



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



VALIDACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO TIPO BOUSSINESQ PARA EL ESTUDIO DE WAKE WAVES Y SU APLICACIÓN EN LA BAHÍA DE ALGECIRAS

Trabajo realizado por:
Héctor Lobeto Alonso

Dirigido:
***Gabriel Díaz Hernández/Raúl Medina
Santamaría***

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Octubre 2016

TRABAJO FINAL DE MASTER

VALIDACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO TIPO BOUSSINESQ PARA EL ESTUDIO DE WAKE WAVES Y SU APLICACIÓN EN LA BAHÍA DE ALGECIRAS

Autor: Héctor LOBETO ALONSO, Trabajo Final de Máster Universitario de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Convocatoria: octubre de 2016.

Dirigido por: Gabriel Díaz Hernández / Raúl Medina Santamaría

Resumen

El oleaje generado por el paso de embarcaciones (o wake waves) ha sido estudiado en el último medio siglo por muchos investigadores. El objetivo perseguido era, no solo la comprensión de este tipo de oleaje, sino también su predicción de forma analítica o, más recientemente, mediante modelos numéricos.

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como propósito fundamental la validación de un modelo numérico basado en las ecuaciones de Boussinesq en su empleo para la predicción de wake waves. Para ello, se emplean tres parámetros multiplicadores, α , β y γ , cada uno de los cuales irá aplicado sobre una dimensión básica del barco, eslora, manga y calado, respectivamente. La validación finalizará con unas leyes generales para la obtención de esos parámetros, aplicables a cualquier barco.

Realizada la validación, se buscará la aplicación del modelo numérico a un emplazamiento particular, la Bahía de Algeciras. No obstante, el número de barcos que entran en este lugar es demasiado grande como para simularlos todos, será necesario, por tanto, desarrollar previamente una metodología que nos permita seleccionar un número reducido de embarcaciones representativas del resto y, dentro de ellas, un número limitado de rutas para simular.

Finalmente, este trabajo concluye con la simulación de un caso real, a partir de los datos obtenidos tras la aplicación de la metodología diseñada para la clasificación de embarcaciones y, mediante el empleo de los coeficientes α , β y γ extraídos de las leyes generales obtenidas tras la validación.

Palabras clave: Wake waves, modelo numérico, Boussinesq, oleaje, embarcación, validación

1. Introducción

El oleaje generado por una embarcación con su movimiento es un factor a tener en cuenta en varias situaciones, por ejemplo, a la hora de estudiar la operatividad de un puerto, o la erosión originada en los márgenes de un río navegable.

La velocidad de movimiento de las embarcaciones, así como su gran tamaño, pueden hacer que, lejos de generar una perturbación imperceptible, produzcan un oleaje que en muchos casos es significativo en comparación con el oleaje generado por viento, y que puede afectar a la actividad humana.

Es en este contexto donde se enmarca este Trabajo de fin de Máster. En él, basándonos en la aplicación de un modelo numérico tipo Boussinesq, buscamos la obtención de unas leyes generales para el cálculo de unos coeficientes de calibración, de forma que estos

permitan la simulación del oleaje producido por cualquier embarcación

2. Generación numérica del oleaje por paso de embarcaciones

Descripción del modelo numérico IH-Boussinesq

Es un modelo numérico que permite, a través de una perturbación generada en la superficie libre por un elemento de geometría conocida, el análisis del oleaje generado por el paso de embarcaciones en un entorno de batimetría también conocida.

En términos generales, los principales inputs a introducir en el modelo numérico son:

Geometría del dominio de simulación: El tamaño del dominio donde se lleva a cabo la simulación vendrá condicionado por dos factores: Dimensiones globales (en metros) y el

tamaño de celda. A partir de estos datos obtenemos el tamaño del dominio en unidades de malla:

$$N = \frac{Anchura_{Total}}{D_Y} \quad M = \frac{Longitud_{Total}}{D_X}$$

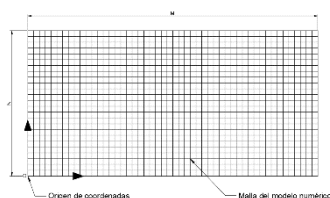


Figura 1 geometría del dominio

Tiempo de simulación: Resultará necesario establecer el tiempo de simulación y el intervalo de tiempo para el cual se obtienen resultados.

Batimetría: Para definir la batimetría tenemos tres opciones:

- Archivo con la batimetría del lugar de estudio
- Fondo constante
- Fondo con pendiente constante

Espojas: Permiten absorber el oleaje generado por la perturbación, evitando el efecto de reflexión.

Sensores de medición: Permite la colocación de tantos como resulte necesario. Las coordenadas de cada sensor serán fijadas en unidades de malla.

Implementación del movimiento del barco en el modelo

El movimiento del barco en el modelo es representado a través de una perturbación producida por un elemento cuyas dimensiones quedarán definidas por las características geométricas principales de la embarcación, esto es, eslora, manga y calado.

No obstante, es también necesario el establecimiento de la posición y de la velocidad de desplazamiento del barco. El movimiento quedará definido a través de dos polinomios de grado 10, el primero de ellos representa la variación de la posición X (longitud) en función del tiempo, mientras que el segundo representa la variación de la posición Y (latitud) con respecto del tiempo.

Para la completa definición del movimiento de la embarcación, se considerará la intervención de tres factores: alpha, beta y gamma, actuando, cada uno de ellos, como factor multiplicador de la eslora, la manga y el calado del barco respectivamente, dando lugar a una geometría corregida.

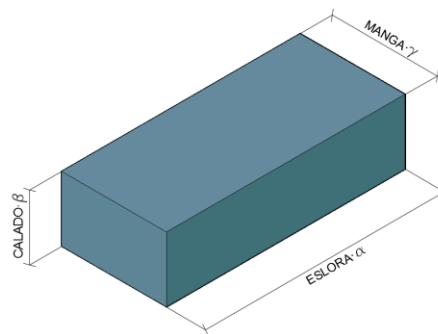


Figura 2 geometría corregida

Validación del modelo

La validación del modelo numérico se llevará a cabo haciendo uso de los resultados obtenidos en seis estudios diferentes. Quedan recogidos en la siguiente tabla:

Caso	Autor/es	Tipo de exp.	Fn_h
1	Abdul Ghani et al.	Ensayo de laboratorio	0,60-1,20
2	Shiotani, S.	Ensayo de campo	0,30-0,40
3	Johnson, J.W.	Ensayo de laboratorio	0,80-1,20
4	All American Marine Incorporated	Ensayo de campo	0,62-1,55
5	Nece et al.	Ensayo de campo	0,25-0,30
6	Varyani, K.S.	Híbrido	0,42-1,11

Para cada uno de los casos a calibrar se extrae la siguiente información:

- Ficha resumen con los principales datos del experimento y del modelo, así como los resultados más significativos.
- Descripción del ensayo realizado.
- Diseño del dominio introducido en el modelo numérico / datos necesarios para la implementación del movimiento del barco.
- Resultados obtenidos de la calibración.

Se muestran a continuación un ejemplo de resultados obtenidos en la calibración:

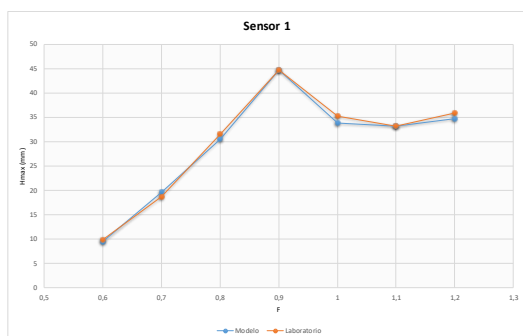


Gráfico 1 Gráfico 1 Caso calibración nº1 – Sensor 1 (0,80 m)

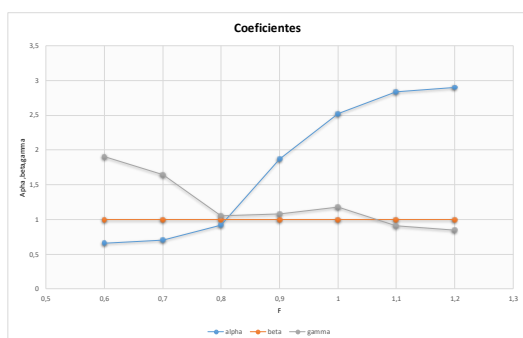


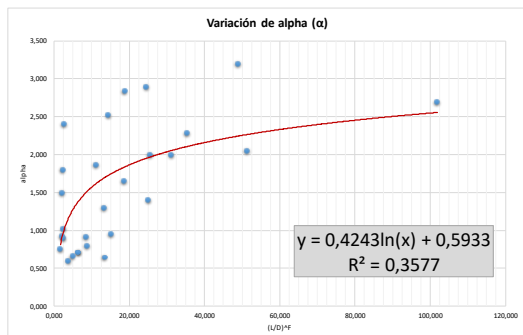
Gráfico 2 Caso calibración nº1 – Coeficientes de calibración

Parametrización de los factores alpha, beta y gamma

Una vez finalizada la validación de los experimentos indicados, el objetivo que se persigue es poner en conjunto los resultados obtenidos para conseguir alcanzar una ley global, aplicable a cualquier embarcación conocidas las características geométricas del mismo, su patrón de movimiento y la batimetría en la que se mueve.

Factor Alpha

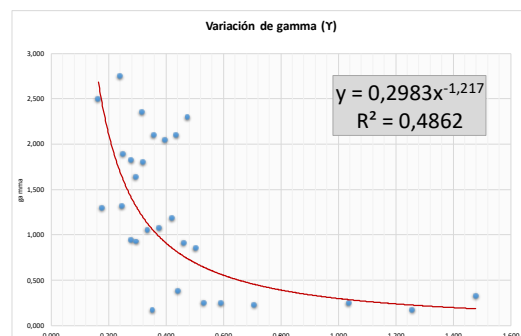
La ley general obtenida para el parámetro alpha fue la siguiente:



$$\alpha = 0,4243 \cdot \log \frac{L}{D} \cdot F^{n_h} + 0,5933$$

Factor gamma

La ley general obtenida para el parámetro gamma fue la siguiente:



$$\gamma = 0,2983 \cdot F^{n_l} \cdot L^{-1,217}$$

Conclusiones

Principales conclusiones extraídas de la validación:

- Es coeficiente alpha tiene una tendencia siempre creciente.
- El coeficiente gamma tiene una tendencia siempre decreciente.
- Se obtienen resultados más limpios para un $F^{n_h} > 0,60$.

3. Post-proceso de la base de datos AIS

El presente apartado tiene como objeto describir la metodología diseñada para la selección de los casos de simulación que, posteriormente, se introducirán en el modelo numérico.

Descripción de la metodología

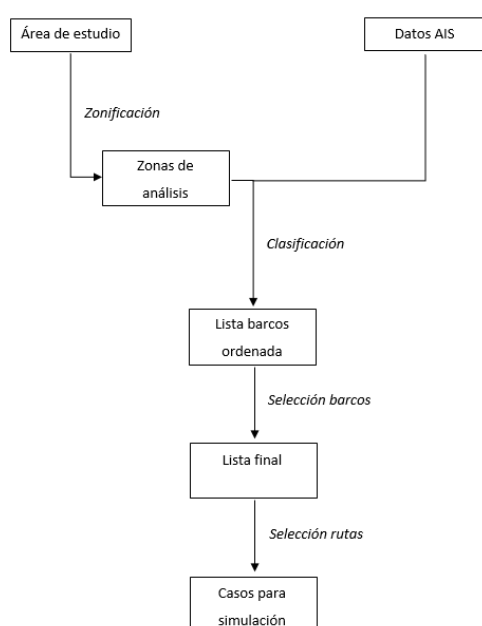
Podemos dividir el proceso en los siguientes pasos:

- **Zonificación:** División del área de estudio en zonas más pequeñas
- **Clasificación:** Ordenación del conjunto de embarcaciones de acuerdo a



- diferentes criterios, partiendo de los datos AIS y de las zonas obtenidas.
- Selección de barcos: Selección de un número reducido de embarcaciones partiendo de la clasificación obtenida en el apartado anterior.
- Selección de rutas: Identificación de aquella/s rutas más significativas de los buques seleccionados y la extracción de los datos necesarios para la simulación.

El esquema general de la metodología es el siguiente:



Datos extraídos para simulación

Una vez elegidas las rutas que se simularán, será necesario generar los datos para dicha simulación. De cada ruta se proporcionarán la siguiente información:

- Latitud y longitud.
- Tiempo relativo, con tiempo 0 en el evento de inicio de la ruta.
- Fecha de cada evento.
- Coeficientes de ajuste de dos polinomios de grado 10, tiempo relativo-Latitud y tiempo relativo-longitud
- Nombre, eslora, calado y manga.
- Gráfico que refleje la evolución de la distancia del barco al centro de cada zona con el tiempo.

- Gráfico que represente la evolución de la velocidad con el tiempo.
- Mapa en el que se refleje la trayectoria con una graduación de colores en función de la velocidad que tiene el barco en ese punto
- Fotografías del barco

4. Aplicación del modelo a un caso real

Se simulará una de las rutas de entrada de un barco en la zona de estudio. Posteriormente, una vez obtenidos los resultados del modelo numérico, se compararán con los obtenidos en el registro del sensor instalado por la Autoridad Portuaria.

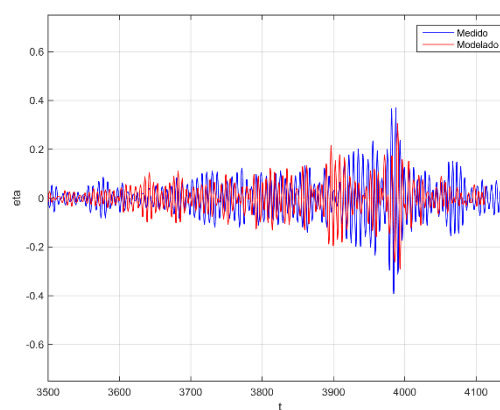


Gráfico 3 Comparación de superficie libre

5. Conclusiones generales

- Los resultados obtenidos en la simulación dan muestra de que el modelo numérico tipo Boussinesq permite simular de forma aceptable el oleaje producido por el paso de embarcaciones.

- En general, el modelo numérico subestima el valor del oleaje real medido en el sensor.

- Las fórmulas obtenidas para el cálculo de los factores alpha y gamma, hacen posible el empleo del modelo para cualquier batimetría y para cualquier embarcación

- La totalidad de barcos que entran operan en un emplazamiento, como puede ser la Bahía de Algeciras, pueden ser representados a partir de un número limitado de casos, mediante el tratamiento de la información procedente de la base de datos AIS según la metodología descrita

VALIDATION OF A BOUSSINESQ-TYPE NUMERICAL MODEL FOR THE STUDY OF WAKE WAVES AND ITS APPLICATION TO ALGECIRA'S BAY

Author: Héctor LOBETO ALONSO, Master's Degree final Project. Date: October 2016.

Guided by: Gabriel Díaz Hernández / Raúl Medina Santamaría

Summary

The waves generated by passing vessels (or wake waves) has been studied in the past half century by many researchers. The objective was not only an understanding of this type of wave, but also his prediction analytically or, more recently, using numerical models.

This Master's Degree final project has the main aim of validating a Boussinesq-type numerical model in its use to the prediction of wake waves. For that purpose, three multiplier factors will be used, alpha, beta and gamma, each of which will be applied to a basic dimension of the ship, length, beam and draft, respectively. Validation ends with a general law that will allow us to obtain those parameters independently of the ship.

Realized validation, application of the numerical model to a particular location be sought, the Bay of Algeciras. However, the number of ships entering this place is too big to simulate all, it is necessary, therefore, previously developed a methodology that allows us to select a small number of boats representing the remaining number and, within these, a number limited to simulate routes.

Finally, this paper concludes with a simulation of a real case, from the data obtained after the application of the methodology designed for the classification of ships and, by using the alpha coefficients, beta and gamma extracted from the general laws obtained after validation.

Key words: Wake waves, numerical model, Boussinesq, waves, ship, vessel, validation, calibration,

Kelvin

1. Introduction

Waves generated by a boat with his movement is a factor to consider in various situations, for example, when studying the operation of a port or erosion originated in the margins of a navigable river.

The speed of movement of ships, as well as its large size, can make, far from generating an imperceptible disturbance, a wave which in many cases is significant compared to the waves generated by wind, and that can affect the human activity.

It is in this context that this work fits. In it, based on the application of a Boussinesq-type numerical model, we seek to obtain general laws for calculating calibration coefficients, so that they allow the simulation of waves produced by passing vessels.

2. Numerical simulation of wake waves

Description of the numerical model

It is a numerical model that allows, through a disturbance on the free surface generated by an element of known geometry, the analysis of the wake waves in an environment which bathymetry is also known.

Generally speaking, the main inputs to introduce into the numerical model are:

Domain geometry: The size of the domain where the simulation performed will be conditioned by two factors: Overall dimensions (in meters) and the cell size. From these data we obtain domain size in mesh units:

$$N = \frac{Anchura_{Total}}{D_Y} \quad M = \frac{Longitud_{Total}}{D_X}$$

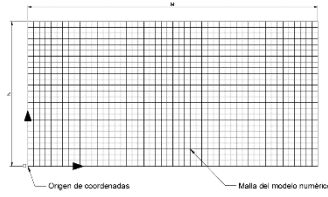


Figura 1 Domain's geometry

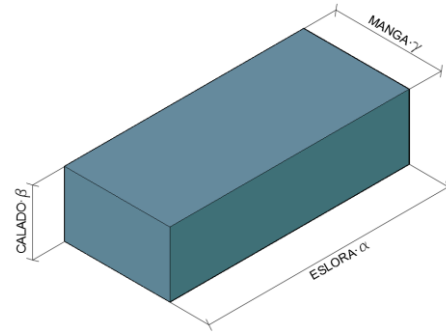


Figura 2 Corrected geometry

Simulation time: It is necessary to establish the simulation time and the time interval for which results are obtained.

Bathymetry: To define the bathymetry we have three options:

- A file with the bathymetry data
- Constant depth
- Constant slope

Sponges: They allow to absorb wake waves, avoiding the effect of reflexion in the walls.

Measurement gauges: It allows the placement of as many as necessary. The coordinates of each sensor will be fixed in units of mesh

Ship movement implementation

The movement of the ship in the model is represented by a disturbance caused by an element whose dimensions will be defined by the main geometric characteristics of the vessel, ie, length, width and depth.

However, it is also necessary to establish position and speed of movement of the boat. The movement will be defined through two polynomials of degree 10, the first of which represents the variation of the X position (length) in function of time, while the second represents the variation of the Y position (latitude) with respect to time.

For the complete definition of the movement of the vessel shall be considered the intervention of three factors: alpha, beta and gamma, acting, each of them, as a multiplier factor of length, breadth and draft of the ship respectively, resulting in a corrected geometry.

Model validation

Numerical model validation is carried out using the results obtained in six different studies. They are listed in the following table:

Case	Author/s	Exp. Type	Fn_h
1	Abdul Ghani et al.	Laboratory	0,60-1,20
2	Shiotani, S.	Field	0,30-0,40
3	Johnson, J.W.	Laboratory	0,80-1,20
4	All American Marine Incorporated	Field	0,62-1,55
5	Nece et al.	Field	0,25-0,30
6	Varyani, K.S.	Hybrid	0,42-1,11

For each of the cases to calibrate the following information is extracted:

- Summary of the main experiment data and model sheet, and the most significant results.
- Description of the trial.
- Design of the domain entered in the numerical model / data necessary for the implementation of the movement of the ship.
- Results obtained calibration

An example of the results extracted is shown:

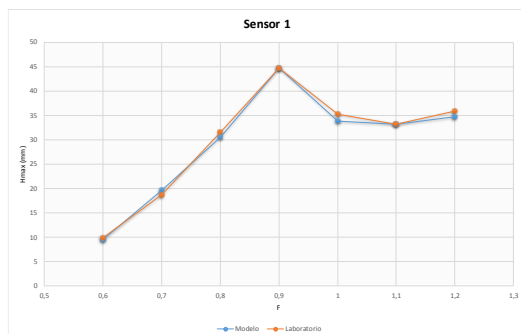


Gráfico 1 Gráfico 1 Caso calibración nº1 – Sensor 1 (0,80 m)

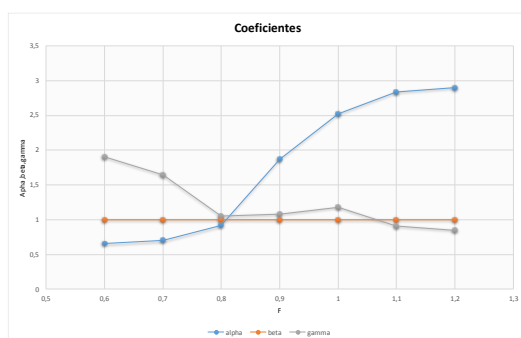


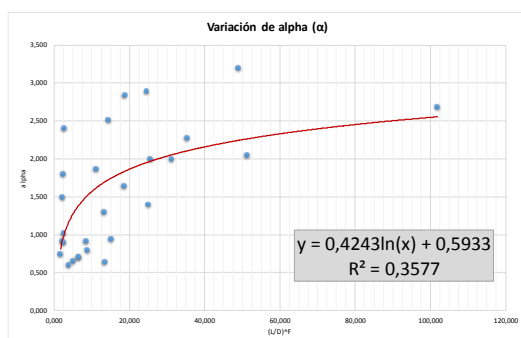
Gráfico 2 Caso calibración nº1 – Coeficientes de calibración

Alpha, beta and gamma parametrization

Once the validation is finished, the objective pursued is to put together the results to help reach a comprehensive law applicable to any vessel known its geometric characteristics, its pattern of movement and bathymetry in which it moves.

Alpha

The general law obtained for alpha was:

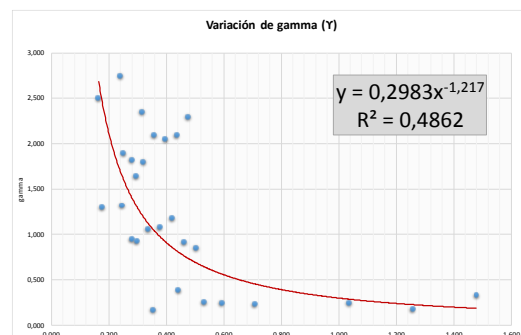


$$\alpha = 0,4243 \cdot \log \frac{L}{D} + 0,5933$$

Gamma

The general law obtained for gamma was:

$$\gamma = 0,2983 \cdot Fn_L^{-1,217}$$



Conclusions

Main conclusion extracted from the validation process:

- Alpha coefficient is always growing.
- Gamma coefficient is always decreasing.
- Clear results are obtained for $Fn_h > 0,60$.

3. Post-proceso de la base de datos AIS

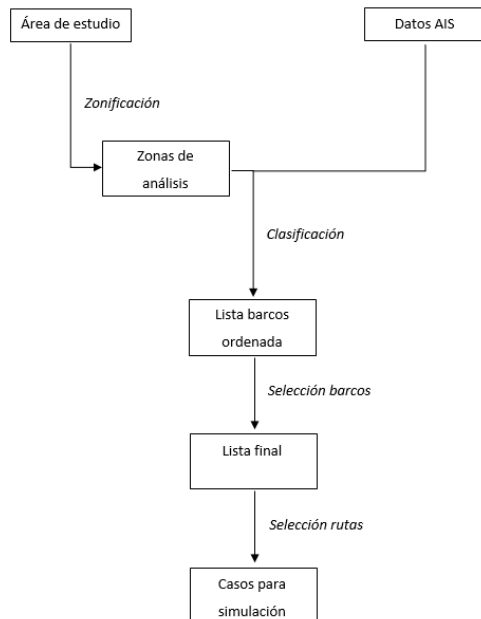
The main objective of this section is to describe the methodology designed for the selection of the cases that will be simulated.

Description of the methodology

We can divide the process in these parts:

- Zoning: Division of the area of study in smaller parts.
- Classification: Sort ships by different criteria, starting from AIS data and the zones obtained previously.
- Ship selection: Selection of a small number of ships starting from the classification obtained previously.
- Route selection: Identification of those routes more significant and the extraction of the data needed for the simulation:

The general scheme of the methodology is the following:



Scheme 1 General scheme of the methodology

Data extracted for simulation

After choosing the routes that will be simulated, it will be necessary to generate the data for this simulation. Each route provide the following information:

- Latitude and longitude
- Relative time, starting time is the initial event of the route.
- Date of each event
- Adjustment coefficients of two tenth degree polynomials, relative time-latitude, relative time-longitude
- Name, length, beam and draft
- Plot representing evolution of the distance to the centre of a zone against time
- Plot representing speed against time
- Map representing the trajectory with a colour bar depending of the speed
- Ship photos

4. Application of the model to an actual case

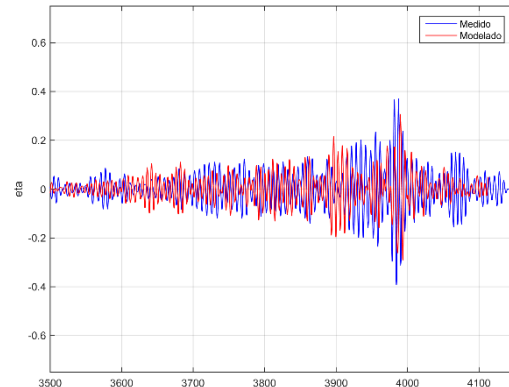


Gráfico 3 Free Surface comparison

It will simulate one of the routes of entry of a boat in the study area. Subsequently, once obtained the results of the numerical model are compared with those obtained in the record of sensor installed by the Port Authority.

5. General conclusions

- Results obtained in the simulation show that Boussinesq-type numerical model allow us to simulate acceptably wake waves produced by passing ships.
- In general, the numerical model underestimates the actual values obtained in the gauge.
- Formulas obtained for the calculation of alpha, beta and gamma, make it possible to use the model in any bathymetry and with any ship.
- All vessels that operate in an emplacement could be represented by a small number of cases using the methodology described in this paper.

3 DE OCTUBRE DE 2016



VALIDACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO TIPO BOUSSINESQ PARA EL ESTUDIO DE WAKE WAVES Y SU APLICACIÓN EN LA BAHÍA DE ALGECIRAS

HÉCTOR LOBETO ALONSO

Dirigido por:

Gabriel Díaz Hernández
Raúl Medina Santamaría



Agradecimientos

Quiero mostrar mi agradecimiento a todos los que me han ayudado a sacar adelante este proyecto. Pero especialmente:

Al profesor Raúl Medina, por haberme dado la oportunidad de hacer este trabajo, así como por haberme prestado ayuda cada vez que la he necesitado.

A Gabo, por haberme guiado y aconsejado a lo largo de todo este proyecto, además de haberme ayudado siempre que se lo he pedido.

Índice

Resumen	15
1. Introducción y objetivos	16
2. Estado del arte sobre el oleaje generado por el paso de embarcaciones ..	17
<i>Procesos y su observación en laboratorio.....</i>	<i>17</i>
Formación del oleaje por el paso de embarcaciones	17
Oleaje generado en aguas profundas	18
Oleaje generado en aguas someras	20
<i>Mediciones de laboratorio y campo.....</i>	<i>21</i>
Mediciones de laboratorio	21
Mediciones de campo	26
<i>Ensayos numéricos</i>	<i>29</i>
Introducción	29
Análisis del oleaje con modelos numéricos	29
<i>Aproximación analítica</i>	<i>31</i>
Kriebel et al., (2001)	31
Sireli, E.M., (2002).....	33
3. Generación numérica del oleaje por paso de embarcaciones	34
<i>Descripción del modelo numérico IH-Boussinesq</i>	<i>34</i>
Descripción general.....	34
Geometría del dominio de simulación	35
Tiempo de simulación	36
Batimetría	36
Esponjas.....	36
Sensores de medición.....	37
<i>Implementación del movimiento del barco en el modelo.....</i>	<i>37</i>
Caracterización básica del movimiento	37
Factores alpha, beta y gamma	38
<i>Validación del modelo.....</i>	<i>40</i>
Descripción de los datos de validación.....	40
Calibración - Caso nº 1.....	41
Calibración - Caso nº2	64
Calibración - Caso nº3	84
Calibración - Caso nº 4.....	108

Calibración – Caso nº5	130
Calibración - Caso nº 6.....	146
<i>Parametrización de los factores alpha, beta y gamma</i>	<i>167</i>
Planteamiento	167
Factor alpha.....	167
Factor gamma.....	169
<i>Conclusiones.....</i>	<i>172</i>
4. Post-proceso de la base de datos AIS.....	173
<i>Introducción</i>	<i>173</i>
<i>Objetivos</i>	<i>173</i>
<i>Descripción de la metodología.....</i>	<i>174</i>
Introducción.....	174
Datos de partida	175
Zonificación	176
Clasificación de barcos	178
Selección de barcos.....	187
Selección de rutas	191
<i>Resultados.....</i>	<i>201</i>
Análisis global	201
Análisis espacial – Número de eventos	202
Análisis espacial – Número de entradas.....	204
Análisis de las características de las embarcaciones - Eslora.....	205
Análisis de las características de las embarcaciones – Calado.....	207
Selección de barcos.....	208
Selección de rutas - Selección de barcos con rutas a simular	210
Selección rutas – Casos para simulación	214
5. Aplicación del modelo a un caso real.....	216
<i>Introducción</i>	<i>216</i>
<i>Filtrado de los datos de campo</i>	<i>216</i>
Metodología.....	216
Caso particular a simular	219
<i>Diseño del dominio.....</i>	<i>221</i>
Batimetría	221
Geometría del dominio.....	222
Ubicación de los sensores.....	222



<i>Ejecución</i>	<i>223</i>
Embarcación a simular	223
Coeficientes alpha, beta y gamma	223
<i>Resultados y validación con datos instrumentales</i>	<i>224</i>
Resultados.....	224
Validación con datos instrumentales	226
<i>Conclusiones.....</i>	<i>229</i>
6. Conclusiones generales	230
7. Futuras líneas de investigación	231
8. Referencias.....	232
Anejo 1 - Fichas de calibración.....	234
Anejo 2- Scripts.....	240



Listado de esquemas

Esquema 1 Esquema general del modelo numérico	34
Esquema 2 Implementación movimiento barco.....	40
Esquema 3 Esquema general de la metodología de selección	175
Esquema 4 Proceso de Zonificación	177
Esquema 5 Diagrama de flujo de NbarcosZona.m.....	179
Esquema 6 Diagrama de flujo de Eventos.m.....	181
Esquema 7 Diagrama de flujo de CuentaRutas.m.....	184
Esquema 8 Análisis de las características de las embarcaciones	186
Esquema 9 Clasificación de barcos.....	187
Esquema 10 Análisis de la Selección de Barcos	190
Esquema 11 Diagrama de flujo de Tipos.m.....	193
Esquema 12 Diagrama de flujo de Rutas.m	196
Esquema 13 Diagrama de flujo de RepresentacionRutas.m	198
Esquema 14 Diagrama de flujo de FicheroMAT.m.....	199

Listado de tablas

Tabla 1 Datos para realizar la calibración	41
Tabla 2 Velocidades y números de Froude estudiados (Abdull Ghani et al., 2006).....	41
Tabla 3 Características del tanque (Abdul Ghani et al., 2006)	42
Tabla 4 Ubicación de los sensores (Abdul Ghani et al, 2006).....	42
Tabla 5 Características de la embarcación empleada (Abdul Ghani et al, 2006)	43
Tabla 6 Caso calibración nº1 - Características del dominio de simulación	45
Tabla 7 Caso calibración nº1 - Ubicación sensores en el dominio	45
Tabla 8 Caso calibración nº1 - Velocidades contempladas en la simulación	46
Tabla 9 Caso calibración nº1 – Sensor 1 (0,80 m).....	46
Tabla 10 Caso calibración nº1 – Sensor 2 (1,00 m).....	47
Tabla 11 Caso calibración nº1 – Sensor 3 (1,20 m)	48
Tabla 12 Caso calibración nº1 – Sensor 4 (1,40 m)	49
Tabla 13 Caso calibración nº1 – Coeficientes de calibración	49
Tabla 14 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,600	52
Tabla 15 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,700	55
Tabla 16 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,800	56
Tabla 17 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,900	58
Tabla 18 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,000	60
Tabla 19 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,100	62
Tabla 20 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,200	63
Tabla 21 Tipo de barcos empleados en el experimento (Shiotani, 2010)	65
Tabla 22 Caso calibración nº2 - Características del barco a simular	68
Tabla 23 Caso calibración nº2 - Características del dominio de simulación	71
Tabla 24 Caso calibración nº2 - Ubicación sensores en el dominio	73
Tabla 25 Caso calibración nº2 - Velocidades contempladas en la simulación	73
Tabla 26 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (25 m).....	74
Tabla 27 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (75 m).....	75
Tabla 28 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (125 m).....	75
Tabla 29 Caso calibración nº2 – Coeficientes de calibración	75
Tabla 30 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,300	80
Tabla 31 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,350	81
Tabla 32 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,400	83
Tabla 33 Ubicación de los sensores (Johnson, 1957)	85
Tabla 34 Caso calibración nº3 - Características del barco a simular	86
Tabla 35 Caso calibración nº3 - Características del dominio de simulación	90
Tabla 36 Caso calibración nº3 - Ubicación sensores en el dominio	91
Tabla 37 Caso calibración nº3 - Velocidades contempladas en la simulación	92
Tabla 38 Caso calibración nº3 – Sensor 1 (0,457 m)	92
Tabla 39 Caso calibración nº3 – Sensor 2 (0,914 m)	93
Tabla 40 Caso calibración nº3 – Sensor 3 (1,524 m)	94
Tabla 41 Caso calibración nº3 – Sensor 4 (2,438 m)	94
Tabla 42 Caso calibración nº3 – Sensor 5 (3,353 m)	95
Tabla 43 Caso calibración nº3 – Coeficientes de calibración	95
Tabla 44 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=0,800	101
Tabla 45 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=0,900	102
Tabla 46 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=1,000	104

Tabla 47 Caso calibración nº3 – Total ensayos $F=1,100$	105
Tabla 48 Caso calibración nº3 – Total ensayos $F=1,200$	107
Tabla 49 Caso calibración nº4 - Características del barco a simular	110
Tabla 50 Ensayos realizados (All Marine Incorporated, 2002)	112
Tabla 51 Caso calibración nº4 - Resultados del ajuste	114
Tabla 52 Caso calibración nº4 - Características del dominio de simulación	115
Tabla 53 Caso calibración nº4 - Ubicación sensores en el dominio	116
Tabla 54 Caso calibración nº4 - Velocidades contempladas en la simulación	117
Tabla 55 Caso calibración nº4 – Sensor 1 (130 m)	118
Tabla 56 Caso calibración nº4 – Sensor 2 (160 m)	119
Tabla 57 Caso calibración nº4 – Sensor 3 (190 m)	119
Tabla 58 Caso calibración nº4 – Coeficientes de calibración	120
Tabla 59 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=0,620$	124
Tabla 60 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=1,080$	126
Tabla 61 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=1,320$	128
Tabla 62 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=1,550$	129
Tabla 63 Barcos empleados en el estudio (Nece et al., 1985)	130
Tabla 64 Caso calibración nº5 - Características del barco a simular	133
Tabla 65 Caso calibración nº5 - Características del dominio de simulación	136
Tabla 66 Caso calibración nº5 - Ubicación sensores en el dominio	137
Tabla 67 Caso calibración nº5 - Velocidades contempladas en la simulación	137
Tabla 68 Caso calibración nº5 – Sensor 1 (91,44 m)	138
Tabla 69 Caso calibración nº5 – Sensor 2 (182,88 m)	139
Tabla 70 Caso calibración nº5 – Sensor 3 (365,76 m)	140
Tabla 71 Caso calibración nº5 – Coeficientes de calibración	140
Tabla 72 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,169$	142
Tabla 73 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,253$	143
Tabla 74 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,287$	144
Tabla 75 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,304$	145
Tabla 76 Profundidades en diferentes puntos (Varyani, 2005)	147
Tabla 77 Distancias de medición (Varyani, 2005)	149
Tabla 78 Caso calibración nº6 - Características del barco a simular	149
Tabla 79 Velocidades de pasada en cada segmento (Varyani, 2005)	150
Tabla 80 Caso calibración nº6 - Características del dominio de simulación	152
Tabla 81 Caso calibración nº6 - Tamaño de malla	152
Tabla 82 Caso calibración nº6 - Tamaño de las esponjas	152
Tabla 83 Caso calibración nº6 - Ubicación sensores en el dominio en los casos 1, 2 y 4	154
Tabla 84 Ubicación sensores en el dominio en los casos 1, 2 y 4	155
Tabla 85 Caso calibración nº6 - Velocidades contempladas en la simulación	155
Tabla 86 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (150 m)	156
Tabla 87 Caso calibración nº6 – Sensor 2 (200 m)	157
Tabla 88 Caso calibración nº6 – Sensor 3 (300 m)	157
Tabla 89 Caso calibración nº6 – Sensor 4 (400 m)	158
Tabla 90 Caso calibración nº6 – Coeficientes de calibración	158
Tabla 91 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,424$	161
Tabla 92 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,700$	163
Tabla 93 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,833$	164
Tabla 94 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,875$	165



Tabla 95 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=1,111$	166
Tabla 96 Pesos en función del número de eventos	187
Tabla 97 Pesos en función del número de entradas en la Zona correspondiente	188
Tabla 98 Pesos en función de la eslora	188
Tabla 99 Pesos en función del tipo de embarcación	188
Tabla 100 Número de eventos.....	203
Tabla 101 Número de entradas	205
Tabla 102 Clasificación por tamaño eslora	206
Tabla 103 Clasificación por calado	208
Tabla 104 Características del dominio para la simulación del caso real	222
Tabla 105 Características geométricas del barco a simular	223
Tabla 106 Parámetros a introducir en el modelo para el caso real	224
Tabla 107 Comparación altura de ola medido vs. Modelo	228
Tabla 108 Comparación periodo medido vs. Modelo	229

Listado de gráficos

Gráfico 1 Caso calibración nº1 – Sensor 1 (0,80 m)	46
Gráfico 2 Caso calibración nº1 – Sensor 2 (1,00 m)	47
Gráfico 3 Caso calibración nº1 – Sensor 3 (1,20 m)	48
Gráfico 4 Caso calibración nº1 – Sensor 4 (1,40 m)	49
Gráfico 5 Caso calibración nº1 – Coeficientes de calibración	50
Gráfico 6 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,600	51
Gráfico 7 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,700	53
Gráfico 8 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,800	55
Gráfico 9 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,900	57
Gráfico 10 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,000	59
Gráfico 11 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,100	61
Gráfico 12 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,200	62
Gráfico 13 Caso calibración nº 2 - Ajuste obtenido para una distancia entre 100 y 200 metros	70
Gráfico 14 Gráfico 13 Caso calibración nº 2 - Ajuste obtenido para una distancia entre 50 y 100 metros.....	70
Gráfico 15 Caso calibración nº 2 - Ajuste obtenido para una distancia entre 0 y 50 metros	70
Gráfico 16 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (25 m)	74
Gráfico 17 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (75 m)	74
Gráfico 18 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (125 m)	75
Gráfico 19 Caso calibración nº2 – Coeficientes de calibración	76
Gráfico 20 Caso calibración nº 2 – Volcado de resultados para una distancia entre 0 y 50 metros	76
Gráfico 21 Caso calibración nº 2 – Volcado de resultados para una distancia entre 50 y 100 metros.....	77
Gráfico 22 Caso calibración nº 2 – Volcado de resultados para una distancia entre 100 y 150 metros.....	77
Gráfico 23 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,300	79
Gráfico 24 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,350	80
Gráfico 25 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,400	82
Gráfico 26 Caso calibración nº 3 - Ajuste obtenido para una distancia de 1,5 pies.....	87
Gráfico 27 Caso calibración nº 3 - Ajuste obtenido para una distancia de 8,0 pies.....	88
Gráfico 28 Caso calibración nº 3 - Ajuste obtenido para una distancia de 5,0 pies.....	88
Gráfico 29 Caso calibración nº 3 - Ajuste obtenido para una distancia de 3,0 pies.....	88
Gráfico 30 Caso calibración nº 3 - Ajuste obtenido para una distancia de 11,0 pies.....	89
Gráfico 31 Caso calibración nº3 – Sensor 1 (0,457 m)	92
Gráfico 32 Caso calibración nº3 – Sensor 2 (0,914 m)	93
Gráfico 33 Caso calibración nº3 – Sensor 3 (1,524 m)	93
Gráfico 34 Caso calibración nº3 – Sensor 4 (2,438 m)	94
Gráfico 35 Caso calibración nº3 – Sensor 5 (3,353 m)	95
Gráfico 36 Caso calibración nº3 – Coeficientes de calibración	96
Gráfico 37 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 0,457 metros	96
Gráfico 38 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 0,914 metros	97
Gráfico 39 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 1,524 metros	97

Gráfico 40 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 2,438 metros	98
Gráfico 41 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 3,353metros	98
Gráfico 42 Caso calibración nº3 – Total ensayos $F=0,800$	100
Gráfico 43 Caso calibración nº3 – Total ensayos $F=0,900$	102
Gráfico 44 Caso calibración nº3 – Total ensayos $F=1,000$	103
Gráfico 45 Caso calibración nº3 – Total ensayos $F=1,100$	104
Gráfico 46 Caso calibración nº3 – Total ensayos $F=1,200$	106
Gráfico 47 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=0,620$	112
Gráfico 48 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=1,080$	113
Gráfico 49 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=1,320$	113
Gráfico 50 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=1,550$	114
Gráfico 51 Caso calibración nº4 – Resultados del ajuste F vs. H	114
Gráfico 52 Caso calibración nº4 – Sensor 1 (130 m)	118
Gráfico 53 Caso calibración nº4 – Sensor 2 (160 m)	118
Gráfico 54 Caso calibración nº4 – Sensor 3 (190 m)	119
Gráfico 55 Caso calibración nº4 – Coeficientes de calibración	120
Gráfico 56 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para $F=0,620$	121
Gráfico 57 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para $F=1,080$	121
Gráfico 58 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para $F=1,320$	122
Gráfico 59 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para $F=1,550$	122
Gráfico 60 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=0,620$	124
Gráfico 61 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=1,080$	125
Gráfico 62 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=1,320$	127
Gráfico 63 Caso calibración nº4 – Total ensayos $F=1,550$	128
Gráfico 64 Caso calibración nº5 – Sensor 1 (91,44 m)	138
Gráfico 65 Caso calibración nº5 – Sensor 2 (182,88 m).....	139
Gráfico 66 Caso calibración nº5 – Sensor 3 (365,76 m).....	139
Gráfico 67 Caso calibración nº5 – Coeficientes de calibración	140
Gráfico 68 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,169$	142
Gráfico 69 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,253$	143
Gráfico 70 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,287$	144
Gráfico 71 Caso calibración nº5 – Total ensayos $F=0,304$	145
Gráfico 72 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (150 m)	156
Gráfico 73 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (200 m)	156
Gráfico 74 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (300 m)	157
Gráfico 75 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (400 m)	158
Gráfico 76 Caso calibración nº6 – Coeficientes de calibración	159
Gráfico 77 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,424$	160
Gráfico 78 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,700$	162
Gráfico 79 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,833$	163
Gráfico 80 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,875$	164
Gráfico 81 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=1,111$	165
Gráfico 82 Parametrización de α , Fn_h vs. L/D	168
Gráfico 83 Parametrización de α , ajuste final	169
Gráfico 84 parametrización de γ , Fn_h vs. L/D	170
Gráfico 85 Parametrización de γ , ajuste 1	170



Gráfico 86 Parametrización de gamma, ajuste final	171
Gráfico 87 Porcentaje de barcos en cada zona.....	201
Gráfico 88 Número de barcos en cada zona	202
Gráfico 89 Número de barcos por tipo.....	210
Gráfico 90 Número de casos por tipología.....	215
Gráfico 91 Registro de superficie libre obtenido en el modelo (I)	224
Gráfico 92 Pulso generado por el paso del barco	225
Gráfico 93 Periodos pertenecientes al oleaje modelado.....	226
Gráfico 94 Comparativa entre la variación de la superficie libre en el sensor y en el modelo (II)	227
Gráfico 95 Comparativa entre la variación de la superficie libre en el sensor y en el modelo (I)	227
Gráfico 96 Comparativa periodos modelo vs. medido	228

Listado de figuras

Figura 1 Oleaje tipo generado por el paso de una embarcación	17
Figura 2 Sistema de oleaje según la teoría de kelvin	18
Figura 3 Registros del oleaje producido por el paso de una embarcación en aguas profundas	19
Figura 4 Super-critical speed range	21
Figura 5 Modelo a escala monocasco (Fakulti, 2006)	22
Figura 6 Modelo a escala tipo catamarán (L. J. Doctors, 2010).....	22
Figura 7 Sistema de poleas empleado para el movimiento del barco (Fuente: Johnson 1957).	23
Figura 8 Australian Maritime College (AMC).....	23
Figura 9 Ferry (Fuente: R.E. Nece et. al, 2005)	26
Figura 10 Remolcador (Fuente: S. Shiotani, 2010).....	27
Figura 11 Modelado numérico (I)	30
Figura 12 Modelado numérico (II).....	30
Figura 13 Modelado numérico (III).....	31
Figura 14 Formulación de Kriebel et al. (Fuente: Abdul Ghani et al., 2006)	31
Figura 15 Ajuste propuesto por Kriebel et al. (2001)	32
Figura 16 Geometría global del dominio de simulación	35
Figura 17 Esponjas en el modelo numérico	36
Figura 18 Ejemplo ubicación de un sensor.....	37
Figura 19 Elemento teórico generador de la perturbación	38
Figura 20 Elemento corregido generador de la perturbación	39
Figura 21 Disposición de los sensores en el tanque (Abdul Ghani et al, 2006)	43
Figura 22 Resultados presentado en el documento original (Abdul Ghani et al, 2006).....	44
Figura 23 Caso calibración nº1 - Esquema global del contorno en el modelo numérico	45
Figura 24 Caso calibración nº1 - Renderización del modelo - F=0.90.....	50
Figura 25 Caso calibración nº1 - Renderización del modelo - F=1.00.....	51
Figura 26 Localización del experimento (Shiotani, 2010)	64
Figura 27 Ejemplo de remolcador, Ryuoh2 (Shiotani, 2010).....	65
Figura 28 Barco de recreo Mukomaru (Shiotani, 2010)	65
Figura 29 Esquema de medición del oleaje (Shiotani, 2010)	66
Figura 30 Principales características de los remolcadores.....	67
Figura 31 Periodo vs. Velocidad (Shiotani, 2010).....	68
Figura 32 Altura de ola vs. Velocidad (Shiotani, 2010)	68
Figura 33 Periodo vs. Distancia (Shiotani, 2010)	69
Figura 34 Dirección del oleaje vs. Distancia (Shiotani, 2010).....	69
Figura 35 Altura de ola vs. Distancia (Shiotani, 2010)	69
Figura 36 Dirección del oleaje vs. Velocidad (Shiotani, 2010).....	69
Figura 37 Caso calibración nº2 - Esquema global del dominio en el modelo numérico	72
Figura 38 Caso calibración nº2 - Disposición de los sensores	73
Figura 39 Caso calibración nº 2 – Renderización del modelo - F=0.40.....	78
Figura 40 Caso calibración nº 2 – Renderización del modelo - F=0.30.....	78
Figura 41 Sistema para el movimiento de los modelos a escala (Johnson, 1957)	84
Figura 42 Disposición de los sensores en el tanque (Johnson, 1957)	85
Figura 43 Resultados en sensor a 1,5 pies (Johnson, 1957).....	86
Figura 44 Resultados en sensor a 3,0 pies (Johnson, 1957).....	86
Figura 45 Resultados en sensor a 5,0 pies (Johnson, 1957).....	87
Figura 46 Resultados en sensor a 8,0 pies (Johnson, 1957).....	87

Figura 47 Resultados en sensor a 11,0 (Johnson, 1957) pies)	87
Figura 48 Caso calibración nº3 - Esquema global del contorno en el modelo numérico	90
Figura 49 Caso calibración nº3 - Disposición de los sensores	91
Figura 50 Caso calibración nº 3 – Renderización del modelo - $F=0.800$	99
Figura 51 Caso calibración nº 3 – Renderización del modelo - $F=1.000$	99
Figura 52 Ubicación de la Bahía de Bellingham	108
Figura 53 Zona de desarrollo del estudio (All Marine Incorporated, 2002).....	109
Figura 54 Instrumentación empleada para la medida de la altura de ola (All Marine Incorporated, 2002).....	110
Figura 55 Altura de ola vs. Velocidad (All Marine Incorporated, 2002)	111
Figura 56 Registro individual de altura de ola (All Marine Incorporated, 2002)	111
Figura 57 Caso calibración nº4 - Esquema global del dominio en el modelo numérico	116
Figura 58 Caso calibración nº4 - Disposición de los sensores	117
Figura 59 Caso calibración nº 4 – Renderización del modelo - $F=1.08$	123
Figura 60 Caso calibración nº 4 – Renderización del modelo - $F=1.32$	123
Figura 61 Ubicación del Estrecho de Puget	130
Figura 62 Super Class (Nece et al., 1985).....	131
Figura 63 Issaquah Class (Nece et al., 1985)	131
Figura 64 Evergreen State Class (Nece et al., 1985).....	131
Figura 65 Carta náutica de la zona de desarrollo del estudio (Nece et al., 1985)	132
Figura 66 Disposición del sistema de medición (Nece et al., 1985)	133
Figura 67 Velocidad 18 nudos (Nece et al., 1985).....	134
Figura 68 Velocidad 17 nudos (Nece et al., 1985).....	134
Figura 69 Velocidad 10 nudos (Nece et al., 1985).....	134
Figura 70 Velocidad 15 nudos (Nece et al., 1985).....	134
Figura 71 Distancia 600 pies (Nece et al., 1985).....	134
Figura 72 Distancia 300 pies (Nece et al., 1985).....	134
Figura 73 Distancia 1200 pies (Nece et al., 1985)	135
Figura 74 Caso calibración nº5 - Esquema global del dominio en el modelo numérico	136
Figura 75 Caso calibración nº5 - Disposición de los sensores	137
Figura 76 Renderización del modelo - $F=0.253$	141
Figura 77 Renderización del modelo - $F=0.304$	141
Figura 78 Zona de realización del estudio (Varyani, 2005)	146
Figura 79 División en segmentos de la ruta (Varyani, 2005).....	147
Figura 80 Subdivisión de los segmentos A-B y F-G (Varyani, 2005)	148
Figura 81 Segmento A_3B (200 m) (Varyani, 2005).....	150
Figura 82 Segmento BA_3 (200 m) (Varyani, 2005).....	150
Figura 83 Segmento A_3B (400 m) (Varyani, 2005).....	150
Figura 84 Segmento BA_3 (400 m) (Varyani, 2005).....	150
Figura 85 Segmento A_3B (1000 m) (Varyani, 2005).....	151
Figura 86 Segmento BA_3 (1000 m) (Varyani, 2005).....	151
Figura 87 Segmento F_1F_2 (150 m) (Varyani, 2005)	151
Figura 88 Segmento F_2F_1 (150 m) (Varyani, 2005)	151
Figura 89 Segmento F_2F_1 (200 m) (Varyani, 2005)	151
Figura 90 Segmento F_1F_2 (200 m) (Varyani, 2005)	151
Figura 91 Segmento F_2F_1 (300 m) (Varyani, 2005).....	151
Figura 92 Segmento F_1F_2 (300 m) (Varyani, 2005).....	151
Figura 93 Esquema global del contorno en los casos 1, 2 y 4	153



Figura 94 Esquema global del dominio en los casos 3 y 5	153
Figura 95 Disposición de los sensores en los casos 1, 2 y 4	154
Figura 96 Disposición de los sensores en los casos 3 y 5	155
Figura 97 Caso calibración nº6 – Renderización del modelo - $F=0.700$	159
Figura 98 Caso calibración nº6 – Renderización del modelo - $F=0.875$	160
Figura 99 Zonificación del área de estudio	177
Figura 100 Límites de la Bahía a considerar	182
Figura 101 Entrada a la Bahía	183
Figura 102 Rutas de entrada y ángulo de ruta	195
Figura 103 Ejemplo de aplicación de "RepresentacionRutas.m"	197
Figura 104 Distancia al centroide vs. Tiempo	200
Figura 105 Evolución de la velocidad	200
Figura 106 Evolución de la velocidad en el espacio	200
Figura 107 Ajuste del polinomio de grado 10.....	201
Figura 108 Ruta de entrada tipo a.....	210
Figura 109 Ruta de entrada tipo b	211
Figura 110 Ruta de entrada tipo c.....	211
Figura 111 Ruta de entrada tipo d	212
Figura 112 Ruta de entrada tipo e	212
Figura 113 Serie bruta registrada en el sensor	216
Figura 114 Serie sin bajas frecuencias	217
Figura 115 Aislamiento de franjas temporales con presencia de wake waves	217
Figura 116 Espectro wavelet	218
Figura 117 Serie filtrada para el oleaje por paso de embarcaciones	219
Figura 118 Serie filtrada sin bajas frecuencias	219
Figura 119 Serie a simular en el modelo	220
Figura 120 Batimetría de la zona de estudio (1).....	221
Figura 121 Batimetría de la zona de estudio (2).....	221
Figura 122 Situación de los sensores en la Bahía de Algeciras	222

Resumen

El oleaje generado por el paso de embarcaciones (o wake waves) ha sido estudiado en el último medio siglo por muchos investigadores, bien mediante ensayos de campo, o bien mediante ensayos de laboratorio. El objetivo perseguido era, no solo la comprensión de este tipo de oleaje, sino también su predicción de forma analítica o, más recientemente, mediante modelos numéricos.

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como propósito fundamental la validación de un modelo numérico basado en las ecuaciones de Boussinesq, concretamente el IH-Boussinesq, en su empleo para la predicción de wake waves. Para ello, se emplean tres parámetros multiplicadores, alpha, beta y gamma, cada uno de los cuales irá aplicado sobre una dimensión básica del barco, eslora, manga y calado, respectivamente.

Así pues, mediante el empleo de estudios de campo y de laboratorio llevados a cabo por otros autores años atrás, se calibrará el valor de estos coeficientes para un total de veintiocho casos, realizando una suma de 439 simulaciones de ordenador. Una vez finalizado el proceso de calibración, se ajustarán los resultados a una ley general, aplicable a todos los casos, conocidas las características geométricas del barco, su patrón de movimiento y la batimetría en la que se mueve

Realizada la validación, se buscará la aplicación del modelo numérico a un emplazamiento particular, la Bahía de Algeciras. No obstante, el número de barcos que entran en este lugar es demasiado grande como para simularlos todos, será necesario, por tanto, desarrollar previamente una metodología que nos permita seleccionar un número limitado de embarcaciones representativas del resto y, dentro de ellas, un número limitado de rutas para simular.

Para facilitar el estudio, la bahía se dividirá en siete zonas caracterizadas por un punto representativo o centroide. La información de partida de esta metodología es la contenida en la base de datos AIS (*Automatic Identification System*), a partir de ella, se clasificarán los barcos en base a diversos criterios: Eslora, calado, número de entradas a cada zona, número de entradas a la Bahía etc. Así pues, dividiendo cada clasificación en intervalos y, asignando pesos, se obtendrá un índice de comparación para cada embarcación, permitiéndonos quedarnos con aquellos más representativos. Esta metodología finaliza con la obtención de la información necesaria a introducir en el modelo numérico.

Finalmente, este trabajo concluye con la simulación de un caso real, a partir de los datos obtenidos tras la aplicación de la metodología diseñada para la clasificación de embarcaciones y, mediante el empleo de los coeficientes alpha, beta y gamma extraídos de las leyes generales obtenidas tras la validación. A partir de los resultados obtenidos y de los datos medidos por unos sensores instalados por la Autoridad Portuaria en la zona de estudio, se realizará una comparación y se extraerán conclusiones sobre la validez del modelo numérico.

1. Introducción y objetivos

El oleaje generado por una embarcación con su movimiento o wake waves, es un factor a tener en cuenta en varias situaciones, por ejemplo, a la hora de estudiar la operatividad de un puerto, o la erosión originada en los márgenes de un río navegable.

La velocidad de movimiento de las embarcaciones, así como su gran tamaño, pueden hacer que, lejos de generar una perturbación imperceptible, produzcan un oleaje que en muchos casos es significativo en comparación con el oleaje generado por viento, y que puede afectar a la actividad humana.

Es por ello que, en los últimos cincuenta años, han sido muchos los experimentos llevados a cabo buscando entender el patrón seguido por las wake waves y como predecirlas. Los ensayos de laboratorio y de campo, así como el desarrollo de modelos numéricos y formulación analítica, han ido avanzando cada vez más en esta materia, alcanzando soluciones razonablemente buenas en la predicción de las wake waves.

Es en este contexto donde se enmarca este Trabajo de fin de Máster. En él, mediante el empleo de un modelo numérico basado en las ecuaciones de Boussinesq, buscamos la obtención de unas leyes generales para el cálculo de unos coeficientes de calibración, de forma que estos permitan la simulación del oleaje producido por cualquier embarcación y, la obtención de resultados adecuados en cuanto a la predicción de las wake waves producidas por las mismas.

Se persiguen los siguientes objetivos:

- Realizar un repaso de los principales estudios acerca de las wake waves, de cómo se forman, y de las diferentes maneras de analizar su comportamiento a lo largo de los últimos cincuenta años.
- La validación de un modelo numérico tipo Boussinesq, basándonos en la aplicación de tres coeficientes de calibración, α , β y γ , a partir los estudios llevados a cabo por otros autores años atrás en materia de oleaje generado por embarcaciones.
- Extender los resultados obtenidos en la validación a cualquier embarcación, conocidas sus características geométricas, su patrón de movimiento y la batimetría del emplazamiento.
- El tratamiento de la información contenida en la base de datos AIS para la Bahía de Algeciras, seleccionando un número limitado de casos a simular
- Extraer la información necesaria para la simulación, describiendo la metodología seguida.
- Simular uno de esos casos y validar los resultados con los datos reales obtenidos en un sensor de medición situado en el emplazamiento real.

2. Estado del arte sobre el oleaje generado por el paso de embarcaciones

Procesos y su observación en laboratorio

Formación del oleaje por el paso de embarcaciones

Durante su avance, el barco experimenta una resistencia al movimiento. Ésta, es debida a tres tipos de fuerzas generadas como reacción a la turbulencia provocada por la embarcación:

- Fricción actuante tangencialmente sobre el casco del barco, consecuencia de la viscosidad del agua.
- Resistencia provocada por los remolinos generados alrededor del casco.
- Resistencia provocada por el oleaje causado por el movimiento de la embarcación.

Las olas son generadas en la proa, popa, o en cualquier punto donde existan cambios bruscos en la geometría del casco, causando alteraciones en el fluido. A medida que el barco se mueve, la energía transferida al agua es alejada del propio barco por sistemas de olas como el apreciado en la siguiente figura:

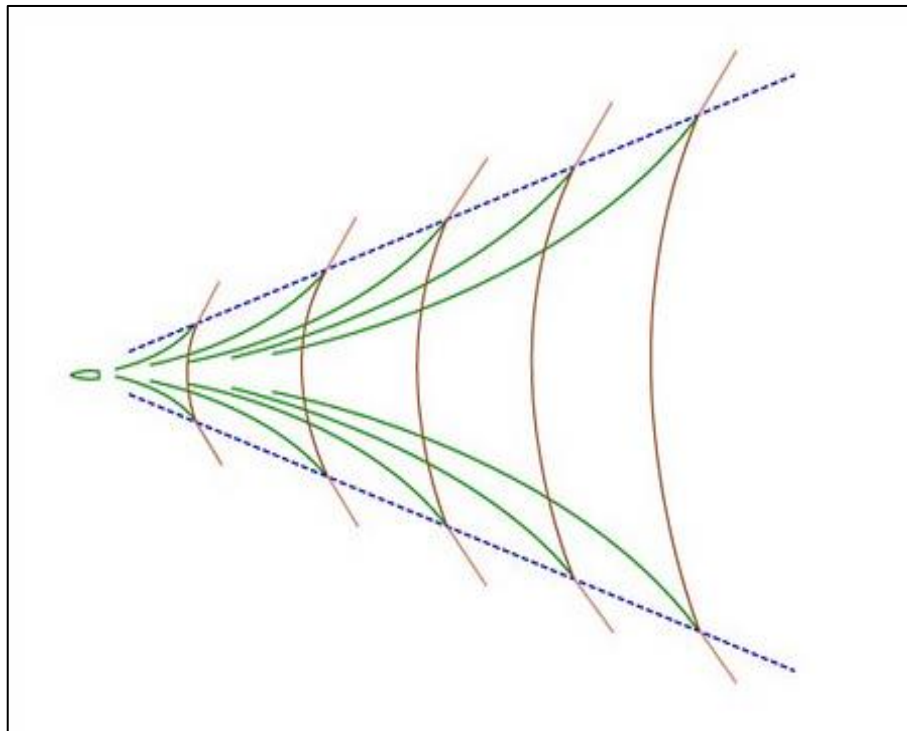


Figura 1 Oleaje tipo generado por el paso de una embarcación

Oleaje generado en aguas profundas

El oleaje producido por el paso de una embarcación en aguas profundas se considera que sigue la teoría expuesta por Kelvin en 1887. El concepto de aguas profundas está asociado a que el fondo no tiene afección sobre la propagación de las ondas generadas.

De acuerdo a la teoría de Kelvin, en el sistema de ondas producido se pueden distinguir dos tipos:

- Ondas divergentes (*Diverging waves*): Se propagan con un ángulo entre 90° y 35° alejándose de forma oblicua de la línea de navegación.
- Ondas transversales (*Transverse waves*): Se propagan con un ángulo entre 35° y 0° siguiendo la línea de navegación. En condiciones normales, las ondas transversales viajan a la misma velocidad que la del propio barco.

Las ondas transversales se encuentran con las divergentes a ambos lados de la embarcación, formando una envolvente caracterizada por dos líneas que forman, con respecto a la trayectoria del barco, un ángulo de aproximadamente $19,50^\circ$. Es en ese lugar geométrico de encuentro, donde el tamaño de las ondas es mayor (*cusp locus line*). Se muestra a continuación un esquema del sistema de oleaje descrito por Kelvin:

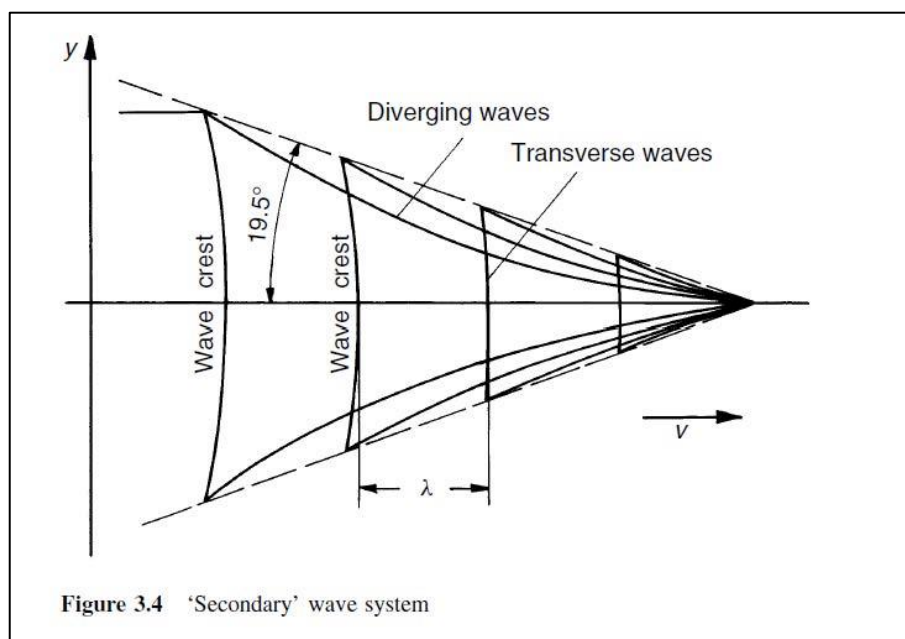


Figura 2 Sistema de oleaje según la teoría de kelvin

En aguas profundas cuanto mayor es la velocidad de la embarcación, mayor es el tamaño de la ola generada. El parámetro más importante para la caracterización del oleaje, de acuerdo a la teoría de Kelvin, es la relación entre la velocidad y la eslora de la embarcación. Ambos

parámetros se combinan junto con la aceleración de la gravedad para obtener el número de Froude dependiente de la eslora (Fn_L), el cual sigue la siguiente expresión:

$$Fn_L = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Siendo v (m/s) la velocidad del barco, g (m/s²) la aceleración de la gravedad y L (m) la eslora.

A continuación se muestran dos registros del oleaje producido por una embarcación (Sorensen 1997):

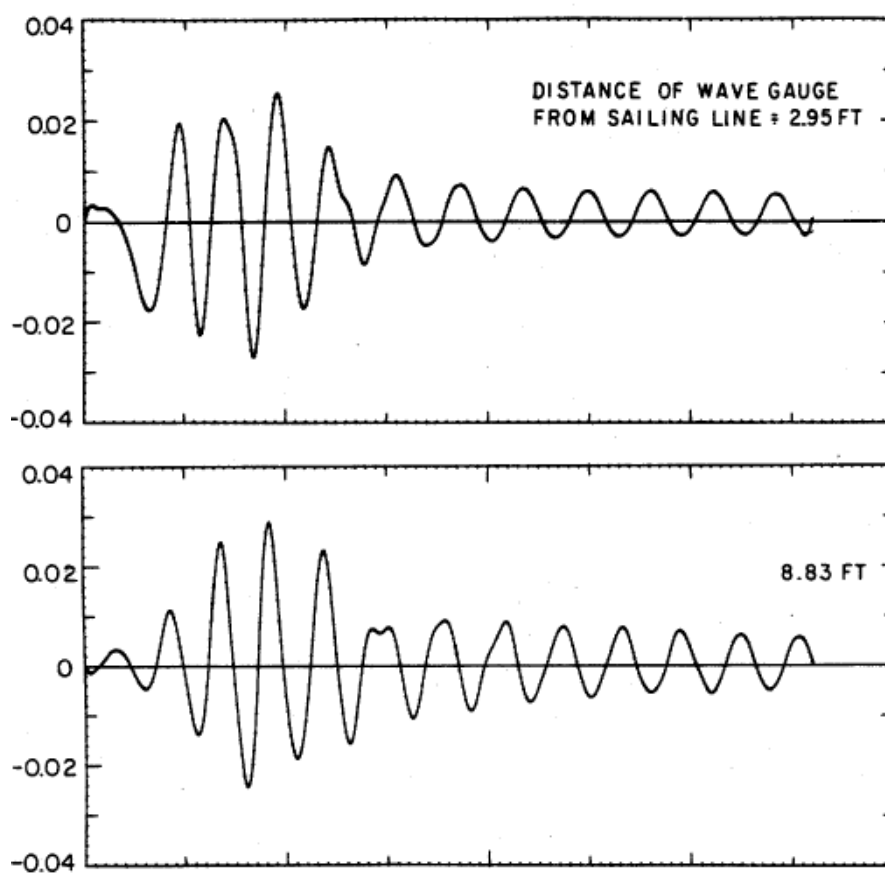


Figura 3 Registros del oleaje producido por el paso de una embarcación en aguas profundas

Se puede observar que la mayor altura de ola es obtenida en la tercera o cuarta ola y que, además, el periodo de las primeras es inferior al de las siguientes. Esto se debe a que las ondas iniciales registradas son predominantemente ondas divergentes, mientras que el final del registro está dominado por la presencia de ondas transversales, aparecidas a medida que el barco se aleja de la zona.

Oleaje generado en aguas someras

Cuando la onda se propaga con una profundidad aproximadamente inferior a la mitad de la longitud de onda, ésta empieza a sentir el fondo. Para tener en cuenta el efecto de la profundidad, se considera otro parámetro, el número de Froude dependiente de la profundidad (Fn_h), cuya expresión es la siguiente:

$$Fn_h = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Siendo v (m/s) la velocidad de la embarcación, g (m/s²) la aceleración de la gravedad y h (m) la profundidad del agua.

El sistema de oleaje según Kelvin, se formaría para un Fn_h inferior a 0,57, a partir de ese valor, las ondas divergentes más pequeñas comienzan a notar el fondo. El rango en el cual las ondas generadas siguen la teoría de Kelvin suele designarse como subcrítico (*sub-critical speed range*), pero, a medida que la profundidad empieza a cambiar significativamente el patrón formado por las olas, se comienza a hablar de rango de velocidad cercano al crítico (*near-critical speed range*) y suele abarcar un Fn_h entre 0,7 y 1,0.

En este rango cercano al crítico, las olas producidas siguen siendo cada vez mayores, no obstante, hay diferencias entre la velocidad de crecimiento de las ondas transversales y de las ondas divergentes. Las ondas transversales crecen a una velocidad superior a lo que lo hacen las otras, de forma que terminan por ser las predominantes en las proximidades de un número de Froude unidad.

El ángulo que forma la línea de encuentro de ambos tipos de onda con la línea de navegación aumenta desde 19,5° a 90° cuando alcanzamos la unidad en Fn_h . Esto ocurre debido a que el ángulo que las ondas divergentes forman con la línea de navegación asciende hasta 90°.

Cuando se alcanza un número de Froude igual a 1,0, la velocidad del barco se iguala a la velocidad máxima de propagación de las ondas en esa profundidad, esta situación se la conoce como situación crítica (*critical speed*). En este punto, la línea de encuentro de los dos tipos de ondas es perpendicular a la línea de navegación y, en un registro, las primeras ondas de ambos tipos, son mucho más acentuadas que aquellas que las preceden.

Para un número de Froude dependiente de la profundidad superior a 1,0 (*super-critical speed range*), las ondas transversales desaparecen. Esto se debe a que no son capaces de seguir al barco, ya que su velocidad está limitada por la profundidad. El ángulo de propagación de la primera ola puede ser determinado como:

$$\cos \theta = \frac{1}{Fn_h}$$

Siendo θ el ángulo con la línea de navegación.

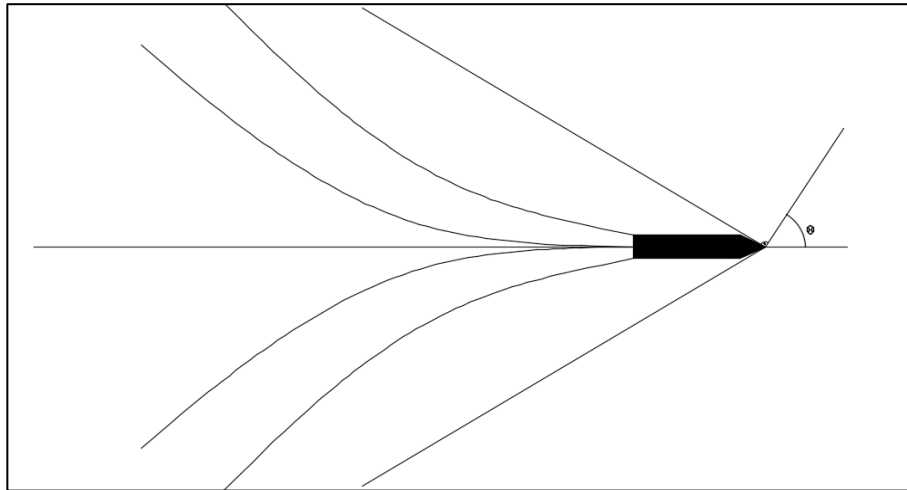


Figura 4 Super-critical speed range

Mediciones de laboratorio y campo

Mediciones de laboratorio

Desarrollo de los experimentos

A lo largo de los últimos 50 años, han sido muchos los experimentos de laboratorio realizados para profundizar en el conocimiento sobre el oleaje generado por el paso de embarcaciones.

Normalmente, en este tipo de experimentos los registros de la superficie libre en función del tiempo se obtienen en varios puntos, cada uno de ellos situados a una distancia a la línea de navegación. No obstante, en la mayor parte de los casos estos registros no son publicados, siendo dos las formas más habituales de presentación de los resultados, aunque, como se verá más adelante, el abanico de posibilidades es amplio.

La primera de ellas consiste en presentar un gráfico cuyo eje de ordenadas es la altura de ola máxima y su eje de abscisas es la velocidad para una profundidad establecida, o bien, el número de Froude. Así mismo, se indica cual es la distancia a la línea de navegación para la cual se obtuvieron los resultados presentados.

La segunda forma es el caso opuesto a la primera, en ella los gráficos presentan en su eje de ordenadas la altura de ola máxima obtenida y en el eje de abscisas presentan la distancia a la línea de navegación, cada uno de los gráficos suele estar asociado a un determinado número de Froude en función de la profundidad.

Además, algunos autores exponen también otras variables como puede ser la densidad de energía o el periodo asociado a la altura de ola máxima en función de, o bien la distancia a la línea de navegación, o bien el número de Froude.

Para el desarrollo de estos experimentos, se emplean modelos a escala reducida de embarcaciones reales, siendo muy amplia la casuística de barcos representados. No obstante, podemos dividir los modelos en dos grandes grupos:

- Barcos de tipo monocasco
- Barcos de tipo catamarán



Figura 5 Modelo a escala monocasco (Fakulti, 2006)

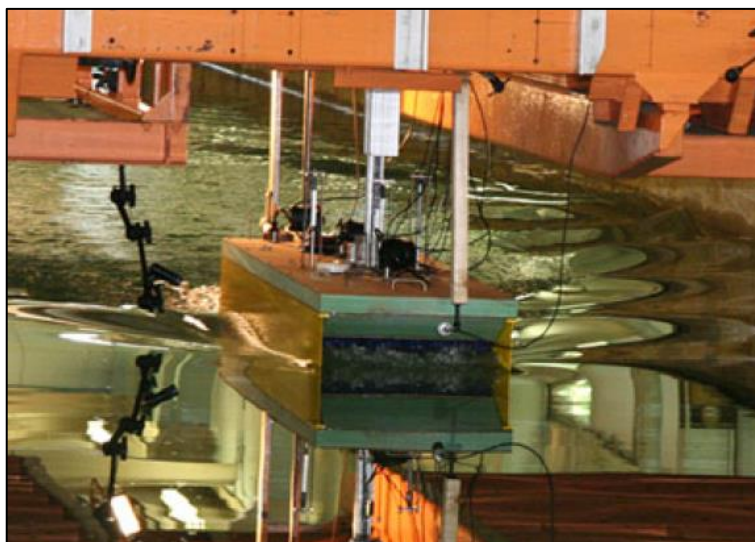


Figura 6 Modelo a escala tipo catamarán (L. J. Doctors, 2010)

Si bien los primeros ensayos realizados obtuvieron resultados para barcos de tipo monocasco, el desarrollo de la tipología de embarcación HSC (*High Speed Craft*), basada en una

morfología tipo catamarán, ha hecho que los experimentos empleando este último tipo de modelos hayan crecido en importancia.

Los sistemas utilizados para el movimiento de la embarcación han ido evolucionando a lo largo de los años, pasando de sistemas más rudimentarios como el que aparece representado en el estudio de Johnson en 1957, el cual está basado en un sistema de poleas, a métodos completamente mecanizados que mueven el barco según los parámetros de velocidad establecidos en el panel de control.

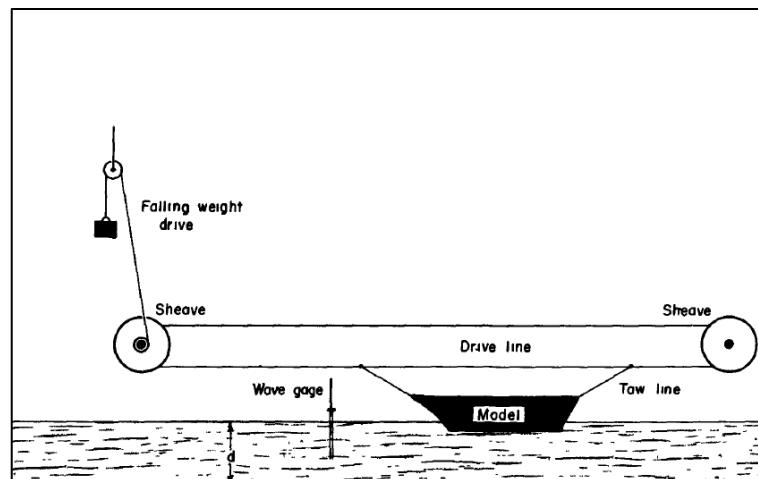


Figura 7 Sistema de poleas empleado para el movimiento del barco (Fuente: Johnson 1957)

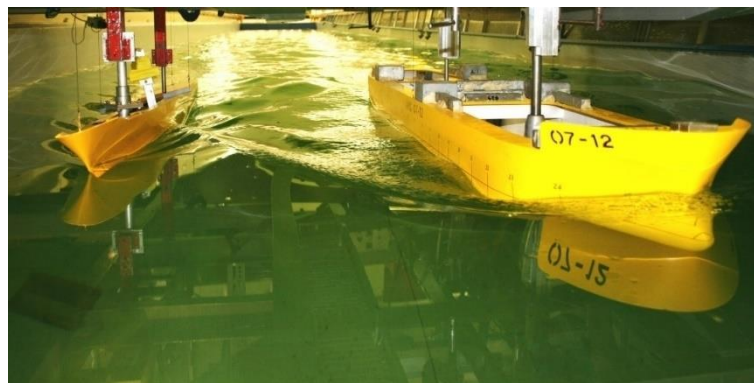


Figura 8 Australian Maritime College (AMC)

Las principales ventajas que aporta este tipo de ensayos son las siguientes:

- Facilidad en la consecución de unas características batimétricas determinadas (profundidad constante, profundidad variable etc.)
- Facilidad en la implementación del movimiento del barco, variando la velocidad o la trayectoria del mismo.



- Posibilidad de disponer varios tipos de embarcaciones, mediante el empleo de modelos a escala reducida.
- Obtención de un amplio espectro de resultados, empleando un menor tiempo en cada ensayo del que se necesitaría para la obtención de los mismos a escala real.

Resumen de estudios y resultados realizados hasta la fecha

Los primeros experimentos realizados consistían en ensayos sencillos de laboratorio, donde se estudiaba el oleaje generado por un barco movido gracias a un sistema de polea, por ejemplo. Los resultados se limitaban a aportar datos en forma de gráficos sobre el oleaje medido para un determinado intervalo de velocidad o lo que es lo mismo, de número de Froude, como puede ser entre 0,60 y 2,00 (Johnson, 1957).

Más tarde, tras la realización de un nuevo experimento en laboratorio con más de 270 ensayos para un rango de números de Froude entre 0,36 y 0,76, se concluye que, en entornos cerrados, el oleaje generado por el paso de embarcaciones puede llegar a ser de una magnitud significativa en comparación al oleaje producido por el viento. Asimismo, se demuestra que embarcaciones más pequeñas como puede ser un remolcador, pueden llegar a producir un oleaje comparable al producido por barcos mayores, moviéndose estos últimos a una menor velocidad (Hay, 1968).

Además, Los resultados muestran que, para un barco, velocidad y distancia a la línea de navegación determinadas, la altura de ola máxima aumenta al disminuir la profundidad. No obstante, no solo la velocidad y la profundidad son parámetros importantes que condicional la altura de ola, la forma del casco también juega un papel muy importante, Brebner en 1966 definió el ratio de finura (*fineness ratio*) como:

$$\frac{L}{\sqrt{A}}$$

Siendo L la longitud de la parte curva de la proa y A la sección transversal por debajo del nivel del agua.

De la observación de los resultados se concluye que la ola generada disminuye al aumentar la finura.

Los resultados de un experimento en tanque de laboratorio con dos modelos a escala reducida, uno correspondiente a un remolcador y otro a un ferry, en los que los resultados son presentados en un gráfico que muestra la altura de ola máxima adimensionalizada con respecto al número de Froude basado en la eslora del barco, y el periodo en función del número de Froude dependiente de la profundidad, permitieron corroborar que el periodo máximo es función del

número de Froude dependiente de la profundidad y que, la altura de ola máxima es dependiente de la eslora del barco y del número de Froude basado en la profundidad (Kurata et al., 1984).

El mayor experimento realizado hasta la fecha en términos de wake waves, y que aportó una gran cantidad de datos para la comprensión del patrón de oleaje propuesto por Kelvin, consistió en el estudio del oleaje generado por cinco modelos a escala en un tanque de laboratorio en un rango de números de Froude entre 0,185 y 0,41, reflejando en el informe los registros de superficie libre obtenidos para cada uno de los ensayos realizados (Taylor, 1990).

Con el paso de los años los experimentos ya no buscaban únicamente la medida de la altura de ola producida por los modelos a escala, sino que incluían también la medida de otros aspectos, como, por ejemplo, los movimientos de la embarcación (Olivieri et al., 2001).

No obstante, los datos sobre la altura de ola seguían mostrándose. En el estudio indicado, los perfiles de oleaje son presentados en un gráfico que, en el eje de ordenadas representa la superficie libre y en el eje de abscisas representa la distancia recorrida por el barco adimensionalizada con la eslora del mismo para dos números de Froude, 0,28 y 0,41.

Como se indicó en apartados anteriores, a medida que aumentaba el empleo de ferries de alta velocidad, crecían los ensayos realizados con modelos tipo catamarán. Uno de estos experimentos, en el que se analizaba el oleaje producido por tres modelos, dos de los cuales eran de tipo catamarán, presentaba dos conclusiones principales:

Por un lado, hace hincapié en que ambos números de Froude, el dependiente de la eslora y el dependiente de la profundidad, son importantes, y que no se deben considerar de manera aislada. Por otro lado, concluye que la velocidad con la que desciende la altura de ola máxima a media que nos alejamos de la línea de navegación es mayor cuando nos encontramos en régimen súper crítico que cuando nos situamos en un régimen subcrítico (Doyle et al., 2001).

El desarrollo de la informática y de los modelos numéricos, hace que los experimentos de laboratorio busquen, en algunos casos, la validación de los resultados obtenidos tras una simulación numérica. En 2002, se llevó a cabo un experimento empleando cuatro modelos a escala reducida, dos de los cuales son tipo monocasco y dos de tipo catamarán, el objetivo era el citado anteriormente (Molland et al., 2002). Se profundizará más sobre éste experimento en el apartado correspondiente al estado del arte de simulación numérica.

No solo se perseguía la validación de modelos numéricos, sino también probar la validez de diferentes formulaciones analíticas pensadas para la predicción del oleaje generado por el paso de embarcaciones. En este contexto, se plantea el estudio del oleaje generado en un tanque de laboratorio por cuatro modelos a escala, en el que se profundizará más en apartados posteriores (Sireli et al., 2002).

Un estudio llevado a cabo en laboratorio, donde se analiza el oleaje producido por un modelo a escala para un rango de números Froude basados en la profundidad de entre 0,60 y 1,40, permitió concluir que el oleaje generado es fuertemente dependiente del número de Fn_h , conclusión mostrada ya por varios autores hasta ese momento. La segunda conclusión era que

la máxima altura de ola se obtiene para un Fn_h de 0,90 aproximadamente y, finalmente, la tercera fue que la aproximación analítica de Kriebel et al. (2001) se ajusta bien a los resultados obtenidos en laboratorio (Abdulghani et al., 2006)

En 2010, en un experimento de laboratorio mediante el empleo de un modelo a escala reducida tipo catamarán, se trata de poner de manifiesto la reducción en el oleaje que provoca la colocación de amortiguadores en la parte inferior de la embarcación (Day, 2010).

Mediciones de campo

Desarrollo de los experimentos

Al igual que en los ensayos de laboratorio, en el último medio siglo han sido muchos los experimentos de campo llevados a cabo para profundizar en el conocimiento del oleaje producido por el paso de embarcaciones. Son muchas las afecciones causadas por éste fenómeno, entre las que cabe destacar la alteración de la operatividad en los puertos o la erosión en los márgenes de los ríos.

La forma en la que se presentan los resultados es análoga a la empleada en los ensayos de laboratorio, siendo también poco frecuente la representación de los registros completos de oleaje en función del tiempo, representándose, en cambio, resultados concretos, siendo el más habitual la altura de ola máxima generada.

Las ubicaciones donde llevar a cabo estos experimentos son muy variadas, teniendo normalmente todas ellas unos rasgos comunes: ser una zona abrigada para evitar el oleaje producido por el viento y tener una batimetría conocida. Tenemos por ejemplo experimentos realizados en puertos (Shiotani, 2010) o realizados en estrechos (Nece et. al, 1985). También serán importantes las condiciones atmosféricas en las cuales se desarrolla el estudio, para evitar que el oleaje producido por agentes atmosféricos ensucie los resultados.

La tipología de embarcación que se emplea en los experimentos es muy diversa, podemos encontrarnos con remolcadores (Shiotani, 2010), ferries (Nece et. al, 1985) o Barcos de tipología HSC (All American Marine Incorporated, 2002).

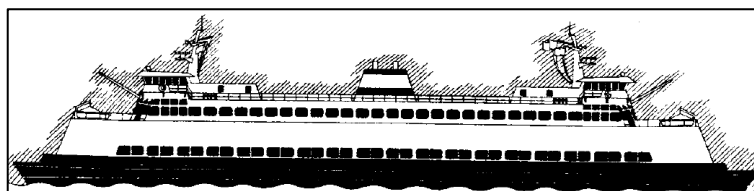


Figura 9 Ferry (Fuente: R.E. Nece et. al, 2005)

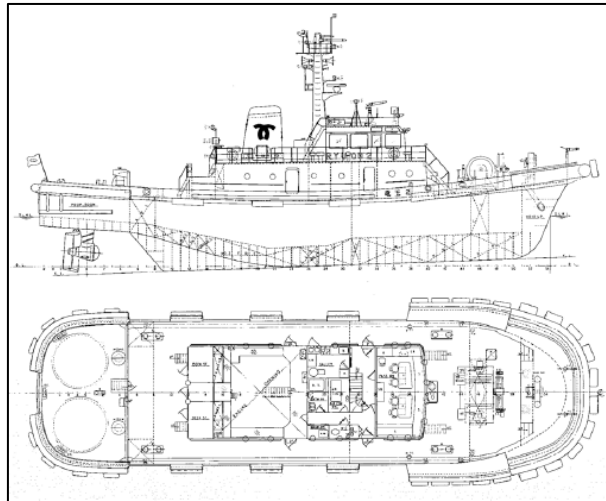


Figura 10 Remolcador (Fuente: S. Shiotani, 2010)

En lo que respecta a la ubicación de los sensores para medir la altura de ola producida, existen dos formas de llevar a cabo el experimento fundamentalmente. La primera de ellas consiste en disponer un único sensor situado a una determinada distancia a la línea habitual de navegación de la embarcación y en cada pasada medir distancia, la velocidad y la altura de ola. Es frecuente agrupar los datos obtenidos por velocidades o distancias similares.

La segunda opción es disponer de más de un sensor de medición, de forma que en cada pasada se obtengan varios registros, análogamente a como se realiza habitualmente un ensayo de laboratorio.

Las principales ventajas que presentan este tipo de experimentos son:

- Evitar la reflexión producida en las paredes de los tanques de laboratorio.
- Evitar la pérdida de precisión asociada a la representación de un barco real como un modelo a escala.
- Permite tener en cuenta la batimetría real del emplazamiento y no una aproximación.

Resumen de estudios y resultados realizados hasta la fecha

La gran erosión existente en los márgenes de los ríos Illinois y Mississippi, llevó a la necesidad de realizar un ensayo de campo para analizar el oleaje generado por el paso de embarcaciones, ante la posibilidad de que éste fuera uno de los motivos de ese proceso.

Las alturas de ola medidas en campo fueron de un máximo de 33 a un mínimo de 3 centímetros. Además, se calculó el oleaje producido por el viento, llegando a la conclusión de que ambos tipos de oleaje son suficientemente importantes como para provocar la erosión en los márgenes.

No obstante, se concretó que la importancia relativa del oleaje causado por los barcos, en comparación con el oleaje generado por el viento, no era posible medirla cualitativamente debido a la diferencia existente en la frecuencia, duración y magnitud (Bhowmik et al., 1982)

Otros ensayos de campo fueron realizados esos años, como por ejemplo el llevado a cabo en el estrecho de Puget (Estado de Washington, EE. UU). El experimento consistió en determinar la altura de ola generada por tres clases de barcos (*Super Class*, *Issaquah Class* y *Evergreen State class*).

Los resultados fueron presentados en gráficos, el eje de ordenadas representaba la variación de la altura de ola, y el eje de abscisas representaba la distancia a la línea de navegación para un determinado rango de velocidades (Nece et al., 1985)

El desarrollo de las embarcaciones HSC (*High speed craft*) impulsó un estudio en 1988 que pretendía analizar el efecto causado por las embarcaciones de este tipo y, sus diferencias en el oleaje generado en aguas someras con respecto a las embarcaciones convencionales (Kirkegaard et al., 1988).

Este tipo de embarcaciones en el régimen supercrítico generan ondas divergentes en grupos de alto y bajo periodo, el estudio se centra en describir el comportamiento de las ondas de alto periodo. Los resultados se presentan en dos formas, por un lado, aparecen registros temporales de oleaje y, por otro, aparecen gráficos que muestran la altura de ola en función del número de Froude dependiente de la profundidad.

El estudio finalmente confirmó la existencia de grupos de ondas divergentes generadas por este tipo de embarcaciones, así como que la máxima altura de ola se produce en las cercanías de un número de Froude dependiente de la profundidad igual a la unidad.

El creciente desarrollo y empleo de las embarcaciones tipo HSC, así como la dificultad de la representación en ensayos de laboratorio del comportamiento de estos barcos debido a las grandes dimensiones que se precisan, no solo en longitud, sino también en anchura para permitir la generación de los patrones de ondas, hizo frecuente la aparición de experimentos para analizar el oleaje producido por ferries de alta velocidad en la primera década del siglo XXI.

Se muestra a continuación un resumen:

- Año 2002, M. Bruno, B. Fullerton y R. Datla en Nueva York
- Año 2002, a cargo de All American Marine Incorporated en la Bahía de Bellingham
- Año 2007, P.D. Osborne, D.B. Hericks y J.M. Coté en San Diego
- Año 2008, T. Torsvik y T. Soomere en la Bahía de Tallin

El daño medioambiental es uno de los aspectos fundamentales que impulsan el estudio de las wake waves, con este motivo se lleva a cabo un estudio para analizar el oleaje producido por los barcos del Puerto de Otago (Nueva Zelanda), concluyendo la necesidad de un canal de navegación más profundo para reducir los efectos causados por las wake waves (Pullar, 2009).

Finalmente, el empleo de remolcadores y su frecuente uso en los puertos, motivó la realización de un experimento para analizar el oleaje producido por los mismos en el puerto de Kobe (Japón). El estudio mostraba en sus resultados la altura de ola generada con respecto a la distancia o con respecto a la velocidad (Shiotani, 2010)

Ensayos numéricos

Introducción

El oleaje generado por el paso de embarcaciones puede tener efectos negativos sobre el medioambiente, provocando la erosión de los márgenes de un río, por ejemplo, o sobre la propia actividad humana, en tanto en cuanto la operatividad de un puerto se vea afectada por la altura excesiva de ola producida por el movimiento de un barco.

Es por tanto que, la previsión del oleaje producido es fundamental de cara a poder tomar las medidas oportunas que permitan hacer frente a los efectos negativos, bien mediante protecciones, o bien modificando el movimiento de las propias embarcaciones, reduciendo la velocidad o cambiando su trayectoria, entre otras soluciones.

La simulación numérica aparece como una herramienta de gran utilidad para conseguir este propósito debido, entre otros factores, a su posibilidad de aplicación a múltiples batimetrías y embarcaciones y su comodidad de uso.

A lo largo de los últimos veinte años, el desarrollo de la informática ha permitido el incremento en el uso de estas técnicas. A continuación, se muestra alguno de los estudios realizados en materia de oleaje producido por movimiento de barcos empleando modelos numéricos.

Análisis del oleaje con modelos numéricos

Un estudio donde se comparan los resultados de un experimento de laboratorio con los que aporta un modelo numérico basado en la “thin ship theory” pone de manifiesto la validez del modelo para la estimación del oleaje sin un esfuerzo computacional muy elevado (A.F. Molland et al, 2002). Dicha teoría es desarrollada en los siguientes documentos:

- Insel, M. An Investigation into the Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans. Ph.D. Thesis, University of Southampton, 1990.
- Insel, M., Molland, A.F. and Wellicome, J.F. Wave Resistance Prediction of a Catamaran by Linearised Theory. Proc. of Fifth International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation. CADMO'94, Computational Mechanics Publications, 1994
- Couser, P.R., Wellicome, J.F. and Molland, A.F. An Improved Method for the Theoretical Prediction of the Wave Resistance of Transom Stern Hulls using a Slender Body Approach. International Shipbuilding Progress, 45, No.444, 1998.

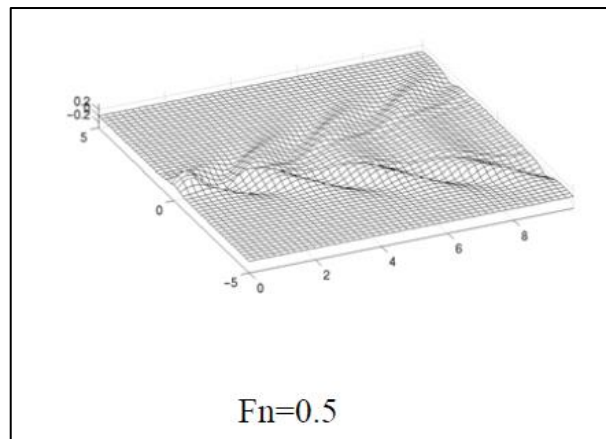


Figura 11 Modelado numérico (I)

También en 2002, mediante el empleo de un programa basado en ecuaciones de Boussinesq y en la “slender-body theory”, se investiga el oleaje generado por el paso de embarcaciones teniendo en cuenta varias topografías, llegando a la conclusión de que la propagación del oleaje depende significativamente de la topografía del fondo (Tao Jiang et al., 2002)

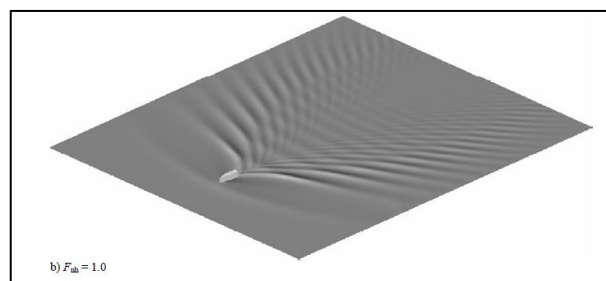


Figura 12 Modelado numérico (II)

Años más tarde, de forma análoga a lo descrito para Molland et al. (2002), se lleva a cabo un experimento de laboratorio y una simulación numérica, comprando los resultados obtenidos en ambos casos. El modelo numérico estaba basado en las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles (Ohashi et al., 2008).

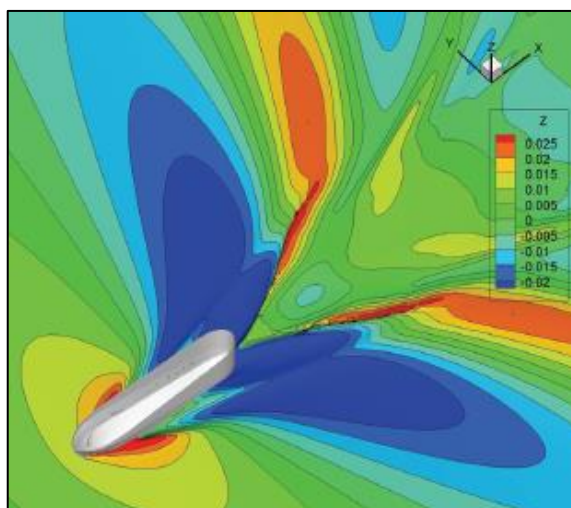


Figura 13 Modelado numérico (III)

En 2012 se realizan un estudio cuyo principal objetivo es obtener la amplitud del oleaje generado por barcos mediante el empleo de un modelo numérico basado en la resolución de las ecuaciones de Navier -Stokes en 3D. (Ji et al., 2010).

Aproximación analítica

Desde que comenzó el estudio de las wake waves, el objetivo de conseguir una formulación que permitiera de forma analítica predecir el oleaje generado, ha sido una constante hasta la actualidad.

Numerosas formulaciones han sido desarrolladas, mostrándose a continuación dos ejemplos.

Kriebel et al., (2001)

Kriebel et al. en 2001 proponen la siguiente formulación para la predicción del oleaje por paso de embarcaciones:

$\frac{gH}{V_s^2} = \beta(F_s - 0.1)^2 \left(\frac{y}{L}\right)^{-\frac{1}{3}}$ $H = \frac{V_s^2}{g} \beta(F_s - 0.1)^2 \left(\frac{y}{L}\right)^{-\frac{1}{3}}$	Height of the largest wave in the wave train at a distance y from the sailing line of the vessel.
$F_s = F_L(e)^{\frac{\alpha R}{d}}$	Modified depth Froude number that accounts for vessel length and draft and form.
$\alpha = 2.35(1 - C_b)$	A parameter related to hull form – mostly the block coefficient.
$\beta = 1 + 8 \tanh^3 \left(0.45 \left(\frac{L}{Le} - 2 \right) \right)$	A parameter related to hull form – mostly the bow angle

Figura 14 Formulación de Kriebel et al. (Fuente: Abdul Ghani et al., 2006)

Donde:

H: Máxima altura de ola generada (m)

C: Celeridad de onda (m/s)

F_L : Número de Froude basado en la eslora

F_d : Número de Froude basado en la profundidad

F^* : Número de Froude basado en la profundidad modificado

L_{BP} : Eslora entre perpendiculares (m)

d: Profundidad (m)

R: Calado (m)

C_b : Coeficiente de bloqueo

L_e : Longitud de proa (m)

V_s : Velocidad del barco (m/s)

α : Coeficiente de forma del casco

β : Coeficiente relacionado con la forma de la proa

y: Distancia a la línea de navegación

L_w : longitud de onda

θ : Ángulo entre la línea de navegación y la línea perpendicular a la dirección de las ondas divergentes

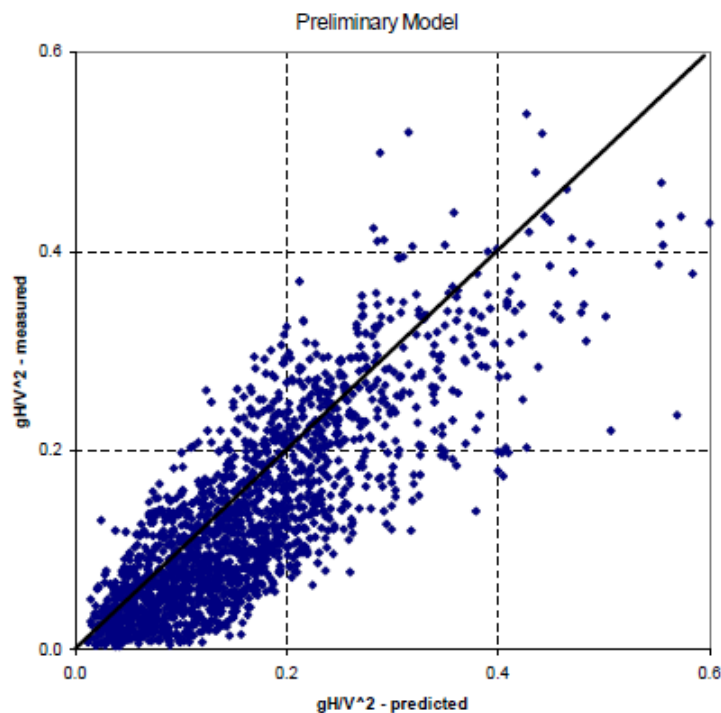


Figura 15 Ajuste propuesto por Kriebel et al. (2001)

Vemos como la fórmula propuesta depende tanto de las características geométricas globales del barco (eslora y calado), como de la forma de su casco a través de los coeficientes de forma (α y β).

Además, a través del número de Froude se considera tanto la influencia de la velocidad, como de la profundidad

Sireli, E.M., (2002)

E.M. Sireli en 2002 propone la siguiente formulación para la predicción del oleaje por paso de embarcaciones:

$$\frac{H_m}{L} = \left[1,5780 - 0,2266 \frac{L}{B} + 0,0115 \frac{L^2}{B} + 0,0123 \frac{L}{T} - 0,2605 \frac{B}{T} + 0,0219 \frac{B^2}{T} \right] \frac{y_s}{L}^{-\frac{1}{3}} F_n^3$$

Donde:

H_m : Máxima altura de ola generada (m)

B : Manga máxima (m)

F_n : Número de Froude basado en la eslora

L : Eslora a nivel de superficie (m)

T : Calado máximo (m)

β : Coeficiente relacionado con la forma de la proa

y_s : Distancia a la línea de navegación

El modelo sigue la siguiente forma:

$$\frac{H_m}{L} = f_1\left(\frac{y_s}{L}\right) \cdot f_2\left(\frac{L}{B}, \frac{B}{T}\right) \cdot f_3(F_n)$$

La altura de ola máxima adimensionalizada con la eslora del barco depende de tres términos. El primero de ellos es función de la distancia a la línea de navegación y de la eslora, el segundo es función de las características geométricas del barco y, finalmente, el tercero, es función del número de Froude.

3. Generación numérica del oleaje por paso de embarcaciones

Descripción del modelo numérico IH-Boussinesq

Descripción general

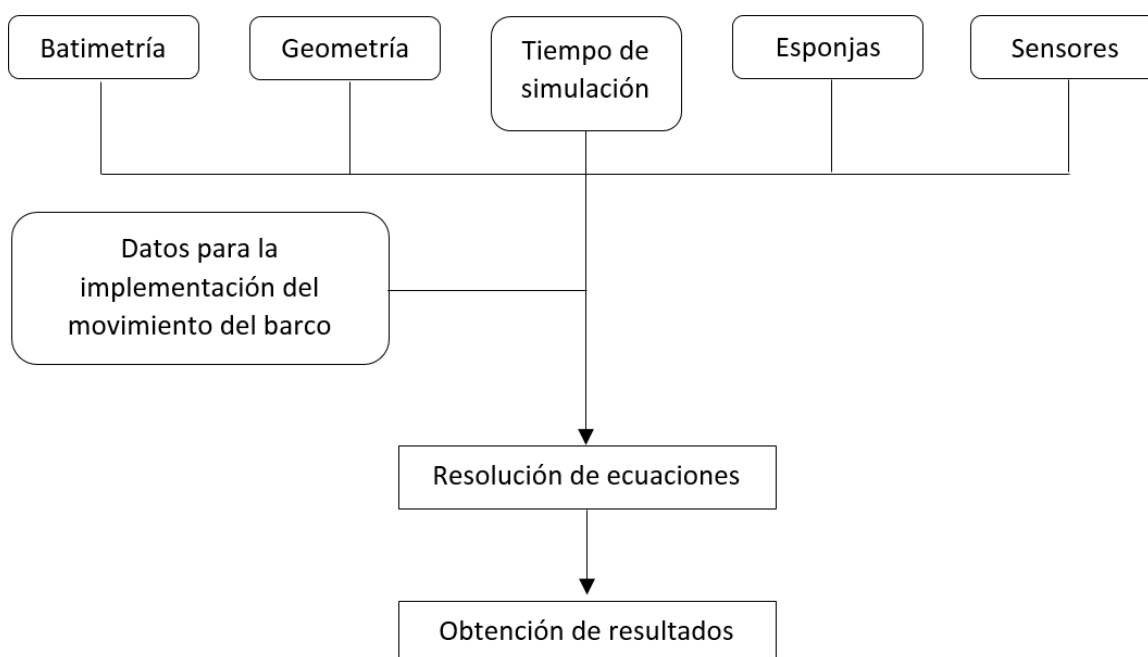
Es un modelo numérico que permite, a través de una perturbación generada en la superficie libre por un elemento de geometría conocida, el análisis del oleaje generado por el paso de embarcaciones en un entorno de batimetría también conocida.

Podremos, de esta forma, analizar la altura de ola máxima que una embarcación con una geometría determinada va a producir en un emplazamiento concreto. Permitirá, además, disponer sensores de medición en aquellos puntos que nos interese conocer el oleaje incidente, así como definir la trayectoria seguida por el barco a analizar y su velocidad.

En términos generales, los principales inputs a introducir en el modelo numérico son:

- La batimetría del emplazamiento donde se quiere llevar a cabo el estudio.
- El tiempo de simulación.
- La geometría del contorno, es decir, longitud y anchura.
- La disposición y el tamaño de las esponjas.
- Ubicación y número de sensores.
- Datos necesarios para la implementación del movimiento del barco.

A partir de estos datos, el modelo numérico resolverá las ecuaciones modificadas completamente no lineales y completamente dispersivas de Boussinesq.



Esquema 1 Esquema general del modelo numérico

Geometría del dominio de simulación

El tamaño del dominio donde se lleva a cabo la simulación vendrá condicionado por dos factores:

- Las dimensiones globales (en metros).
- El tamaño de celda de la malla.

Así pues, una vez decidido el tamaño global del dominio, en función de las características reales del emplazamiento donde queramos estudiar el oleaje generado por el paso por embarcaciones, deberemos decidir el tamaño de celda.

Como norma general, consideraremos un tamaño de celda inferior a una cuarta parte la manga del barco que vaya a ser simulado, para garantizar que la anchura del barco es representada por al menos cuatro elementos.

El tamaño de celda condiciona de forma muy importante el tiempo de ejecución, si bien es cierto que, un menor tamaño de celda aporta resultados más precisos que la misma simulación llevada a cabo con un tamaño mayor.

Por lo tanto, partiendo de la longitud y de la anchura total del dominio, y del tamaño de celda, podemos determinar sus medidas en unidades de malla, como se expone a continuación:

$$M = \frac{Longitud_{Total}}{D_X}$$

$$N = \frac{Anchura_{Total}}{D_Y}$$

El dominio definido tendrá su origen de coordenadas en el extremo situado en el vértice sur-oeste del mismo, tal cual se indica en la figura posterior. Será importante tener esto en cuenta a la hora de definir la posición de los sensores de medición, como se expondrá más adelante.

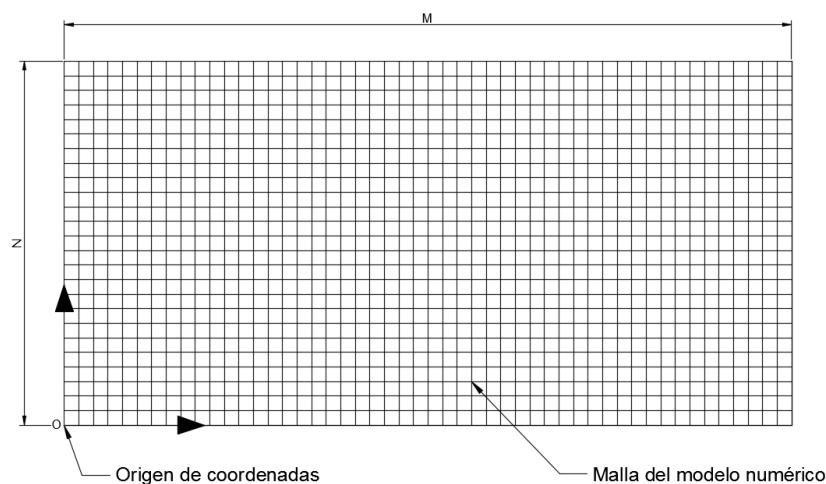


Figura 16 Geometría global del dominio de simulación



Tiempo de simulación

Resultará necesario establecer el tiempo de simulación, éste deberá ser suficiente para permitir que el oleaje llega a los sensores dispuestos. Así mismo, se debe fijar el intervalo de tiempo para el cual se obtienen resultados en los sensores.

Batimetría

La batimetría es uno de los aspectos fundamentales que condicionan el oleaje generado por el paso de embarcaciones, debido, entre otros factores, a su influencia directa en el número de Froude basado en la profundidad. Para definir la batimetría tenemos tres opciones:

- Cargar los datos de la batimetría del emplazamiento en el cual se quiere estudiar el oleaje.
- Fijar una batimetría de profundidad constante, como puede ser el caso de un tanque de laboratorio.
- Fijar una batimetría con una profundidad variable, estableciendo el valor de la pendiente del fondo.

Esponjas

El modelo numérico tiene implementada la opción de colocar una esponja en cada uno de los límites del dominio. Dichos elementos permiten absorber el oleaje generado por la perturbación, evitando el efecto de reflexión que se generaría en las paredes en caso de que no estuvieran presentes.

Será por tanto necesario establecer si se desea o no el uso de estas esponjas y, en caso afirmativo, fijar una anchura para cada una de ellas, es decir, esponja norte, esponja sur, esponja este o esponja oeste. El establecimiento del espesor de cada uno de estos elementos será en metros, y no en unidades de malla como hemos visto en casos anteriores.

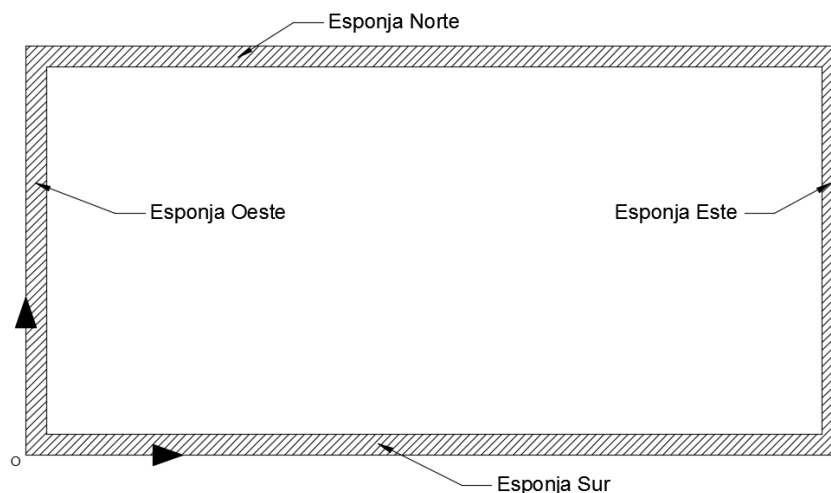


Figura 17 Esponjas en el modelo numérico

Sensores de medición

En lo que respecta a los sensores de medición, podremos fijar tantos como resulte necesario. La ubicación de los mismos se establecerá teniendo en cuenta la posición del origen de coordenadas (ver *figura 16*) y el tamaño de celda, dicho de otro modo, las coordenadas de cada sensor serán fijadas en unidades de malla.

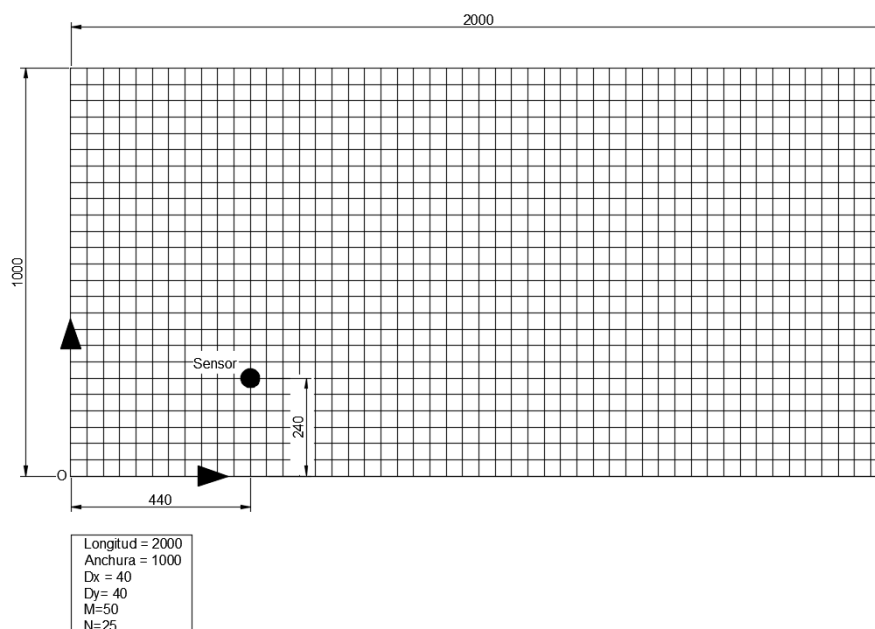


Figura 18 Ejemplo ubicación de un sensor

En el ejemplo anterior vemos como el sensor se coloca en la posición (440, 240), que, en coordenadas con unidades de malla sería:

$$X = \frac{440}{40} = 11,00$$

$$Y = \frac{240}{40} = 6,00$$

Implementación del movimiento del barco en el modelo

Caracterización básica del movimiento

El movimiento del barco en el modelo es representado a través de una perturbación producida por un elemento cuyas dimensiones quedarán definidas por las características geométricas principales de la embarcación, esto es, eslora, manga y calado.

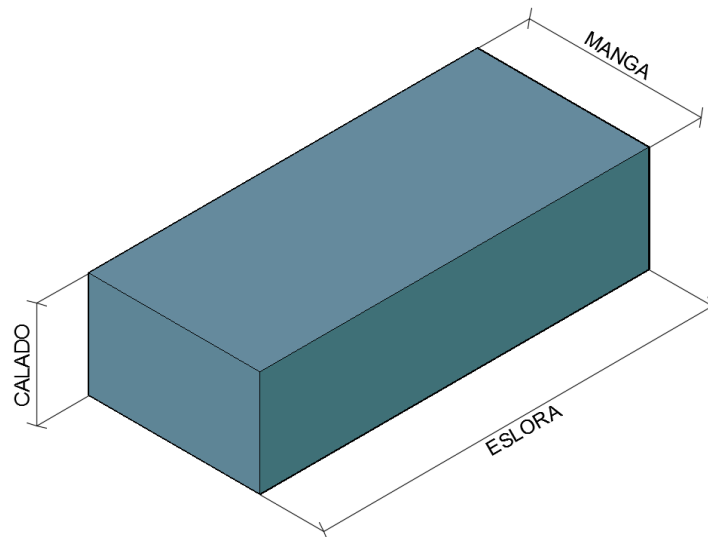


Figura 19 Elemento teórico generador de la perturbación

No obstante, es también necesario el establecimiento de la posición y de la velocidad de desplazamiento del barco. Para ello, tal y cómo se indicará posteriormente en el apartado “*Post-proceso de la base de datos AIS*”, el movimiento quedará definido a través de dos polinomios de grado 10, el primero de ellos representa la variación de la posición X (longitud) en función del tiempo, mientras que el segundo representa la variación de la posición Y (latitud) con respecto del tiempo.

Un caso particular es aquel en el que la velocidad de movimiento de la embarcación se asume constante, en tal caso, el polinomio que representa la variación de la posición en función del tiempo, únicamente tendrá componente no nula en el segundo término, siendo los términos independientes de ambos vectores los que definan la posición de partida del barco.

Así mismo, como se verá más adelante, si además de considerar una velocidad constante, consideramos un movimiento de oeste a este o bien, de este a oeste, los únicos términos no nulos serán el segundo término del polinomio que define la posición en “X” (nos indica la velocidad constante), y los términos independientes de ambos vectores, que definirán la posición de partida del barco.

Factores alpha, beta y gamma

Para la completa definición del movimiento de la embarcación, se considerará la intervención de tres factores: alpha, beta y gamma, asociados, cada uno de ellos, a la eslora, la manga y el calado del barco respectivamente.

Cada uno de estos factores actuará como un coeficiente multiplicador aplicado a la característica correspondiente del barco, dando lugar a una geometría corregida que será la que realmente simule la embarcación generadora del oleaje.

$$\begin{aligned} \text{Eslora Real} \cdot \alpha &= \text{Eslora corregida} \\ \text{Manga Real} \cdot \beta &= \text{Manga corregida} \\ \text{Calado Real} \cdot \gamma &= \text{Calado corregido} \end{aligned}$$

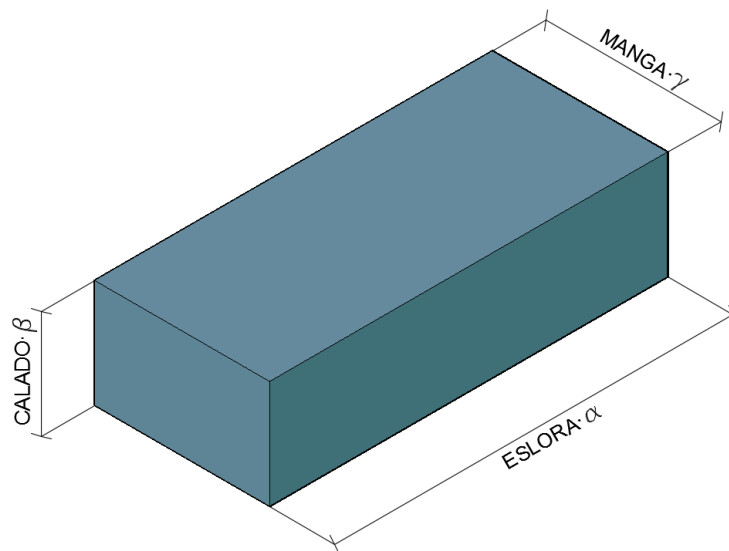


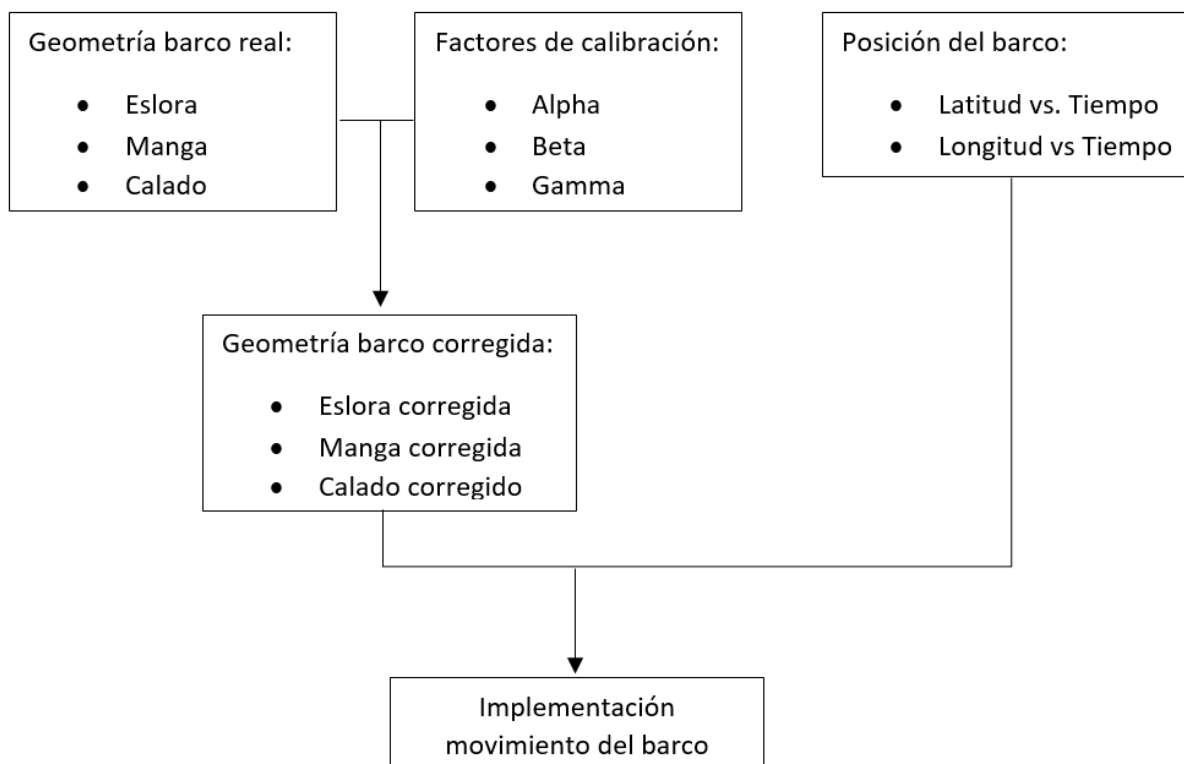
Figura 20 Elemento corregido generador de la perturbación

El objeto del presente trabajo será la calibración de dichos parámetros de forma que, partiendo de las características geométricas de un barco cualquiera y de su movimiento, se pueda determinar el valor de alpha, beta y gamma que permitan simular una altura de ola máxima similar a la realmente generada por el barco.

Para llevar a cabo la validación se emplearán estudios previos realizados por otros investigadores en el campo de las wake waves. Distinguiremos entre ensayos realizados en un tanque de laboratorio o ensayos realizados a escala real.

Los datos de partida para la calibración, los resultados obtenidos en cada estudio concreto por aquellos investigadores que los realizaron, y los resultados obtenidos del proceso de calibración de los parámetros serán expuestos en los apartados posteriores.

A modo de resumen se muestra a continuación un esquema de los datos necesarios para la implementación del movimiento del barco en el modelo, una vez definido, claro está, el dominio numérico donde llevar a cabo la simulación:



Esquema 2 Implementación movimiento barco

Validación del modelo

Descripción de los datos de validación

La validación del modelo numérico se llevará a cabo haciendo uso de los resultados obtenidos en seis estudios diferentes. Del total empleado, dos de ellos corresponden a ensayos de laboratorio, tres corresponden a datos obtenidos en un ensayo de campo a escala real y, finalmente, uno de ellos corresponde a los datos obtenidos tras la aplicación de una formulación analítica previamente calibrada.

Así pues, el resumen de los estudios empleados para llevar a cabo la calibración aparece recogido en la siguiente tabla:

Caso nº	Autor/es	Año	Tipo de experimento	Rango de Fn_h
1	Abdul Ghani, M.P. Abdul Rahim, M.N.	2006	Ensayo de laboratorio	0,60-1,20
2	Shiotani, S.	2010	Ensayo de campo	0,30-0,40
3	Johnson, J.W.	1957	Ensayo de laboratorio	0,80-1,20
4	All American Marine Incorporated Teknicraft Design	2002	Ensayo de campo	0,62-1,55

5	Nece, R.E. McCaslin, M.R Christensen, D.R.	1985	Ensayo de campo	0,25-0,30
6	Varyani, K.S.	2005	Aproximación analítica/Ensayo de campo	0,42-1,11

Tabla 1 Datos para realizar la calibración

Cada uno de los casos calibrados irá acompañado de la siguiente información:

- Ficha resumen con los principales datos del experimento y del modelo, así como los resultados más significativos. Estas fichas quedarán recogidas en el **Anejo 1**.
- Descripción del ensayo realizado, haciendo hincapié en lo que concierne a las características del emplazamiento, de la embarcación, el sistema de medida y la forma de presentación de los resultados.
- Diseño del dominio introducido en el modelo numérico, así como los datos necesarios para la implementación del movimiento del barco.
- Resultados obtenidos de la calibración.

Calibración - Caso nº 1

Descripción del ensayo real

Características generales

Autor/es: Abdul Ghani, M.P. y Abdul Rahim, M.N.

Año: 2006

Descripción breve:

Se trata de un ensayo de laboratorio llevado a cabo en la Universidad Tecnológica de Malasia (*University of Technology, Malaysia*). En este experimento se evalúa el oleaje generado por un modelo a escala 1:8,75 en un tanque con la geometría que se indicará en apartados posteriores.

Se estudia el efecto generado por el barco moviéndose a distintas velocidades, ésta varía desde 1,03 hasta 2,40 m/s, o lo que es lo mismo, el número de Froude basado en la profundidad varía entre 0,60 y 1,40.

F	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
V (m/s)	1,03	1,2	1,37	1,54	1,72	1,89	2,06	2,23	2,4

Tabla 2 Velocidades y números de Froude estudiados (Abdull Ghani et al., 2006)

Geometría del área de estudio

El experimento fue llevado a cabo en un tanque con las siguientes medidas:

Longitud total	120 m
Longitud útil	90 m
Anchura	4 m
Profundidad máxima	2,5 m
Velocidad máxima	5 m/s
Profundidad de la plataforma aguas reducidas	0,3 m
Longitud de la plataforma aguas reducidas	16 m

Tabla 3 Características del tanque (Abdul Ghani et al., 2006)

Sensores de medición

Para la realización del ensayo se emplearon cuatro sensores. Estos dispositivos fueron situados en la zona del tanque correspondiente a la plataforma de aguas reducidas (profundidad 0,30 m) y a una distancia de 7,30 metros desde la entrada a dicha zona. El objetivo que se perseguía era su colocación en la ubicación donde se alcanzase la mayor altura de ola al paso de la embarcación.

En la siguiente tabla se indica la distancia a la que los sensores se colocan con respecto a la línea de navegación:

Sensor 1	0,80 m
Sensor 2	1,00 m
Sensor 3	1,20 m
Sensor 4	1,40 m

Tabla 4 Ubicación de los sensores (Abdul Ghani et al., 2006)

A continuación se muestra un esquema con la disposición de los sensores para la medida del oleaje generado por el paso de la embarcación:

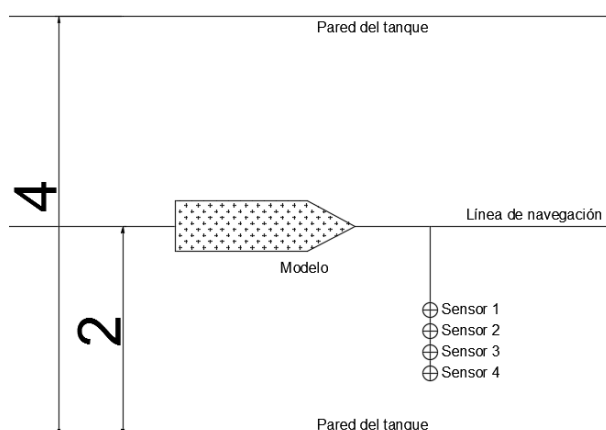


Figura 21 Disposición de los sensores en el tanque (Abdul Ghani et al, 2006)

Características de la embarcación empleada

Para el ensayo se empleó un modelo reducido a escala 1:8.75 cuyas principales características geométricas, así como las del barco a escala real, aparecen recogidas en la siguiente tabla:

	Modelo	Barco real
LOA (m)	1,71	15
LBP (m)	1,44	12,6
LWL (m)	1,51	13,2
Manga (m)	0,48	4,2
Calado a mitad de embarcación (m)	0,111	0,975
Calado en proa (m)	0,119	1,038
Volumen desplazado (m3)	0,02926	19,6
Escala	1:8,75	

Tabla 5 Características de la embarcación empleada (Abdul Ghani et al, 2006)

Resultados presentados en el documento

En el documento original se recoge en forma de tabla los resultados obtenidos de los experimentos para cada número de Froude, se muestra la tabla original a continuación:

	probe 1 $y/L = 0.53$	probe 2 $y/L = 0.66$	probe 3 $y/L = 0.79$	probe 4 $y/L = 0.93$
F_{nh}	Hmax (mm)	Hmax (mm)	Hmax (mm)	Hmax (mm)
0.6	9.86	9.18	7.65	6.19
0.7	18.78	17.26	15.21	13.32
0.8	31.49	29.62	27.25	23.34
0.9	44.72	42.43	39.23	35.14
1.0	35.27	33.13	30.88	26.75
1.1	33.15	31.02	27.53	23.97
1.2	35.86	32.84	29.97	25.83
1.3	36.83	33.58	30.34	26.36
1.4	36.97	35.84	34.86	32.92

Figura 22 Resultados presentado en el documento original (Abdul Ghani et al, 2006)

Datos del modelo numérico

Geometría del área de estudio

Para representar el ensayo descrito se ha decidido disponer un dominio de las siguientes características:

- Longitud: 40,00 metros
- Anchura: 4,00 metros
- Profundidad: 0,30 metros

Dado que la medida se realiza en la zona del tanque correspondiente a aguas someras, en el modelo se considerará una profundidad constante e igual a la de dicha zona (0,30 metros).

Por otro lado, dado que interesa conocer el efecto causado por el oleaje en los sensores y que estos se situarán a una distancia de 15 metros desde el extremo del dominio (se especificará más adelante), no se representarán los 120 metros reales sino 40, ahorrando tiempo de computación.

En lo que respecta al tamaño de malla, se ha decidido colocar una dimensión de celda de 0,10 metros, siendo igual en ambas direcciones ($Dx=Dy$). Así pues, el tamaño del dominio es de 400 x 40.

Finalmente, para minimizar cuanto más posible el efecto de reflexión generado por las paredes del dominio se ha colocado un tamaño de esponja de 0,55 metros.

Se muestra una tabla resumen con las dimensiones consideradas para la validación:

Longitud (m)	40
Anchura (m)	4
Profundidad (m)	0,3

Dx	0,1
Dy	0,1
M	400
N	40
Esponja Este (m)	0,55
Esponja Norte (m)	0,55
Esponja Oeste (m)	0,55
Esponja Sur (m)	0,55

Tabla 6 Caso calibración nº1 - Características del dominio de simulación

A continuación se muestra en esquema global del dominio introducido en el modelo numérico:

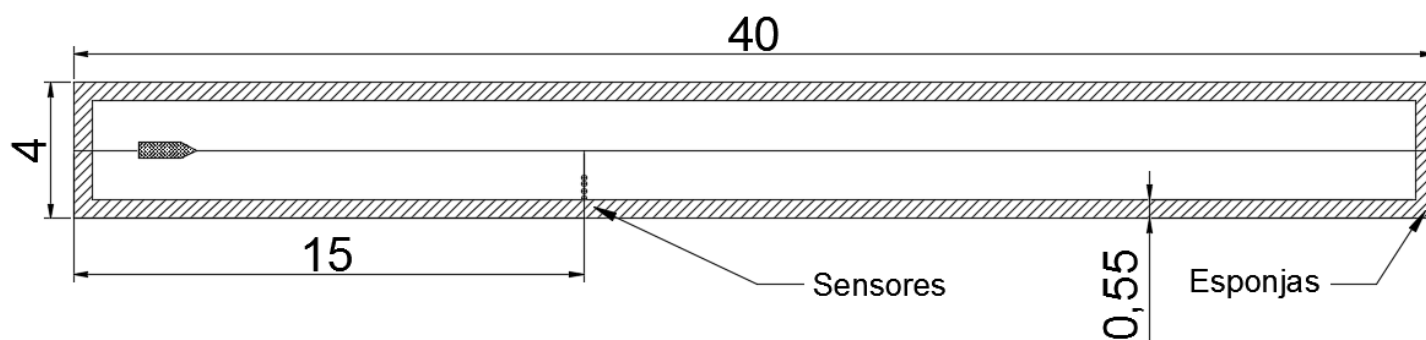


Figura 23 Caso calibración nº1 - Esquema global del contorno en el modelo numérico

Ubicación de los sensores

Los sensores se situarán a una distancia de 15 metros con respecto al lado oeste del dominio. Se disponen cuatro sensores tal y como se hizo en el ensayo real, manteniendo las mismas distancias que en el laboratorio a la línea de navegación.

La posición de los sensores con respecto al origen de coordenadas teniendo en cuenta el tamaño de celda dispuesto es la siguiente:

	X	Y
Sensor 1	150	12
Sensor 2	150	10
Sensor 3	150	8
Sensor 4	150	6

Tabla 7 Caso calibración nº1 - Ubicación sensores en el dominio

Resultados

Del rango de velocidades de las que se obtuvieron resultados en el laboratorio, se simularán aquellos casos que van desde un $F = 0,60$ hasta un $F = 1,20$.

F	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
V (m/s)	1,03	1,2	1,37	1,54	1,72	1,89	2,06

Tabla 8 Caso calibración nº1 - Velocidades contempladas en la simulación

A continuación se muestran los resultados finales obtenidos en cada uno de los sensores. Se obtienen cuatro gráficas, una para cada uno de ellos, donde aparece representada la altura de ola máxima obtenida en el laboratorio y la altura de ola máxima obtenida en la simulación con respecto al número de Froude. Para la altura de ola máxima se considerarán pasos ascendentes por cero:

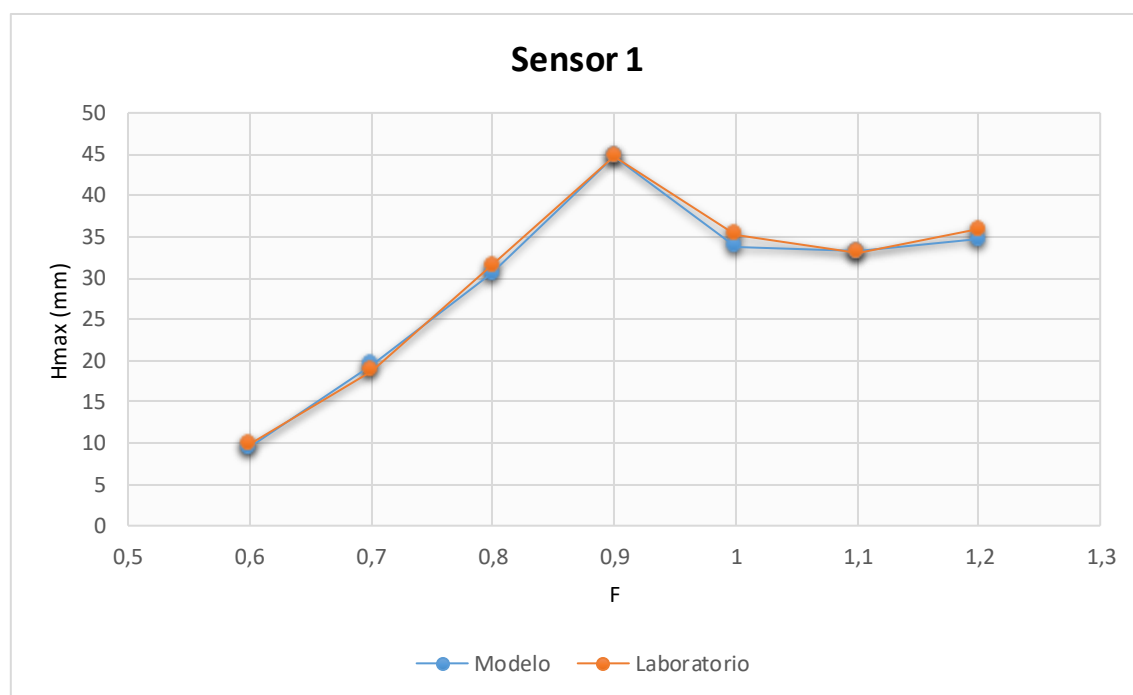


Gráfico 1 Caso calibración nº1 – Sensor 1 (0,80 m)

Sensor 1			
F	H ₁ Modelo (mm)	H ₁ Laboratorio (mm)	Error (%)
0,6	9,513	9,860	3,518
0,7	19,581	18,780	4,265
0,8	30,536	31,490	3,030
0,9	44,722	44,720	0,004
1,0	33,825	35,270	4,097
1,1	33,258	33,150	0,326
1,2	34,701	35,860	3,232

Tabla 9 Caso calibración nº1 – Sensor 1 (0,80 m)

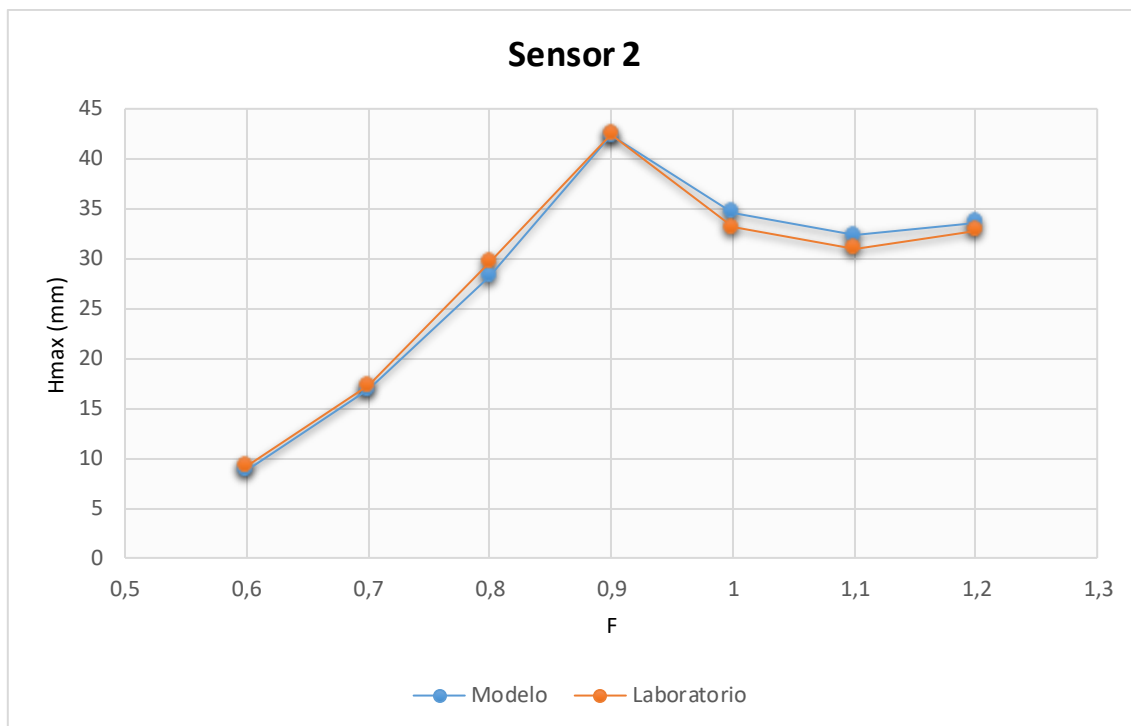


Gráfico 2 Caso calibración nº1 – Sensor 2 (1,00 m)

Sensor 2			
F	H ₂ Modelo (mm)	H ₂ Laboratorio (mm)	Error (%)
0,6	8,757	9,180	4,613
0,7	16,926	17,260	1,935
0,8	28,175	29,620	4,878
0,9	42,354	42,430	0,179
1,0	34,649	33,130	4,585
1,1	32,331	31,020	4,226
1,2	33,587	32,84	2,275

Tabla 10 Caso calibración nº1 – Sensor 2 (1,00 m)

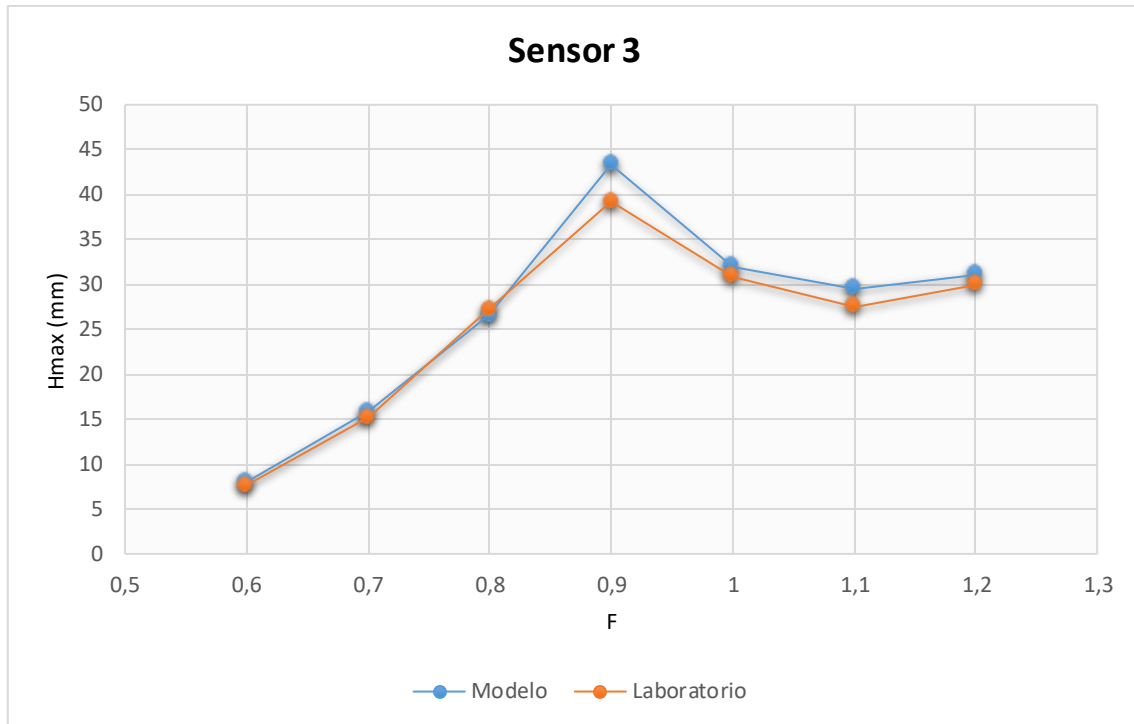


Gráfico 3 Caso calibración nº1 – Sensor 3 (1,20 m)

Sensor 3			
F	H ₃ Modelo (mm)	H ₃ Laboratorio (mm)	Error (%)
0,6	8,001	7,650	4,584
0,7	15,893	15,210	4,490
0,8	26,554	27,250	2,554
0,9	43,346	39,230	10,492
1,0	32,046	30,880	3,776
1,1	29,524	27,530	7,243
1,2	31,153	29,97	3,947

Tabla 11 Caso calibración nº1 – Sensor 3 (1,20 m)

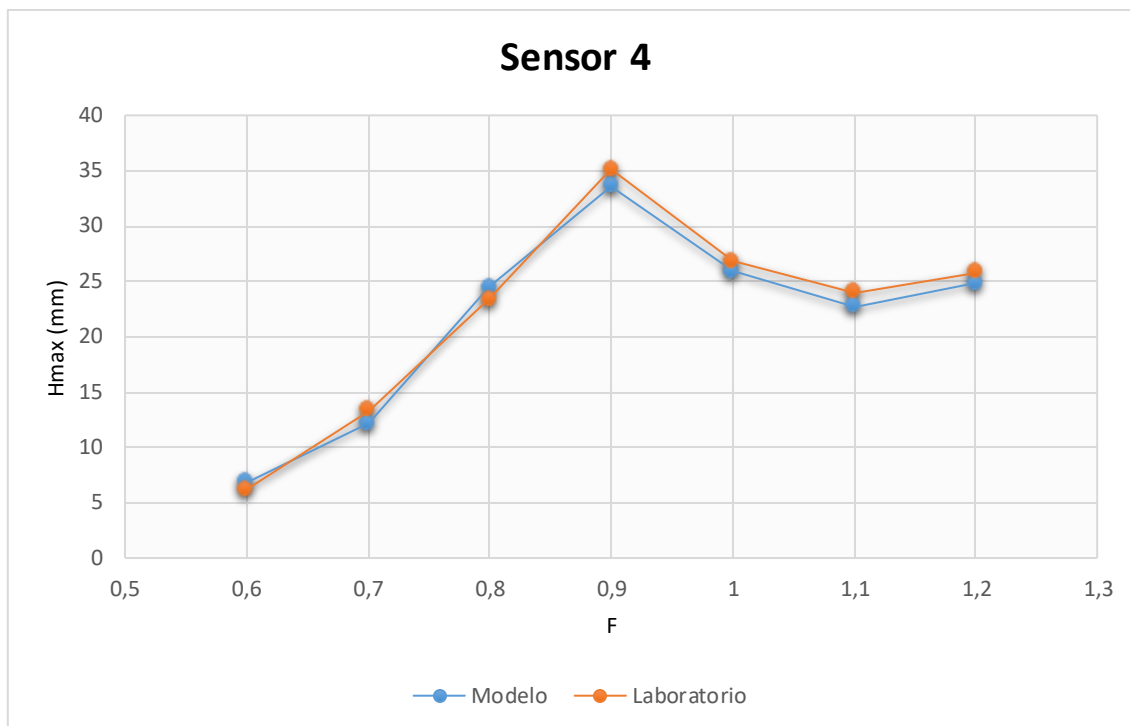


Gráfico 4 Caso calibración nº1 – Sensor 4 (1,40 m)

Sensor 4			
F	H ₄ Modelo (mm)	H ₄ Laboratorio (mm)	Error (%)
0,6	6,808	6,190	9,971
0,7	12,114	13,320	9,054
0,8	24,481	23,340	4,889
0,9	33,573	35,140	4,459
1,0	25,900	26,750	3,178
1,1	22,751	23,970	5,086
1,2	24,840	25,83	3,833

Tabla 12 Caso calibración nº1 – Sensor 4 (1,40 m)

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los coeficientes de calibración (alpha, beta y gamma) para la que se han obtenido los resultados expuestos anteriormente:

F	α	β	γ
0,6	0,660	1,000	1,900
0,7	0,706	1,000	1,641
0,8	0,915	1,000	1,055
0,9	1,870	1,000	1,080
1	2,520	1,000	1,180
1,1	2,835	1,000	0,910
1,2	2,900	1,000	0,850

Tabla 13 Caso calibración nº1 – Coeficientes de calibración

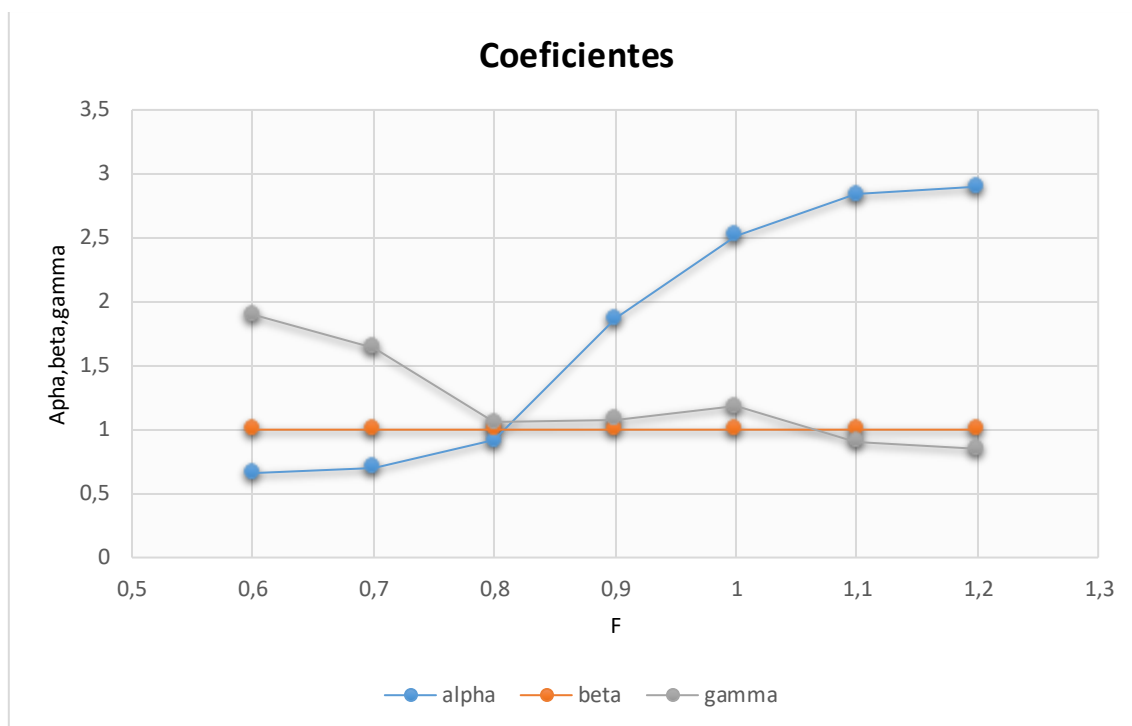


Gráfico 5 Caso calibración nº1 – Coeficientes de calibración

Se muestran dos capturas obtenidas de la renderización del modelo:

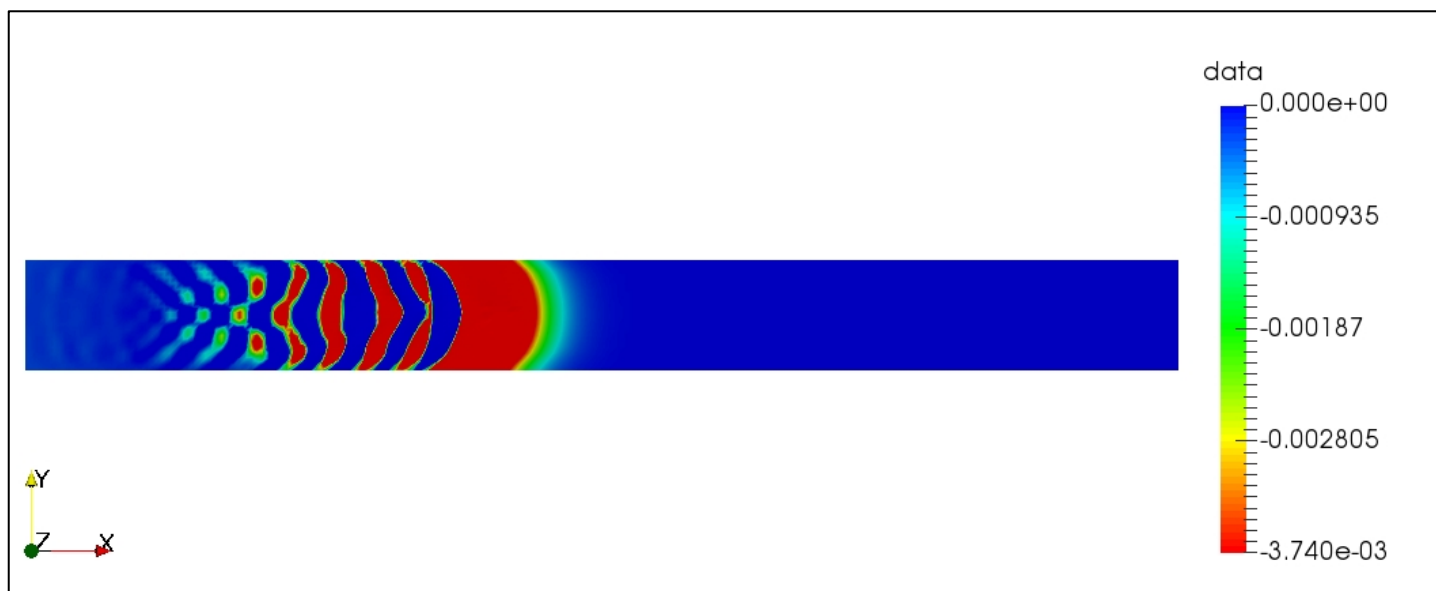


Figura 24 Caso calibración nº1 - Renderización del modelo - $F=0.90$

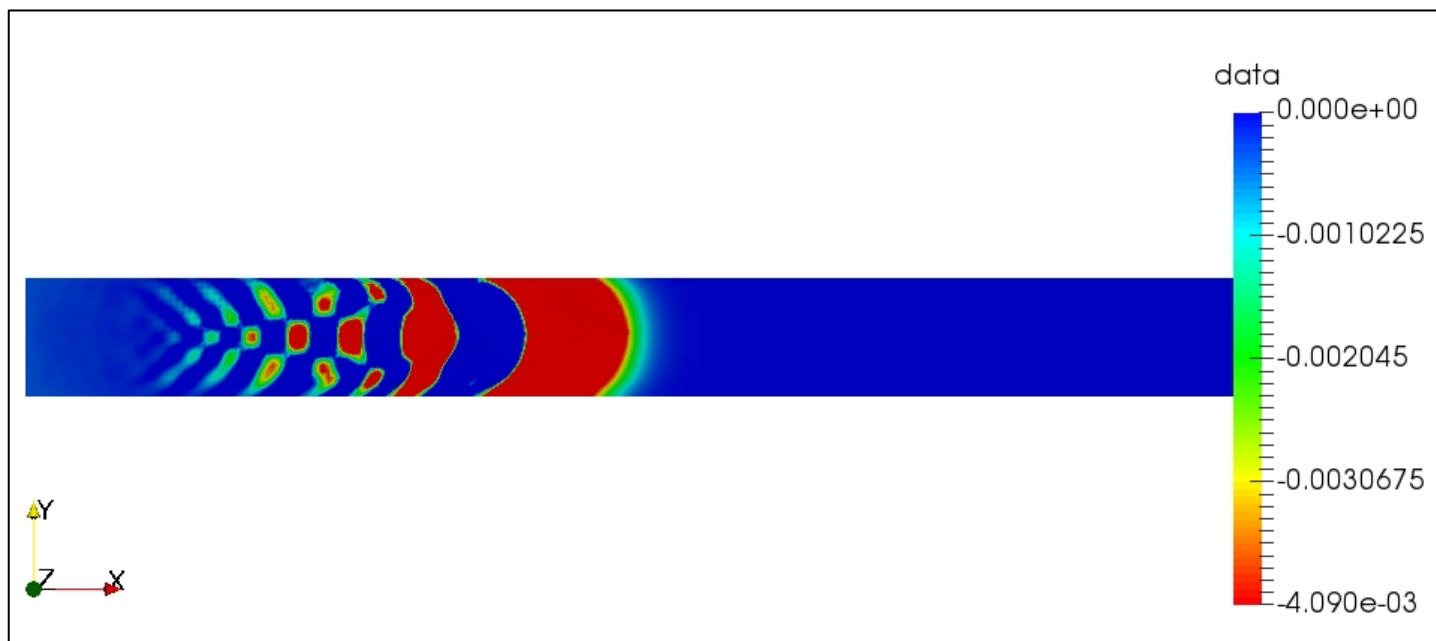


Figura 25 Caso calibración nº1 - Renderización del modelo - $F=1.00$

A continuación quedan recogidos todos los ensayos realizados para cada uno de los casos, es decir, para cada número de Froude:

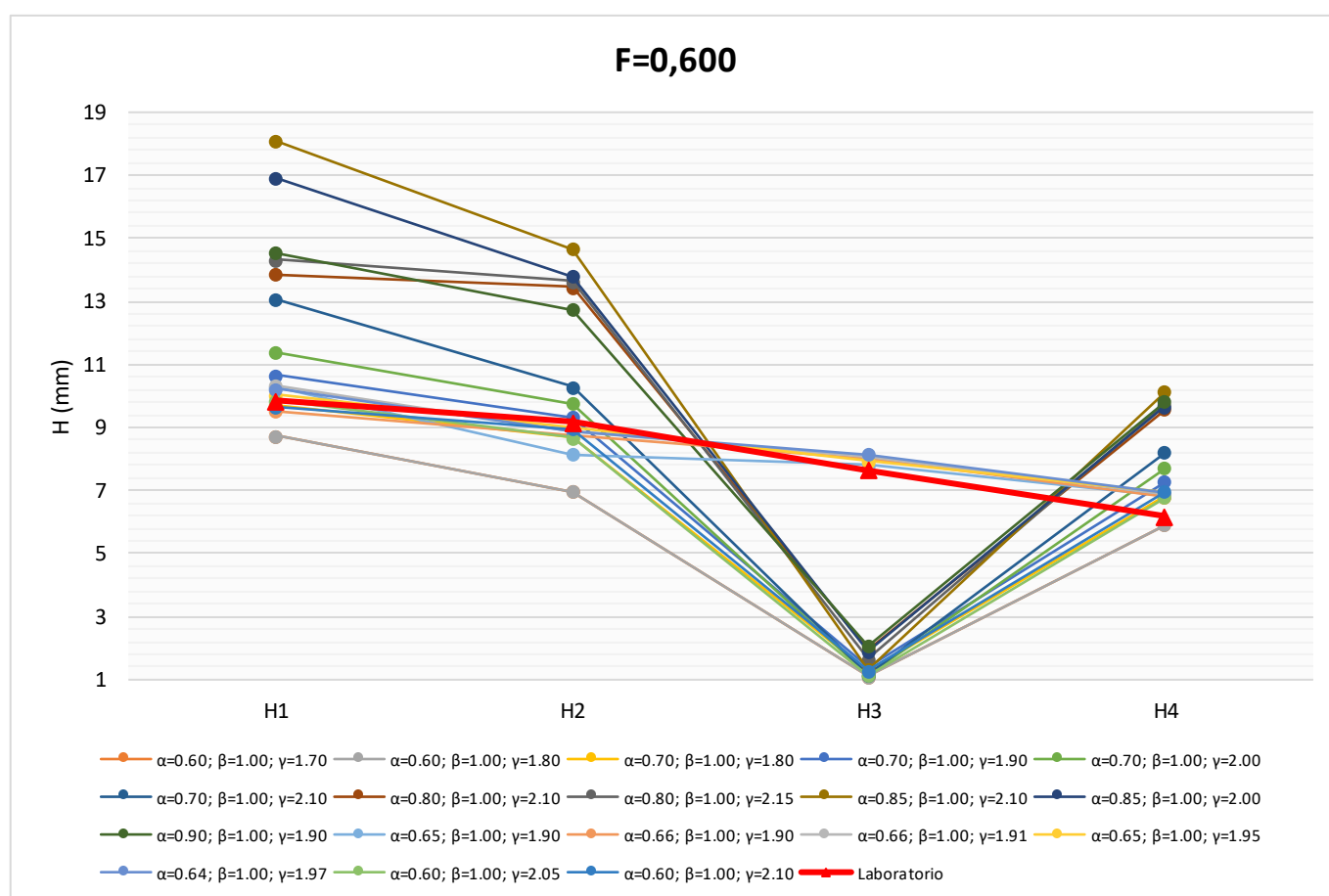


Gráfico 6 Caso calibración nº1 – Total ensayos $F=0,600$

alfa	0,600	0,600	0,700	0,700	0,700	0,700	0,800	0,800	0,850	0,850
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,700	1,800	1,800	1,900	2,000	2,100	2,100	2,150	2,100	2,000
H1 (mm)	8,065	8,748	9,704	10,672	11,380	13,064	13,845	14,337	18,083	16,911
H2 (mm)	6,869	6,956	8,716	9,342	9,766	10,286	13,449	13,634	14,669	13,789
H3 (mm)	1,325	1,119	1,277	1,401	1,151	1,163	1,946	1,669	1,317	1,905
H4 (mm)	5,500	5,909	6,812	7,272	7,721	8,207	9,577	9,745	10,137	9,684
e1 (mm)	-1,796	-1,112	-0,156	0,812	1,520	3,204	3,985	4,477	8,223	7,051
e2 (mm)	-2,311	-2,224	-0,464	0,162	0,586	1,106	4,269	4,454	5,489	4,609
e3 (mm)	-6,325	-6,531	-6,373	-6,249	-6,499	-6,487	-5,704	-5,981	-6,334	-5,745
e4 (mm)	-0,690	-0,281	0,622	1,082	1,531	2,017	3,387	3,555	3,947	3,494
error medio (mm)	2,780	2,537	1,903	2,076	2,534	3,204	4,336	4,617	5,998	5,225
e1 (%)	18,210	11,275	1,578	8,235	15,416	32,495	40,416	45,406	83,398	71,511
e2 (%)	25,172	24,224	5,051	1,765	6,385	12,048	46,503	48,519	59,793	50,207
e3 (%)	82,680	85,367	83,302	81,684	84,953	84,800	74,566	78,183	82,791	75,103
e4 (%)	11,149	4,533	10,042	17,472	24,738	32,591	54,724	57,438	63,764	56,439
error medio (%)	34,303	31,350	24,993	27,289	32,873	40,484	54,052	57,386	72,436	63,315

alfa	0,900	0,650	0,660	0,660	0,650	0,640	0,600	0,600
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,900	1,900	1,900	1,910	1,950	1,970	2,050	2,100
H1 (mm)	14,528	10,281	9,513	10,328	10,049	10,237	9,863	9,654
H2 (mm)	12,739	8,163	8,757	8,880	9,011	8,877	8,681	8,958
H3 (mm)	2,066	7,820	8,001	8,094	7,939	8,153	1,129	1,302
H4 (mm)	9,810	6,834	6,807	6,887	6,948	6,931	6,775	6,956
e1 (mm)	4,668	0,421	-0,347	0,468	0,189	0,377	0,003	-0,207
e2 (mm)	3,559	-1,017	-0,423	-0,300	-0,169	-0,303	-0,499	-0,222
e3 (mm)	-5,584	0,170	0,351	0,444	0,289	0,503	-6,521	-6,348
e4 (mm)	3,620	0,644	0,617	0,697	0,758	0,741	0,585	0,765
error medio (mm)	4,358	0,563	0,435	0,477	0,352	0,481	1,902	1,886
e1 (%)	47,343	4,270	3,518	4,746	1,917	3,824	0,028	2,094
e2 (%)	38,769	11,078	4,613	3,268	1,844	3,300	5,434	2,419
e3 (%)	72,992	2,220	4,584	5,808	3,783	6,574	85,246	82,984
e4 (%)	58,486	10,409	9,971	11,254	12,252	11,968	9,446	12,367
error medio (%)	54,398	6,994	5,672	6,269	4,949	6,416	25,038	24,966

Tabla 14 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,600

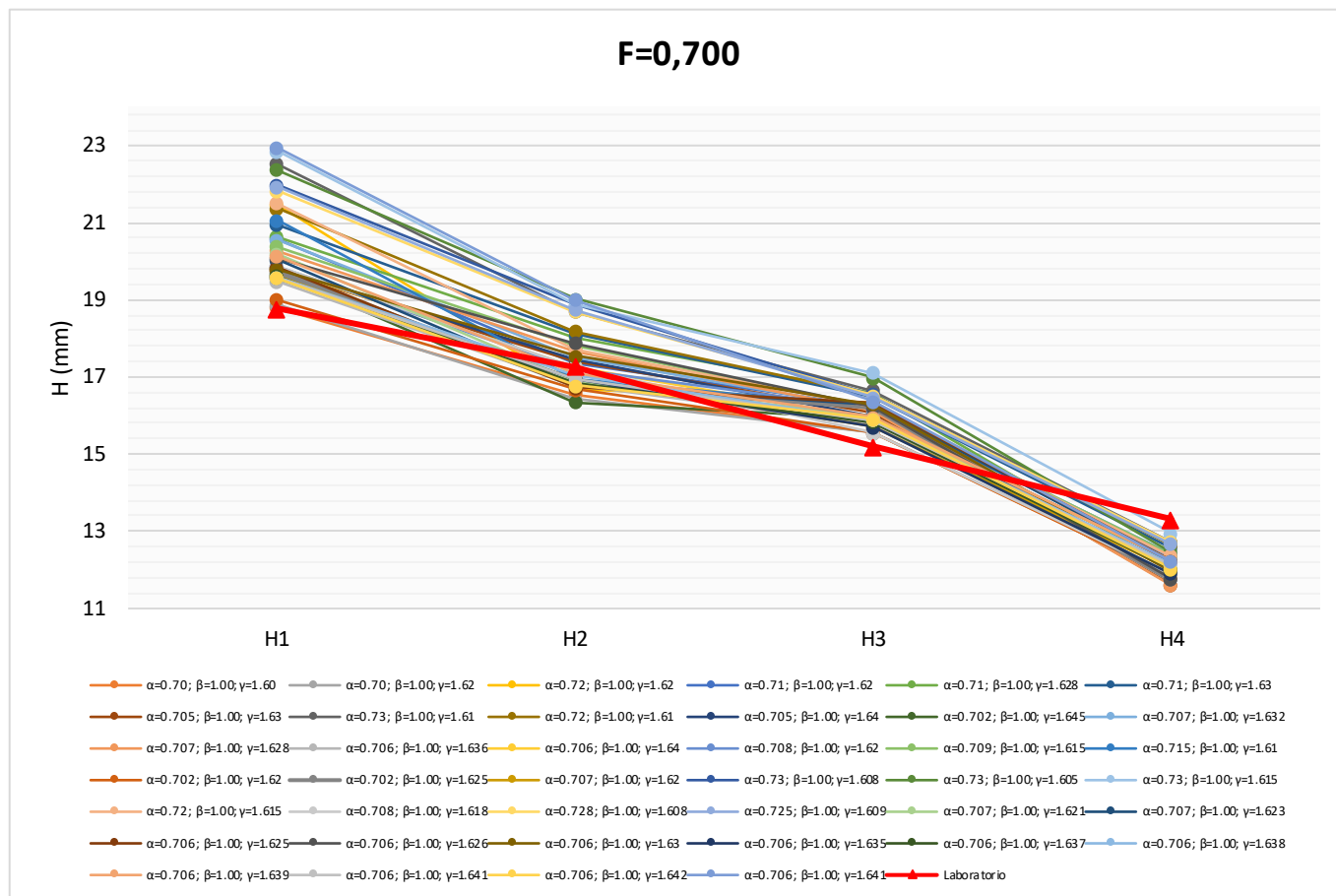


Gráfico 7 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,700

alfa	0,700	0,700	0,720	0,710	0,710	0,710	0,705	0,730	0,720	0,705
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,600	1,620	1,620	1,620	1,628	1,630	1,630	1,610	1,610	1,640
H1 (mm)	18,791	18,881	21,470	20,574	20,632	20,946	19,760	22,518	21,379	19,817
H2 (mm)	16,560	16,431	16,709	17,345	18,019	18,119	17,417	18,698	18,185	17,472
H3 (mm)	15,563	15,547	16,355	16,244	16,585	16,469	16,062	16,651	16,537	16,001
H4 (mm)	11,831	11,888	12,304	12,395	12,030	12,568	11,626	12,719	12,648	12,236
e1 (mm)	0,011	0,101	2,690	1,794	1,852	2,166	0,980	3,738	2,599	1,037
e2 (mm)	-0,700	-0,829	-0,551	0,085	0,759	0,859	0,157	1,438	0,925	0,212
e3 (mm)	0,353	0,337	1,145	1,034	1,375	1,259	0,852	1,441	1,327	0,791
e4 (mm)	-1,489	-1,432	-1,016	-0,925	-1,290	-0,752	-1,694	-0,601	-0,672	-1,084
error medio (mm)	0,638	0,675	1,351	0,959	1,319	1,259	0,921	1,805	1,381	0,781
e1 (%)	0,059	0,538	14,324	9,553	9,862	11,534	5,218	19,904	13,839	5,522
e2 (%)	4,056	4,803	3,192	0,492	4,397	4,977	0,910	8,331	5,359	1,228
e3 (%)	2,321	2,216	7,528	6,798	9,040	8,277	5,602	9,474	8,725	5,201
e4 (%)	11,179	10,751	7,628	6,944	9,685	5,646	12,718	4,512	5,045	8,138
error medio (%)	4,403	4,577	8,168	5,947	8,246	7,608	6,112	10,555	8,242	5,022

alfa	0,702	0,707	0,707	0,706	0,706	0,708	0,709	0,715	0,702	0,702
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,645	1,632	1,628	1,636	1,640	1,620	1,615	1,610	1,620	1,625
H1 (mm)	19,681	20,559	20,265	19,481	19,828	19,866	20,372	21,071	18,999	19,731
H2 (mm)	16,346	17,511	17,682	16,819	17,260	17,221	17,803	16,972	16,677	16,789
H3 (mm)	15,904	16,170	16,133	15,773	15,928	16,159	16,240	16,223	15,588	16,227
H4 (mm)	11,854	12,420	11,605	11,887	12,252	12,328	12,402	12,246	11,837	11,752
e1 (mm)	0,901	1,779	1,485	0,701	1,048	1,086	1,592	2,291	0,219	0,951
e2 (mm)	-0,914	0,251	0,422	-0,441	0,000	-0,039	0,543	-0,288	-0,583	-0,471
e3 (mm)	0,694	0,960	0,923	0,563	0,718	0,949	1,030	1,013	0,378	1,017
e4 (mm)	-1,466	-0,900	-1,715	-1,433	-1,068	-0,992	-0,918	-1,074	-1,483	-1,568
error medio (mm)	0,994	0,973	1,136	0,785	0,708	0,767	1,021	1,167	0,666	1,002
e1 (%)	4,798	9,473	7,907	3,733	5,580	5,783	8,477	12,199	1,166	5,064
e2 (%)	5,295	1,454	2,445	2,555	0,000	0,226	3,146	1,669	3,378	2,729
e3 (%)	4,563	6,312	6,068	3,702	4,721	6,239	6,772	6,660	2,485	6,686
e4 (%)	11,006	6,757	12,875	10,758	8,018	7,447	6,892	8,063	11,134	11,772
error medio (%)	6,415	5,999	7,324	5,187	4,580	4,924	6,322	7,148	4,541	6,563

alfa	0,707	0,730	0,730	0,730	0,720	0,708	0,728	0,725	0,707	0,707
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,620	1,608	1,605	1,615	1,615	1,618	1,608	1,609	1,621	1,623
H1 (mm)	19,614	21,984	22,361	22,863	21,496	19,868	21,833	21,939	20,192	20,048
H2 (mm)	16,966	18,871	19,026	18,881	17,692	17,267	18,705	18,748	16,893	16,815
H3 (mm)	15,718	16,561	16,979	17,101	16,255	15,564	16,524	16,479	15,954	16,274
H4 (mm)	12,008	12,715	12,458	12,963	12,354	11,883	12,716	12,668	12,032	12,209
e1 (mm)	0,834	3,204	3,581	4,083	2,716	1,088	3,053	3,159	1,412	1,268
e2 (mm)	-0,294	1,611	1,766	1,621	0,432	0,007	1,445	1,488	-0,367	-0,445
e3 (mm)	0,508	1,351	1,769	1,891	1,045	0,354	1,314	1,269	0,744	1,064
e4 (mm)	-1,312	-0,605	-0,862	-0,357	-0,966	-1,437	-0,604	-0,652	-1,288	-1,111
error medio (mm)	0,737	1,693	1,995	1,988	1,290	0,721	1,604	1,642	0,953	0,972
e1 (%)	4,441	17,061	19,068	21,741	14,462	5,793	16,257	16,821	7,519	6,752
e2 (%)	1,703	9,334	10,232	9,392	2,503	0,041	8,372	8,621	2,126	2,578
e3 (%)	3,340	8,882	11,631	12,433	6,870	2,327	8,639	8,343	4,892	6,995
e4 (%)	9,850	4,542	6,471	2,680	7,252	10,788	4,535	4,895	9,670	8,341
error medio (%)	4,834	9,955	11,850	11,561	7,772	4,737	9,451	9,670	6,052	6,167

alfa	0,706	0,706	0,706	0,706	0,706	0,706	0,706	0,706	0,706	0,706
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,200
gamma	1,625	1,626	1,630	1,635	1,637	1,638	1,639	1,641	1,642	1,641
H1 (mm)	19,846	20,080	19,790	19,556	19,601	19,588	20,130	19,581	19,556	22,948
H2 (mm)	16,728	17,878	17,540	16,957	16,848	17,058	17,087	16,926	16,788	19,002
H3 (mm)	16,328	16,228	16,287	15,716	15,842	15,888	15,956	15,893	15,922	16,375
H4 (mm)	12,247	11,777	11,960	11,898	12,036	12,158	12,244	12,114	12,046	12,224
e1 (mm)	1,066	1,300	1,010	0,776	0,821	0,808	1,350	0,801	0,776	4,168
e2 (mm)	-0,532	0,618	0,280	-0,303	-0,412	-0,202	-0,173	-0,334	-0,472	1,742
e3 (mm)	1,118	1,018	1,077	0,506	0,632	0,678	0,746	0,683	0,712	1,165
e4 (mm)	-1,073	-1,543	-1,360	-1,422	-1,284	-1,162	-1,076	-1,206	-1,274	-1,096
error medio (mm)	0,947	1,120	0,932	0,752	0,787	0,713	0,836	0,756	0,809	2,043
e1 (%)	5,676	6,922	5,378	4,132	4,372	4,302	7,188	4,265	4,132	22,194
e2 (%)	3,082	3,581	1,622	1,756	2,387	1,170	1,002	1,935	2,735	10,093
e3 (%)	7,350	6,693	7,081	3,327	4,155	4,458	4,905	4,490	4,681	7,659
e4 (%)	8,056	11,584	10,210	10,676	9,640	8,724	8,078	9,054	9,565	8,228
error medio (%)	6,041	7,195	6,073	4,972	5,138	4,664	5,293	4,936	5,278	12,044

Tabla 15 Caso calibración nº1 – Total ensayos $F=0,700$

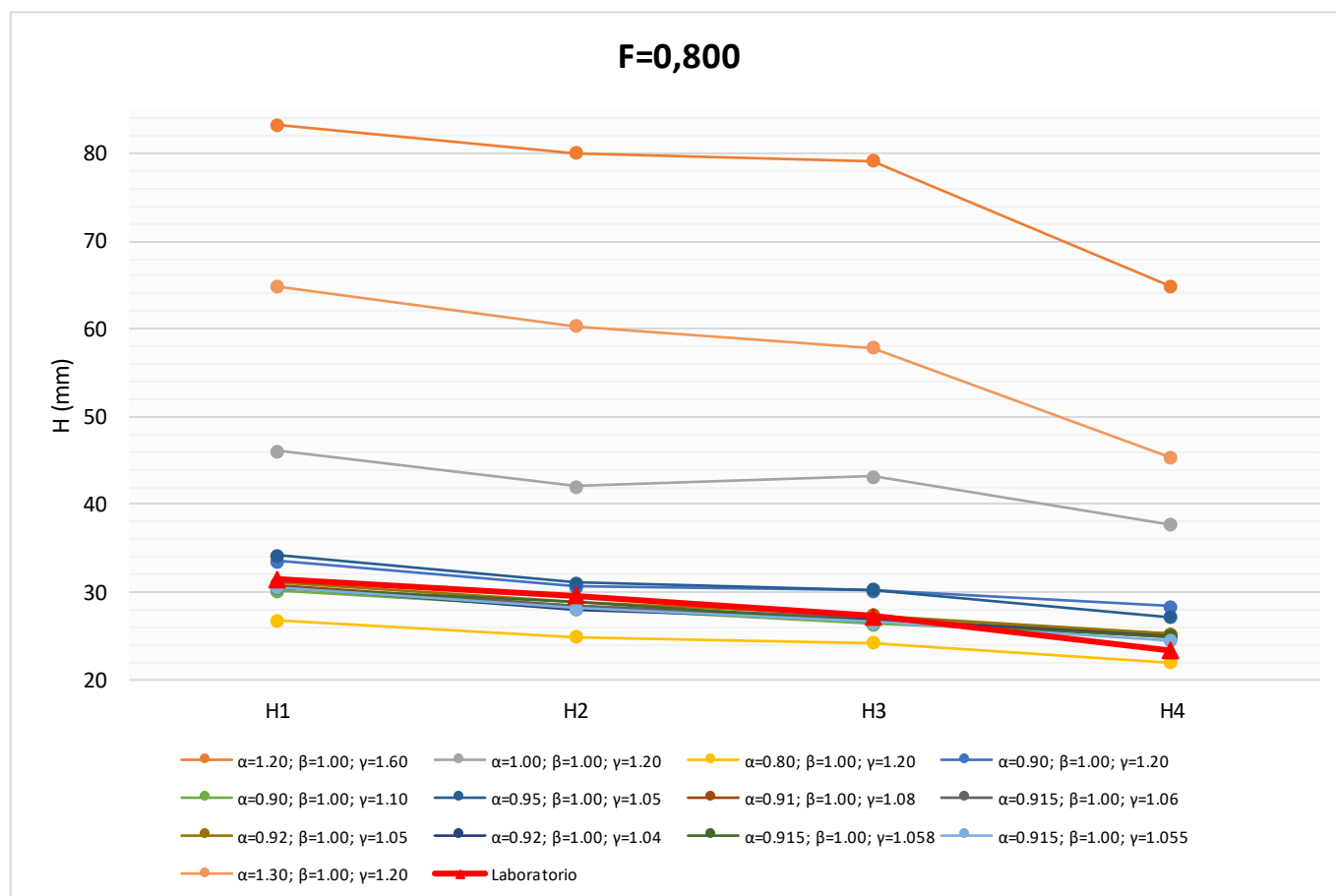


Gráfico 8 Caso calibración nº1 – Total ensayos $F=0,800$

alfa	1,200	1,000	0,800	0,900	0,900	0,950	0,910	0,915	0,920	0,920
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,600	1,200	1,200	1,200	1,100	1,050	1,080	1,060	1,050	1,040
H1 (mm)	83,236	46,128	26,792	33,586	30,191	34,227	30,788	30,558	31,103	30,608
H2 (mm)	80,069	42,084	24,966	30,578	28,202	31,081	28,409	28,405	28,829	28,041
H3 (mm)	79,183	43,219	24,295	30,139	26,358	30,248	26,984	27,094	27,375	26,910
H4 (mm)	64,822	37,682	21,956	28,435	25,103	27,124	25,274	24,841	25,283	24,981
e1 (mm)	51,746	14,638	-4,698	2,096	-1,299	2,737	-0,702	-0,932	-0,387	-0,882
e2 (mm)	50,449	12,464	-4,654	0,958	-1,418	1,461	-1,211	-1,215	-0,791	-1,579
e3 (mm)	51,933	15,969	-2,955	2,889	-0,892	2,998	-0,266	-0,156	0,125	-0,340
e4 (mm)	41,482	14,342	-1,384	5,095	1,763	3,784	1,934	1,501	1,943	1,641
error medio (mm)	48,903	14,353	3,423	2,760	1,343	2,745	1,028	0,951	0,812	1,111
e1 (%)	164,325	46,485	14,919	6,656	4,125	8,692	2,229	2,960	1,229	2,801
e2 (%)	170,321	42,080	15,712	3,234	4,787	4,932	4,088	4,102	2,670	5,331
e3 (%)	190,580	58,602	10,844	10,602	3,273	11,002	0,976	0,572	0,459	1,248
e4 (%)	177,729	61,448	5,930	21,829	7,554	16,213	8,286	6,431	8,325	7,031
error medio (%)	175,739	52,154	11,851	10,580	4,935	10,210	3,895	3,516	3,171	4,103

alfa	0,915	0,915	1,300
beta	1,000	1,000	1,000
gamma	1,058	1,055	1,200
H1 (mm)	30,480	30,536	64,807
H2 (mm)	28,902	28,175	60,365
H3 (mm)	26,725	26,554	57,884
H4 (mm)	24,916	24,481	45,319
e1 (mm)	-1,010	-0,954	33,317
e2 (mm)	-0,718	-1,445	30,745
e3 (mm)	-0,525	-0,696	30,634
e4 (mm)	1,576	1,141	21,979
error medio (mm)	0,957	1,059	29,169
e1 (%)	3,207	3,030	105,802
e2 (%)	2,424	4,878	103,798
e3 (%)	1,927	2,554	112,418
e4 (%)	6,752	4,889	94,169
error medio (%)	3,578	3,838	104,047

Tabla 16 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,800

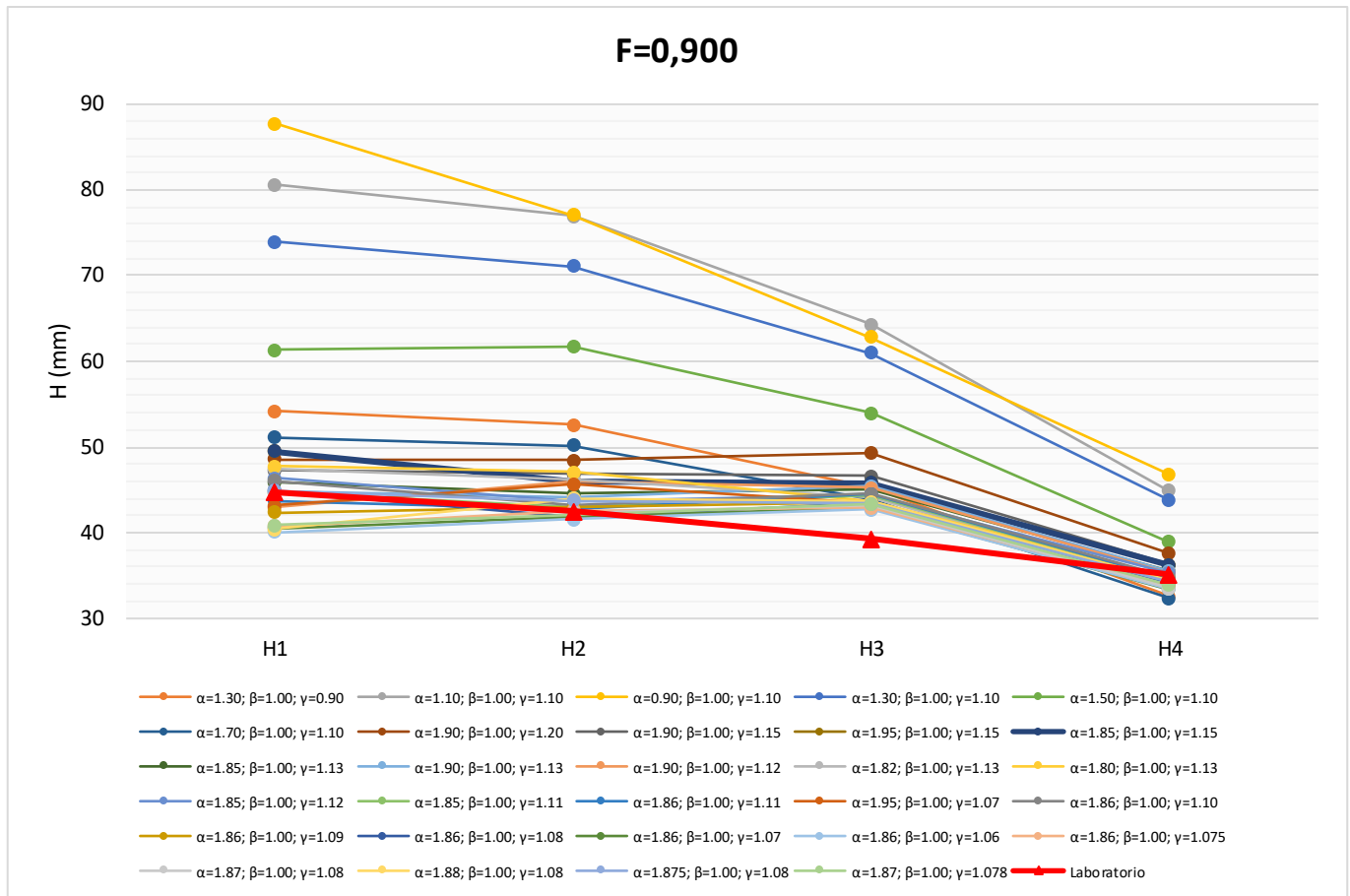


Gráfico 9 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,900

alfa	1,300	1,100	0,900	1,300	1,500	1,700	1,900	1,900	1,950	1,850
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,900	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,200	1,150	1,150	1,150
H1 (mm)	54,232	80,635	87,769	73,982	61,277	51,098	48,596	47,319	47,673	49,436
H2 (mm)	52,560	76,929	77,047	71,136	61,716	50,207	48,412	46,827	48,527	46,042
H3 (mm)	45,284	64,263	62,795	60,951	53,960	43,893	49,304	46,593	48,161	45,849
H4 (mm)	32,635	44,846	46,808	43,813	38,883	32,378	37,600	36,334	36,187	36,226
e1 (mm)	9,512	35,915	43,049	29,262	16,557	6,378	3,876	2,599	2,953	4,716
e2 (mm)	10,130	34,499	34,617	28,706	19,286	7,777	5,982	4,397	6,097	3,612
e3 (mm)	6,054	25,033	23,565	21,721	14,730	4,663	10,074	7,363	8,931	6,619
e4 (mm)	-2,505	9,706	11,668	8,673	3,743	-2,762	2,460	1,194	1,047	1,086
error medio (mm)	7,050	26,288	28,225	22,091	13,579	5,395	5,598	3,888	4,757	4,008
e1 (%)	21,270	80,311	96,263	65,434	37,024	14,262	8,667	5,812	6,603	10,546
e2 (%)	23,875	81,308	81,586	67,655	45,454	18,329	14,099	10,363	14,370	8,513
e3 (%)	15,432	63,811	60,069	55,368	37,548	11,886	25,679	18,769	22,766	16,872
e4 (%)	7,129	27,621	33,204	24,681	10,652	7,860	7,001	3,398	2,980	3,090
error medio (%)	16,926	63,263	67,781	53,285	32,669	13,084	13,861	9,585	11,680	9,755

alfa	1,850	1,900	1,900	1,820	1,800	1,850	1,850	1,860	1,950	1,860
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,130	1,130	1,120	1,130	1,130	1,120	1,110	1,110	1,070	1,100
H1 (mm)	45,913	44,782	42,945	47,461	47,807	46,416	44,744	43,801	43,147	46,008
H2 (mm)	44,542	44,079	46,001	46,121	47,078	43,739	43,108	42,820	45,683	43,185
H3 (mm)	45,099	45,476	45,298	44,243	43,648	44,473	44,364	44,536	43,398	44,539
H4 (mm)	35,540	35,499	35,296	34,349	34,808	35,294	34,615	34,674	33,655	34,806
e1 (mm)	1,193	0,062	-1,775	2,741	3,087	1,696	0,024	-0,919	-1,573	1,288
e2 (mm)	2,112	1,649	3,571	3,691	4,648	1,309	0,678	0,390	3,253	0,755
e3 (mm)	5,869	6,246	6,068	5,013	4,418	5,243	5,134	5,306	4,168	5,309
e4 (mm)	0,400	0,359	0,156	-0,791	-0,332	0,154	-0,525	-0,466	-1,485	-0,334
error medio (mm)	2,394	2,079	2,893	3,059	3,121	2,101	1,590	1,770	2,620	1,922
e1 (%)	2,668	0,139	3,969	6,129	6,903	3,792	0,054	2,055	3,517	2,880
e2 (%)	4,978	3,886	8,416	8,699	10,955	3,085	1,598	0,919	7,667	1,779
e3 (%)	14,960	15,921	15,468	12,778	11,262	13,365	13,087	13,525	10,625	13,533
e4 (%)	1,138	1,022	0,444	2,251	0,945	0,438	1,494	1,326	4,226	0,950
error medio (%)	5,936	5,242	7,074	7,464	7,516	5,170	4,058	4,456	6,509	4,786

alfa	1,860	1,860	1,860	1,860	1,860	1,870	1,880	1,875	1,870
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,090	1,080	1,070	1,060	1,075	1,080	1,080	1,080	1,078
H1 (mm)	42,424	44,847	40,573	40,075	40,772	44,722	40,378	44,879	40,862
H2 (mm)	42,962	41,862	41,936	41,523	42,572	42,354	43,967	43,773	42,136
H3 (mm)	43,568	43,463	42,896	42,765	42,966	43,346	43,611	43,416	43,358
H4 (mm)	34,422	34,164	33,362	33,437	33,798	33,573	34,441	34,272	33,891
e1 (mm)	-2,296	0,127	-4,147	-4,645	-3,948	0,002	-4,342	0,159	-3,858
e2 (mm)	0,532	-0,568	-0,494	-0,907	0,142	-0,076	1,537	1,343	-0,294
e3 (mm)	4,338	4,233	3,666	3,535	3,736	4,116	4,381	4,186	4,128
e4 (mm)	-0,718	-0,976	-1,778	-1,703	-1,342	-1,567	-0,699	-0,868	-1,249
error medio (mm)	1,971	1,476	2,521	2,698	2,292	1,440	2,740	1,639	2,382
e1 (%)	5,134	0,284	9,273	10,387	8,828	0,004	9,709	0,356	8,627
e2 (%)	1,254	1,339	1,164	2,138	0,335	0,179	3,622	3,165	0,693
e3 (%)	11,058	10,790	9,345	9,011	9,523	10,492	11,167	10,670	10,523
e4 (%)	2,043	2,777	5,060	4,846	3,819	4,459	1,989	2,470	3,554
error medio (%)	4,872	3,798	6,211	6,595	5,626	3,784	6,622	4,165	5,849

Tabla 17 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=0,900

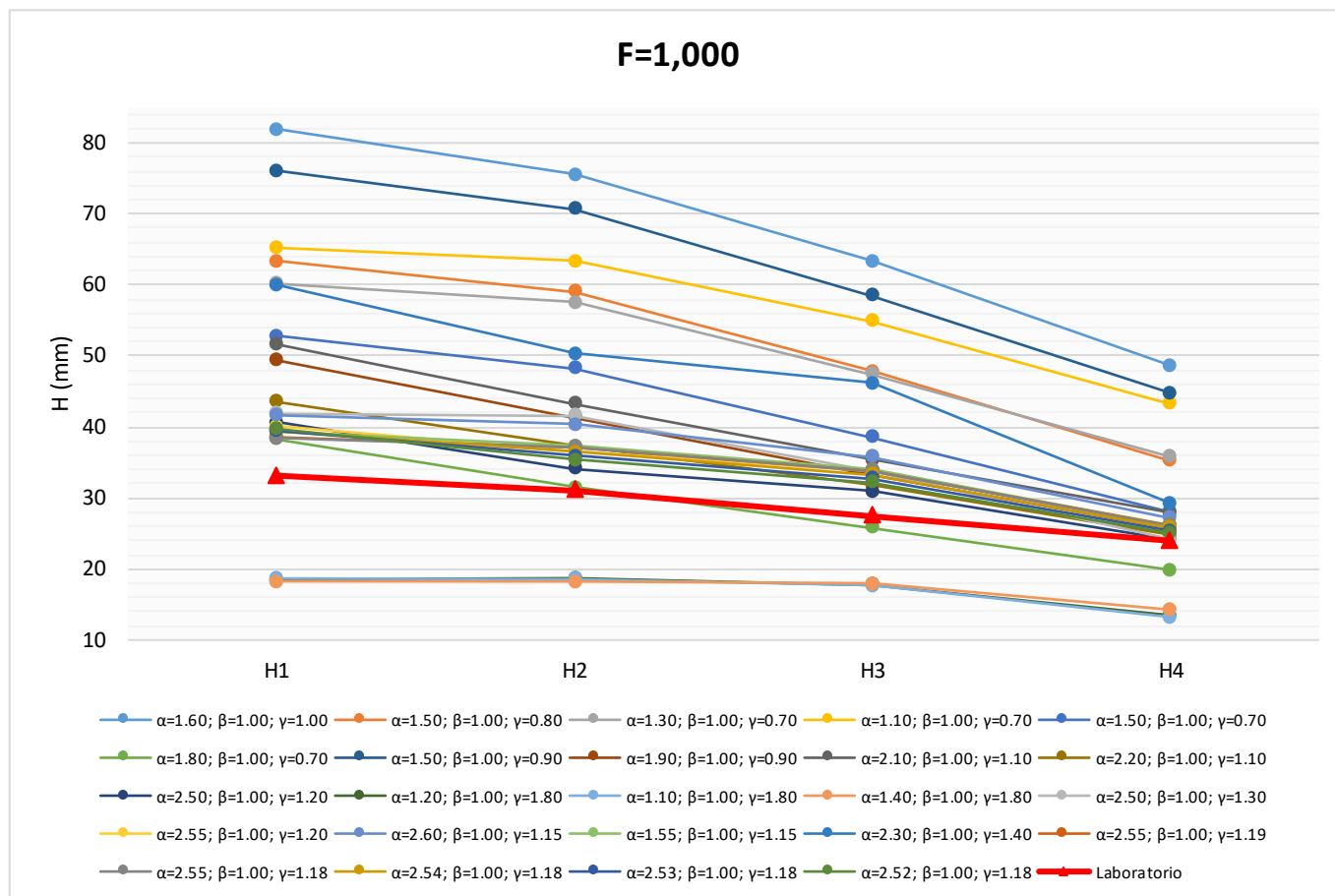


Gráfico 10 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,000

alfa	1,600	1,500	1,300	1,100	1,500	1,800	1,500	1,900	2,100	2,200
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,000	0,800	0,700	0,700	0,700	0,700	0,900	0,900	1,100	1,100
H1 (mm)	81,960	63,394	60,167	65,233	52,849	38,246	76,091	49,379	51,631	43,523
H2 (mm)	75,493	59,051	57,597	63,365	48,228	31,556	70,702	41,268	43,294	37,351
H3 (mm)	63,325	47,861	47,428	54,863	38,620	25,850	58,453	33,267	35,399	31,830
H4 (mm)	48,670	35,222	35,801	43,226	28,011	19,884	44,798	25,736	27,952	24,832
e1 (mm)	46,690	28,124	24,897	29,963	17,579	2,976	40,821	14,109	16,361	8,253
e2 (mm)	42,363	25,921	24,467	30,235	15,098	-1,574	37,572	8,138	10,164	4,221
e3 (mm)	32,445	16,981	16,548	23,983	7,740	-5,030	27,573	2,387	4,519	0,950
e4 (mm)	21,920	8,472	9,051	16,476	1,261	-6,866	18,048	-1,014	1,202	-1,918
error medio (mm)	35,855	19,875	18,741	25,164	10,420	4,112	31,004	6,412	8,062	3,836
e1 (%)	132,379	79,739	70,590	84,953	49,841	8,438	115,739	40,003	46,388	23,399
e2 (%)	127,869	78,240	73,851	91,262	45,572	4,751	113,408	24,564	30,679	12,741
e3 (%)	105,068	54,990	53,588	77,665	25,065	16,289	89,291	7,730	14,634	3,076
e4 (%)	81,944	31,671	33,836	61,593	4,714	25,667	67,469	3,791	4,493	7,170
error medio (%)	111,815	61,160	57,966	78,868	31,298	13,786	96,477	19,022	24,049	11,597

alfa	2,500	1,200	1,100	1,400	2,500	2,550	2,550	2,600	2,300	2,550
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,200	1,800	1,800	1,800	1,300	1,200	1,150	1,150	1,400	1,190
H1 (mm)	40,708	18,541	18,677	18,144	41,857	40,141	39,330	41,646	60,010	38,562
H2 (mm)	34,087	18,708	18,675	18,250	41,545	36,646	37,379	40,423	50,285	37,063
H3 (mm)	30,918	17,832	17,660	17,902	33,861	33,828	33,982	35,748	46,115	33,865
H4 (mm)	24,146	13,487	13,240	14,279	24,200	26,207	26,046	27,158	29,270	26,122
e1 (mm)	5,438	-16,729	-16,593	-17,126	6,587	4,871	4,060	6,376	24,740	3,292
e2 (mm)	0,957	-14,422	-14,455	-14,880	8,415	3,516	4,249	7,293	17,155	3,933
e3 (mm)	0,038	-13,048	-13,220	-12,978	2,981	2,948	3,102	4,868	15,235	2,985
e4 (mm)	-2,604	-13,263	-13,510	-12,471	-2,550	-0,543	-0,704	0,408	2,520	-0,628
error medio (mm)	2,259	14,366	14,445	14,364	5,133	2,970	3,029	4,736	14,913	2,710
e1 (%)	15,418	47,431	47,046	48,557	18,676	13,811	11,511	18,078	70,145	9,334
e2 (%)	2,889	43,532	43,631	44,914	25,400	10,613	12,825	22,013	51,781	11,871
e3 (%)	0,123	42,254	42,811	42,027	9,653	9,547	10,045	15,764	49,336	9,666
e4 (%)	9,735	49,581	50,505	46,621	9,533	2,030	2,632	1,525	9,421	2,348
error medio (%)	7,041	45,699	45,998	45,530	15,816	9,000	9,253	14,345	45,171	8,305

alfa	2,550	2,540	2,530	2,520
beta	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,180	1,180	1,180	1,180
H1 (mm)	38,468	39,400	39,469	39,724
H2 (mm)	37,245	36,485	35,928	35,430
H3 (mm)	33,805	33,239	32,689	32,260
H4 (mm)	26,085	25,777	25,379	25,080
e1 (mm)	3,198	4,130	4,199	4,454
e2 (mm)	4,115	3,355	2,798	2,300
e3 (mm)	2,925	2,359	1,809	1,380
e4 (mm)	-0,665	-0,973	-1,371	-1,670
error medio (mm)	2,726	2,704	2,544	2,451
e1 (%)	9,067	11,710	11,905	12,628
e2 (%)	12,421	10,127	8,446	6,942
e3 (%)	9,472	7,639	5,858	4,469
e4 (%)	2,486	3,637	5,125	6,243
error medio (%)	8,362	8,278	7,834	7,571

Tabla 18 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,000

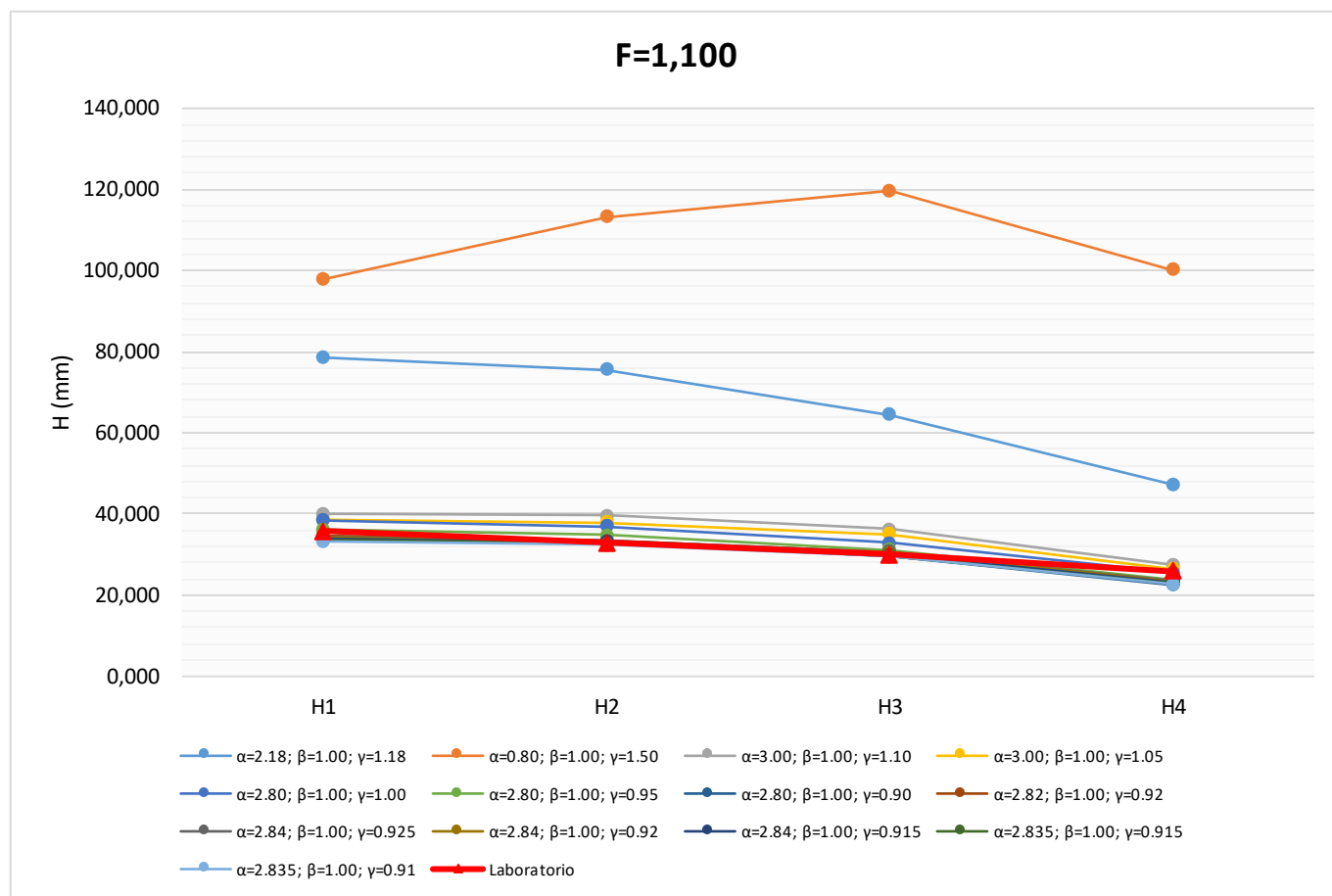


Gráfico 11 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,100

alfa	2,180	0,800	3,000	3,000	2,800	2,800	2,800	2,820	2,840	2,840
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,180	1,500	1,100	1,050	1,000	0,950	0,900	0,920	0,925	0,920
H1 (mm)	78,574	97,885	40,071	38,603	38,411	36,200	34,335	34,666	34,364	34,255
H2 (mm)	75,587	113,140	39,685	37,893	37,087	34,691	32,870	33,458	33,321	33,024
H3 (mm)	64,384	119,680	36,264	34,988	32,837	31,241	29,826	30,495	30,732	30,447
H4 (mm)	47,262	100,250	27,499	26,418	25,602	23,808	22,515	23,035	23,587	23,383
e1 (mm)	45,424	64,735	6,921	5,453	5,261	3,050	1,185	1,516	1,214	1,105
e2 (mm)	44,567	82,120	8,665	6,873	6,067	3,671	1,850	2,438	2,301	2,004
e3 (mm)	36,854	92,150	8,734	7,458	5,307	3,711	2,296	2,965	3,202	2,917
e4 (mm)	23,292	76,280	3,529	2,448	1,632	-0,162	-1,455	-0,935	-0,383	-0,587
error medio (mm)	37,534	78,821	6,962	5,558	4,567	2,649	1,697	1,964	1,775	1,653
e1 (%)	137,026	195,279	20,878	16,449	15,870	9,201	3,575	4,573	3,662	3,333
e2 (%)	143,672	264,732	27,934	22,157	19,558	11,834	5,964	7,859	7,418	6,460
e3 (%)	133,869	334,726	31,725	27,090	19,277	13,480	8,340	10,770	11,631	10,596
e4 (%)	97,171	318,231	14,723	10,213	6,809	0,676	6,070	3,901	1,598	2,449
error medio (%)	127,934	278,242	23,815	18,977	15,379	8,798	5,987	6,776	6,077	5,710

alfa	2,840	2,835	2,835
beta	1,000	1,000	1,000
gamma	0,915	0,915	0,910
H1 (mm)	33,922	33,571	33,258
H2 (mm)	33,041	32,827	32,331
H3 (mm)	30,018	29,825	29,524
H4 (mm)	23,149	22,904	22,751
e1 (mm)	0,772	0,421	0,108
e2 (mm)	2,021	1,807	1,311
e3 (mm)	2,488	2,295	1,994
e4 (mm)	-0,821	-1,066	-1,219
error medio (mm)	1,526	1,397	1,158
e1 (%)	2,329	1,270	0,326
e2 (%)	6,515	5,825	4,226
e3 (%)	9,037	8,336	7,243
e4 (%)	3,425	4,447	5,086
error medio (%)	5,327	4,970	4,220

Tabla 19 Caso calibración nº1 – Total ensayos $F=1,100$

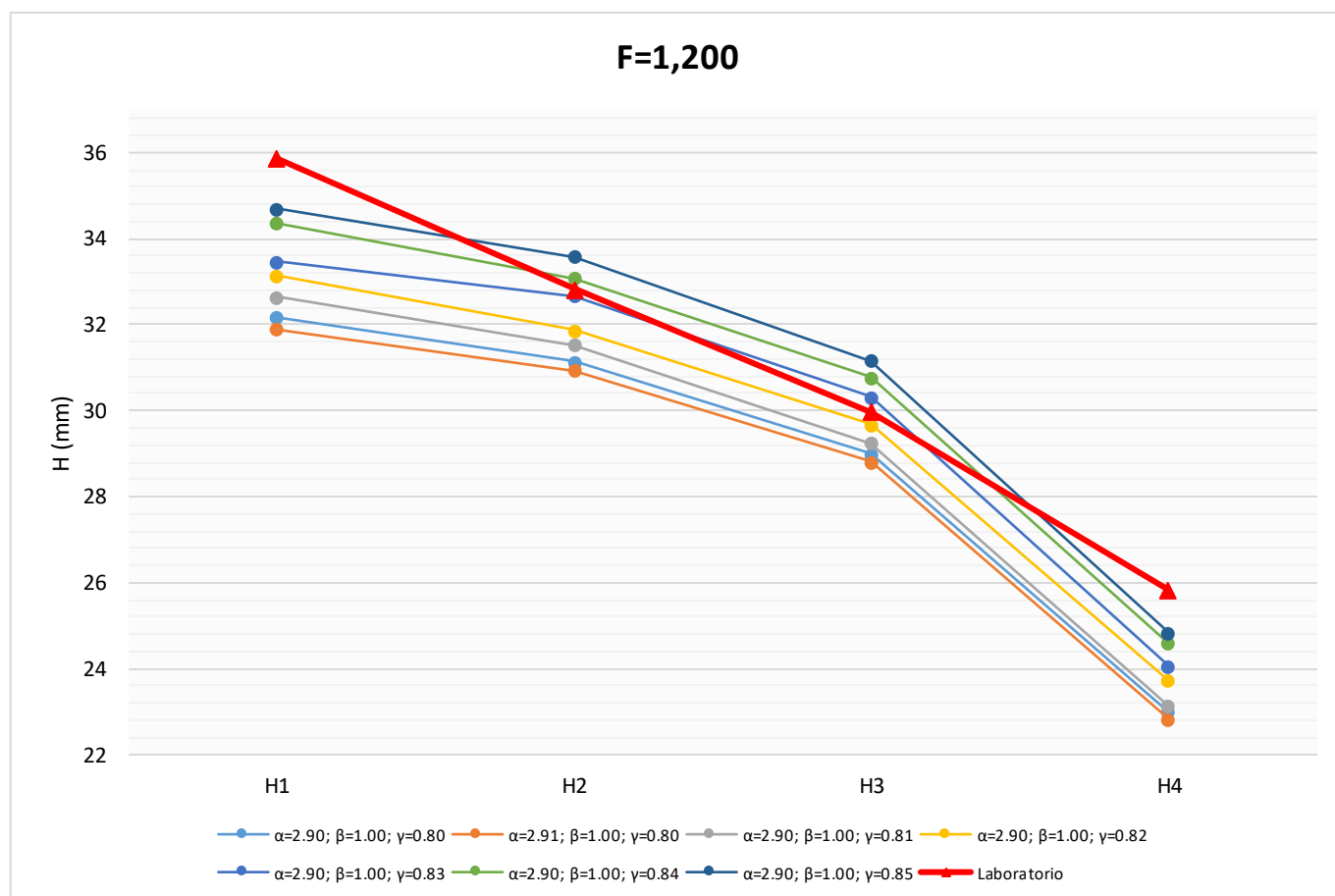


Gráfico 12 Caso calibración nº1 – Total ensayos $F=1,200$

alfa	2,900	2,910	2,900	2,900	2,900	2,900	2,900
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,800	0,800	0,810	0,820	0,830	0,840	0,850
H1 (mm)	32,167	31,883	32,652	33,143	33,474	34,356	34,701
H2 (mm)	31,149	30,932	31,532	31,880	32,660	33,070	33,587
H3 (mm)	29,006	28,810	29,245	29,672	30,325	30,784	31,153
H4 (mm)	22,988	22,833	23,129	23,721	24,065	24,583	24,840
e1 (mm)	-3,693	-3,977	-3,208	-2,717	-2,386	-1,504	-1,159
e2 (mm)	-1,691	-1,908	-1,308	-0,960	-0,180	0,230	0,747
e3 (mm)	-0,964	-1,160	-0,725	-0,298	0,355	0,814	1,183
e4 (mm)	-2,842	-2,997	-2,701	-2,109	-1,765	-1,247	-0,990
error medio (mm)	2,298	2,511	1,986	1,521	1,172	0,949	1,020
e1 (%)	10,298	11,090	8,946	7,577	6,654	4,194	3,232
e2 (%)	5,149	5,810	3,983	2,923	0,548	0,700	2,275
e3 (%)	3,217	3,871	2,419	0,994	1,185	2,716	3,947
e4 (%)	11,003	11,603	10,457	8,165	6,833	4,828	3,833
error medio (%)	7,417	8,093	6,451	4,915	3,805	3,110	3,322

Tabla 20 Caso calibración nº1 – Total ensayos F=1,200

Calibración - Caso n^o2

Descripción del ensayo real

Características generales

Autor/es: S. Shiotani, Kobe University

Año: 2010

Descripción breve

Se trata de un ensayo de campo llevado a cabo en el Puerto de Kobe (Japón).

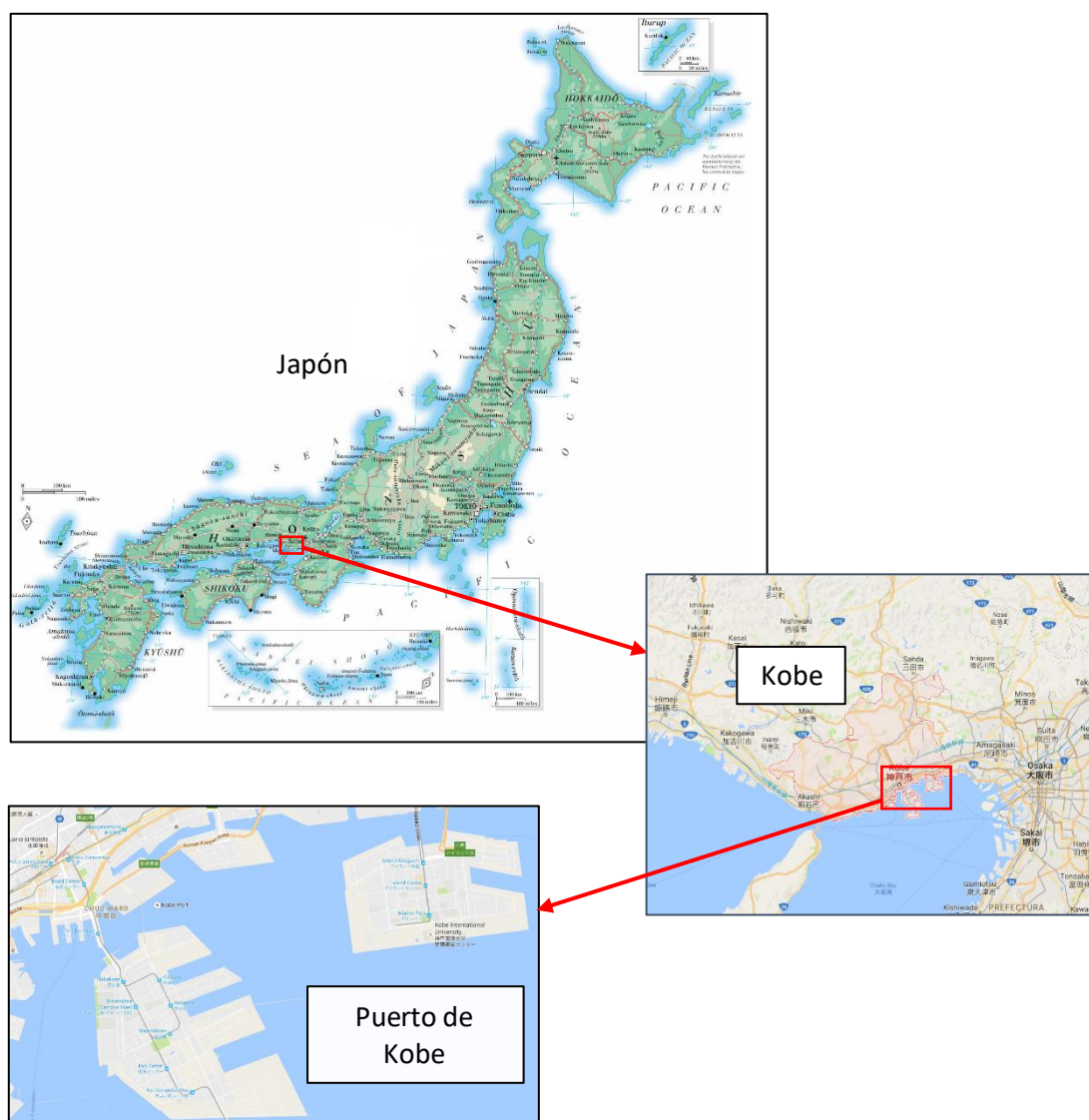


Figura 26 Localización del experimento (Shiotani, 2010)

En este experimento se plantea la medida de la altura de ola generada por los remolcadores que operan en dicho emplazamiento. Así mismo, y de forma más específica, se estudia de forma detallada el oleaje producido por dos embarcaciones concretas:

Barco	Tipo
Ryuou2	Remolcador
Mukomaru	Barco de recreo

Tabla 21 Tipo de barcos empleados en el experimento (Shiotani, 2010)

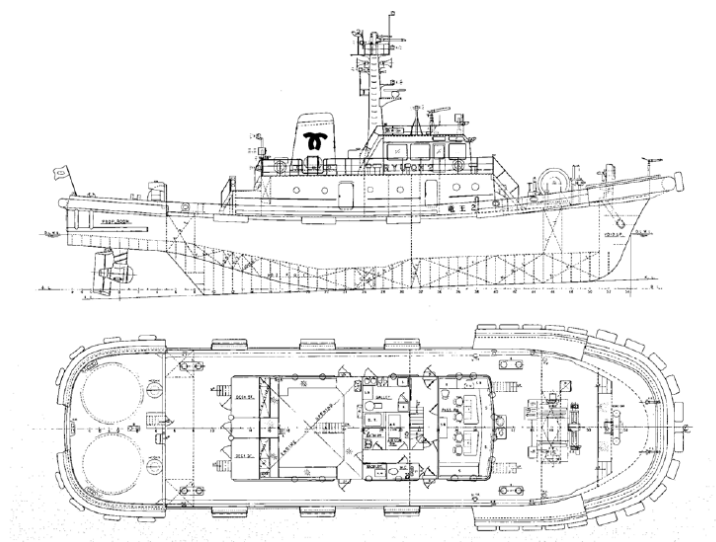


Figura 27 Ejemplo de remolcador, Ryuoh2 (Shiotani, 2010)



Figura 28 Barco de recreo Mukomaru (Shiotani, 2010)

En lo que corresponde al presente trabajo, se analizará el oleaje generado por la totalidad de los remolcadores que operan en el puerto. Como se verá más adelante, la información se suministra agrupada y será necesario, por tanto, realizar una serie de suposiciones para la extracción de los datos y su posterior introducción en el modelo numérico.

Geometría del área de estudio

Pese a que la profundidad no es constante en la ubicación donde se lleva a cabo el estudio, para el mismo se consideró, a modo de simplificación, una profundidad de 20 metros igual en cada punto.

En lo que respecta a las dimensiones de longitud y anchura, no quedan limitadas más que por la velocidad de ejecución del modelo y la consecución de unos resultados adecuados a la hora de realizar la simulación.

Sensores de medición

Para la realización del ensayo se empleó un sensor de medición situado en una zona abrigada del puerto, de esta forma podía despreciarse el efecto de las olas generadas por viento.

Las medidas fueron realizadas manteniendo constante la distancia a la línea de navegación y variando la velocidad de paso de las embarcaciones o, al contrario, es decir, manteniendo constante la velocidad y variando la distancia a la línea de navegación. Para la medida de la velocidad se registraba el tiempo que el barco tardaba en pasar dos puntos fijos. Además, para la medida de la distancia se empleó un láser situado a bordo de la embarcación.

La dirección del oleaje fue medida leyendo una brújula, quedando ésta definida por el ángulo entre la línea de navegación y la dirección de llegada del oleaje al aparato de medición, como se precisa en la figura posterior.

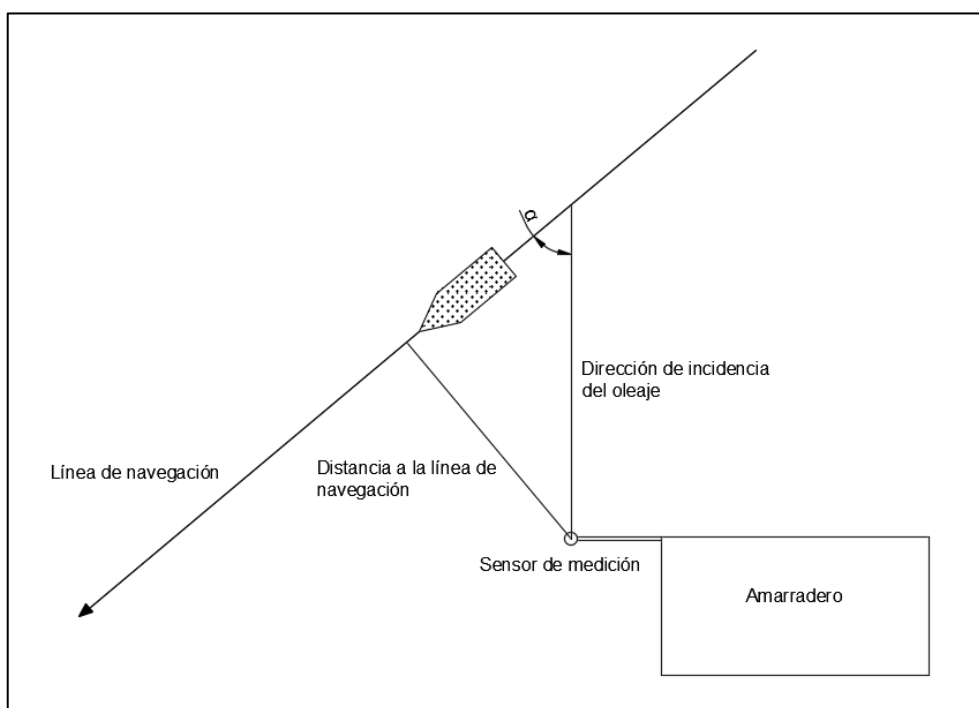


Figura 29 Esquema de medición del oleaje (Shiotani, 2010)

Características de la embarcación empleada

En el puerto de Kobe operan alrededor de veinte remolcadores, siendo todos ellos de características similares:

- Eslora: 35-50 metros
- Velocidad: 12-14 nudos
- Motor: 2600-3600 HP
- Peso: 150-200 toneladas

Se muestra a continuación la tabla recogida en el documento original, donde aparecen indicadas las características principales de los remolcadores que operan en el puerto:

	G/T (ton)	LOA (m)	Lpp (m)	B (m)	D (m)	Draft (m)	Speed (knot)	Bollard Pull (Max) (tonf)	Main Engine Type	B.H.P. (PS)	B.H.P (kW)
A	198	34.0	29.0	9.2	4.18	3.0	13	55	Z280-EN	D 3600PS x2	2647
B	197.8	31.0	27.0	8.8	3.49	2.7	12	36	—	D 2600PS x2	1911
C	196.0	31.0	27.0	8.8	3.48	2.6	12	36	—	D 2600PS x2	1911
D	195	33.5	29.5	9.2	4.18	3.2	13	45	6DLM - 28S	D 3600PS x2	2647
E	158	30.8	26.4	8.6	3.78	2.6	13	37	6N21A - EV	D 2600PS x2	1911
F	153	30.8	25.5	8.6	3.80	2.7	13	35	—	D 2600PS x2	1911
G	191	33.4	31.5	9.2	4.00	2.6	14	48	6L28HX	D 3600PS x2	2647
H	153	31.5	29.7	8.6	3.75	2.0	12	40	6L25CXE	D 2600PS x2	1911
I	161	31.5	26.1	8.6	3.80	2.7	13	42	6L25HX	D 2600PS x2	1911
J	193	33.3	29	9.2	4.17	3.2	14	50	Z280-EN	D 3600PS x2	2647
K	152	30.8	25.5	8.6	3.78	3.2	13	36	6L25BX	D 2600PS x2	1911
L	154	30.3	25.8	8.6	3.77	2.7	12	36	6L25BX	D 2400PS x2	1764
M	199	33.0	28.5	9.2	4.18 3	3.1	14.	50	6L28HX	D 3600PS x2	2647
N	160	30.9	26.0	8.8	3.78	2.7	12	36	6L27.5X	D 2600PS x2	1911
O	164	30.9	26.0	8.8	3.78	2.7	12.3	36	6L27.5X	D 2600PS x2	1911
P	193.67	28.4	25.0	8.5	3.48	2.6	11	30	8PSHTcM -26D	D 2100PS x2	1544
Q	195	33.9	29.5	9.4	4.00	3.1	14	52	6L28HX	D 3600PS x2	2647
R	195	34	29.9	9.2	4.20	3.2	14	—	Z280-FN	D 3600PS x2	2647
S	101.27	23	19.1	6.6	3.00	2.3	11	18	6L20AX	D 1300PS x2	955
T	157	31.5	26.5	8.6	3.78	2.6	13	36	—	D 2600PS x2	1911

Figura 30 Principales características de los remolcadores

De acuerdo a lo anterior, se ha decidido emplear una embarcación “media” ficticia, cuya eslora, calado y manga será la correspondiente a la media aritmética del conjunto de remolcadores previamente indicados.

Con todo esto, las características geométricas del barco que se introducirá en el modelo numérico son las siguientes:

Eslora (m)	31,375
Manga (m)	8,755
Calado (m)	2,775

Tabla 22 Caso calibración nº2 - Características del barco a simular

Resultados presentados en el documento

En el documento original, para el análisis del oleaje generado por el conjunto de remolcadores que actúan en el puerto se presentan seis gráficos. Tres de ellos corresponden a la situación en la que se mantiene constante la distancia a la línea de navegación y se varía la velocidad y, los otros tres, corresponden a la situación en la que se mantiene constante la velocidad y se varía la distancia a la línea de navegación.

No obstante, los gráficos en los que se mantiene constante la distancia a la línea de navegación consideran un intervalo de distancias, es decir, incluyen los resultados obtenidos para embarcaciones que pasan a una distancia comprendida entre 0 y 50 metros, 50 y 100 metros o 100 y 200 metros.

Para poder introducir el barco “medio” ficticio expuesto anteriormente, se ha considerado que las distancias de los sensores son las correspondientes a la media aritmética de los extremos del intervalo, esto es, 25 metros, 75 metros y 150 metros.

Finalmente, los gráficos en los que se mantiene constante la velocidad y se varía la distancia a la línea de navegación también consideran intervalos. Los intervalos son de entre 0 y 5 nudos, 5 y 10 nudos y 10 y 15 nudos.

Se muestran a continuación los gráficos recogidos en el documento original a partir de los cuales se extrajeron los datos para realizar la calibración:

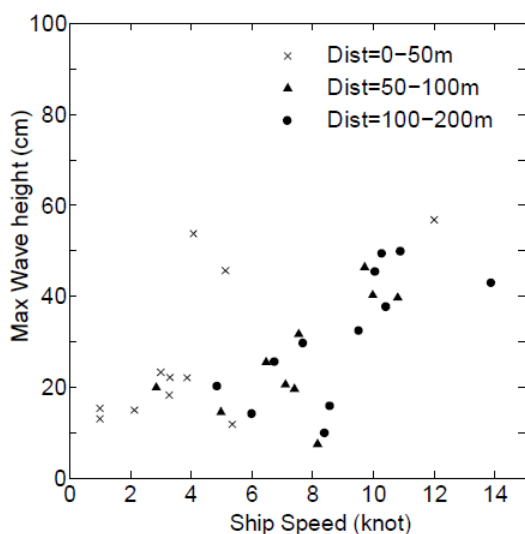


Figura 32 Altura de ola vs. Velocidad (Shiotani, 2010)

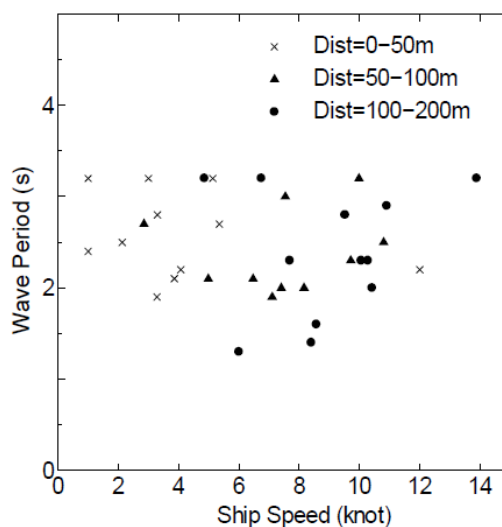


Figura 31 Periodo vs. Velocidad (Shiotani, 2010)

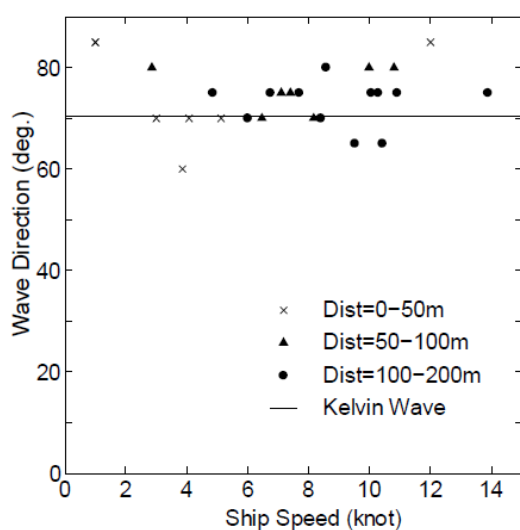


Figura 36 Dirección del oleaje vs. Velocidad (Shiotani, 2010)

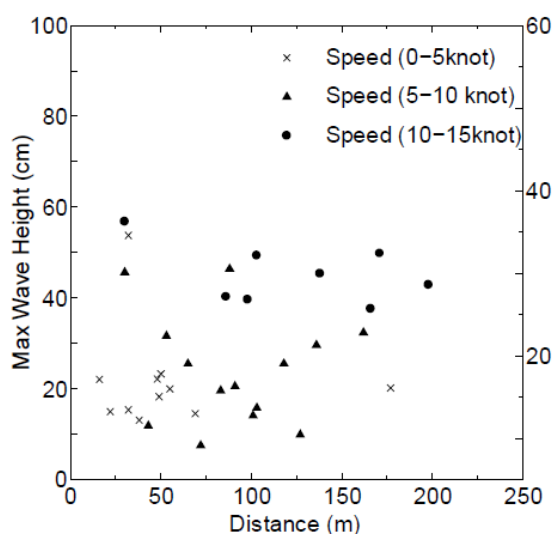


Figura 35 Altura de ola vs. Distancia (Shiotani, 2010)

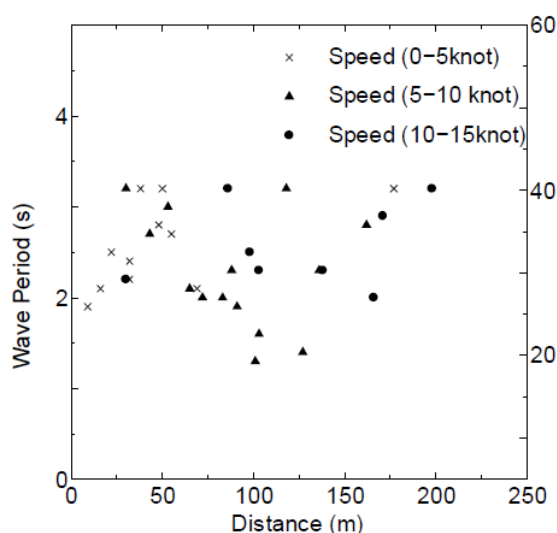


Figura 33 Periodo vs. Distancia (Shiotani, 2010)

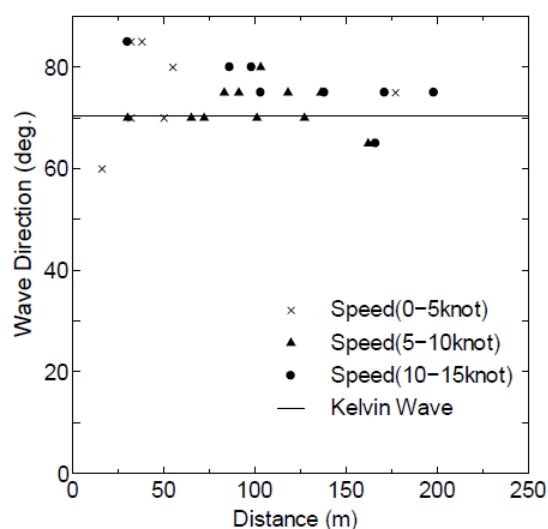
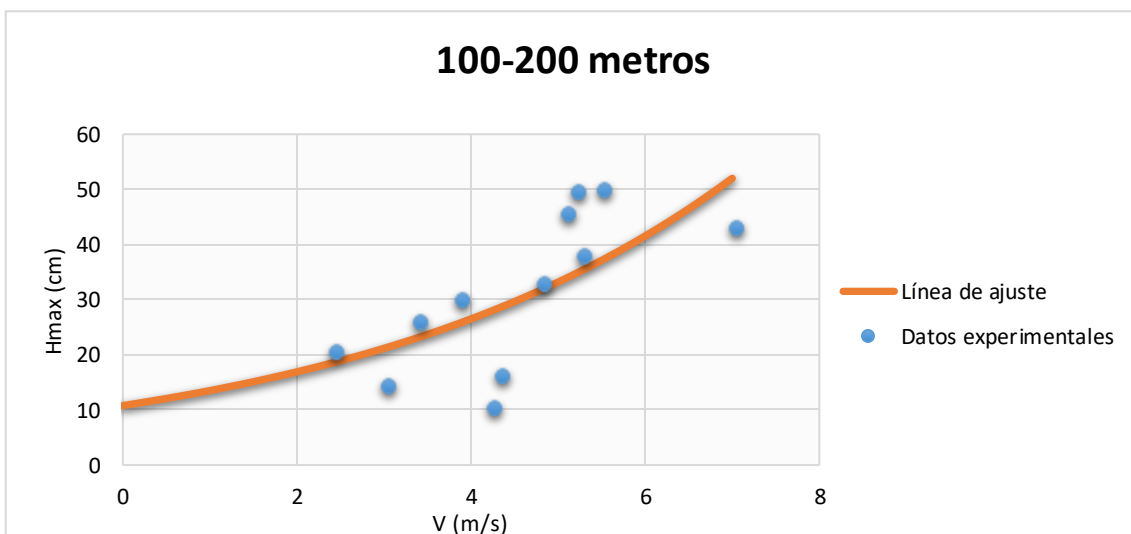
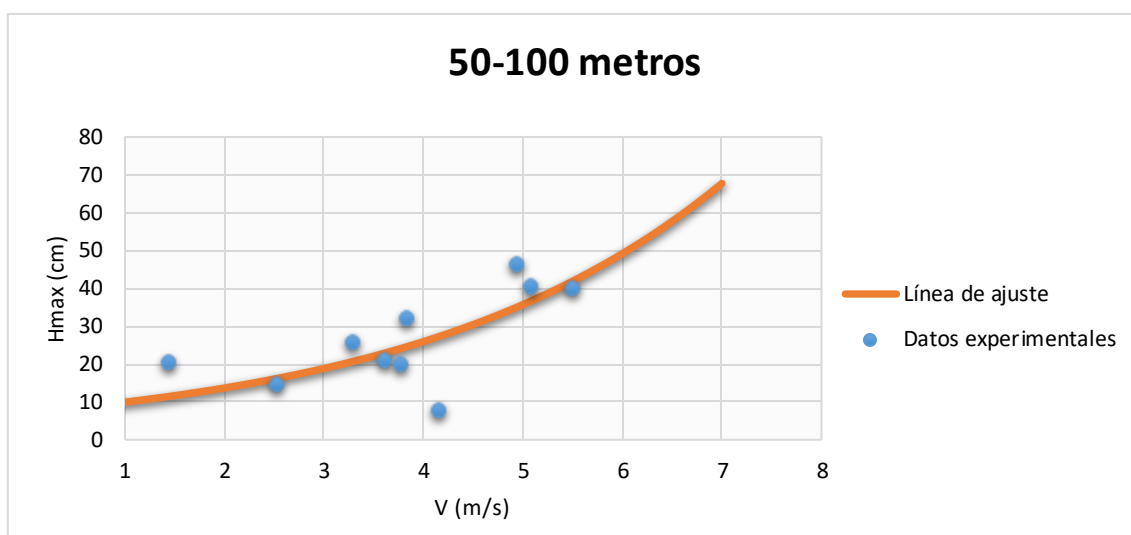
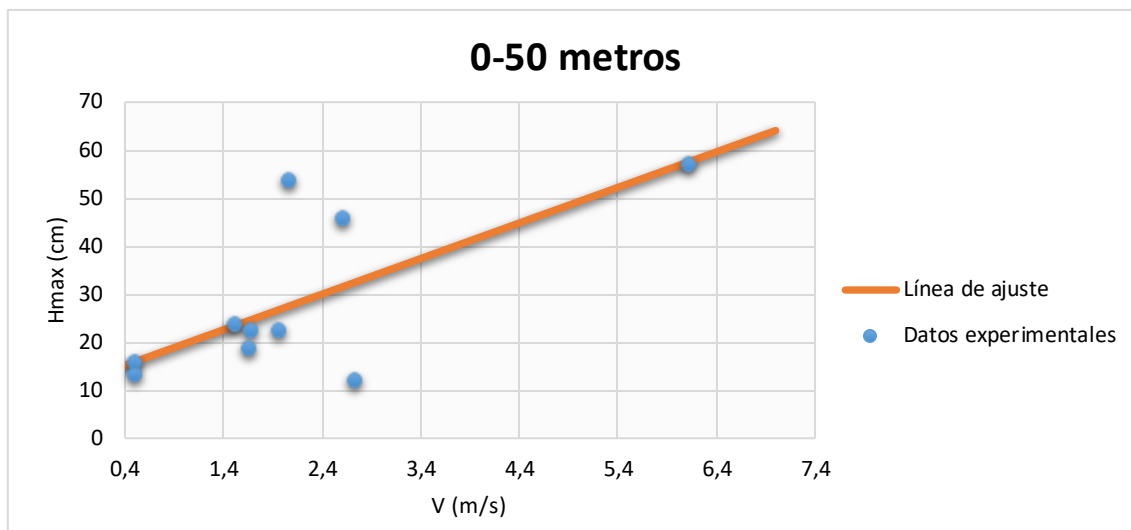


Figura 34 Dirección del oleaje vs. Distancia (Shiotani, 2010)

Como se puede apreciar, cada gráfico nos aporta una nube de puntos. Así pues, para obtener unos valores concretos, generamos una línea de ajuste con los datos disponibles y extraemos el correspondiente a la velocidad que nos interese.

En los siguientes gráficos podemos ver los datos con su respectiva línea de ajuste para los tres intervalos de distancia a la línea de navegación:



Datos del modelo numérico

Geometría del área de estudio

Para representar el ensayo descrito se ha decidido disponer un dominio de las siguientes características:

- Longitud: 700 metros
- Anchura: 700 metros
- Profundidad: 20 metros

Como se indicó anteriormente, y pese a que la profundidad es variable en la zona de estudio, se asume constante e igual a 20 metros.

Por otro lado, dado que no se dispone de unas medidas concretas que delimiten el dominio, consideraremos el menor tamaño posible que nos garantice la generación del oleaje y que permitan contener todos los sensores.

En lo que respecta al tamaño de malla, se ha decidido colocar una dimensión de celda de 2,0 metros, siendo igual en ambas direcciones ($Dx=Dy$). Así pues, el tamaño del dominio es de 350 x 350.

Finalmente, para minimizar cuanto más posible el efecto de reflexión generado por las paredes se ha colocado un tamaño de esponja de 100 metros.

Se muestra una tabla resumen con las dimensiones consideradas para la validación:

Longitud (m)	1600
Anchura (m)	1132
Profundidad (m)	33,528
Dx	4,0
Dy	4,0
M	400
N	283
Esponja Este (m)	100
Esponja Norte (m)	100
Esponja Oeste (m)	100
Esponja Sur (m)	100

Tabla 23 Caso calibración nº2 - Características del dominio de simulación

A continuación se muestra el esquema global del dominio introducido en el modelo:

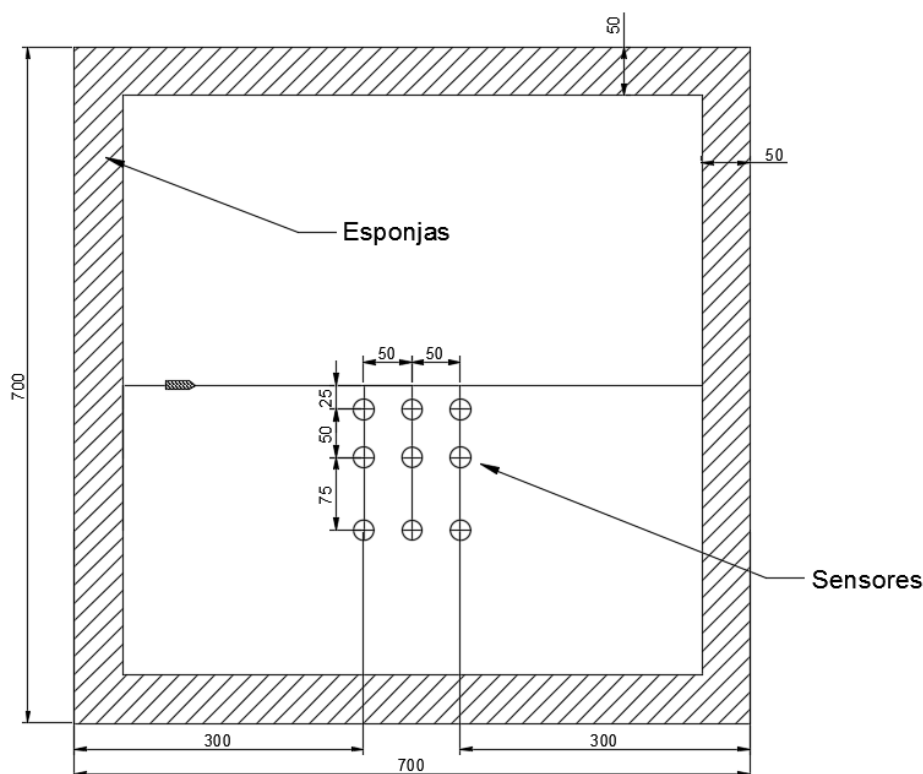


Figura 37 Caso calibración nº2 - Esquema global del dominio en el modelo numérico

Ubicación de los sensores

Los sensores se situarán a una distancia mínima de 300 metros con respecto al lado oeste del dominio. Para la colocación de los sensores, dispondremos tres filas paralelas, cada una de ellas con tres puntos de medida.

El resultado será el obtenido de realizar la media aritmética entre las alturas de ola máxima obtenidas en cada uno de los tres sensores situados a la misma distancia de la línea de navegación.

La posición de los puntos de medida con respecto al origen de coordenadas y teniendo en cuenta el tamaño de celda dispuesto es la siguiente:

	X	Y
Sensor1 (a)	150	118,64
Sensor1 (b)	162,5	118,64
Sensor1 (c)	175	118,64
Sensor2 (a)	150	95,78
Sensor2 (b)	162,5	95,78
Sensor2 (c)	175	95,78

Sensor 3 (a)	150	50,06
Sensor 3 (b)	162,5	50,06
Sensor 3 (c)	175	50,06

Tabla 24 Caso calibración nº2 - Ubicación sensores en el dominio

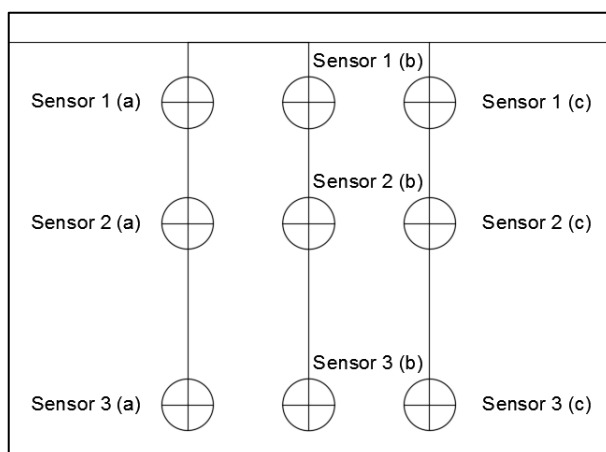


Figura 38 Caso calibración nº2 - Disposición de los sensores

Resultados

Los casos simulados corresponden a las velocidades especificadas en la siguiente tabla:

F	0,300	0,350	0,400
V (m/s)	4,200	4,900	5,600

Tabla 25 Caso calibración nº2 - Velocidades contempladas en la simulación

A continuación se muestran los resultados finales obtenidos en cada uno de los sensores. Se obtienen tres gráficas, una para cada uno de ellos, donde aparece representada la altura de ola máxima obtenida en el laboratorio y la altura de ola máxima obtenida en la simulación con respecto al número de Froude. Para la altura de ola máxima se considerarán pasos ascendentes por cero:

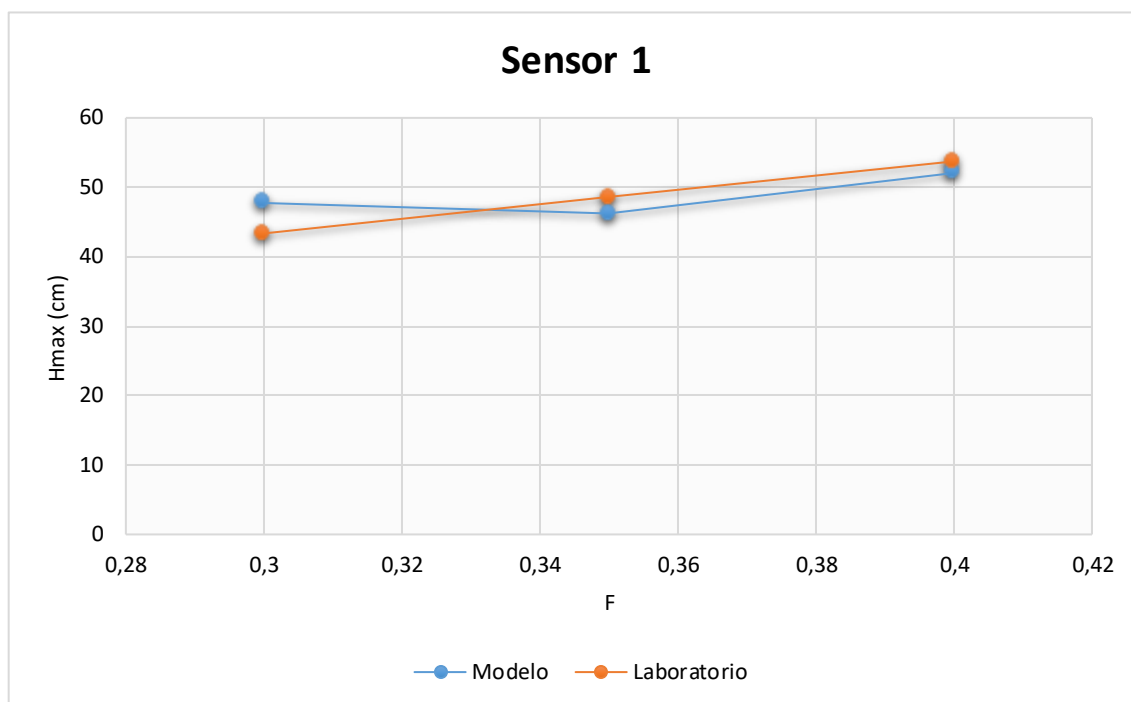


Gráfico 16 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (25 m)

Sensor 1			
F	H ₁ Modelo (cm)	H ₁ Experimento (cm)	Error (%)
0,3	47,779	43,356	10,201
0,35	46,232	48,545	4,765
0,4	52,062	53,734	3,112

Tabla 26 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (25 m)

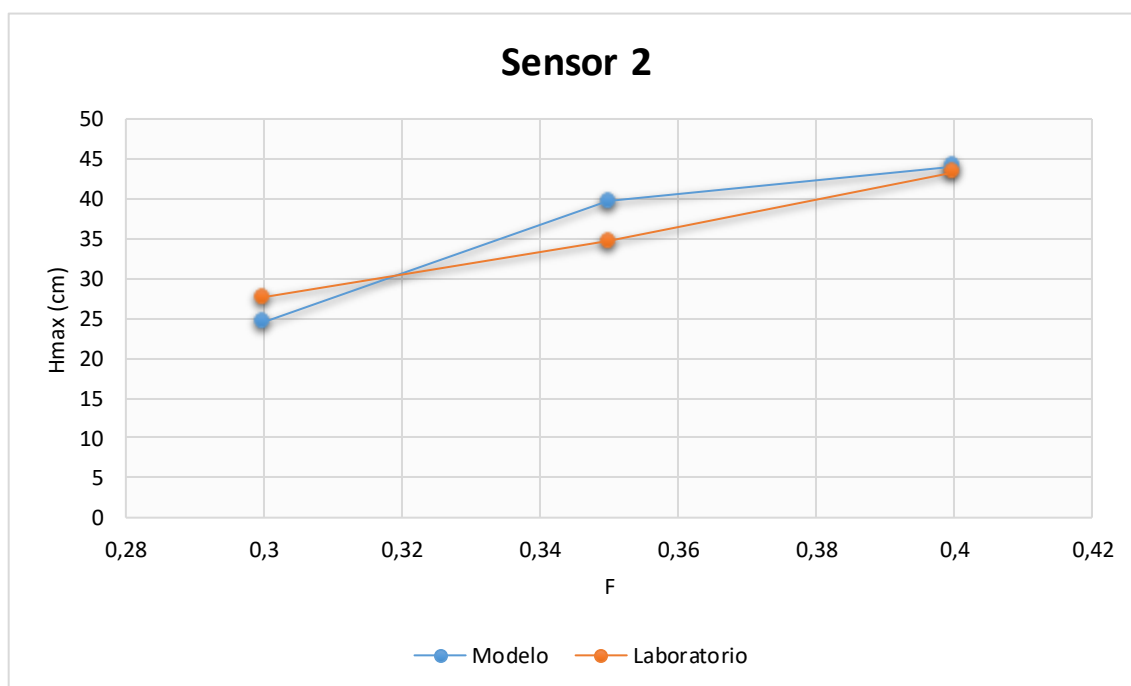


Gráfico 17 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (75 m)

Sensor 2			
F	H ₂ Modelo (cm)	H ₂ Experimento (cm)	Error (%)
0,3	24,535	27,660	11,295
0,35	39,611	34,607	14,460
0,4	44,023	43,300	1,671

Tabla 27 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (75 m)

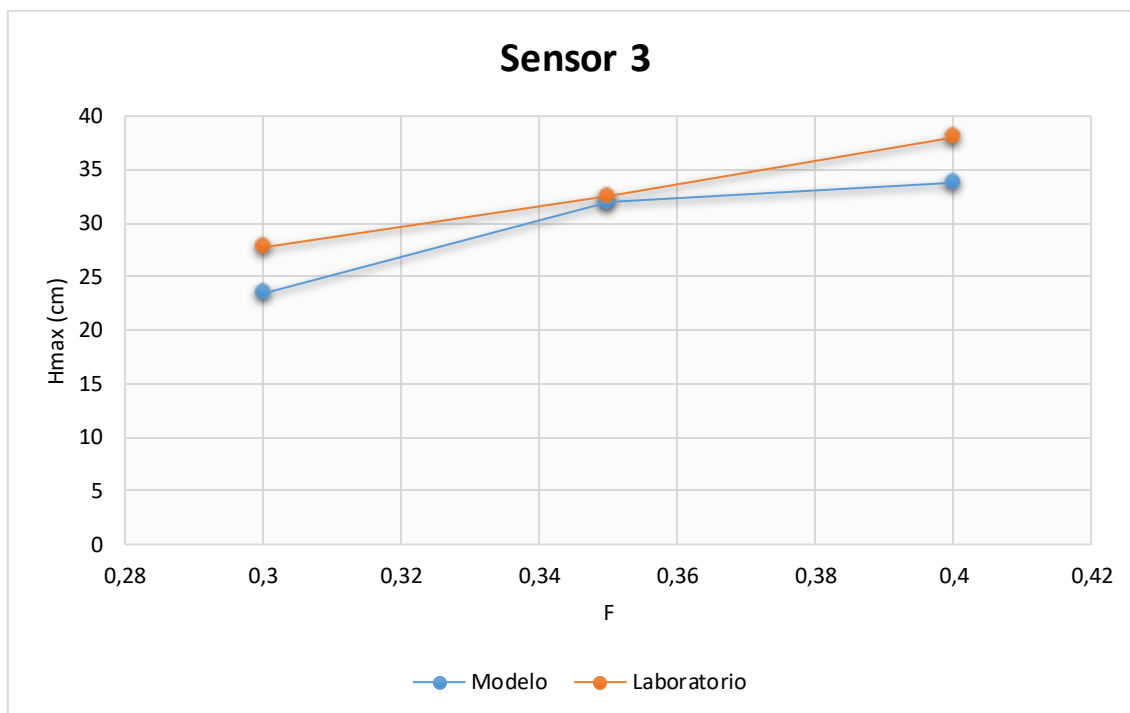


Gráfico 18 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (125 m)

Sensor 3			
F	H ₃ Modelo (cm)	H ₃ Experimento (cm)	Error (%)
0,3	23,432	27,740	15,532
0,35	31,924	32,467	1,673
0,4	33,780	38,000	11,104

Tabla 28 Caso calibración nº2 – Sensor 1 (125 m)

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los coeficientes de calibración (alpha, beta y gamma) para la que se han obtenido los resultados expuestos anteriormente:

F	α	β	γ
0,300	1,500	1,000	2,750
0,350	1,800	1,000	1,820
0,400	2,400	1,000	1,800

Tabla 29 Caso calibración nº2 – Coeficientes de calibración

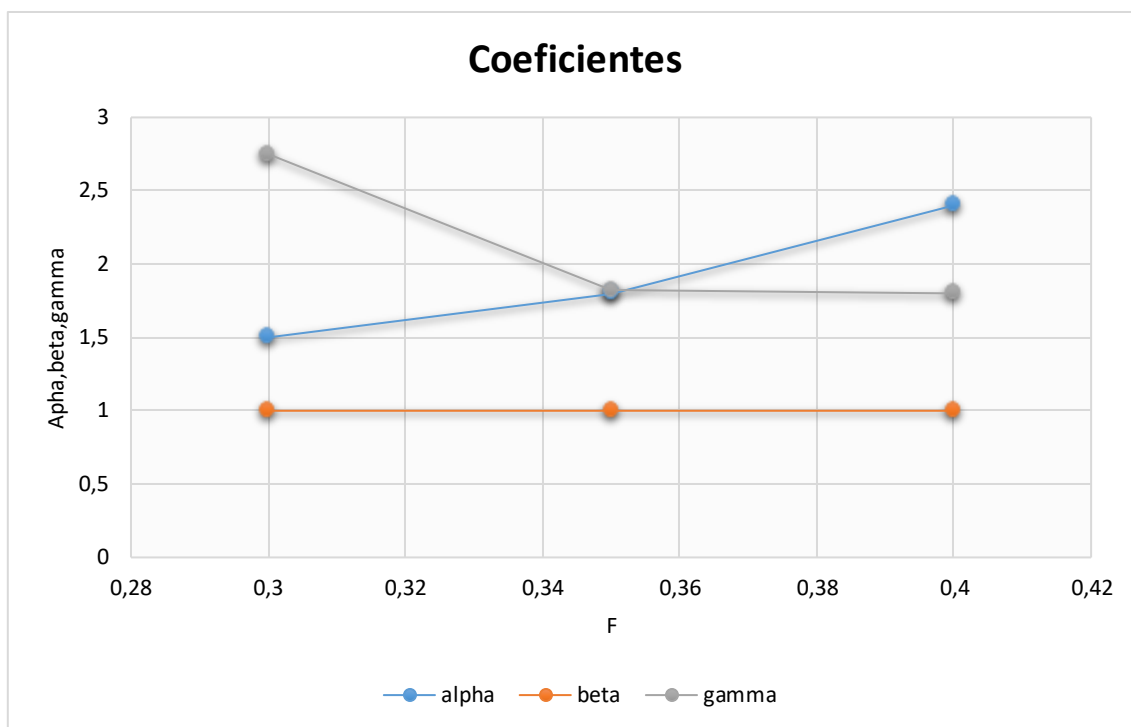


Gráfico 19 Caso calibración nº2 – Coeficientes de calibración

Los resultados obtenidos pueden volcarse en los gráficos con los datos experimentales y la línea de ajuste, obteniéndose lo siguiente:

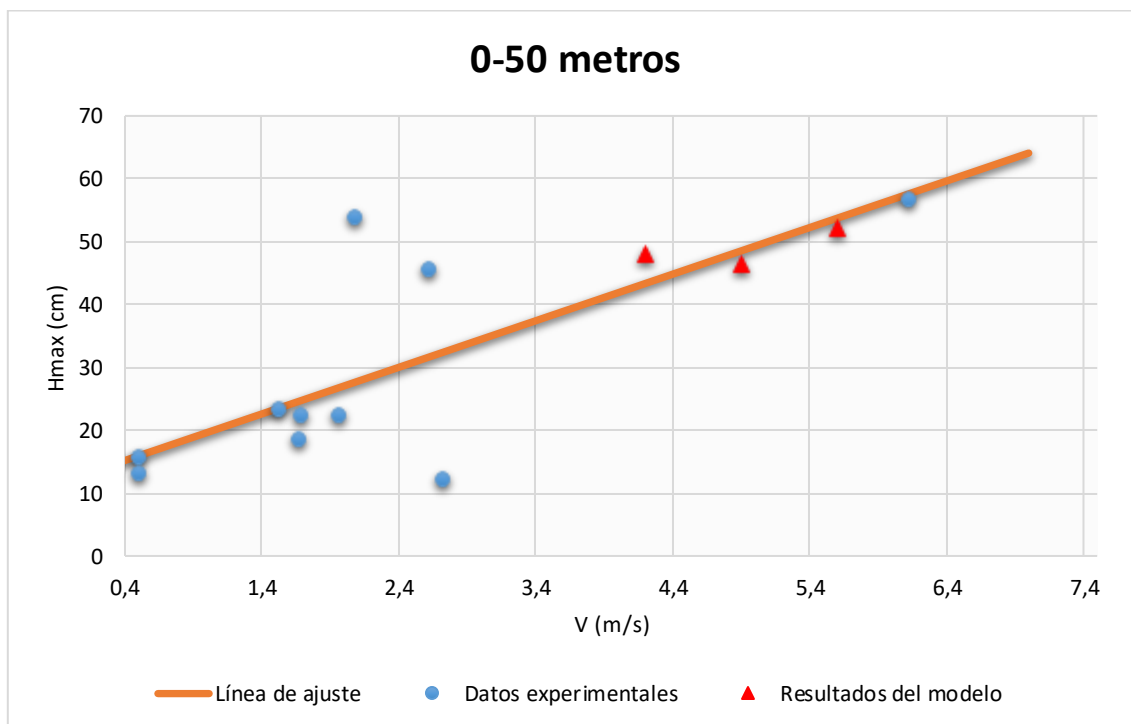


Gráfico 20 Caso calibración nº 2 – Volcado de resultados para una distancia entre 0 y 50 metros

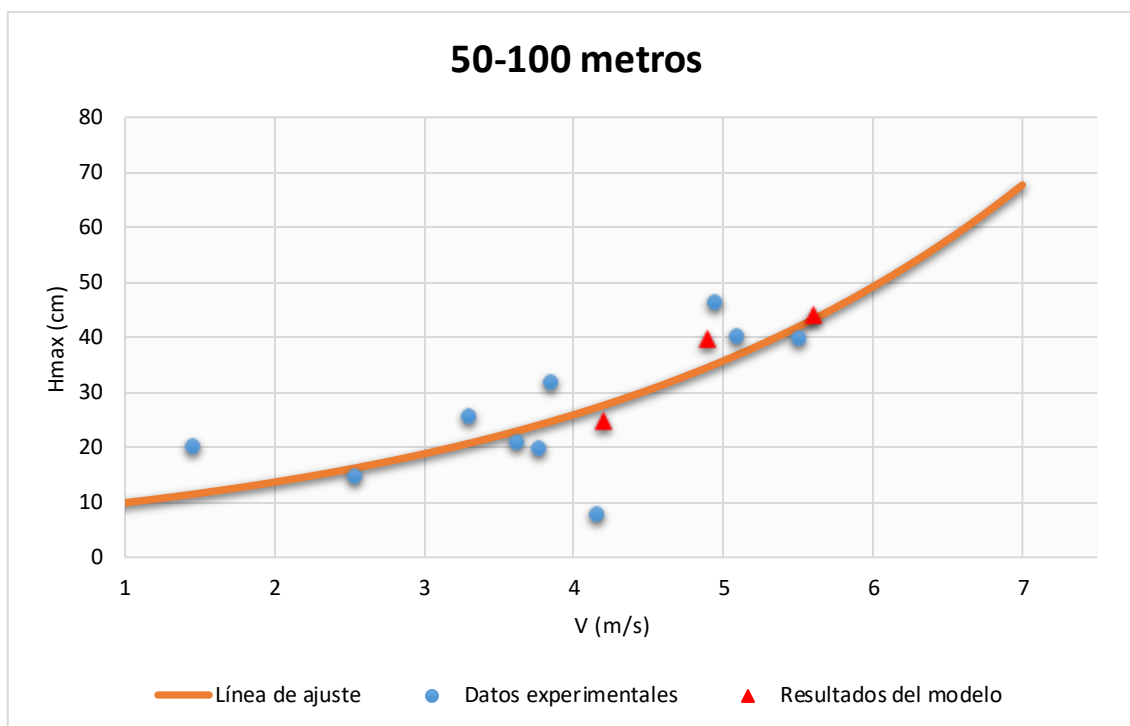


Gráfico 21 Caso calibración nº 2 – Volcado de resultados para una distancia entre 50 y 100 metros

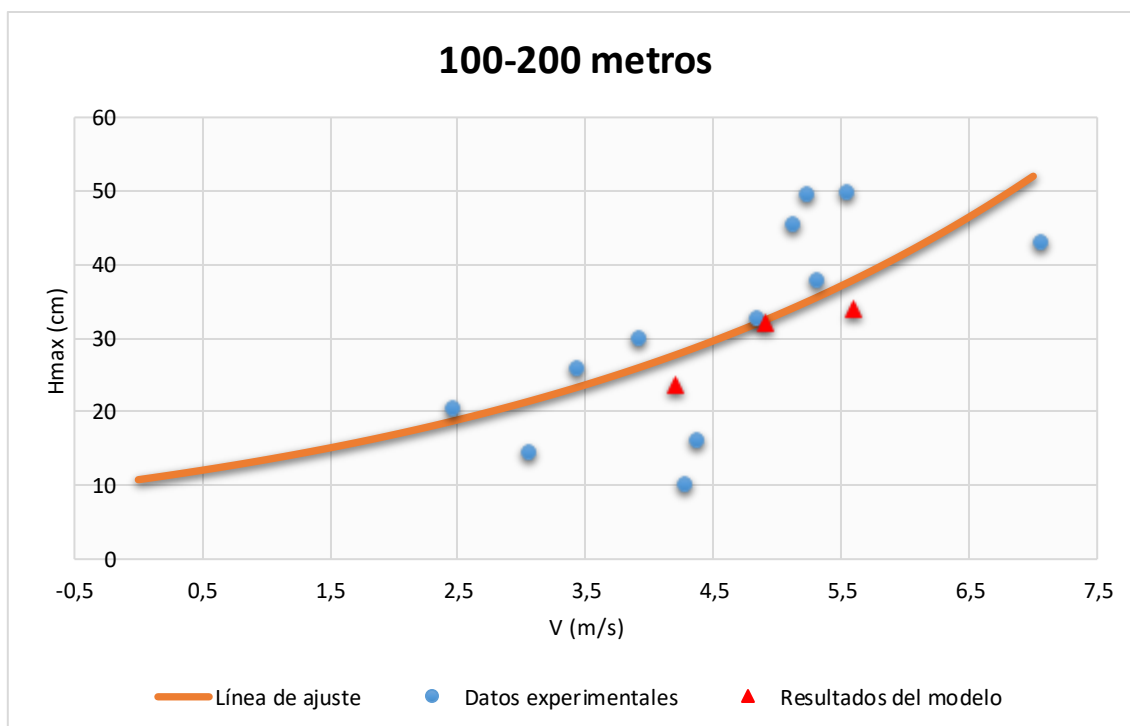


Gráfico 22 Caso calibración nº 2 – Volcado de resultados para una distancia entre 100 y 150 metros

Se muestran dos capturas obtenidas de la renderización del modelo:

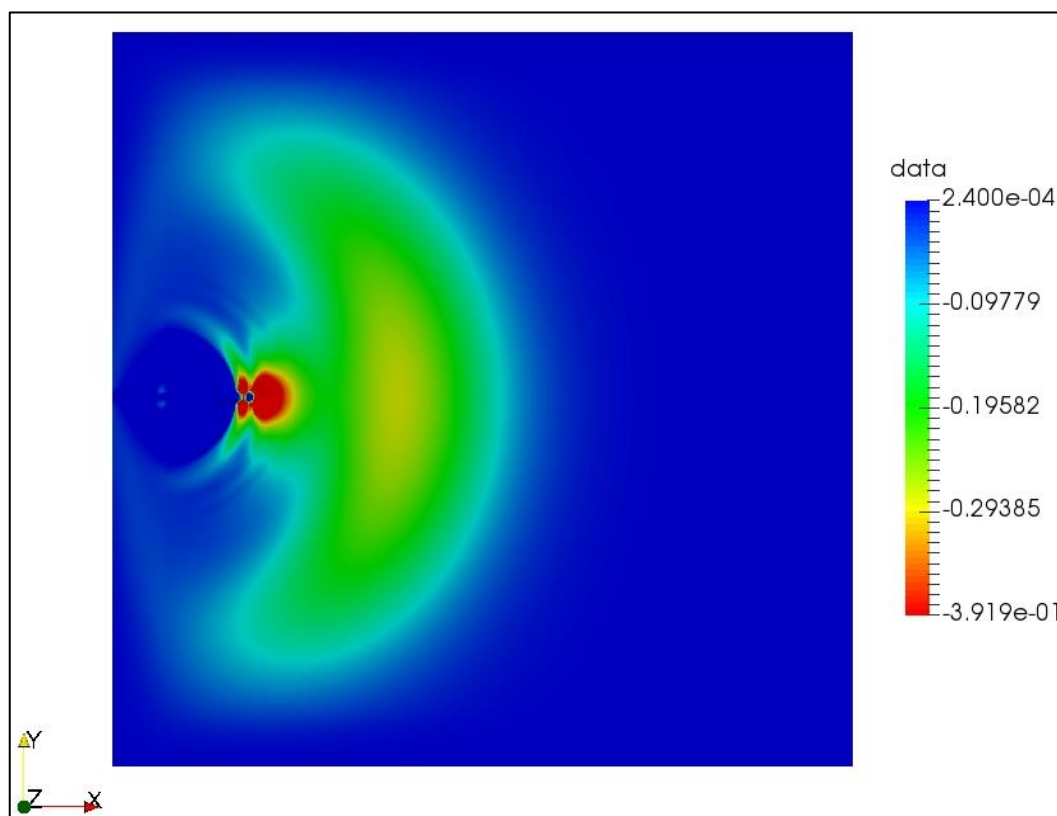


Figura 40 Caso calibración nº 2 – Renderización del modelo - $F=0.30$

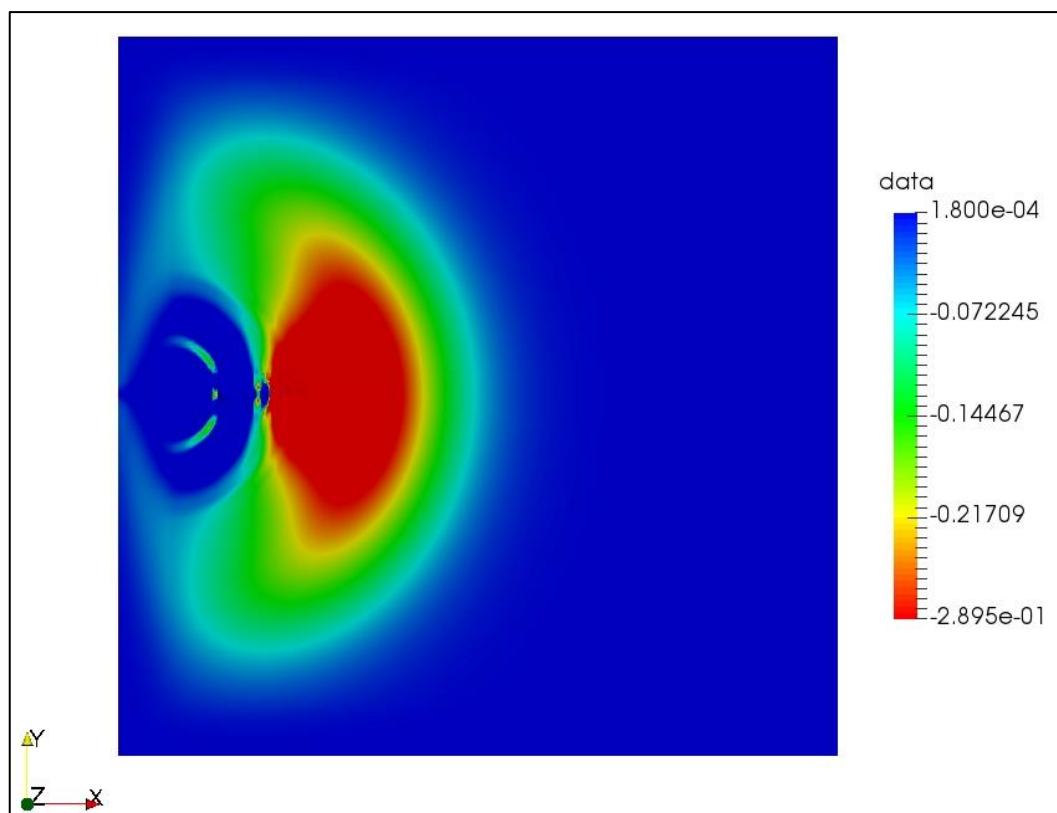


Figura 39 Caso calibración nº 2 – Renderización del modelo - $F=0.40$

A continuación quedan recogidos todos los ensayos realizados para cada uno de los casos, es decir, para cada número de Froude:

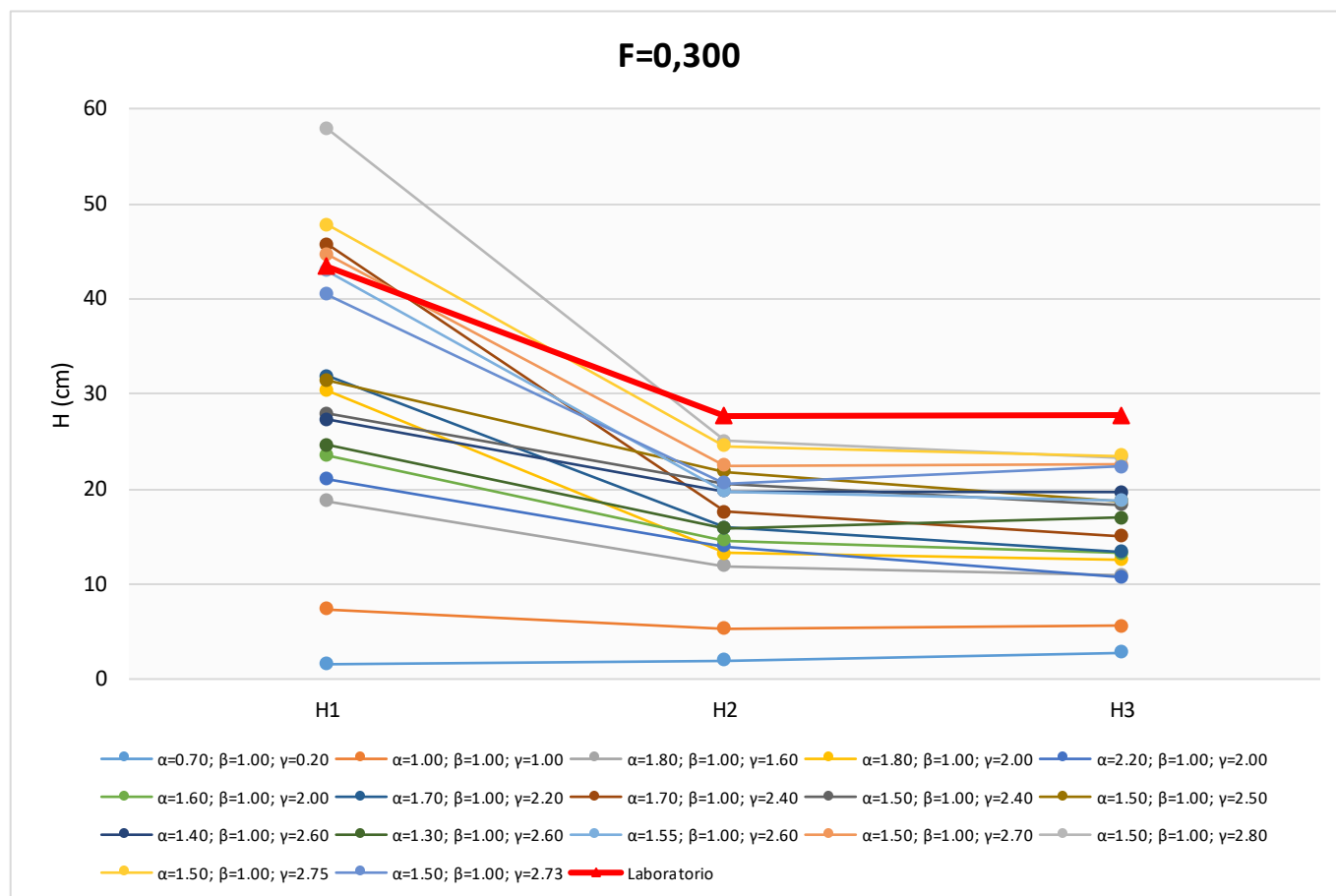


Gráfico 23 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,300

alfa	0,700	1,000	1,800	1,800	2,200	1,600	1,600	1,700	1,700	1,500
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,200	1,000	1,600	2,000	2,000	2,000	2,200	2,200	2,400	2,400
H1	1,556	7,301	18,671	30,320	21,009	23,503	28,432	31,890	45,718	27,935
H2	2,005	5,277	11,847	13,237	13,913	14,577	16,394	15,912	17,553	20,432
H3	2,746	5,551	10,920	12,541	10,713	13,270	15,223	13,360	15,006	18,292
e1 (cm)	-41,800	-36,055	-24,685	-13,036	-22,347	-19,853	-14,924	-11,466	2,362	-15,421
e2 (cm)	-25,655	-22,383	-15,813	-14,423	-13,747	-13,083	-11,266	-11,748	-10,107	-7,228
e3 (cm)	-24,994	-22,189	-16,820	-15,199	-17,027	-14,470	-12,517	-14,380	-12,734	-9,448
error medio (cm)	30,816	26,876	19,106	14,219	17,707	15,802	12,902	12,531	8,401	10,699
e1 (%)	96,411	83,160	56,936	30,068	51,543	45,791	34,422	26,446	5,448	35,568
e2 (%)	92,751	80,922	57,168	52,143	49,699	47,298	40,729	42,472	36,539	26,130
e3 (%)	90,101	79,989	60,635	54,791	61,381	52,163	45,123	51,839	45,905	34,060
error medio (%)	93,088	81,357	58,246	45,667	54,208	48,417	40,091	40,252	29,297	31,919

Tabla 30 Caso calibración nº2 – Total ensayos $F=0,300$



alfa	1,000	1,800	1,800	1,900	1,900	2,100	1,800	1,700	1,750	1,750
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,000	1,400	1,500	1,600	1,700	1,700	1,700	1,750	1,750	1,780
H1	12,038	33,030	35,111	43,169	47,066	49,175	44,500	39,145	42,144	41,063
H2	7,862	28,429	32,525	34,159	38,423	30,144	39,511	40,215	36,469	40,490
H3	6,528	23,043	25,659	25,203	27,042	21,679	29,832	33,925	29,962	32,717
e1 (cm)	-36,507	-15,515	-13,434	-5,376	-1,479	0,630	-4,045	-9,400	-6,401	-7,482
e2 (cm)	-26,745	-6,178	-2,082	-0,448	3,816	-4,463	4,904	5,608	1,862	5,883
e3 (cm)	-25,939	-9,424	-6,808	-7,264	-5,425	-10,788	-2,635	1,458	-2,505	0,250
error medio (cm)	29,730	10,372	7,441	4,363	3,573	5,294	3,861	5,489	3,589	4,538
e1 (%)	75,202	31,960	27,674	11,075	3,047	1,297	8,333	19,364	13,186	15,413
e2 (%)	77,282	17,852	6,016	1,295	11,027	12,896	14,171	16,205	5,380	16,999
e3 (%)	79,893	29,026	20,969	22,374	16,710	33,228	8,116	4,490	7,716	0,770
error medio (%)	77,459	26,280	18,220	11,581	10,261	15,807	10,207	13,353	8,761	11,061

alfa	1,780	1,780	1,780	1,790	1,800	1,810	1,820	1,820	1,820	1,800
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,780	1,790	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,810	1,820	1,820
H1	43,692	45,638	44,887	43,874	45,785	48,494	49,697	48,559	50,033	46,232
H2	39,330	39,611	40,003	40,783	40,032	41,557	43,119	41,433	42,432	39,611
H3	31,445	30,455	31,332	32,087	32,258	31,253	30,646	31,414	30,168	31,924
e1 (cm)	-4,853	-2,907	-3,658	-4,671	-2,760	-0,051	1,152	0,014	1,488	-2,313
e2 (cm)	4,723	5,004	5,396	6,176	5,425	6,950	8,512	6,826	7,825	5,004
e3 (cm)	-1,022	-2,012	-1,135	-0,380	-0,209	-1,214	-1,821	-1,053	-2,299	-0,543
error medio (cm)	3,533	3,308	3,396	3,742	2,798	2,738	3,828	2,631	3,871	2,620
e1 (%)	9,997	5,989	7,536	9,622	5,686	0,105	2,373	0,028	3,065	4,765
e2 (%)	13,648	14,460	15,592	17,846	15,676	20,083	24,596	19,724	22,611	14,460
e3 (%)	3,148	6,197	3,496	1,171	0,644	3,739	5,609	3,244	7,081	1,673
error medio (%)	8,931	8,882	8,875	9,546	7,335	7,976	10,859	7,665	10,919	6,966

Alfa	1,810	1,790	1,780
beta	1,000	1,000	1,000
gamma	1,820	1,820	1,830
H1	47,453	47,493	45,284
H2	42,431	41,517	40,890
H3	32,219	32,113	32,117
e1 (cm)	-1,092	-1,052	-3,261
e2 (cm)	7,824	6,910	6,283
e3 (cm)	-0,248	-0,354	-0,350
error medio (cm)	3,055	2,772	3,298
e1 (%)	2,250	2,167	6,718
e2 (%)	22,608	19,967	18,155
e3 (%)	0,764	1,091	1,078
error medio (%)	8,541	7,742	8,650

Tabla 31 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,350

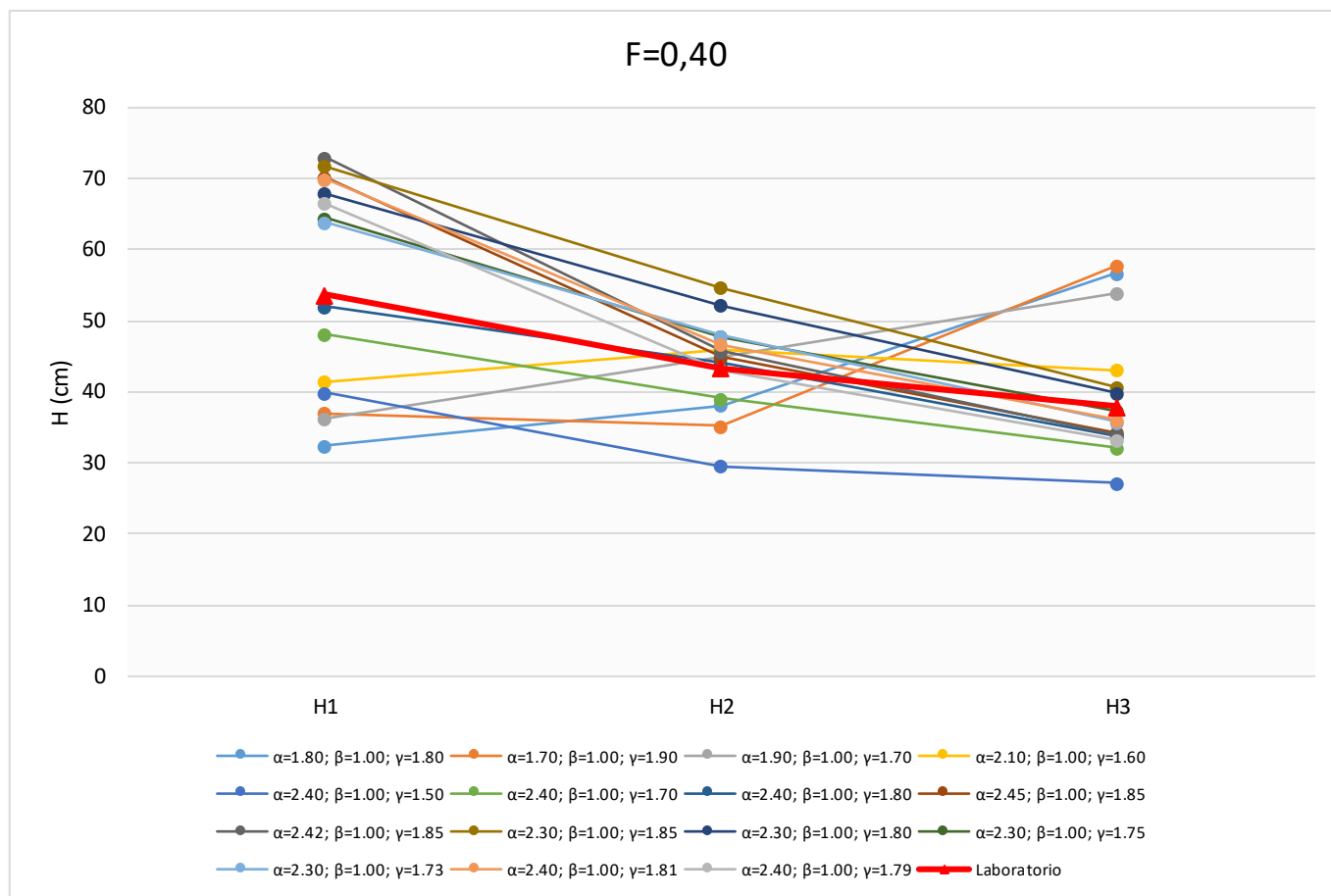


Gráfico 25 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,400

alfa	1,800	1,700	1,900	2,100	2,400	2,400	2,400	2,450	2,420	2,300
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,800	1,900	1,700	1,600	1,500	1,700	1,800	1,850	1,850	1,850
H1	32,477	36,963	36,279	41,409	39,939	48,128	52,062	70,183	73,020	71,714
H2	38,105	35,284	45,015	45,938	29,583	39,112	44,023	44,874	45,651	54,663
H3	56,791	57,824	53,917	43,118	27,228	32,168	33,780	34,225	33,953	40,656
e1 (cm)	-21,257	-16,771	-17,455	-12,325	-13,795	-5,606	-1,672	16,449	19,286	17,980
e2 (cm)	-5,195	-8,016	1,715	2,638	-13,717	-4,188	0,723	1,574	2,351	11,363
e3 (cm)	18,792	19,825	15,918	5,119	-10,772	-5,832	-4,220	-3,775	-4,046	2,657
error medio (cm)	15,081	14,870	11,696	6,694	12,761	5,208	2,205	7,266	8,561	10,667
e1 (%)	39,560	31,211	32,484	22,937	25,673	10,433	3,112	30,611	35,891	33,461
e2 (%)	11,997	18,512	3,962	6,093	31,678	9,671	1,671	3,636	5,431	26,244
e3 (%)	49,452	52,170	41,889	13,470	28,346	15,346	11,104	9,933	10,649	6,991
error medio (%)	33,670	33,965	26,112	14,167	28,566	11,817	5,296	14,727	17,323	22,232

alfa	2,300	2,300	2,300	2,400	2,400
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,800	1,750	1,730	1,810	1,790
H1	67,891	64,523	63,886	69,982	66,472
H2	52,119	47,835	47,909	46,675	43,123
H3	39,856	37,290	35,823	36,112	33,246
e1 (cm)	14,157	10,789	10,152	16,248	12,737
e2 (cm)	8,819	4,535	4,609	3,375	-0,176
e3 (cm)	1,857	-0,709	-2,177	-1,888	-4,753
error medio (cm)	8,278	5,345	5,646	7,170	5,889
e1 (%)	26,346	20,078	18,893	30,238	23,704
e2 (%)	20,368	10,474	10,645	7,795	0,407
e3 (%)	4,886	1,867	5,728	4,968	12,509
error medio (%)	17,200	10,807	11,755	14,333	12,207

Tabla 32 Caso calibración nº2 – Total ensayos F=0,400

Calibración - Caso nº3

Descripción del ensayo real

Características generales

Autor/es: J.W Johnson

Año: 1957

Descripción breve

Se trata de un ensayo de laboratorio llevado a cabo en la Universidad de California (*University of California*). En este experimento se evalúa el oleaje generado por un modelo a escala en un tanque con la geometría que se indicará en apartados posteriores.

Se estudia el efecto generado por el barco moviéndose a distintas velocidades, manteniendo ésta constante y, registrando el oleaje en una serie de sensores situados a distintas distancias con respecto a la línea de navegación.

El sistema empleado para el movimiento del modelo en el tanque queda ilustrado con la siguiente figura extraída del documento original:

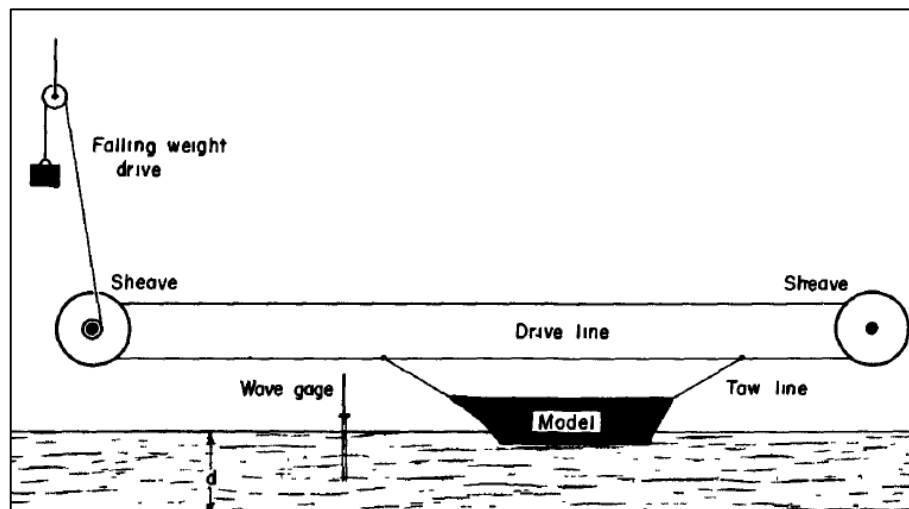


Figura 41 Sistema para el movimiento de los modelos a escala (Johnson, 1957)

Geometría del área de estudio

El experimento fue llevado a cabo en un tanque del que no se especifican las medidas. No obstante, para la obtención de los datos con lo que se llevará a cabo la calibración, sí que se especifica la profundidad de agua empleada, concretamente 0,520 pies o 0,158 metros.

Sensores de medición

Para la realización del ensayo se emplearon cinco sensores. En la siguiente tabla se indica la distancia a la que los sensores se colocan con respecto a la línea de navegación:

Sensor 1	1,500 ft	0,457 m
Sensor 2	3,000 ft	0,914 m
Sensor 3	5,000 ft	1,524 m
Sensor 4	8,000 ft	2,438 m
Sensor 5	11,000 ft	3,353 m

Tabla 33 Ubicación de los sensores (Johnson, 1957)

A continuación se muestra un esquema con la disposición de los sensores para la medida del oleaje generado por el paso de la embarcación:

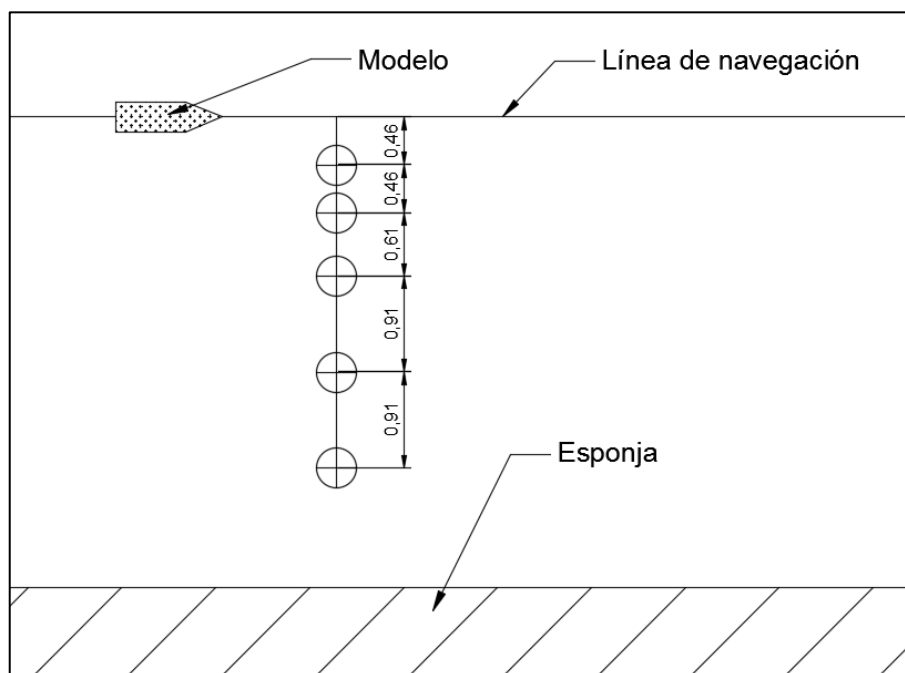


Figura 42 Disposición de los sensores en el tanque (Johnson, 1957)

Características de la embarcación empleada

Para el ensayo se empleó un modelo reducido cuyas principales características geométricas aparecen recogidas en la siguiente tabla:

Eslora (m)	1,012
Manga (m)	0,287
Calado (m)	0,040

Tabla 34 Caso calibración nº3 - Características del barco a simular

Resultados presentados en el documento

En el documento original se recoge en forma de gráfico los resultados extraídos de los ensayos. Cada uno de ellos corresponde a uno de los sensores, es decir, a una distancia con respecto a la línea de navegación.

Lo gráficos en su eje horizontal muestran la velocidad en nudos de movimiento del modelo a escala reducida y, en el eje vertical, la altura de ola máxima en pies obtenida en el sensor correspondiente.

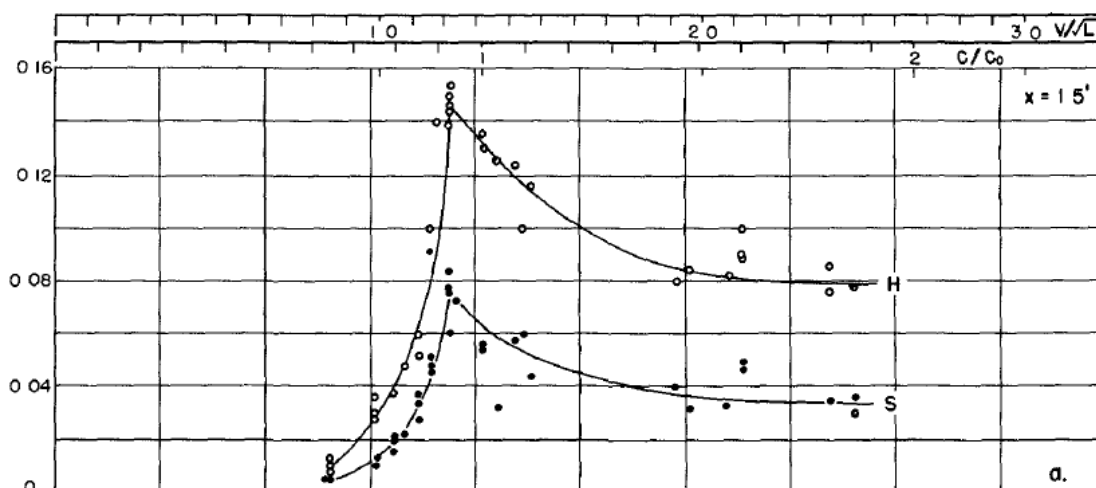


Figura 43 Resultados en sensor a 1,5 pies (Johnson, 1957)

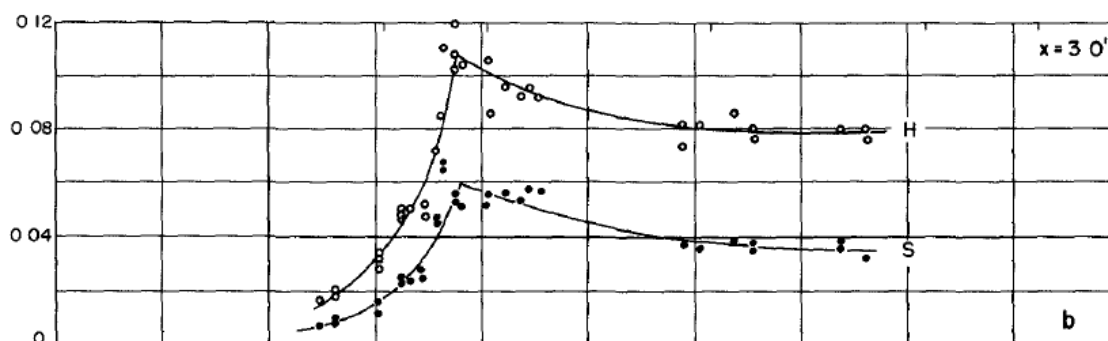


Figura 44 Resultados en sensor a 3,0 pies (Johnson, 1957)

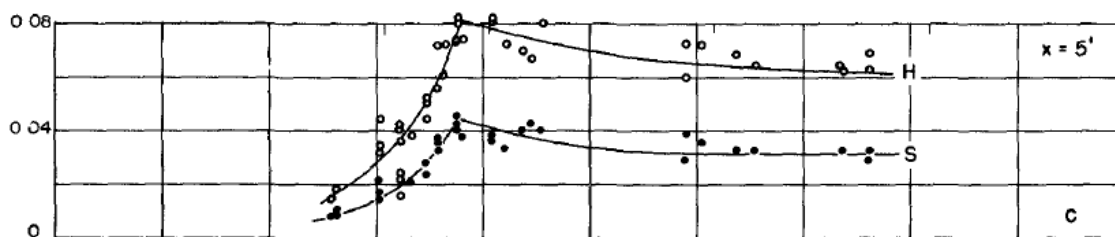


Figura 45 Resultados en sensor a 5,0 pies (Johnson, 1957)

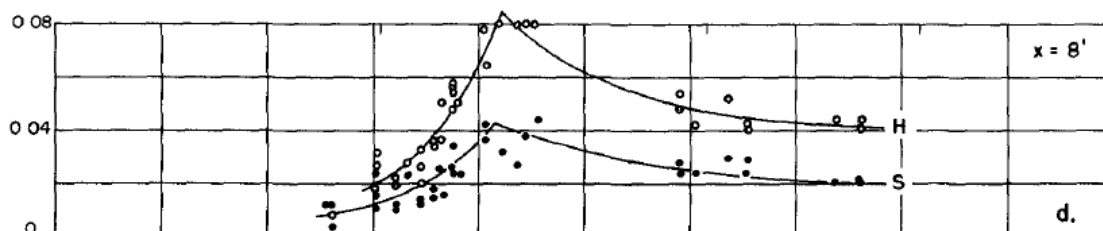


Figura 46 Resultados en sensor a 8,0 pies (Johnson, 1957)

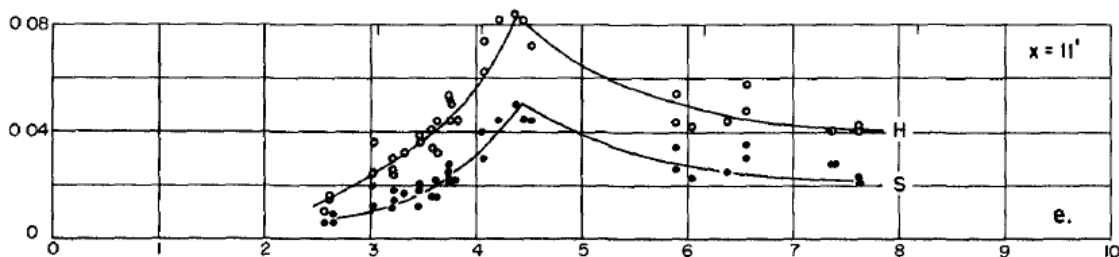


Figura 47 Resultados en sensor a 11,0 (Johnson, 1957)

A partir de esta información, se han extraído los datos de altura de ola y se ha obtenido una línea de ajuste. A partir de ella podemos obtener el valor de altura ola máxima para un valor de velocidad (o número de Froude) en base al cual poder realizar la calibración. Los gráficos obtenidos son los siguientes:

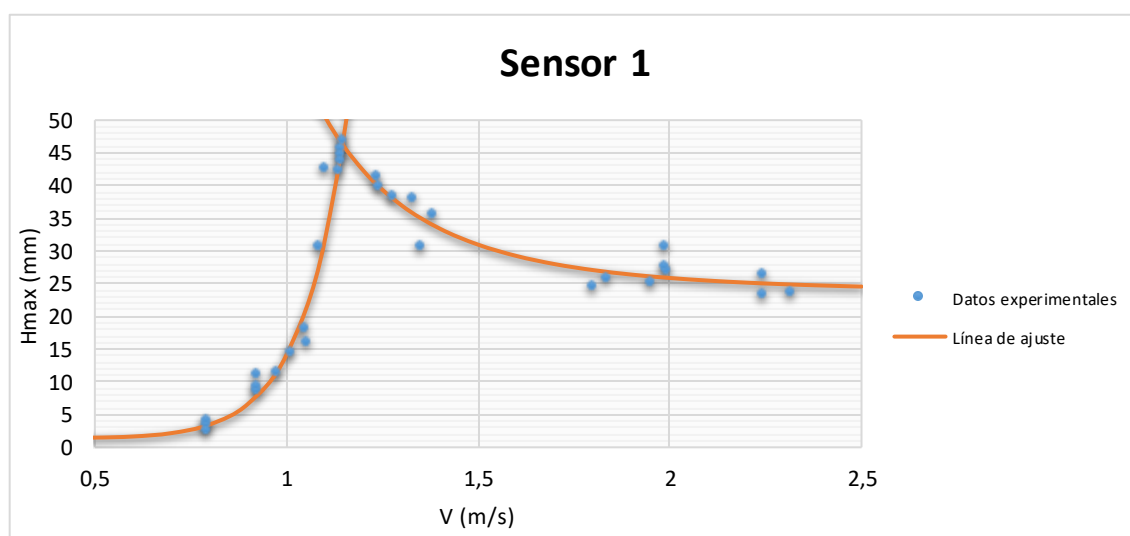
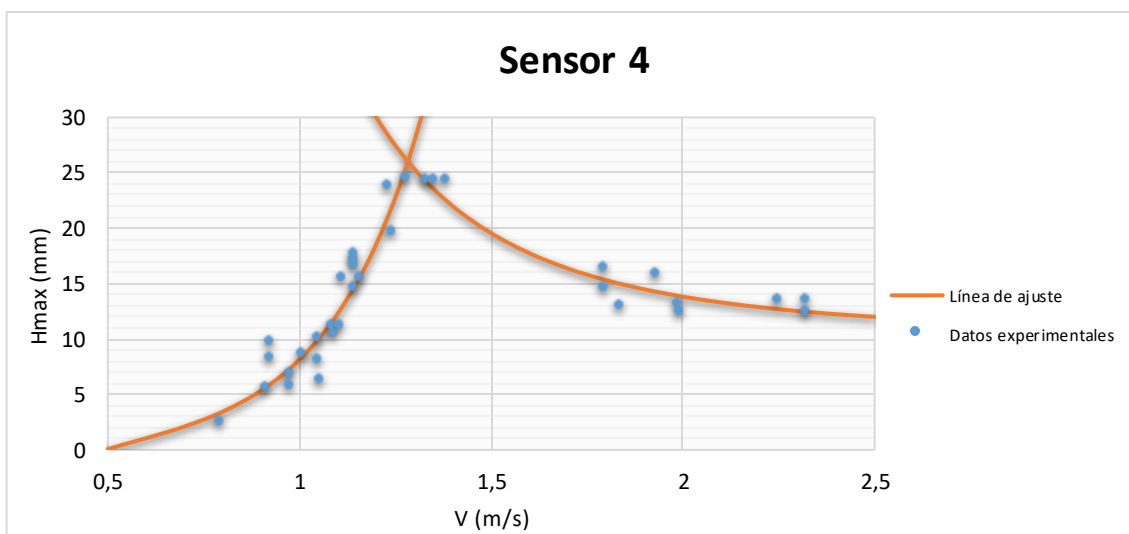
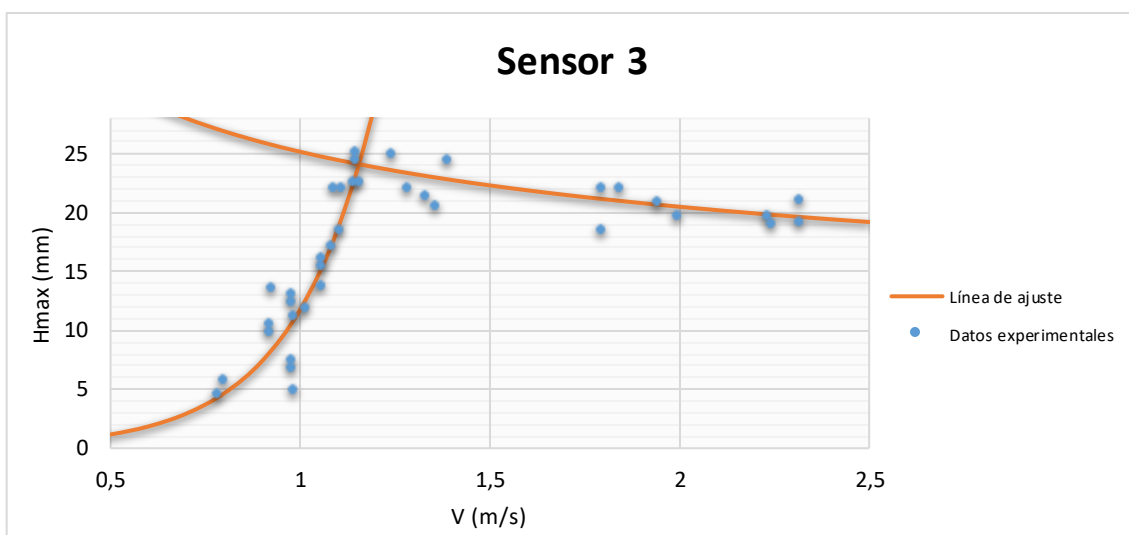
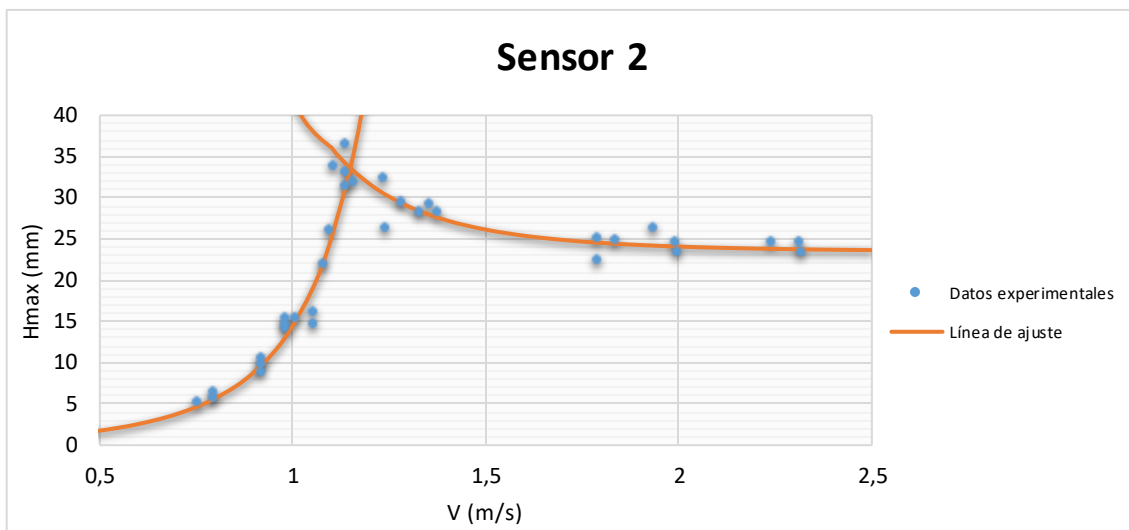


Gráfico 26 Caso calibración nº 3 - Ajuste obtenido para una distancia de 1,5 pies



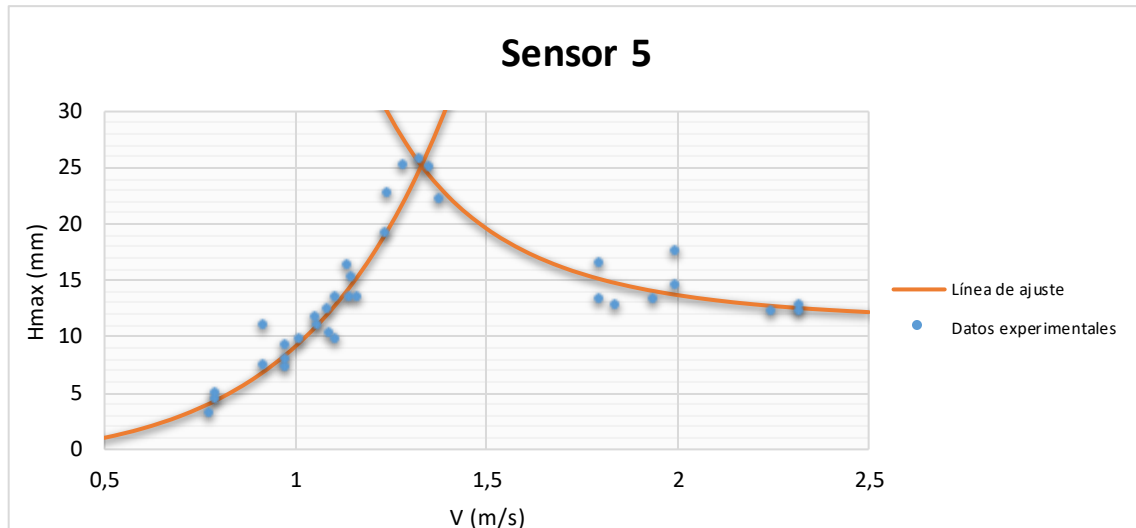


Gráfico 30 Caso calibración nº 3 - Ajuste obtenido para una distancia de 11,0 pies

Datos del modelo numérico

Geometría del área de estudio

Para representar el ensayo descrito se ha decidido disponer un dominio de las siguientes características:

- Longitud: 25 metros
- Anchura: 15 metros
- Profundidad: 0,158 metros

Como se indicó anteriormente, la profundidad se considera constante e igual a 0,520 pies, es decir, 0,158 metros.

Por otro lado, dado que no se dispone de unas medidas concretas que delimiten el dominio, consideraremos el menor tamaño posible que nos garantice la generación del oleaje y que permitan contener todos los sensores.

En lo que respecta al tamaño de malla, se ha decidido colocar una dimensión de celda de 0,05 metros, siendo igual en ambas direcciones ($Dx=Dy$). Así pues, el tamaño del dominio es de 500 x 300.

Finalmente, para minimizar cuanto más posible el efecto de reflexión generado por las paredes del dominio se ha colocado un tamaño de esponja de 3,00 metros en las paredes norte, oeste y sur, y de 4,00 metros en la pared este.

Se muestra una tabla resumen con las dimensiones consideradas para la validación:

Tabla 35 Caso calibración nº3 - Características del dominio de simulación

Technical drawing of a rectangular sensor assembly. The overall dimensions are 25 units in width and 15 units in height. The assembly consists of a central white rectangular area (12 units wide, 10 units high) surrounded by a hatched region labeled "Esponjas" (Sponges). The hatched region is 3 units thick on the top and bottom, and 3 units thick on the left and right. The central white area contains a horizontal line with a small rectangular feature on the left. Below this line, there are three vertical columns of circular symbols, each containing a cross. The label "Sensores" (Sensors) points to these columns. The distance from the left edge of the white area to the first column of sensors is 12 units. The distance between the first and second columns is 1.5 units, and between the second and third columns is 1.5 units. The distance from the bottom edge of the white area to the sensor columns is 3 units.

Figura 48 Caso calibración nº3 - Esquema global del contorno en el modelo numérico

- 90 -

con cinco puntos de medida. Las distancias a la línea de navegación son las correspondientes a los gráficos reflejados en los apartados anteriores, esto es: 1,5, 3,0, 5,0, 8,0 y 11,0 pies.

El resultado será el obtenido de realizar la media aritmética entre las alturas de ola máxima obtenidas en cada uno de los tres sensores, situados a la misma distancia de la línea de navegación.

La posición de los sensores con respecto al origen de coordenadas y teniendo en cuenta el tamaño de malla dispuesto es la siguiente:

	X	Y
Sensor 1 (a)	240	140,856
Sensor 1 (b)	270	140,856
Sensor 1 (c)	300	140,856
Sensor 2 (a)	240	131,712
Sensor 2 (b)	270	131,712
Sensor 2 (c)	300	131,712
Sensor 3 (a)	240	119,520
Sensor 3 (b)	270	119,520
Sensor 3 (c)	300	119,520
Sensor 4 (a)	240	101,232
Sensor 4 (b)	270	101,232
Sensor 4 (c)	300	101,232
Sensor 5 (a)	240	82,944
Sensor 5 (b)	270	82,944
Sensor 5 (c)	300	82,944

Tabla 36 Caso calibración nº3 - Ubicación sensores en el dominio

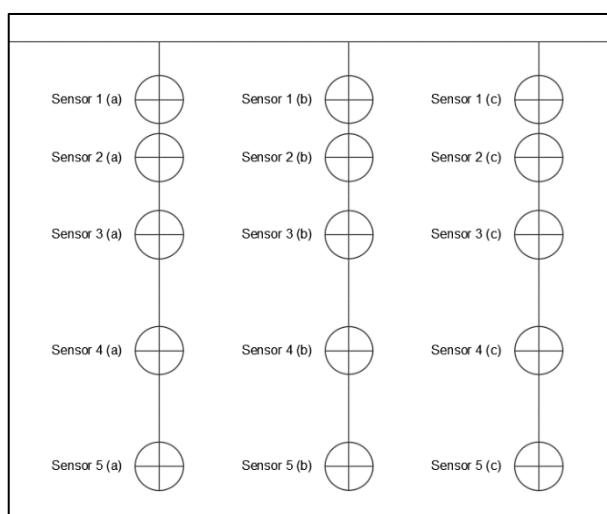


Figura 49 Caso calibración nº3 - Disposición de los sensores

Resultados

Del rango de velocidades de las que se obtuvieron resultados en el laboratorio, se simularán aquellos casos que van desde un $F = 0,80$ hasta un $F = 1,20$.

F	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
V (m/s)	0,998	1,122	1,247	1,372	2,496

Tabla 37 Caso calibración nº3 - Velocidades contempladas en la simulación

A continuación se muestran los resultados finales obtenidos en cada uno de los sensores. Se obtienen cinco gráficas, una para cada uno de ellos, donde aparece representada la altura de ola máxima obtenida en el laboratorio y la altura de ola máxima obtenida en la simulación con respecto al número de Froude. Para la altura de ola máxima se considerarán pasos ascendentes por cero:

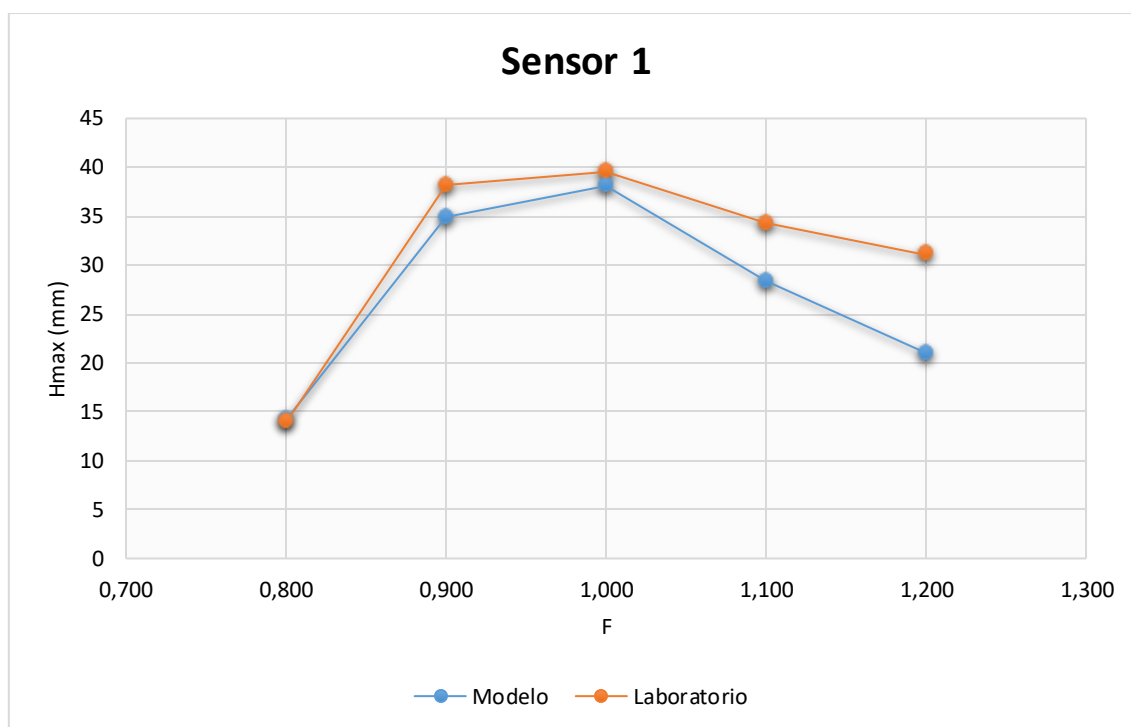


Gráfico 31 Caso calibración nº3 – Sensor 1 (0,457 m)

Sensor 1			
F	H ₁ modelo (mm)	H ₁ laboratorio (mm)	Error (%)
0,800	14,168	13,889	2,005
0,900	34,892	38,112	8,450
1,000	38,096	39,534	3,636
1,100	28,295	34,295	17,495
1,200	20,966	31,045	32,467

Tabla 38 Caso calibración nº3 – Sensor 1 (0,457 m)

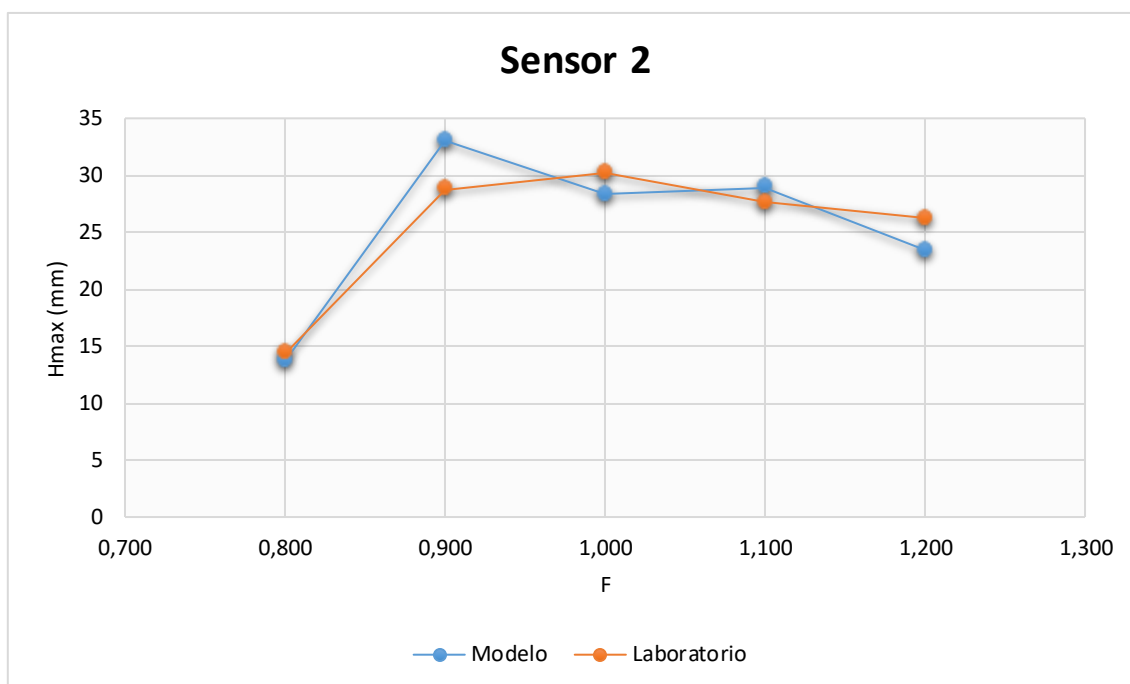


Gráfico 32 Caso calibración nº3 – Sensor 2 (0,914 m)

Sensor 2			
F	H ₂ modelo (mm)	H ₂ laboratorio (mm)	Error (%)
0,800	13,691	14,337	4,501
0,900	33,040	28,742	14,953
1,000	28,305	30,208	6,300
1,100	28,914	27,649	4,574
1,200	23,362	26,172	10,736

Tabla 39 Caso calibración nº3 – Sensor 2 (0,914 m)

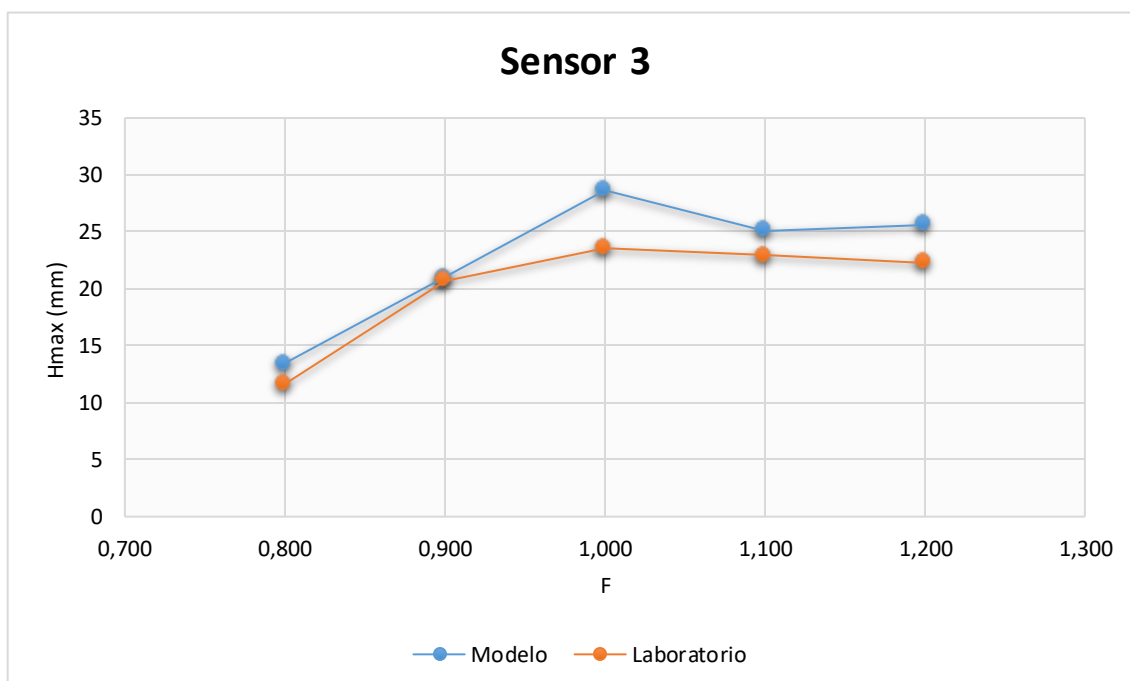


Gráfico 33 Caso calibración nº3 – Sensor 3 (1,524 m)

Sensor 3			
F	H₃ modelo (mm)	H₃ laboratorio (mm)	Error (%)
0,800	13,473	11,644	15,709
0,900	21,035	20,749	1,380
1,000	28,650	23,567	21,571
1,100	25,161	22,910	9,823
1,200	25,647	22,330	14,857

Tabla 40 Caso calibración nº3 – Sensor 3 (1,524 m)

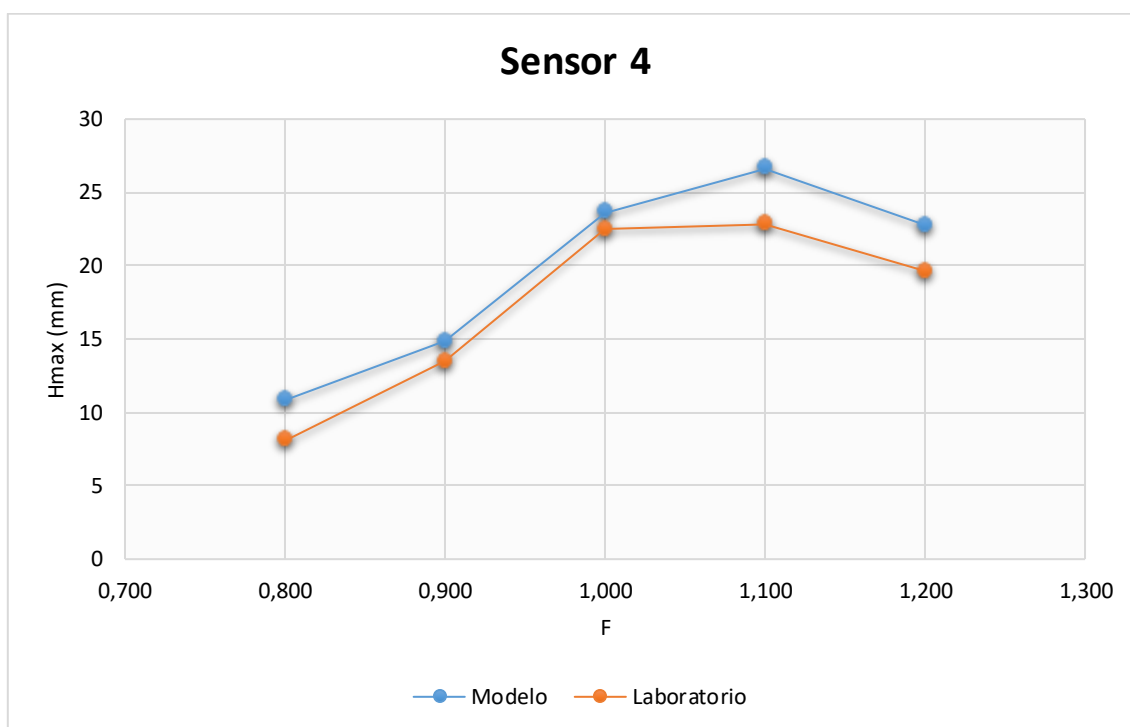


Gráfico 34 Caso calibración nº3 – Sensor 4 (2,438 m)

Sensor 4			
F	H₄ modelo (mm)	H₄ laboratorio (mm)	Error (%)
0,800	10,836	8,071	34,263
0,900	14,825	13,503	9,791
1,000	23,621	22,491	5,025
1,100	26,600	22,821	16,558
1,200	22,742	19,632	15,843

Tabla 41 Caso calibración nº3 – Sensor 4 (2,438 m)

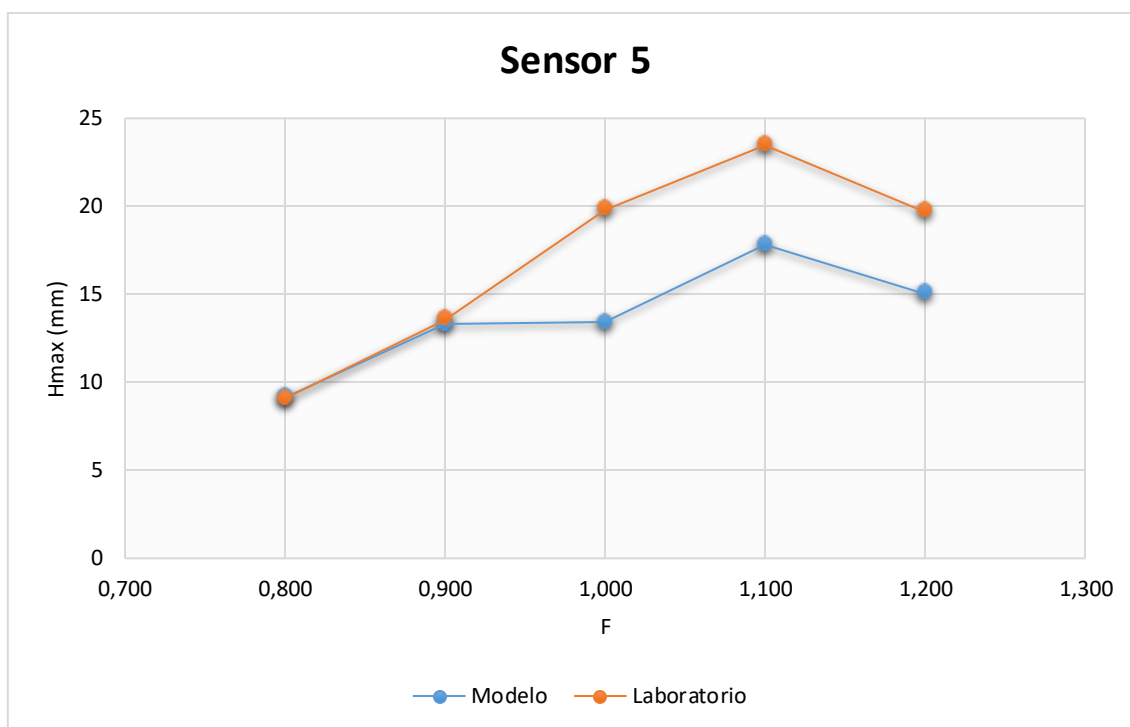


Gráfico 35 Caso calibración nº3 – Sensor 5 (3,353 m)

Sensor 5			
F	H5 modelo (mm)	H5 laboratorio (mm)	Error (%)
0,800	9,133	9,081	0,572
0,900	13,261	13,561	2,215
1,000	13,380	19,794	32,404
1,100	17,819	23,468	24,073
1,200	15,050	19,695	23,585

Tabla 42 Caso calibración nº3 – Sensor 5 (3,353 m)

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los coeficientes de calibración (alpha, beta y gamma) para la que se han obtenido los resultados expuestos anteriormente:

F	α	β	γ
0,800	0,640	1,000	2,350
0,900	1,650	1,000	2,100
1,000	2,000	1,000	2,050
1,100	2,280	1,000	2,100
1,200	3,200	1,000	2,300

Tabla 43 Caso calibración nº3 – Coeficientes de calibración

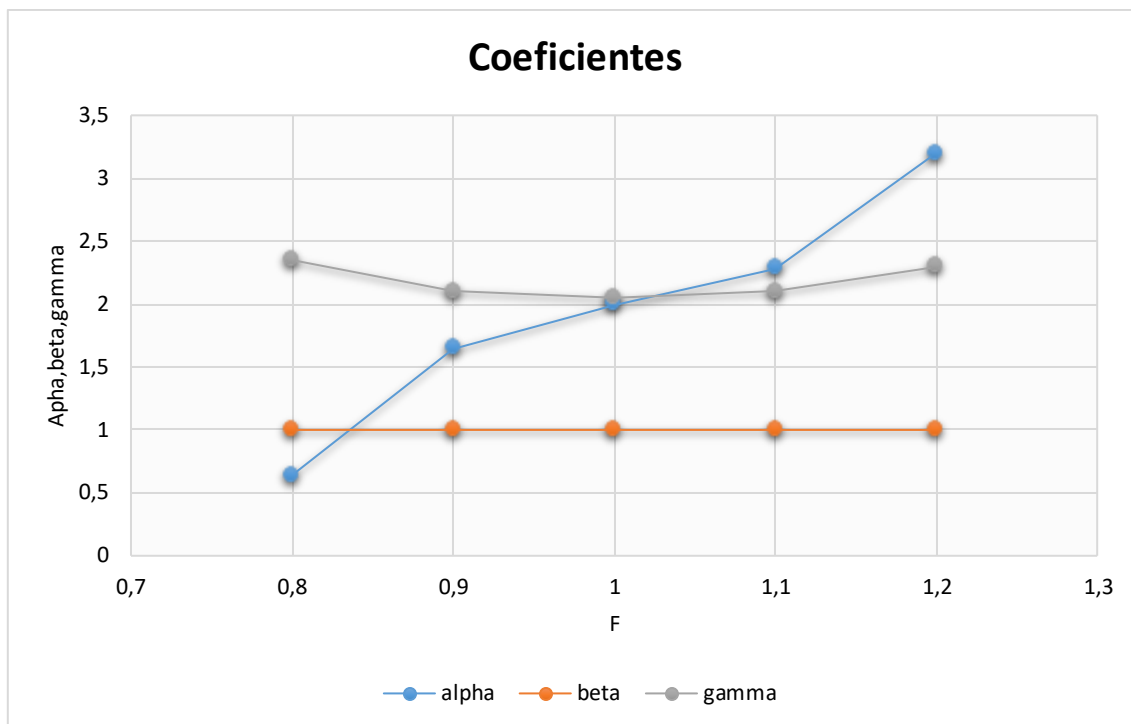


Gráfico 36 Caso calibración nº3 – Coeficientes de calibración

Se muestran a continuación los resultados obtenidos volcados en los gráficos expuestos en el apartado “Resultados presentados en el documento”:

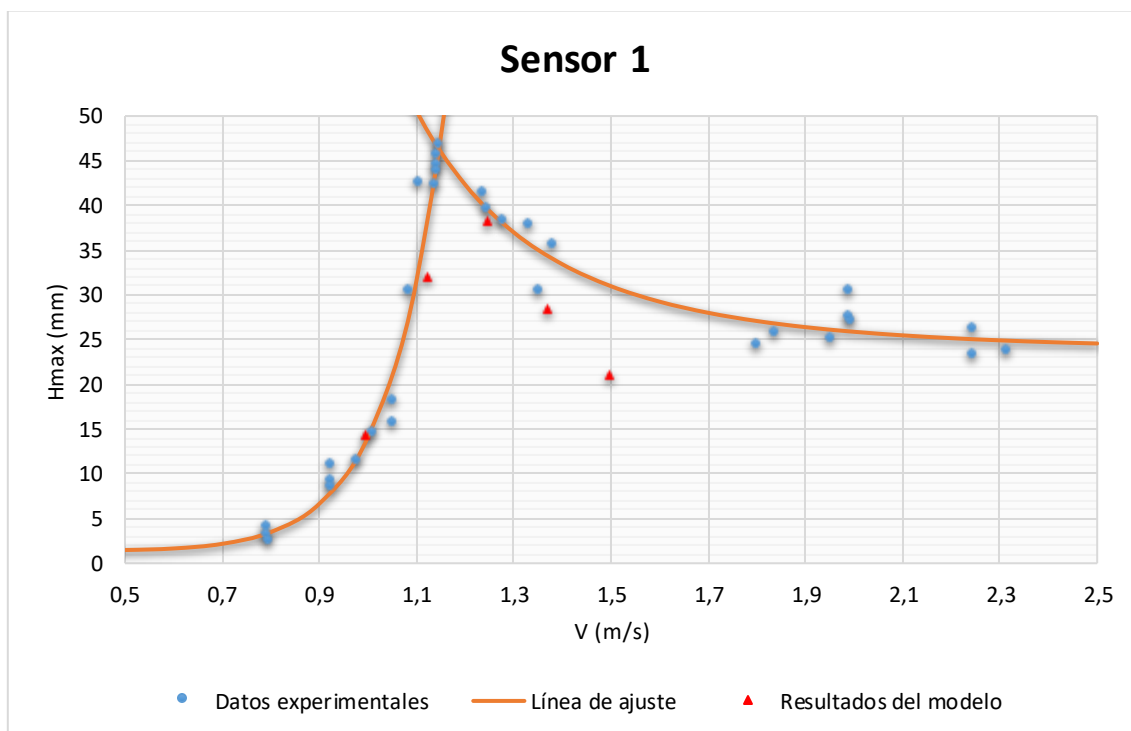


Gráfico 37 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 0,457 metros

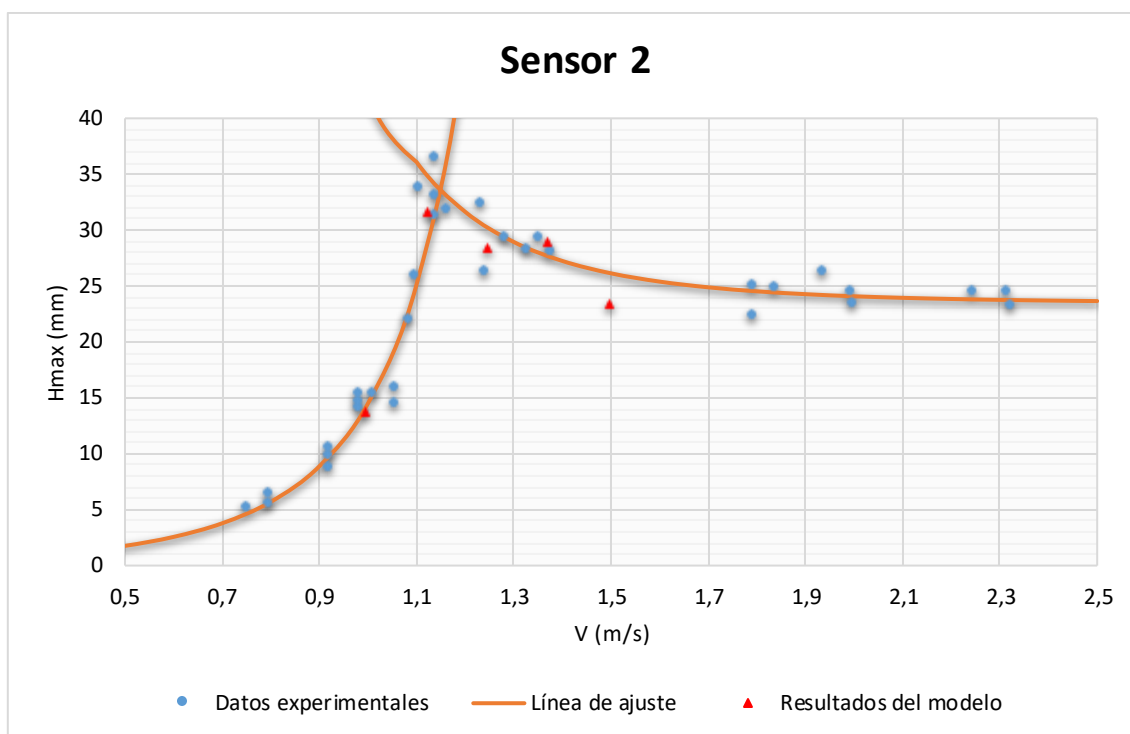


Gráfico 38 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 0,914 metros

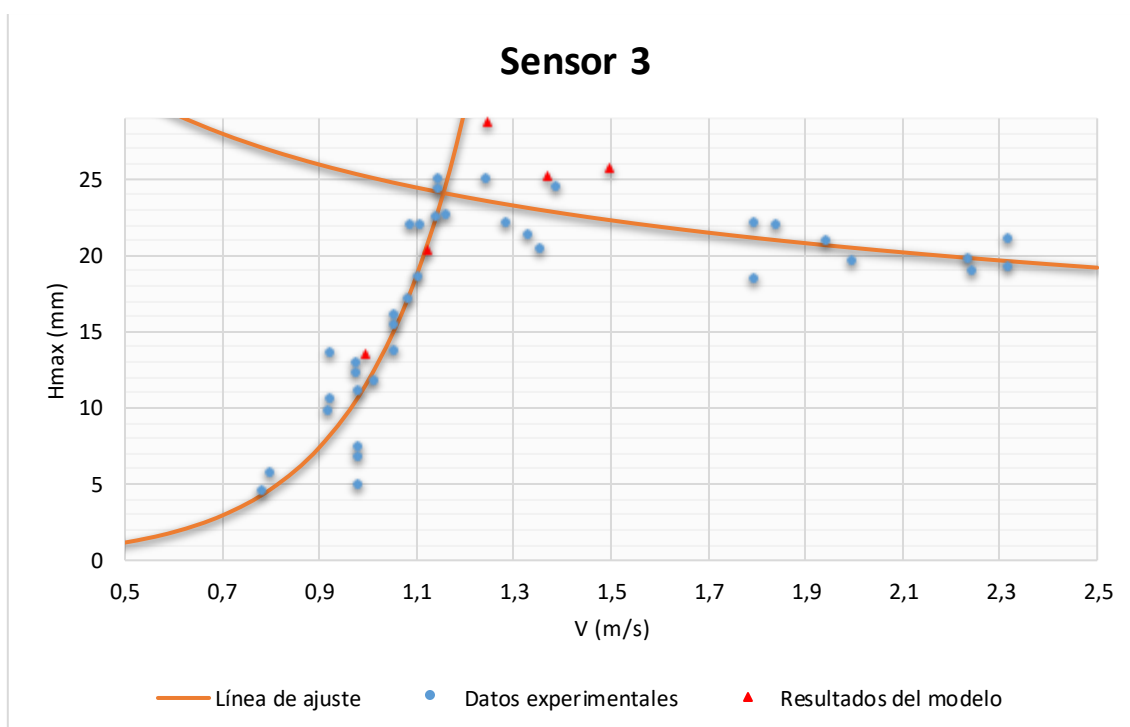


Gráfico 39 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 1,524 metros

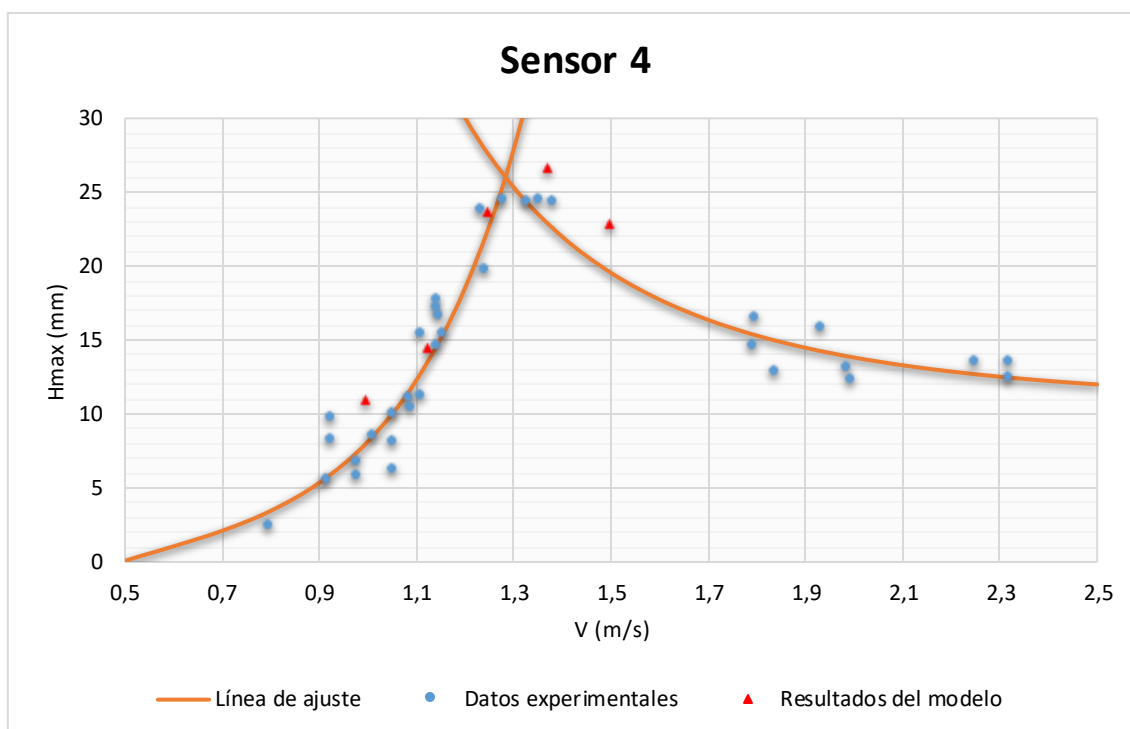


Gráfico 40 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 2,438 metros

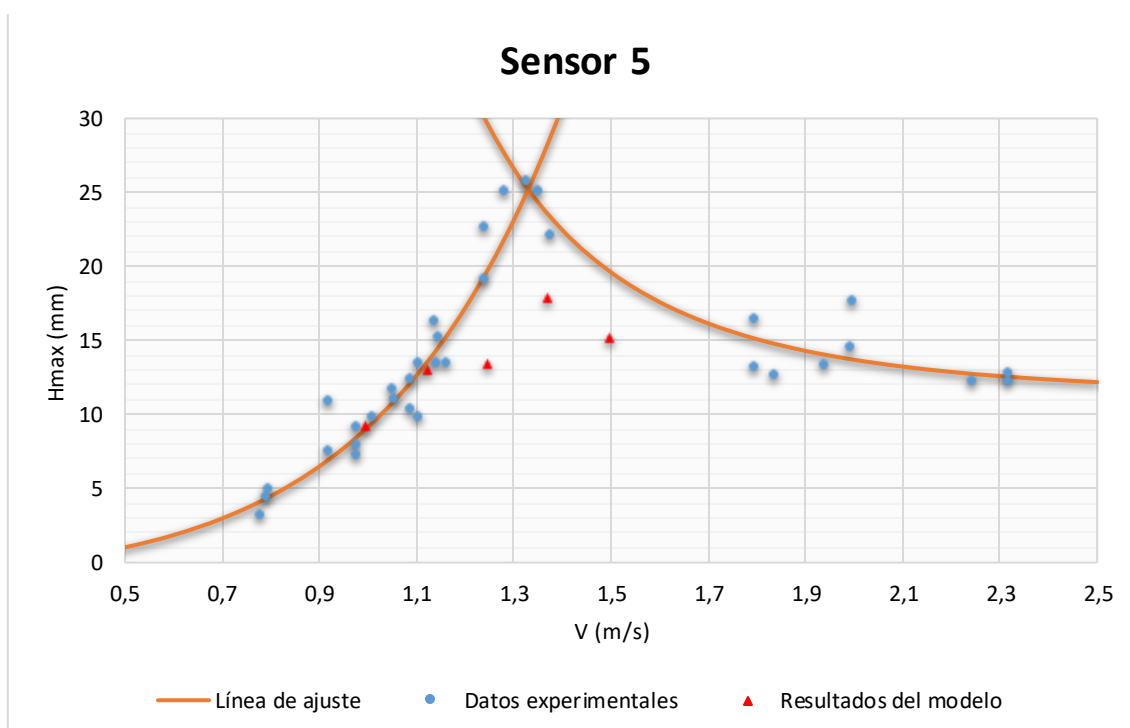


Gráfico 41 Caso calibración nº 3 – Volcado de resultados para una distancia entre 3,353 metros

Se muestran dos capturas obtenidas de la renderización del modelo:

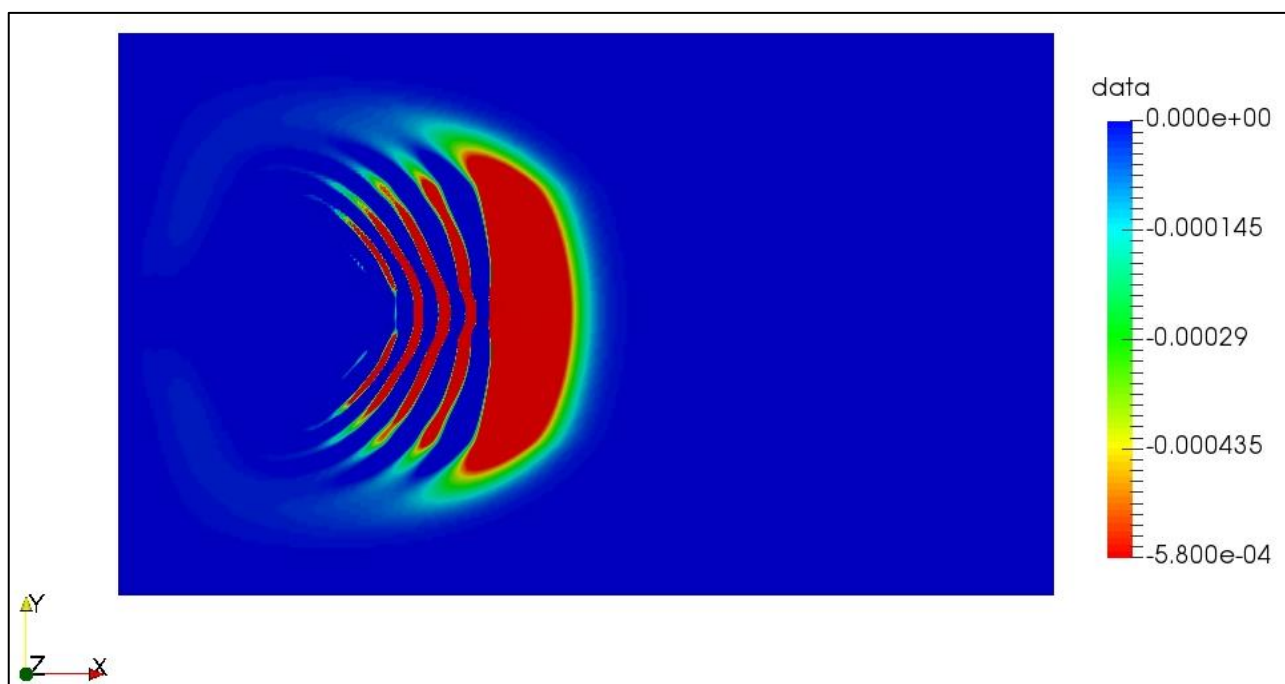


Figura 50 Caso calibración nº 3 – Renderización del modelo - $F=0.800$

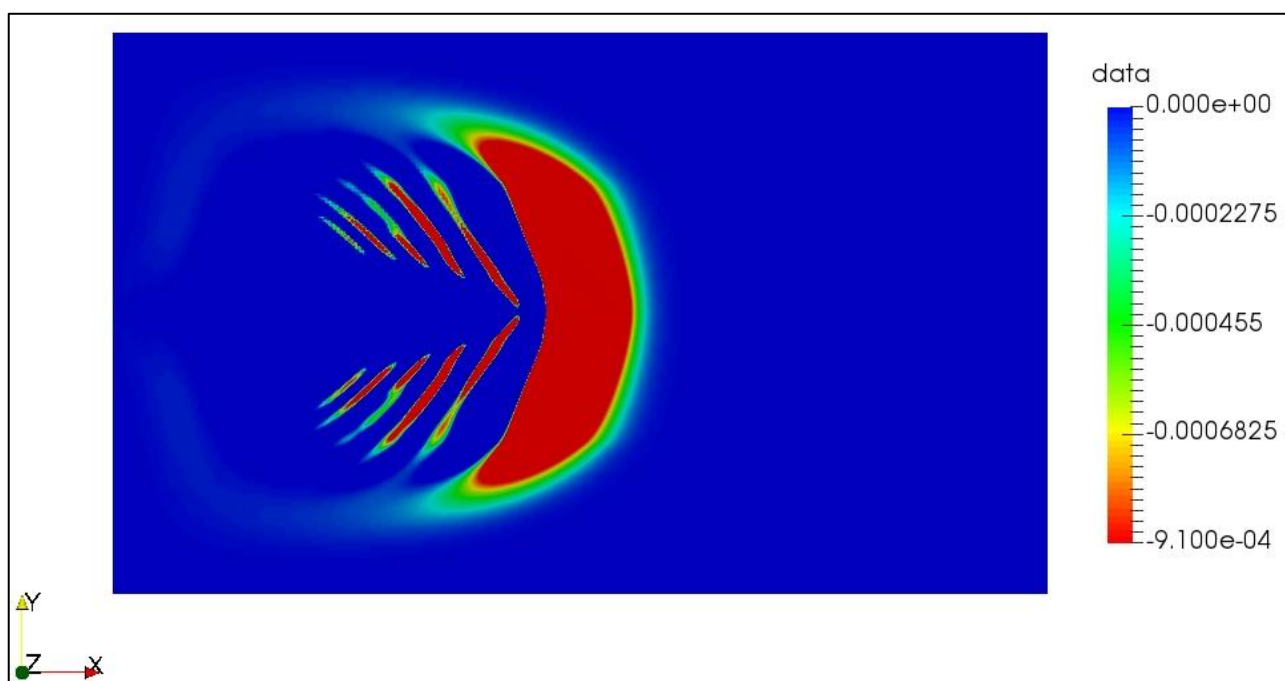


Figura 51 Caso calibración nº 3 – Renderización del modelo - $F=1.000$

A continuación quedan recogidos todos los ensayos realizados para cada uno de los casos, es decir, para cada número de Froude:

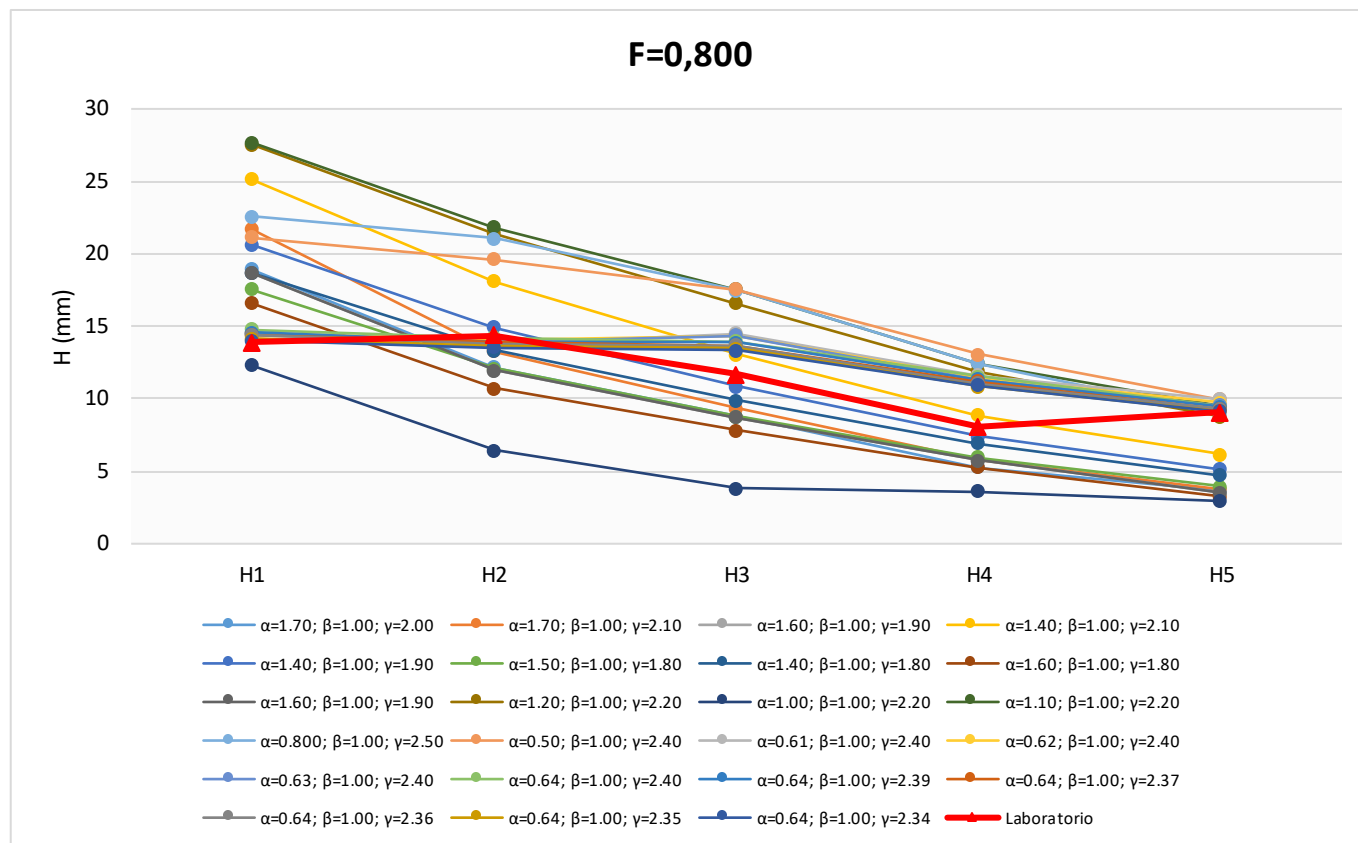


Gráfico 42 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=0,800

alfa	1,700	1,700	1,600	1,400	1,400	1,500	1,400	1,600	1,600	1,200
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	2,000	2,100	1,900	2,100	1,900	1,800	1,800	1,800	1,900	2,200
H1	18,893	21,673	18,663	25,106	20,613	17,510	18,671	16,571	18,663	27,528
H2	12,132	13,272	11,975	18,073	14,889	12,113	13,316	10,698	11,975	21,424
H3	8,767	9,327	8,734	13,062	10,814	8,776	9,890	7,845	8,734	16,556
H4	5,287	5,786	5,735	8,813	7,425	5,980	6,911	5,261	5,735	11,859
H5	3,673	3,753	3,526	6,190	5,118	3,973	4,695	3,268	3,526	8,781
e1 (mm)	5,004	7,784	4,774	11,217	6,724	3,621	4,781	2,682	4,774	13,639
e2 (mm)	-2,205	-1,065	-2,362	3,736	0,552	-2,224	-1,020	-3,639	-2,361	7,087
e3 (mm)	-2,877	-2,317	-2,910	1,418	-0,830	-2,868	-1,754	-3,799	-2,910	4,912
e4 (mm)	-2,784	-2,285	-2,336	0,742	-0,646	-2,091	-1,161	-2,810	-2,337	3,788
e5 (mm)	-5,408	-5,328	-5,555	-2,891	-3,963	-5,108	-4,385	-5,813	-5,555	-0,300
error medio (mm)	3,655	3,756	3,587	4,001	2,543	3,182	2,620	3,748	3,587	5,945
e1 (%)	36,028	56,044	34,372	80,761	48,412	26,070	34,426	19,310	34,373	98,201
e2 (%)	15,377	7,426	16,473	26,062	3,853	15,510	7,116	25,382	16,471	49,434
e3 (%)	24,708	19,898	24,991	12,178	7,128	24,631	15,066	32,624	24,995	42,187
e4 (%)	34,494	28,312	28,943	9,193	8,004	25,908	14,379	34,814	28,950	46,928
e5 (%)	59,552	58,671	61,171	31,834	43,639	56,248	48,293	64,012	61,174	3,305
error medio (%)	34,032	34,070	33,190	32,006	22,207	29,673	23,856	35,228	33,192	48,011

alfa	1,000	1,100	0,800	0,500	0,610	0,620	0,630	0,640	0,640	0,640
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	2,200	2,200	2,500	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,390	2,380
H1	12,283	27,671	22,594	21,099	14,567	14,551	14,538	14,746	14,597	14,565
H2	6,448	21,823	21,061	19,578	13,821	13,993	13,849	14,229	13,970	13,882
H3	3,798	17,508	17,438	17,572	14,530	14,399	14,366	13,982	13,859	13,799
H4	3,612	12,436	12,406	13,029	11,586	11,440	11,325	11,562	11,322	11,175
H5	2,946	9,503	8,932	9,923	9,964	9,755	9,522	9,485	9,463	9,426
e1 (mm)	-1,606	13,782	8,705	7,210	0,677	0,662	0,649	0,857	0,708	0,676
e2 (mm)	-7,889	7,486	6,725	5,242	-0,516	-0,344	-0,488	-0,107	-0,367	-0,455
e3 (mm)	-7,846	5,864	5,794	5,928	2,886	2,755	2,722	2,338	2,215	2,155
e4 (mm)	-4,459	4,365	4,335	4,958	3,515	3,368	3,254	3,491	3,251	3,104
e5 (mm)	-6,135	0,422	-0,149	0,842	0,883	0,674	0,441	0,404	0,383	0,345
error medio (mm)	5,587	6,384	5,141	4,836	1,696	1,561	1,511	1,440	1,385	1,347
e1 (%)	11,563	99,232	62,675	51,908	4,878	4,768	4,674	6,170	5,097	4,864
e2 (%)	55,027	52,219	46,905	36,560	3,599	2,398	3,401	0,748	2,558	3,174
e3 (%)	67,386	50,359	49,759	50,907	24,782	23,664	23,376	20,080	19,019	18,505
e4 (%)	55,249	54,083	53,709	61,424	43,553	41,735	40,313	43,257	40,281	38,457
e5 (%)	67,558	4,651	1,637	9,276	9,728	7,424	4,856	4,453	4,214	3,800
error medio (%)	51,357	52,109	42,937	42,015	17,308	15,998	15,324	14,942	14,234	13,760

alfa	0,640	0,640	0,640	0,640
beta	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	2,370	2,360	2,350	2,340
H1	14,392	14,397	14,168	14,032
H2	13,876	13,819	13,691	13,519
H3	13,618	13,650	13,473	13,366
H4	11,200	11,086	10,836	10,896
H5	9,279	9,308	9,133	9,107
e1 (mm)	0,503	0,508	0,278	0,143
e2 (mm)	-0,460	-0,517	-0,645	-0,817
e3 (mm)	1,974	2,006	1,829	1,722
e4 (mm)	3,129	3,015	2,765	2,825
e5 (mm)	0,199	0,227	0,052	0,026
error medio (mm)	1,253	1,255	1,114	1,107
e1 (%)	3,623	3,658	2,005	1,032
e2 (%)	3,211	3,609	4,501	5,700
e3 (%)	16,951	17,228	15,709	14,786
e4 (%)	38,773	37,355	34,263	35,000
e5 (%)	2,186	2,501	0,572	0,283
error medio (%)	12,949	12,870	11,410	11,360

Tabla 44 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=0,800

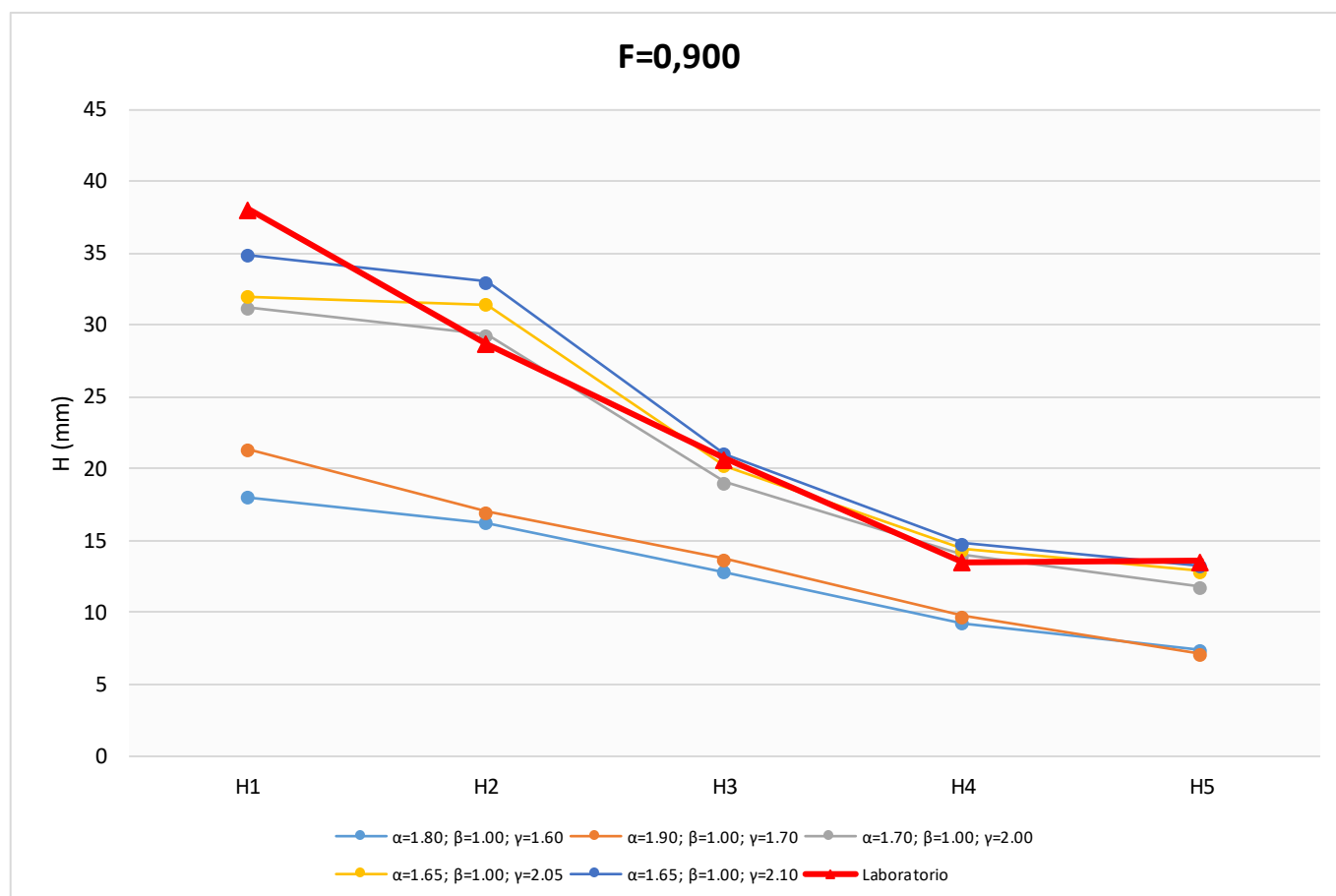


Gráfico 43 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=0,900

alfa	1,800	1,900	1,700	1,650	1,650
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,600	1,700	2,000	2,050	2,100
H1	18,020	21,376	31,254	31,990	34,892
H2	16,274	17,048	29,364	31,478	33,040
H3	12,836	13,723	19,058	20,269	21,035
H4	9,272	9,764	13,987	14,409	14,825
H5	7,413	7,142	11,819	12,919	13,261
e1 (mm)	-20,092	-16,736	-6,858	-6,122	-3,220
e2 (mm)	-12,468	-11,694	0,622	2,736	4,298
e3 (mm)	-7,913	-7,026	-1,691	-0,480	0,286
e4 (mm)	-4,231	-3,739	0,484	0,906	1,322
e5 (mm)	-6,148	-6,419	-1,742	-0,642	-0,300
error medio (mm)	10,170	9,123	2,279	2,177	1,885
e1 (%)	52,718	43,913	17,994	16,063	8,450
e2 (%)	43,379	40,686	2,164	9,519	14,953
e3 (%)	38,137	33,862	8,150	2,313	1,380
e4 (%)	31,334	27,690	3,584	6,710	9,791
e5 (%)	45,336	47,334	12,846	4,734	2,215
error medio (%)	42,181	38,697	8,948	7,868	7,358

Tabla 45 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=0,900

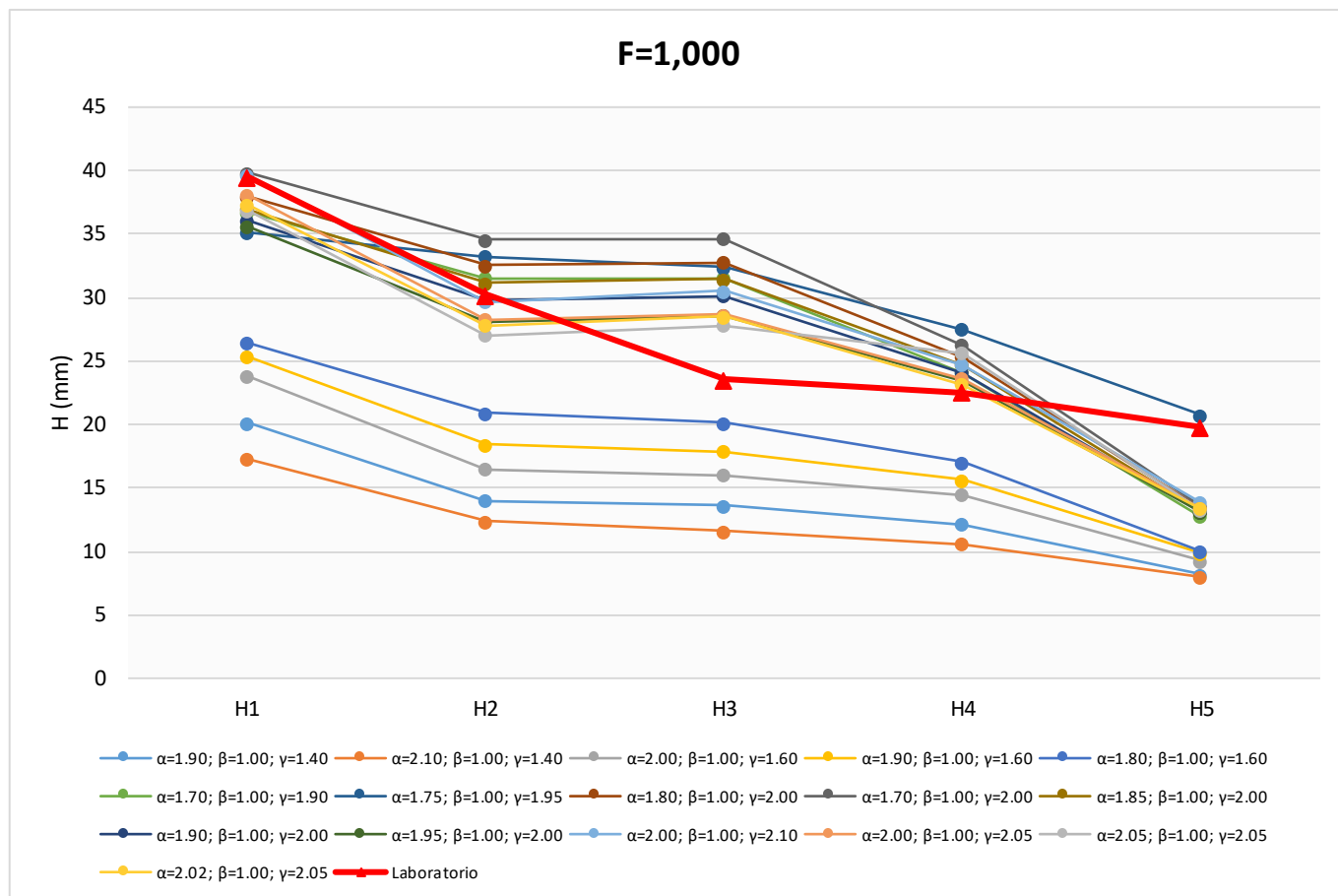


Gráfico 44 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=1,000

alfa	1,900	2,100	2,000	1,900	1,800	1,700	1,750	1,800	1,700	1,850
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,400	1,400	1,600	1,600	1,600	1,900	1,950	2,000	2,000	2,000
H1	20,160	17,281	23,815	25,357	26,442	36,748	35,138	37,984	39,866	36,931
H2	13,970	12,358	16,512	18,449	20,898	31,521	33,218	32,548	34,521	31,177
H3	13,598	11,627	15,985	17,854	20,094	31,536	32,354	32,732	34,605	31,478
H4	12,147	10,572	14,492	15,586	17,056	24,087	27,505	25,320	26,233	24,735
H5	8,209	7,988	9,288	9,873	10,010	12,719	20,767	13,370	13,560	13,147
e1 (mm)	-19,374	-22,253	-15,719	-14,177	-13,092	-2,786	-4,396	-1,550	0,332	-2,603
e2 (mm)	-16,238	-17,850	-13,696	-11,759	-9,310	1,313	3,010	2,340	4,313	0,969
e3 (mm)	-9,969	-11,940	-7,582	-5,713	-3,473	7,970	8,787	9,165	11,038	7,911
e4 (mm)	-10,344	-11,919	-7,999	-6,905	-5,435	1,596	5,014	2,829	3,742	2,245
e5 (mm)	-11,585	-11,806	-10,506	-9,921	-9,784	-7,076	0,972	-6,424	-6,235	-6,647
error medio (mm)	13,502	15,154	11,100	9,695	8,219	4,148	4,436	4,462	5,132	4,075
e1 (%)	49,006	56,288	39,761	35,860	33,116	7,048	11,120	3,922	0,840	6,585
e2 (%)	53,754	59,091	45,340	38,927	30,820	4,345	9,963	7,745	14,278	3,208
e3 (%)	42,299	50,663	32,171	24,240	14,735	33,818	37,287	38,891	46,838	33,570
e4 (%)	45,991	52,994	35,565	30,701	24,165	7,098	22,292	12,578	16,638	9,980
e5 (%)	58,529	59,645	53,078	50,122	49,430	35,746	4,911	32,456	31,498	33,582
error medio (%)	49,916	55,736	41,183	35,970	30,453	17,611	17,115	19,118	22,019	17,385

alfa	1,900	1,950	2,000	2,000	2,050	2,020
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	2,000	2,000	2,100	2,050	2,050	2,050
H1	36,092	35,609	39,685	38,096	36,892	37,330
H2	29,823	28,138	29,642	28,305	27,036	27,779
H3	30,094	28,609	30,552	28,650	27,834	28,478
H4	24,092	23,345	24,666	23,621	25,655	23,188
H5	13,089	13,104	13,839	13,380	13,265	13,340
e1 (mm)	-3,442	-3,925	0,151	-1,438	-2,642	-2,205
e2 (mm)	-0,386	-2,070	-0,566	-1,903	-3,172	-2,429
e3 (mm)	6,527	5,042	6,985	5,084	4,267	4,912
e4 (mm)	1,601	0,854	2,175	1,130	3,164	0,697
e5 (mm)	-6,706	-6,690	-5,956	-6,414	-6,529	-6,455
error medio (mm)	3,732	3,716	3,167	3,194	3,955	3,339
e1 (%)	8,706	9,928	0,381	3,636	6,683	5,576
e2 (%)	1,277	6,852	1,873	6,300	10,501	8,042
e3 (%)	27,697	21,396	29,641	21,571	18,107	20,841
e4 (%)	7,120	3,799	9,672	5,025	14,069	3,097
e5 (%)	33,877	33,798	30,087	32,404	32,986	32,610
error medio (%)	15,735	15,154	14,331	13,787	16,469	14,033

Tabla 46 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=1,000

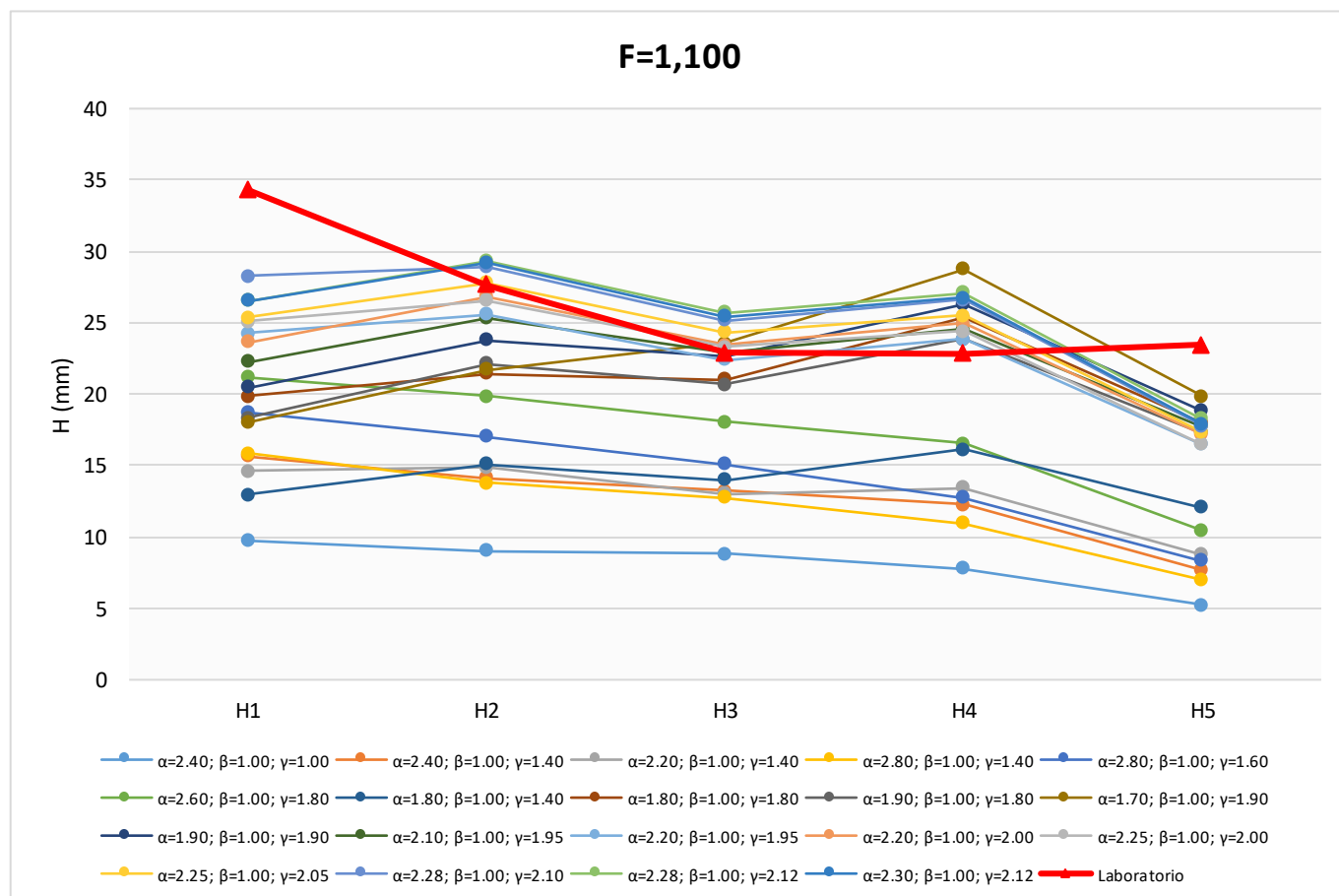


Gráfico 45 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=1,100

alfa	2,400	2,400	2,200	2,800	2,800	2,600	1,800	1,800	1,900	1,700
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,000	1,400	1,400	1,400	1,600	1,800	1,400	1,800	1,800	1,900
H1	9,738	15,628	14,642	15,871	18,715	21,169	12,943	19,877	18,368	18,033
H2	8,999	14,132	14,883	13,762	17,057	19,880	15,084	21,449	22,101	21,719
H3	8,807	13,223	13,045	12,767	15,090	18,034	14,012	21,057	20,651	23,591
H4	7,793	12,282	13,434	10,965	12,743	16,516	16,155	25,377	23,878	28,727
H5	5,266	7,688	8,756	7,002	8,307	10,464	12,041	17,991	17,273	19,859
e1 (mm)	-24,557	-18,667	-19,653	-18,424	-15,580	-13,126	-21,352	-14,418	-15,927	-16,262
e2 (mm)	-18,650	-13,517	-12,766	-13,887	-10,592	-7,769	-12,565	-6,200	-5,548	-5,930
e3 (mm)	-14,103	-9,687	-9,865	-10,143	-7,820	-4,876	-8,898	-1,854	-2,259	0,681
e4 (mm)	-15,028	-10,539	-9,387	-11,856	-10,078	-6,305	-6,666	2,556	1,057	5,906
e5 (mm)	-18,202	-15,780	-14,712	-16,466	-15,162	-13,004	-11,427	-5,477	-6,195	-3,609
error medio (mm)	18,108	13,638	13,277	14,155	11,846	9,016	12,182	6,101	6,197	6,477
e1 (%)	71,605	54,431	57,306	53,721	45,429	38,274	62,260	42,040	46,442	47,419
e2 (%)	67,453	48,888	46,172	50,225	38,310	28,099	45,445	22,424	20,065	21,446
e3 (%)	61,558	42,283	43,060	44,273	34,134	21,283	38,839	8,090	9,859	2,972
e4 (%)	65,852	46,181	41,133	51,953	44,159	27,628	29,210	11,201	4,632	25,878
e5 (%)	77,561	67,240	62,690	70,164	64,605	55,412	48,692	23,337	26,399	15,378
error medio (%)	68,806	51,805	50,072	54,067	45,327	34,139	44,889	21,418	21,479	22,619

alfa	1,900	2,100	2,200	2,200	2,250	2,250	2,250	2,280	2,280	2,300
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,900	1,950	1,950	2,000	2,000	2,050	2,100	2,100	2,120	2,120
H1	20,496	22,254	24,265	23,636	25,079	25,373	26,238	28,295	26,557	26,510
H2	23,793	25,322	25,564	26,811	26,536	27,770	28,986	28,914	29,319	29,205
H3	22,590	22,921	22,408	23,448	23,272	24,332	25,263	25,161	25,725	25,471
H4	26,296	24,571	23,821	24,972	24,408	25,523	26,891	26,600	27,096	26,774
H5	18,832	17,715	16,476	17,198	16,480	17,359	18,200	17,819	18,241	17,922
e1 (mm)	-13,800	-12,041	-10,031	-10,659	-9,216	-8,922	-8,057	-6,000	-7,738	-7,785
e2 (mm)	-3,856	-2,327	-2,085	-0,839	-1,113	0,121	1,337	1,265	1,670	1,556
e3 (mm)	-0,320	0,011	-0,502	0,538	0,361	1,422	2,353	2,251	2,815	2,561
e4 (mm)	3,475	1,750	0,999	2,151	1,587	2,702	4,070	3,779	4,275	3,953
e5 (mm)	-4,636	-5,753	-6,992	-6,270	-6,988	-6,109	-5,268	-5,650	-5,227	-5,546
error medio (mm)	5,217	4,376	4,122	4,091	3,853	3,855	4,217	3,789	4,345	4,280
e1 (%)	40,238	35,110	29,248	31,081	26,873	26,015	23,493	17,495	22,562	22,700
e2 (%)	13,945	8,416	7,541	3,033	4,027	0,438	4,835	4,574	6,039	5,629
e3 (%)	1,399	0,048	2,193	2,348	1,578	6,205	10,270	9,823	12,287	11,179
e4 (%)	15,225	7,667	4,380	9,427	6,952	11,841	17,833	16,558	18,733	17,320
e5 (%)	19,755	24,514	29,795	26,716	29,777	26,031	22,449	24,073	22,274	23,633
error medio (%)	18,112	15,151	14,631	14,521	13,841	14,106	15,776	14,505	16,379	16,092

Tabla 47 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=1,100

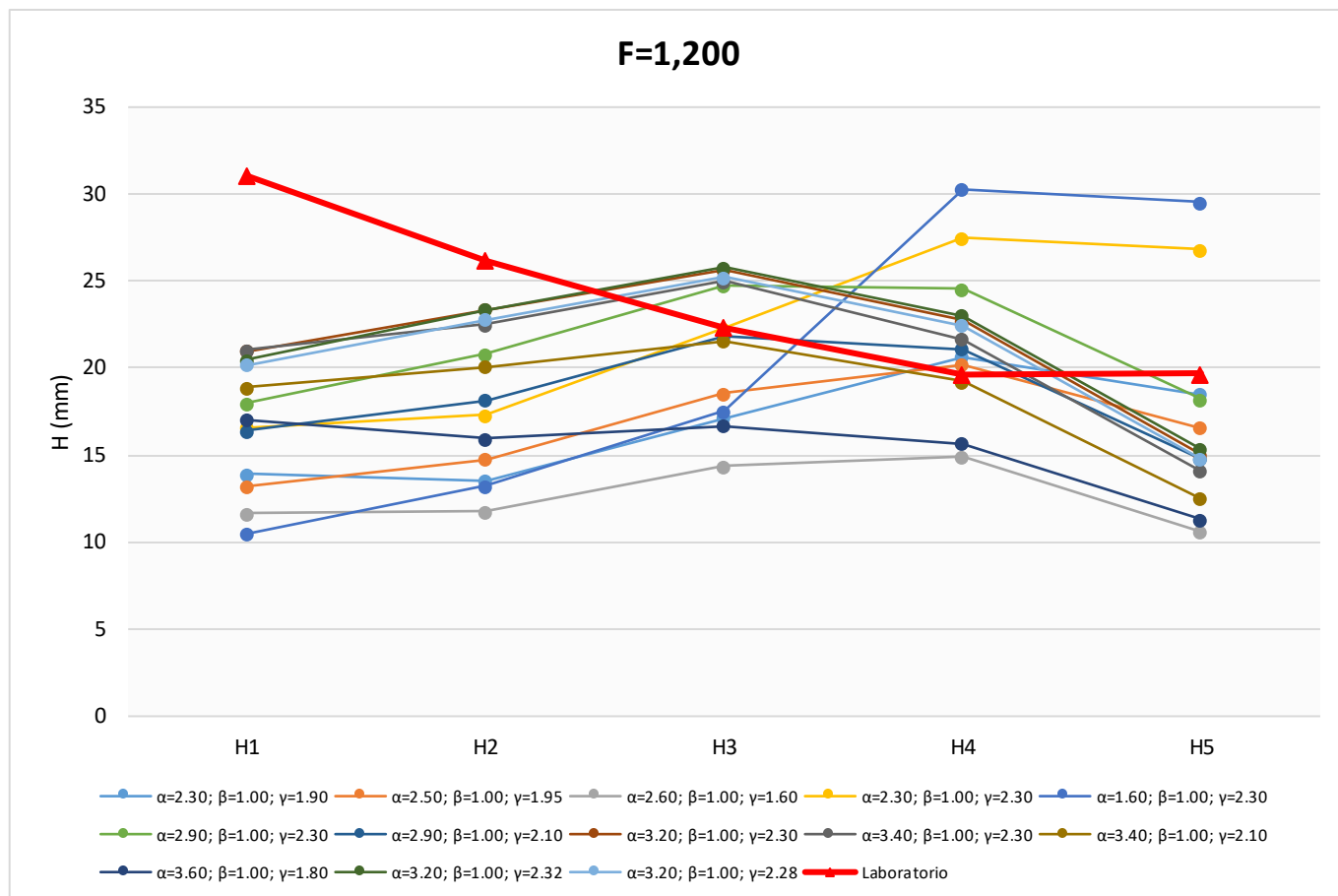


Gráfico 46 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=1,200

alfa	2,300	2,500	2,600	2,300	1,600	2,900	2,900	3,200	3,400	3,400
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,900	1,950	1,600	2,300	2,300	2,300	2,100	2,300	2,300	2,100
H1	13,915	13,218	11,646	16,576	10,491	18,016	16,410	20,966	21,040	18,915
H2	13,524	14,754	11,768	17,305	13,240	20,819	18,139	23,362	22,527	20,074
H3	17,145	18,547	14,344	22,304	17,515	24,753	21,837	25,647	25,028	21,547
H4	20,629	20,191	14,924	27,504	30,272	24,539	21,089	22,742	21,667	19,232
H5	18,501	16,554	10,606	26,836	29,557	18,190	14,788	15,050	14,085	12,501
e1 (mm)	-17,131	-17,827	-19,399	-14,469	-20,554	-13,030	-14,635	-10,080	-10,005	-12,130
e2 (mm)	-12,648	-11,418	-14,404	-8,868	-12,932	-5,353	-8,034	-2,810	-3,645	-6,098
e3 (mm)	-5,185	-3,783	-7,986	-0,025	-4,815	2,424	-0,493	3,318	2,698	-0,783
e4 (mm)	0,997	0,560	-4,708	7,873	10,640	4,908	1,457	3,110	2,036	-0,400
e5 (mm)	-1,194	-3,141	-9,089	7,141	9,862	-1,505	-4,907	-4,645	-5,610	-7,194
error medio (mm)	7,431	7,346	11,117	7,675	11,761	5,444	5,905	4,792	4,799	5,321
e1 (%)	55,180	57,422	62,487	46,607	66,207	41,970	47,141	32,467	32,227	39,072
e2 (%)	48,326	43,626	55,035	33,882	49,410	20,455	30,695	10,736	13,926	23,299
e3 (%)	23,220	16,942	35,763	0,113	21,563	10,854	2,206	14,857	12,084	3,506
e4 (%)	5,080	2,850	23,981	40,101	54,199	24,998	7,421	15,843	10,369	2,038
e5 (%)	6,062	15,948	46,151	36,257	50,074	7,643	24,915	23,585	28,484	36,528
error medio (%)	27,574	27,358	44,683	31,392	48,290	21,184	22,476	19,498	19,418	20,889

alfa	3,600	3,200	3,200
beta	1,000	1,000	1,000
gamma	1,800	2,320	2,280
H1	17,020	20,462	20,188
H2	15,935	23,383	22,794
H3	16,667	25,816	25,257
H4	15,665	23,022	22,452
H5	11,327	15,353	14,789
e1 (mm)	-14,025	-10,584	-10,858
e2 (mm)	-10,237	-2,789	-3,378
e3 (mm)	-5,663	3,486	2,928
e4 (mm)	-3,967	3,390	2,821
e5 (mm)	-8,368	-4,342	-4,906
error medio (mm)	8,452	4,918	4,978
e1 (%)	45,176	34,091	34,973
e2 (%)	39,114	10,656	12,907
e3 (%)	25,360	15,612	13,112
e4 (%)	20,205	17,267	14,367
e5 (%)	42,488	22,048	24,909
error medio (%)	34,469	19,935	20,054

Tabla 48 Caso calibración nº3 – Total ensayos F=1,200

Calibración - Caso nº 4

Descripción del ensayo real

Características generales

Autor/es: All American Marine Incorporated

Teknicraft Design

Año: 2002

Descripción breve

Se trata de un ensayo de campo llevado a cabo en la Bahía de Bellingham (Washington, Estados Unidos).



Figura 52 Ubicación de la Bahía de Bellingham

En este experimento se plantea la medida de la altura de ola generada por un barco a diferentes distancias de la línea de navegación y con diferentes velocidades de pasada.

Los ensayos fueron realizados en la Bahía de Bellingham el 22 de febrero de 2002 con unas condiciones atmosféricas adecuadas. No obstante, los técnicos encargados de llevar a cabo el experimento filtraron los resultados para poder eliminar el oleaje producido por el viento.

Geometría del área de estudio

Como se indicó anteriormente, el experimento fue desarrollado en la Bahía de Bellingham, tomando medidas a diferentes distancias de la línea de navegación durante el tránsito de la embarcación analizada.

La profundidad de la zona donde se llevó a cabo el estudio puede ser apreciada en la siguiente carta náutica, extraída del documento original:

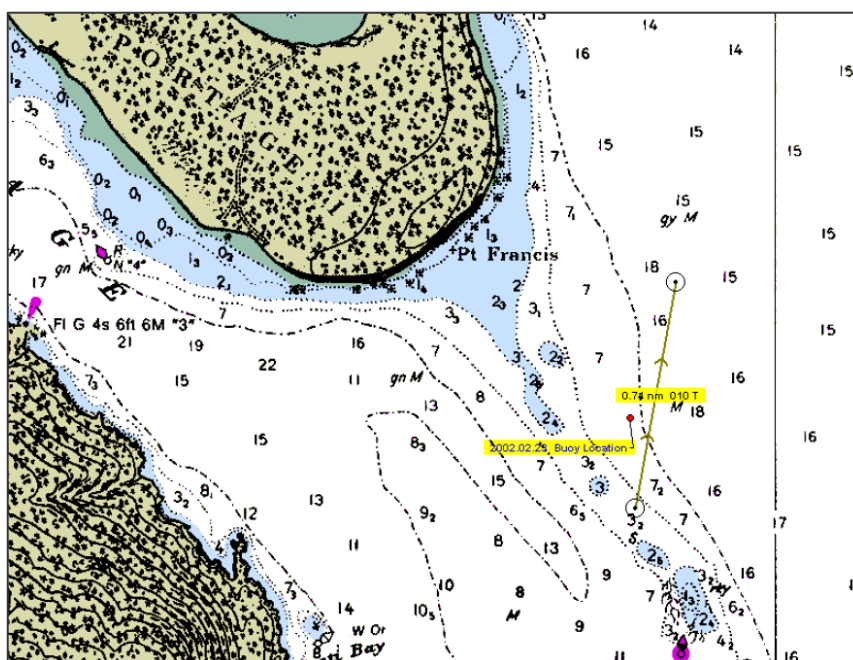


Figura 53 Zona de desarrollo del estudio (All Marine Incorporated, 2002)

Como simplificación se ha decidido considerar una profundidad constante e igual a 18 metros para todo el área de estudio. En los apartados siguientes se especificará detalladamente el tamaño considerado para el dominio que se introducirá en el modelo.

Sensores de medición

El sistema para la medida de la altura de ola generada por el paso de la embarcación fue un instrumento sumergido que permitía la medida de la presión cuatro veces por segundo, registrando los resultados en la memoria de un ordenador. Este instrumento estaba anclado al suelo y suspendido gracias a una boya que flota en superficie.

A continuación se muestra un esquema de la instrumentación utilizada, extraído del documento original:

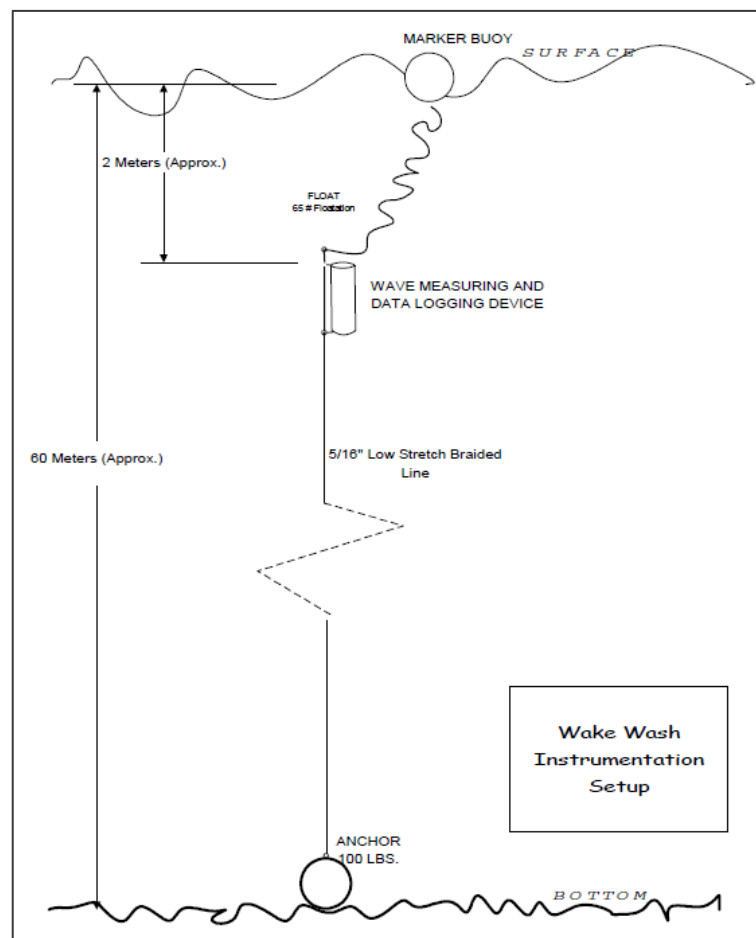


Figura 54 Instrumentación empleada para la medida de la altura de ola (All Marine Incorporated, 2002)

Características de la embarcación empleada

Las características de la embarcación empleada para llevar a cabo el experimento son las siguientes:

Eslora (m)	19,75
Manga (m)	8,08
Calado (m)	1,00

Tabla 49 Caso calibración nº4 - Características del barco a simular

Resultados presentados en el documento

En el experimento se realizaron 42 ensayos, obteniéndose en cada uno de ellos la siguiente información:

- Velocidad
- Número de Froude dependiente de la eslora
- Número de Froude dependiente de la profundidad
- Hora del registro
- Distancia a la línea de navegación
- Factor de corrección para una distancia normalizada de 300 metros
- Registro del oleaje con la altura de ola máxima

Para cada uno de los ensayos, independientemente de la distancia a la línea de navegación, la altura de ola es corregida por un factor para normalizar todos los resultados a una misma distancia, 300 metros, y de esta forma poder obtener un gráfico unificado:

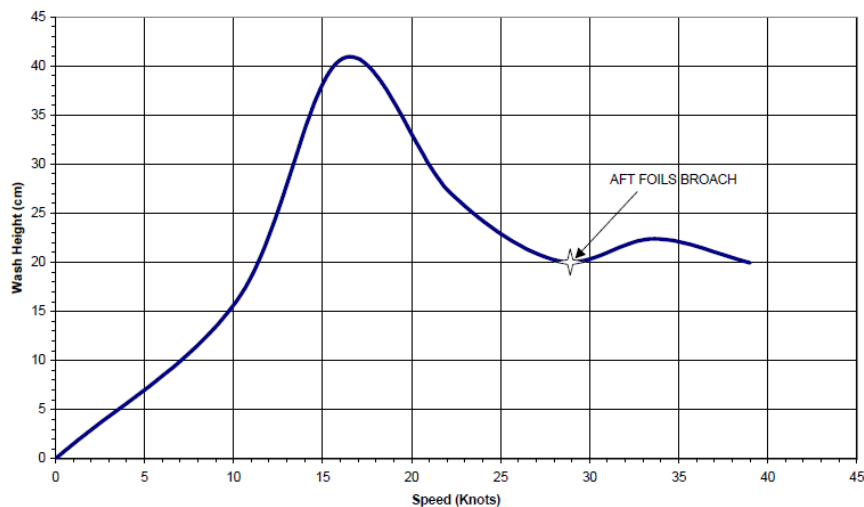


Figura 55 Altura de ola vs. Velocidad (All Marine Incorporated, 2002)

En lo que respecta los registros individuales de cada ensayo, se muestra a modo de ejemplo el obtenido para una distancia de 135 metros y una velocidad de 5,14 m/s (10 nudos):

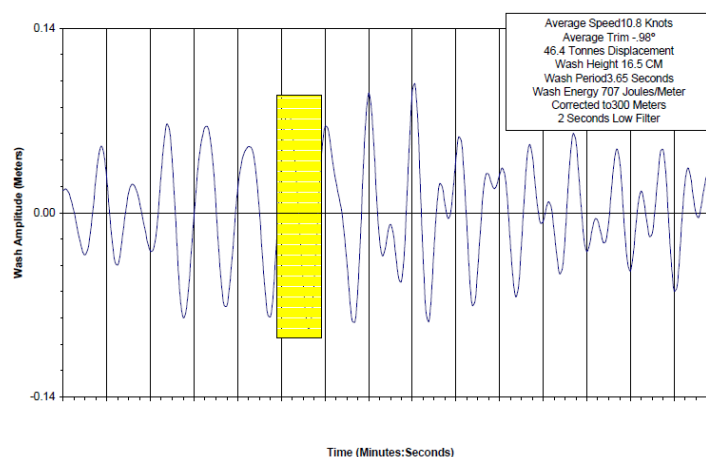


Figura 56 Registro individual de altura de ola (All Marine Incorporated, 2002)

La totalidad de ensayos realizados se pueden agrupar en seis bloques, cada uno de ellos para una velocidad de pasada:

v (m/s)	v (nudos)	F_h
20,578	40,000	1,550
17,491	34,000	1,320
14,404	28,000	1,080
11,318	22,000	0,850
8,231	16,000	0,620
5,144	10,000	0,390

Tabla 50 Ensayos realizados (All Marine Incorporated, 2002)

Para realizar la calibración se han volcado en un gráfico las alturas de ola máximas obtenidas para cuatro de estos bloques. Posteriormente, se ha obtenido su línea de ajuste y se han extraído los resultados para tres distancias concretas con respecto a la línea de navegación: 130, 160 y 190 metros.

Los gráficos obtenidos fueron los siguientes:

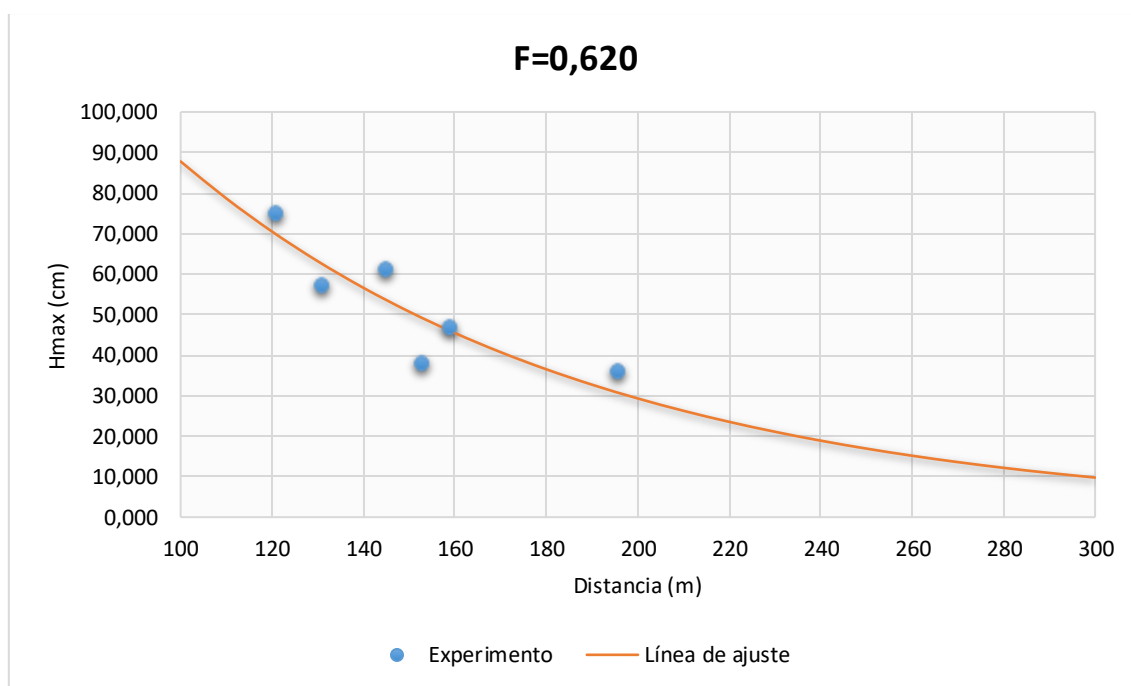


Gráfico 47 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=0,620$

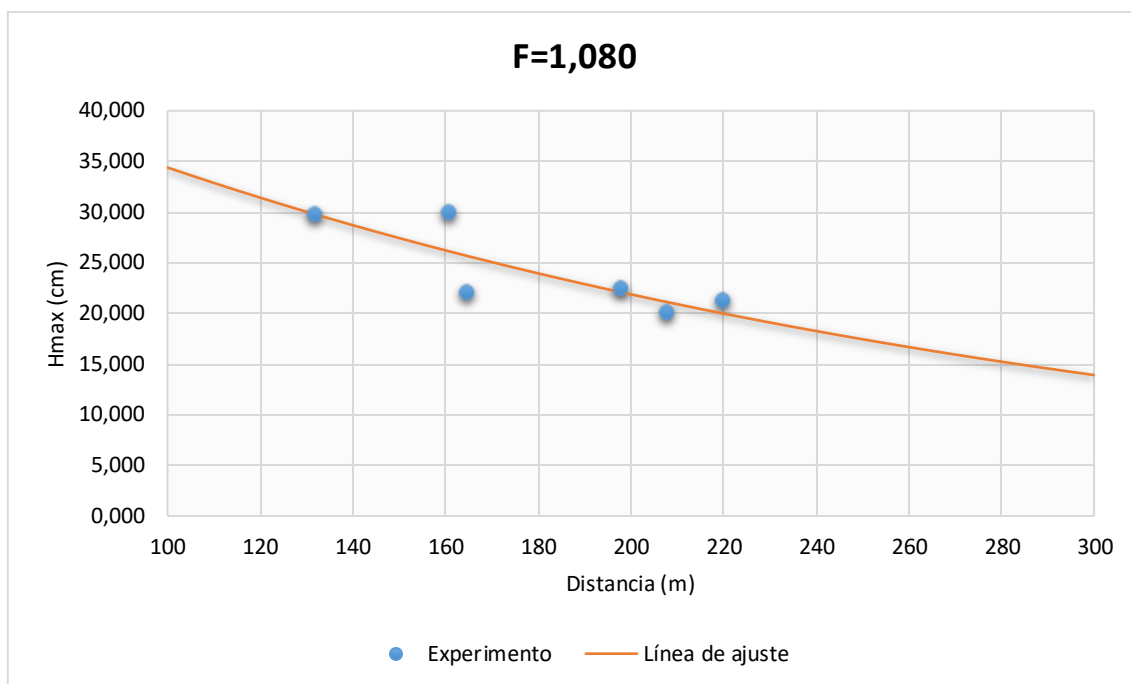


Gráfico 48 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=1,080$

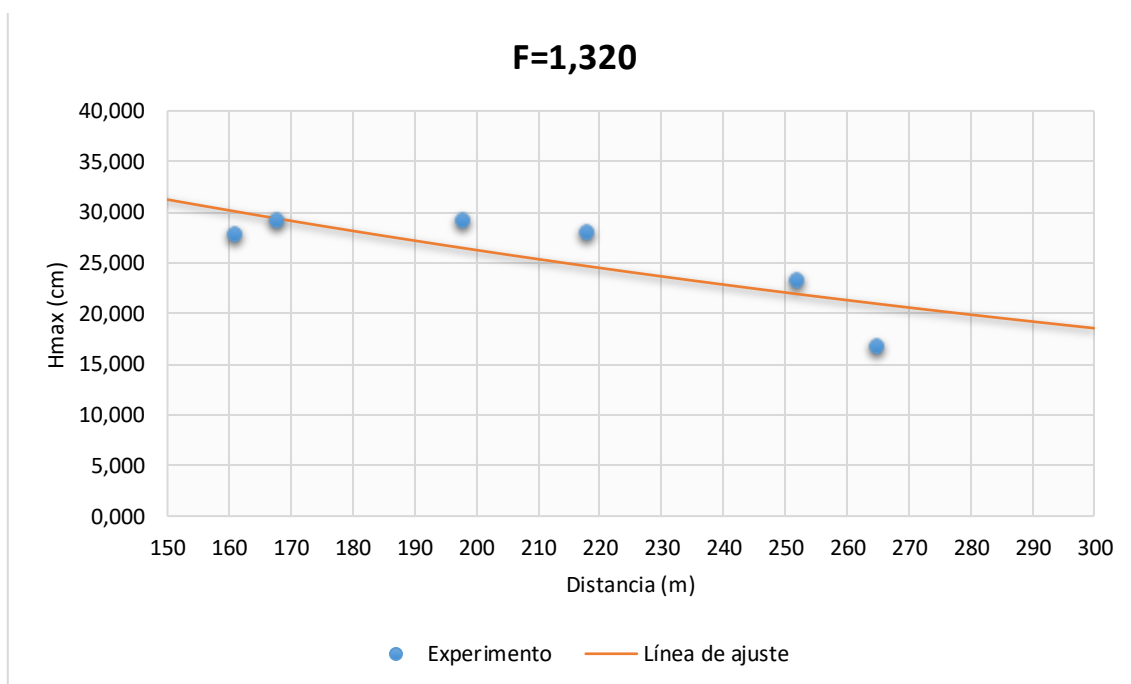


Gráfico 49 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=1,320$

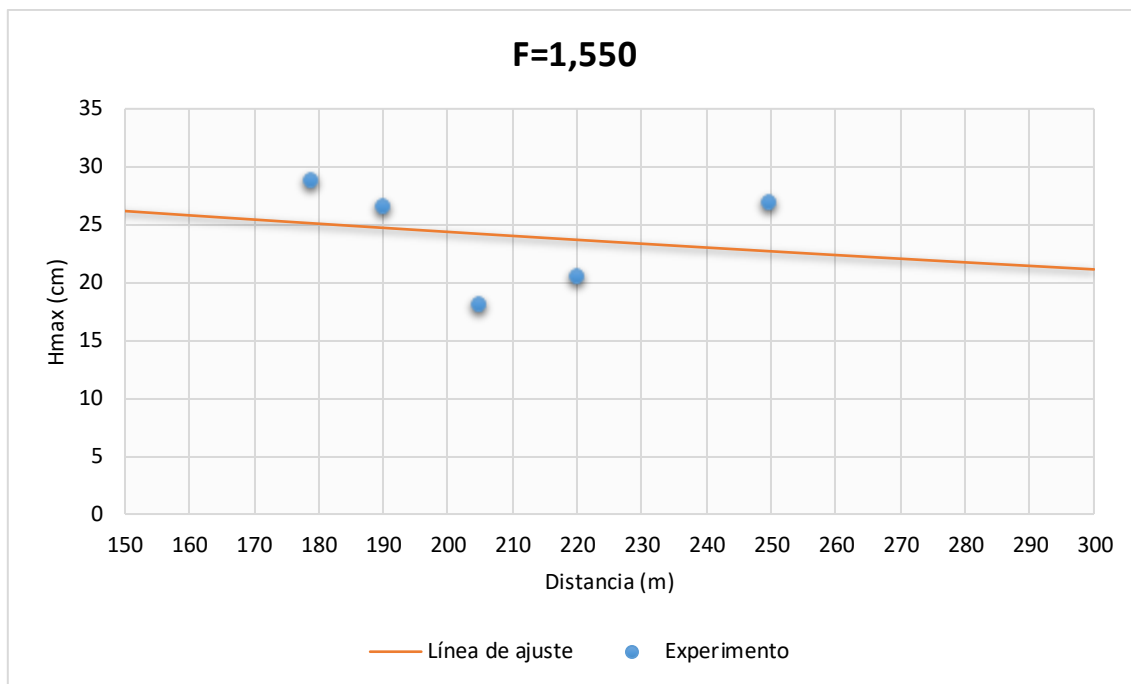


Gráfico 50 Caso calibración nº4 – Ajuste obtenido para $F=1,550$

Los resultados obtenidos tras el ajuste para las distancias indicadas fueron:

F	0,620	1,080	1,320	1,550
H ₁ (cm)	63,149	30,037	33,496	26,926
H ₂ (cm)	45,432	26,223	30,180	25,799
H ₃ (cm)	32,686	22,894	27,192	24,719

Tabla 51 Caso calibración nº4 - Resultados del ajuste

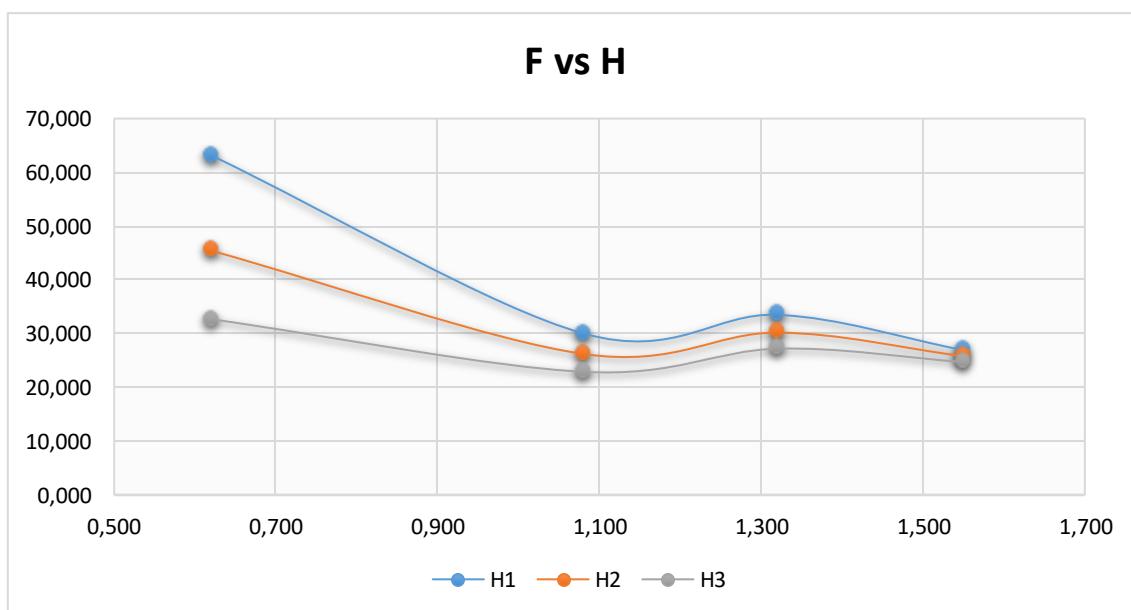


Gráfico 51 Caso calibración nº4 – Resultados del ajuste F vs. H

Datos del modelo numérico

Geometría del área de estudio

Para representar el ensayo descrito se ha decidido disponer un dominio de las siguientes características:

- Longitud: 750,00 metros
- Anchura: 800,00 metros
- Profundidad: 18,00 metros

Como se indicó anteriormente, y pese a que la profundidad es variable en la zona de estudio, se asume constante e igual a 18 metros.

Por otro lado, dado que no se dispone de unas medidas concretas que delimiten el dominio, consideraremos el menor tamaño posible que nos garantice la generación del oleaje y que permitan contener todos los sensores.

En lo que respecta al tamaño de malla, se ha decidido colocar una dimensión de celda de 2,0 metros, siendo igual en ambas direcciones ($D_x=D_y$). Así pues, el tamaño del dominio es de 375 x 400.

Finalmente, para minimizar cuanto más posible el efecto de reflexión generado por las paredes, se ha colocado un tamaño de esponja de 200 metros.

Se muestra una tabla resumen con las dimensiones consideradas para la validación:

Longitud (m)	750
Anchura (m)	800
Profundidad (m)	18
Dx	2,0
Dy	2,0
M	375
N	400
Esponja Este (m)	200
Esponja Norte (m)	200
Esponja Oeste (m)	200
Esponja Sur (m)	200

Tabla 52 Caso calibración nº4 - Características del dominio de simulación

A continuación se muestra en esquema global del dominio introducido en el modelo numérico:

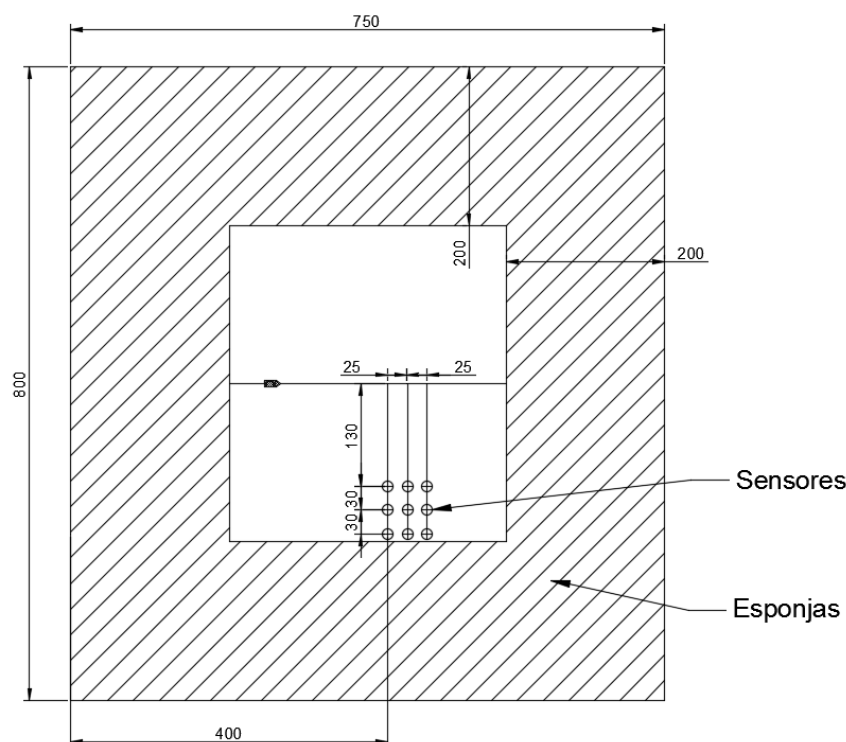


Figura 57 Caso calibración n°4 - Esquema global del dominio en el modelo numérico

Ubicación de los sensores

Los sensores se situarán a una distancia mínima de 400 metros con respecto al lado oeste del dominio. Para la colocación de los sensores, dispondremos tres filas paralelas, cada una de ellas con tres puntos de medida. Las distancias a la línea de navegación son 130, 160 y 190 metros.

El resultado será el obtenido de realizar la media aritmética entre las alturas de ola máxima obtenidas en cada uno de los tres sensores situados a la misma distancia de la línea de navegación.

La posición de los puntos de medida con respecto al origen de coordenadas y teniendo en cuenta el tamaño de celda dispuesto, es la siguiente:

	X	Y
Sensor 1 (a)	200,00	135,00
Sensor 1 (b)	212,50	135,00
Sensor 1 (c)	225,00	135,00
Sensor 2 (a)	200,00	120,00
Sensor 2 (b)	212,50	120,00
Sensor 2 (c)	225,00	120,00
Sensor 3 (a)	200,00	105,00
Sensor 3 (b)	212,50	105,00
Sensor 3 (c)	225,00	105,00

Tabla 53 Caso calibración n°4 - Ubicación sensores en el dominio

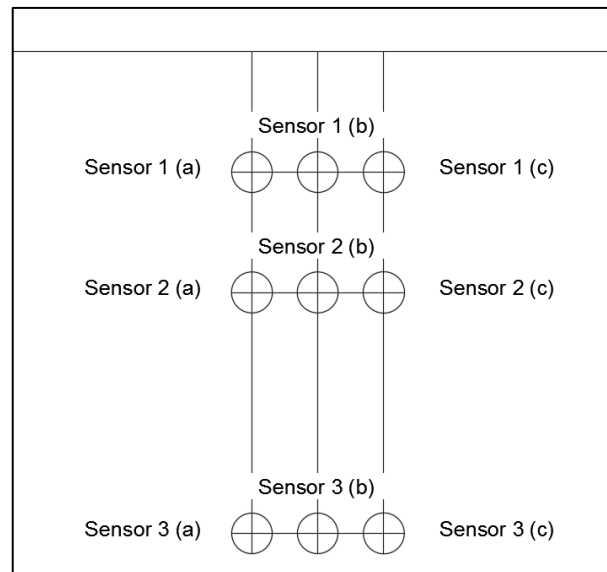


Figura 58 Caso calibración nº4 - Disposición de los sensores

Resultados

Los casos simulados corresponden a las velocidades especificadas en la siguiente tabla:

F	0,620	1,080	1,320	1,550
V (m/s)	8,231	14,404	17,491	20,578

Tabla 54 Caso calibración nº4 - Velocidades contempladas en la simulación

A continuación se muestran los resultados finales obtenidos en cada uno de los sensores. Se obtienen tres gráficas, una para cada uno de ellos, donde aparece representada la altura de ola máxima obtenida en el laboratorio y la altura de ola máxima obtenida en la simulación con respecto al número de Froude. Para la altura de ola máxima se considerarán pasos ascendentes por cero:

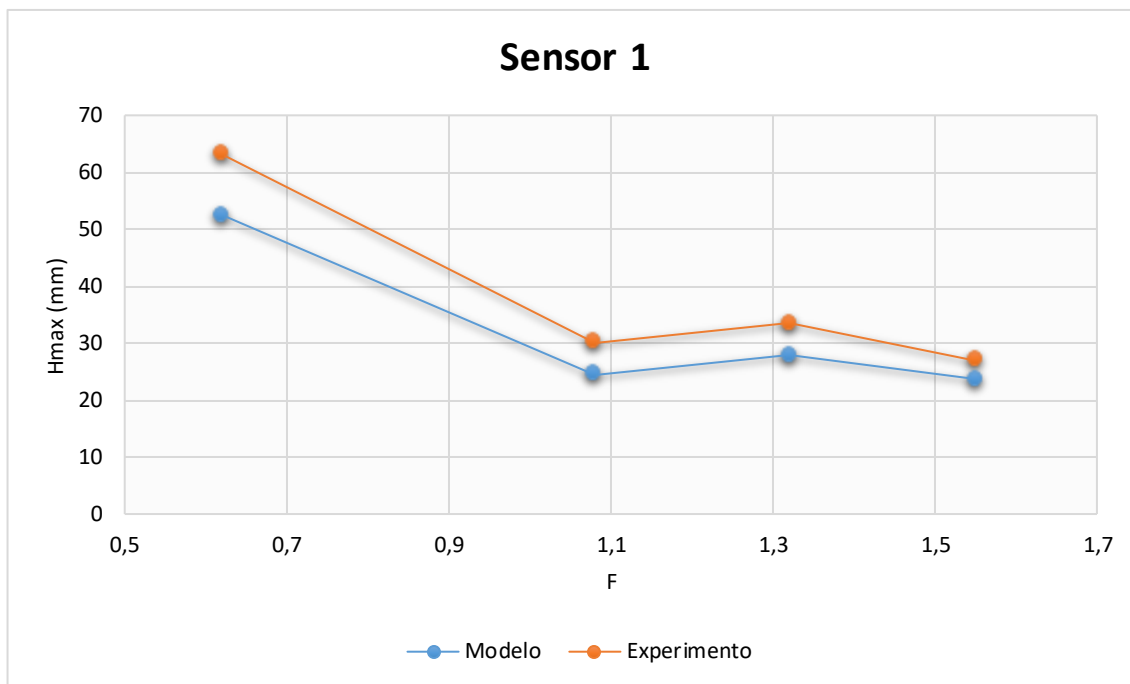


Gráfico 52 Caso calibración nº4 – Sensor 1 (130 m)

Sensor 1			
F	H ₁ Modelo (cm)	H ₁ Experimento (cm)	Error (%)
0,620	52,503	63,149	16,859
1,080	24,535	30,037	18,317
1,320	27,754	33,496	17,143
1,550	23,703	26,926	11,970

Tabla 55 Caso calibración nº4 – Sensor 1 (130 m)

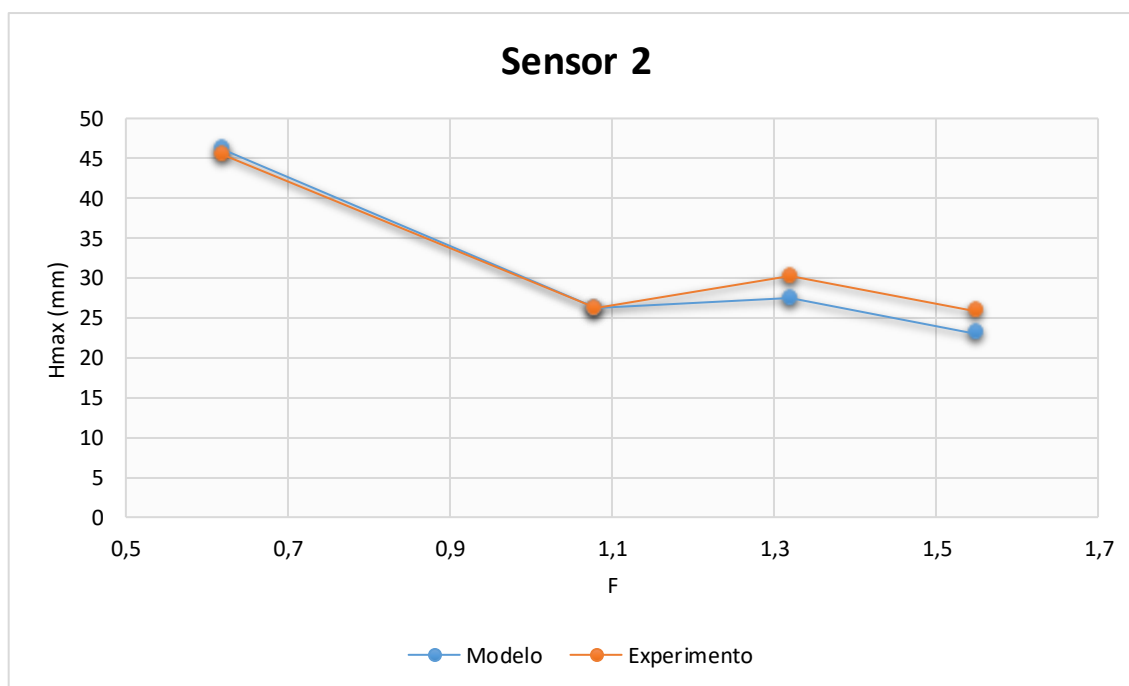


Gráfico 53 Caso calibración nº4 – Sensor 2 (160 m)

Sensor 2			
F	H ₂ Modelo (cm)	H ₂ Experimento (cm)	Error (%)
0,620	46,093	45,432	1,454
1,080	26,120	26,223	0,393
1,320	27,456	30,180	9,028
1,550	22,971	25,799	10,962

Tabla 56 Caso calibración nº4 – Sensor 2 (160 m)

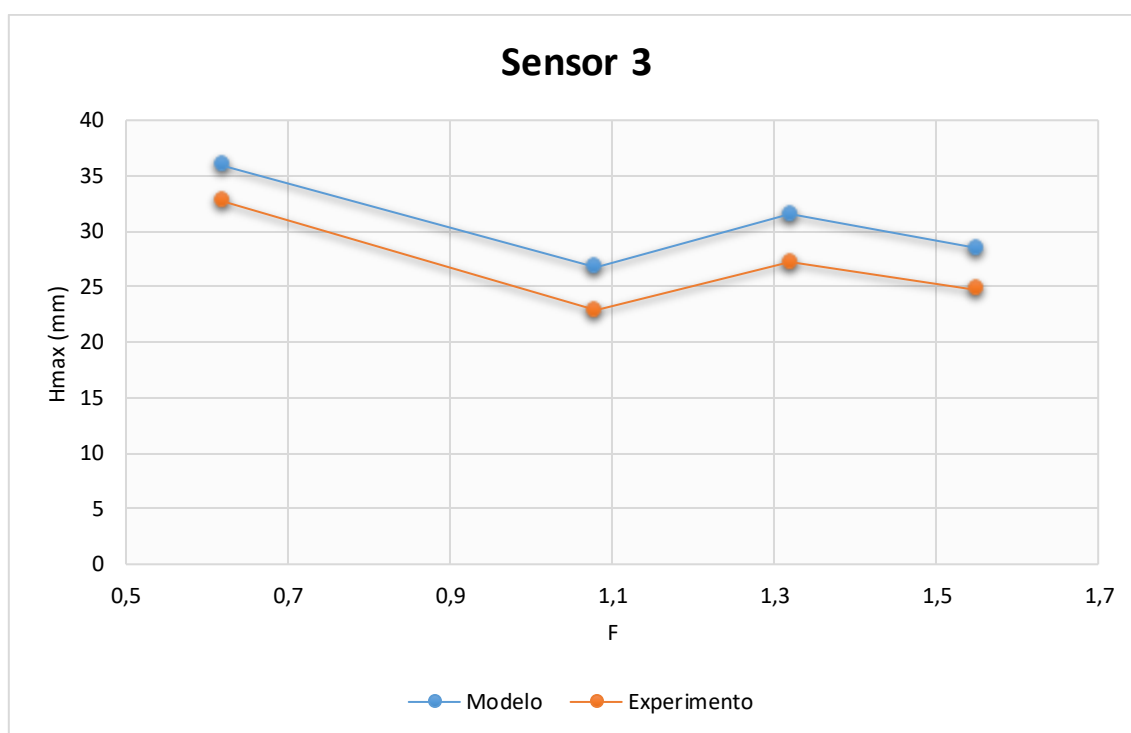


Gráfico 54 Caso calibración nº4 – Sensor 3 (190 m)

Sensor 3			
F	H ₃ Modelo (cm)	H ₃ Experimento (cm)	Error (%)
0,620	35,893	32,686	9,812
1,080	26,753	22,894	16,857
1,320	31,486	27,192	15,791
1,550	28,448	24,719	15,084

Tabla 57 Caso calibración nº4 – Sensor 3 (190 m)

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los coeficientes de calibración (alpha, beta y gamma) para la que se han obtenido los resultados expuestos anteriormente:

F	α	β	γ
0,620	0,710	1,000	0,330
1,080	1,400	1,000	0,180
1,320	2,050	1,000	0,245
1,550	2,690	1,000	0,248

Tabla 58 Caso calibración nº4 – Coeficientes de calibración

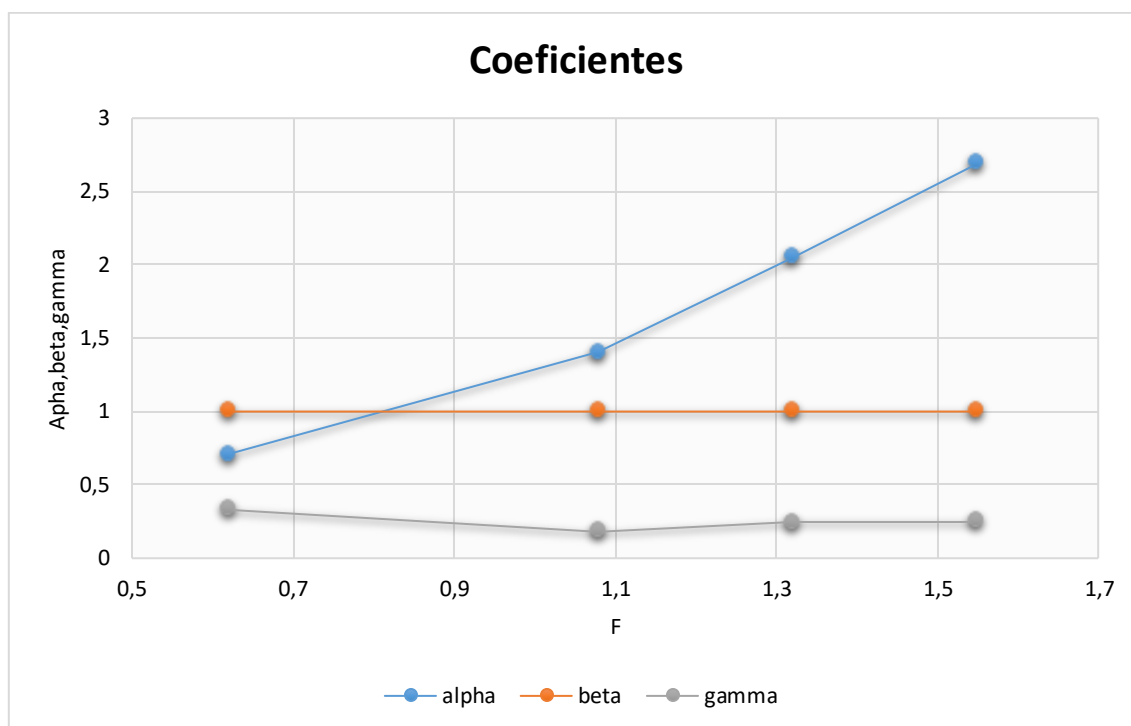


Gráfico 55 Caso calibración nº4 – Coeficientes de calibración

Los resultados obtenidos pueden volcarse en los gráficos con los datos experimentales y la línea de ajuste, obteniéndose lo siguiente:

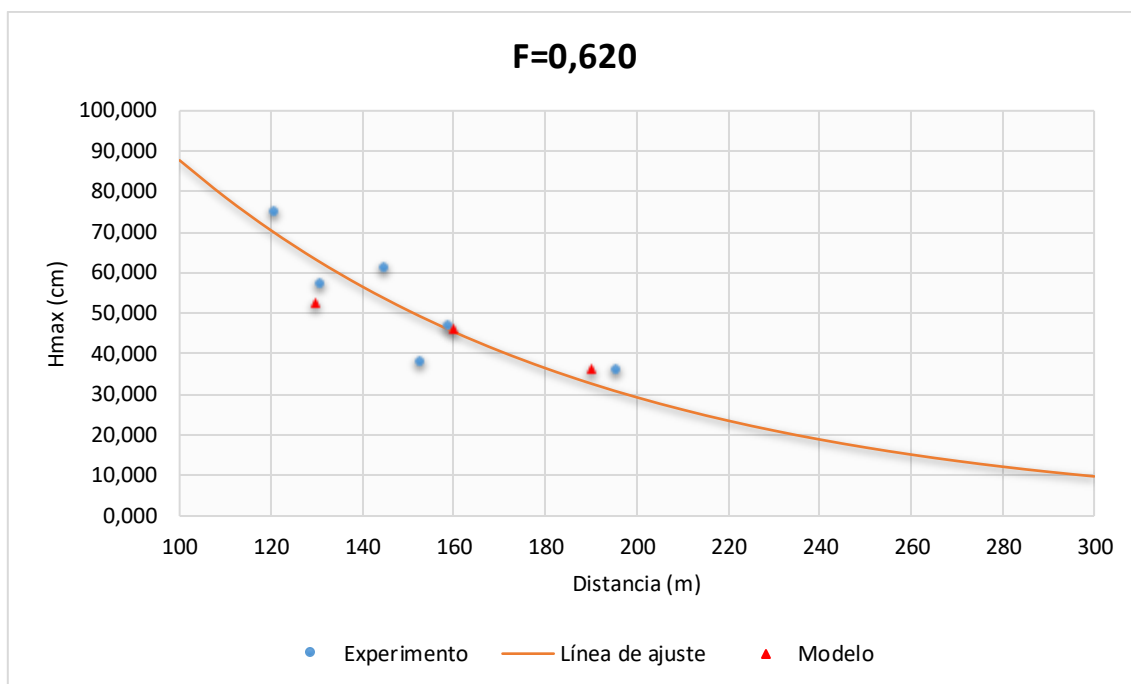


Gráfico 56 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para F=0,620

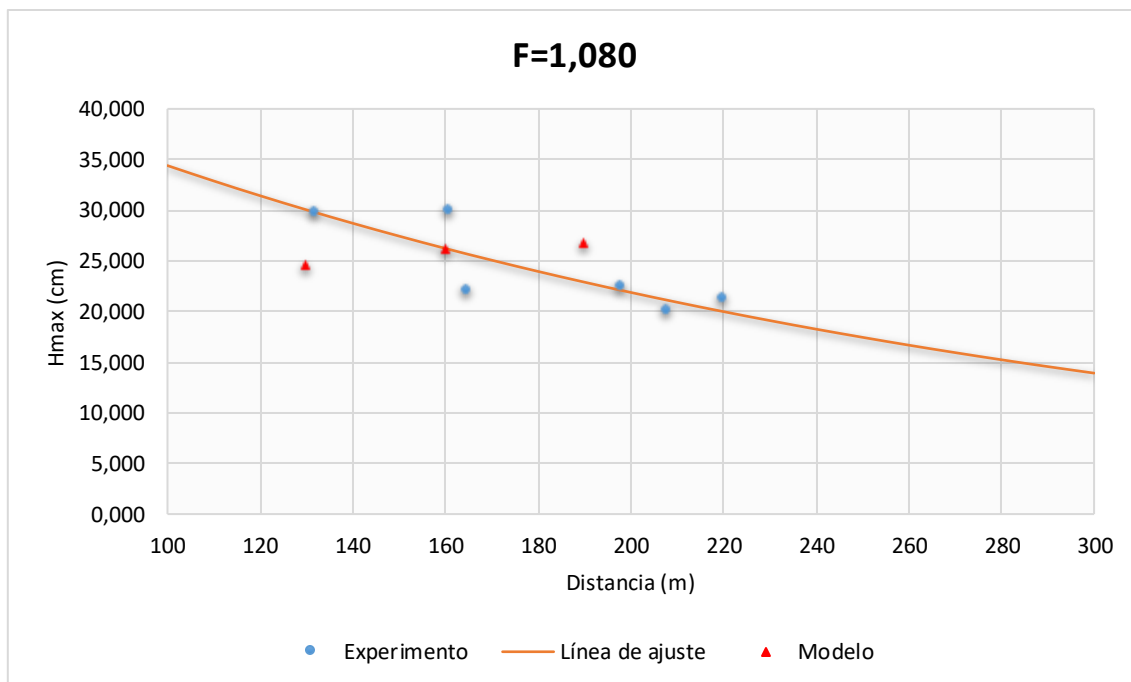


Gráfico 57 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para F=1,080

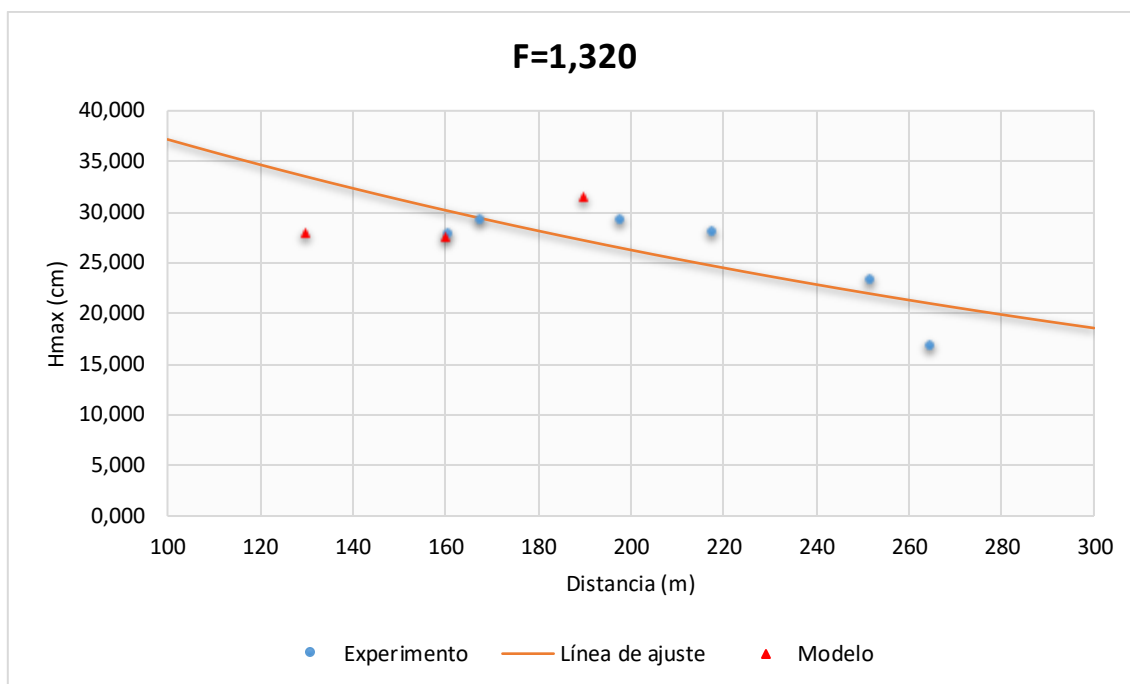


Gráfico 58 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para F=1,320

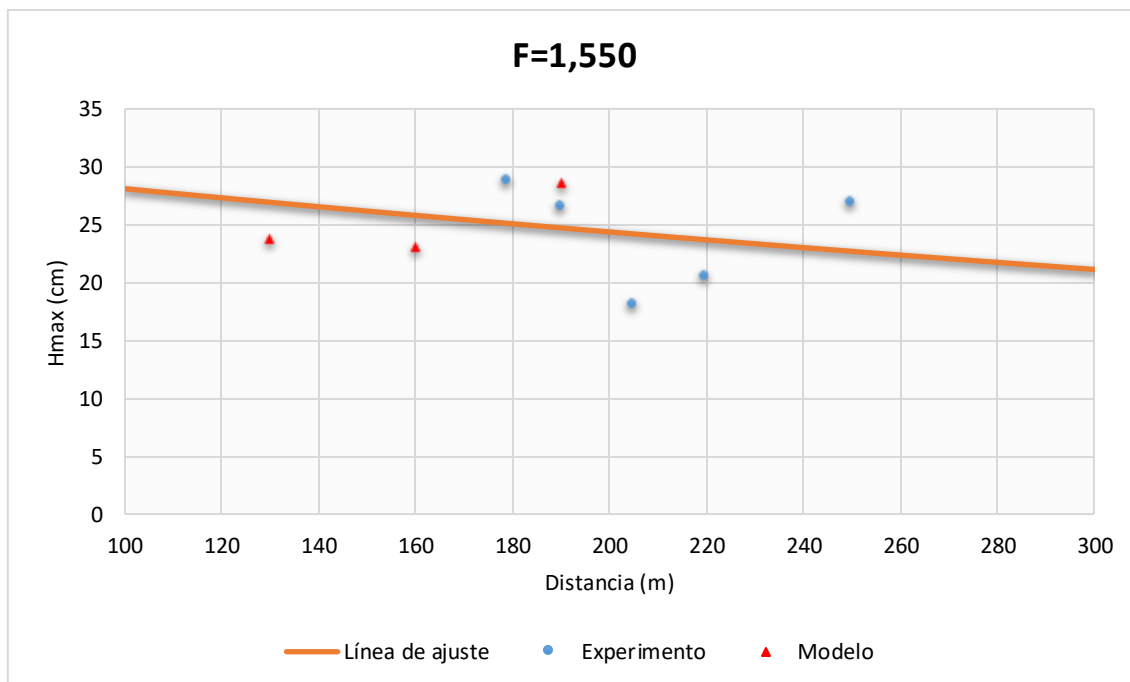


Gráfico 59 Caso calibración nº 4 – Volcado de resultados para F=1,550

Se muestran dos capturas obtenidas de la renderización del modelo:

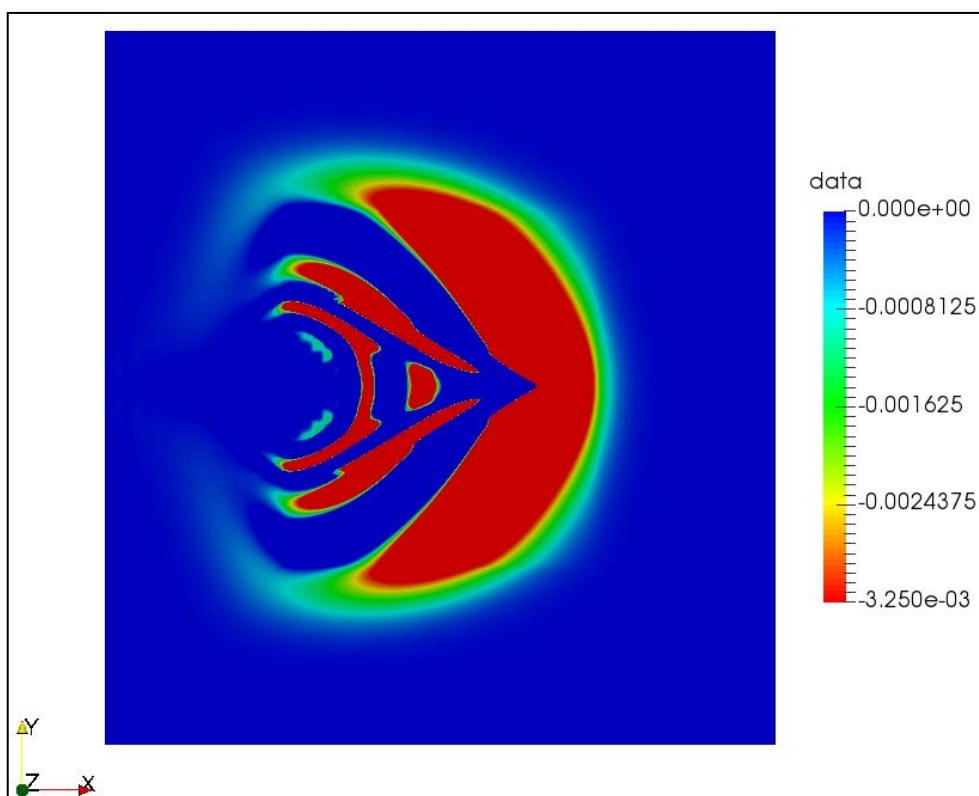


Figura 59 Caso calibración nº 4 – Renderización del modelo - $F=1.08$

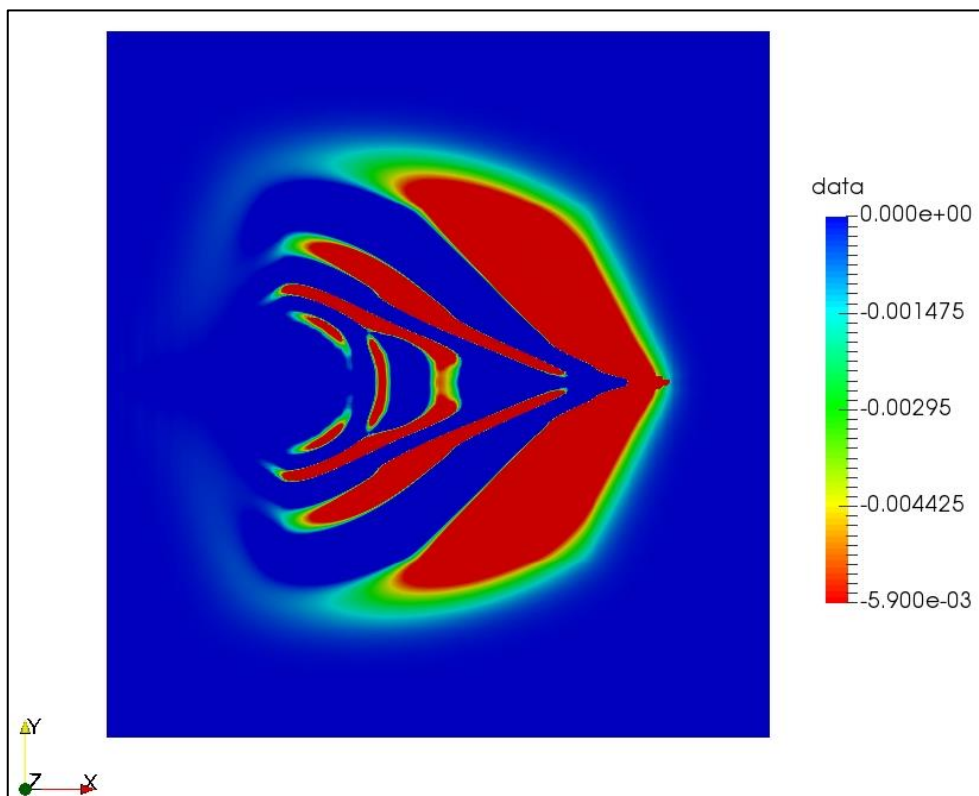


Figura 60 Caso calibración nº 4 – Renderización del modelo - $F=1.32$

A continuación quedan recogidos todos los ensayos realizados para cada uno de los casos, es decir, para cada número de Froude:

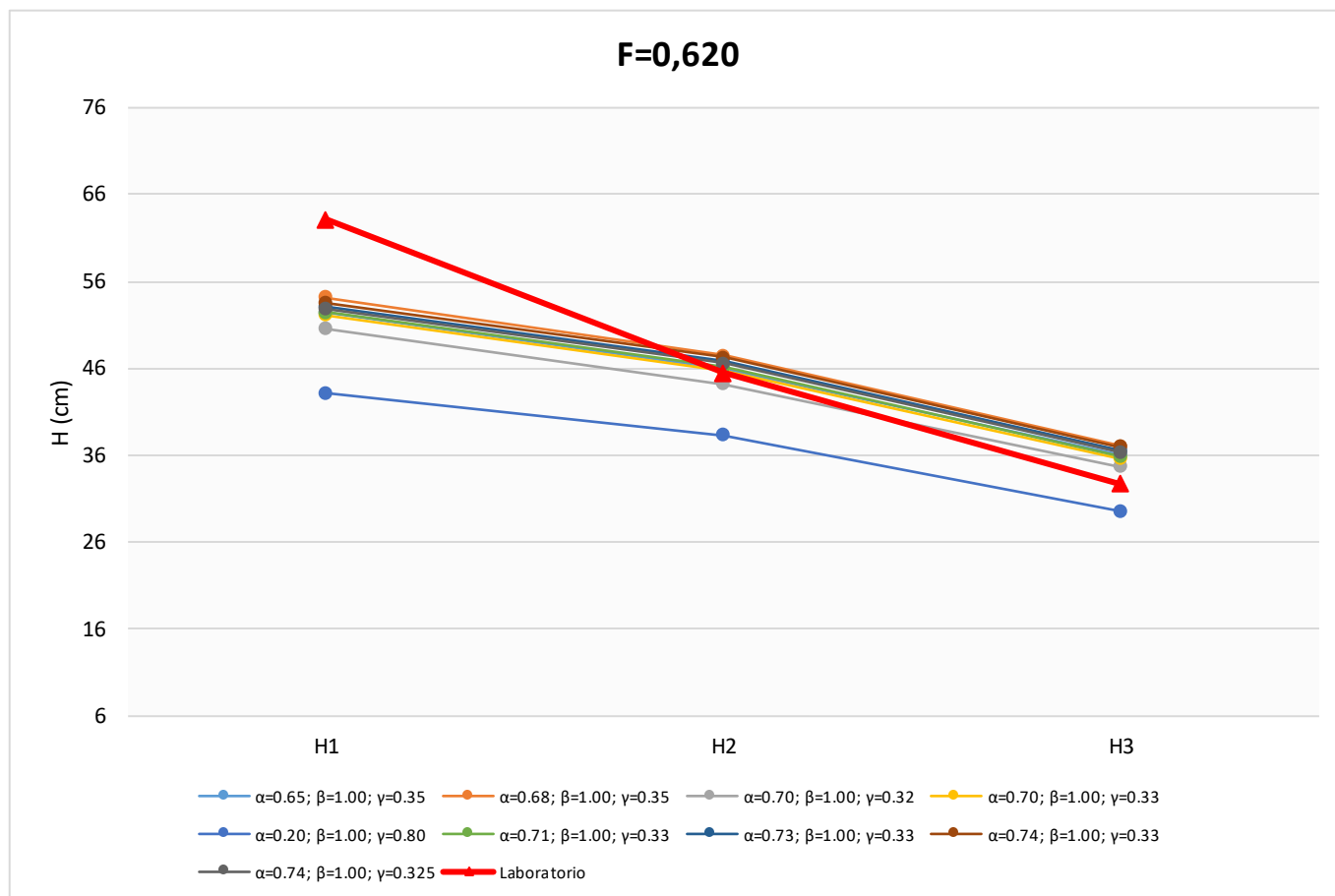


Gráfico 60 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=0,620

alfa	0,650	0,680	0,700	0,700	0,200	0,710	0,730	0,740	0,740
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,350	0,350	0,320	0,330	0,800	0,330	0,330	0,330	0,325
H1	52,445	54,119	50,552	52,106	43,172	52,503	53,111	53,527	52,843
H2	46,008	47,468	44,268	45,765	38,274	46,093	46,892	47,255	46,562
H3	36,059	37,120	34,661	35,607	29,583	35,893	36,575	36,925	36,363
e1 (cm)	-10,704	-9,031	-12,598	-11,044	-19,978	-10,646	-10,039	-9,623	-10,306
e2 (cm)	0,576	2,036	-1,164	0,333	-7,158	0,660	1,460	1,823	1,130
e3 (cm)	3,373	4,435	1,975	2,921	-3,103	3,207	3,889	4,239	3,677
error medio (cm)	4,884	5,167	5,246	4,766	10,080	4,838	5,129	5,228	5,038
e1 (%)	16,950	14,301	19,949	17,488	31,636	16,859	15,897	15,238	16,321
e2 (%)	1,267	4,481	2,563	0,732	15,755	1,454	3,214	4,013	2,487
e3 (%)	10,320	13,567	6,042	8,937	9,494	9,812	11,898	12,970	11,249
error medio (%)	9,513	10,783	9,518	9,053	18,962	9,375	10,336	10,740	10,019

Tabla 59 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=0,620

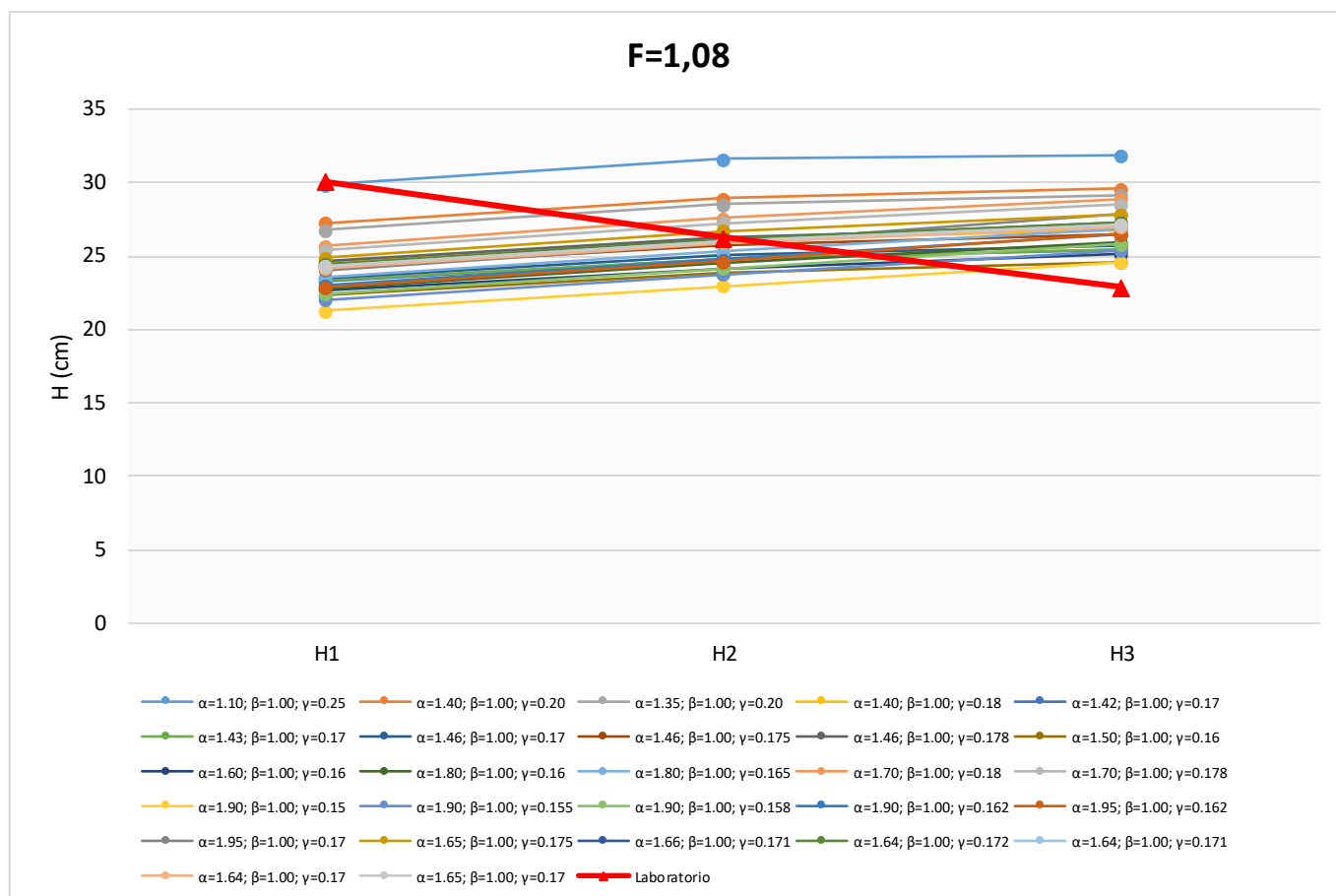


Gráfico 61 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=1,080

alfa	1,100	1,400	1,350	1,400	1,420	1,430	1,460	1,460	1,460	1,500
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,250	0,200	0,200	0,180	0,170	0,170	0,170	0,175	0,178	0,160
H1	29,873	27,235	26,801	24,535	23,292	23,355	23,499	24,210	24,664	22,353
H2	31,633	28,947	28,507	26,120	24,765	24,847	25,027	25,770	26,281	23,812
H3	31,863	29,610	29,137	26,753	25,428	25,454	25,713	26,484	27,026	24,583
e1 (cm)	-0,164	-2,802	-3,235	-5,502	-6,745	-6,682	-6,538	-5,827	-5,373	-7,684
e2 (cm)	5,409	2,723	2,284	-0,103	-1,458	-1,376	-1,196	-0,453	0,057	-2,411
e3 (cm)	8,969	6,716	6,243	3,859	2,534	2,560	2,819	3,590	4,132	1,689
error medio (cm)	4,847	4,080	3,921	3,155	3,579	3,539	3,518	3,290	3,188	3,928
e1 (%)	0,545	9,328	10,771	18,317	22,454	22,245	21,765	19,398	17,888	25,581
e2 (%)	20,628	10,386	8,709	0,393	5,561	5,247	4,562	1,727	0,219	9,195
e3 (%)	39,174	29,335	27,267	16,857	11,069	11,182	12,314	15,681	18,049	7,376
error medio (%)	20,116	16,350	15,582	11,856	13,028	12,891	12,880	12,269	12,052	14,051

alfa	1,600	1,800	1,800	1,700	1,700	1,900	1,900	1,900	1,900	1,950
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,160	0,160	0,165	0,180	0,178	0,150	0,155	0,158	0,162	0,162
H1	22,675	22,801	23,570	25,705	25,416	21,300	22,009	22,432	23,015	22,890
H2	24,198	24,516	25,325	27,562	27,243	22,971	23,734	24,157	24,766	24,664
H3	25,152	25,948	26,840	28,867	28,525	24,579	25,377	25,837	26,486	26,529
e1 (cm)	-7,362	-7,236	-6,467	-4,331	-4,621	-8,737	-8,027	-7,604	-7,021	-7,147
e2 (cm)	-2,025	-1,708	-0,899	1,338	1,020	-3,252	-2,489	-2,066	-1,457	-1,559
e3 (cm)	2,258	3,054	3,946	5,973	5,631	1,685	2,483	2,943	3,592	3,635
error medio (cm)	3,882	3,999	3,770	3,881	3,757	4,558	4,333	4,204	4,023	4,114
e1 (%)	24,509	24,090	21,529	14,420	15,384	29,086	26,726	25,317	23,375	23,795
e2 (%)	7,723	6,512	3,427	5,104	3,889	12,401	9,493	7,878	5,556	5,945
e3 (%)	9,864	13,341	17,234	26,088	24,596	7,360	10,847	12,853	15,689	15,876
error medio (%)	14,032	14,647	14,063	15,204	14,623	16,282	15,688	15,349	14,874	15,205

alfa	1,950	1,650	1,650	1,660	1,640	1,640	1,640	1,650
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,170	0,175	0,172	0,171	0,172	0,171	0,170	0,170
H1	24,032	24,908	24,493	24,362	24,458	24,313	24,176	24,313
H2	25,925	26,686	26,243	26,104	26,180	26,028	25,888	26,028
H3	27,873	27,832	27,385	27,284	27,289	27,133	26,985	27,133
e1 (cm)	-6,005	-5,129	-5,544	-5,675	-5,579	-5,724	-5,860	-5,724
e2 (cm)	-0,298	0,462	0,020	-0,119	-0,044	-0,195	-0,335	-0,195
e3 (cm)	4,979	4,938	4,491	4,390	4,395	4,239	4,091	4,239
error medio (cm)	3,761	3,510	3,352	3,394	3,339	3,386	3,429	3,386
e1 (%)	19,992	17,074	18,457	18,892	18,573	19,056	19,510	19,056
e2 (%)	1,137	1,764	0,075	0,455	0,166	0,743	1,278	0,743
e3 (%)	21,748	21,570	19,617	19,174	19,195	18,515	17,868	18,515
error medio (%)	14,292	13,469	12,717	12,840	12,645	12,772	12,885	12,772

Tabla 60 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=1,080

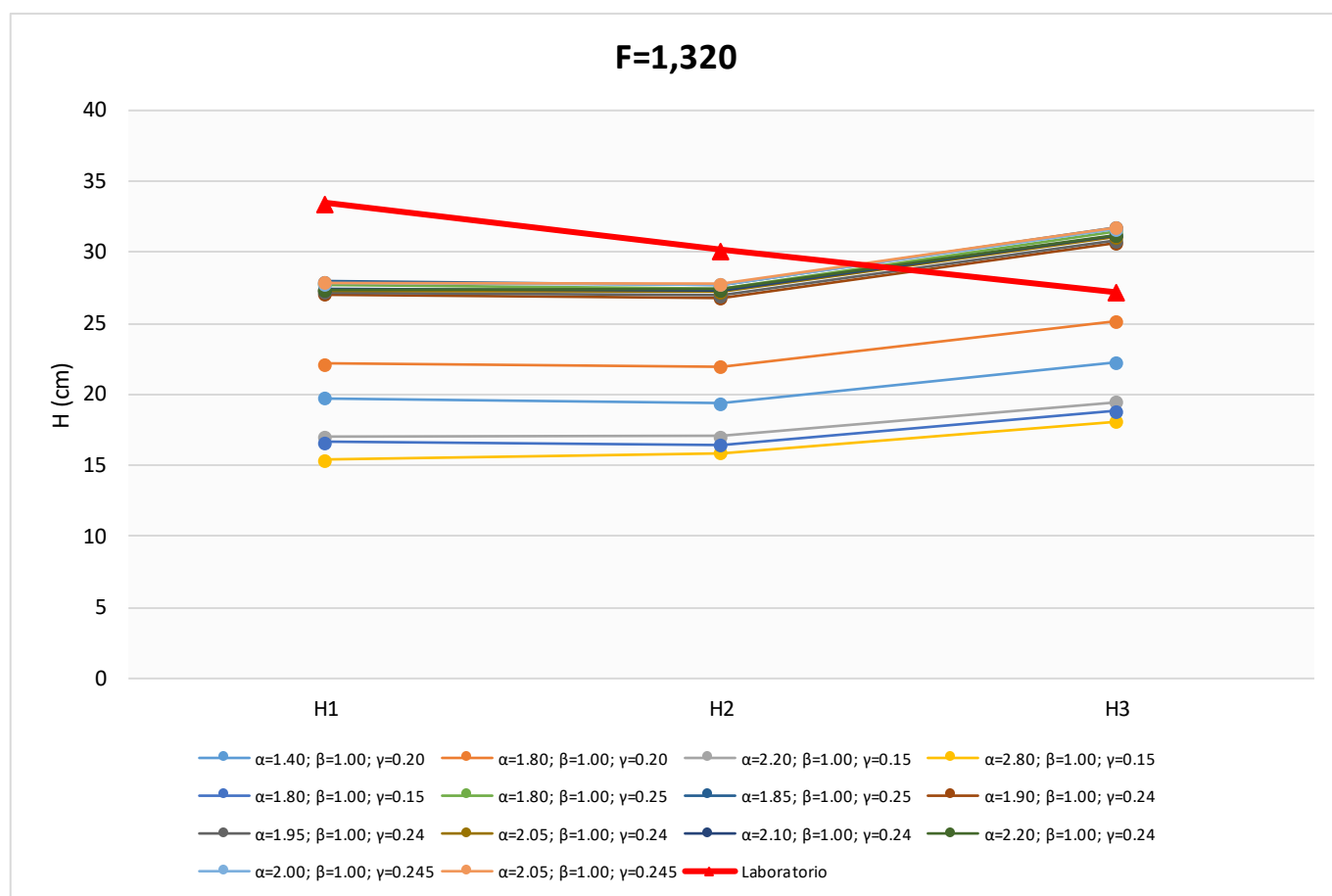


Gráfico 62 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=1,320

alfa	1,400	1,800	2,200	2,800	1,800	1,800	1,850	1,900	1,950	2,050
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,200	0,200	0,150	0,150	0,150	0,250	0,250	0,240	0,240	0,240
H1	19,764	22,190	17,034	15,425	16,611	27,754	27,988	27,031	27,180	27,331
H2	19,395	21,950	17,042	15,894	16,439	27,456	27,709	26,791	26,995	27,240
H3	22,268	25,165	19,447	18,079	18,863	31,486	31,766	30,673	30,858	31,106
e1 (cm)	-13,733	-11,307	-16,463	-18,071	-16,885	-5,742	-5,509	-6,465	-6,317	-6,165
e2 (cm)	-10,785	-8,230	-13,138	-14,287	-13,741	-2,725	-2,471	-3,389	-3,185	-2,940
e3 (cm)	-4,924	-2,027	-7,745	-9,113	-8,329	4,294	4,574	3,481	3,666	3,913
error medio (cm)	9,814	7,188	12,449	13,824	12,985	4,254	4,185	4,445	4,389	4,340
e1 (%)	40,998	33,755	49,148	53,950	50,409	17,143	16,446	19,302	18,858	18,405
e2 (%)	35,737	27,270	43,532	47,338	45,529	9,028	8,188	11,230	10,553	9,742
e3 (%)	18,108	7,455	28,484	33,514	30,631	15,791	16,820	12,801	13,481	14,391
error medio (%)	31,614	22,827	40,388	44,934	42,190	13,987	13,818	14,444	14,297	14,180

alfa	2,100	2,200	2,000	2,050
beta	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,240	0,240	0,245	0,245
H1	27,382	27,363	27,817	27,919
H2	27,322	27,414	27,720	27,809
H3	31,191	31,231	31,660	31,755
e1 (cm)	-6,114	-6,133	-5,680	-5,577
e2 (cm)	-2,859	-2,767	-2,460	-2,371
e3 (cm)	3,999	4,039	4,468	4,563
error medio (cm)	4,324	4,313	4,203	4,170
e1 (%)	18,254	18,311	16,956	16,650
e2 (%)	9,472	9,167	8,152	7,856
e3 (%)	14,706	14,852	16,430	16,780
error medio (%)	14,144	14,110	13,846	13,762

Tabla 61 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=1,320

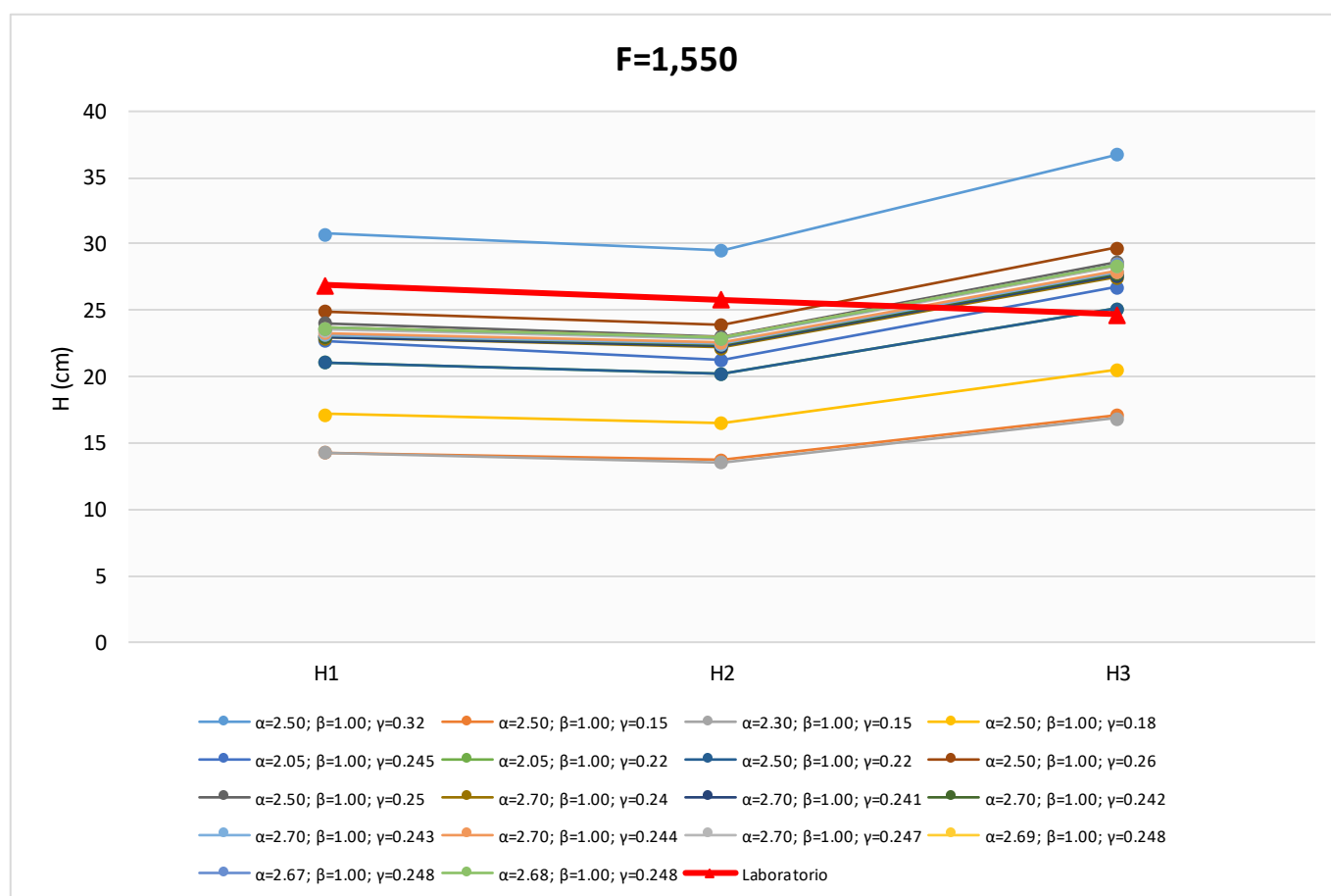


Gráfico 63 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=1,550

alfa	2,500	2,500	2,300	2,500	2,050	2,050	2,500	2,500	2,500	2,700
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,320	0,150	0,150	0,180	0,245	0,220	0,220	0,260	0,250	0,240
H1	30,809	14,323	14,270	17,188	22,737	20,380	21,074	24,937	24,016	22,912
H2	29,522	13,748	13,532	16,511	21,268	19,098	20,231	23,915	23,021	22,233
H3	36,741	17,111	16,913	20,540	26,791	23,999	25,175	29,761	28,648	27,530
e1 (cm)	3,883	-12,603	-12,657	-9,739	-4,189	-6,546	-5,853	-1,989	-2,911	-4,014
e2 (cm)	3,723	-12,051	-12,268	-9,289	-4,531	-6,701	-5,569	-1,884	-2,778	-3,566
e3 (cm)	12,022	-7,608	-7,806	-4,179	2,072	-0,720	0,456	5,042	3,929	2,811
error medio (cm)	6,543	10,754	10,910	7,735	3,597	4,656	3,959	2,972	3,206	3,464
e1 (%)	14,420	46,807	47,005	36,167	15,558	24,312	21,737	7,389	10,810	14,908
e2 (%)	14,430	46,712	47,551	36,003	17,563	25,974	21,585	7,302	10,769	13,823
e3 (%)	48,634	30,778	31,579	16,907	8,382	2,914	1,844	20,398	15,893	11,371
error medio (%)	25,828	41,432	42,045	29,693	13,834	17,734	15,055	11,696	12,491	13,368

alfa	2,700	2,700	2,700	2,700	2,700	2,700	2,690	2,670	2,680
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,241	0,242	0,243	0,244	0,247	0,248	0,248	0,248	0,248
H1	23,008	23,106	23,201	23,291	23,568	23,664	23,703	23,700	23,689
H2	22,325	22,422	22,504	22,597	22,863	22,959	22,971	22,937	22,959
H3	27,645	27,761	27,883	27,996	28,338	28,451	28,448	28,456	28,439
e1 (cm)	-3,918	-3,821	-3,726	-3,636	-3,358	-3,262	-3,223	-3,226	-3,238
e2 (cm)	-3,475	-3,377	-3,296	-3,202	-2,936	-2,841	-2,828	-2,862	-2,840
e3 (cm)	2,926	3,042	3,164	3,277	3,619	3,732	3,729	3,737	3,720
error medio (cm)	3,439	3,413	3,395	3,372	3,304	3,278	3,260	3,275	3,266
e1 (%)	14,551	14,190	13,837	13,503	12,473	12,115	11,970	11,983	12,025
e2 (%)	13,468	13,091	12,774	12,412	11,380	11,011	10,962	11,095	11,009
e3 (%)	11,835	12,307	12,798	13,255	14,639	15,096	15,084	15,117	15,050
error medio (%)	13,285	13,196	13,137	13,057	12,831	12,741	12,672	12,732	12,694

Tabla 62 Caso calibración nº4 – Total ensayos F=1,550

Calibración – Caso n°5

Descripción del ensayo real

Características generales

Autor/es: Nece, R.E., McCaslin, M.R, Christensen, D.R.

Año: 1985

Descripción breve

Se trata de un ensayo de campo llevado a cabo en el Estrecho de Puget (Washington, Estados Unidos).

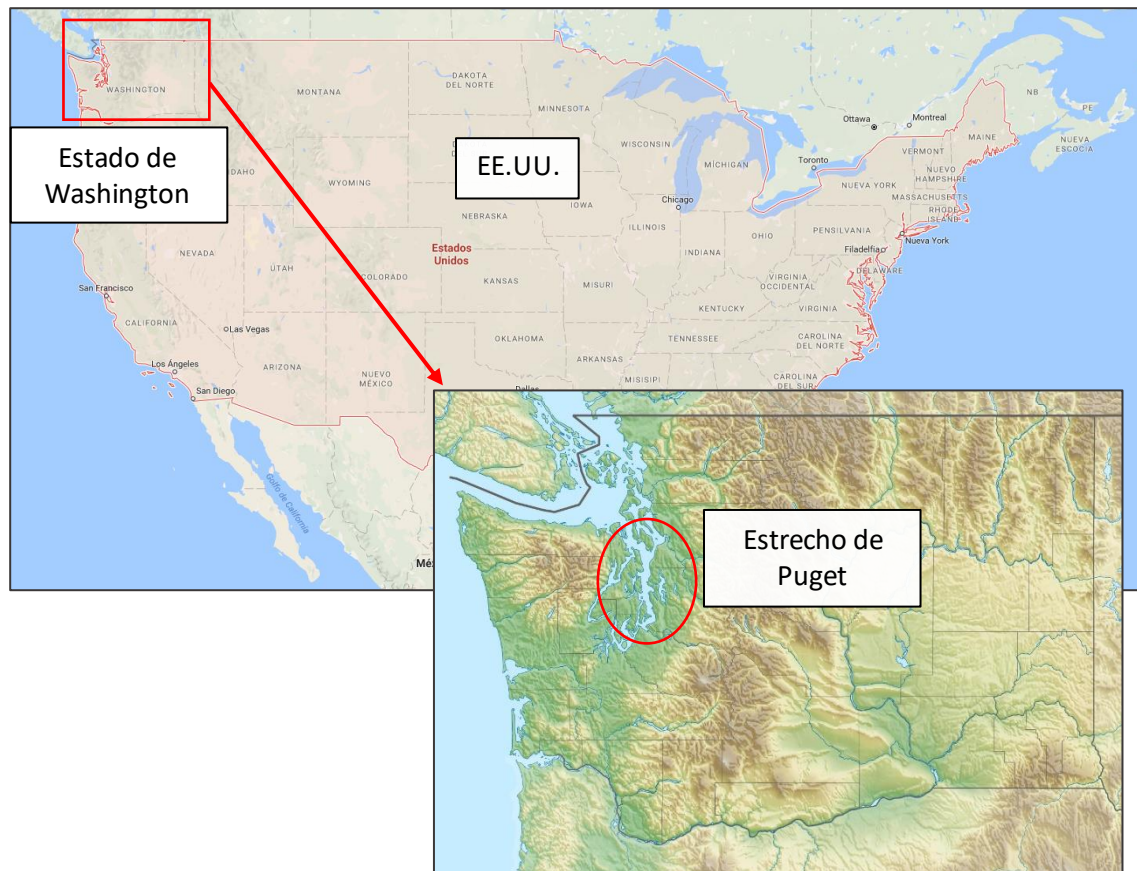


Figura 61 Ubicación del Estrecho de Puget

En este experimento se plantea la medida de la altura de ola generada por tres tipos de embarcación operando en dicho emplazamiento.

Barco	Clase
Yakima	Super
Sealth	Issaquah
Klahowya	Evergreen State

Tabla 63 Barcos empleados en el estudio (Nece et al., 1985)

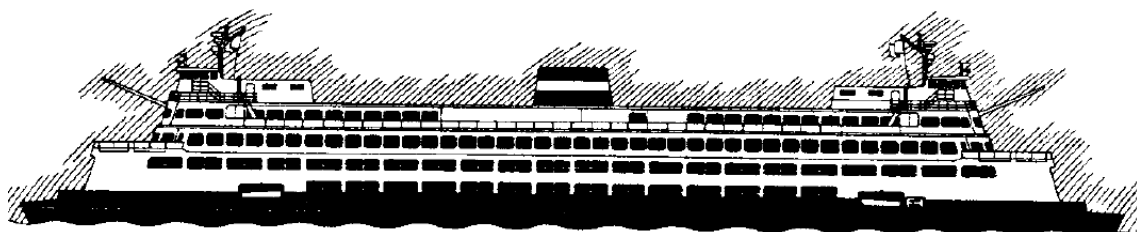


Figura 62 Super Class (Nece et al., 1985)

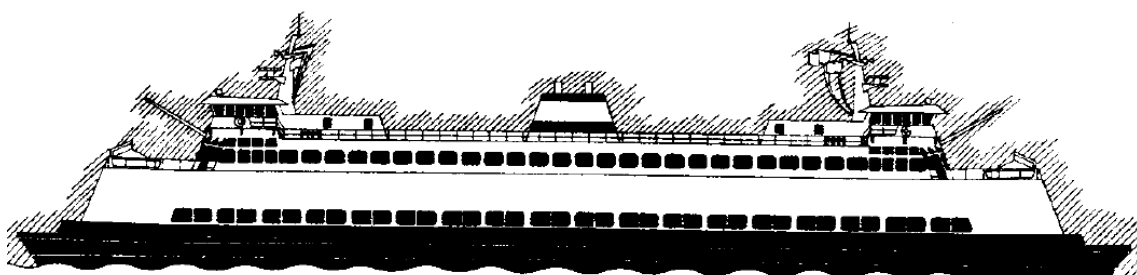


Figura 63 Issaquah Class (Nece et al., 1985)

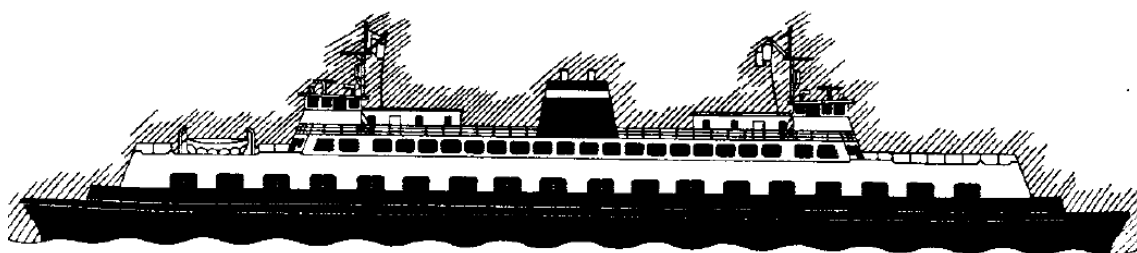


Figura 64 Evergreen State Class (Nece et al., 1985)

Para el presente trabajo se considerará una de las tres embarcaciones analizadas, concretamente el barco Sealth, de la clase Issaquah, con las características que se especificarán posteriormente.

Se tendrá en cuenta la variación de la altura de ola con la distancia a la línea de navegación para un rango de velocidades determinado, ésta varía desde 5,144 hasta 9,260 m/s, o lo que es lo mismo, el número de Froude varía entre 0,283 y 0,511.

Geometría del área de estudio

Como se indicó anteriormente, el experimento fue desarrollado en el estrecho de Puget, tomando medidas a diferentes distancias de la línea de navegación durante el tránsito de las embarcaciones.

La profundidad de la zona donde se llevó a cabo el estudio puede ser apreciada en la siguiente figura:

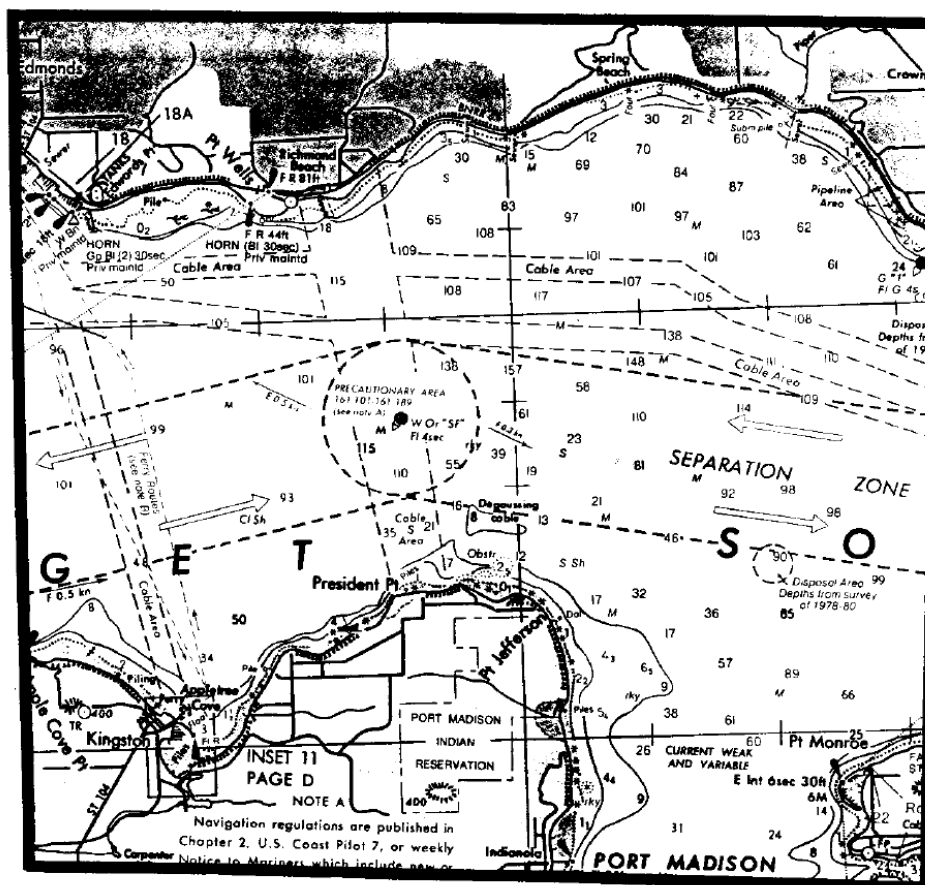


Figura 65 Carta náutica de la zona de desarrollo del estudio (Nece et al., 1985)

Como simplificación se ha decidido considerar una profundidad constante e igual a 310 pies (94,488 metros) para todo el área de estudio. En los apartados siguientes se especificará detalladamente el tamaño considerado para el dominio que se introducirá en el modelo.

Sensores de medición

Para la realización del ensayo se emplearon tres sensores unidos a una boya situada en un punto fijo. El principal problema residía en determinar la distancia a la línea de navegación de cada sensor, así como el ángulo formado entre ésta y la línea de sensores, ya que la ruta seguida difería entre las distintas pasadas de los barcos. Así pues, la posición de los sensores quedaba definida a través de las distancias x_1 , x_2 y x_3 como se puede apreciar en la figura posterior.

Para obtener la localización, en cada pasada se realizaba un registro de la posición relativa de los sensores, el ángulo α entre la línea de navegación y la línea de sensores, y la distancia entre la línea de navegación y el sensor más próximo. Estos registros se realizaban por fotografía aérea cuando era posible o por observación visual.

Vemos en la siguiente figura la disposición de los sensores y las principales variables para la definición de su posición.

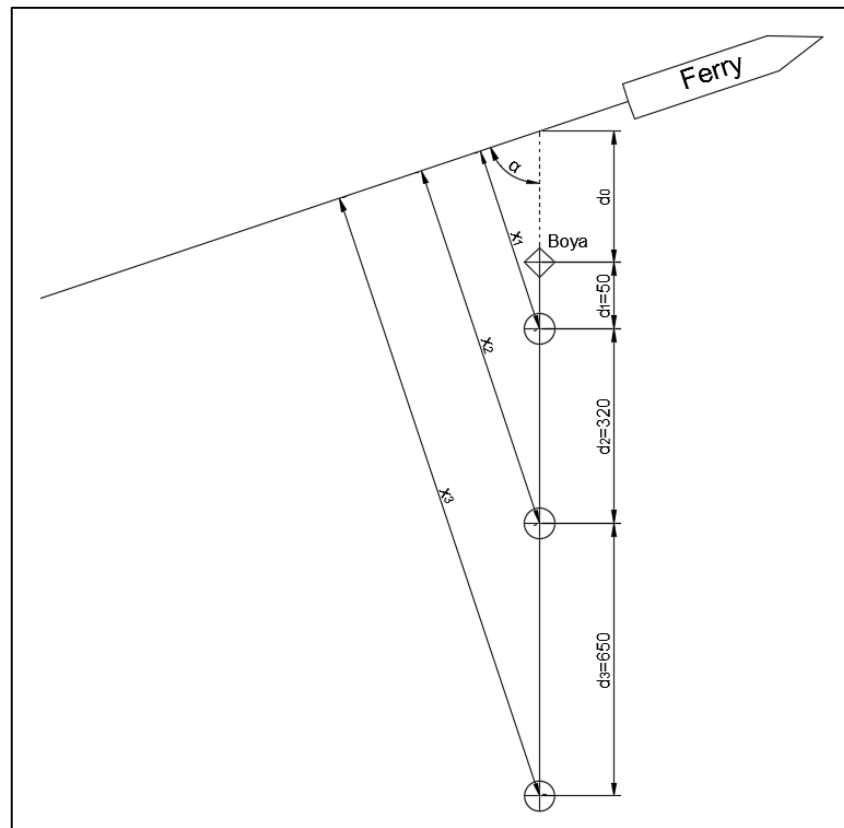


Figura 66 Disposición del sistema de medición (Nece et al., 1985)

Características de la embarcación empleada

Como se indicó en la descripción inicial, el barco analizado pertenece a la clase Issaquah, cuyas principales características se muestran a continuación:

Eslora (m)	100,0
Manga (m)	24,0
Calado (m)	4,7

Tabla 64 Caso calibración nº5 - Características del barco a simular

Resultados presentados en el documento

En el documento original quedan recogidos cuatro gráficos, cada uno de los cuales representa las alturas de ola obtenidas para una velocidad distinta. Así mismo, se puede apreciar cómo se presentan tanto los datos originales como los datos filtrados.

A continuación se muestran los cuatro gráficos recogidos:

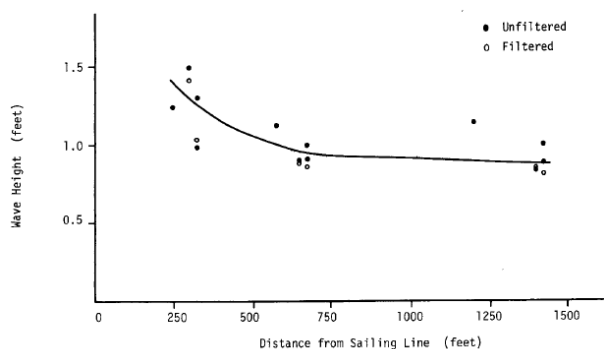


Figura 67 Velocidad 18 nudos (Nece et al., 1985)

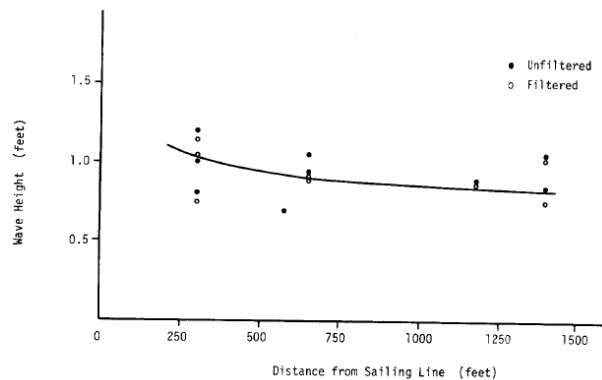


Figura 68 Velocidad 17 nudos (Nece et al., 1985)

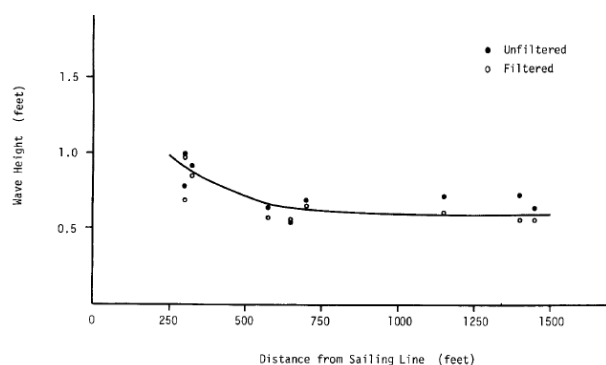


Figura 70 Velocidad 15 nudos (Nece et al., 1985)

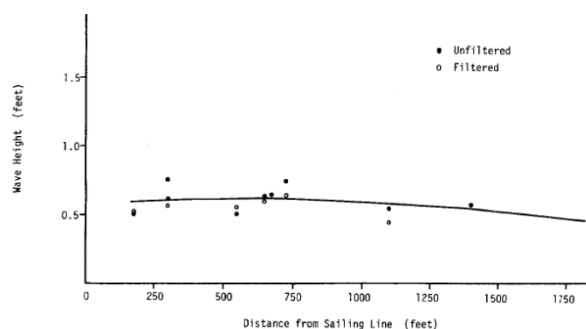


Figura 69 Velocidad 10 nudos (Nece et al., 1985)

Estos gráficos fueron obtenidos también para las otras dos embarcaciones analizadas.

Finalmente, con el conjunto de datos disponible se llega a tres gráficos, cada uno de ellos corresponde a una distancia con respecto a la línea de navegación, reflejando la altura de ola con respecto a diferentes velocidades, se muestran a continuación:

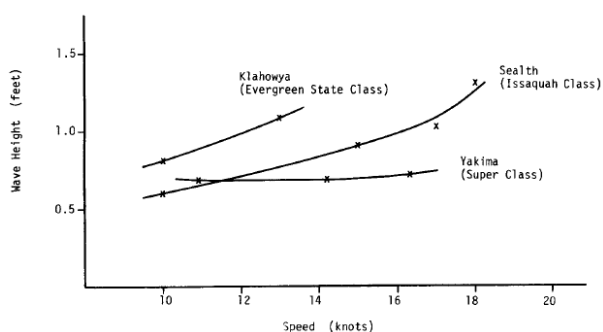


Figura 72 Distancia 300 pies (Nece et al., 1985)

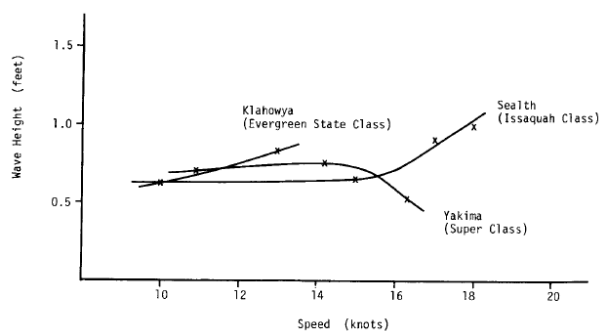


Figura 71 Distancia 600 pies (Nece et al., 1985)

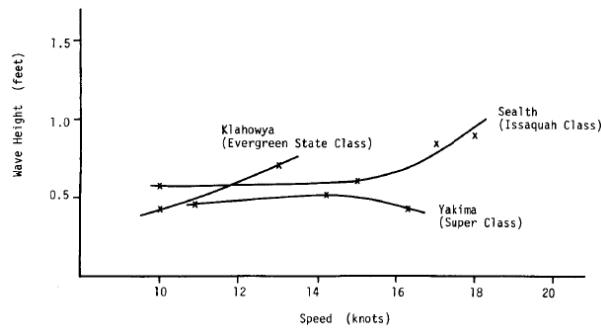


Figura 73 Distancia 1200 pies (Nece et al., 1985)

Datos del modelo numérico

Geometría del área de estudio

Para representar el ensayo descrito se ha decidido disponer un dominio de las siguientes características:

- Longitud: 1600 metros
- Anchura: 1132 metros
- Profundidad: 94,488 metros

Como se indicó anteriormente, y pese a que la profundidad es variable en la zona de estudio, se asume constante e igual a 310 pies, o lo que es lo mismo 94,488 metros.

Por otro lado, dado que no se dispone de unas medidas concretas que delimiten el dominio, consideraremos el menor tamaño posible que nos garantice la generación del oleaje y que permitan contener todos los sensores.

En lo que respecta al tamaño de malla, se ha decidido colocar una dimensión de celda de 4,0 metros, siendo igual en ambas direcciones ($Dx=Dy$). Así pues, el tamaño del dominio es de 400×283 .

Finalmente, para minimizar cuanto más posible el efecto de reflexión generado por las paredes, se ha colocado un tamaño de esponja de 100 metros.

Se muestra una tabla resumen con las dimensiones consideradas para la validación:

Longitud (m)	1600
Anchura (m)	1132
Profundidad (m)	33,528
Dx	4,0
Dy	4,0
M	400
N	283

Esponja Este (m)	100
Esponja Norte (m)	100
Esponja Oeste (m)	100
Esponja Sur (m)	100

Tabla 65 Caso calibración nº5 - Características del dominio de simulación

A continuación se muestra en esquema global del dominio introducido en el modelo:

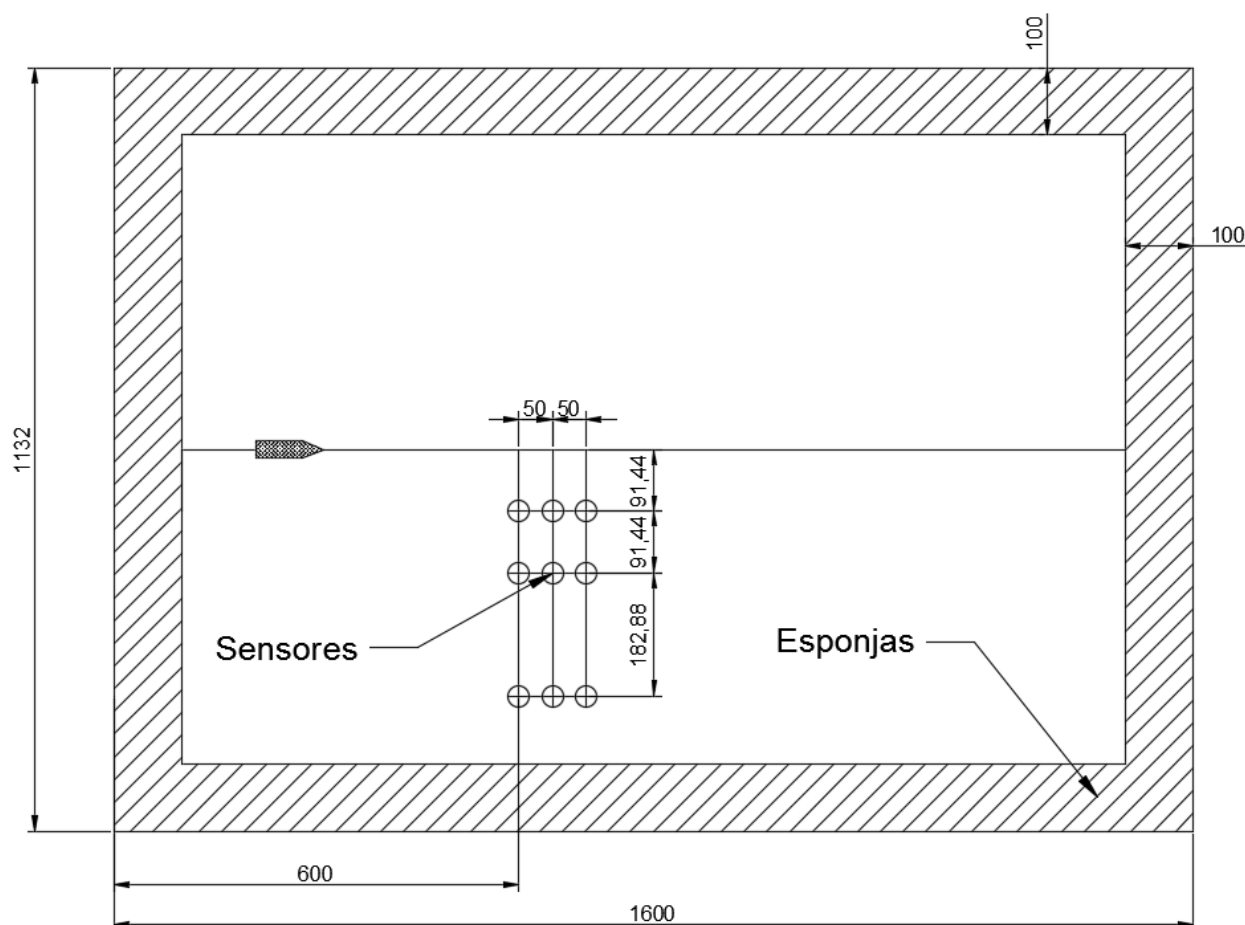


Figura 74 Caso calibración nº5 - Esquema global del dominio en el modelo numérico

Ubicación de los sensores

Los sensores se situarán a una distancia mínima de 600 metros con respecto al lado oeste del dominio. Para la colocación de los sensores, dispondremos tres filas paralelas, cada una de ellas con tres puntos de medida. Las distancias a la línea de navegación son las correspondientes a los gráficos reflejados en los apartados anteriores, esto es, 300, 600 y 1200 pies.

El resultado será el obtenido de realizar la media aritmética entre las alturas de ola máxima obtenidas en cada uno de los tres sensores situados a la misma distancia de la línea de navegación.

La posición de los puntos de medida con respecto al origen de coordenadas y teniendo en cuenta el tamaño de celda dispuesto, es la siguiente:

	X	Y
Sensor1 (a)	150	118,64
Sensor1 (b)	162,5	118,64
Sensor1 (c)	175	118,64
Sensor2 (a)	150	95,78
Sensor2 (b)	162,5	95,78
Sensor2 (c)	175	95,78
Sensor3 (a)	150	50,06
Sensor3 (b)	162,5	50,06
Sensor3 (c)	175	50,06

Tabla 66 Caso calibración nº5 - Ubicación sensores en el dominio

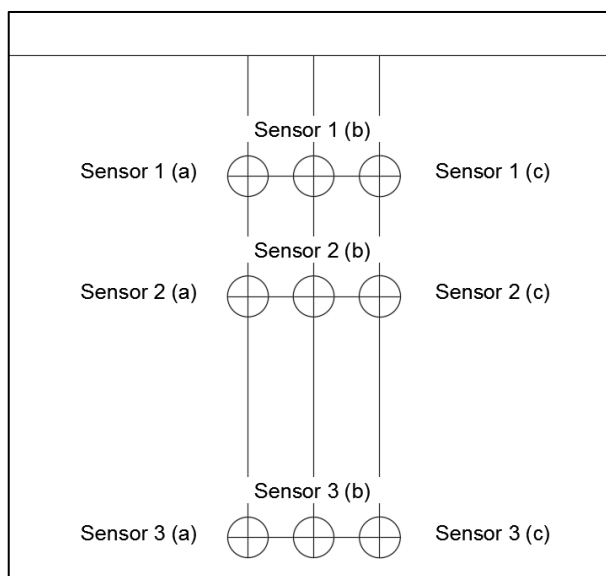


Figura 75 Caso calibración nº5 - Disposición de los sensores

Resultados

Los casos simulados corresponden a las velocidades especificadas en la siguiente tabla:

F	0,284	0,425	0,482	0,511
V (m/s)	5,144	7,717	8,746	9,260

Tabla 67 Caso calibración nº5 - Velocidades contempladas en la simulación

A continuación se muestran los resultados finales obtenidos en cada uno de los sensores. Se obtienen tres gráficas, una para cada uno de ellos, donde aparece representada la altura de ola máxima obtenida en el laboratorio y la altura de ola máxima obtenida en la simulación con respecto al número de Froude. Para la altura de ola máxima se considerarán pasos ascendentes por cero:

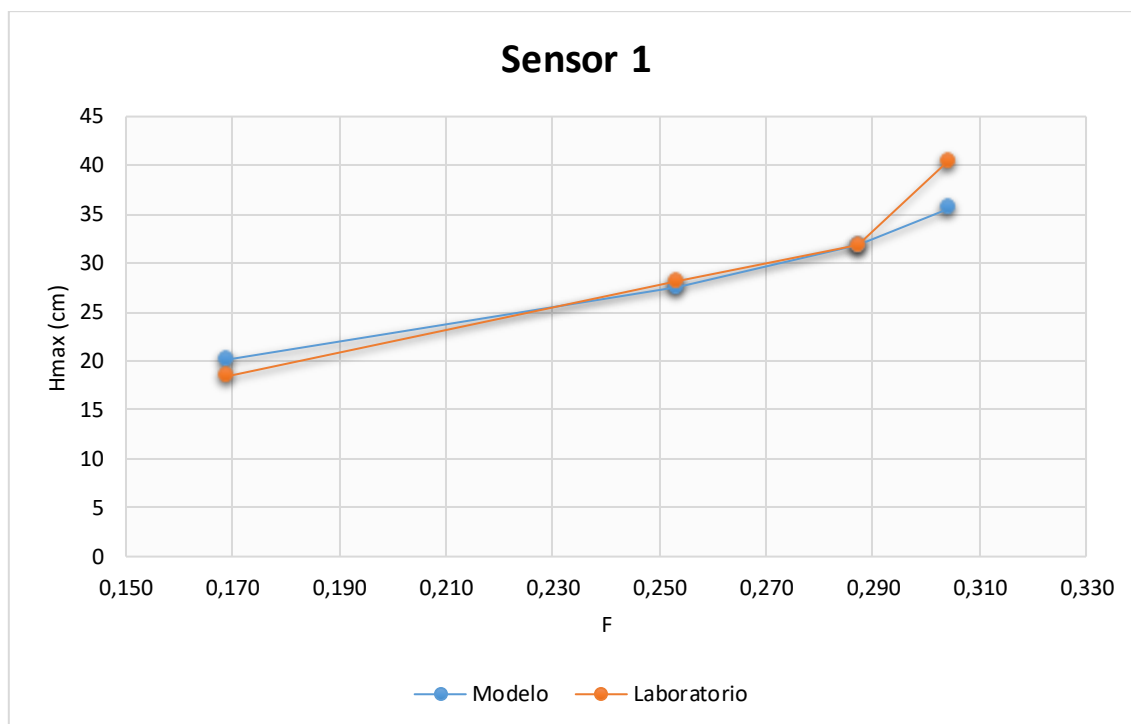


Gráfico 64 Caso calibración nº5 – Sensor 1 (91,44 m)

Sensor 1			
F	H1 modelo (cm)	H1 laboratorio (cm)	Error (%)
0,169	20,142	18,437	9,245
0,253	27,522	28,083	1,998
0,287	31,766	31,864	0,309
0,304	35,551	40,453	12,117

Tabla 68 Caso calibración nº5 – Sensor 1 (91,44 m)

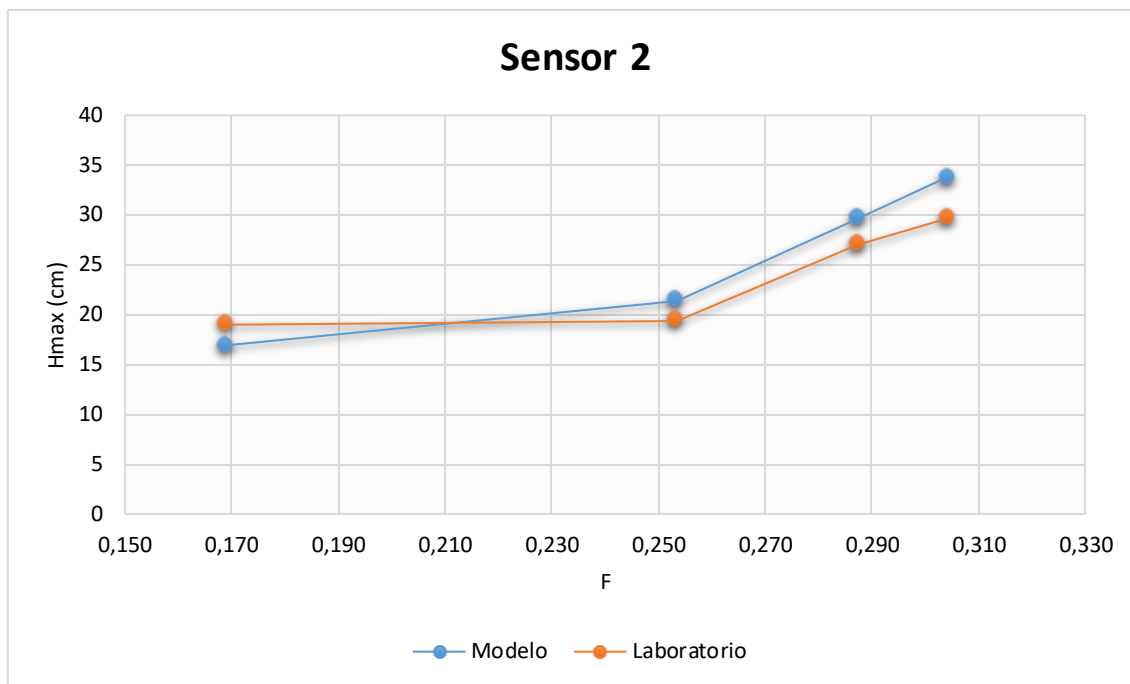


Gráfico 65 Caso calibración nº5 – Sensor 2 (182,88 m)

Sensor 2			
F	H2 modelo (cm)	H2 laboratorio (cm)	Error (%)
0,169	16,926	18,993	10,882
0,253	21,454	19,389	10,650
0,287	29,696	27,041	9,820
0,304	33,798	29,651	13,989

Tabla 69 Caso calibración nº5 – Sensor 2 (182,88 m)

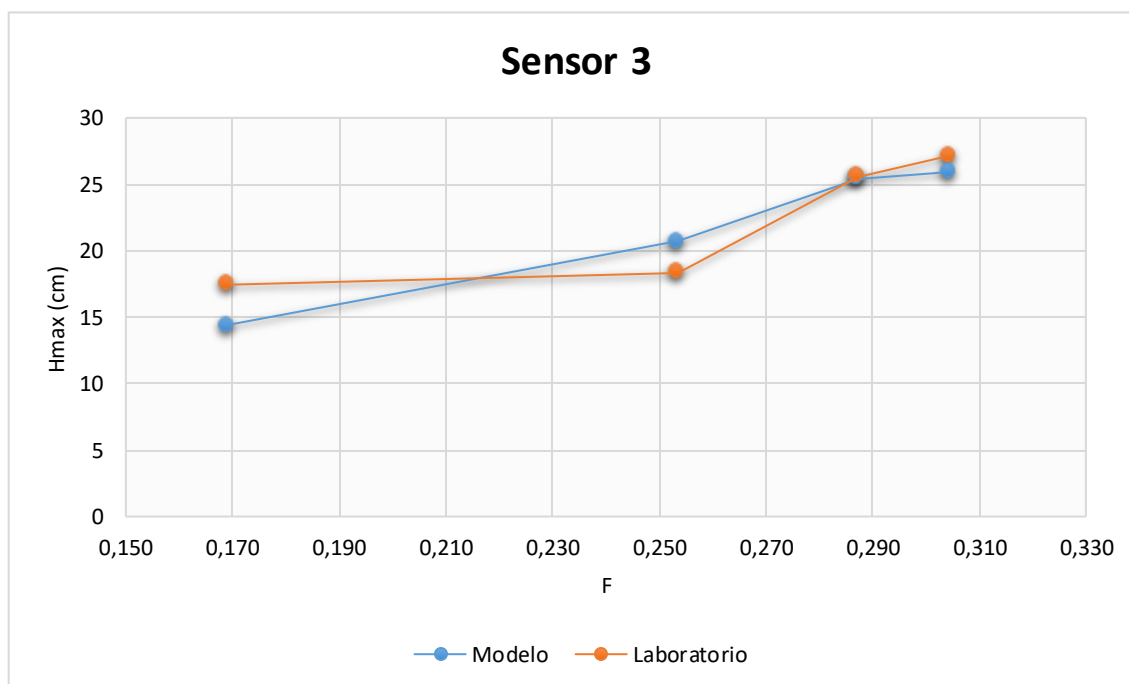


Gráfico 66 Caso calibración nº5 – Sensor 3 (365,76 m)

Sensor 3			
F	H3 modelo (cm)	H3 laboratorio (cm)	Error (%)
0,169	14,407	17,440	17,395
0,253	20,686	18,379	12,553
0,287	25,464	25,577	0,444
0,304	25,917	27,125	4,451

Tabla 70 Caso calibración nº5 – Sensor 3 (365,76 m)

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los coeficientes de calibración (alpha, beta y gamma) para la que se han obtenido los resultados expuestos anteriormente:

F	α	β	γ
0,169	0,750	1,000	2,500
0,253	0,920	1,000	1,320
0,287	0,900	1,000	0,950
0,304	1,020	1,000	0,930

Tabla 71 Caso calibración nº5 – Coeficientes de calibración

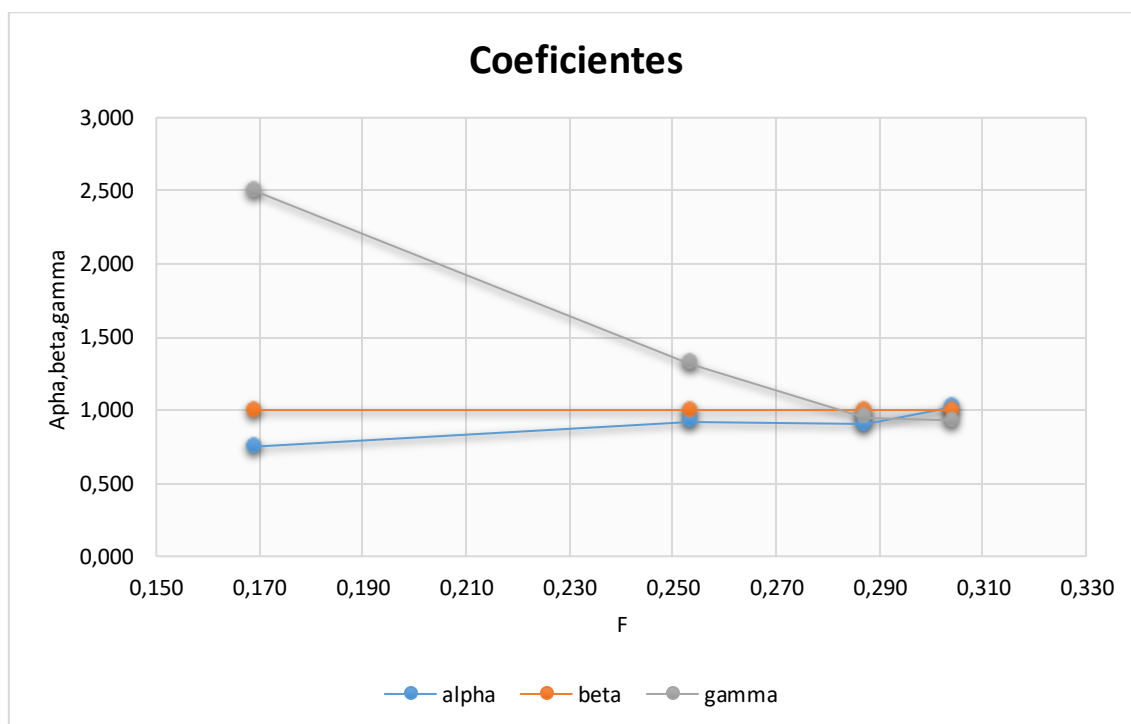


Gráfico 67 Caso calibración nº5 – Coeficientes de calibración

Se muestran dos capturas obtenidas de la renderización del modelo:

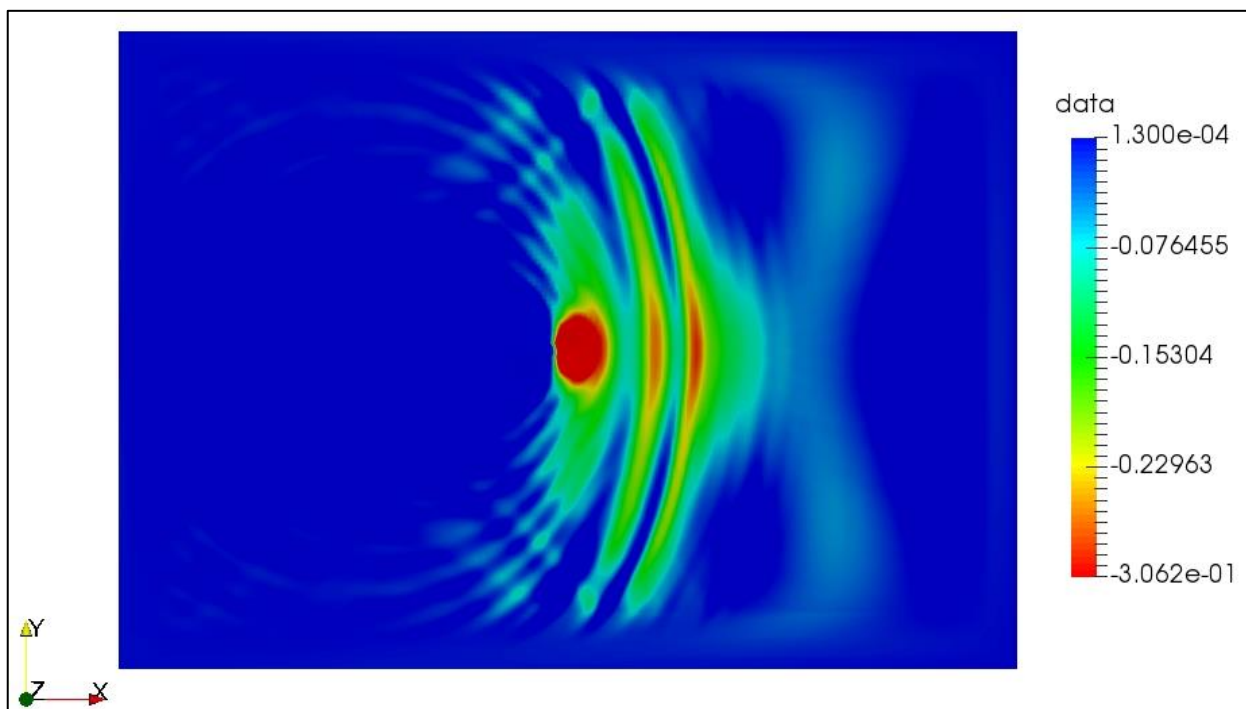


Figura 76 Renderización del modelo - $F=0.253$

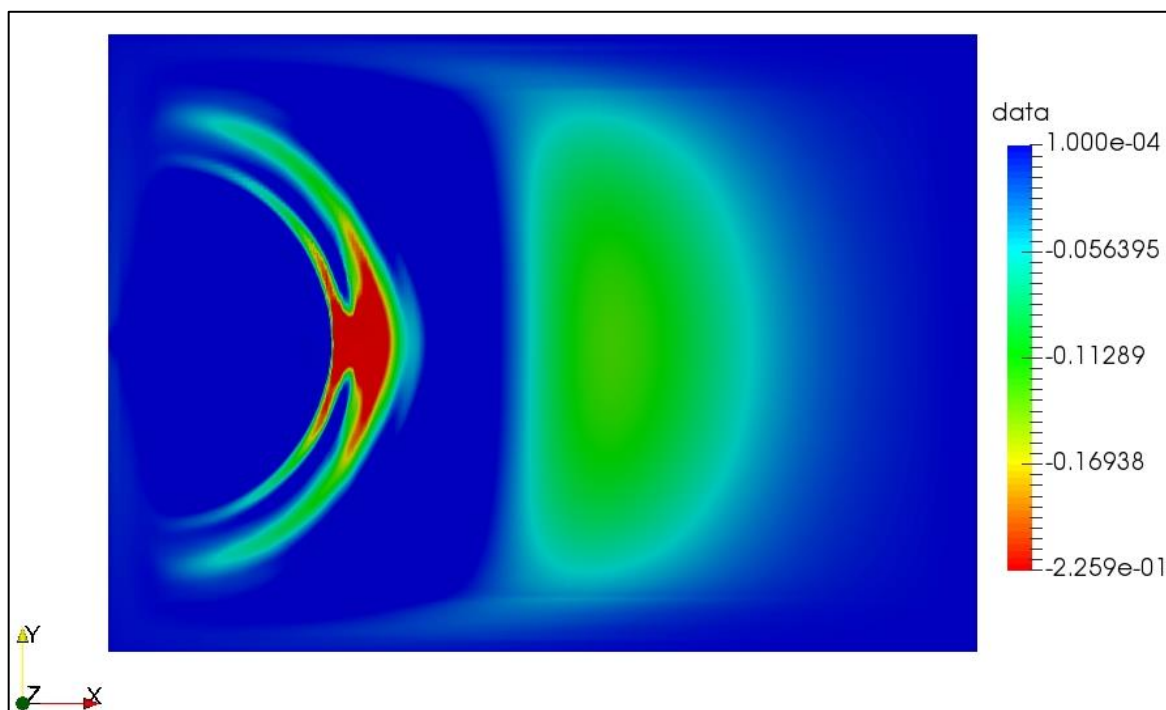


Figura 77 Renderización del modelo - $F=0.304$

A continuación quedan recogidos todos los ensayos realizados para cada uno de los casos, es decir, para cada número de Froude:

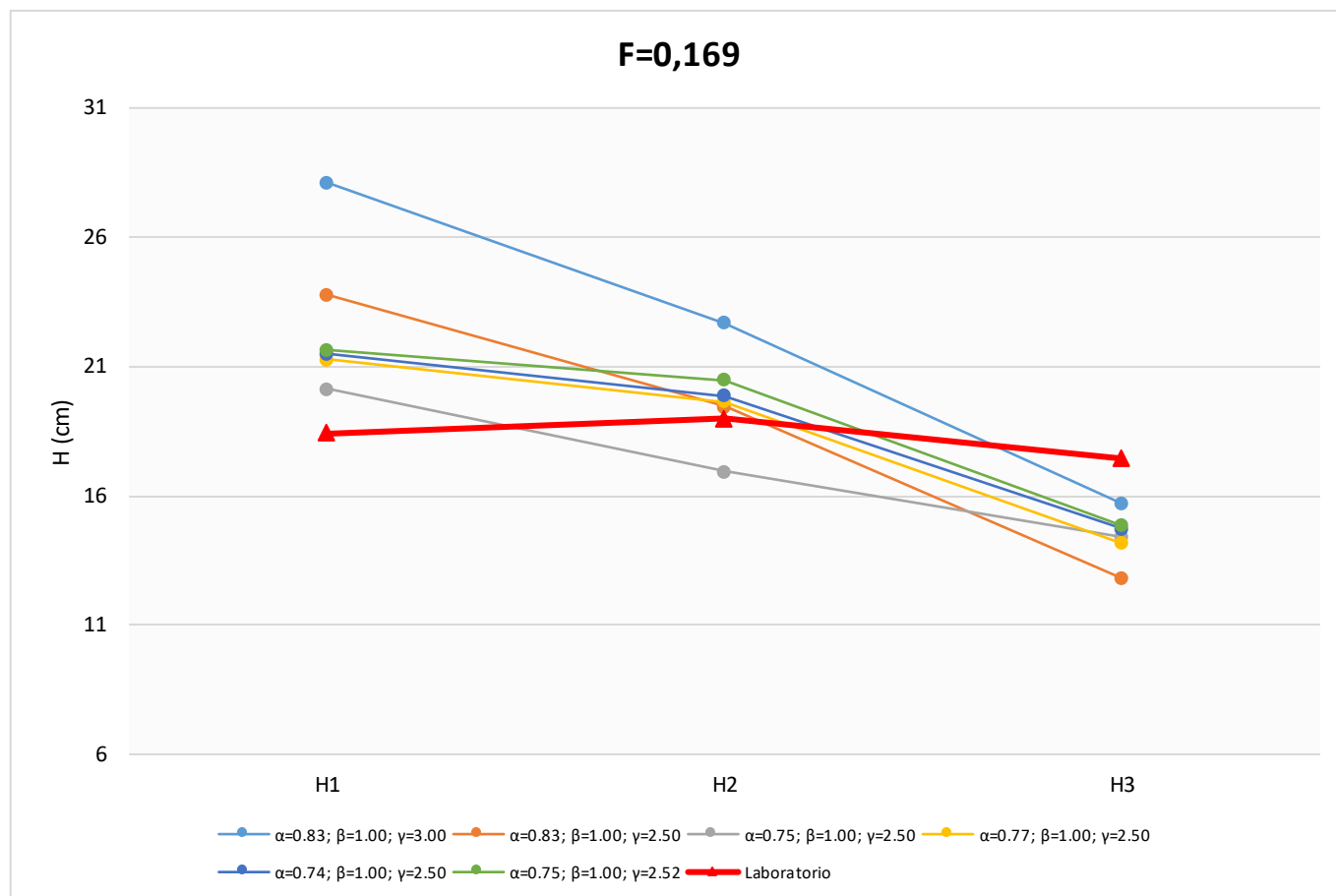


Gráfico 68 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,169

alfa	0,830	0,830	0,750	0,770	0,740	0,750
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	3,000	2,500	2,500	2,500	2,500	2,520
H1	28,108	23,772	20,142	21,283	21,493	21,642
H2	22,682	19,437	16,926	19,644	19,880	20,490
H3	15,702	12,815	14,407	14,162	14,739	14,850
e1 (cm)	9,670	5,334	1,704	2,845	3,056	3,205
e2 (cm)	3,689	0,444	-2,067	0,652	0,887	1,497
e3 (cm)	-1,738	-4,626	-3,034	-3,278	-2,701	-2,590
error medio (cm)	5,032	3,468	2,268	2,258	2,214	2,431
e1 (%)	52,449	28,933	9,245	15,431	16,573	17,382
e2 (%)	19,422	2,338	10,882	3,431	4,669	7,882
e3 (%)	9,966	26,523	17,395	18,795	15,486	14,849
error medio (%)	27,279	19,265	12,507	12,552	12,243	13,371

Tabla 72 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,169

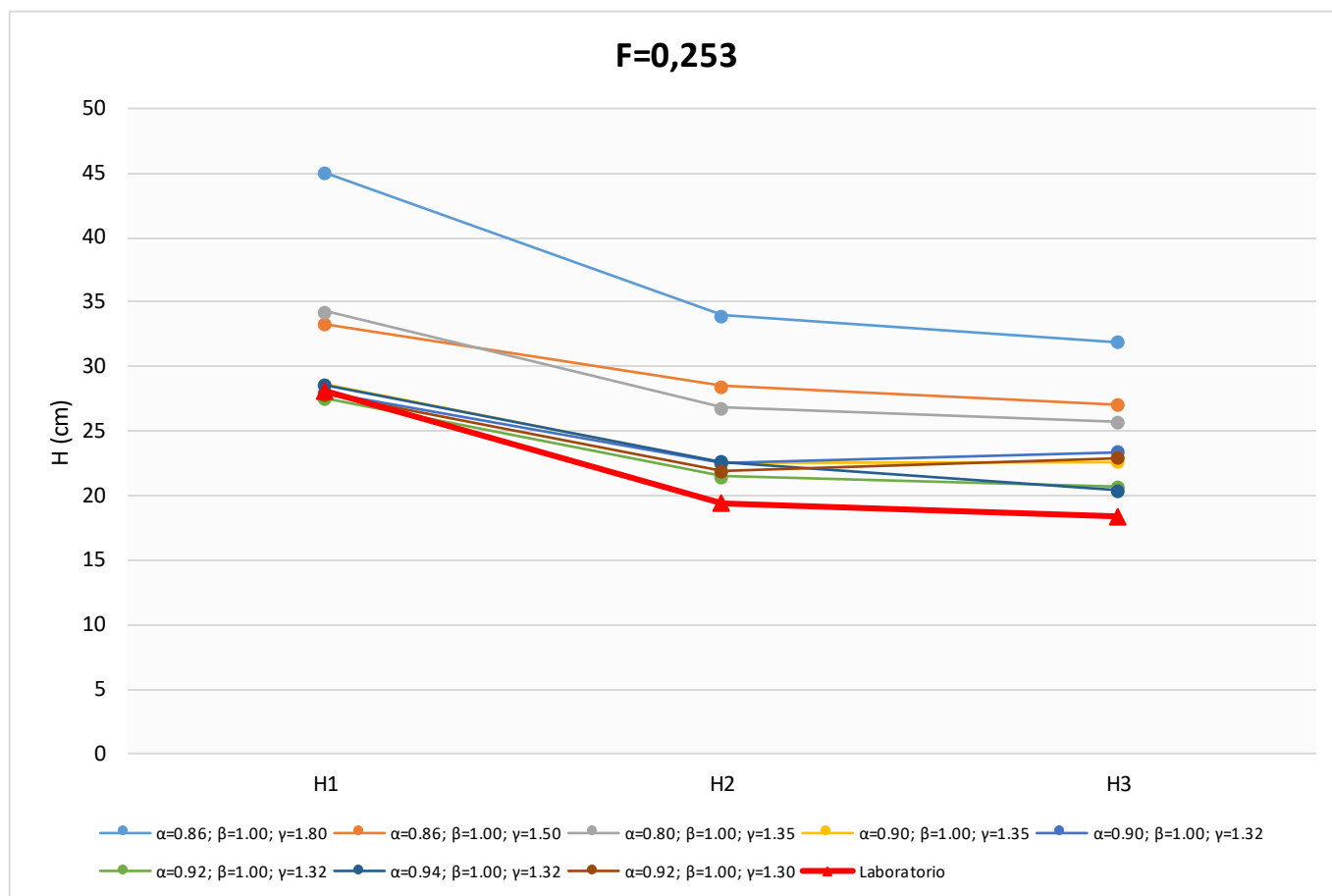


Gráfico 69 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,253

alfa	0,860	0,860	0,800	0,900	0,900	0,920	0,940	0,920
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,800	1,500	1,350	1,350	1,320	1,320	1,320	1,300
H1	44,993	33,263	34,294	28,612	27,975	27,522	28,542	27,863
H2	33,947	28,487	26,810	22,525	22,519	21,454	22,607	21,903
H3	31,871	27,034	25,712	22,611	23,345	20,686	20,410	22,888
e1 (cm)	16,910	5,180	6,211	0,529	-0,107	-0,561	0,460	-0,220
e2 (cm)	14,557	9,097	7,421	3,136	3,129	2,065	3,217	2,514
e3 (cm)	13,492	8,655	7,333	4,232	4,966	2,307	2,032	4,509
error medio (cm)	14,986	7,644	6,988	2,632	2,734	1,644	1,903	2,414
e1 (%)	60,215	18,446	22,118	1,883	0,383	1,998	1,636	0,783
e2 (%)	75,078	46,919	38,271	16,174	16,140	10,650	16,593	12,964
e3 (%)	73,412	47,093	39,902	23,027	27,023	12,553	11,054	24,535
error medio (%)	69,569	37,486	33,430	13,694	14,515	8,400	9,761	12,761

Tabla 73 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,253

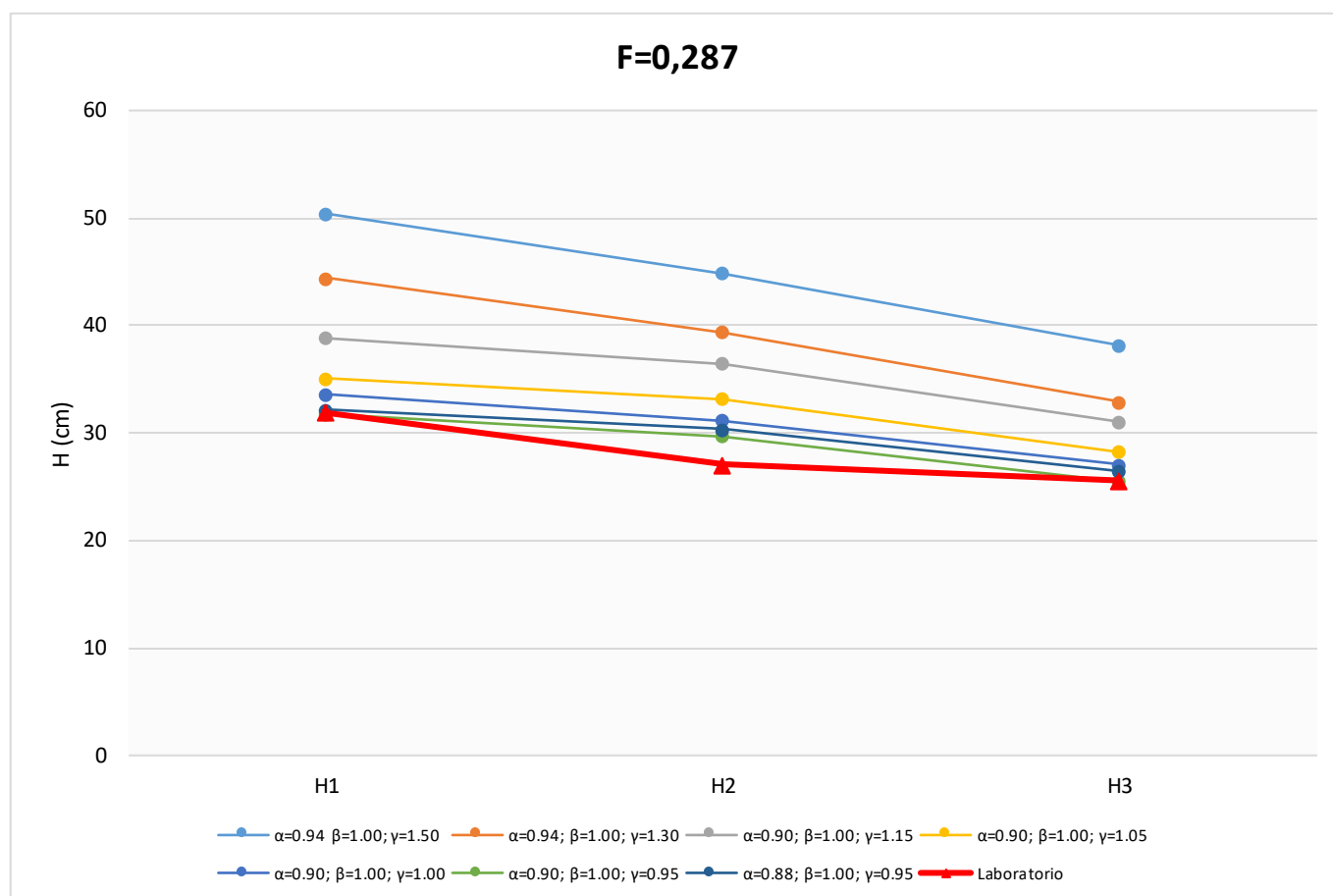


Gráfico 70 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,287

alfa	0,940	0,940	0,900	0,900	0,900	0,900	0,880
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,500	1,300	1,150	1,050	1,000	0,950	0,950
H1	50,395	44,439	38,810	35,090	33,602	31,766	32,182
H2	44,835	39,415	36,449	33,155	31,139	29,696	30,320
H3	38,162	32,924	31,046	28,220	27,085	25,464	26,450
e1 (cm)	18,530	12,574	6,946	3,225	1,738	-0,098	0,317
e2 (cm)	17,794	12,374	9,409	6,114	4,099	2,655	3,279
e3 (cm)	12,585	7,347	5,468	2,643	1,508	-0,114	0,873
error medio (cm)	16,303	10,765	7,274	3,994	2,448	0,956	1,490
e1 (%)	58,154	39,462	21,797	10,122	5,454	0,309	0,996
e2 (%)	65,806	45,762	34,794	22,610	15,158	9,820	12,127
e3 (%)	49,204	28,723	21,380	10,333	5,895	0,444	3,413
error medio (%)	57,721	37,982	25,991	14,355	8,836	3,524	5,512
error	100,665	66,906	46,291	26,841	17,154	9,835	12,637

Tabla 74 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,287

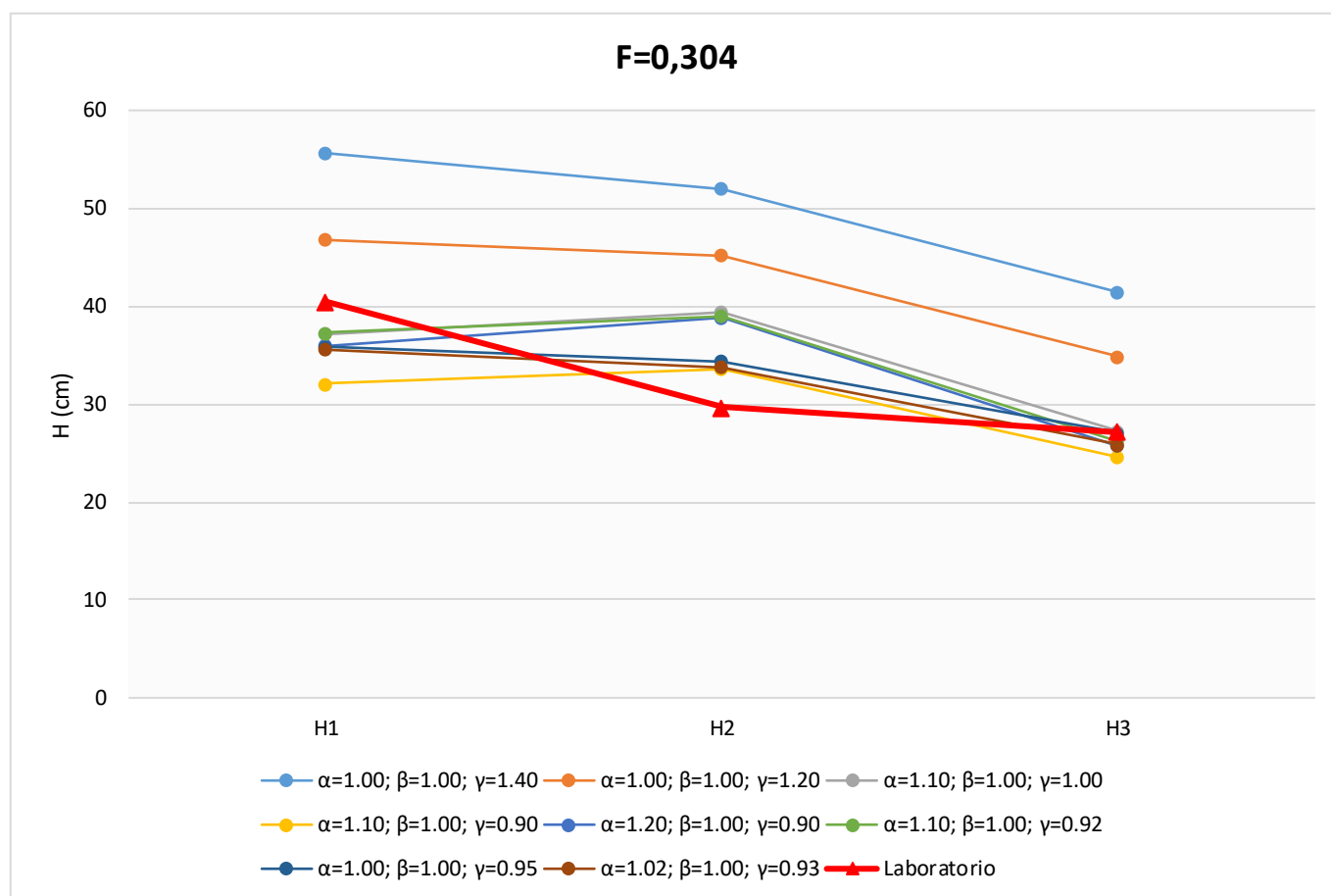


Gráfico 71 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,304

alfa	1,000	1,000	1,100	1,100	1,200	1,100	1,000	1,020
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,400	1,200	1,000	0,900	0,900	0,920	0,950	0,930
H1	55,627	46,759	37,224	32,046	35,931	37,329	35,861	35,551
H2	52,019	45,194	39,379	33,570	38,830	38,958	34,345	33,798
H3	41,449	34,893	27,293	24,606	25,723	26,214	27,119	25,917
e1 (cm)	15,174	6,306	-3,230	-8,408	-4,522	-3,125	-4,592	-4,902
e2 (cm)	22,368	15,543	9,729	3,919	9,180	9,308	4,694	4,148
e3 (cm)	14,324	7,768	0,168	-2,519	-1,402	-0,910	-0,006	-1,207
error medio (cm)	17,289	9,873	4,376	4,949	5,035	4,448	3,097	3,419
e1 (%)	37,510	15,589	7,983	20,783	11,179	7,724	11,351	12,117
e2 (%)	75,439	52,421	32,811	13,219	30,960	31,392	15,832	13,989
e3 (%)	52,810	28,640	0,621	9,287	5,168	3,356	0,022	4,451
error medio (%)	55,253	32,217	13,805	14,430	15,769	14,157	9,068	10,186

Tabla 75 Caso calibración nº5 – Total ensayos F=0,304

Calibración - Caso nº 6

Descripción del ensayo real

Características generales

Autor/es: Varyani, K.S., Universities of Glasgow and Strathclyde

Año: 2005

Descripción breve

Se trata de un ensayo de campo llevado a cabo en la ruta que une el puerto de Barcelona con el puerto de Palma.

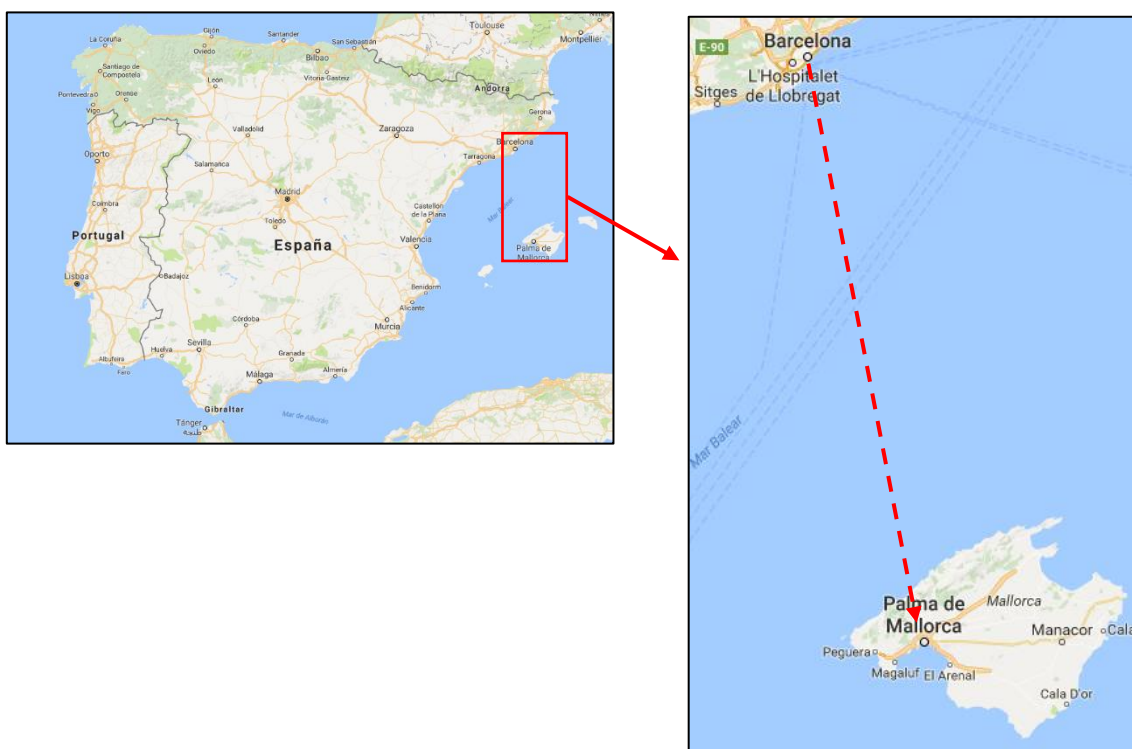


Figura 78 Zona de realización del estudio (Varyani, 2005)

En este experimento se plantea el análisis del oleaje generado por un ferry de tipo HSC (*High Speed Craft*) que une los puertos ya mencionados. La ruta es dividida en varios segmentos para conseguir facilitar el análisis del oleaje, asignando a cada uno de ellos una profundidad constante a modo de simplificación.

Asimismo, para cada uno de los segmentos se considera una velocidad diferente y, además, se contemplarán ambas direcciones, es decir, Palma-Barcelona o Barcelona-Palma, a cada una de las cuales le corresponden también una velocidad distinta.

Así pues, se tendrá en cuenta la variación de la altura de ola con la distancia a la línea de navegación considerando las características asociadas a cada uno de los segmentos, como se especificará más adelante.

Geometría del área de estudio

Tal y como se indicó anteriormente, la ruta que une Barcelona con Palma se divide en varios segmentos, como se muestra en la siguiente figura extraída del documento original:

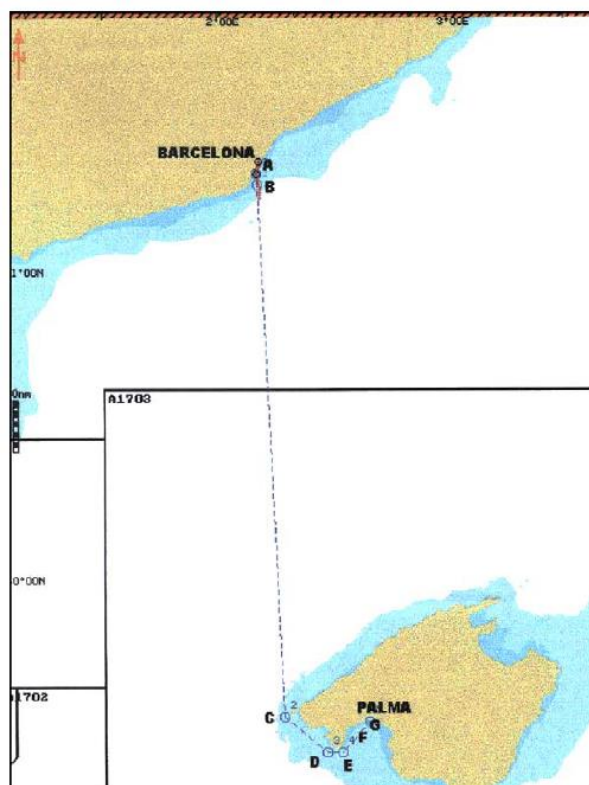


Figura 79 División en segmentos de la ruta (Varyani, 2005)

La profundidad en los distintos puntos a lo largo de la ruta son las que se recogen a continuación:

Localización	Profundidad (m)
A	12
B	18
C	60
D	40
E	39
F	15

Tabla 76 Profundidades en diferentes puntos (Varyani, 2005)

Además, los segmentos A-B y F-G se subdividirán en tramos más pequeños, obteniéndose lo siguiente:

- Tramo A-B, da lugar a:
 - A-A₁
 - A₁-A₂
 - A₂-A₃
 - A₃-B
- Tramo F-G, da lugar a:
 - F-F₁
 - F₁-F₂
 - F₂-G

Podemos apreciar las subdivisiones en la siguiente figura extraída del documento original:

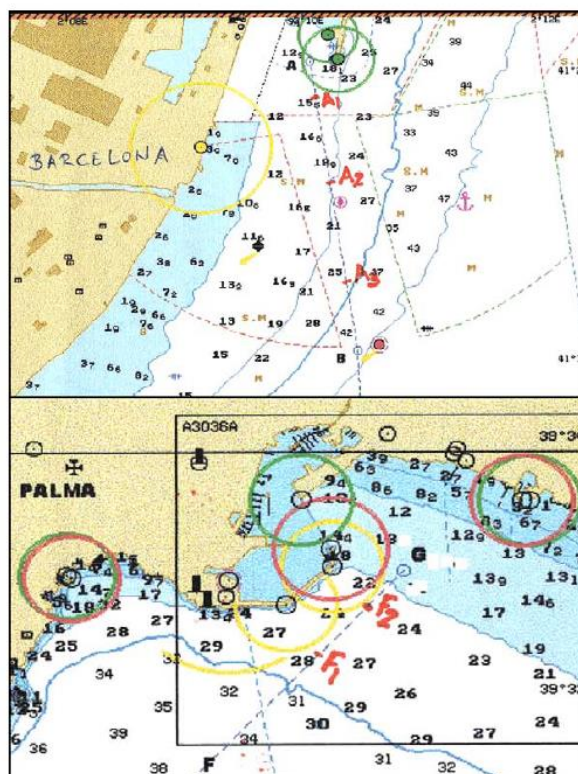


Figura 80 Subdivisión de los segmentos A-B y F-G (Varyani, 2005)

En lo que respecta a las dimensiones de longitud y anchura de la zona de realización del estudio, no quedan limitadas más que por la velocidad de ejecución del modelo y la consecución de unos resultados adecuados a la hora de realizar la simulación.

Sensores de medición

Para la obtención del oleaje generado a varias distancias con respecto a la línea de navegación, en este último caso de calibración no se dispondrán sensores, sino que se aplicará

la teoría de Gadd (1994, 1999) para el cálculo del oleaje producido por una embarcación de tipología HSC a una cierta distancia.

A pesar de no ser una calibración directa con datos de campo, esta teoría ha sido debidamente calibrada mediante ensayos, como se puede apreciar en:

- Gadd, G., 1994. The Wash of boats On Recreational Waterways. Transactions institution of naval architects, RINA.
- Gadd, G., 1999. Far field waves made by high speed ferries. RINA International Conference on Hydrodynamics of High Speed Craft, London, pp. 1-9.

En lo que respecta a las distancias a las cuales se obtuvieron medidas en el estudio, son las siguientes:

Segmento	Distancia (m)
A₃B	200
	400
	1000
F₁F₂	150
	200
	300
F₂G	150
	200
	300

Tabla 77 Distancias de medición (Varyani, 2005)

Características de la embarcación empleada

Las características principales del barco con el que se llevó a cabo el estudio son:

LOA (m)	86,31
LWL (m)	86,12
Manga (m)	9,00
Calado (m)	3,91

Tabla 78 Caso calibración nº6 - Características del barco a simular

Resultados presentados en el documento

En el documento original se presentan los resultados obtenidos en gráficos. Para cada una de las distancias en cada segmento, se obtiene el registro del oleaje teórico que se debería producir en dicho punto.

A partir de estos gráficos resulta sencilla la obtención de la altura de ola máxima, si bien es cierto que, en muchas ocasiones, en la propia redacción del documento aparecen citados esos valores.

Dado que la velocidad de pasada en una dirección no es igual a la registrada en la contraria, se obtendrán dos gráficos para cada distancia y segmento, cada uno de ellos correspondiente a una velocidad.

Se muestran a continuación las velocidades de pasada en cada segmento:

Segmento	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	F_h
A_3B	20,58	35,00	1,11
BA_3	15,43	35,00	0,83
F_1F_2	10,29	22,00	0,70
F_2F_1	12,86	22,00	0,88
F_2G	5,14	15,00	0,42

Tabla 79 Velocidades de pasada en cada segmento (Varyani, 2005)

Además, los gráficos presentados en el documento original son los siguientes:

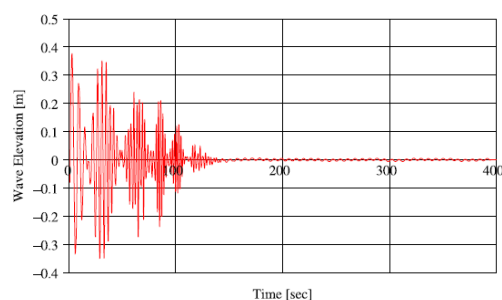


Figura 82 Segmento BA_3 (200 m) (Varyani, 2005)

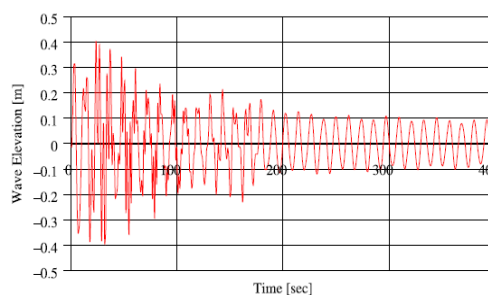


Figura 81 Segmento A_3B (200 m) (Varyani, 2005)

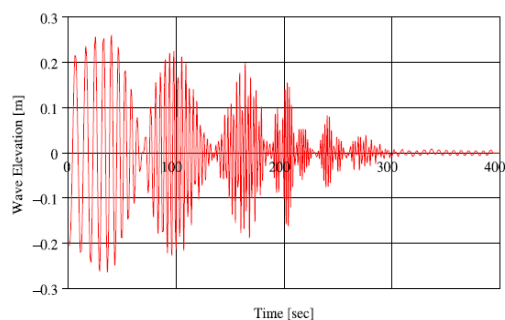


Figura 84 Segmento BA_3 (400 m) (Varyani, 2005)

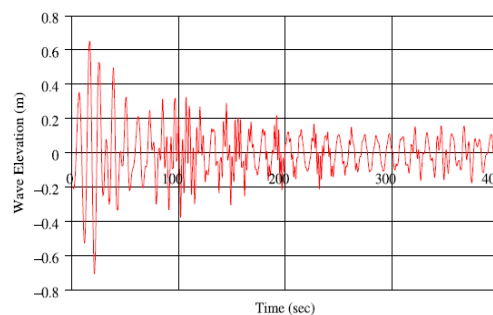


Figura 83 Segmento A_3B (400 m) (Varyani, 2005)

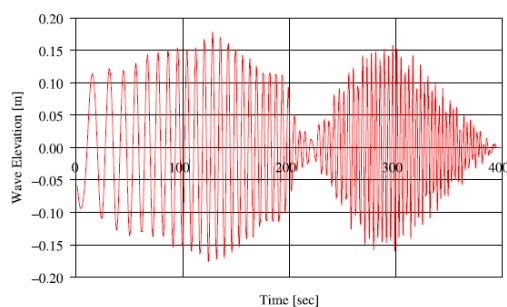


Figura 86 Segmento BA_3 (1000 m) (Varyani, 2005)

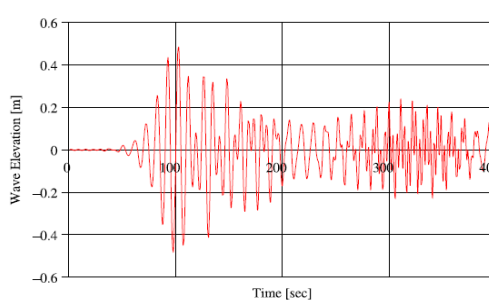


Figura 85 Segmento A_3B (1000 m) (Varyani, 2005)

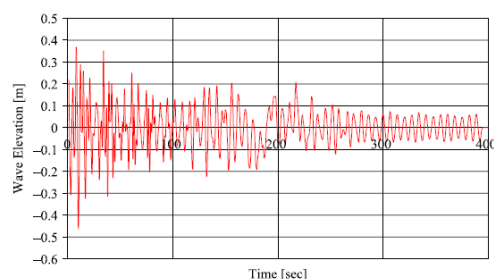


Figura 88 Segmento F_2F_1 (150 m) (Varyani, 2005)

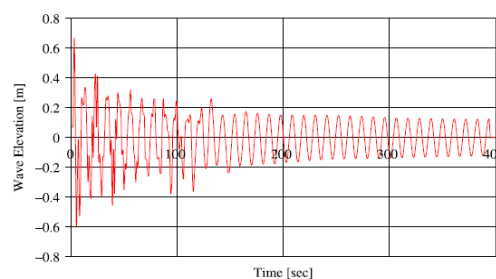


Figura 87 Segmento F_1F_2 (150 m) (Varyani, 2005)

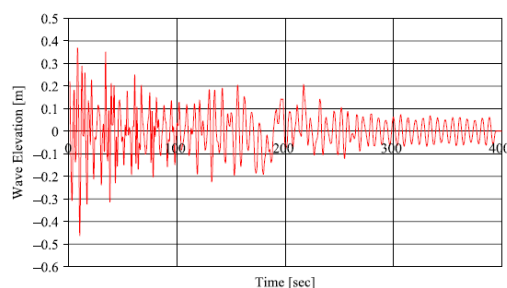


Figura 90 Segmento F_1F_2 (200 m) (Varyani, 2005)

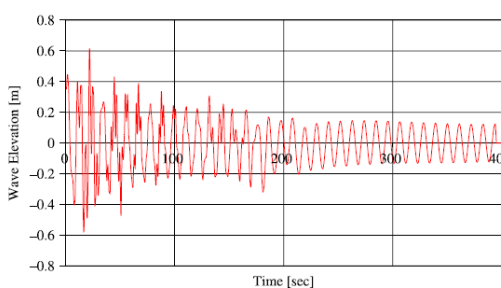


Figura 89 Segmento F_2F_1 (200 m) (Varyani, 2005)

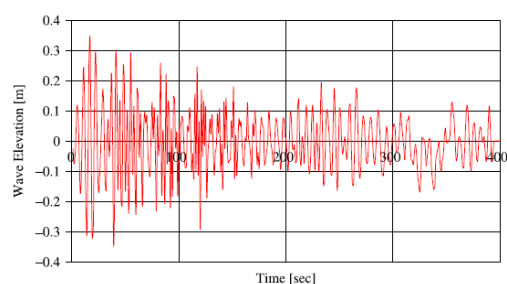


Figura 92 Segmento F_1F_2 (300 m) (Varyani, 2005)

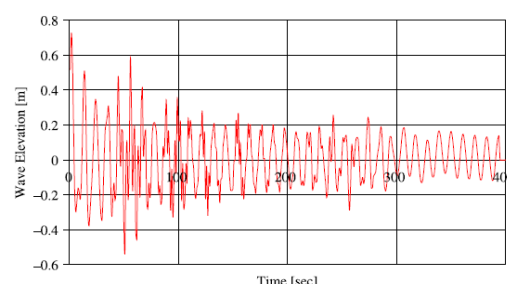


Figura 91 Segmento F_2F_1 (300 m) (Varyani, 2005)

Datos del modelo numérico

Geometría del área de estudio

Para representar el ensayo descrito se ha decidido disponer un dominio de las siguientes características:

Caso nº	F_h	Longitud (m)	Anchura (m)	Profundidad (m)
1	0,42	1000	1000	15
2	0,70	1000	1000	22
3	0,83	1350	1800	35
4	0,88	1000	1000	22
5	1,11	1350	1800	35

Tabla 80 Caso calibración nº6 - Características del dominio de simulación

En lo que respecta a la malla, se ha decidido colocar un tamaño de celda de 2,0 metros, siendo igual en ambas direcciones ($Dx=Dy$). Así pues, el tamaño del dominio en unidades de malla es:

Caso nº	F_h	M	N
1	0,42	500	500
2	0,70	500	500
3	0,83	675	900
4	0,88	500	500
5	1,11	675	900

Tabla 81 Caso calibración nº6 - Tamaño de malla

Finalmente, para minimizar cuanto más posible el efecto de reflexión generado por las paredes se ha colocado unas esponjas con las siguientes medidas:

Caso nº	F_h	Esponja Sur (m)	Esponja Norte (m)	Esponja Este (m)	Esponja Oeste (m)
1	0,42	90	90	90	90
2	0,70	90	90	90	90
3	0,83	200	200	200	200
4	0,88	90	90	90	90
5	1,11	200	200	200	200

Tabla 82 Caso calibración nº6 - Tamaño de las esponjas

A continuación se muestra en esquema global del dominio introducido en el modelo numérico:

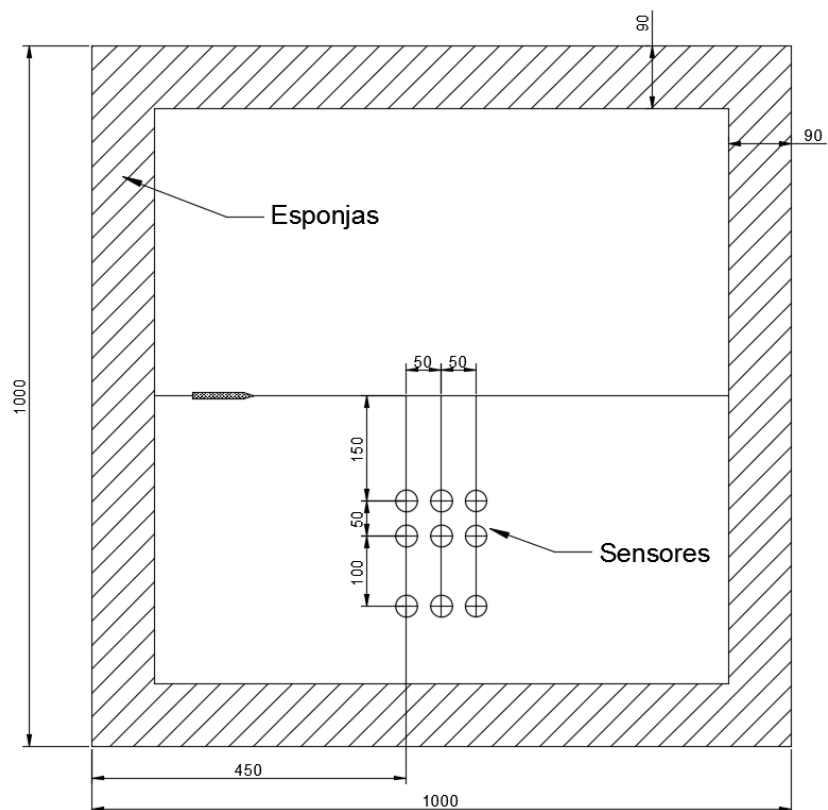


Figura 93 Esquema global del contorno en los casos 1, 2 y 4

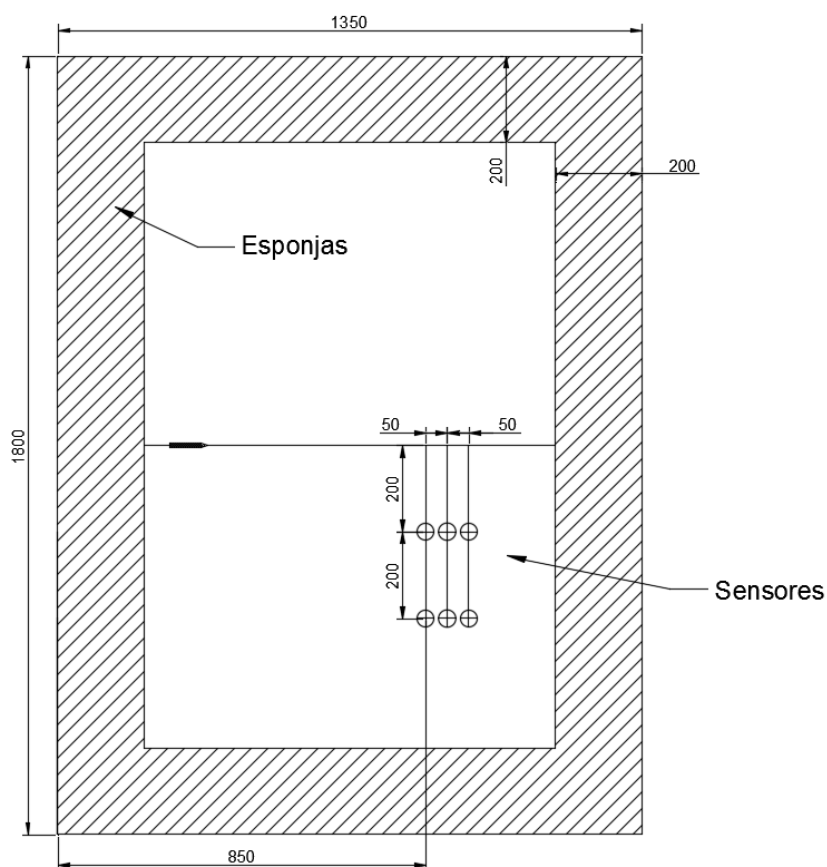


Figura 94 Esquema global del dominio en los casos 3 y 5

Ubicación de los sensores

En la ubicación de los sensores debemos distinguir dos situaciones distintas, por un lado, los casos 1,2 y 4 y, por otro, los casos 3 y 5.

En lo que respecta a los primeros casos, los sensores se situarán a una distancia mínima de 450 metros con respecto al lado oeste del contorno. Para la colocación de los sensores, dispondremos tres filas paralelas, cada una de ellas con tres puntos de medida. Las distancias a la línea de navegación serán: 150, 200 y 300 metros.

El resultado será el obtenido de realizar la media aritmética entre las alturas de ola máxima obtenidas en cada uno de los tres sensores situados a la misma distancia de la línea de navegación.

La posición de los puntos de medida con respecto al origen de coordenadas y teniendo en cuenta el tamaño de celda dispuesto es la siguiente:

	X	Y
Sensor 1 (a)	225	175
Sensor 1 (b)	250	175
Sensor 1 (c)	275	175
Sensor 2 (a)	225	150
Sensor 2 (b)	250	150
Sensor 2 (c)	275	150
Sensor 3 (a)	225	100
Sensor 3 (b)	250	100
Sensor 3 (c)	275	100

Tabla 83 Caso calibración nº6 - Ubicación sensores en el dominio en los casos 1, 2 y 4

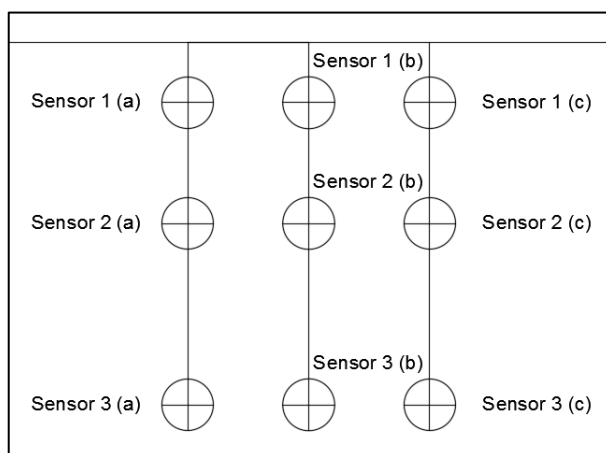


Figura 95 Disposición de los sensores en los casos 1, 2 y 4

En los casos 3 y 5, pese a que en el documento original se obtienen resultados a tres distancias con respecto a la línea de navegación, para reducir el tiempo de computación, únicamente se considerarán dos de ellas, las más cercanas.

Así pues, los sensores se situarán a 200 y 400 metros. Considerando el tamaño de celda y la posición del origen de coordenadas, los puntos de medida se dispondrán en las siguientes coordenadas:

	X	Y
Sensor 1 (a)	425	350
Sensor 1 (b)	450	350
Sensor 1 (c)	475	350
Sensor 2 (a)	425	250
Sensor 2 (b)	450	250
Sensor 2 (c)	475	250

Tabla 84 Ubicación sensores en el dominio en los casos 1, 2 y 4

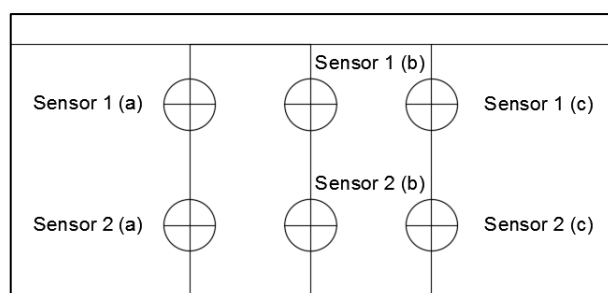


Figura 96 Disposición de los sensores en los casos 3 y 5

Resultados

Los casos simulados corresponden a las velocidades especificadas en la siguiente tabla:

F	0,424	0,700	0,833	0,875	1,111
V (m/s)	5,144	10,289	15,433	12,861	20,578

Tabla 85 Caso calibración nº6 - Velocidades contempladas en la simulación

A continuación se muestran los resultados finales obtenidos en cada uno de los sensores (150, 200, 300 y 400 m). Se obtienen cuatro gráficas, una para cada uno de ellos, donde aparece representada la altura de ola máxima obtenida en el laboratorio y la altura de ola máxima obtenida en la simulación con respecto al número de Froude. Para la altura de ola máxima se considerarán pasos ascendentes por cero:

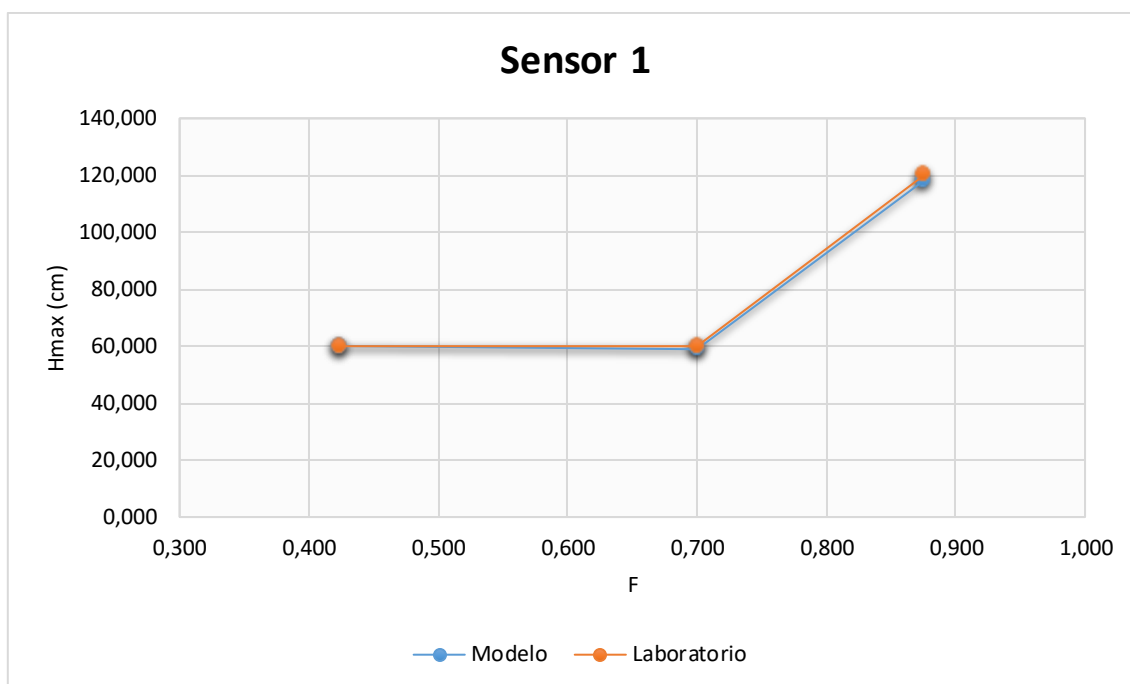


Gráfico 72 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (150 m)

Sensor 1			
F	H1 Modelo (cm)	H1 Laboratorio (cm)	Error (%)
0,424	59,907	60,000	0,155
0,700	58,923	60,000	1,795
0,875	118,158	120,000	1,535

Tabla 86 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (150 m)

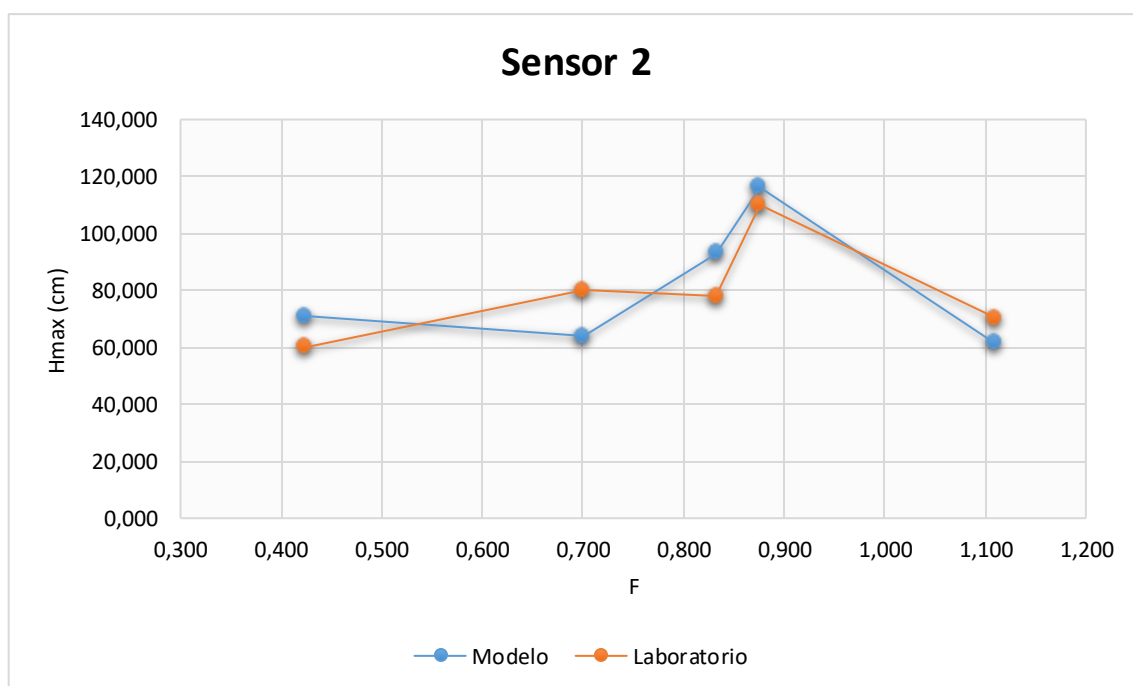


Gráfico 73 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (200 m)

Sensor 2			
F	H2 Modelo (cm)	H2 Laboratorio (cm)	Error (%)
0,424	70,960	60,000	18,266
0,700	63,669	80,000	20,414
0,833	92,886	78,000	19,084
0,875	116,142	110,000	5,584
1,111	61,210	70,000	12,558

Tabla 87 Caso calibración nº6 – Sensor 2 (200 m)

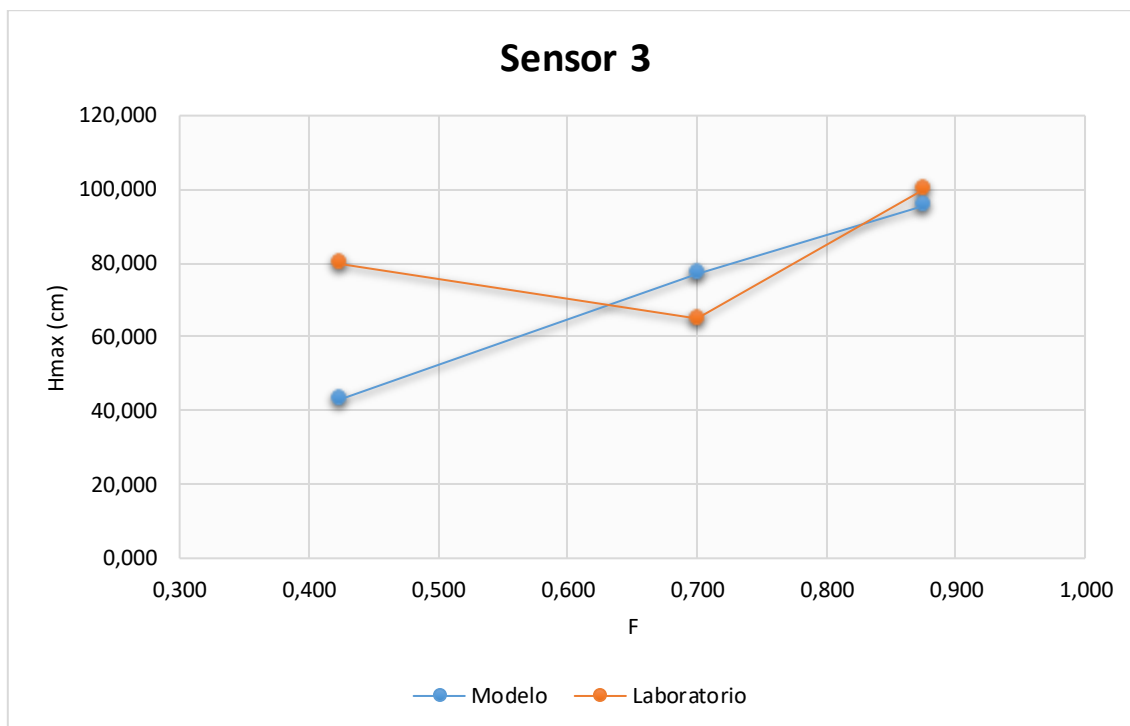


Gráfico 74 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (300 m)

Sensor 3			
F	H3 Modelo (cm)	H3 Laboratorio (cm)	Error (%)
0,424	43,072	80,000	46,160
0,700	77,093	65,000	18,605
0,875	95,552	100,000	4,448

Tabla 88 Caso calibración nº6 – Sensor 3 (300 m)

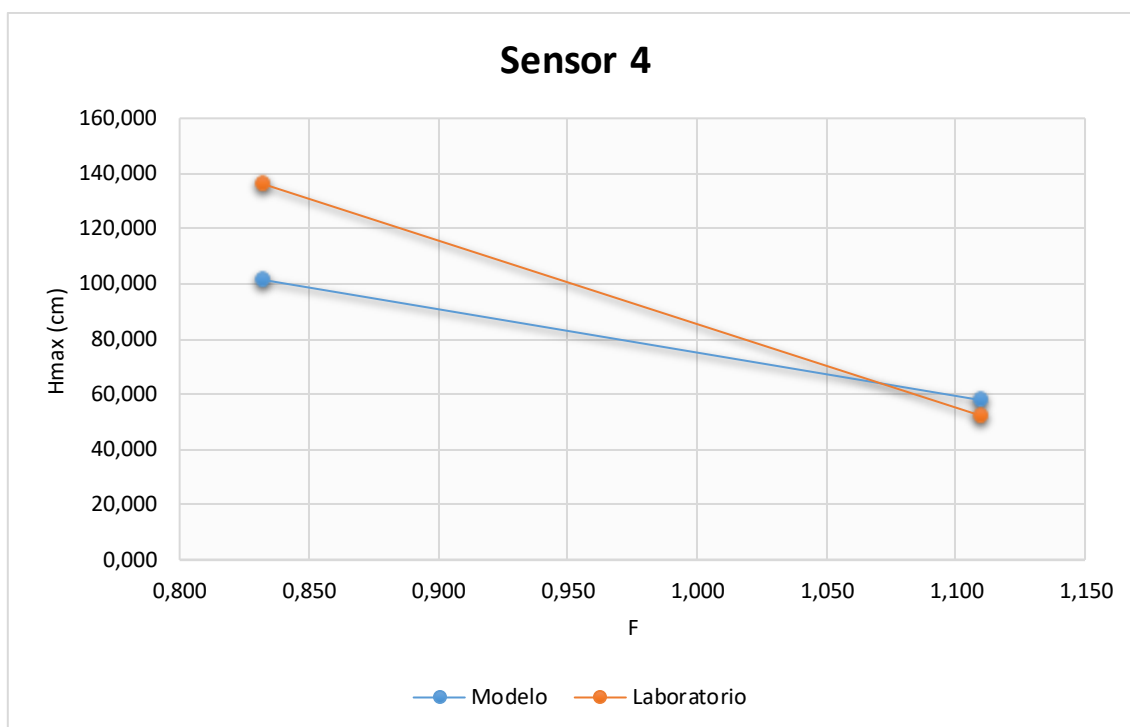


Gráfico 75 Caso calibración nº6 – Sensor 1 (400 m)

sensor 4			
F	Modelo	Laboratorio	Error (%)
0,833	101,358	136,000	25,472
1,111	57,750	52,000	11,057

Tabla 89 Caso calibración nº6 – Sensor 4 (400 m)

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los coeficientes de calibración (alpha, beta y gamma) para la que se han obtenido los resultados expuestos anteriormente:

F	α	β	γ
0,424	0,605	1,000	1,300
0,700	0,800	1,000	0,170
0,833	1,300	1,000	0,250
0,875	0,950	1,000	0,380
1,111	2,000	1,000	0,230

Tabla 90 Caso calibración nº6 – Coeficientes de calibración

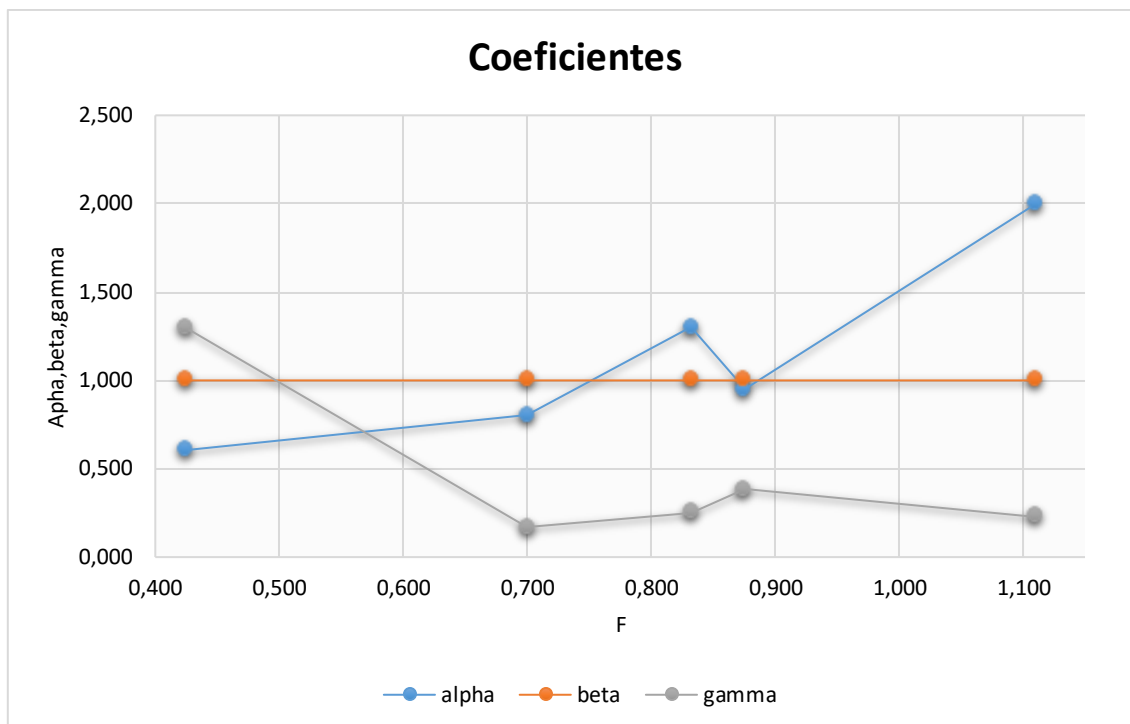


Gráfico 76 Caso calibración nº6 – Coeficientes de calibración

Se muestran dos capturas obtenidas de la renderización del modelo:

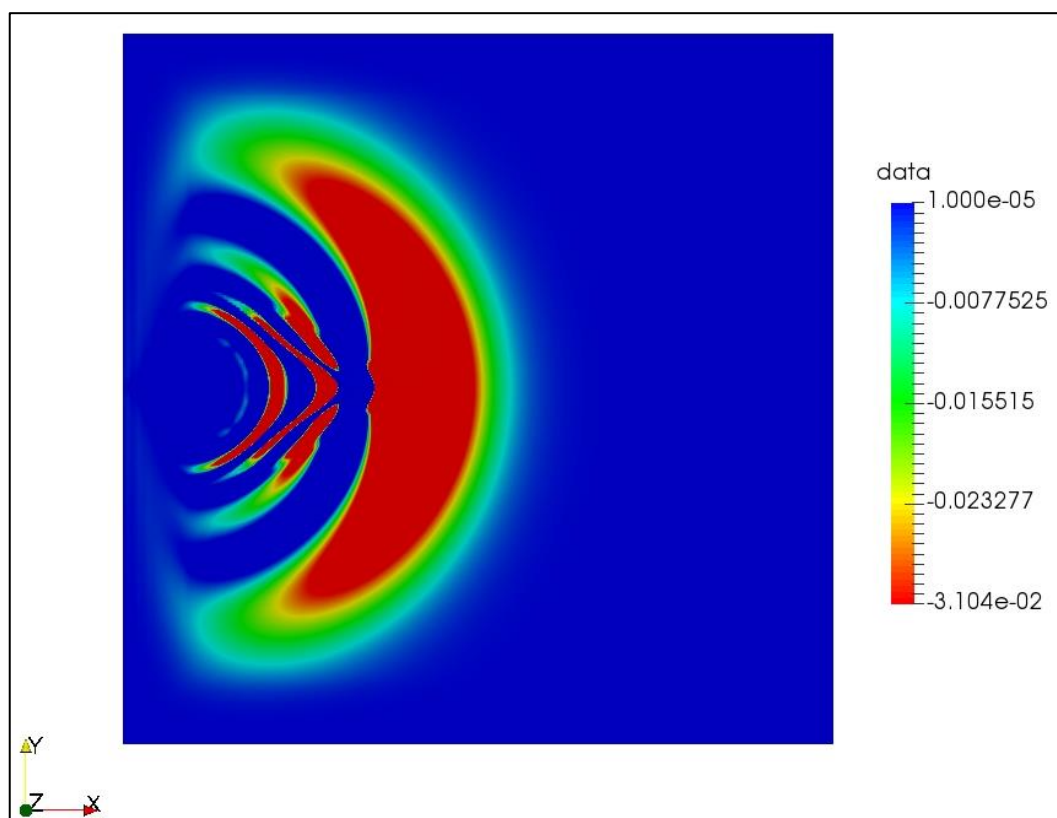


Figura 97 Caso calibración nº6 – Renderización del modelo - $F=0.700$

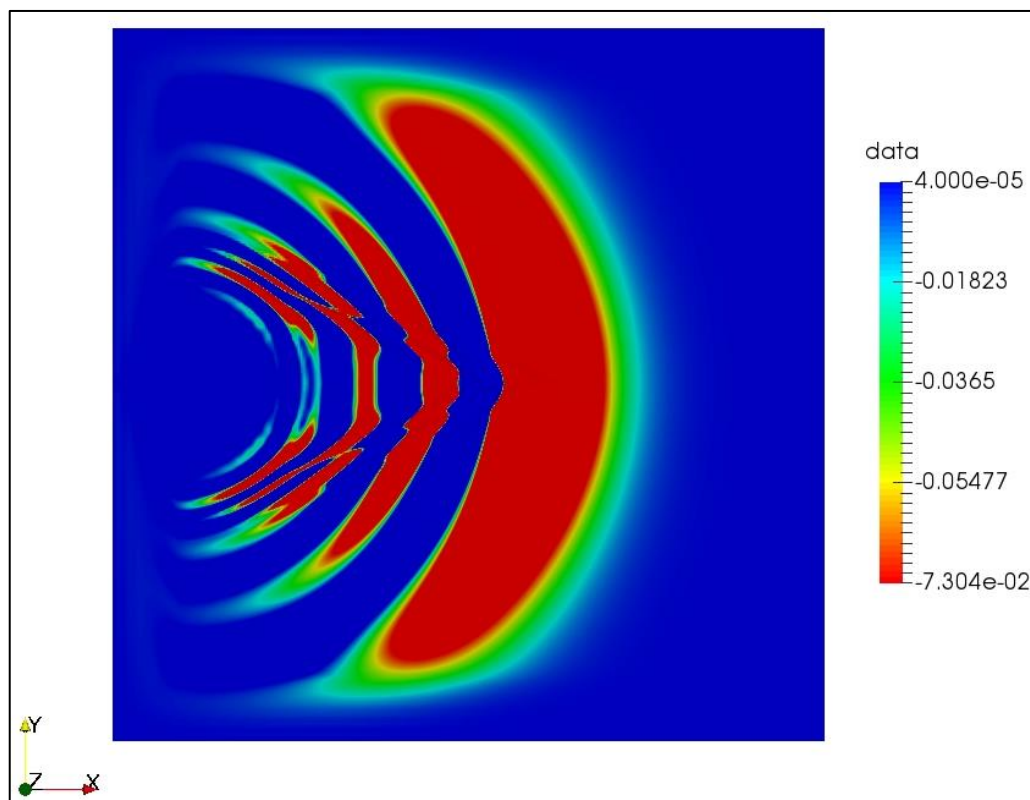


Figura 98 Caso calibración nº6 – Renderización del modelo - $F=0.875$

A continuación quedan recogidos todos los ensayos realizados para cada uno de los casos, es decir, para cada número de Froude:

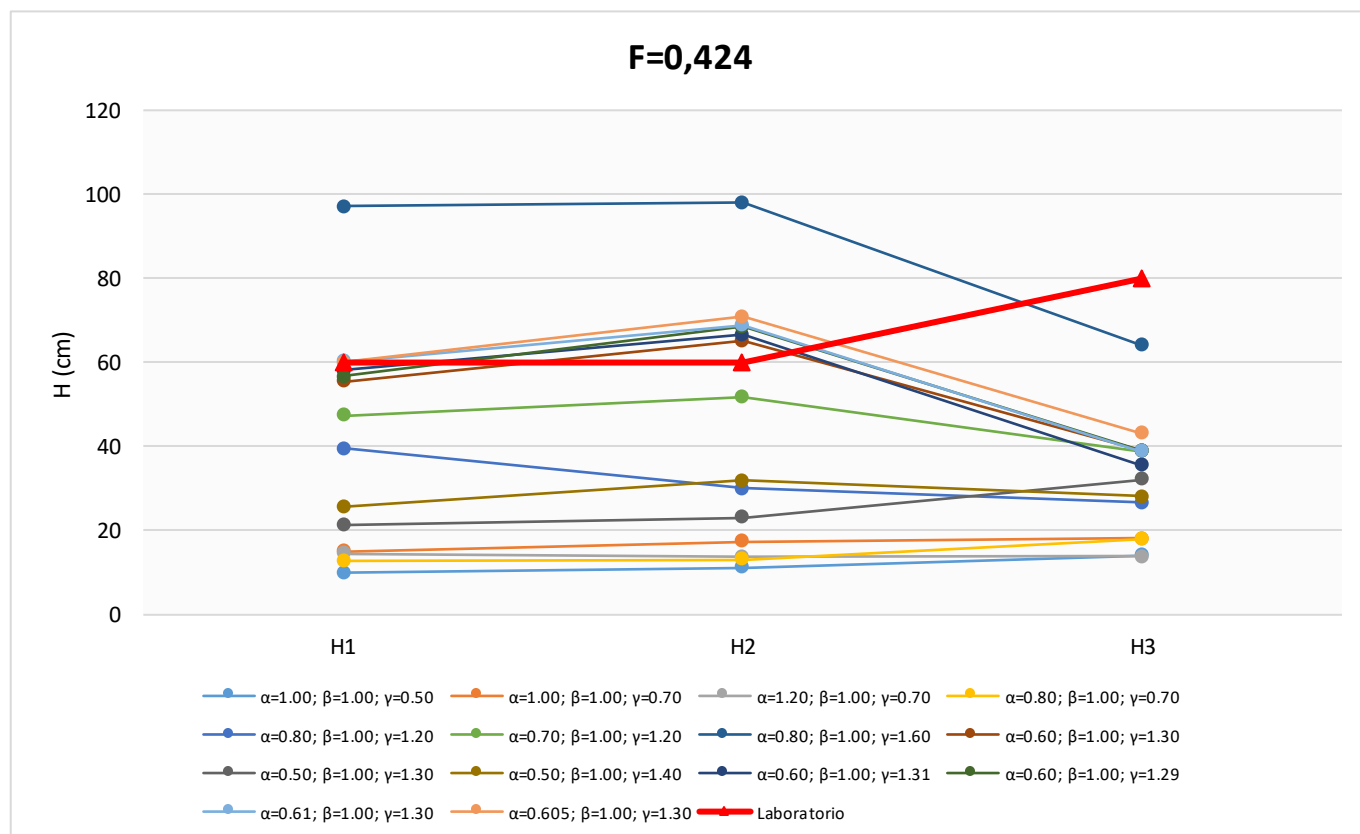


Gráfico 77 Caso calibración nº6 – Total ensayos $F=0,424$

alfa	1,000	1,000	1,200	0,800	0,800	0,700	0,800	0,600	0,500	0,500
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,500	0,700	0,700	0,700	1,200	1,200	1,600	1,300	1,300	1,400
H1	10,017	14,992	14,474	12,817	39,651	47,359	97,117	55,547	21,340	25,688
H2	11,278	17,437	13,812	13,158	30,139	51,773	98,078	65,190	23,168	32,013
H3	14,040	18,258	13,964	17,989	26,743	38,788	64,049	39,046	32,088	28,089
e1 (mm)	-49,983	-45,008	-45,526	-47,183	-20,349	-12,641	37,117	-4,453	-38,660	-34,312
e2 (mm)	-48,722	-42,563	-46,188	-46,842	-29,861	-8,227	38,078	5,190	-36,832	-27,987
e3 (mm)	-65,960	-61,742	-66,036	-62,011	-53,257	-41,212	-15,951	-40,954	-47,912	-51,911
error medio (mm)	54,888	37,328	39,438	39,009	25,867	15,520	22,787	12,649	30,851	28,553
e1 (%)	83,305	75,013	75,877	78,638	33,915	21,068	61,862	7,422	64,433	57,187
e2 (%)	81,203	70,938	76,980	78,070	49,768	13,712	63,463	8,650	61,387	46,645
e3 (%)	82,450	77,178	82,545	77,514	66,571	51,515	19,939	51,193	59,890	64,889
error medio (%)	82,319	74,376	78,467	78,074	50,085	28,765	48,421	22,421	61,903	56,240

alfa	0,600	0,600	0,610	0,605
beta	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	1,310	1,290	1,300	1,300
H1	58,143	56,742	60,354	59,907
H2	66,668	68,588	68,843	70,960
H3	35,463	39,002	38,745	43,072
e1 (mm)	-1,857	-3,258	0,354	-0,093
e2 (mm)	6,668	8,588	8,843	10,960
e3 (mm)	-44,537	-40,998	-41,255	-36,928
error medio (mm)	13,266	13,211	12,613	11,995
e1 (%)	3,096	5,431	0,590	0,155
e2 (%)	11,113	14,314	14,738	18,266
e3 (%)	55,672	51,247	51,569	46,160
error medio (%)	23,293	23,664	22,299	21,527

Tabla 91 Caso calibración nº6 – Total ensayos F=0,424

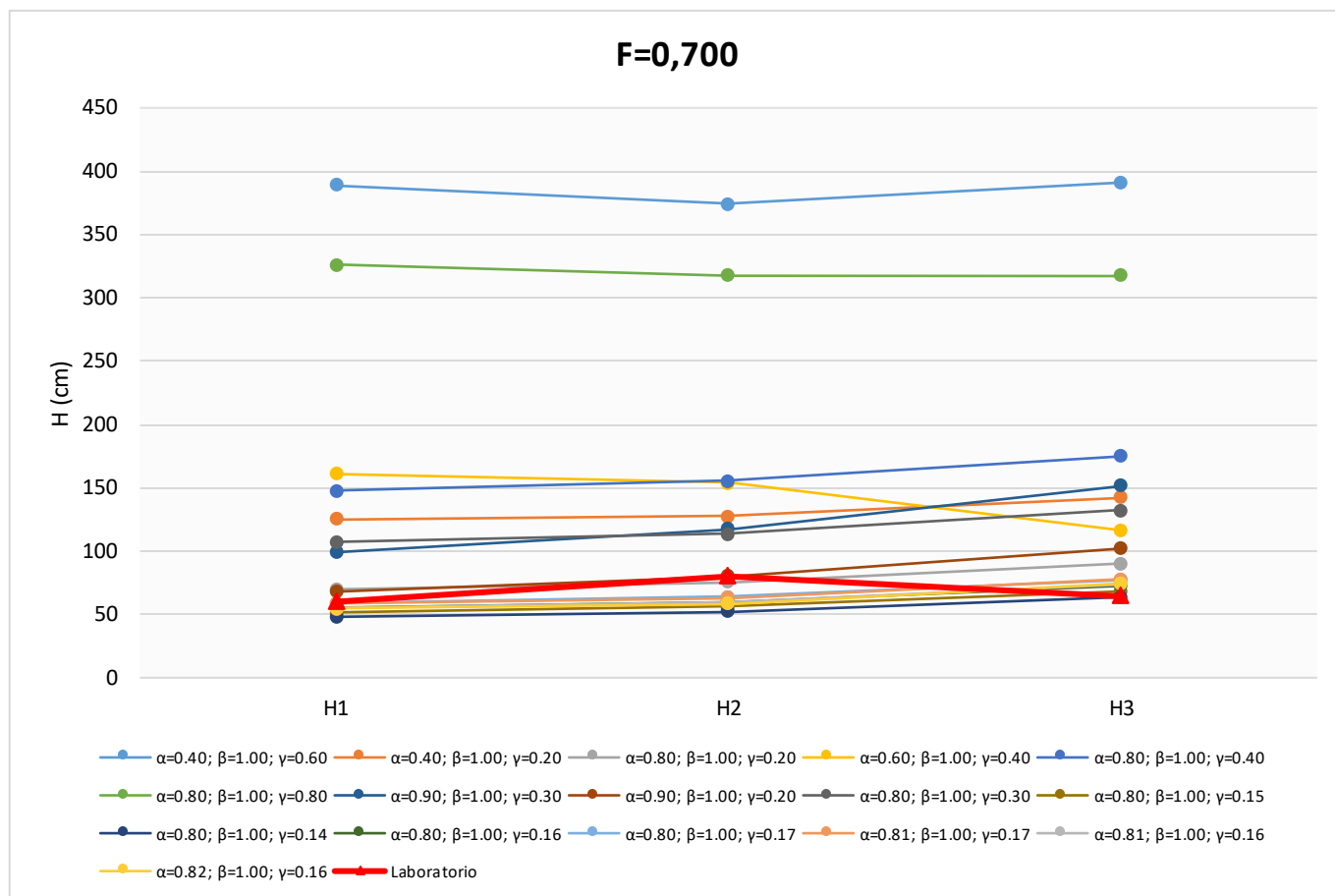


Gráfico 78 Caso calibración nº6 – Total ensayos F=0,700

alfa	0,400	0,400	0,800	0,600	0,800	0,800	0,900	0,900	0,800	0,800
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,600	0,200	0,200	0,400	0,400	0,800	0,300	0,200	0,300	0,150
H1	389,223	124,835	69,829	160,841	147,847	326,300	99,077	67,958	107,278	51,631
H2	374,410	127,508	75,288	153,619	155,231	317,410	117,681	80,432	113,654	56,025
H3	390,990	141,964	90,205	116,429	174,788	317,677	151,304	102,002	132,504	68,181
e1 (mm)	329,223	64,835	9,829	100,841	87,847	266,300	39,077	7,958	47,278	-8,369
e2 (mm)	294,410	47,508	-4,712	73,619	75,231	237,410	37,681	0,432	33,654	-23,975
e3 (mm)	325,990	76,964	25,205	51,429	109,788	252,677	86,304	37,002	67,504	3,181
error medio (mm)	316,541	63,102	10,107	75,296	90,955	252,129	54,354	15,131	49,479	-9,721
e1 (%)	548,705	108,058	16,382	168,068	146,412	443,833	65,128	13,263	78,797	13,948
e2 (%)	368,013	59,385	5,890	92,024	94,039	296,763	47,101	0,540	42,068	29,969
e3 (%)	501,523	118,406	38,777	79,122	168,905	388,734	132,775	56,926	103,852	4,894
error medio (%)	472,747	95,283	20,350	113,071	136,452	376,443	81,668	23,576	74,905	16,270

alfa	0,800	0,800	0,800	0,810	0,810	0,820
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,140	0,160	0,170	0,170	0,160	0,160
H1	48,088	55,359	58,923	58,718	55,181	54,928
H2	52,192	59,759	63,669	63,114	59,299	58,512
H3	63,647	72,570	77,093	77,854	73,604	74,420
e1 (mm)	-11,912	-4,641	-1,077	-1,282	-4,819	-5,072
e2 (mm)	-27,808	-20,241	-16,331	-16,886	-20,701	-21,488
e3 (mm)	-1,353	7,570	12,093	12,854	8,604	9,420
error medio (mm)	-13,691	-5,770	-1,772	-1,771	-5,639	-5,713
e1 (%)	19,854	7,735	1,795	2,137	8,032	8,453
e2 (%)	34,760	25,301	20,414	21,107	25,876	26,860
e3 (%)	2,081	11,647	18,605	19,775	13,237	14,493
error medio (%)	18,898	14,894	13,604	14,340	15,715	16,602

Tabla 92 Caso calibración nº6 – Total ensayos F=0,700

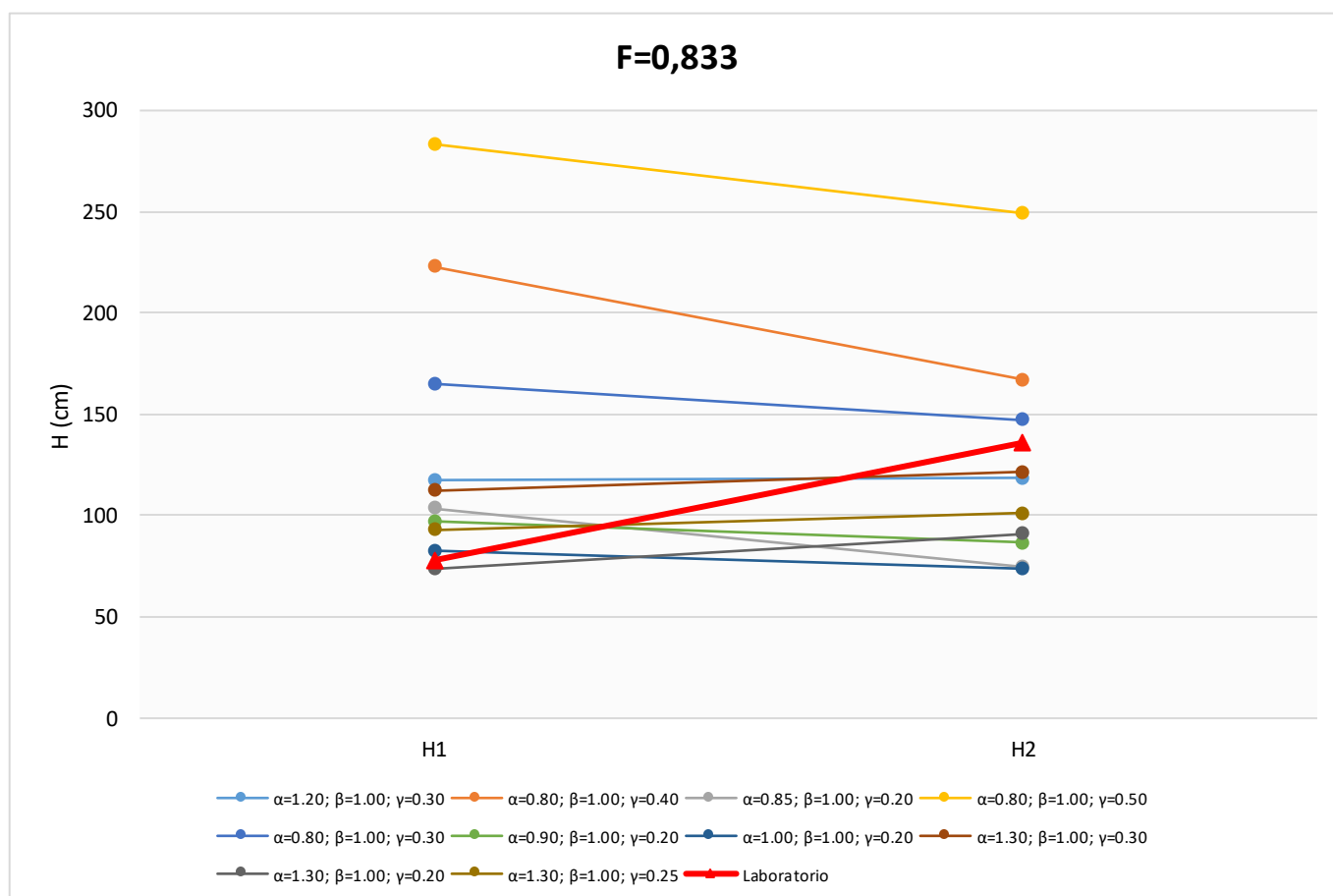


Gráfico 79 Caso calibración nº6 – Total ensayos F=0,833

alfa	1,200	0,800	0,850	0,800	0,800	0,900	1,000	1,300	1,300	1,300
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,300	0,400	0,200	0,500	0,300	0,200	0,200	0,300	0,200	0,250
H1	117,553	222,794	103,439	283,360	165,081	97,220	82,727	112,267	73,724	92,886
H2	118,698	167,241	74,714	249,287	147,114	86,849	73,812	121,669	90,906	101,358
e1 (mm)	39,553	144,794	25,439	205,360	87,081	19,220	4,727	34,267	-4,276	14,886
e2 (mm)	-17,302	31,241	-61,286	113,287	11,114	-49,151	-62,188	-14,331	-45,094	-34,642
error medio (mm)	28,427	88,018	43,362	159,323	49,097	34,186	33,458	24,299	24,685	24,764
e1 (%)	50,709	185,633	32,614	263,282	111,642	24,641	6,061	43,932	5,482	19,084
e2 (%)	12,722	22,972	45,063	83,299	8,172	36,141	45,726	10,538	33,157	25,472
error medio (%)	31,715	104,302	38,839	173,291	59,907	30,391	25,893	27,235	19,319	22,278

Tabla 93 Caso calibración nº6 – Total ensayos F=0,833

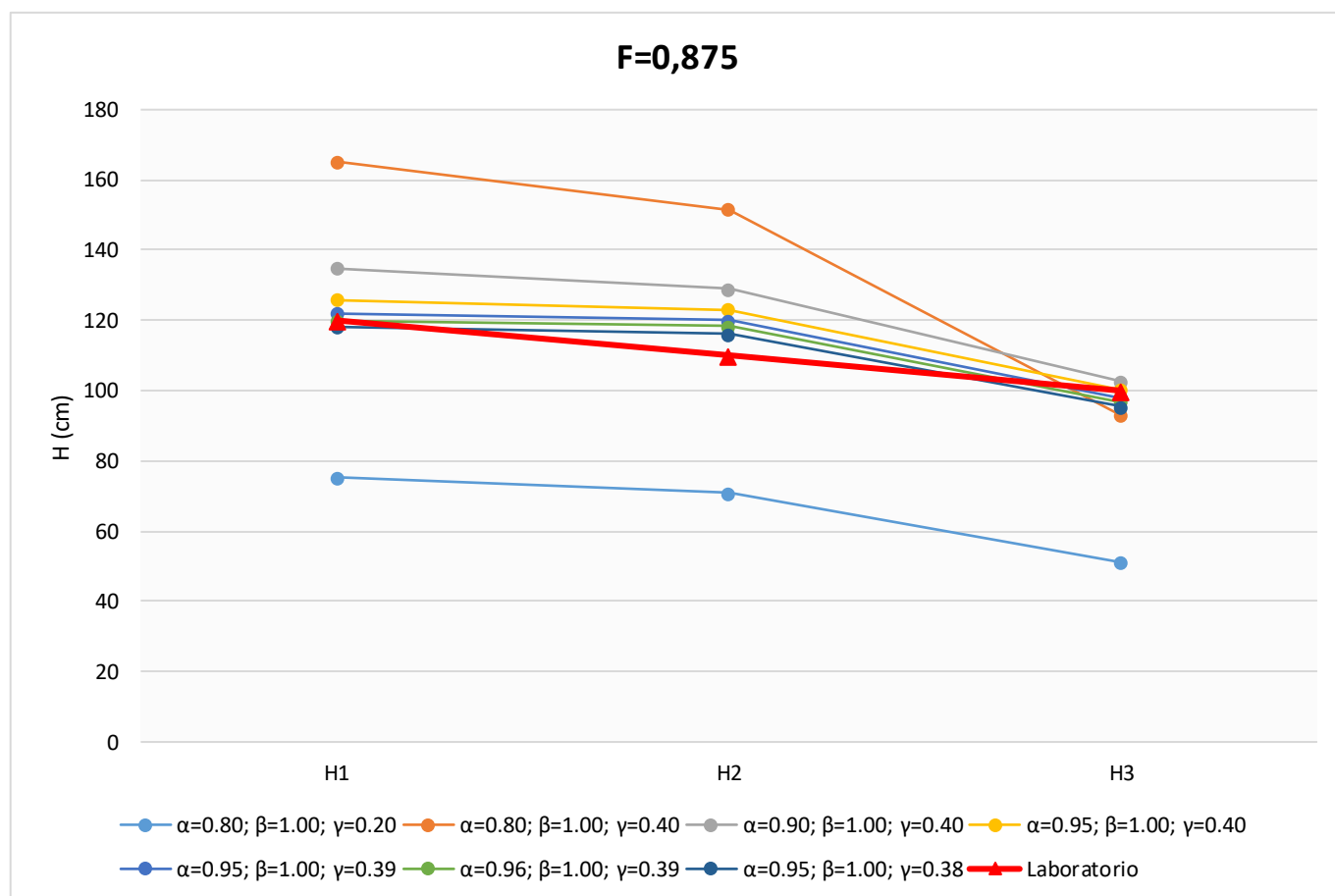


Gráfico 80 Caso calibración nº6 – Total ensayos F=0,875

alfa	0,800	0,800	0,900	0,950	0,950	0,960	0,950
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,200	0,400	0,400	0,400	0,390	0,390	0,380
H1	75,356	165,205	134,746	125,750	121,943	119,888	118,158
H2	70,956	151,590	128,813	123,095	119,895	118,351	116,142
H3	51,132	92,955	102,654	100,202	97,843	96,684	95,552
e1 (mm)	-44,644	45,205	14,746	5,750	1,943	-0,112	-1,842
e2 (mm)	-39,044	41,590	18,813	13,095	9,895	8,351	6,142
e3 (mm)	-48,868	-7,045	2,654	0,202	-2,157	-3,316	-4,448
error medio (mm)	44,185	31,280	12,071	6,349	4,665	3,926	4,144
e1 (%)	37,203	37,671	12,288	4,792	1,619	0,093	1,535
e2 (%)	35,495	37,809	17,103	11,905	8,995	7,592	5,584
e3 (%)	48,868	7,045	2,654	0,202	2,157	3,316	4,448
error medio (%)	40,522	27,508	10,682	5,633	4,257	3,667	3,856

Tabla 94 Caso calibración n°6 – Total ensayos $F=0,875$

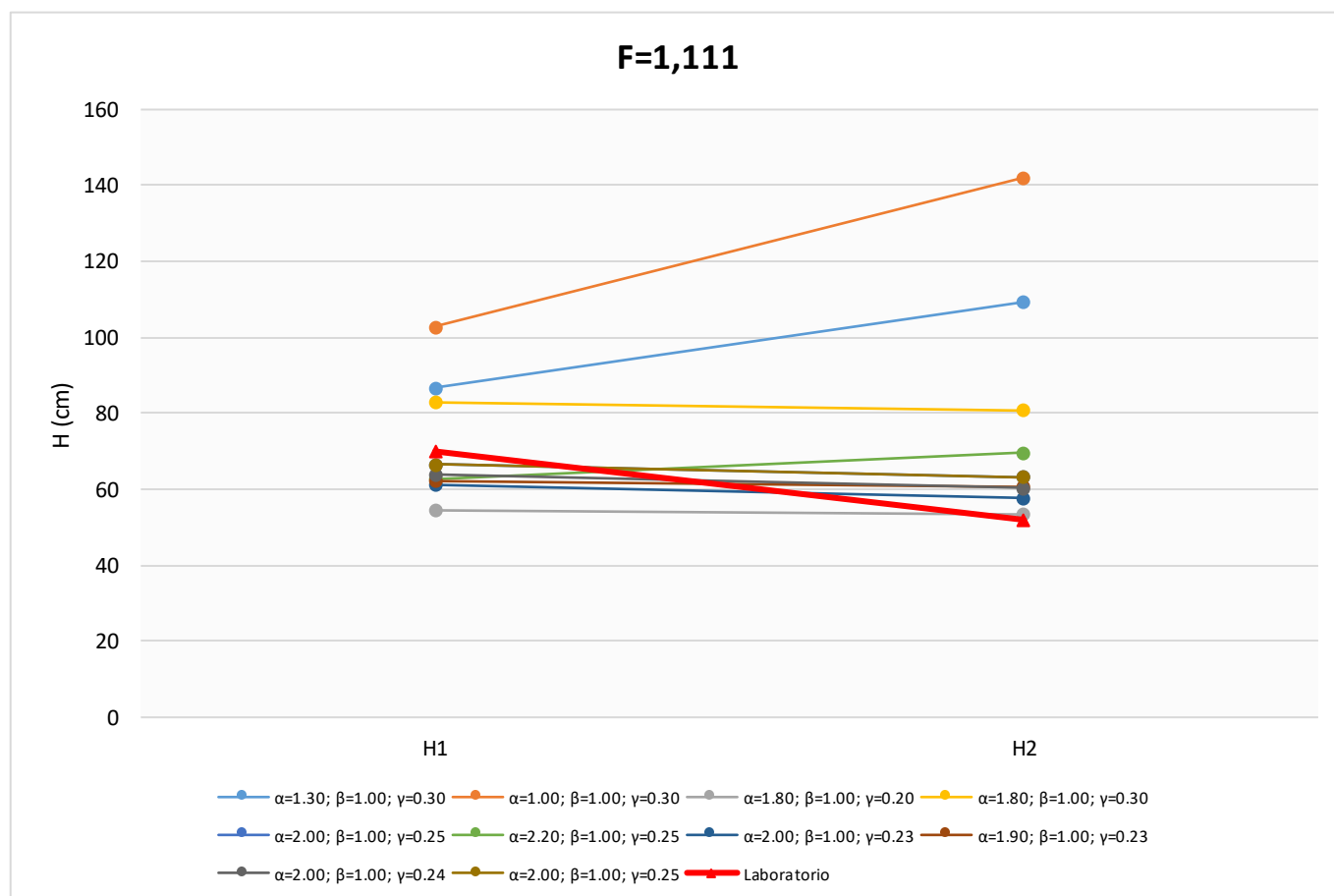


Gráfico 81 Caso calibración n°6 – Total ensayos $F=1,111$

alfa	1,300	1,000	1,800	1,800	2,000	2,200	2,000	1,900	2,000	2,000
beta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
gamma	0,300	0,300	0,200	0,300	0,250	0,250	0,230	0,230	0,240	0,250
H1	86,809	102,933	54,488	82,901	66,676	62,689	61,210	62,197	63,941	66,676
H2	109,337	142,102	53,409	80,745	63,152	69,724	57,750	60,644	60,441	63,152
e1 (mm)	16,809	32,933	-15,512	12,901	-3,324	-7,311	-8,790	-7,803	-6,059	-3,324
e2 (mm)	57,337	90,102	1,409	28,745	11,152	17,724	5,750	8,644	8,441	11,152
error medio (mm)	37,073	61,517	8,461	20,823	7,238	12,518	7,270	8,224	7,250	7,238
e1 (%)	24,012	47,047	22,160	18,430	4,748	10,444	12,558	11,148	8,656	4,748
e2 (%)	110,264	173,273	2,710	55,278	21,446	34,085	11,057	16,624	16,233	21,446
error medio (%)	67,138	110,160	12,435	36,854	13,097	22,264	11,807	13,886	12,444	13,097

Tabla 95 Caso calibración nº6 – Total ensayos F=1,111

Parametrización de los factores alpha, beta y gamma

Planteamiento

Una vez finalizada la calibración de los experimentos descritos en apartados anteriores, el objetivo que se persigue es poner en conjunto los resultados obtenidos para conseguir alcanzar una ley global, aplicable a cualquier embarcación, de forma que, conocidos una serie de parámetros, podamos obtener un valor de alpha, beta y gamma para introducir en el modelo numérico.

Los parámetros que necesitaremos conocer del barco del que queramos simular su generación de oleaje, son los siguientes:

- Características geométricas:
 - Eslora
 - Manga
 - Calado
- Batimetría del área de estudio
- Velocidad de movimiento de la embarcación

Combinando los datos anteriores podremos obtener también:

- Número de Froude dependiente de la profundidad
- Número de Froude dependiente de la eslora

En los siguientes apartados se muestra el proceso seguido para la obtención de una ley general para determinar los parámetros de calibración.

Factor alpha

Para la obtención de una ley general, lo primero que se hizo fue representar los valores de alpha calibrados en un gráfico, cuyo eje de ordenadas representaba el número de Froude dependiente de la profundidad y el eje de abscisas la relación entre la eslora y el calado. Se optó por esta relación buscando conseguir un valor adimensional, pudiendo introducir el correspondiente a cualquier embarcación.

En los resultados obtenidos el valor de alpha oscila entre 0,666 y 3,200, por ello, lo que se consideró fue dividir los valores en tres grupos, dicho de otro modo:

- Grupo 1: $0,000 < \alpha \leq 1,000$
- Grupo 2: $1,000 < \alpha \leq 2,000$
- Grupo 3: $2,000 < \alpha \leq 3,200$

Obtenemos lo siguiente:

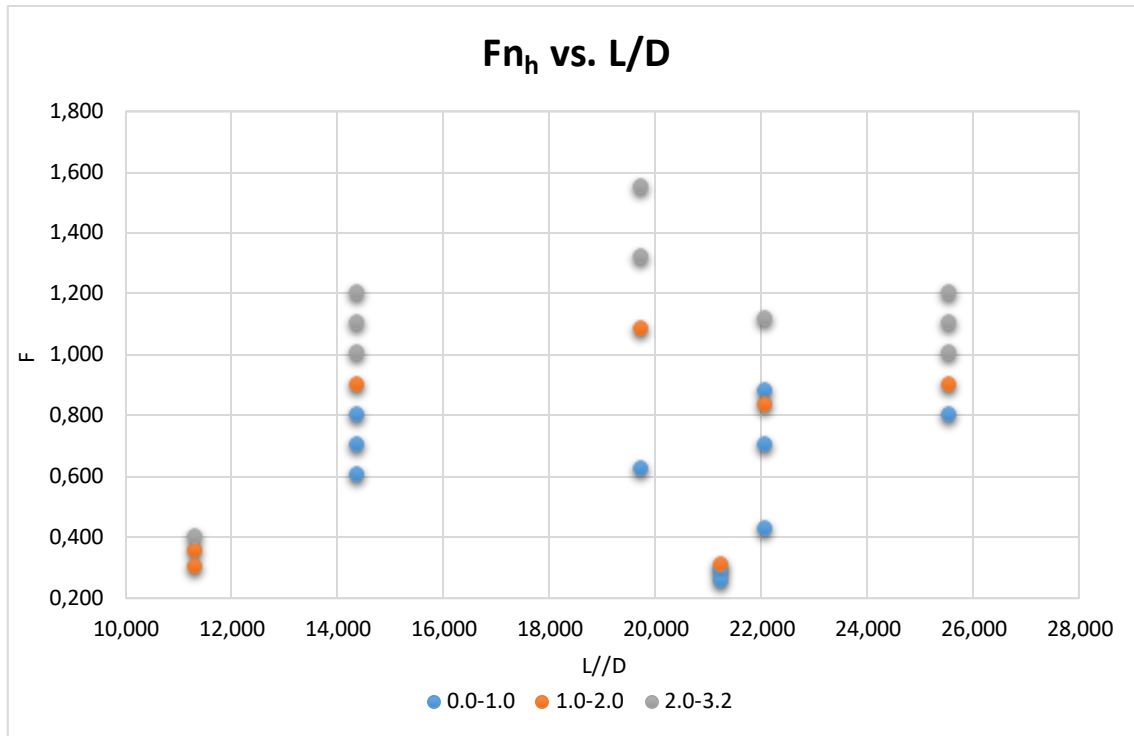


Gráfico 82 Parametrización de α , F_{n_h} vs. L/D

Vemos como los grupos adquieren una forma similar a la de una parábola.

No obstante, lo que realmente interesa es poder acceder al gráfico con unos parámetros y sacar un valor concreto de α . Para conseguir esto, obtenemos un nuevo gráfico, en él representamos en el eje de ordenadas el valor de coeficiente y en el eje de abscisas colocamos la siguiente relación:

$$\frac{L}{D}^{F_{n_h}}$$

Se ha elegido esta relación porque, por un lado es adimensional y, por otro, tiene en cuenta tanto las características geométricas del barco como la batimetría (o profundidad) del emplazamiento mediante la introducción del número de Froude basado en la profundidad.

No fue la única posibilidad que se planteó introducir, se probaron varias combinaciones, intentando cumplir con las dos cuestiones indicadas, siendo la mostrada aquella con la que se obtuvo un mejor ajuste.

El gráfico resultante es el siguiente:

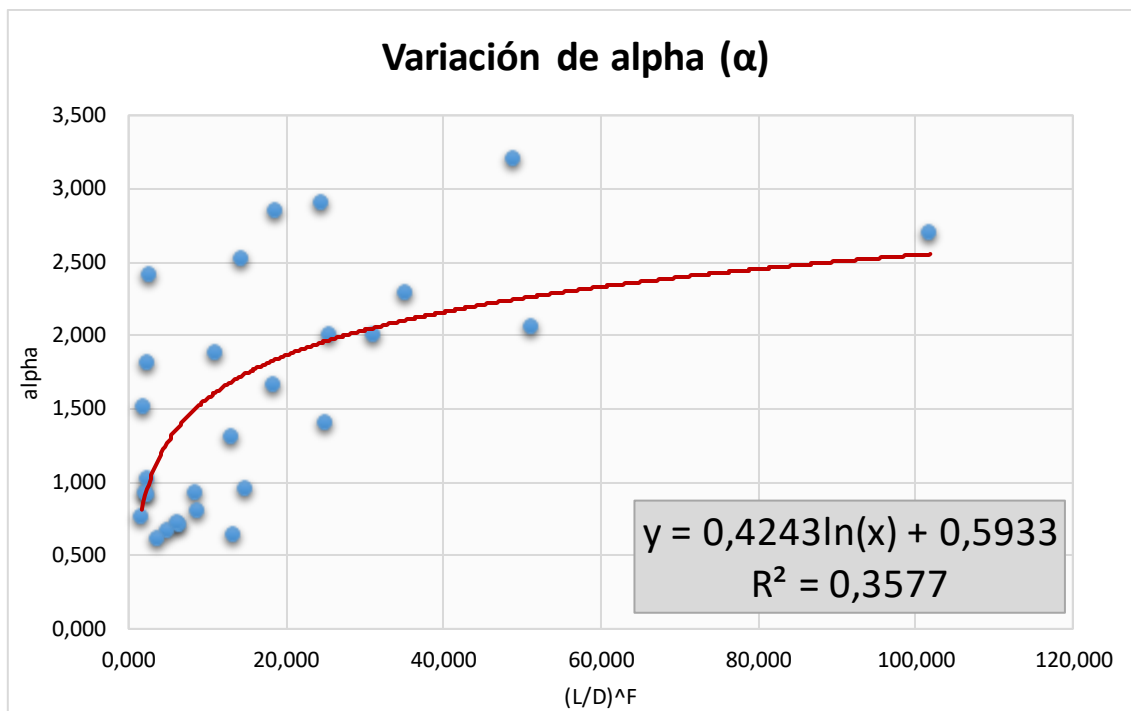


Gráfico 83 Parametrización de alpha, ajuste final

Los datos se han ajustado a una línea de tendencia logarítmica que sigue la siguiente expresión:

$$\alpha = 0,4243 \cdot \log \frac{L^{Fn_h}}{D} + 0,5933$$

La línea de tendencia se ajusta a un valor medio, el mínimo valor que adquiere alpha es de 0,813, mientras que el máximo valor que puede alcanzar es de 2,555.

Factor gamma

Para el coeficiente gamma, se repiten los pasos realizados con el alpha. Como primer gráfico se obtuvo uno que en su eje de ordenadas tiene el número de Froude en función de la profundidad y en el eje de abscisas tiene la relación entre la eslora y el calado.

El factor gamma varía entre 0,170 y 2,750, se establecen los siguientes grupos:

- Grupo 1: $0,000 < \gamma \leq 1,000$
- Grupo 2: $0,800 < \gamma \leq 2,000$
- Grupo 3: $2,000 < \gamma \leq 2,800$

Obtenemos lo siguiente:

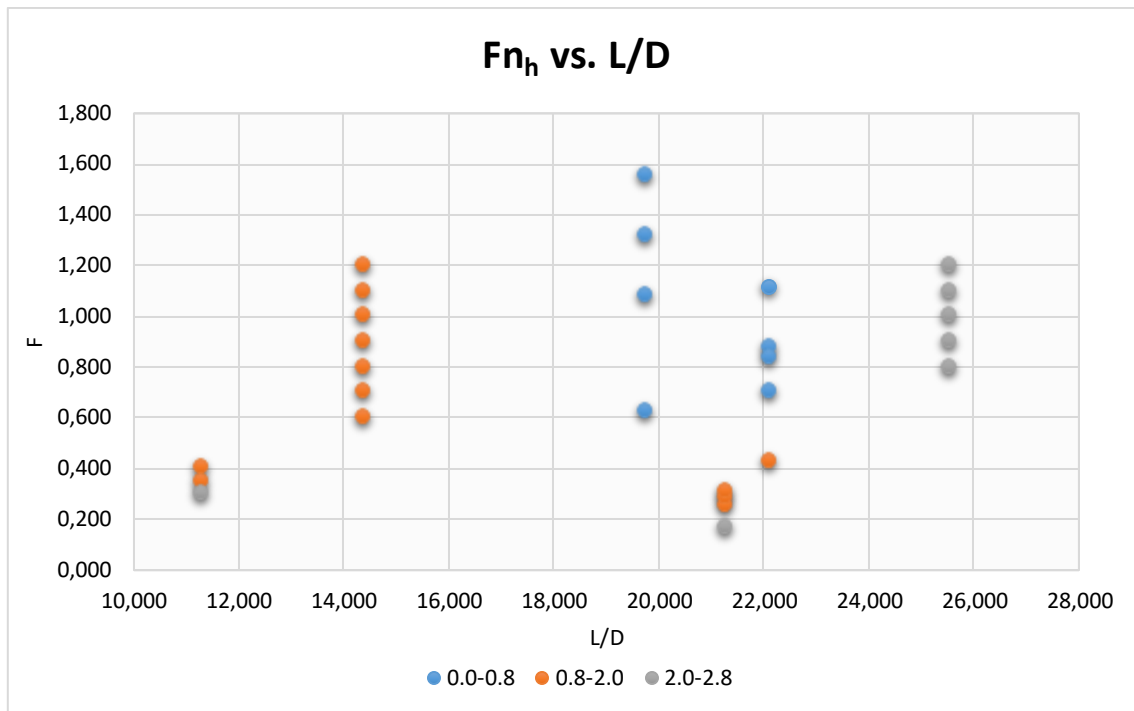


Gráfico 84 parametrización de gamma, Fn_h vs. L/D

No se obtiene ningún ajuste aparente como ocurría en el caso del coeficiente alpha.

El siguiente paso es obtener un nuevo gráfico, si lo representamos con los mismos ejes para los cuales se obtuvo el ajuste final en el caso del coeficiente alpha, es decir, factor gamma vs. $(L/D)^F$, obtenemos lo siguiente:

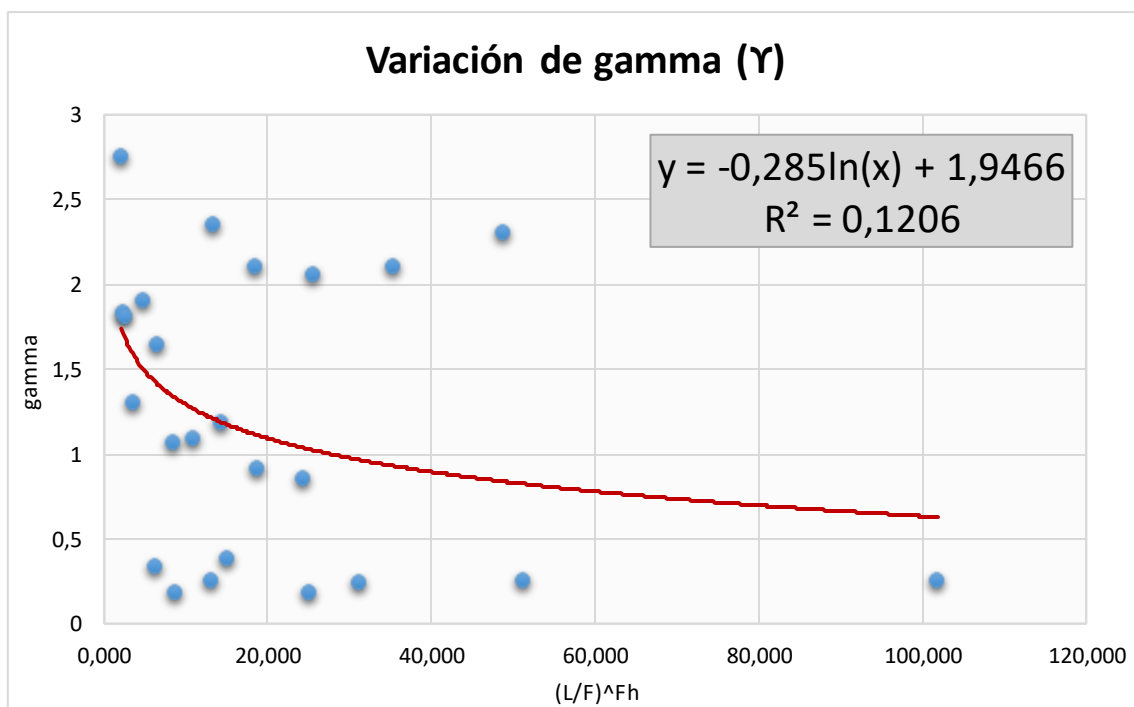


Gráfico 85 Parametrización de gamma, ajuste 1

A continuación buscamos un mejor ajuste al que hemos obtenido. Finalmente, tras comprobar varias combinaciones posibles, llegamos a que el mejor ajuste se obtiene colocando en el eje de ordenadas el valor del coeficiente gamma γ , en el eje de abscisas, el número de Froude dependiente de la eslora.

El gráfico resultante es el siguiente:

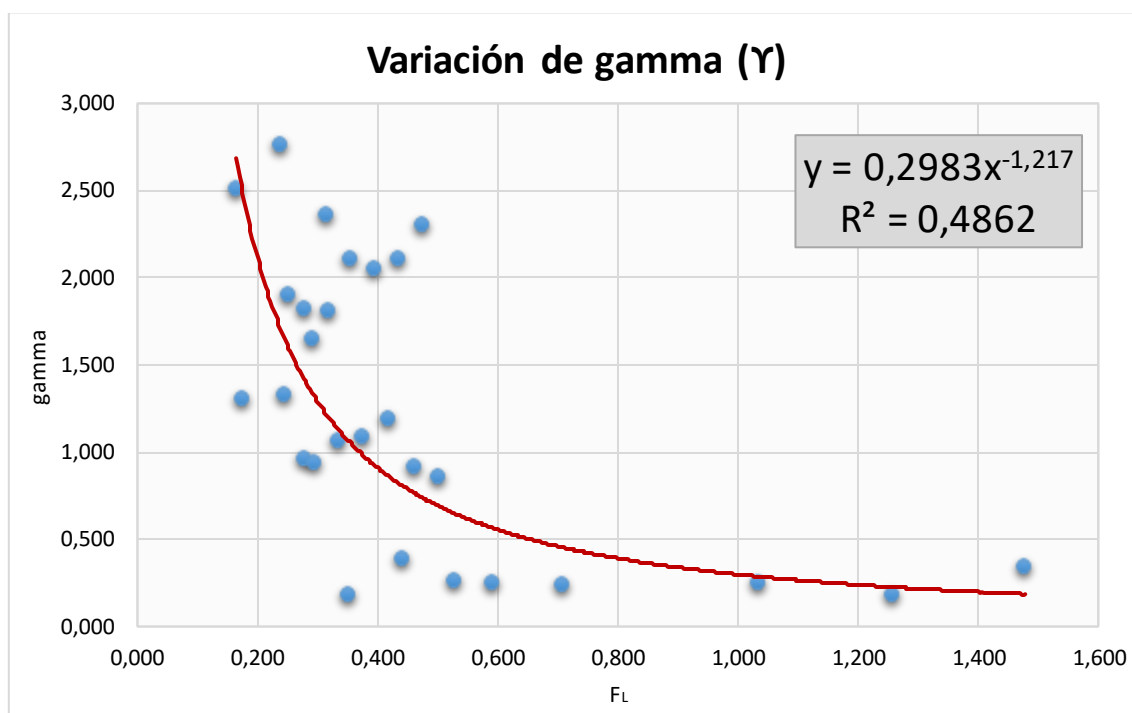


Gráfico 86 Parametrización de gamma, ajuste final

La línea de ajuste sigue una ley potencial con la siguiente expresión:

$$\gamma = 0,2983 \cdot Fn_L^{-1,217}$$

La línea de tendencia se ajusta a un valor medio, el mínimo valor que adquiere gamma es de 0,185, mientras que el máximo valor que puede alcanzar es de 2,688.

Conclusiones

Tras el proceso de validación y la parametrización de los coeficientes α , β y γ , se extraen las siguientes conclusiones:

- El coeficiente α tiene una tendencia siempre creciente, es decir, para una profundidad dada, a medida que se aumenta la velocidad, aumenta el tamaño de la eslora corregida de la embarcación.
- El coeficiente γ tiene una tendencia siempre decreciente, es decir, para una profundidad dada, a medida que se aumenta la velocidad disminuye el calado corregido de la embarcación.
- La variación del coeficiente α es dependiente de las características del barco, de la velocidad y de la profundidad, relacionadas estas últimas mediante el número de Froude dependiente de la profundidad.
- La variación del coeficiente γ es fuertemente dependiente del número de Froude basado en la eslora, o lo que es lo mismo, de la velocidad y de la eslora del barco.
- Durante la validación se observó la obtención de resultados más limpios para número de Froude dependiente de la profundidad superior a 0,60.

Como se vio anteriormente, por debajo de 0,60 nos encontramos en régimen subcrítico, o lo que es lo mismo, en aguas profundas. En este régimen, el patrón de oleaje sigue el expuesto por Kelvin en 1887.

4. Post-proceso de la base de datos AIS

Introducción

El estudio del oleaje generado por las embarcaciones a su paso por la Bahía de Algeciras se antoja como un aspecto de gran importancia de cara a valorar la operatividad de los puertos que en ella se ubican. Será necesario conocer, por tanto, el oleaje que un determinado tipo de barco va a generar a su entrada, en función de sus características geométricas y de su velocidad.

Como consecuencia del elevado volumen de tráfico marítimo que soporta este emplazamiento, será necesario elegir un número limitado de embarcaciones representativas del total recogido en la base de datos AIS (*Automatic Identification System*), asumiendo que, los resultados obtenidos de su posterior simulación, son extrapolables al resto de barcos disponibles.

En relación con lo anterior, el presente apartado tiene como objeto describir la metodología diseñada para la selección de los casos de simulación que, posteriormente, se introducirán en un modelo numérico tipo Boussinesq.

En los siguientes apartados se describe el procedimiento empleado para la división de la Bahía en zonas y para la selección de los casos de simulación, los resultados y, finalmente, programas o *scripts* diseñados, describiendo el objetivo de su creación, los datos de los que parten, las bases de su funcionamiento y los resultados obtenidos de los mismos.

Objetivos

Los objetivos que se persiguen se pueden resumir en los siguientes:

- Análisis del oleaje generado por las embarcaciones que entran en la Bahía de Algeciras, de forma que se pueda prevenir su magnitud en función de las características (velocidad y geometría) de un barco concreto.
- Tratamiento de la información contenida en el base de datos AIS, con ello se persigue la selección de un número limitado de casos a simular del total de embarcaciones que entran en la zona de estudio.
- Extracción de la información necesaria a introducir en el modelo numérico en cada caso de simulación.

Descripción de la metodología

Introducción

Descripción de la base de datos AIS

El sistema AIS es un sistema de difusión para buques que funciona en la banda marítima de VHF. La clase A sintoniza toda la banda entre 156,036 y 162,025 Mhz, mientras que la clase B sintoniza entre 161,5 y 162,025 Mhz.

El AIS fue aprobado por la OMI (Organización Marítima internacional) en 2002, con un calendario de implementación según las características del buque, comenzando el 31 de diciembre de 2004. El AIS es obligatorio para los buques sometidos al Convenio SOLAS con las siguientes características:

- Buques de un arqueado bruto igual o superior a 500 toneladas.
- Buques en viaje internacional con arqueado bruto superior a 300 toneladas.
- Todos los buques de pasaje, independientemente de su tamaño.

El sistema AIS permite ver en una pantalla la posición de los barcos próximos y obtener una amplia información sobre ellos, como su nombre, velocidad, rumbo, MMSI, estado actual de navegación, etc.

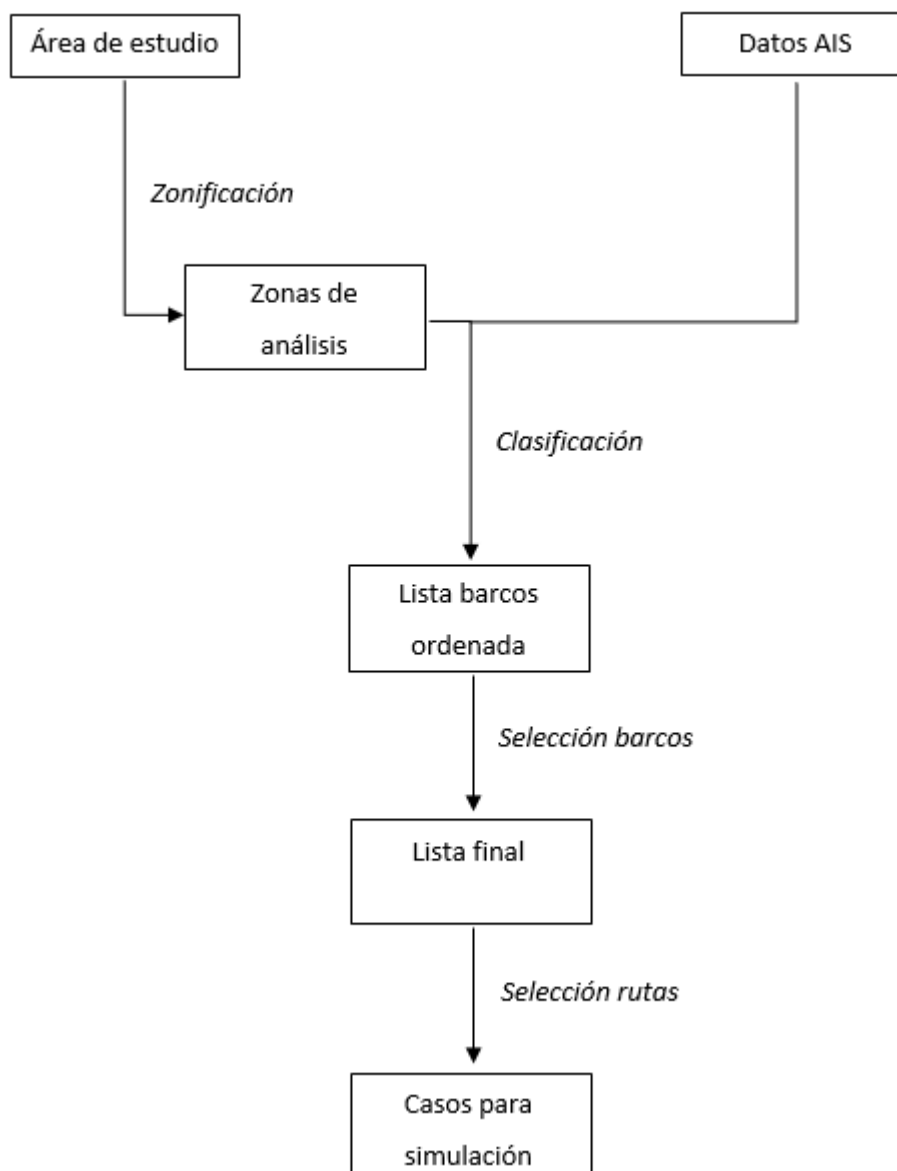
Esquema general de la metodología

A continuación se describe la metodología utilizada para la selección de los casos simulados. Podemos dividir el proceso en los siguientes pasos:

- *Zonificación*: División del área de estudio en zonas más pequeñas sobre las que poder realizar un análisis más detallado.
- *Clasificación*: Ordenación del conjunto de embarcaciones de acuerdo a diferentes criterios, partiendo de los datos AIS y de las zonas obtenidas.
- *Selección de barcos*: Selección de un número reducido de embarcaciones partiendo de la clasificación obtenida en el apartado anterior. Una o varias de las rutas de cada uno de estos barcos serán simuladas.
- *Selección de rutas*: Identificación de aquella/s rutas más significativas de los buques seleccionados.

El resultado de este último apartado serán los ficheros con la información necesaria para la simulación.

Se muestra a continuación un esquema general de la metodología de selección:



Esquema 3 Esquema general de la metodología de selección

Datos de partida

Para el desarrollo de la metodología, partimos de los datos AIS de cada una de las embarcaciones que accedieron a la Bahía de Algeciras durante los años 2014 y 2015. La base de datos AIS debe ser disgregada en distintos ficheros que contengan toda la información de cada embarcación individual, de esta forma se optimiza la lectura de la información para posteriores análisis, y se logra organizar los miles de registros espacio-temporales de esos años.

Disponemos, por tanto, de un fichero MAT (formato estructura) para cada barco, contando cada uno de esos archivos con la siguiente información:

- Nombre de la embarcación.
- Tipo de embarcación de acuerdo a la clasificación AIS.



- ID de la embarcación.
- Vector de posición definido a través de longitud y latitud en coordenadas geométricas. La dimensión del vector latitud y del vector longitud, será la correspondiente al número de eventos registrados para ese barco.
- Eslora del barco (en metros)
- Manga del barco (en metros)
- Calado (en metros)
- Vector de fecha juliana. La longitud del vector de fechas deberá coincidir necesariamente con el tamaño de los vectores longitud y latitud.
- IMO
- MMSI

Zonificación

El área de estudio será la Bahía de Algeciras, la cual, para poder realizar el análisis de forma detallada, la dividimos en siete zonas. El criterio para fijar las zonas parte de la hipótesis de que la máxima distancia de influencia del oleaje generado por el paso de embarcaciones es de dos kilómetros.

De acuerdo al criterio establecido, los pasos a seguir para delimitar las diferentes zonas son los siguientes:

1. Fijar los centroides o centros de referencia de cada zona. Serán ubicados en un punto representativo de uso del puerto.
2. Delimitar un área circular con centro el centroide y radio dos kilómetros.
3. Determinar la intersección entre zonas y entre zonas y la costa.
4. Eliminar las partes de solapamiento y definir las zonas definitivas.

Una vez obtenidas las zonas que utilizaremos para el posterior análisis, exportamos las coordenadas de cada contorno y la posición del centroide a un archivo: "Zona1.txt", "Zona2.txt"... "Zona7.txt" y "centroides.txt".

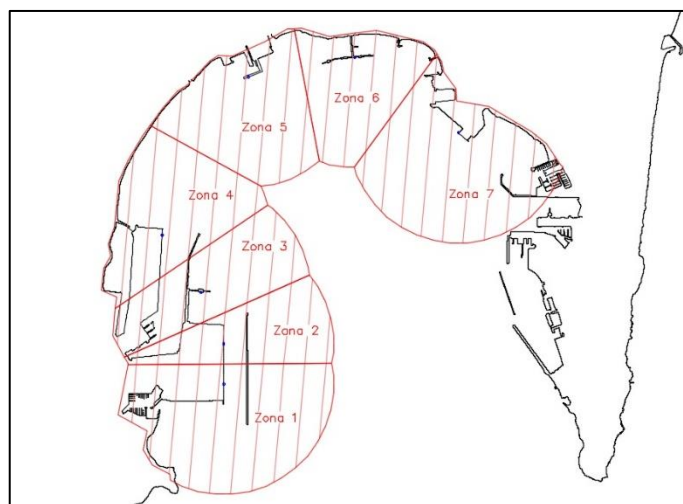
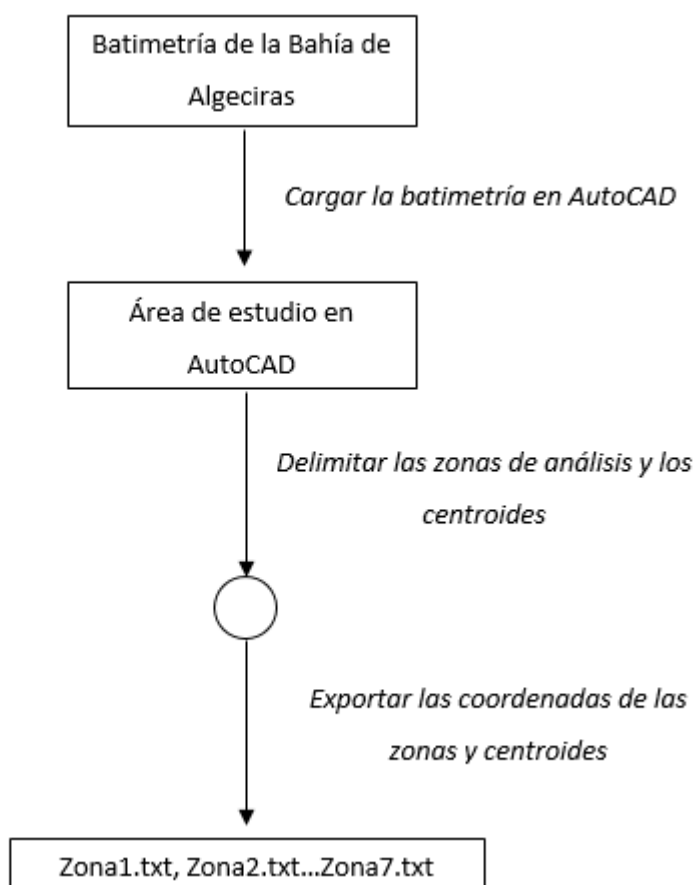


Figura 99 Zonificación del área de estudio

Se muestra a continuación un esquema que resume este apartado:



Esquema 4 Proceso de Zonificación

Clasificación de barcos

La clasificación de las embarcaciones hace necesaria la realización de tres tipos de análisis dentro de este apartado:

- *Análisis global*: Estudio de los barcos que entran en cada una de las zonas.
- *Análisis espacial*: Estudio del número de veces que un barco entra en cada zona y el número de eventos registrados en ella.
- *Análisis de las características de las embarcaciones*: Estudio de la eslora y el calado de cada embarcación para cada una de las zonas.

Análisis global

A partir de los ficheros MATs de todos los barcos (*xxx.mat*) se estudia el número de ellos que entran en cada zona.

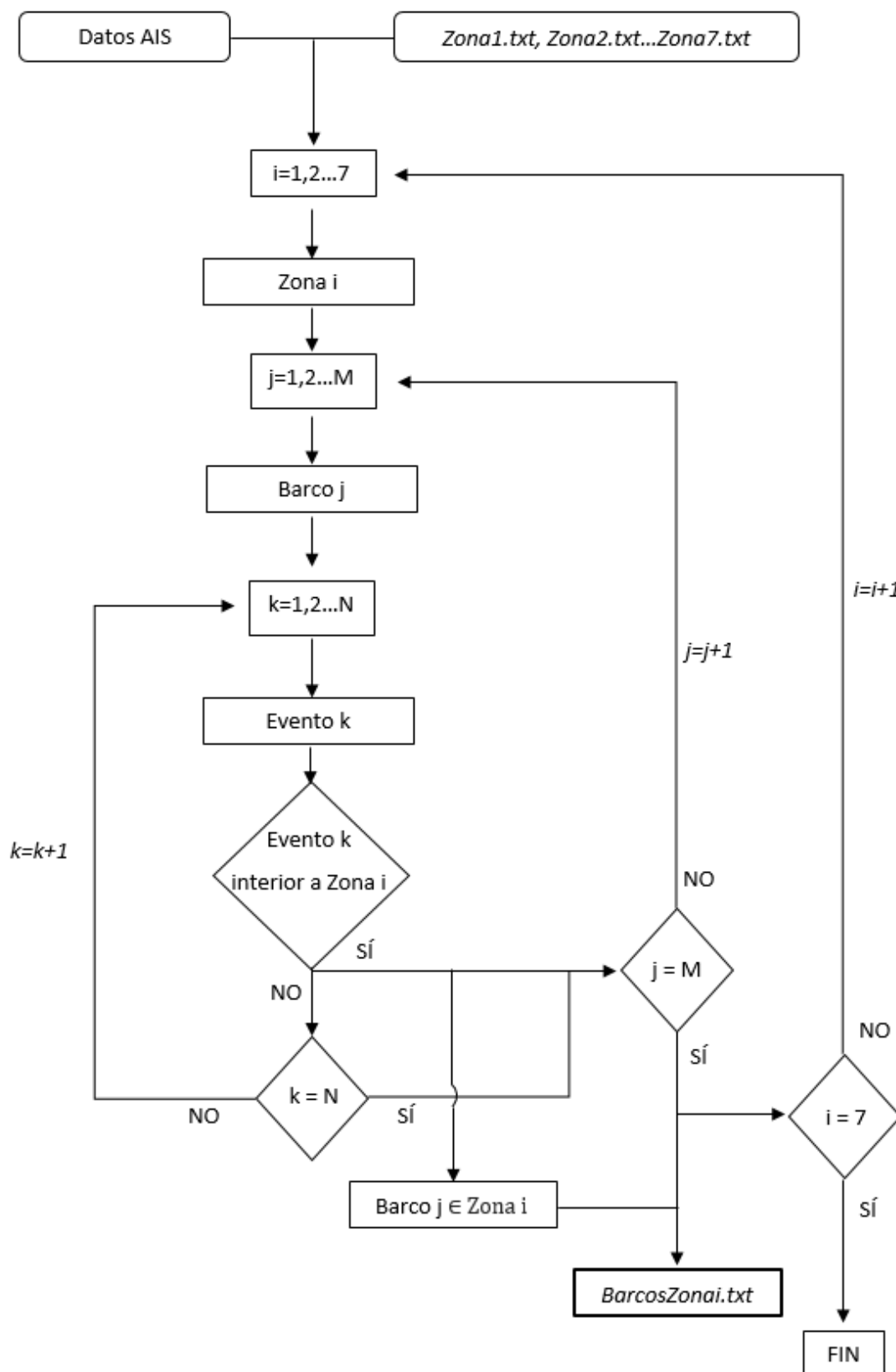
El procedimiento se basa en comprobar si, al menos uno de los eventos registrados en cada barco, se encuentra dentro del contorno que define cada una de las siete áreas de estudio obtenidas en el apartado anterior.

Dado que las coordenadas de los contornos y de los centroides exportadas desde AutoCAD se encuentran en UTM, lo primero que debemos hacer será transformar esos datos a coordenadas geográficas, con este propósito emplearemos los *scripts* “*CargarZonas.m*” y “*CargarCentroides.m*”.

La obtención del listado de barcos que entran en cada zona de estudio se lleva a cabo a través del *script* “*NbarcosZona.m*”. Así pues, el proceso seguido en dicho programa es el que se describe a continuación:

- Cargamos los archivos “*ZonaX.txt*” a través del *script* “*CargarZonas.m*”.
- De forma iterativa, se comprueba si cada una de las posiciones (Lat, Lon) registradas en los datos AIS de cada barco es interior o exterior a alguna de las zonas definidas.
- Creación una lista para cada zona con el nombre de los barcos que al menos tienen un evento en su interior.

Como se ha indicado, el resultado de este análisis es una lista para cada zona (*BarcosZonaX.txt*), imprescindible para poder realizar los análisis posteriores.



Esquema 5 Diagrama de flujo de NbarcosZona.m



Análisis espacial

A partir de los archivos *“BarcosZonaX.txt”* generados en el análisis global, se realiza un doble estudio:

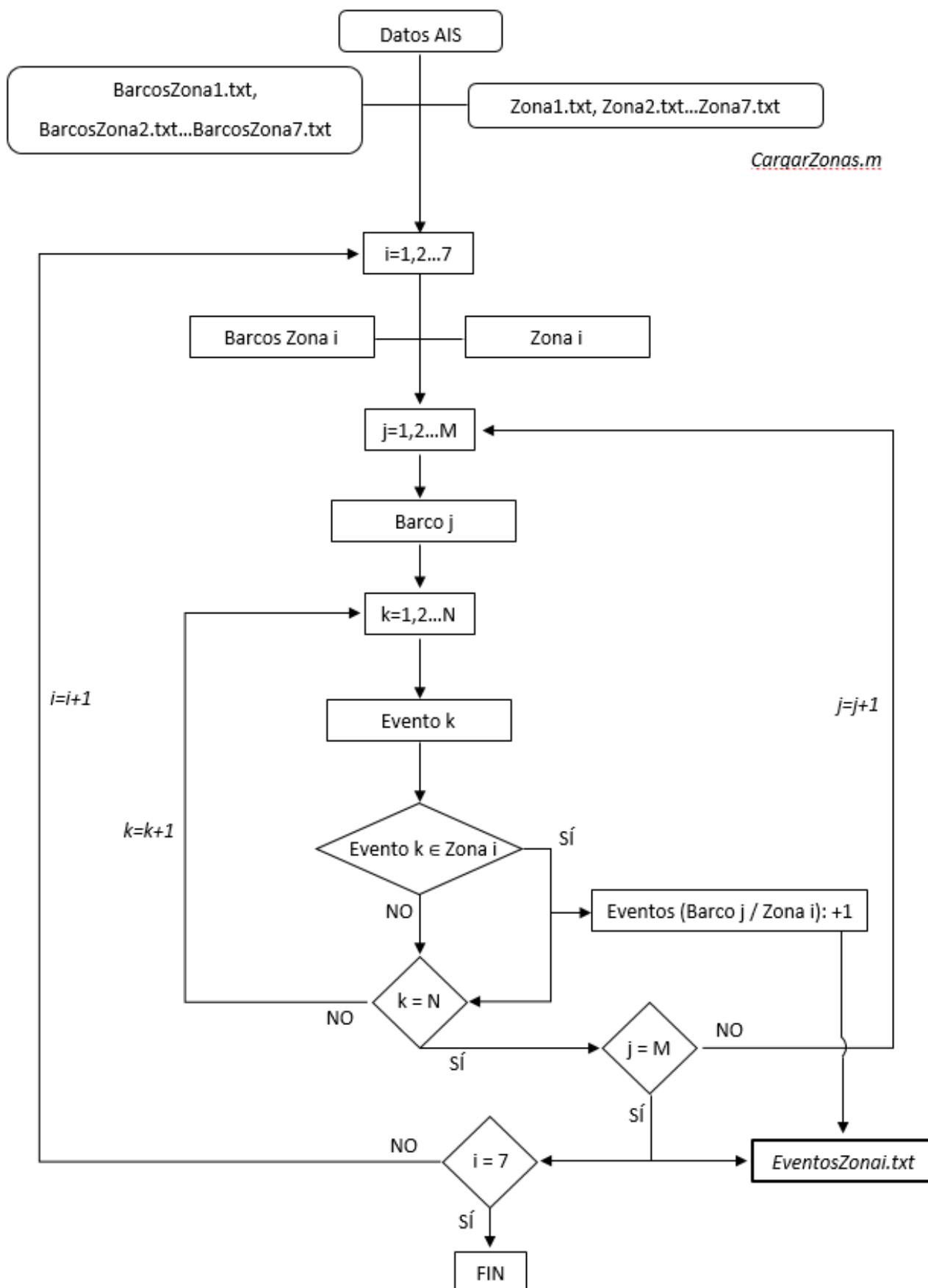
- Número de eventos registrados en cada zona.
- Número de entradas de las embarcaciones a la Bahía y a la zona en cuestión.

Número de eventos

En cada zona y de forma iterativa se calculará el número de eventos (Lat, Lon) de cada barco registrados en su interior. El *script* diseñado para realizar esta tarea será *“Eventos.m”* y su desarrollo sigue los siguientes pasos:

- Cargamos los archivos *“BarcosZonaX.txt”* y *“ZonaX.txt.”* a través del programa *“CargarZonas.m”*.
- De forma iterativa se comprueba si cada una de las posiciones (Lat, Lon) registradas en los datos AIS de cada barco es interior o exterior.
- Obtención para cada barco del número de eventos de su registro que corresponden a un punto interior a la zona que se esté analizando.
- Clasificación de los barcos en función del número de eventos (de mayor a menor).
- Cambio de zona y vuelta al punto inicial.

El resultado final de este apartado es un archivo *“EventosZonaX.txt”* para cada zona, donde aparece el nombre de los barcos ordenados por el número de eventos. A continuación se representa el diagrama de flujo del programa *“Eventos.m”*:



Esquema 6 Diagrama de flujo de Eventos.m

Número de entradas

Este análisis se lleva a cabo mediante el script "*CuentaRutas.m*". En él, se determina el número de veces que cada barco entra en la Bahía y cuántas de esas veces entra también en el área en cuestión.

Así pues, el esquema que sigue el programa es el siguiente:

- Cargamos los archivos "*BarcosZonaX.txt*" y "*ZonaX.txt*" a través del programa "*CargarZonas.m*".
- Fijamos unos límites en latitud y longitud para la Bahía de Algeciras (ver *Figura 100*). Los límites establecidos (en coordenadas geográficas) han sido $36,075^\circ$ en latitud y $-5,34^\circ$ en longitud.

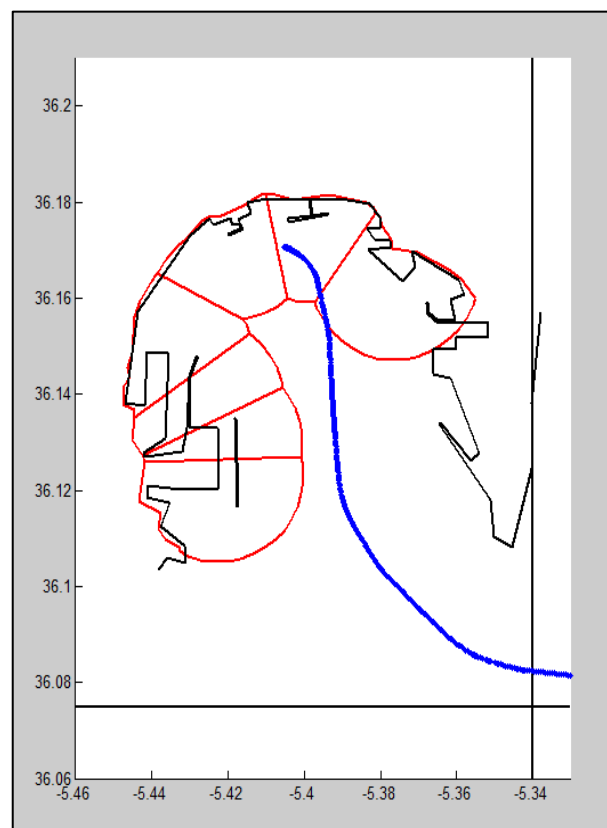


Figura 100 Límites de la Bahía a considerar

- Registramos el número de veces que esos límites son atravesados por cada barco hacia el interior y hacia el exterior de la Bahía, obteniendo el total de entradas y salidas de la misma.

Para poder concluir que un barco a atravesado uno de esos límites, el criterio considerado ha sido que el evento genérico n se encuentre a uno de los lados y que los siguientes tres eventos se encuentren al otro lado. Con esto conseguimos asegurar el correcto funcionamiento del programa, evitando registrar un número excesivo de

entradas en aquellos casos en los que, por posibles errores en la localización, se produzca una alternancia de lado entre cuatro eventos consecutivos, por ejemplo, evento n al sur del límite, evento $n+1$ al norte del límite, evento $n+2$ al sur del límite y, finalmente, los eventos $n+3, n+4$ etc al norte. Solo existe una entrada de la embarcación en la Bahía, pero en caso de no considerar lo mencionado, hubiésemos registrado dos entradas.

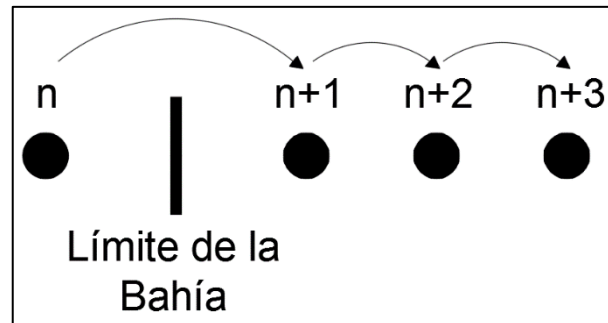
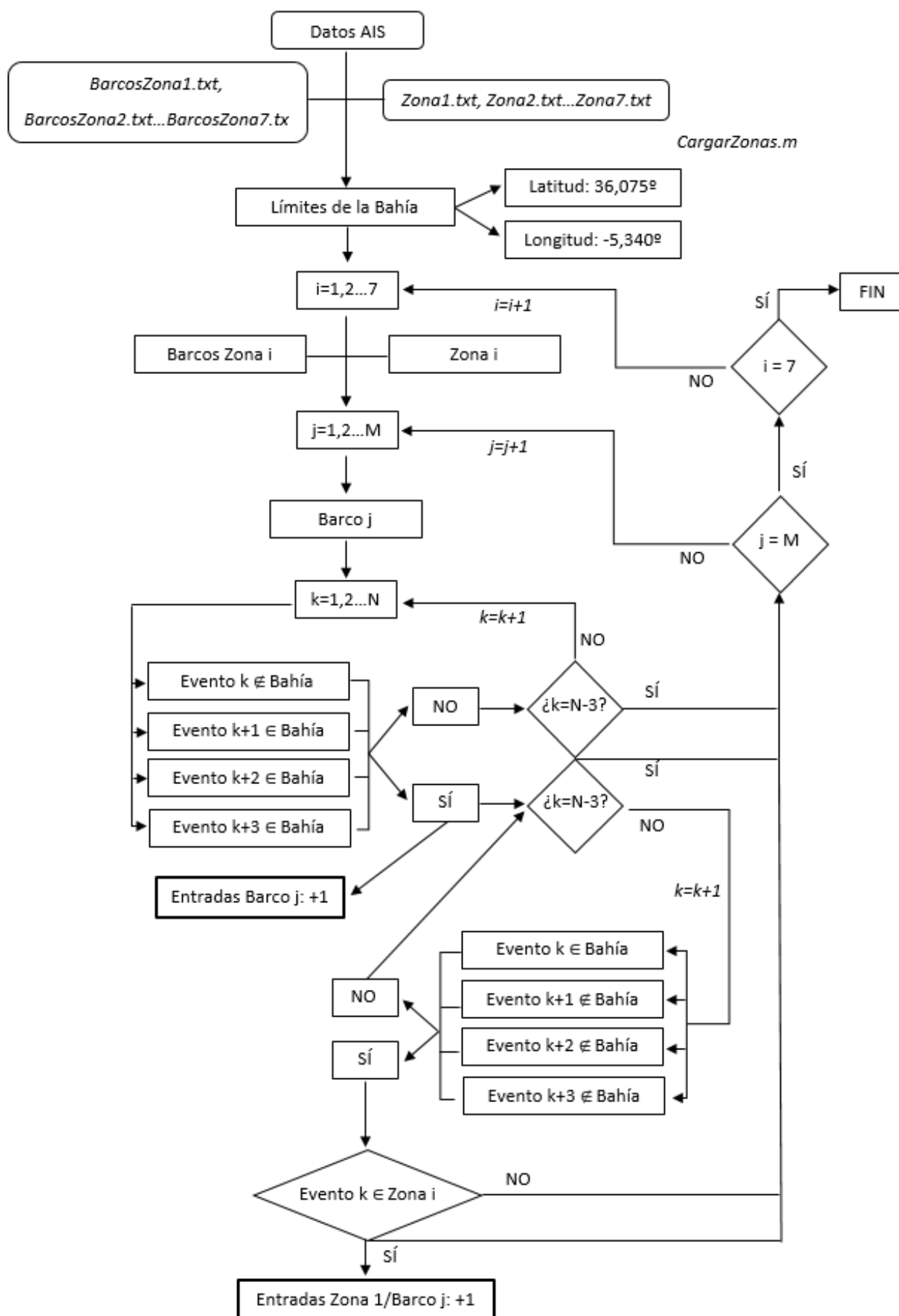


Figura 101 Entrada a la Bahía

- Para cada entrada en la Bahía registramos si, durante ella, el barco se introduce también en la zona que estamos estudiando según el procedimiento explicado en el *Análisis global*.
- Cambio de zona y repetición del proceso.

Finalmente obtenemos un archivo "*EntradasZonaX.txt*" para cada zona, con los barcos ordenados en función del número de entradas.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo que sigue el script "*CuentaRutas.m*":



Análisis de las características de las embarcaciones

A partir de los archivos "*BarcosZonaX.txt*" se realiza una clasificación de las embarcaciones siguiendo dos criterios:

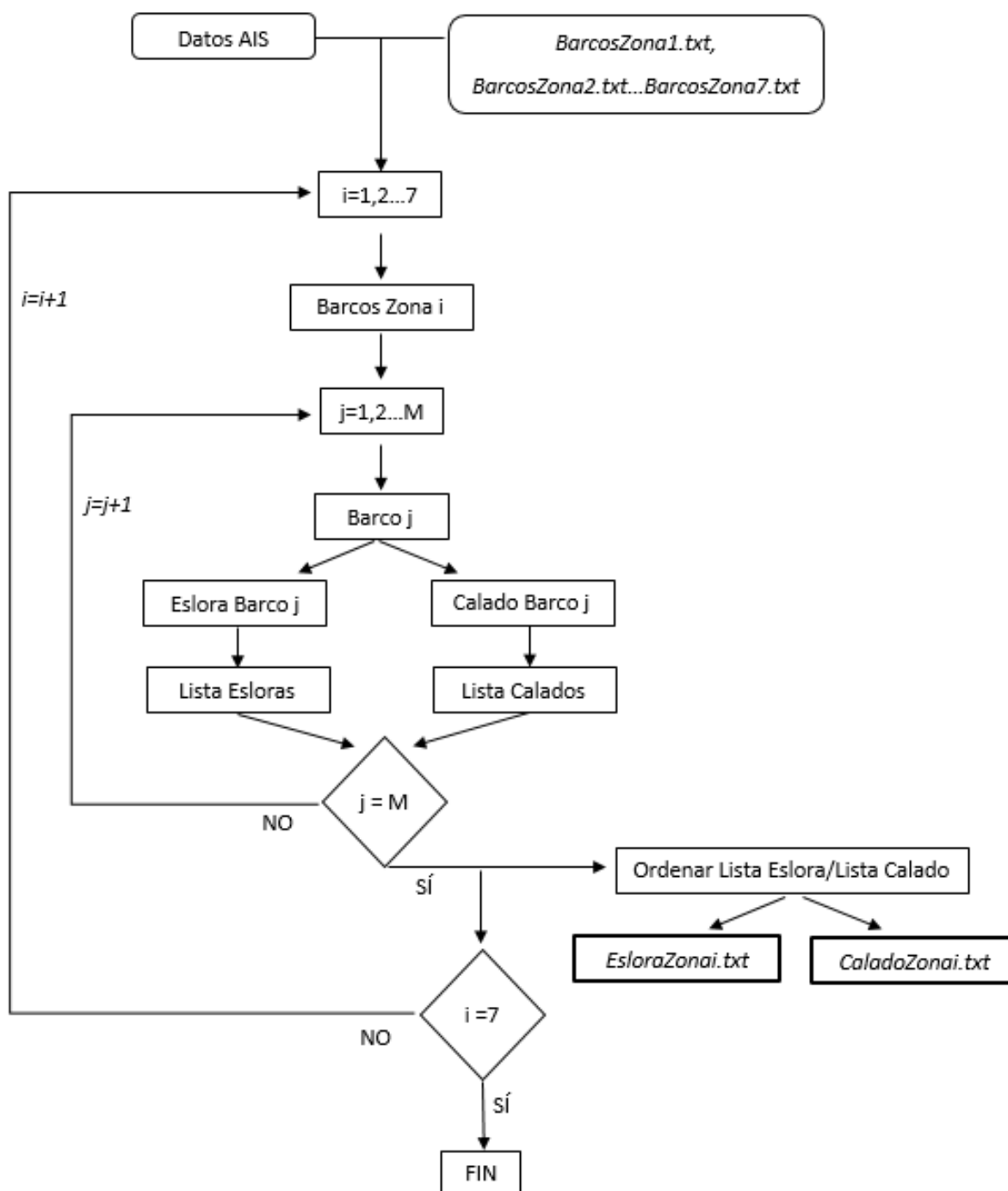
- Por su eslora
- Por su calado

Para realizar esta tarea se emplearán dos *scripts*, uno para cada una de las características. Así pues, estos programas serán "*Eslora.m*" y "*Calado.m*".

El procedimiento será común a los dos *scripts*, variando únicamente la característica a la que acceden de todos los datos AIS proporcionados:

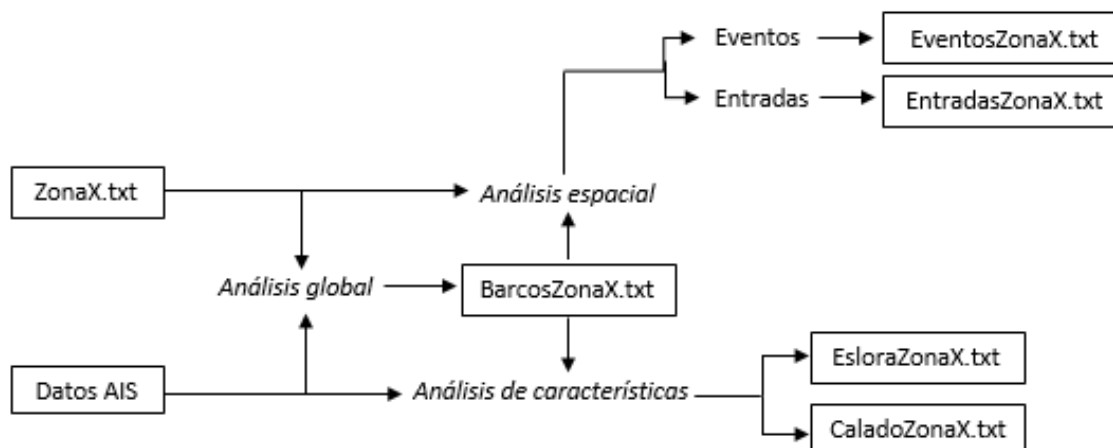
- Cargamos el archivo "*BarcosZonaX.txt*".
- Para cada barco de la zona correspondiente, accedemos a sus datos AIS de eslora y calado.
- Guardamos una lista con todas las esloras y todos los calados de los barcos de cada zona.
- Ordenamos esa lista de mayor a menor.
- Extraemos los resultados en dos archivos, uno correspondiente a cada característica: "*EsloraZonaX.txt*" y "*CaladoZonaX.txt*".
- Cambio de zona.

Finalmente, para cada una de las áreas de estudio se obtendrán dos archivos: "*EsloraZonaX.txt*" y "*CaladoZonaX.txt*" donde quedarán clasificadas todas las embarcaciones (de mayor a menor para ambos criterios).



Esquema 8 Análisis de las características de las embarcaciones

A continuación se muestra un esquema global de la Clasificación de barcos donde se recogen los principales archivos extraídos en sus diferentes subapartados:



Esquema 9 Clasificación de barcos

Selección de barcos

El objetivo de este apartado es la obtención de una lista con 63 barcos, de los cuales tres serán remolcadores. Partimos de los datos obtenidos en la “clasificación de barcos” y, aplicando pesos de acuerdo a la importancia de cada criterio de clasificación, obtendremos la lista buscada.

Los pasos a seguir se describen a continuación:

- Para cada clasificación obtenida (eventos, entradas, eslora y calado) y para cada zona, realizaremos un ranking de diez barcos.
- De los resultados obtenidos descartamos el ranking según calado porque su influencia en la generación de oleaje se considera menor que la de los otros tres.
- Tenemos por tanto 30 barcos para cada zona, los reunimos en un mismo archivo “*ranking.txt*” prestando atención a que puede haber barcos comunes entre ellas.
- Partimos del archivo “*ranking.txt*” aplicando los siguientes criterios para su clasificación:

Nº Eventos	Peso
Eventos < 100	0
100 ≤ Eventos < 1000	1
1000 ≤ Eventos < 5000	2
5000 ≤ Eventos < 20000	3
20000 ≤ Eventos < 50000	4
50000 ≤ Eventos < 150000	5
Eventos ≥ 150000	6

Tabla 96 Pesos en función del número de eventos

Nº Entradas Zona	Peso
Entradas < 50	0
50 ≤ Entradas < 100	1
100 ≤ Entradas < 200	2

$200 \leq \text{Entradas} < 300$	3
$300 \leq \text{Entradas} < 400$	4
$400 \leq \text{Entradas} < 500$	5
$500 \leq \text{Entradas} < 600$	6
$600 \leq \text{Entradas} < 700$	7
$700 \leq \text{Entradas} < 800$	8
$800 \leq \text{Entradas} < 900$	9
$\text{Entradas} \geq 900$	10

Tabla 97 Pesos en función del número de entradas en la Zona correspondiente

Eslora	Peso
$\text{Eslora} < 100$	1
$100 \leq \text{Eslora} < 200$	2
$200 \leq \text{Eslora} < 300$	3
$300 \leq \text{Eslora} < 400$	4
$400 \leq \text{Eslora} < 500$	5
$\text{Eslora} \geq 500$	6

Tabla 98 Pesos en función de la eslora

Tipo	Peso
High Speed Craft	5
Passenger	4
Cargo	3
Tanker	2
Resto	0

Tabla 99 Pesos en función del tipo de embarcación

- La suma total de la puntuación obtenida (Índice de comparación) para: número de eventos, eslora, número de entradas y tipología de embarcación nos determinan el orden de importancia de los barcos.
- De la clasificación obtenida tras la aplicación de los pesos correspondientes, nos quedamos con los primeros 60 barcos y con 3 remolcadores.
- Para la selección de los 3 remolcadores, en caso de igual índice de comparación se seleccionarán por su tamaño de eslora.

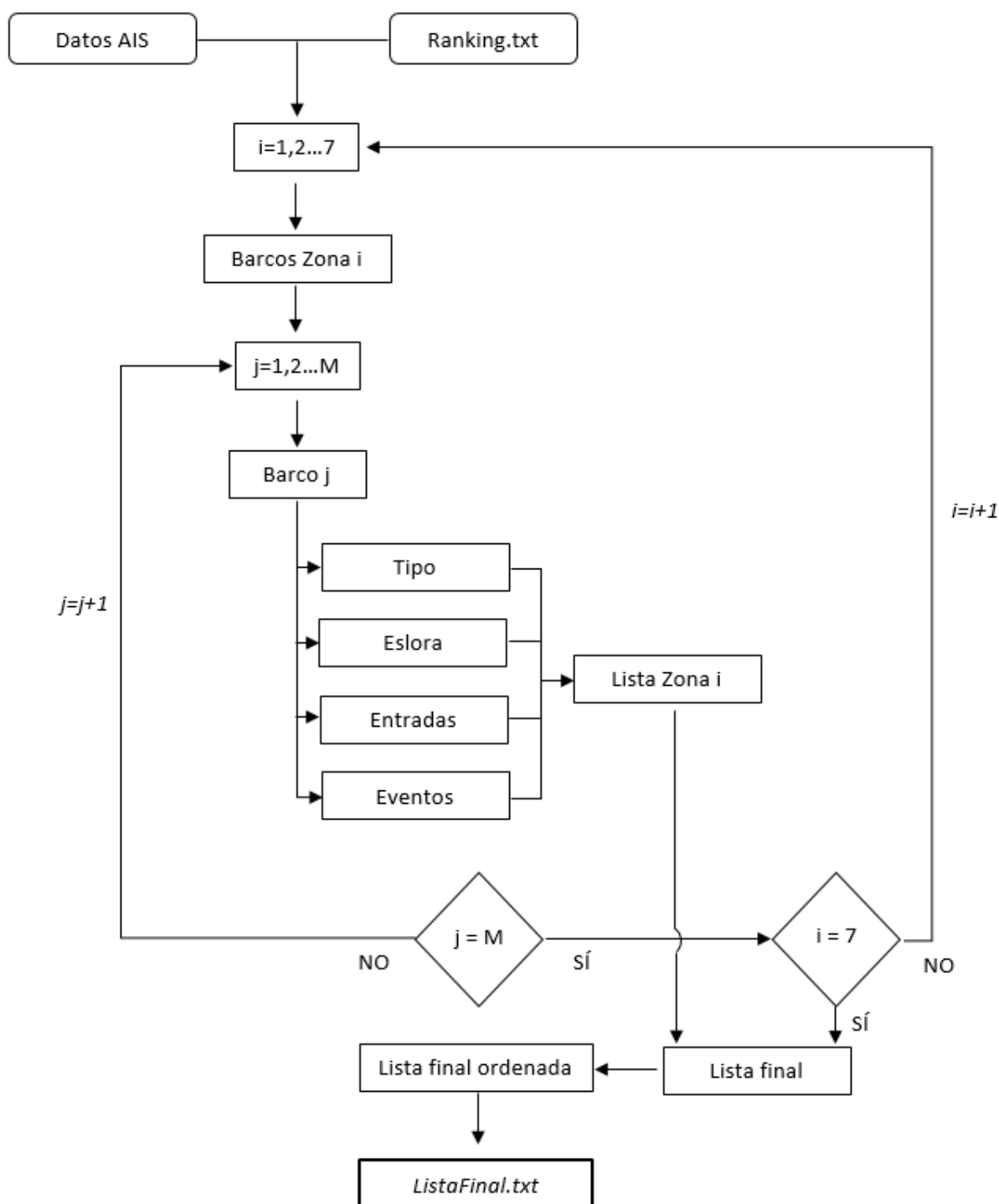
El programa diseñado para obtener la clasificación de los barcos considerando los criterios establecidos anteriormente es “*Ranking.m*”, este *script* sigue los siguientes pasos:

- Cargamos el archivo “*Ranking.txt*”
- Para cada zona recorremos la lista, barco a barco. Podrán existir zonas en las que no tengamos eventos registrados de un barco o que ese barco no entre en ella. Los criterios de clasificación con sus pesos correspondientes se aplican en el siguiente orden:
 - Clasificación por tipo de embarcación

- Clasificación por tamaño de eslora
- Clasificación por el número de entradas
- Clasificación por el número de eventos registrados
- Realizamos el sumatorio de los pesos según cada criterio para cada uno de los barcos
- Cambiamos de zona y repetimos el proceso
- Terminadas todas las zonas, tendremos siete listas con los mismos barcos (una para cada zona) pero con diferente índice de clasificación en cada caso para un barco concreto en función de si en una zona se han registrado más eventos que en otra o el número de entradas ha sido superior.
- De esas siete listas, la puntuación del barco será la mayor que tenga entre ellas.
- Ordenamos la lista según el índice de clasificación
- Extraemos dicha lista

Como resultado, obtenemos un documento de texto "*ListaFinal.txt*" donde aparece el nombre de la embarcación, el valor de su índice de clasificación y la tipología.

Se muestra a continuación un esquema del proceso seguido en el script “Ranking.m” para la selección:



Esquema 10 Análisis de la Selección de Barcos

Selección de rutas

Selección de barcos con rutas a simular

En este momento disponemos de una lista con 63 barcos en total. No obstante, cada una de esas embarcaciones lleva asociado un determinado número de rutas que, en muchas ocasiones, son similares entre sí e incluso similares a las rutas de otras embarcaciones.

El objetivo de este apartado es seleccionar 40 casos para una posterior simulación. Es importante mencionar que lo que se simulará en cada caso es una ruta de entrada de un barco. Para seleccionarlos se seguirán los siguientes criterios:

- No se consideran rutas que entran en Gibraltar.
- Si la ruta es similar entre dos barcos, elegiremos aquel más importante según los criterios que posteriormente se expondrán.
- Solamente se consideran rutas de entrada.

Los pasos que se han seguido han sido los siguientes:

- 1- Partimos de una lista de 63 barcos donde 3 de ellos son remolcadores (*ListaDef.txt*). El criterio de elección de los remolcadores ha sido por tamaño de eslora.
- 2- Mediante el archivo "*Tipos.m*" organizamos la lista de 63 barcos por tipología de embarcación.

Se muestra a continuación un cuadro con los tipos de barcos existentes en la lista de 63.

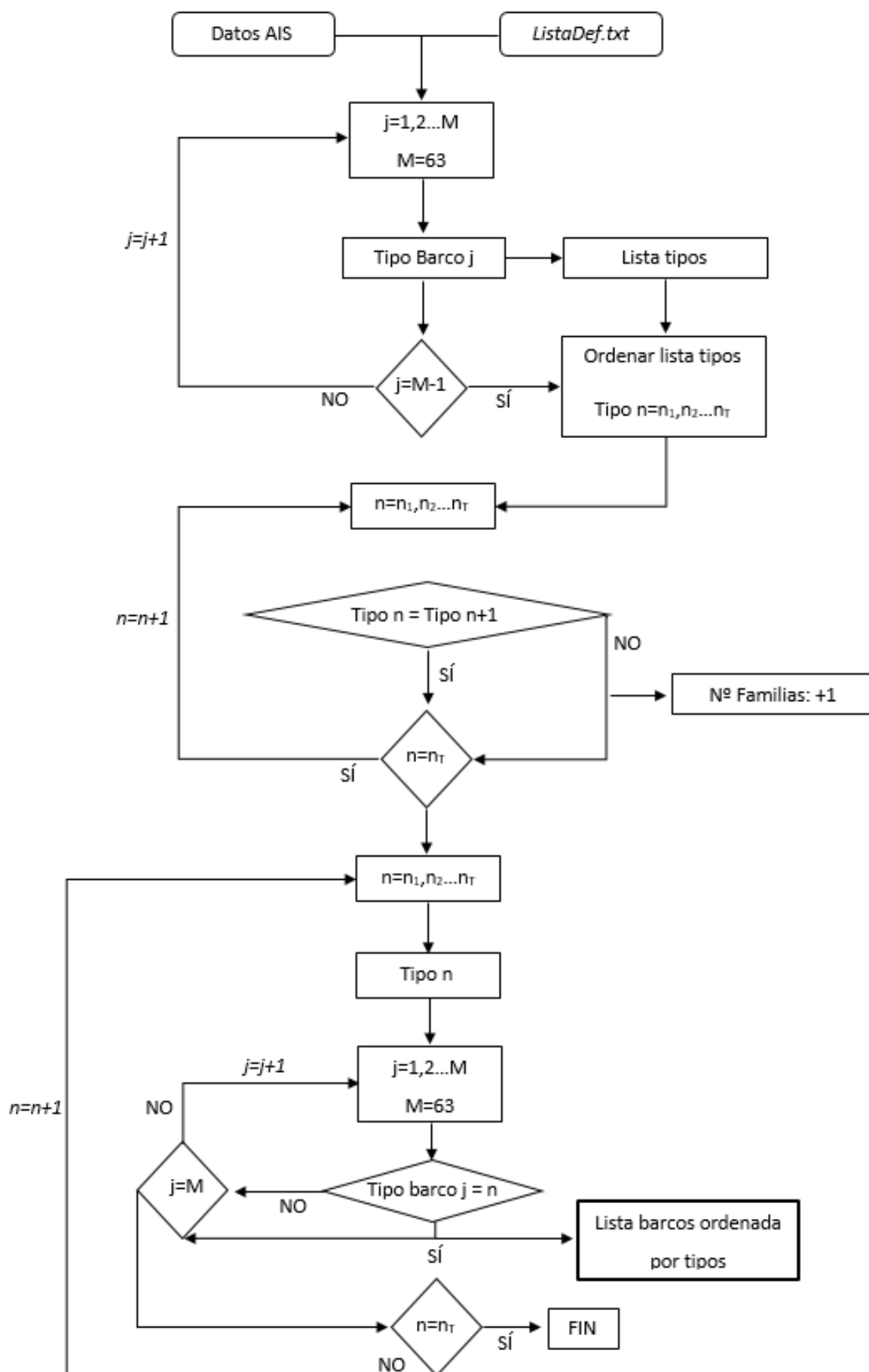
Número	AIS Type	Número	AIS Type
40	High Speed Craft	74	Cargo - Hazard D
49	High Speed Craft	79	Cargo
50	Pilot vessel	80	Tanker
51	SAR	81	Tanker - Hazard A
52	Tug	82	Tanker - Hazard B
54	Pollution control vessel	83	Tanker - Hazard C
60	Passenger	85	Tanker
70	Cargo	89	Tanker
71	Cargo - Hazard A	99	Passenger

- 3- Los tipos mostrados se pueden agrupar en familias. Estas familias están compuestas por aquellos con la misma cifra inicial (excepto el tipo 60 y el 99 que los consideramos pertenecientes a la misma),

- Tipos 40 y 49: High Speed Craft
- Tipos 50, 51, 52 y 54: Special Category

- Tipos 60 y 99: Passenger
 - Tipos 70, 71, 74 y 79: Cargo
 - Tipos 80, 81, 82, 83, 85 y 89: Tanker
- 4- Para cada una de las familias, realizamos una agrupación de barcos con características geométricas similares (eslora y calado), dando prioridad a la eslora en el criterio de elección.
- 5- Para cada paquete de barcos accedemos a las representaciones de sus trayectorias. Seguimos los siguientes pasos:
- a. Agrupamos los barcos con trayectorias similares.
 - b. Los ordenamos por su índice de comparación.
 - c. En caso de que éste coincida, los ordenamos por eslora de mayor a menor.
 - d. En caso de que las esloras coincidan, elegiremos utilizando el criterio de mayor número de entradas en la bahía.
- 6- Ante la posibilidad de que tras este proceso el número de barcos esté por debajo de los 40 requeridos, para aquellos barcos con un mayor índice de comparación elegiremos, como se verá más adelante, más de un caso de simulación, es decir, podría ser que para el barco más importante se simulasen dos de sus rutas, mientras que para los barcos menos importantes sólo se simule una.

A continuación, se muestra el esquema que sigue el script "*Tipos.m*" para organizar las embarcaciones por su tipología AIS:



Esquema 11 Diagrama de flujo de Tipos.m

Selección de rutas a simular

Una vez seleccionados las embarcaciones de las cuales se extraerán los casos a simular y el número de casos que se extraerán de cada barco, es necesario seleccionar las rutas que se simularán.

Para ello se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- Para aquellos barcos con tres casos, se elegirá una ruta “este”, una ruta “oeste” y una ruta “media”
- Para aquellos barcos con dos casos, se elegirá una ruta “este” y una ruta “oeste”.
- Para los barcos con un caso, se elegirá una ruta central representativa.
- Las rutas deberán ser claras.

El *script* diseñado para la obtención de las rutas de cada barco se denomina “*Rutas.m*”. Por otro lado, el programa creado para la representación de las rutas y poder realizar la elección de aquellas que sean más representativas se denomina “*RepresentacionRutas.m*”.

El proceso en el cual se emplean dichos *scripts*, se describe a continuación:

- Cargamos los datos AIS del barco en cuestión perteneciente a la lista de 40 casos de simulación obtenida en el apartado anterior.
- Accedemos a todas las rutas de la embarcación del mismo modo que se hizo en el apartado “*Número de entradas*”.
- Cortamos la ruta de forma que nos quedemos solo con los eventos (Lat, Lon) correspondientes a la entrada.

Para la obtención de la ruta de entrada exclusivamente, se ha considerado que ésta finaliza cuando la distancia relativa entre cuatro eventos consecutivos es menor de dos metros, es decir, designando estos últimos cuatro eventos como n_1 , n_2 , n_3 y n_4 , diremos que la ruta finaliza cuando:

$$Distancia(n_1 n_2) < 2 \text{ metros}$$

$$Distancia(n_2 n_3) < 2 \text{ metros}$$

$$Distancia(n_3 n_4) < 2 \text{ metros}$$

- Una vez tenemos todas las rutas de entrada, calculamos su ángulo, considerando como punto inicial el punto de entrada a la Bahía y como punto final su punto de destino. Dado que estamos analizando el ángulo del vector, no estamos teniendo en cuenta las posibles irregularidades que siga la embarcación en la ruta (ver *Figura 102*), este problema será necesario solventarlo mediante una elección visual como se indicará más adelante.

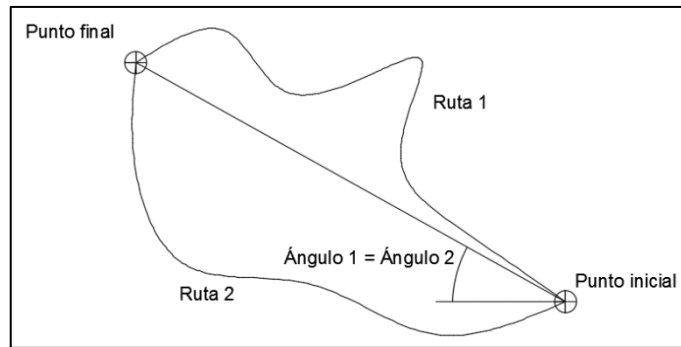


Figura 102 Rutas de entrada y ángulo de ruta

- Obtenemos el ángulo medio y, en caso de que al barco le correspondan dos o tres casos de simulación, obtendremos también dos ángulos más, uno cercano al máximo y otro al mínimo que nos representen la ruta “este” y la ruta “oeste”.
Los ángulos considerados para la obtención de la ruta “media, de la ruta “este” y de la ruta “oeste” se obtienen del siguiente modo:

$$\text{Ángulo Ruta media} = \text{Ángulo}_{med} = 0,5 \cdot \text{Ángulo}_{max} + 0,5 \cdot \text{Ángulo}_{min}$$

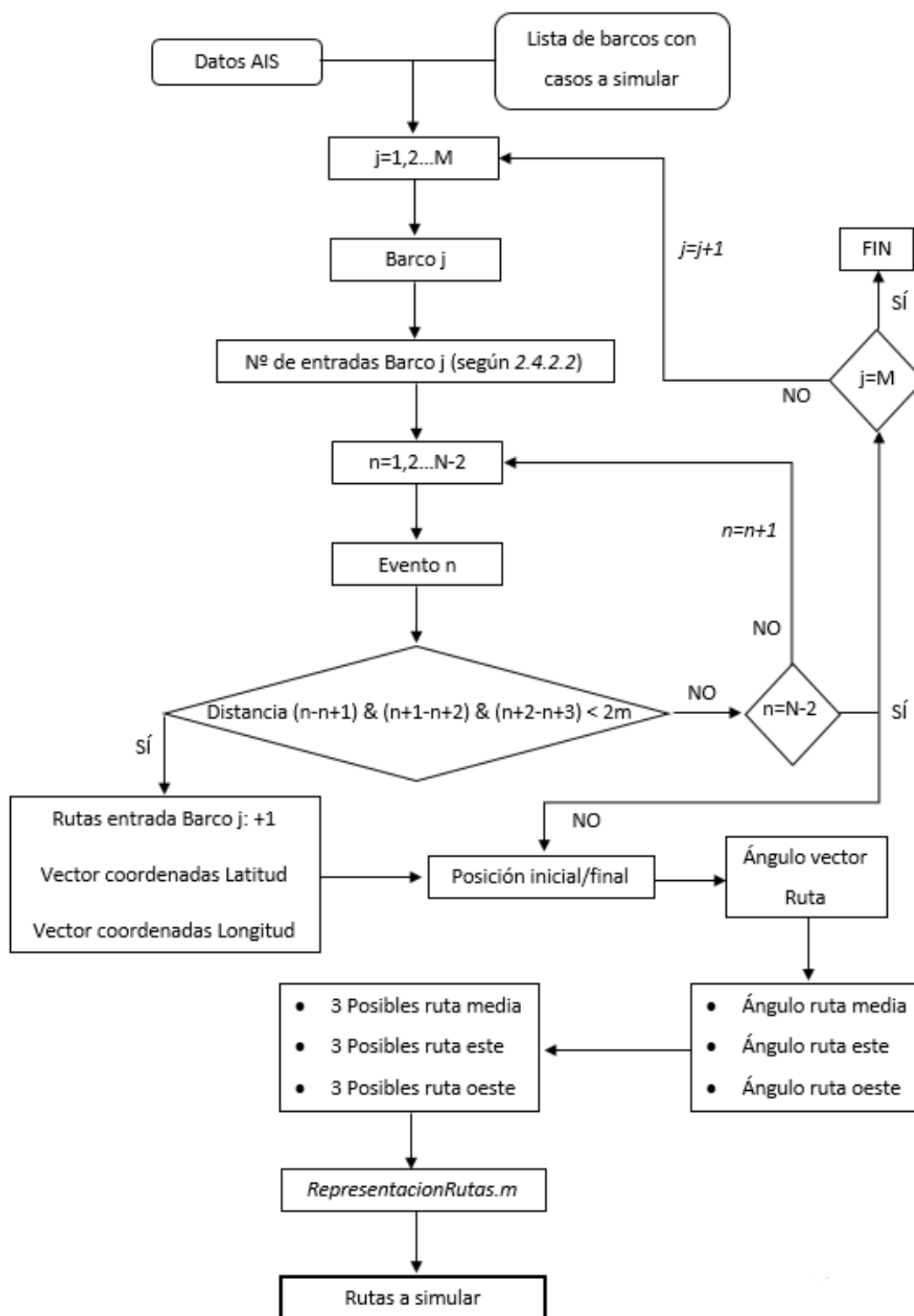
$$\text{Ángulo Ruta Este} = 0,7 \cdot (\text{Ángulo}_{max} - \text{Ángulo}_{med}) + \text{Ángulo}_{med}$$

$$\text{Ángulo Ruta Oeste} = -0,7 \cdot (\text{Ángulo}_{max} - \text{Ángulo}_{med}) + \text{Ángulo}_{med}$$

Dado que para el cálculo del ángulo únicamente estamos teniendo en cuenta el punto de inicial y el punto final, puede haber rutas que pese a tener un ángulo muy próximo al que estamos buscando, tengan una trayectoria muy irregular. Para solucionar este problema, consideramos tres rutas para cada ángulo, esto es, las tres rutas que mejor se ajusten al ángulo medio, las tres rutas que mejor se ajusten al ángulo máximo considerado y lo mismo para el mínimo.

- Una vez obtenidas estas nueve, seis o tres rutas, en función de si el barco tiene tres, dos o un caso de simulación, las representamos mediante el *script* “RepresentaciónRutas.m” y, visualmente, elegimos aquellas que resulten más representativas.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del script “Rutas.m”



Esquema 12 Diagrama de flujo de Rutas.m

Para la representación de las rutas a través del script “*RepresentacionRutas.m*” será necesario hacer uso de otros dos programas, uno de ellos, “*CargarZonas.m*”, ya fue mencionado anteriormente. El segundo es “*Contorno.m*”, este script nos permite representar el contorno de la Bahía exportado previamente desde AutoCAD.

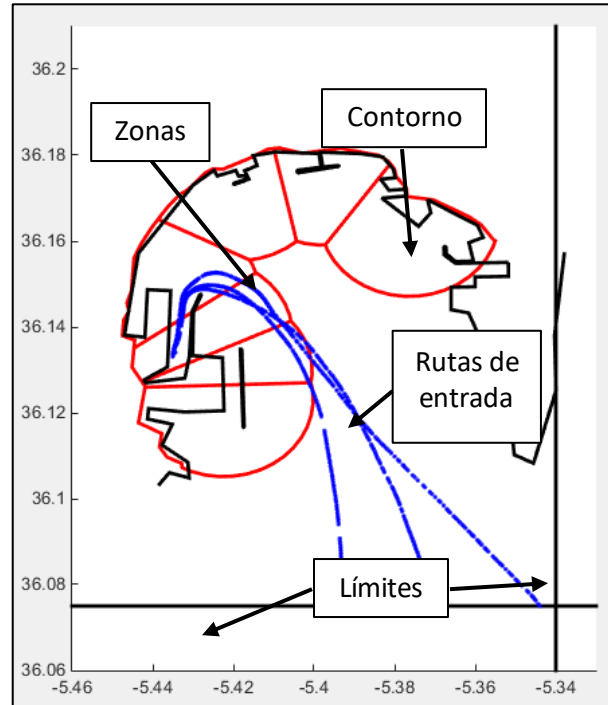
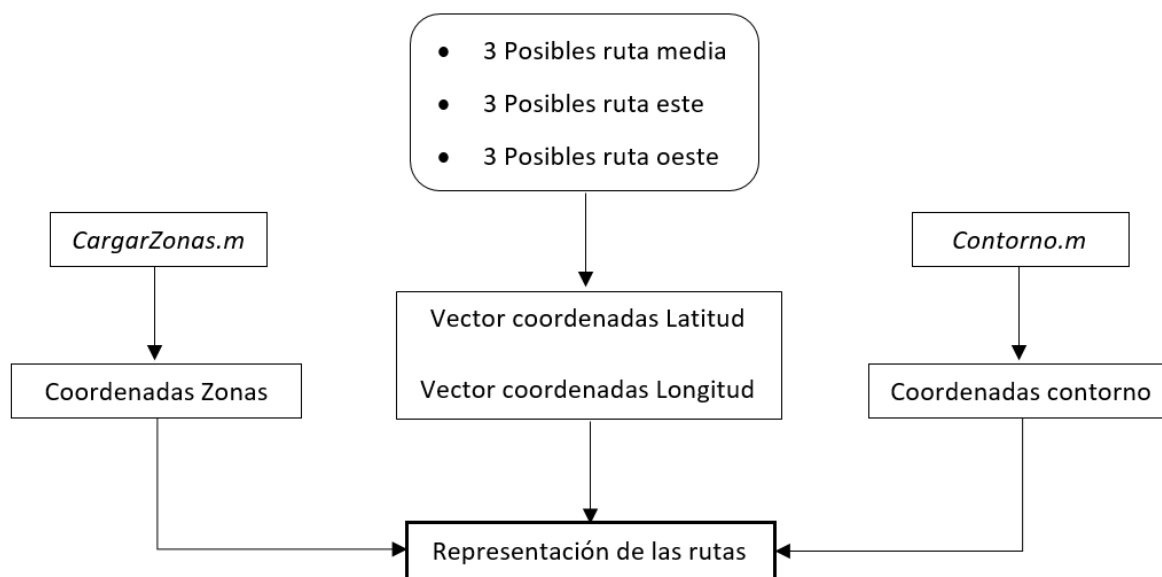


Figura 103 Ejemplo de aplicación de “*RepresentacionRutas.m*”

El funcionamiento del script es el siguiente:

- Lo primero será aplicar los programas “*CargarZonas.m*” y “*Contorno.m*” y representar las coordenadas que aportan, de las zonas de estudio y del contorno de la Bahía respectivamente.
- El programa parte de las rutas seleccionadas en el script “*Rutas.m*” como las más representativas del movimiento del barco. Tal como se indicó, éstas podrán ser nueve, seis o tres en función del número de casos a simular.
Cada una de esas rutas de entrada, tiene asignados dos vectores, uno con las coordenadas de longitud y otro con las de latitud.
- Se representa cada grupo de tres rutas, es decir, las tres correspondientes a la trayectoria media, a la este o a la oeste y se elige la más significativa de ellas.



Esquema 13 Diagrama de flujo de RepresentacionRutas.m

El resultado del script será las rutas que se llevarán a simulación con sus coordenadas (longitud, latitud).

Finalmente, una vez elegidas las rutas que se simularán, será necesario generar los datos para dicha simulación. De cada ruta se proporcionarán los siguientes datos:

1. Latitud y longitud.
2. Tiempo relativo, con tiempo 0 en el evento de inicio de la ruta.
3. Fecha de cada evento.
4. Coeficientes de ajuste de un polinomio de grado 10, uno para el par tiempo relativo-Latitud y otro para el par tiempo relativo – longitud.
5. Datos AIS de nombre, eslora, calado y manga.
6. Gráfico que refleje la evolución de la distancia del barco al centroide de cada zona con el tiempo.
7. Gráfico que represente la evolución de la velocidad con el tiempo.
8. Mapa en el que se refleje la trayectoria con una graduación de colores en función de la velocidad que tiene el barco en ese punto
9. Fotografías del barco al que pertenezca la ruta que se vaya a simular.

Para la obtención de los puntos anteriores se emplea el script "FicheroMAT.m". El procedimiento que sigue este programa es el siguiente:

- Cargar las coordenadas (longitud y latitud) de la ruta correspondiente al caso de simulación que queremos extraer.
- Obtenemos el vector de fecha juliana.
- Obtenemos el vector de tiempos relativos, considerando como tiempo 0 el correspondiente al evento inicial de la ruta de entrada. Así mismo, se deberá tener en

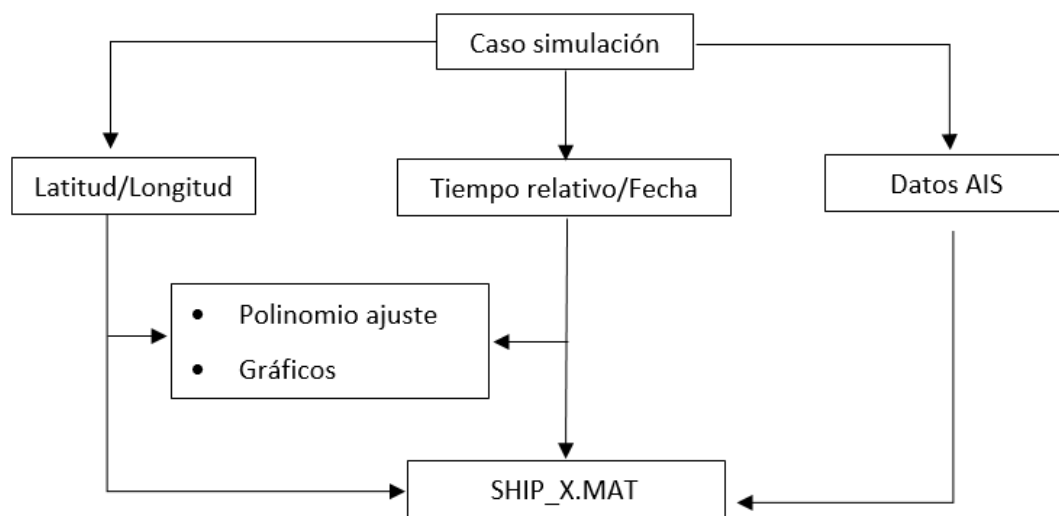


cuenta la posible existencia de un cambio de día, es decir, que mientras el barco entra en la Bahía pasen las doce de la noche.

- Obtenemos la distancia y el tiempo entre eventos. Con los datos anteriores calculamos la velocidad de la embarcación entre cada dos registros.
- Para cumplir con los requisitos del programa de simulación, limitamos la ruta de entrada a dos nuevos límites, diferentes de los que consideramos antes, en coordenadas UTM:
 - $X = 279761.3033 \text{ m}$
 - $Y = 3998912.3298 \text{ m}$
- Ajustamos a un polinomio de grado 10 de los siguientes pares de datos:
 - Tiempo relativo-Latitud
 - Tiempo relativo -Longitud
- Obtenemos le resto de gráficos mencionados anteriormente
- Extraemos los datos

Para cada caso de simulación se extrae un fichero “SHIP_X.mat” donde X es el número del caso a simular.

El diagrama de flujo que sigue el script “FicheroMAT.m” es el siguiente:



Esquema 14 Diagrama de flujo de FicheroMAT.m

A continuación se muestran algunos ejemplos de los gráficos extraídos:



Figura 104 Distancia al centroide vs. Tiempo

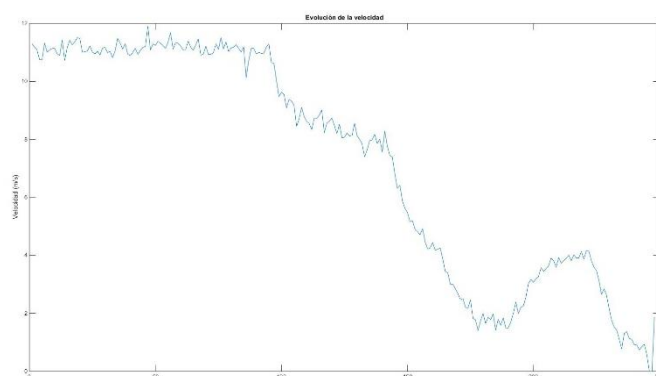


Figura 105 Evolución de la velocidad

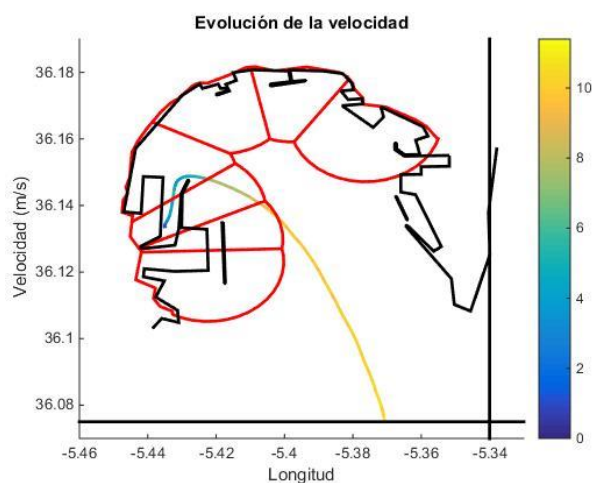


Figura 106 Evolución de la velocidad en el espacio

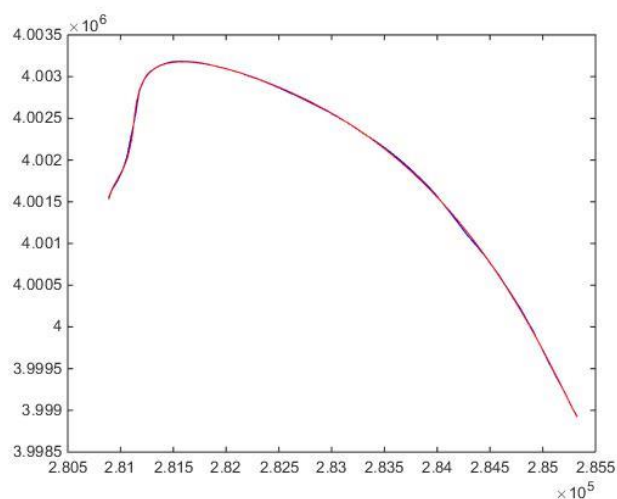


Figura 107 Ajuste del polinomio de grado 10

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología descrita anteriormente.

Análisis global

La distribución de los barcos entre las diferentes zonas es la siguiente:

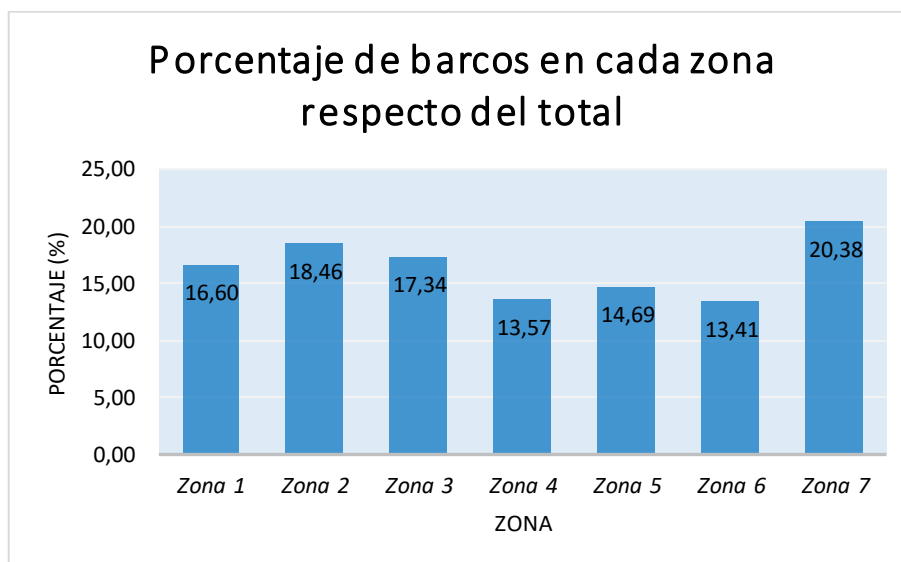


Gráfico 87 Porcentaje de barcos en cada zona

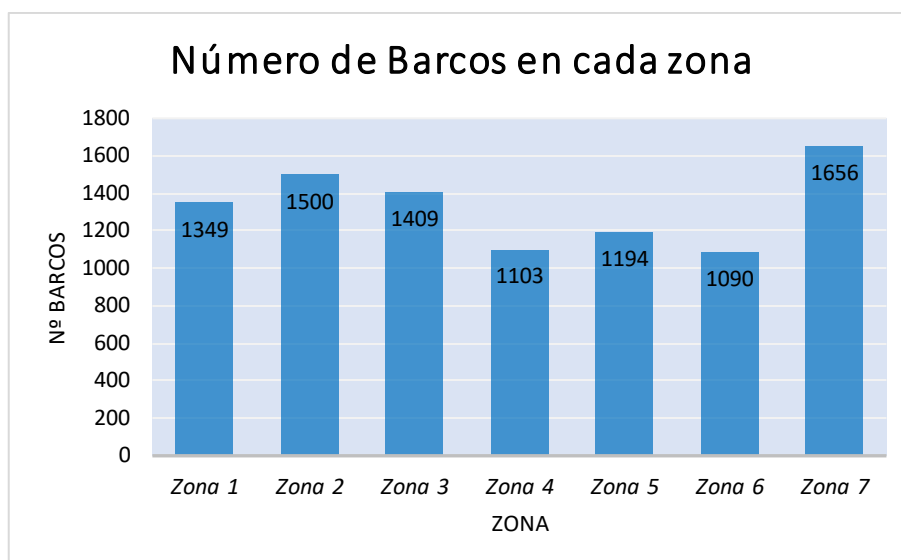


Gráfico 88 Número de barcos en cada zona

Análisis espacial – Número de eventos

A continuación se muestran los diez barcos con mayor número de eventos para cada zona:

EVENTOS ZONA 1	
NOMBRE	Nº EVENTOS
SALVAMAR DUBHE	408901
M.P.R.2	163294
SOUND SOLUTION	155702
M.P.R.1	107056
BONUM	74113
SPABUNKER CUARENTA	59269
SOUND HORIZON	58540
KIM K	56516
ALASKA PRIMERO	40650
SIRRAH	40478

EVENTOS ZONA 2	
NOMBRE	Nº EVENTOS
ALBORAN	183879
JAUME II	119663
MARINA	116403
JAUME I	103213
VB SIMUN	76882
ALG.PILOTSNAVIO	76161
STRAIT FERONIA	68122
MARTIN I SOLER	64311
ALGECIRAS JET	58606
VRONSKIY	56576

EVENTOS ZONA 3	
NOMBRE	Nº EVENTOS
JAUME II	545703
MARTIN I SOLER	377717
STRAIT FERONIA	339168
ALG.PILOTSNAVIO	326274
NISSOS_CHIOS	300805
LAS PALMASDE GRANCAN	280244
VRONSKIY	273766
ALGECIRAS JET	244015
LUZ DE MAR	223587
JAUME I	190557

EVENTOS ZONA 4	
NOMBRE	Nº EVENTOS
SERTOSA OCHO	192488
PALMA	167899
MARTIN I SOLER	165833
SPABUNKER CUARENTA	156418
ALG.PILOTSNAVIO	149069
STRAIT FERONIA	117426
NEPTUNE	113974
VRONSKIY	108024
LAS PALMASDE GRANCAN	95982
YALOBey PRIMERO	65535

EVENTOS ZONA 5	
NOMBRE	Nº EVENTOS
SERTOSA OCHO	620604
SERTOSA DIECISIETE	294993
ALG.PILOTSNAVIO	71137
SPABUNKER CUARENTA	56729
PALMA	47074
LAS PALMASDE GRANCAN	45303
TOLEDO SPIRIT	32454
LIOBA	30282
NICCOLO MACHIAVELLI	26113
SANTINA	22677

EVENTOS ZONA 6	
NOMBRE	Nº EVENTOS
ALG.PILOTSNAVIO	135961
SYN TURAIS	108124
CLIPPER BRICCO	99843
SCALI SANLORENZO	87743
GINOSTRA M	75788
BOW FUJI	59415
SPABUNKER TWENTY	58883
MAR ISA	53483
NEPTUNE	45970
SICHEM SPARROW	39841

EVENTOS ZONA 7	
NOMBRE	Nº EVENTOS
PALLAS GLORY	278741
ANTIGNANO	209890
DETROIT JET	166119
KASSOS	144823
CLIPPER BRICCO	139075
HELGA	134253
GREEN COOLER	123054
VEMAOIL XXV	122702
VEMAOIL XXI	119405
VEMAOIL XIV	115150

Tabla 100 Número de eventos

Análisis espacial – Número de entradas

A continuación se muestra para cada zona, la lista con los diez barcos con mayor número de entradas en la misma, así como también su número total de entradas en el Bahía.

ENTRADAS ZONA 1		
NOMBRE	TOT ENT*	ENT/Z1*
VRONSKIY	977	819
MARTIN I SOLER	1219	664
NORMAN ASTURIAS	723	461
STRAIT FERONIA	706	403
NISSOS_CHIOS	606	325
JAUME II	345	284
ALGECIRAS JET	380	206
LAS PALMASDE GRANCAN	300	133
POETA LOPEZ ANGLADA	325	116
ALBORAN	130	62

ENTRADAS ZONA 2		
NOMBRE	TOT ENT*	ENT/Z2*
MARTIN I SOLER	1219	1207
VRONSKIY	977	972
NORMAN ASTURIAS	723	712
STRAIT FERONIA	706	701
NISSOS_CHIOS	606	601
ALGECIRAS JET	380	380
JAUME II	345	345
POETA LOPEZ ANGLADA	325	319
LAS PALMASDE GRANCAN	300	294
RAMON LLULL	172	171

ENTRADAS ZONA 3		
NOMBRE	TOT ENT*	ENT/Z3*
MARTIN I SOLER	1219	1219
VRONSKIY	977	978
NORMAN ASTURIAS	723	724
STRAIT FERONIA	706	705
NISSOS_CHIOS	606	605
ALGECIRAS JET	380	380
JAUME II	345	345
POETA LOPEZ ANGLADA	325	325
LAS PALMASDE GRANCAN	300	300
RAMON LLULL	172	171

ENTRADAS ZONA 4		
NOMBRE	TOT ENT*	ENT/Z4*
MARTIN I SOLER	1219	1218
VRONSKIY	977	978
NORMAN ASTURIAS	723	724
STRAIT FERONIA	706	705
NISSOS_CHIOS	606	605
ALGECIRAS JET	380	380
JAUME II	345	345
POETA LOPEZ ANGLADA	325	325
LAS PALMASDE GRANCAN	300	300
RAMON LLULL	172	171

ENTRADAS ZONA 5		
NOMBRE	TOT ENT*	ENT/Z5*
DOLPHIN ADVENTURER2	125	60
LUZ DE MAR	61	42
GRANT DEL MAR	56	34
SALVAMAR DUBHE	38	31
LAS PALMASDE GRANCAN	300	30
SCALI SANLORENZO	73	27
GINOSTRA M	85	24
RBD DALMATIA	87	19
NISSOS_CHIOS	606	18
TEIDE SPIRIT	15	14

ENTRADAS ZONA 6		
NOMBRE	TOT ENT*	ENT/Z6*
DOLPHIN ADVENTURER2	125	74
GINOSTRA M	85	73
SCALI SANLORENZO	73	68
LUZ DE MAR	61	42
SYN TURAIS	51	42
MAR ISA	40	37
SALVAMAR DUBHE	38	33
R.C BEHAR	35	30
CASTILLO DE PAMBRE	33	30
WISBY ARGAN	33	29

ENTRADAS ZONA 7		
NOMBRE	TOT ENT*	ENT/Z7*
HALKI	187	141
ANAFI	196	136
AEGEAN PRINCESS	184	134
KASSOS	161	120
DOLPHIN ADVENTURER2	125	100
ANDROS	94	67
VEMAOIL XIV	83	64
HELGA	73	61
VEMAOIL XXV	63	56
GRANT DEL MAR	56	55

*TOT ENT → N° entradas en la bahía

*ENT/ZX → Entra en la bahía y en la zona X

Tabla 101 Número de entradas

Análisis de las características de las embarcaciones - Eslora

ESLORA ZONA 1	
NOMBRE	ESLORA
GIC5'5)PP8X3PXPPRP	560
ALIBAXIA-(!	434
DNDESR A D	413
MUNKEBO MAERSK	399
MORTEN MAERSK	399
MOGENS MAERSK	399
MAYVIEW MAERSK	399
MATZ MAERSK	399
MARY MAERSK	399
MARSTAL MAERSK	399

ESLORA ZONA 2	
NOMBRE	ESLORA
GIC5'5)PP8X3PXPPRP	560
BRUGGE,MAX, !	477
ALIBAXIA-(!	434
MUNKEBO MAERSK	399
MSC ISTANBUL	399
MORTEN MAERSK	399
MOGENS MAERSK	399
MERETE MAERSK	399
MAYVIEW MAERSK	399
MATZ MAERSK	399



ESLORA ZONA 3	
NOMBRE	ESLORA (m)
GIC5'5)PP8X3PXPPRP	560
ALIBAXIA-(!	434
MUNKEBO MAERSK	399
MSC ISTANBUL	399
MORTEN MAERSK	399
MOGENS MAERSK	399
METTE MAERSK	399
MERETE MAERSK	399
MAYVIEW MAERSK	399
MATZ MAERSK	399

ESLORA ZONA 4	
NOMBRE	ESLORA (m)
GIC5'5)PP8X3PXPPRP	560
MUNKEBO MAERSK	399
MSC ISTANBUL	399
MORTEN MAERSK	399
MOGENS MAERSK	399
METTE MAERSK	399
MERETE MAERSK	399
MAYVIEW MAERSK	399
MATZ MAERSK	399
MARY MAERSK	399

ESLORA ZONA 5	
NOMBRE	ESLORA (m)
GIC5'5)PP8X3PXPPRP	560
BRUGGE,MAX, !	477
(0(- -)D-BE)IA	437
ESTELLE MAERSK	397
HANJIN AFRICA	366
CMA CGM CALLISTO	363
AXEL MAERSK	352
MADISON ORCA	340
MAERSK ANTARES	338
MAERSK STOCKHOLM	334

ESLORA ZONA 6	
NOMBRE	ESLORA (m)
GIC5'5)PP8X3PXPPRP	560
BRUGGE,MAX, !	477
HAMBURG EXPRESS	366
CMA CGM CALLISTO	363
SUSAN MAERSK	347
CORNELIA MAERSK	347
MADISON ORCA	340
IRIS	334
STARLIGHT VENTURE	333
PACIFIC VOYAGER	333

ESLORA ZONA 7	
NOMBRE	ESLORA (m)
VLISTDIEP	630
GIC5'5)PP8X3PXPPRP	560
FB JDFXHJ P	548
BRUGGE,MAX, !	477
HAMBURG EXPRESS	366
SUSAN MAERSK	347
CORNELIA MAERSK	347
COLUMBINE MAERSK	347
MADISON ORCA	340
INDEPENDENCE OF SEAS	339

Tabla 102 Clasificación por tamaño eslora

Análisis de las características de las embarcaciones – Calado

CALADO ZONA 1	
NOMBRE	CALADO (m)
HOUSTON	21
SAMJOHN LEGACY	17.6
CAPE CENTURY	17.4
CAVALIERE GRAZIA BOT	17.3
ASIAN SPIRIT	17.2
OTTOMAN INTEGRITY	17
ANANGEL VIRTUE	17
ANANGEL CONQUEROR	17
FRATERNITY	16.3
MT NORDIC MOON	16.1

CALADO ZONA 2	
NOMBRE	CALADO (m)
PACIFIC VOYAGER	19.2
CAPE CENTURY	17.4
CAVALIERE GRAZIA BOT	17.3
ASIAN SPIRIT	17.2
OTTOMAN INTEGRITY	17
ANANGEL VIRTUE	17
ANANGEL SEAFARER	17
ANANGEL CONQUEROR	17
MT NORDIC MOON	16.1
EMMA MAERSK	16.1

CALADO ZONA 3	
NOMBRE	CALADO (m)
MARGOT N	20
SAMJOHN LEGACY	17.6
CAPE CENTURY	17.4
CAVALIERE GRAZIA BOT	17.3
ASIAN SPIRIT	17.2
OTTOMAN INTEGRITY	17
ANANGEL VIRTUE	17
ANANGEL SEAFARER	17
MT NORDIC MOON	16.1
EMMA MAERSK	16.1

CALADO ZONA 4	
NOMBRE	CALADO (m)
ASIAN SPIRIT	17.2
ANANGEL VIRTUE	17
MT NORDIC MOON	16.1
EMMA MAERSK	16.1
NS BURGAS	16
MSC OSCAR	16
IRON FRITZ	16
NS BRAVO	15.9
MSC ISTANBUL	15.9
METTE MAERSK	15.3

CALADO ZONA 5	
NOMBRE	CALADO (m)
SASA	21
SEEB	20
MARGOT N	20
M-T SOLANA	20
ENERGY R	20
AZUMASAN	20
PACIFIC VOYAGER	19.2
XIN JIN HAI	17.8
SAMJOHN LEGACY	17.6
CAPE CENTURY	17.4

CALADO ZONA 6	
NOMBRE	CALADO (m)
STARLIGHT VENTURE	20
M-T SOLANA	20
ENERGY R	20
PACIFIC VOYAGER	19.2
XIN JIN HAI	17.8
SAMJOHN LEGACY	17.6
CAVALIERE GRAZIA BOT	17.3
POMPANO	17
OTTOMAN INTEGRITY	17
OBELIX	17

CALADO ZONA 7	
NOMBRE	CALADO (m)
HMS RICHMOND	25.5
CHRISTOS XXIV	25
STARLIGHT VENTURE	20
M-T SOLANA	20
ENERGY R	20
PACIFIC VOYAGER	19.2
SHAN DONG HENG	18.1
XIN JIN HAI	17.8
POMPANO	17
OBELIX	17

Tabla 103 Clasificación por calado

Selección de barcos

A continuación, se muestra la lista de 63 barcos, con la puntuación obtenida por cada uno de ellos y su tipología:

Número	Nombre	Suma	Tipo	Número	Nombre	Suma	Tipo
1	VRONSKIY	22	60	34	INDEPENDENCE OF SEAS	9	60
2	MARTIN I SOLER	22	99	35	VEMAOILXXI	9	80
3	NORMAN ASTURIAS	20	69	36	HELGA	9	85
4	STRAIT FERONIA	19	70	37	PALLAS GLORY	9	80
5	NISSOS_CHIOS	19	60	38	MARISA	9	89
6	LAS PALMASDE GRANCAN	16	60	39	BOW FUJI	9	80
7	ALGECIRAS JET	16	40	40	SCALI SANLORENZO	9	80
8	JAUME II	16	49	41	TOLEDO SPIRIT	9	89
9	POETA LOPEZ ANGLADA	15	60	42	PALMA	9	80
10	ALBORAN	14	40	43	SPABUNKER CUARENTA	9	80
11	JAUME I	13	40	44	ALASKA PRIMERO	9	99
12	RAMON LLULL	13	40	45	SIRRAH	9	70



13	DETROIT JET	12	40	46	SUSAN MAERSK	8	71
14	KASSOS	11	83	47	HAMBURG EXPRESS	8	70
15	MARINA	11	74	48	BRUGGE, MAX, !	8	70
16	AEGEAN PRINCESS	11	85	49	MAERSK STOCKHOLM	8	71
17	ANAFI	11	80	50	MAERSK ANTARES	8	70
18	HALKI	11	89	51	CMA CGM CALLISTO	8	71
19	HANJIN AFRICA	10	71	52	ESTELLE MAERSK	8	71
20	MSC ISTANBUL	10	71	53	MATZ MAERSK	8	71
21	VLISTDIEP	10	79	54	MERETE MAERSK	8	71
22	VEMAOILXIV	10	80	55	CORNELIA MAERSK	8	70
23	VEMAOILXXV	10	80	56	MOGENS MAERSK	8	70
24	GREEN COOLER	10	70	57	COLUMBINE MAERSK	8	71
25	GINOSTRA M	10	80	58	METTE MAERSK	8	70
26	RBD DALMATIA	10	70	59	TEIDE SPIRIT	8	80
27	MADISON ORCA	9	80	60	CLIPPER BRICCO	8	80
28	MARY MAERSK	9	74	61	SERTOSA OCHO	7	52
29	MAYVIEW MAERSK	9	71	62	M.P.R.2	7	52
30	MORTEN MAERSK	9	79	63	SERTOSA DIECISIETE	7	52
31	MUNKEBO MAERSK	9	71				
32	AL!BAXIA-(!	9	65				
33	MARSTAL MAERSK	9	79				

Se muestra un gráfico resumen con el número de embarcaciones de cada tipo dentro de la lista de 63:

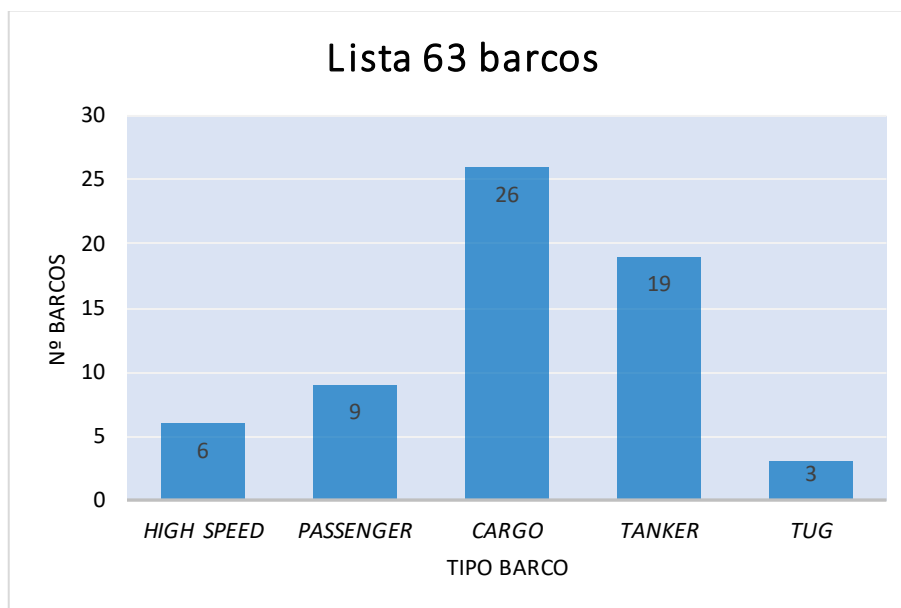


Gráfico 89 Número de barcos por tipo

Selección de rutas - Selección de barcos con rutas a simular

Tal y como se explica en el apartado “Selección de barcos con rutas a simular”, agrupamos los barcos por su tipología para, posteriormente, mediante la observación de sus trayectorias y aplicando los criterios expuestos, seleccionar aquellos cuya ruta se introducirá en el modelo numérico. Podemos agrupar las rutas de los 63 barcos en los siguientes tipos:

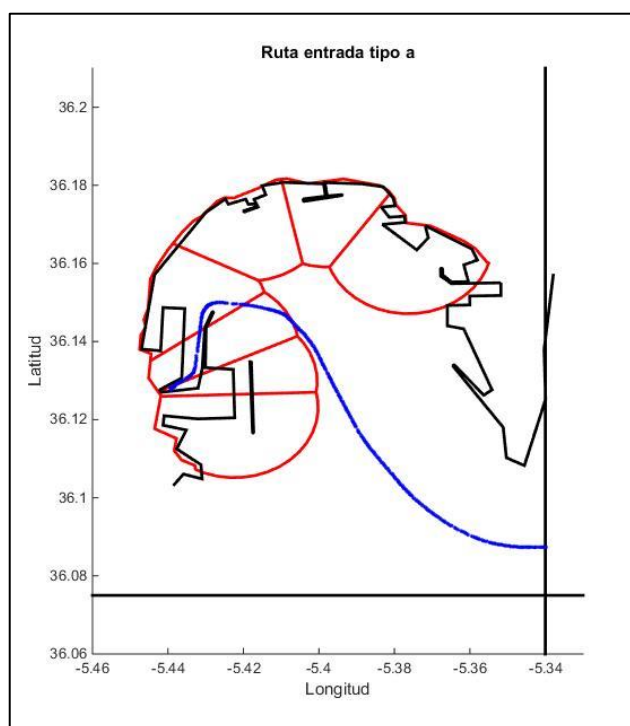


Figura 108 Ruta de entrada tipo a

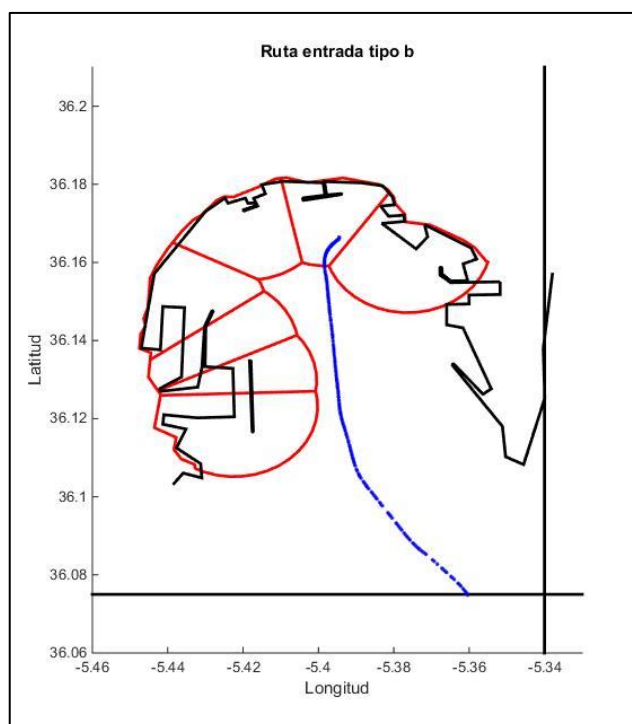


Figura 109 Ruta de entrada tipo b

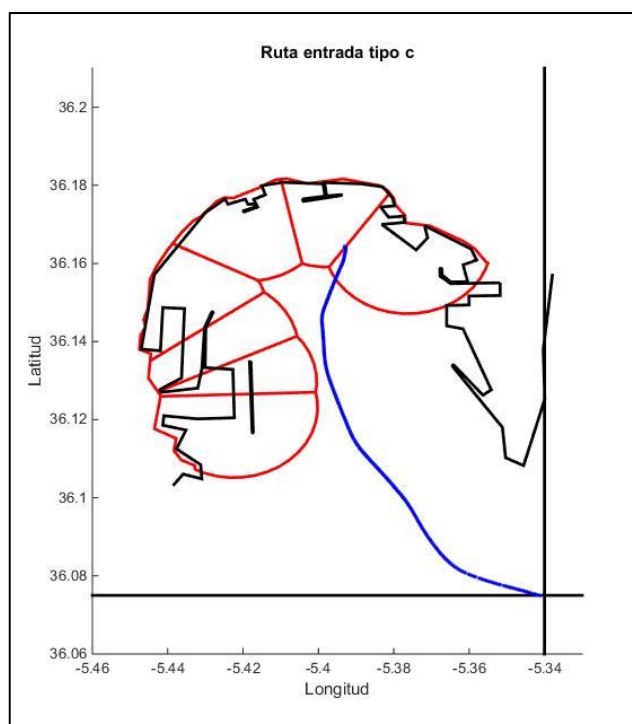


Figura 110 Ruta de entrada tipo c

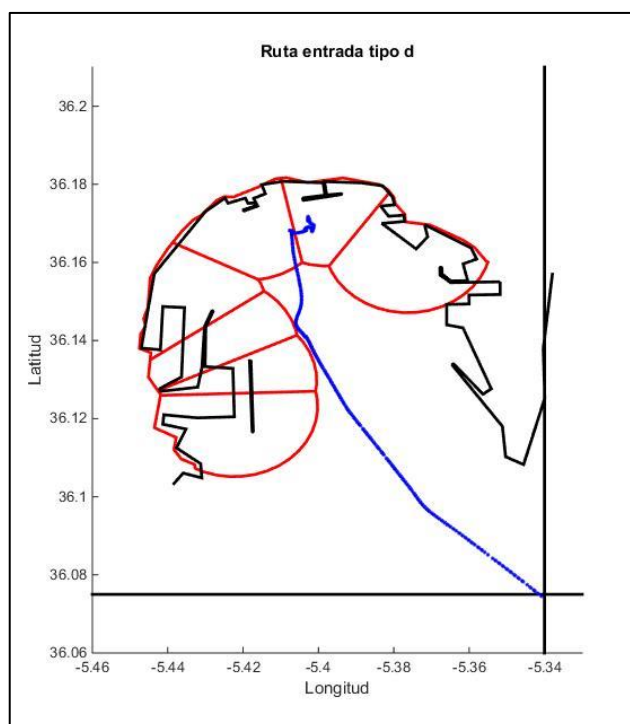


Figura 111 Ruta de entrada tipo d

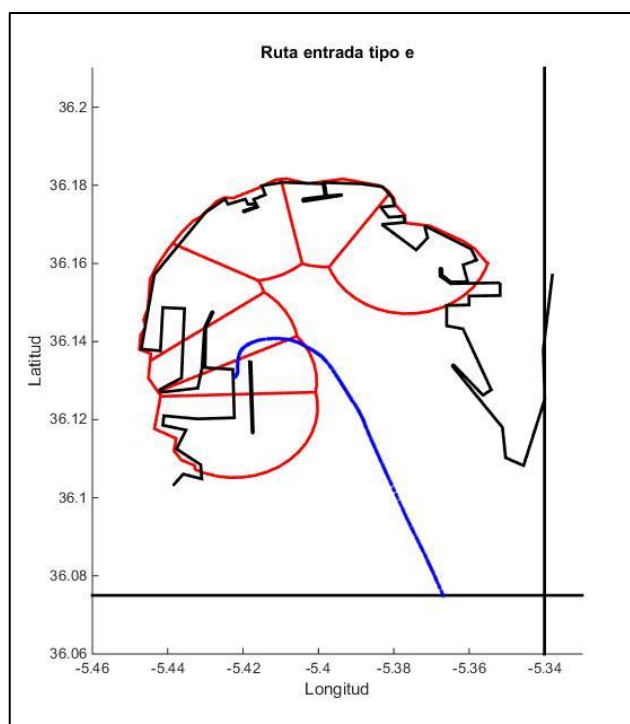


Figura 112 Ruta de entrada tipo e

Así pues, a continuación se muestran los grupos de barcos que se constituyeron, así como aquel que fue elegido:

Nombre	Tipo	Eslora (m)	Calado (m)	Índice comparación	Trayectoria tipo
JAUME I	40	77	3,4	13	a
DETROIT JET	40	72	3,2	12	a
JAUME II	49	81	3	16	a
RAMON LLULL	40	83	2	13	a

Nombre	Tipo	Eslora (m)	Calado (m)	Índice comparación	Trayectoria tipo
NISSOS_CHIOS	60	141	5	19	a
VRONSKIY	60	131	5	22	a
LAS PALMAS DEGRANCAN	60	117	5	16	a
POETA LOPEZ ANGLADA	60	134	4	15	a

Nombre	Tipo	Eslora (m)	Calado (m)	Índice comparación	Trayectoria tipo
MAERSK ANTARES	70	338	12	8	a
CORNELIA MAERSK	70	347	13	8	b
MOGENS MAERSK	70	399	13,7	8	a
HAMBURG EXPRESS	70	366	13	8	c
METTE MAERSK	70	399	15,3	8	a
MAERSK STOCKHOLM	71	334	9,7	8	a
CMA CGM CALLISTO	71	363	15,2	8	d
MATZ MAERSK	71	399	14	8	a,e
MAYVIEW MAERSK	71	399	14,2	9	a
MERETE MAERSK	71	399	14,2	8	a
MSC ISTANBUL	71	399	15,9	10	a
MUNKEBO MAERSK	71	399	13,5	9	a
COLUMBINE MAERSK	71	347	13	8	c
SUSAN MAERSK	71	347	12,8	8	b
ESTELLE MAERSK	71	397	15	8	a
HANJIN AFRICA	71	366	13	10	e
MARY MAERSK	74	399	13	9	a,e
MORTEN MAERSK	79	399	10	9	a
MARSTAL MAERSK	79	399	14	9	a

Nombre	Tipo	Eslora (m)	Calado (m)	Índice comparación	Trayectoria tipo
SIRRAH	70	133	6	9	a,b

GREEN COOLER	70	109	7,2	10	a
RBD DALMATIA	70	130	7	10	a,c

Nombre	Tipo	Eslora (m)	Calado (m)	Índice comparación	Trayectoria tipo
PALMA	80	92	5	8	a,b
SCALI SANLORENZO	80	89	3	8	a
PALLAS GLORY	80	93	5	8	Gibraltar
KASSOS	83	102	6	10	Gibraltar
MAR ISA	89	105	4	8	a
VEMAOIL XIV	80	105	5	9	Gibraltar
VEMAOIL XXI	80	115	7	8	Gibraltar
VEMAOIL XXV	80	105	6	9	Gibraltar
GINOSTRA	80	113	6	9	a
AEGEAN PRINCESS	85	100	6	10	Gibraltar
HELGA	85	92	4	8	a
HALKI	89	102	5	10	Gibraltar
CLIPPER BRICCO	80	90	5	8	Gibraltar

Nombre	Tipo	Eslora (m)	Calado (m)	Índice comparación	Trayectoria tipo
TOLEDO SPIRIT	89	273	15	9	a
TEIDE SPIRIT	80	274	13	8	a

Selección rutas – Casos para simulación

Finalmente, en la siguiente tabla queda recogido el nombre de los barcos con alguna ruta a simular y el número de las mismas que se introducirán en el modelo:

Número	Nombre	Suma	Tipo	Número	Nombre	Suma	Tipo
1	MARTIN I SOLER (1)	22	99	21	MSC ISTANBUL	10	71
2	MARTIN I SOLER (2)	22	99	22	GINOSTRA M	10	80
3	MARTIN I SOLER (3)	22	99	23	RBD DALMATIA (1)	10	70
4	VRONSKIY (1)	22	60	24	RBD DALMATIA (2)	10	70
5	VRONSKIY (2)	22	60	25	ALIBAXIA-(!	9	65
6	VRONSKIY (3)	22	60	26	MADISON ORCA	9	80

7	NORMAN ASTURIAS (1)	20	69	27	CORNELIA MAERSK	8	70
8	NORMAN ASTURIAS (2)	20	69	28	HAMBURG EXPRESS	8	70
9	STRAIT FERONIA (1)	19	70	29	BRUGGE,MAX, !	8	70
10	STRAIT FERONIA (2)	19	70	30	BOW FUJI	9	80
11	ALGECIRAS JET (1)	16	40	31	SIRRAH	9	70
12	ALGECIRAS JET (2)	16	40	32	CMA CGM CALLISTO	8	71
13	JAUME II (1)	16	49	33	TOLEDO SPIRIT	9	89
14	JAUME II (2)	16	49	34	PALMA (1)	9	80
15	ALBORAN (1)	14	40	35	PALMA (2)	9	80
16	ALBORAN (2)	14	40	36	SPABUNKER CUARENTA	9	80
17	MARINA (1)	11	74	37	ALASKA PRIMERO	9	99
18	MARINA (2)	11	74	38	SERTOSA OCHO	7	52
19	VLISTDIEP	10	79	39	M.P.R.2	7	52
20	HANJIN AFRICA	10	71	40	SERTOSA DIECISIETE	7	52

A modo de resumen se muestra el número de casos simulados para cada tipología:

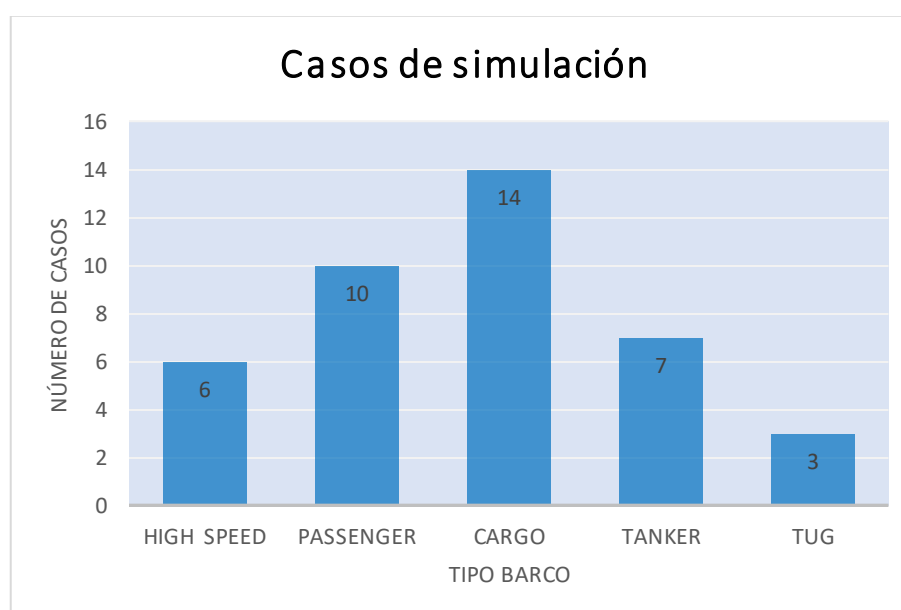


Gráfico 90 Número de casos por tipología

5. Aplicación del modelo a un caso real

Introducción

Siguiendo con lo expuesto en el apartado “*Post-proceso de la base de datos AIS*”, se simulará una de las rutas de entrada de un barco en la zona de estudio. La Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras instaló sensores en varias ubicaciones para la medida del oleaje generado por el paso de embarcaciones, disponiéndose de datos entre el 19 de noviembre de 2015 y el 4 de febrero de 2016.

Mediante el refinado de estos datos, podremos acceder al momento en el cual fue realizado el registro y, consecuentemente, determinar cual fue el barco que causó esa perturbación cuantificada en el sensor.

Posteriormente, empleado la formulación obtenida tras la validación del modelo y, conocidas las características geométricas de la embarcación, además de su velocidad media y de la profundidad, determinaremos los coeficientes α , β y γ necesarios para llevar acabo la simulación.

Finalmente, una vez obtenidos los resultados del modelo numérico, se compararán con los obtenidos en el registro del sensor, habiendo sido éstos filtrados para eliminar en la medida de lo posible el oleaje producido por el viento, tanto onda larga, como onda corta.

Filtrado de los datos de campo

Metodología

Para la obtención del barco a simular se sigue el siguiente proceso:

- Partimos de la serie bruta registrada en el sensor. La serie contendrá tanto el oleaje generado por el viento, como el oleaje producido debido al paso de embarcaciones

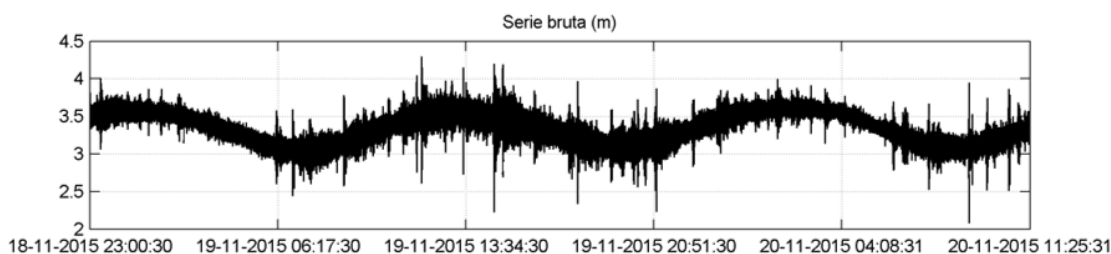


Figura 113 Serie bruta registrada en el sensor

- Se filtra el oleaje de baja frecuencia, obteniéndose una serie final sin bajas frecuencias

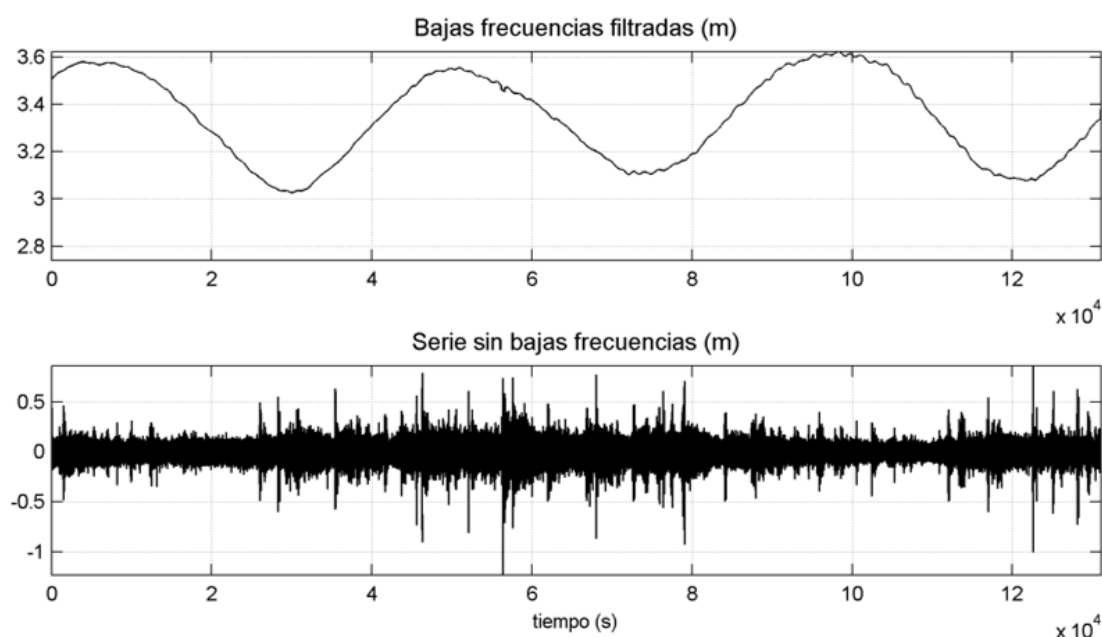


Figura 114 Serie sin bajas frecuencias

- A continuación, se aíslan las franjas de tiempo donde los picos en la altura de ola nos den muestra de la existencia de wake waves.

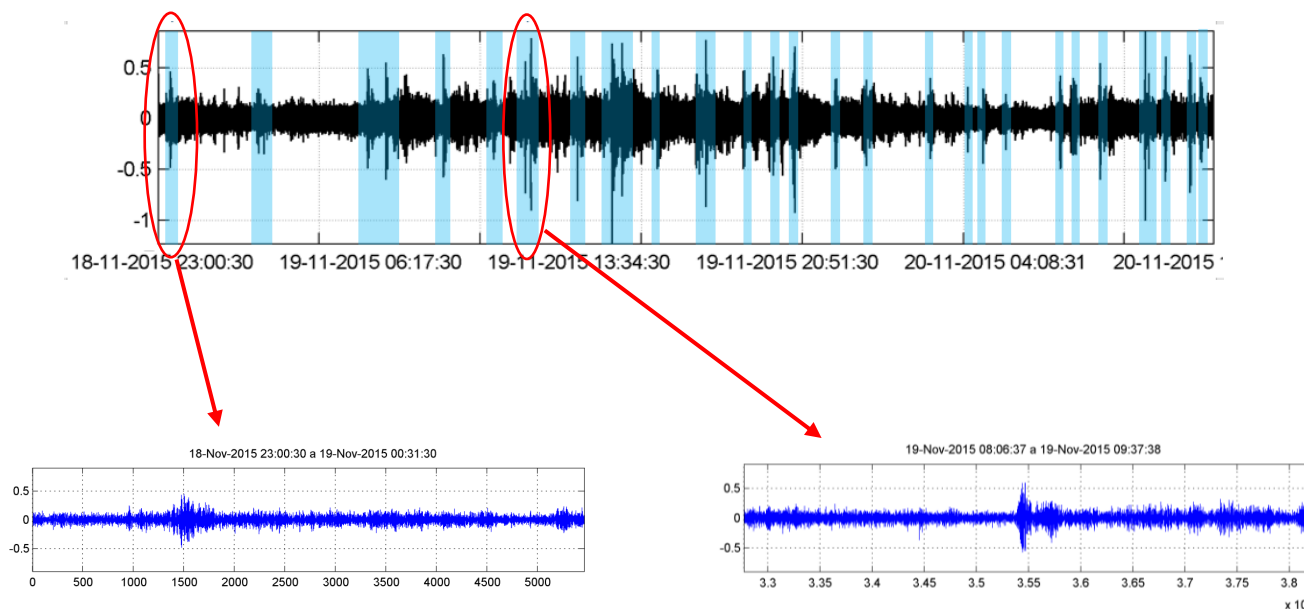


Figura 115 Aislamiento de franjas temporales con presencia de wake waves

- A partir de uno de estos registros, en este ejemplo, el correspondiente al 19 de noviembre, obtenemos un espectro wavelet Periodo vs. Tiempo, donde aislamos los paquetes de energía asociados a las wake waves

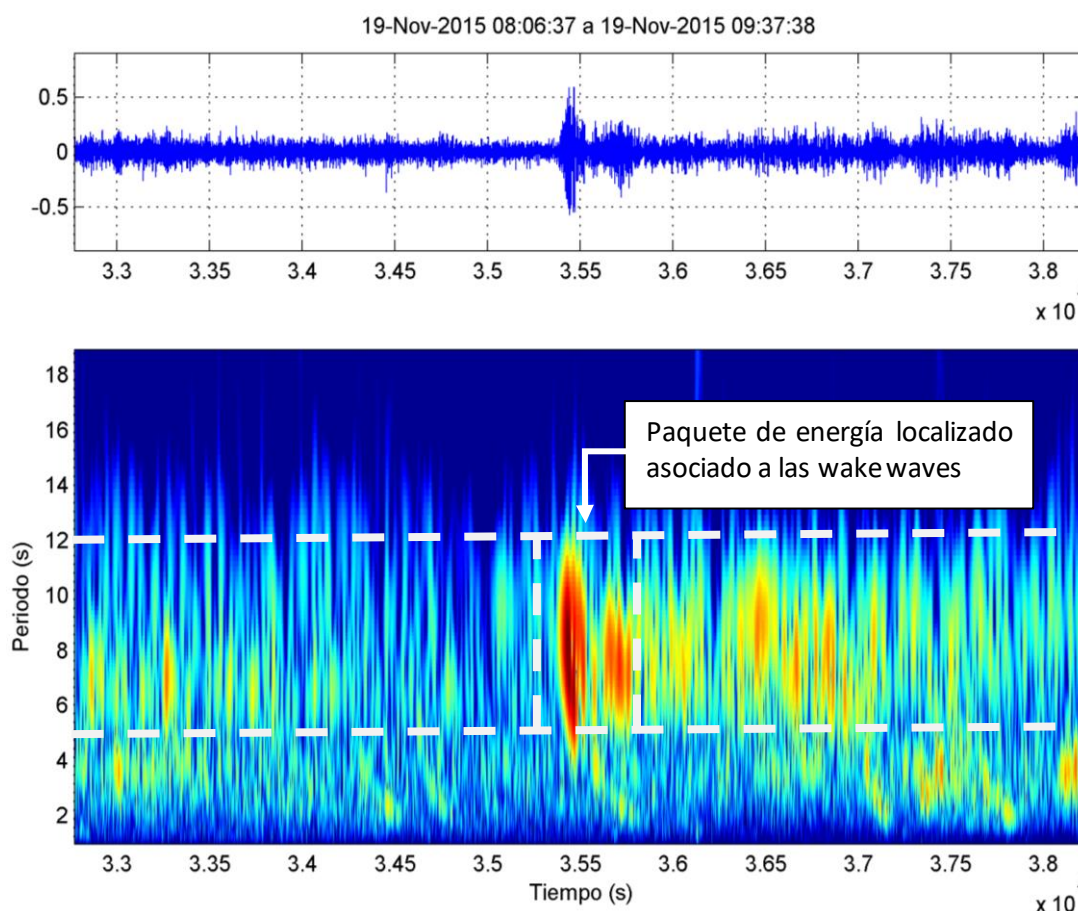


Figura 116 Espectro wavelet

Vemos como la franja de frecuencias en las cuales se encuentra concentrada la energía asociada al oleaje producido por el paso de embarcaciones es la correspondiente al intervalo 5 – 12 segundos

La franja frecuencial situada por debajo de esos 5 segundos es la asociada a un oleaje predominantemente ambiental, formado fundamentalmente por ola de agitación y oleaje local generado por el viento.

- El siguiente paso consiste en filtrar de nuevo la serie para el intervalo de periodos delimitado en el paso anterior, obteniéndose una serie temporal de superficie libre que se asemeja a los resultados que se obtienen con el modelo numérico, donde no se considera el oleaje ambiental.

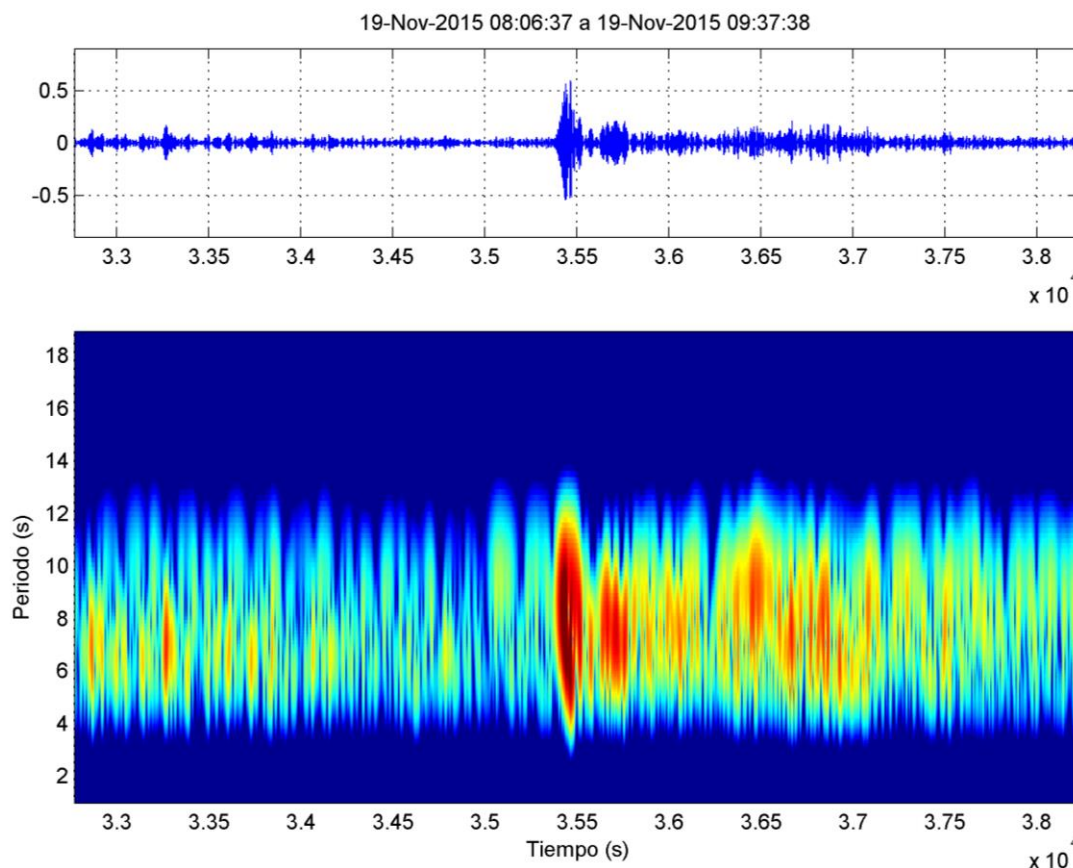


Figura 117 Serie filtrada para el oleaje por paso de embarcaciones

- A partir de la serie filtrada, se localizan los eventos de wake waves. Posteriormente, basándonos en la base de datos AIS, se cruza la fecha de estos eventos con el registro de los barcos que han navegado en las cercanías del punto de medición, obteniendo los posibles barcos generadores del oleaje.

Caso particular a simular

El caso a simular parte de la serie temporal sin bajas frecuencias que va desde el 18 de Noviembre de 2015 a las 23:00:30 hasta el 19 de Noviembre de 2015 a las 00:31:30

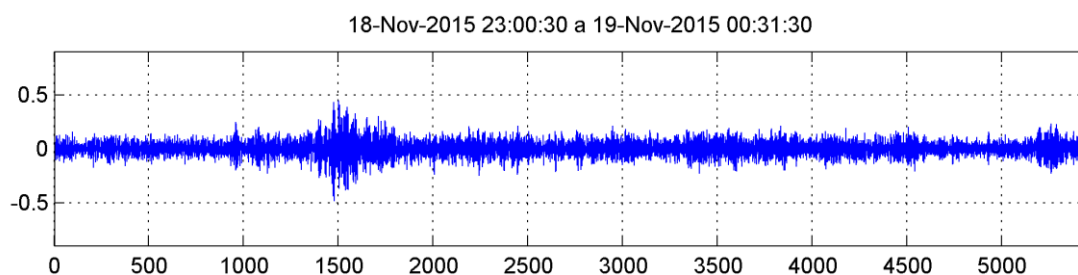


Figura 118 Serie filtrada sin bajas frecuencias

A partir de la serie anterior, y tras el filtrado para la franja de frecuencias asociada al oleaje generado por el paso de embarcaciones, obtenemos la serie a simular:

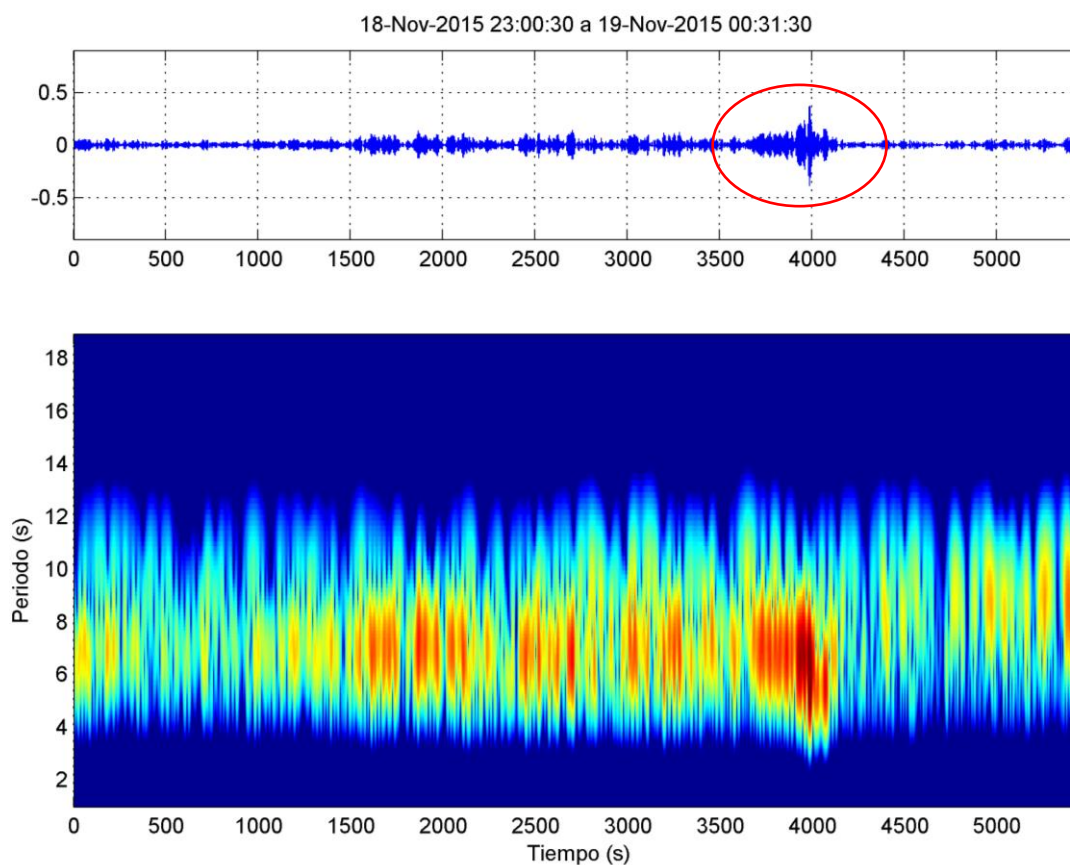


Figura 119 Serie a simular en el modelo

En noviembre de 2015 un total de 632 barcos entraron en la bahía, de todos ellos, 76 coinciden con las fechas del registro seleccionado y, de ese número, 7 han pasado cerca de la posición del sensor.

Nombre	Tipo	MMSI	Eslora	Manga	Calado
Norman Asturias	Passenger/Ro-Ro Cargo Ship	219628000	128,0	26,0	5,8
Passio Per Formentera	Passenger/Ro-Ro Ship	224593000	101,0	17,0	4,2
Las Palmas de GranCan	Passenger/Ro-Ro Cargo Ship	224646000	116,8	20,7	5,0
Avemar Dos	Passenger/Ro-Ro Cargo Ship	224704000	82,0	23,0	2,0
Alboran	High speed craft	224898000	96,0	26,0	3,8
Via Famagusta	Ro-Ro Cargo	225428000	110,0	17,0	4,6
Seacrown 1	Oil Products Tanker	256337000	176,0	31,0	9,8

Finalmente, la embarcación seleccionada para la validación es el barco Alboran, con MMSI 224898000. El criterio considerado para la selección del barco que generó el oleaje registrado en el sensor, ha sido la velocidad de movimiento, si bien es cierto que, en un estudio más detallado sería necesario simular el oleaje producido por las siete embarcaciones seleccionadas para determinar cuál de ellas es la que ha producido la perturbación medida.

Diseño del dominio

Batimetría

Para la ejecución del modelo se carga un archivo con la batimetría de la zona de estudio. No obstante, como se verá más adelante, para la obtención de los parámetros alpha, beta y gamma con los que llevar a cabo la simulación, consideraremos una profundidad media de 30 metros. Se muestran varios renderizados de la batimetría de la Bahía de Algeciras:

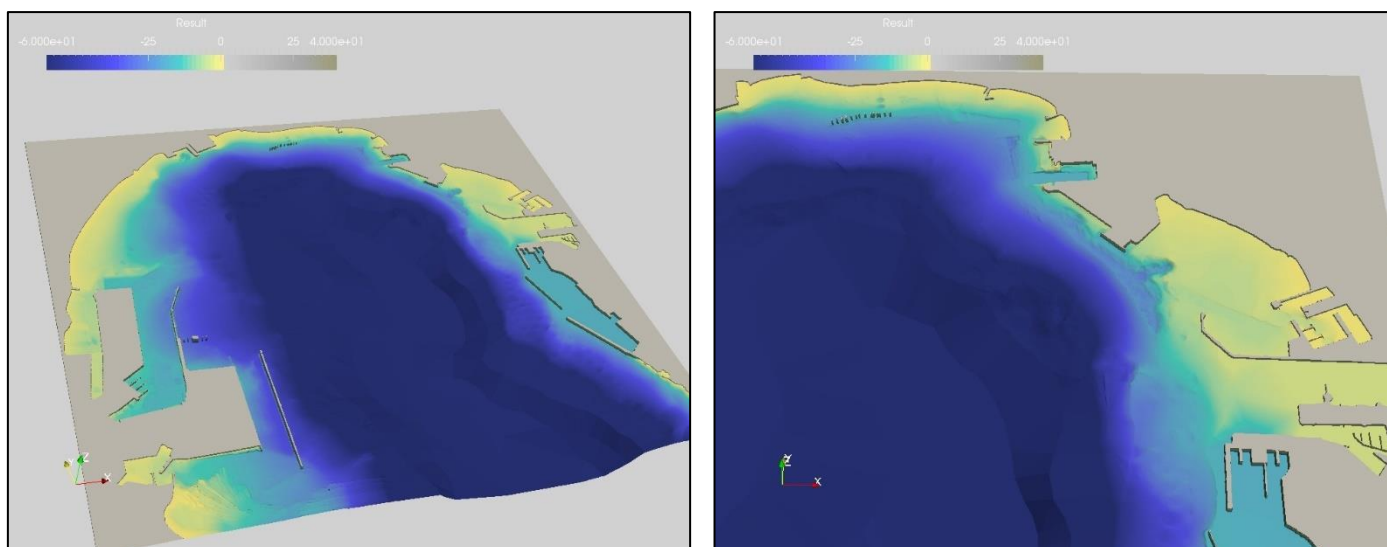


Figura 120 Batimetría de la zona de estudio (1)

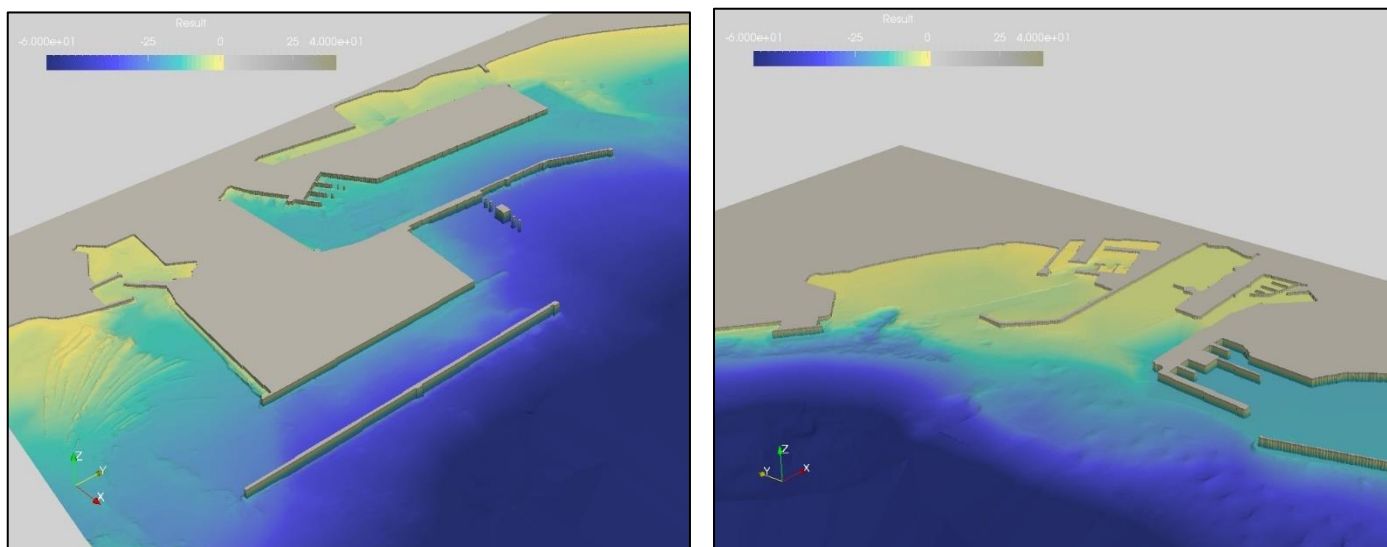


Figura 121 Batimetría de la zona de estudio (2)

Geometría del dominio

En lo que respecta a las medidas del dominio, en la siguiente tabla se exponen las principales dimensiones consideradas:

Longitud (m)	8838,00
Anchura (m)	7896,00
Profundidad (m)	Variable
Dx	3,0
Dy	3,0
M	2946
N	2632
Esponja Este (m)	0,00
Esponja Norte (m)	0,00
Esponja Oeste (m)	0,00
Esponja Sur (m)	150,00

Tabla 104 Características del dominio para la simulación del caso real

Ubicación de los sensores

La Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras instaló cuatro sensores de medición con las ubicaciones que se muestran en la siguiente figura:



Figura 122 Situación de los sensores en la Bahía de Algeciras

Para el caso que nos ocupa se considerará el sensor NSA-00203.

Ejecución

Embarcación a simular

El barco a simular pertenece a la clase HSC (*High Speed Craft*), sus principales características geométricas son las siguientes:

Eslora (m)	96,00
Manga (m)	26,00
Calado (m)	3,80

Tabla 105 Características geométricas del barco a simular

Coeficientes alpha, beta y gamma

Para la obtención de los coeficientes alpha, beta y gamma se emplearán las fórmulas obtuvieron como resultado de la validación del modelo.

Necesitaremos, no sólo de las características geométricas, sino también la velocidad y la profundidad que sigue la embarcación durante su acceso a la bahía. A modo de simplificación, se considerará la velocidad media seguida por el barco, así como la profundidad media.

Los datos necesarios para la obtención de los coeficientes son los siguientes:

Velocidad media (m/s)	5,000
Profundidad media (m)	30,000
Fn_h	0,291
Fn_L	0,163

Parámetro alpha

La fórmula para la obtención del parámetro alpha es la siguiente:

$$\alpha = 0,4243 \cdot \log \frac{L^{Fn_h}}{D} + 0,5933$$

Partiendo del número de Froude dependiente de la profundidad obtenido anteriormente, así como del calado y la eslora del barco, calculamos un valor del factor alpha de **0,993**

Parámetro gamma

La fórmula para la obtención del parámetro gamma es la siguiente:

$$\gamma = 0,2983 \cdot F_L^{-1,217}$$

Partiendo del número de Froude dependiente de la eslora obtenido anteriormente, calculamos un valor del factor gamma de **2,714**

Parámetro beta

Como se vio en la validación del modelo, para todos los casos se considera un valor de beta igual a la unidad

Finalmente, los coeficientes a introducir en el modelo serán:

Alpha	0,993
Beta	1,000
Gamma	2,714

Tabla 106 Parámetros a introducir en el modelo para el caso real

Resultados y validación con datos instrumentales

Resultados

Superficie libre

Tras la ejecución de la simulación se obtuvo el siguiente registro de superficie libre:

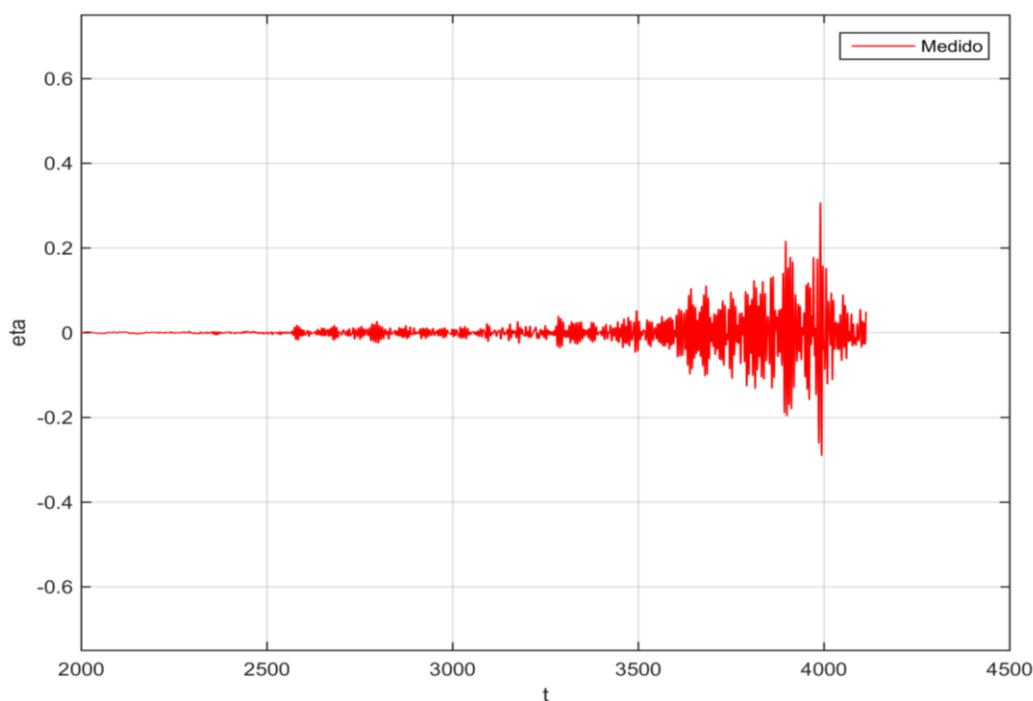


Gráfico 91 Registro de superficie libre obtenido en el modelo (I)

Si centramos el gráfico en la zona donde se genera el pulso asociado a la wake wave, tenemos lo siguiente:

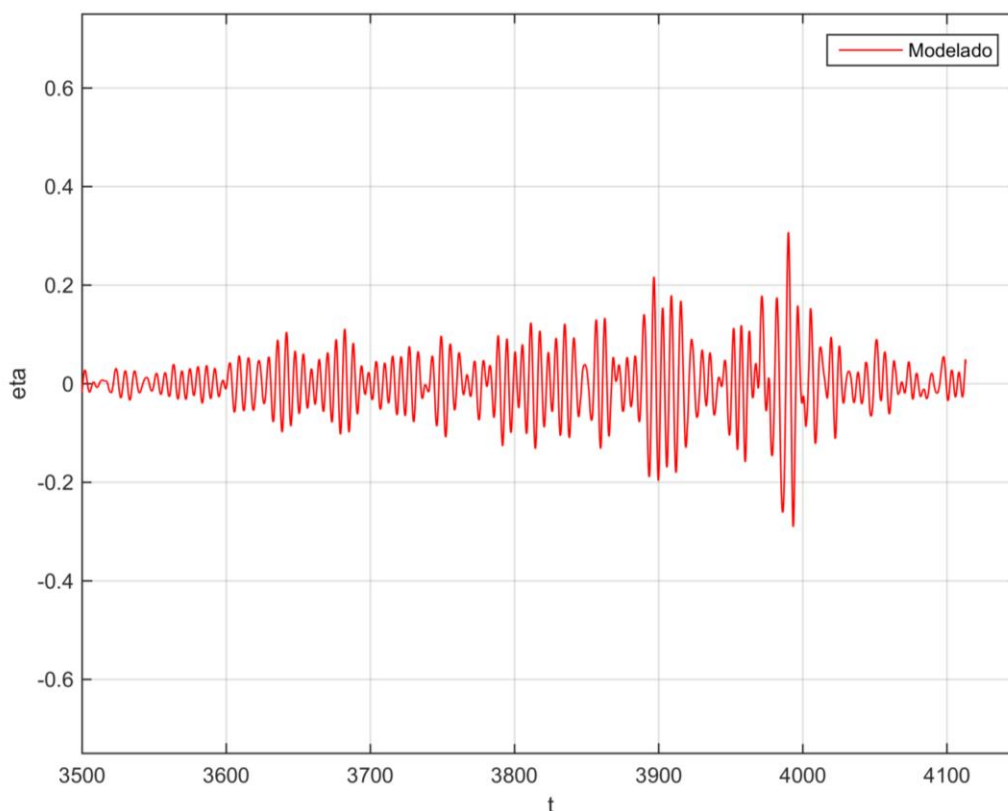


Gráfico 92 Pulso generado por el paso del barco

Altura de ola máxima

En lo que respecta al número de olas y a la altura de ola máxima que se produce, considerando los pasos ascendentes por cero, obtenemos:

$$n^{\circ} \text{ olas} = 99$$

$$H_{max} = 59,82 \text{ cm}$$

Periodo

Para evaluar los resultados, no sólo es importante tener en cuenta la altura de ola generada, sino también los periodos asociados a dicho oleaje. Así pues, a continuación se representa los periodos relativos a cada una de las olas registradas en el sensor, en la franja de tiempo asociado al pulso producido por el paso del barco:

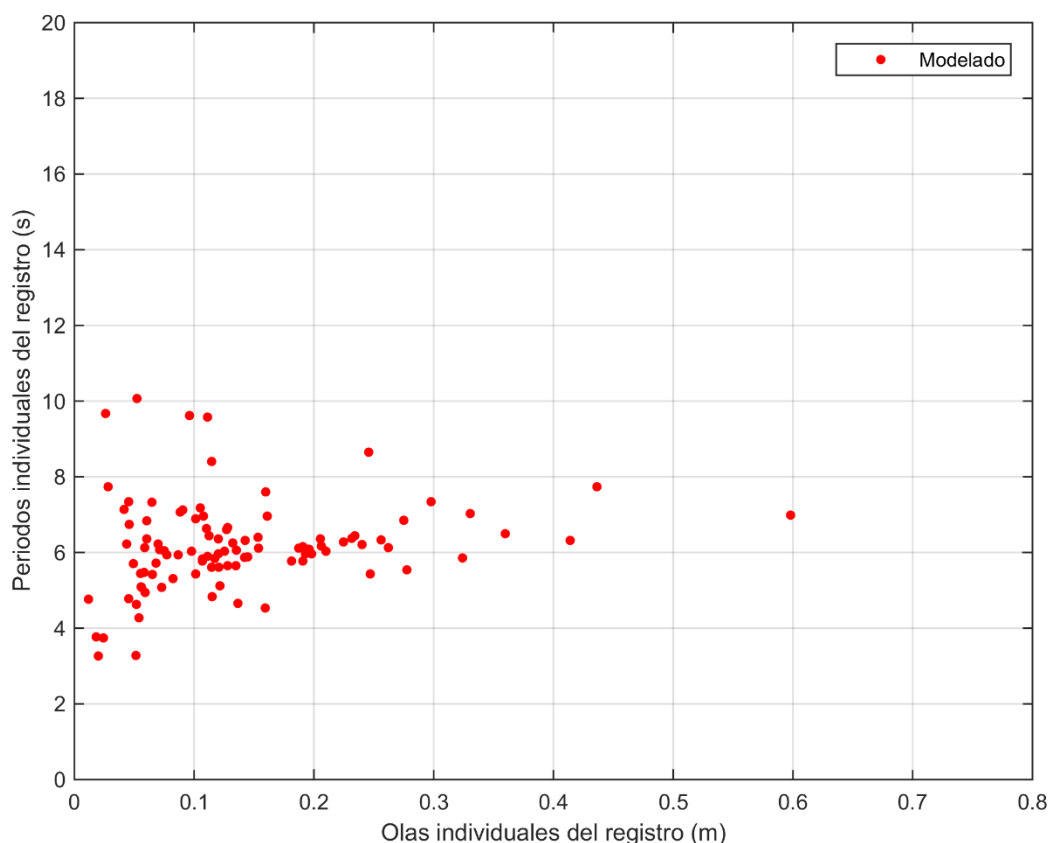


Gráfico 93 Períodos pertenecientes al oleaje modelado

Validación con datos instrumentales

El propósito de este apartado es comparar los datos procedentes del sensor situado en la Bahía de Algeciras y los resultados obtenidos tras llevar a cabo la simulación.

Se obtendrán gráficos comparativos para superficie libre y periodos, y se comparará la altura de ola máxima que se genera en ambos casos.

Finalmente, tras realizar la validación, se extraerán unas conclusiones acerca de la adecuación del modelo para simular el oleaje generado por el paso de embarcaciones, así como de las posibles limitaciones del mismo.

Superficie libre

En el siguiente gráfico se muestra, por un lado, el registro de superficie libre obtenido en el sensor, una vez ha sido filtrado y, por otro, la serie obtenida tras la ejecución del caso en el modelo numérico.

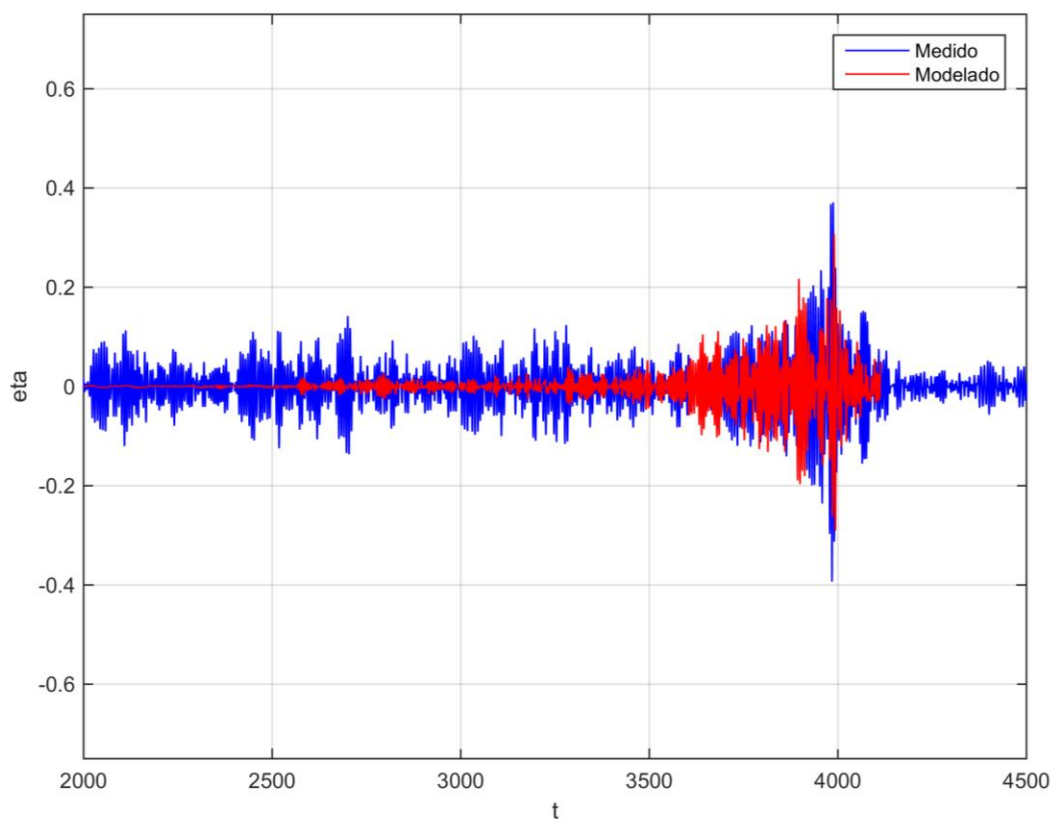


Gráfico 95 Comparativa entre la variación de la superficie libre en el sensor y en el modelo (I)

Ahora, obtenemos el mismo gráfico, pero centrándonos en la zona del pulso generado por la wake wave:

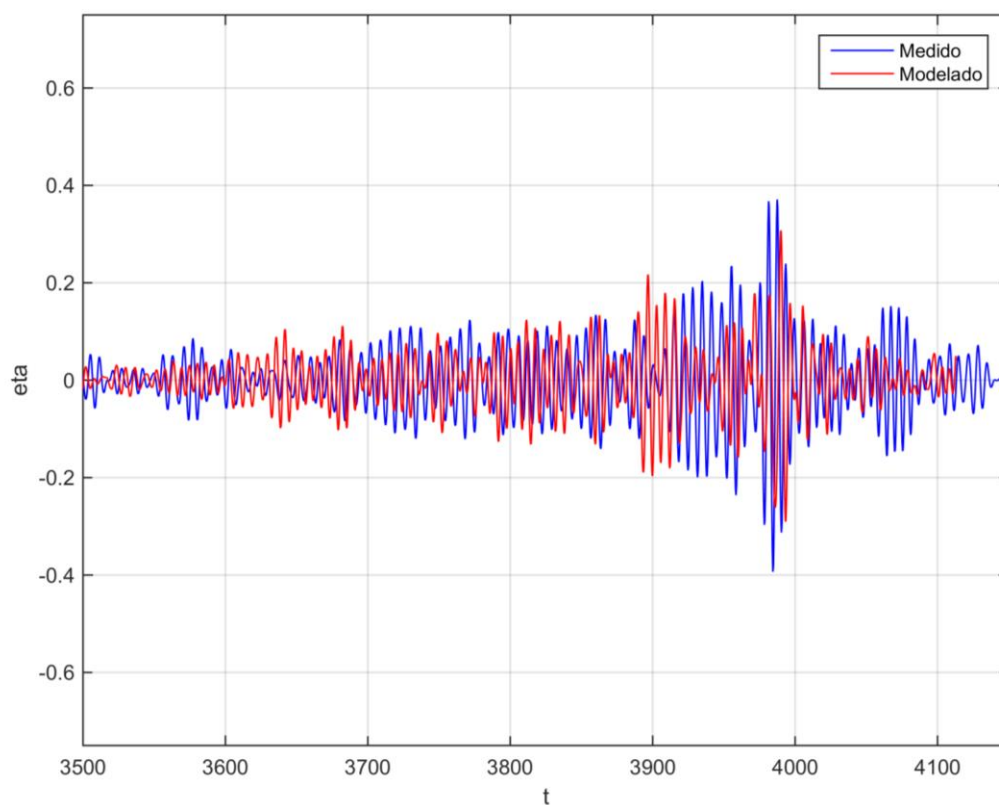


Gráfico 94 Comparativa entre la variación de la superficie libre en el sensor y en el modelo (II)

Podemos ver como en general el ajuste es aceptable, existiendo una tendencia por parte del modelo a subestimar el valor de la altura de ola. No obstante, es necesario mencionar que la serie filtrada a partir de la serie bruta obtenida en el sensor, puede contener aquel oleaje generado por viento con un periodo entre los 5 y los 12 segundos, por lo tanto, no toda la elevación producida es necesariamente consecuencia del paso de la embarcación.

Altura de ola

En lo que respecta al número de olas y la altura de ola máxima, tenemos lo siguiente:

	Sensor real	Modelo
Nº olas	97	99
H _{max} (cm)	76,10	59,82

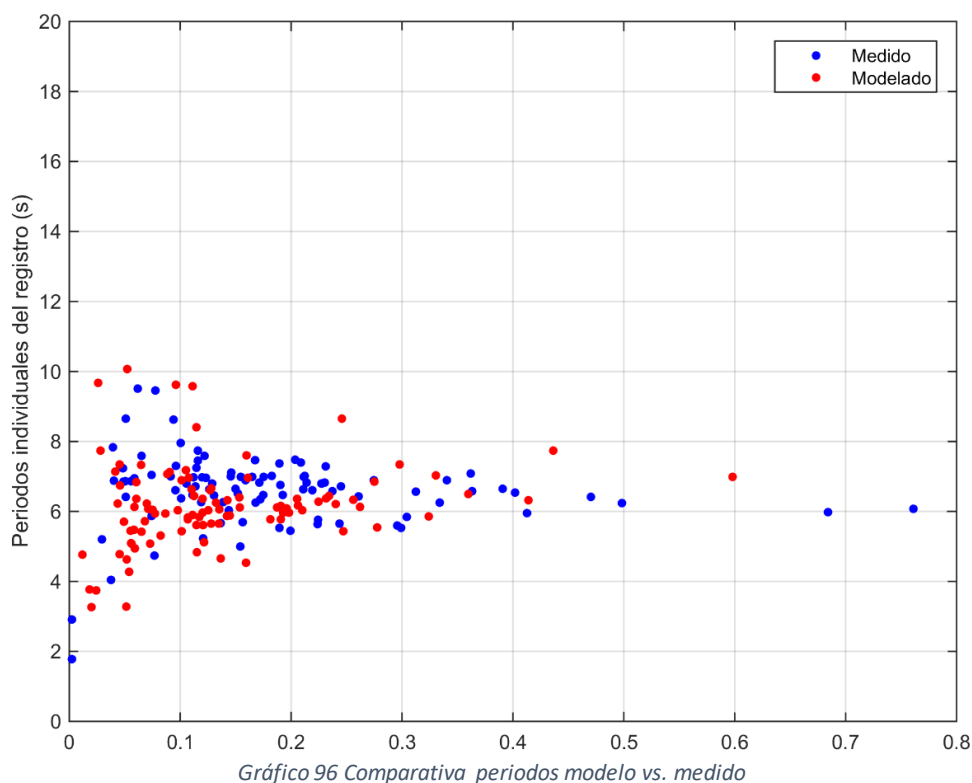
Tabla 107 Comparación altura de ola medido vs. Modelo

El error cometido en la altura de ola máxima es **21,39 %**

Siguiendo con lo expuesto en el apartado anterior, vemos como la altura de ola máxima es superior la obtenida en la medición real que en la simulación.

Periodo

En el siguiente gráfico se compara el periodo del oleaje generado, se muestra el periodo del oleaje medido en el sensor y el periodo del oleaje simulado:



	Sensor real	Modelo
Periodo max (s)	9,51	10,07
Periodo min (s)	1,78	3,27

Tabla 108 Comparación periodo medido vs. Modelo

En el gráfico vemos como el ajuste de los periodos es aceptable. Además, centrándonos en valores concretos, el periodo máximo y mínimo es mayor en ambos casos para el oleaje obtenido tras la simulación.

Conclusiones

Tras la validación del modelo con datos reales se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La correlación entre los datos del modelo y los datos medidos es buena.
- Los periodos de oleaje obtenidos se ajustan de forma satisfactoria a los periodos correspondientes al oleaje registrado en el sensor.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo numérico subestima el valor del oleaje real medido en el sensor.

No obstante, la serie medida contiene también el posible oleaje producido por el viento para un intervalo de periodos entre 5 y 12 segundos, es decir, la limpieza de la serie no es total, luego era esperable que los resultados numéricos fueran algo inferiores a los medidos.

- Para la obtención de los coeficientes alpha, beta y gamma se han considerado a modo de simplificación unos valores medios tanto de velocidad, como de profundidad, obteniendo, por tanto, unos números de Froude constantes. Sin duda esto hace que el resultado de la simulación varíe con respecto al real.
- El caso de simulación que nos ocupa se sitúa en el régimen sub-crítico, con un número de Froude dependiente de la profundidad de entorno a 0,30. Éste régimen está asociado al patrón de oleaje descrito por Kelvin en 1887, es decir, nos encontramos en aguas profundas, entendiendo como tal, que el oleaje generado por los barcos no siente el fondo. El modelo numérico, según lo visto en el apartado “Validación del modelo”, aporta resultados más limpios para un Fn_h superior a 0,60, es decir, a medida que pasamos de un régimen sub-crítico a un régimen cercano al crítico

6. Conclusiones generales

Tras la finalización del trabajo con la obtención de los resultados de simulación y su comparación con el registro del sensor, se ha llegado a las siguientes conclusiones generales acerca del modelo numérico:

- En general, los resultados, obtenidos en la simulación dan muestra de que el modelo numérico tipo Boussinesq permite simular de forma aceptable el oleaje producido por el paso de embarcaciones, permitiendo su empleo para la predicción de la altura de ola generada.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, en general, el modelo numérico subestima el valor del oleaje real medido en el sensor, no obstante, existen, como se ha expuesto a lo largo del documento, varias limitaciones con las que se ha llevado a cabo la simulación que pueden influir en la obtención de resultados inferiores al original
- Las fórmulas obtenidas para el cálculo de los factores alpha y gamma, hacen posible el empleo del modelo para cualquier batimetría y para cualquier embarcación, conocidas previamente las características geométricas del barco, la batimetría y los patrones de movimiento del mismo, siendo éste uno de los principales objetivos que se pretendía con la realización de este trabajo.
- La totalidad de barcos que entran operan en un emplazamiento, como puede ser la Bahía de Algeciras, pueden ser representados a partir de un número limitado de casos, mediante el tratamiento de la información procedente de la base de datos AIS según la metodología descrita.



7. *Futuras líneas de investigación*

A continuación se plantean posibles líneas de investigación futuras relacionadas con el oleaje generado por embarcaciones:

- Analizar la posible influencia del factor beta en la generación de wake waves, no sólo considerar alpha y gamma.
- Dado el creciente empleo de barcos de tipología HSC, y la gran velocidad de movimiento de los mismos, realizar un estudio específico para este tipo de embarcaciones, teniendo en cuenta su geometría tipo catamarán.
- Estudio de las wake waves generadas por embarcaciones en función de la geometría del casco, no teniendo en cuenta solamente la geometría global, es decir, eslora, calado y manga, sino también los coeficientes de forma del casco ya que, como se ha demostrado en algunos estudios, ésta tiene influencia sobre el oleaje generado.
- Discretizar el estudio en regímenes de movimiento (sub-crítico, cercano al crítico y súper crítico), para alcanzar una mayor precisión.
- Analizar la posibilidad de introducir las fórmulas para la obtención de los coeficientes de calibración en el modelo numérico de forma que, dado que la velocidad y la profundidad varían a lo largo de la trayectoria, discretizar ésta en tramos, obteniendo coeficientes distintos en cada tramo, y aumentando la precisión en la simulación de las wake waves.
- Realizar ensayos de laboratorio controlados con la finalidad de validar la herramienta numérica de forma más exhaustiva.



8. Referencias

- Abdul Ghani, M. P., & Abdulrahim, M. A. (2006). *Investigation of wake wash in towing tank*.
- All American Marine Incorporated. (2002). *M/V Condor Express - Wake wash measurement trials*.
- Althage, J. (2010). *Ship-induced waves and sediment transport in Göta River, Sweden*.
- Bhowmik, N. G., Demissie, M., & Guo, C.-Y. (1982). *Waves generated by river traffic and wind on the Illinois and Mississippi Rivers*.
- Bruno, M., Fullerton, B., & Datla, R. (2002). *Technical Report SIT-DL-02-9-2812*.
- Cheng, J. S., Smaoui, H., & Sergent, P. (2012). *3-D numerical simulation of convoy-generated waves in a restricted waterway*.
- Day, A. H., Clelland, D., & Beveridge, P. (2010). *Wave generation of a compartmented surface-effect ship*.
- Duncan Hay, M. S. (1968). *Ship waves in navigable waterways*.
- Jiang, T., Henn, R., & Sharma, S. D. (2002). *Wash waves generated by ships moving on fairways of varying topography*.
- Johnson, J. W. (1957). *Ship waves in shoaling waters*.
- Kirkegaard, J., Kofoed-Hansen, H., & Elfrink, B. (1998). *Wake wash of high-speed craft in coastal areas*.
- Kriebel, D., Seelig, W., & Judge, C. (2003). *Development of a unified description of ship-generated waves*.
- Kurata, K., & Oda, K. (1984). *Ship waves in shallow water and their effects on moored small vessel*.
- Kurennoy, D., Soomere, T., & Parnell, K. E. (2009). *Variability in the properties of wakes generated by high-speed ferries*.
- Maritime Navigation Commission. (1885). *Guidelines for managing wake wash from high-speed vessels*.
- Molland, A. F., Wilson, P. A., & Taunton, D. J. (2002). *Theoretical prediction of the characteristics of ship generated near-field wash waves*.
- Nece, R. E., McCaslin, M. R., & Christensen, D. R. (1985). *Ferry wake study*.
- Ohashi, K., Hasegawa, J., & Fukasawa, R. (2008). *Numerical simulation of high speed ship wash waves*.
- Olivieri, A., Pistani, F., Avanzini, A., Stern, F., & Penna, R. (2001). *Towing tank experiments of resistance, sinkage and trim, boundary layer, wake, and free surface flow around a naval combatant INSEAN 2340 Model*.
- Osborne, P. D., Henricks, D. B., & Côté, J. M. (2007). *Full-scale measurements of high speed passenger ferry performance and wake signature*.



- Pullar, A., & Single, M. (2009). *Vessel effects as a result of a deeper channel in the Lower Otago Harbour*.
- Ratcliffe, T. J., & Lindenmuth, W. T. (1990). *Kelvin wake measurements obtained on five surface ship models*.
- Shiotani, S. (2010). *Measurement and estimation of waves generated by a small ship in port*.
- Sireli, E. M. (2002). *An interim model to predict maximum wave heights of low speed displacement mono-hull ships*.
- Sorensen, R. M. (1997). *Prediction of vessel-generated waves with reference to vessels common to the Upper Mississippi River system*.
- Sorensen, R. M., & Weggel, J. R. (1984). *Development of ship wave design information*.
- Stumbo, S. (2000). *An assessment of wake wash reduction of fast ferries at supercritical Froude numbers and at optimized trim*.
- Torsvik, T., & Soomere, T. (2008). *Simulation of patterns of wakes from high-speed ferries in Tallin Bay*.
- Whittaker, J. T., Doyle, R., & Elsaber, B. (2001). *An experimental investigation of the physical characteristics of fast ferry wash*.

FICHA CASO Nº: 1**Anejo 1 - Fichas de calibración****CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO**Autor/es: Abdul Ghani, M.P.Tipo de experimento: Ensayo de laboratorio

Abdul Rahim, M.N.

Características del tanque:

University of Technology, Malaysia

Longitud: 120,00 m /Anchura: 4,00 m /Profundidad: 0,30 m

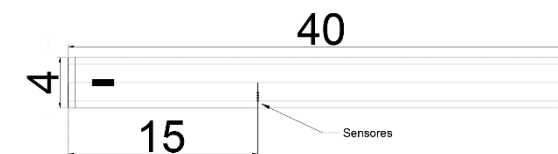
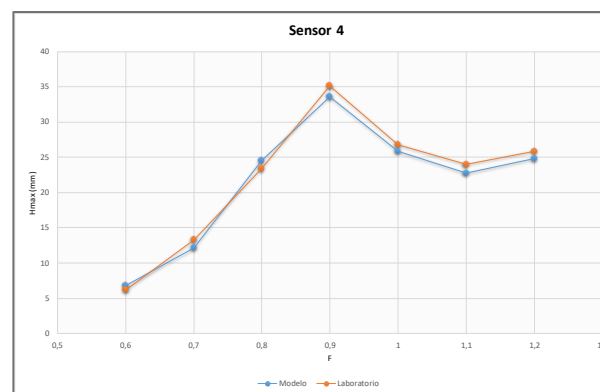
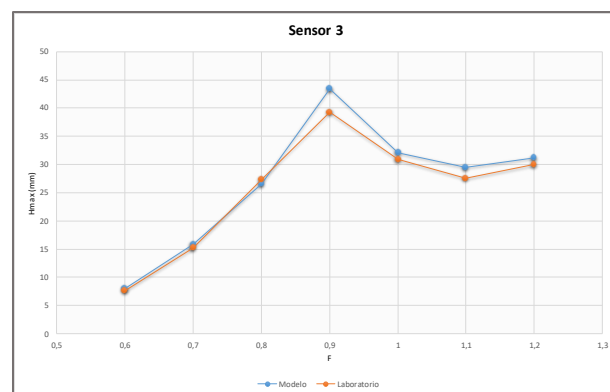
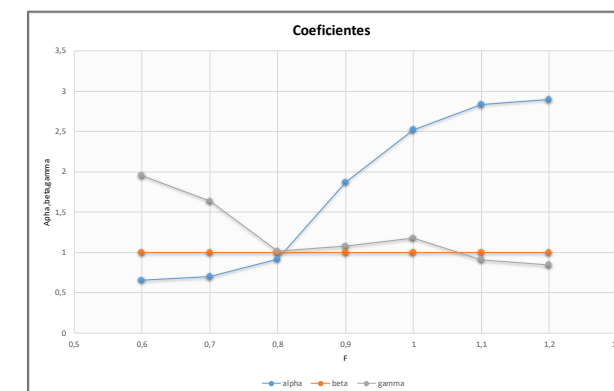
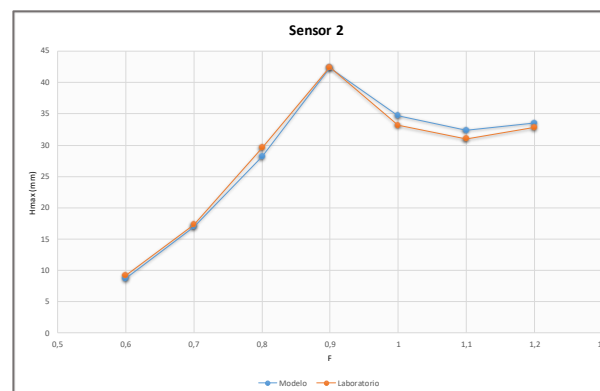
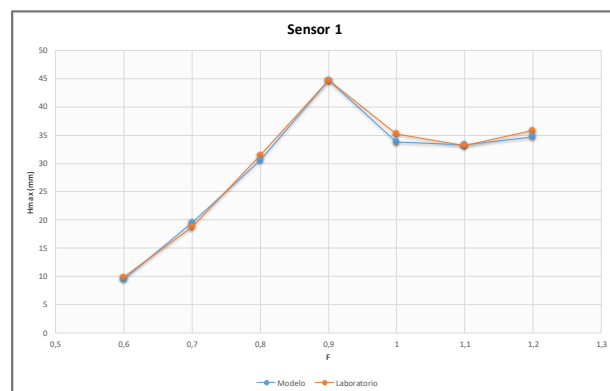
Año: 2006Características de la embarcación:

Eslora: 1,71 m /Manga: 0,48 m /Calado: 0,119 m /Escala: 1:8,75

Velocidad: 1,030 – 2,060 m/s

DATOS DEL MODELO $Dx = 0,1$; $Dy = 0,1$ $M = 400$; $N = 4$

Anchura esponja: 0,55 m

**RESULTADOS**

FICHA CASO Nº: 2**CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO**Autor/es: Shiotani, S.

Kobe University

Año: 2010Tipo de experimento: Ensayo de campoCaracterísticas del área:

Profundidad: 20,00 m

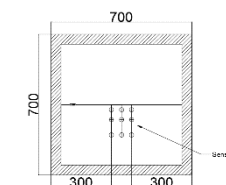
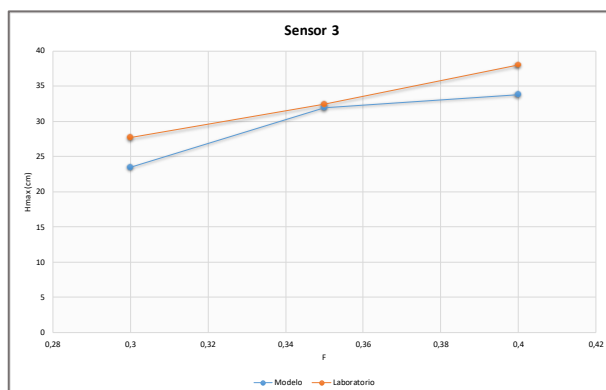
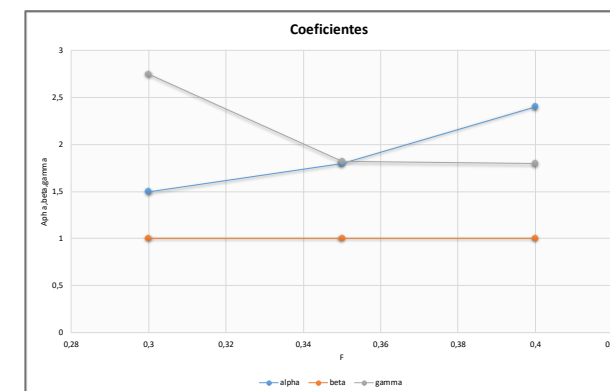
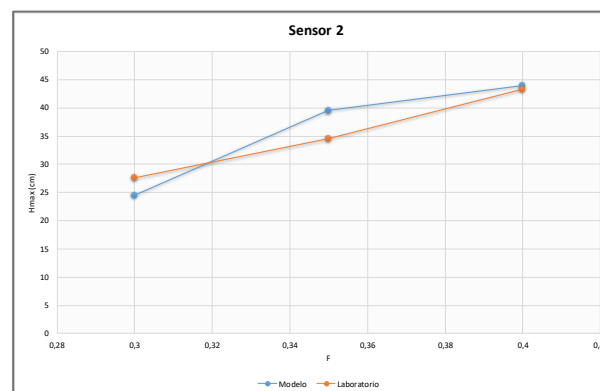
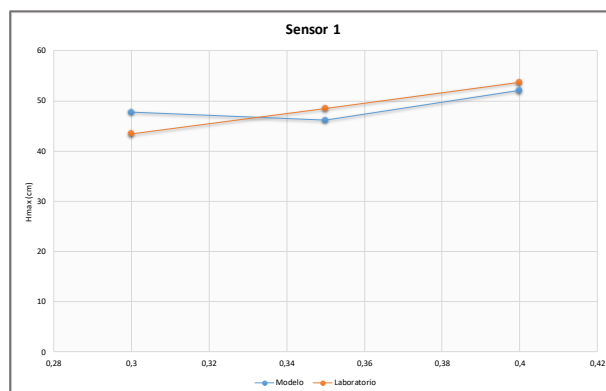
Características de la embarcación:

Eslora: 31,375 m /Manga: 8,755 m /Calado: 2,775 m

Velocidad: 4,200 – 5,600 m/s

DATOS DEL MODELO $Dx = 2,0$; $Dy = 2,0$ $M = 350$; $N = 350$

Anchura esponja: 50 m

**RESULTADOS**

FICHA CASO Nº: 3**CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO**Autor/es: Johnson, J.W.

University of California

Año: 1957Tipo de experimento: Ensayo de laboratorioCaracterísticas del tanque:

Longitud: No esp. /Anchura: No esp./ Profundidad: 0,158 m

Características de la embarcación:

Eslora: 1,010 m /Manga: 0,290 m /Calado: 0,040 m

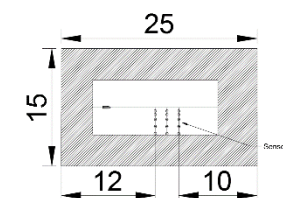
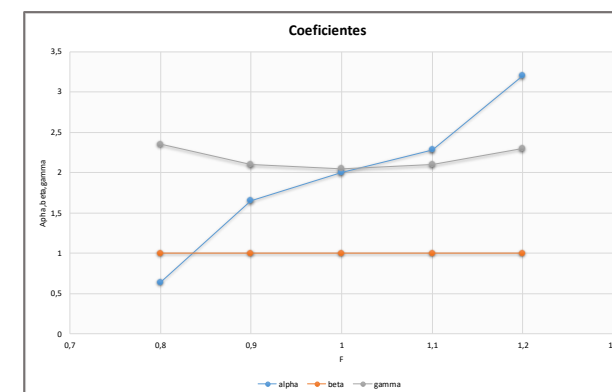
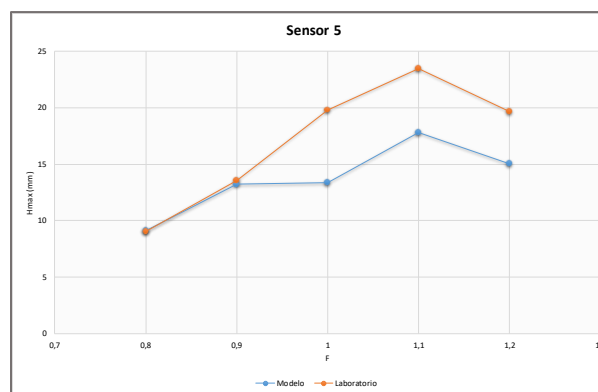
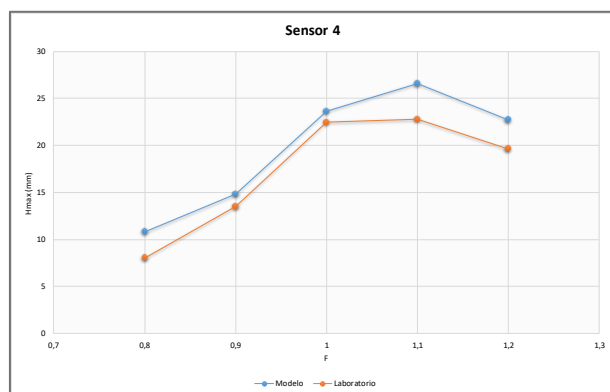
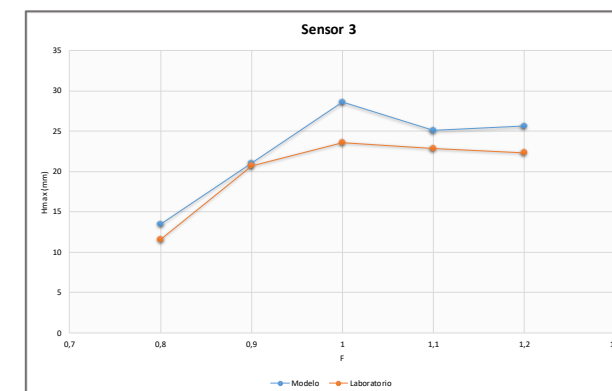
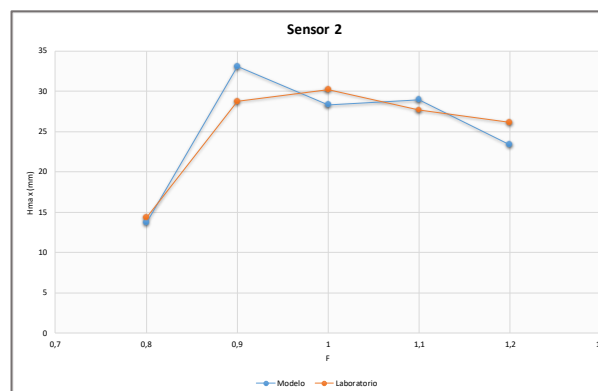
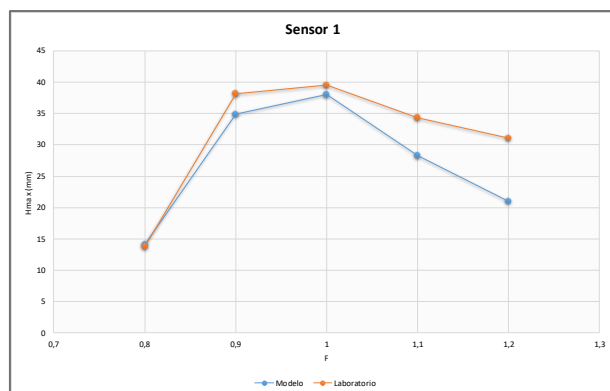
Velocidad: 0,998 – 1,496 m/s

DATOS DEL MODELO $Dx = 0,05$; $Dy = 0,05$ $M = 500$; $N = 300$

Anchura esponja:

Norte: 3,00 m, Este: 4,00 m

Sur: 3,00 m, Oeste: 3,00 m

**RESULTADOS**

FICHA CASO Nº: 4**CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO**Autor/es: All American Marine Incorporated

Teknicraft Design

Año: 2002Tipo de experimento: Ensayo de campoCaracterísticas del área:

Profundidad: 18,00 m

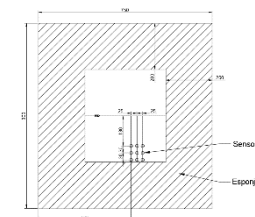
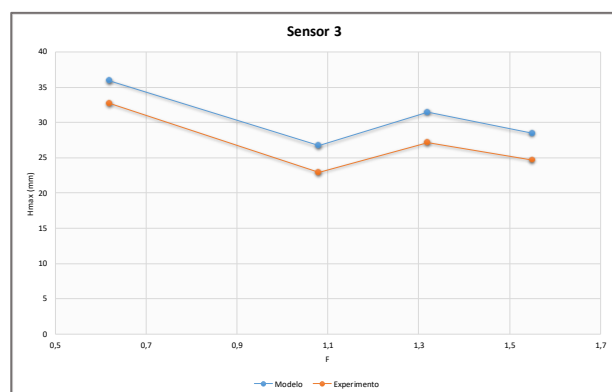
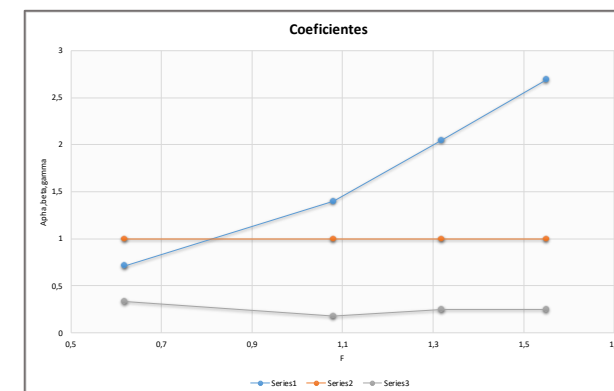
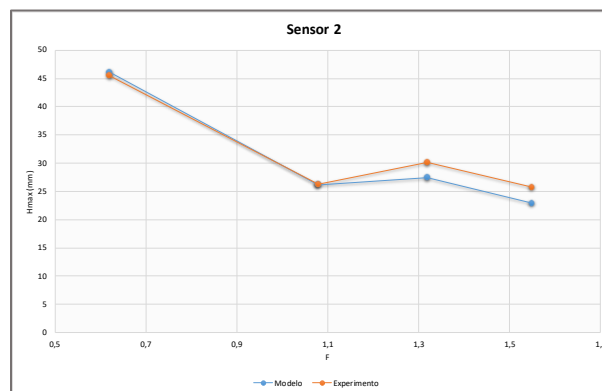
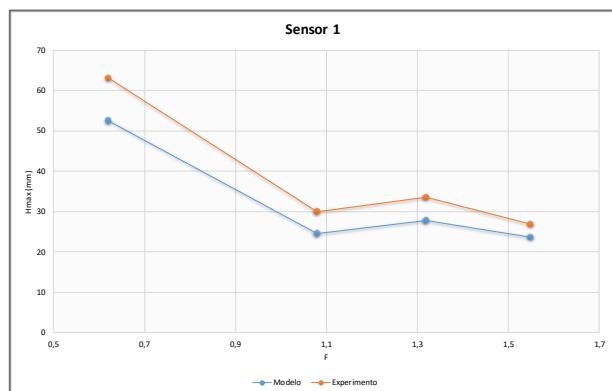
Características de la embarcación:

Eslora: 19,75 m /Manga: 8,08 m /Calado: 1,00 m

Velocidad: 8,231 – 20,578 m/s

DATOS DEL MODELO $Dx = 2,0$; $Dy = 2,0$ $M = 375$; $N = 400$

Anchura esponja: 200 m

**RESULTADOS**

FICHA CASO Nº: 5**CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO**Autor/es: Nece, R.E.Tipo de experimento: Ensayo de campo

McCaslin, M.R.

Características del área:

Christensen, D.R.

Profundidad: 94,49 m

Washington State Transportation
CenterCaracterísticas de la embarcación:

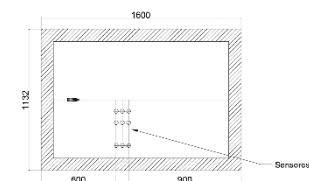
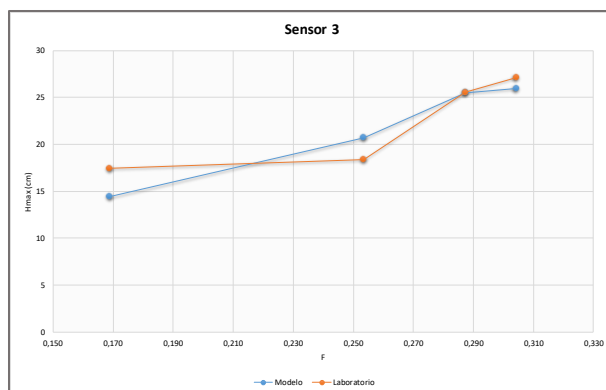
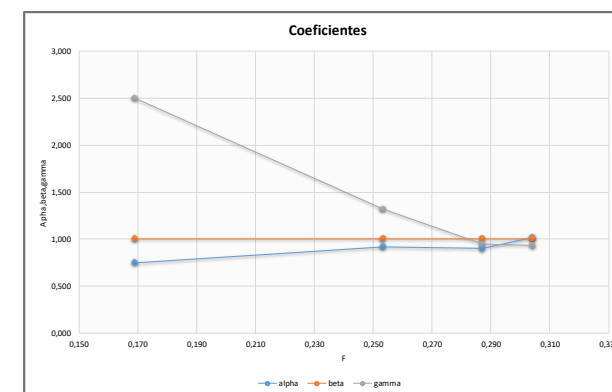
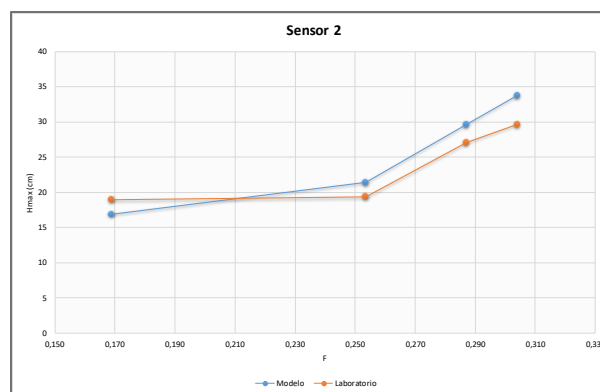
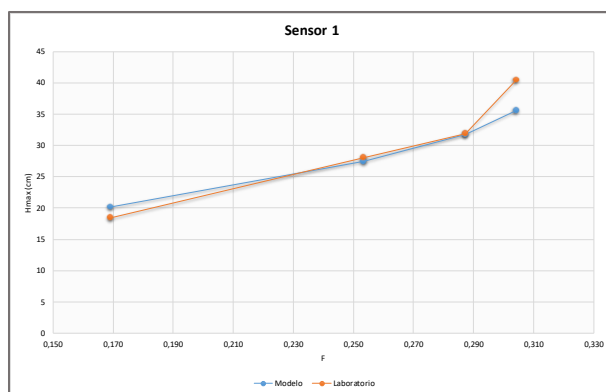
Eslora: 100 m /Manga: 24 m /Calado: 4,70 m

Año: 1985

Velocidad: 5,144 – 9,260 m/s

DATOS DEL MODELO $Dx = 4,0$; $Dy = 4,0$ $M = 400$; $N = 283$

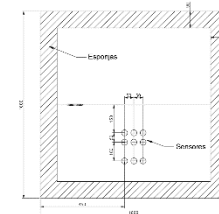
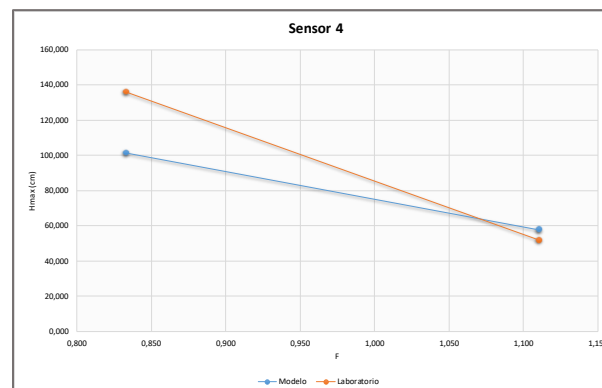
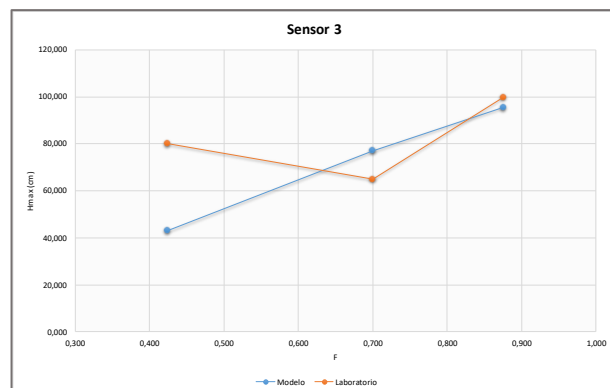
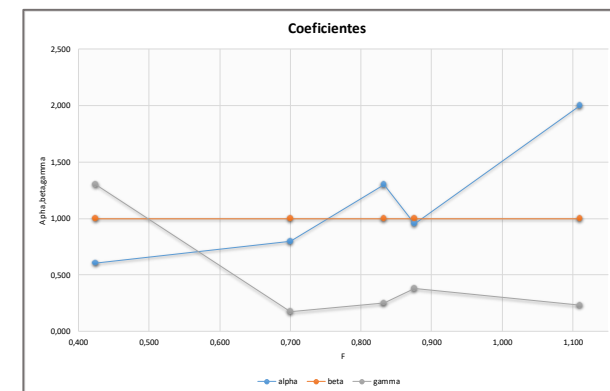
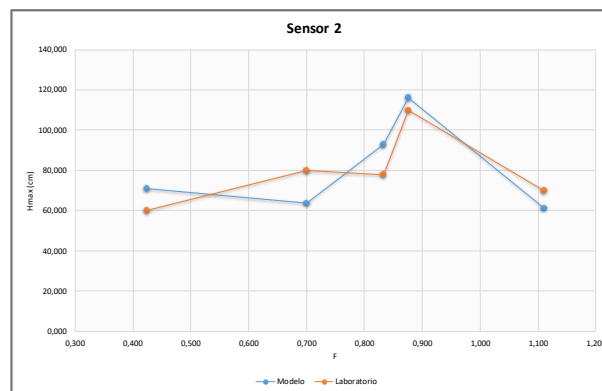
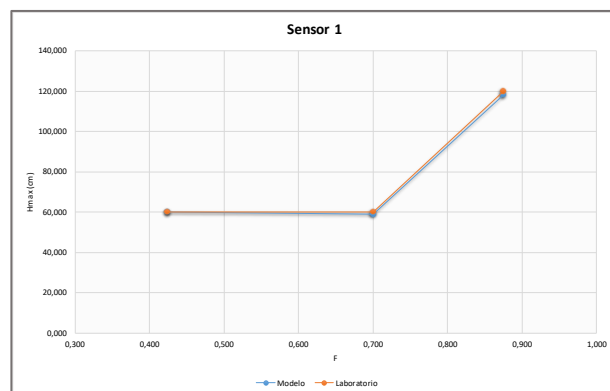
Anchura esponja: 100 m

**RESULTADOS**

FICHA CASO Nº:6**CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO**Autor/es: Varyani, K.S.Tipo de experimento: Ensayo de campo/teoría analticaAño: 2005Características del área:Profundidad (m): 15,00 (F_h^1) / 22,00 (F_h^2, F_h^4) / 35,00 (F_h^3, F_h^5)Características de la embarcación:

Eslora: 86,31 m /Manga: 9,00 m /Calado: 3,91 m

Velocidad: 5,144 – 20,578 m/s

DATOS DEL MODELO $Dx = 2,0$; $Dy = 2,0$ $M = 500$; $N = 500$ (F_h^1, F_h^2, F_h^4) $M = 675$; $N = 900$ (F_h^3, F_h^5)Anch. esponja: 90 m (F_h^1, F_h^2, F_h^4)Anch. esponja: 200 m (F_h^3, F_h^5)**RESULTADOS**



Anejo 2- Scripts

CargarZonas.m

```
%%DESCRIPCIÓN GENERAL
    %cargar los contornos de las zonas de estudio a partir
    %de las coordenadas exportadas desde AutoCAD

%%
load('zona1.txt');
    XZ=zona1(:,1);
    YZ=zona1(:,2);
    Z1UTM=['30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S';'30 S'];
    [LatZ1,LonZ1]=utm2deg(XZ,YZ,Z1UTM);
load('zona2.txt');
    XZ=zona2(:,1);
    YZ=zona2(:,2);
    Z2UTM=['30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S'];
    [LatZ2,LonZ2]=utm2deg(XZ,YZ,Z2UTM);
load('zona3.txt');
    XZ=zona3(:,1);
    YZ=zona3(:,2);
    Z3UTM=['30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S'];
    [LatZ3,LonZ3]=utm2deg(XZ,YZ,Z3UTM);
load('zona4.txt');
    XZ=zona4(:,1);
    YZ=zona4(:,2);
    Z4UTM=['30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S'];
    [LatZ4,LonZ4]=utm2deg(XZ,YZ,Z4UTM);
load('zona5.txt');
    XZ=zona5(:,1);
    YZ=zona5(:,2);
    Z5UTM=['30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S'];
    [LatZ5,LonZ5]=utm2deg(XZ,YZ,Z5UTM);
load('zona6.txt');
    XZ=zona6(:,1);
    YZ=zona6(:,2);
    Z6UTM=['30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S';'30 S'];
    [LatZ6,LonZ6]=utm2deg(XZ,YZ,Z6UTM);
load('zona7.txt');
    XZ=zona7(:,1);
    YZ=zona7(:,2);
    Z7UTM=['30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30
S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S';'30 S'];
    [LatZ7,LonZ7]=utm2deg(XZ,YZ,Z7UTM);
```



CargarCentroides.m

```
%%DESCRIPCIÓN GENERAL
    %cargar los centroides de cada zona a partir
    %de las coordenadas exportadas desde AutoCAD

%%
%centroide 1
load('centroides.txt');
Xcent1=centroides(1,1);
Ycent1=centroides(1,2);
Cent1UTM=['30 S'];
[LatCent1,LonCent1]=utm2deg(Xcent1,Ycent1,Cent1UTM);
%centroide 2
load('centroides.txt');
Xcent2=centroides(2,1);
Ycent2=centroides(2,2);
Cent2UTM=['30 S'];
[LatCent2,LonCent2]=utm2deg(Xcent2,Ycent2,Cent2UTM);
%centroide 3
load('centroides.txt');
Xcent3=centroides(3,1);
Ycent3=centroides(3,2);
Cent3UTM=['30 S'];
[LatCent3,LonCent3]=utm2deg(Xcent3,Ycent3,Cent3UTM);
%centroide 4
load('centroides.txt');
Xcent4=CONTORNOEXT(4,1);
Ycent4=CONTORNOEXT(4,2);
Cent4UTM=['30 S'];
[LatCent4,LonCent4]=utm2deg(Xcent4,Ycent4,Cent4UTM);
%centroide 5
load('centroides.txt');
Xcent5=centroides(5,1);
Ycent5=centroides(5,2);
Cent5UTM=['30 S'];
[LatCent5,LonCent5]=utm2deg(Xcent5,Ycent5,Cent5UTM);
%centroide 6
load('centroides.txt');
Xcent6=centroides(6,1);
Ycent6=centroides(6,2);
Cent6UTM=['30 S'];
[LatCent6,LonCent6]=utm2deg(Xcent6,Ycent6,Cent6UTM);
%centroide 7
load('centroides.txt');
Xcent7=centroides(7,1);
Ycent7=centroides(7,2);
Cent7UTM=['30 S'];
[LatCent7,LonCent7]=utm2deg(Xcent7,Ycent7,Cent7UTM);
```



NbarcosZona.m

```
%%DESCRIPCIÓN GENERAL
    %A partir de los ficheros MATs de todos los barcos (xxxx.mat) se
    estudia el número
    %de ellos que entran en cada zona.
    %El procedimiento se basa en comprobar si, al menos uno de los
    eventos registrados
    %en cada barco, se encuentra dentro del contorno que define cada
    una de las siete
    %áreas de estudio obtenidas en el apartado anterior.

%%
clear all
clc
Ficheros=importdata('Lista.xlsx');
CargarZonas %Cargar la geometría de las 7 zonas importadas desde
AutoCad
%Determinar el número total de barcos que entran en cada zona
contador1=0;contador2=0;contador3=0;contador4=0;contador5=0;contador6=
0;contador7=0;
for i=1:length(Ficheros)
    load(Ficheros{i}); %Cargar los barcos uno a uno
    X=AIS_tot.Lon;
    Y=AIS_tot.Lat;
    X=char(X);
    X=str2num(X);
    Y=char(Y);
    Y=str2num(Y);

    %Zona1-->

    %Copiar en un notepad los nombres de los barcos que
    %alguna vez pasan por dentro de la zona 1

    textol=fopen('BarcosZona1.txt','at');
    textolbis=fopen('BarcosZona1(mat).txt','at');
    for j=1:length(X)
        a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ1,LatZ1);
        if a==1
            contador1=contador1+1;
            b=Ficheros{i};
            nombreBarco=b(1:(length(b)-4));
            c=strcat(nombreBarco,'\n');
            fprintf(textol,c);
            d=strcat(Ficheros{i},'\n');
            fprintf(textolbis,d);
            break
        end
    end

    %Zona2
    texto2=fopen('BarcosZona2.txt','at');
    texto2bis=fopen('BarcosZona2(mat).txt','at');
    for j=1:length(X)
        a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ2,LatZ2);
        if a==1
            contador2=contador2+1;
            b=Ficheros{i};
            nombreBarco=b(1:(length(b)-4));
```



```
c=strcat(nombreBarco, '\n');
fprintf(texto2,c);
d=strcat(Ficheros{i}, '\n');
fprintf(texto2bis,d);
break
end
end

%Zona3
texto3=fopen('BarcosZona3.txt','at');
texto3bis=fopen('BarcosZona3(mat).txt','at');
for j=1:length(X)
    a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ3,LatZ3);
    if a==1
        contador3=contador3+1;
        b=Ficheros{i};
        nombreBarco=b(1:(length(b)-4));
        c=strcat(nombreBarco, '\n');
        fprintf(texto3,c);
        d=strcat(Ficheros{i}, '\n');
        fprintf(texto3bis,d);
        break
    end
end

%Zona4
texto4=fopen('BarcosZona4.txt','at');
texto4bis=fopen('BarcosZona4(mat).txt','at');
for j=1:length(X)
    a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ4,LatZ4);
    if a==1
        contador4=contador4+1;
        b=Ficheros{i};
        nombreBarco=b(1:(length(b)-4));
        c=strcat(nombreBarco, '\n');
        fprintf(texto4,c);
        d=strcat(Ficheros{i}, '\n');
        fprintf(texto4bis,d);
        break
    end
end

%Zona5
texto5=fopen('BarcosZona5.txt','at');
texto5bis=fopen('BarcosZona5(mat).txt','at');
for j=1:length(X)
    a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ5,LatZ5);
    if a==1
        contador5=contador5+1;
        b=Ficheros{i};
        nombreBarco=b(1:(length(b)-4));
        c=strcat(nombreBarco, '\n');
        fprintf(texto5,c);
        d=strcat(Ficheros{i}, '\n');
        fprintf(texto5bis,d);
        break
    end
end

%Zona6
```



```
texto6=fopen('BarcosZona6.txt','at');
texto6bis=fopen('BarcosZona6(mat).txt','at');
for j=1:length(X)
    a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ6,LatZ6);
    if a==1
        contador6=contador6+1;
        b=Ficheros{i};
        nombreBarco=b(1:(length(b)-4));
        c=strcat(nombreBarco,'\n');
        fprintf(texto6,c);
        d=strcat(Ficheros{i},'\n');
        fprintf(texto6bis,d);
        break
    end
end

%Zona7
texto7=fopen('BarcosZona7.txt','at');
texto7bis=fopen('BarcosZona7(mat).txt','at');
for j=1:length(X)
    a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ7,LatZ7);
    if a==1
        contador7=contador7+1;
        b=Ficheros{i};
        nombreBarco=b(1:(length(b)-4));
        c=strcat(nombreBarco,'\n');
        fprintf(texto7,c);
        d=strcat(Ficheros{i},'\n');
        fprintf(texto7bis,d);
        break
    end
end
fclose('all');
end
```



Eventos.m

%%DESCRIPCIÓN GENERAL

 %Contar el numero de eventos registrados de cada barco dentro de cada zona

%% Zona1.

clc

clear all

CargarZonas %Cargar las coordenadas de los contornos de las zonas

fid=fopen('BarcosZonal.mat','r'); %Abrir la lista con las embarcaciones obtenidas en NbarcosZona.m

BZ1 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');

ListaBarcos=BZ1{1,1};

eventos=zeros(length(ListaBarcos),1);

for i=1:length(ListaBarcos)

 load(char(ListaBarcos(i)));

 X=AIS_tot2.Lon;

 Y=AIS_tot2.Lat;

 Neventos=0;

 for j=1:length(X)

 a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ1,LatZ1);

 if a==1

 Neventos=Neventos+1;

 end

 end

 eventos(i)=Neventos;

end

 [NumEventos,orden]=sort(eventos,'descend'); %Obtener el orden de los barcos por el n° de eventos

% Escribir el NotePad

 texto=fopen('EventosZonal.txt','at');

 for n=1:length(ListaBarcos)

 b=char(ListaBarcos(orden(n)));

 nombreBarco=b(1:(length(b)-5));

 fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, NumEventos(n));

 end

 fclose('all');

%% Zona2.

clc

clear all

CargarZonas



```
fid=fopen('BarcosZona2(mat).txt','r');
BZ2 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ2{1,1};
eventos=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    X=AIS_tot2.Lon;
    Y=AIS_tot2.Lat;

    Neventos=0;

    for j=1:length(X)
        a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ2,LatZ2);
        if a==1
            Neventos=Neventos+1;
        end
    end
    eventos(i)=Neventos;
end

[NumEventos,orden]=sort(eventos,'descend');

% Escribir el NotePad
texto=fopen('EventosZona2.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(orden(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, NumEventos(n));
end
fclose('all');

%% Zona3.

clc
clear all
CargarZonas
fid=fopen('BarcosZona3(mat).txt','r');
BZ3 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ3{1,1};
eventos=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    X=AIS_tot2.Lon;
    Y=AIS_tot2.Lat;
    Neventos=0;

    for j=1:length(X)
```



```
a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ3,LatZ3);
if a==1
    Neventos=Neventos+1;
end
end
eventos(i)=Neventos;

end

[NumEventos,orden]=sort(eventos,'descend');

% Escribir el NotePad
texto=fopen('EventosZona3.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(orden(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, NumEventos(n));
end
fclose('all');

%% Zona4.

clc
clear all
CargarZonas
fid=fopen('BarcosZona4(mat).txt','r');
BZ4 = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
ListaBarcos=BZ4{1,1};
eventos=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    X=AIS_tot2.Lon;
    Y=AIS_tot2.Lat;
    Neventos=0;

    for j=1:length(X)
        a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ4,LatZ4);
        if a==1
            Neventos=Neventos+1;
        end
    end
    eventos(i)=Neventos;

end

[NumEventos,orden]=sort(eventos,'descend');

% Escribir el NotePad
texto=fopen('EventosZona4.txt','at');
```



```
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(orden(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, NumEventos(n));
end
fclose('all');

%% Zona5.

clc
clear all
CargarZonas
fid=fopen('BarcosZona5(mat).txt','r');
BZ5 = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
ListaBarcos=BZ5{1,1};
eventos=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    X=AIS_tot2.Lon;
    Y=AIS_tot2.Lat;
    Neventos=0;

    for j=1:length(X)
        a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ5,LatZ5);
        if a==1
            Neventos=Neventos+1;
        end
    end
    eventos(i)=Neventos;
end

[NumEventos,orden]=sort(eventos,'descend');

% Escribir el NotePad
texto=fopen('EventosZona5.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(orden(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, NumEventos(n));
end
fclose('all');

%% Zona6.

clc
clear all
CargarZonas
```



```
fid=fopen('BarcosZona6(mat).txt','r');
BZ6 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ6{1,1};
eventos=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    X=AIS_tot2.Lon;
    Y=AIS_tot2.Lat;

    Neventos=0;

    for j=1:length(X)
        a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ6,LatZ6);
        if a==1
            Neventos=Neventos+1;
        end
    end
    eventos(i)=Neventos;
end

[NumEventos,orden]=sort(eventos,'descend');

% Escribir el NotePad
texto=fopen('EventosZona6.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(orden(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, NumEventos(n));
end
fclose('all');

%% Zona7.

clc
clear all
CargarZonas
fid=fopen('BarcosZona7(mat).txt','r');
BZ7 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ7{1,1};
eventos=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    X=AIS_tot2.Lon;
    Y=AIS_tot2.Lat;

    Neventos=0;
```



```
for j=1:length(X)
    a=inpolygon(X(j),Y(j),LonZ7,LatZ7);
    if a==1
        Neventos=Neventos+1;
    end
end
eventos(i)=Neventos;

end

[NumEventos,orden]=sort(eventos,'descend');

% Escribir el NotePad
texto=fopen('EventosZona7.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(orden(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, NumEventos(n));
end
fclose('all');
```



CuentaRutas.m

```
%%DESCRIPCIÓN GENERAL
    %Contar el numero de veces que entra cada barcos en la Bahía y de
    esas
    %cuantas corresponden a cada zona
    %Límites 36.075/5.34

%%

clc
clear all
CargarZonas
fid=fopen('BarcosZonal(mat).txt','r'); %Cambiar el archivo a abrir
para cada zona
BZ1 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ1{1,1};
MatrizRutas=zeros(length(ListaBarcos),2);
Orden=cell(length(ListaBarcos),1);

for i=1:length(ListaBarcos) %Barrer la lista completa de barcos
    load(char(ListaBarcos(i)));
    contador=0;
    contadorZ1=0;
    interruptorZ1=0;
    entrada=0;
    salida=0;
    X=AIS_tot2.Lon;
    Y=AIS_tot2.Lat;

    for n=1:(length(X)-3)
        a=inpolygon(X(n),Y(n),LonZ1,LatZ1);
        if Y(n)<=36.075 && Y(n+1)>=36.075 && Y(n+2)>=36.075 &&
Y(n+3)>=36.075 && X(n+1)<=-5.34 && X(n+2)<=-5.34 && X(n+3)<=-5.34
            entrada=1;
        elseif X(n)>=-5.34 && X(n+1)<=-5.34 && X(n+2)<=-5.34 &&
X(n+3)<=-5.34 && Y(n+1)>=36.075 && Y(n+2)>=36.075 && Y(n+3)>=36.075
            entrada=1;
        end
        if Y(n)>=36.075 && Y(n+1)<=36.075 && Y(n+2)<=36.075 &&
Y(n+3)<=36.075 && X(n+1)>=-5.34 && X(n+2)>=-5.34 && X(n+3)>=-5.34 &&
            entrada==1
            salida=1;
        elseif X(n)<=-5.34 && X(n+1)>=-5.34 && X(n+2)>=-5.34 &&
X(n+3)>=-5.34 && Y(n+1)<=36.075 && Y(n+2)<=36.075 && Y(n+3)<=36.075 &&
            entrada==1
            salida=1;
        end
    end
end
```



```
        if entrada==1 && salida==0 && interruptorZ1==0 && a==1
            interruptorZ1=1;
            contadorZ1=contadorZ1+1;
        end
        if entrada==1 && salida==1
            contador=contador+1;
            entrada=0;
            salida=0;
            interruptorZ1=0;
        end
    end
    MatrizRutas(i,1)=contador;
    MatrizRutas(i,2)=contadorZ1;

end

TotEntr=MatrizRutas(:,1);
[B,k1]=sort(TotEntr,'descend');
MatrizRutas2=MatrizRutas*0;
for n=1:length(MatrizRutas)
    MatrizRutas2(n,:)=MatrizRutas(k1(n),:);
end
TotEntrZon=MatrizRutas2(:,2);
[B,k2]=sort(TotEntrZon,'descend');
for n=1:length(MatrizRutas)
    MatrizRutas(n,:)=MatrizRutas2(k2(n),:);
end

%Escribir los resultados en un Notepad

texto=fopen('EntradasZonal.txt','at');
b=k1;
for n=1:length(ListaBarcos)
    Orden{n,1}=char(ListaBarcos(k1(n)));
end

for n=1:length(ListaBarcos)
    d=Orden{k2(n),1};
    nombreBarco=d(1:(length(d)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\t%d\n', nombreBarco,
MatrizRutas(n,1),MatrizRutas(n,2));
end

fclose('all');
```



Eslora.m

%%DESCRIPCIÓN GENERAL

 %Ordenar los barcos de cada zona por su eslora

%% Zona 1

clc

clear all

%Ordenar los barcos de la zona 1 por su eslora

fid=fopen('BarcosZona1(mat).txt','r');

BZ1 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');

ListaBarcos=BZ1{1,1};

ListaEslora=zeros(length(ListaBarcos),1);

for i=1:length(ListaBarcos)

 load(char(ListaBarcos(i)));

 ListaEslora(i,1)=AIS_tot2.Eslora;

end

[RankingEslora,NumBarco]=sort(ListaEslora(:,1));

RankingEslora=RankingEslora';

RankingEslora=fliplr(RankingEslora);

RankingEslora=RankingEslora';

NumBarco=NumBarco';

NumBarco=fliplr(NumBarco);

NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad

texto=fopen('EsloraZona1.txt','at');

for n=1:length(ListaBarcos)

 b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));

 nombreBarco=b(1:(length(b)-5));

 fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingEslora(n));

end

fclose('all');

%% Zona 2

clc

clear all

%Ordenar los barcos de la zona 2 por su eslora

fid=fopen('BarcosZona2(mat).txt','r');

BZ2 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');

ListaBarcos=BZ2{1,1};

ListaEslora=zeros(length(ListaBarcos),1);

for i=1:length(ListaBarcos)

 load(char(ListaBarcos(i)));

 ListaEslora(i,1)=AIS_tot2.Eslora;



```
end
[RankingEslora,NumBarco]=sort(ListaEslora(:,1));
RankingEslora=RankingEslora';
RankingEslora=fliplr(RankingEslora);
RankingEslora=RankingEslora';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('EsloraZona2.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingEslora(n));
end
fclose('all');

%% Zona 3
clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 3 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona3(mat).txt','r');
BZ3 = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
ListaBarcos=BZ3{1,1};
ListaEslora=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaEslora(i,1)=AIS_tot2.Eslora;
end
[RankingEslora,NumBarco]=sort(ListaEslora(:,1));
RankingEslora=RankingEslora';
RankingEslora=fliplr(RankingEslora);
RankingEslora=RankingEslora';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('EsloraZona3.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingEslora(n));
end
fclose('all');
```



```
%% Zona 4
clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 4 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona4(mat).txt','r');
BZ4 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ4{1,1};
ListaEslora=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaEslora(i,1)=AIS_tot2.Eslora;
end
[RankingEslora,NumBarco]=sort(ListaEslora(:,1));
RankingEslora=RankingEslora';
RankingEslora=fliplr(RankingEslora);
RankingEslora=RankingEslora';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('EsloraZona4.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingEslora(n));
end
fclose('all');

%% Zona 5
clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 5 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona5(mat).txt','r');
BZ5 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ5{1,1};
ListaEslora=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaEslora(i,1)=AIS_tot2.Eslora;
end
[RankingEslora,NumBarco]=sort(ListaEslora(:,1));
```



```
RankingEslora=RankingEslora';
RankingEslora=fliplr(RankingEslora);
RankingEslora=RankingEslora';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('EsloraZona5.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingEslora(n));
end
fclose('all');
```



```
%% Zona 6
clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 6 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona6(mat).txt','r');
BZ6 = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
ListaBarcos=BZ6{1,1};
ListaEslora=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaEslora(i,1)=AIS_tot2.Eslora;
end
[RankingEslora,NumBarco]=sort(ListaEslora(:,1));
RankingEslora=RankingEslora';
RankingEslora=fliplr(RankingEslora);
RankingEslora=RankingEslora';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('EsloraZona6.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingEslora(n));
end
fclose('all');
```



```
%% Zona 7
clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 7 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona7(mat).txt','r');
BZ7 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ7{1,1};
ListaEslora=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaEslora(i,1)=AIS_tot2.Eslora;
end
[RankingEslora,NumBarco]=sort(ListaEslora(:,1));
RankingEslora=RankingEslora';
RankingEslora=fliplr(RankingEslora);
RankingEslora=RankingEslora';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('EsloraZona7.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingEslora(n));
end
fclose('all');
```



Calado.m

```
%%DESCRIPCIÓN GENERAL
```

```
    %Ordenar los barcos de cada zona por su calado
```

```
%% Zona 1
```

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Ordenar los barcos de la zona 1 por su eslora
```

```
fid=fopen('BarcosZona1(mat).txt','r');
```

```
BZ1 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
```

```
ListaBarcos=BZ1{1,1};
```

```
ListaCalado=zeros(length(ListaBarcos),1);
```

```
for i=1:length(ListaBarcos)
```

```
    load(char(ListaBarcos(i)));
```

```
    ListaCalado(i,1)=AIS_tot2.Draught;
```

```
end
```

```
[RankingCalado,NumBarco]=sort(ListaCalado(:,1));
```

```
RankingCalado=RankingCalado';
```

```
RankingCalado=fliplr(RankingCalado);
```

```
RankingCalado=RankingCalado';
```

```
NumBarco=NumBarco';
```

```
NumBarco=fliplr(NumBarco);
```

```
NumBarco=NumBarco';
```

```
%Escribir resultados en el notepad
```

```
texto=fopen('CaladoZona1.txt','at');
```

```
for n=1:length(ListaBarcos)
```

```
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
```

```
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
```

```
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingCalado(n));
```

```
end
```

```
fclose('all');
```

```
%% Zona 2
```

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Ordenar los barcos de la zona 2 por su eslora
```

```
fid=fopen('BarcosZona2(mat).txt','r');
```

```
BZ2 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
```

```
ListaBarcos=BZ2{1,1};
```

```
ListaCalado=zeros(length(ListaBarcos),1);
```

```
for i=1:length(ListaBarcos)
```

```
    load(char(ListaBarcos(i)));
```



```
ListaCalado(i,1)=AIS_tot2.Draught;
end
[RankingCalado,NumBarco]=sort(ListaCalado(:,1));
RankingCalado=RankingCalado';
RankingCalado=fliplr(RankingCalado);
RankingCalado=RankingCalado';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('CaladoZona2.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingCalado(n));
end
fclose('all');

%% Zona 3

clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 3 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona3(mat).txt','r');
BZ3 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ3{1,1};
ListaCalado=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaCalado(i,1)=AIS_tot2.Draught;
end
[RankingCalado,NumBarco]=sort(ListaCalado(:,1));
RankingCalado=RankingCalado';
RankingCalado=fliplr(RankingCalado);
RankingCalado=RankingCalado';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('CaladoZona3.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingCalado(n));
end
```



```
fclose('all');

%% Zona 4

clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 4 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona4(mat).txt','r');
BZ4 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ4{1,1};
ListaCalado=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaCalado(i,1)=AIS_tot2.Draught;
end
[RankingCalado,NumBarco]=sort(ListaCalado(:,1));
RankingCalado=RankingCalado';
RankingCalado=fliplr(RankingCalado);
RankingCalado=RankingCalado';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('CaladoZona4.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingCalado(n));
end
fclose('all');

%% Zona 5

clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 5 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona5(mat).txt','r');
BZ5 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ5{1,1};
ListaCalado=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaCalado(i,1)=AIS_tot2.Draught;
```



```
end
[RankingCalado,NumBarco]=sort(ListaCalado(:,1));
RankingCalado=RankingCalado';
RankingCalado=fliplr(RankingCalado);
RankingCalado=RankingCalado';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('CaladoZona5.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingCalado(n));
end
fclose('all');

%% Zona 6

clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 6 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona6(mat).txt','r');
BZ6 = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
ListaBarcos=BZ6{1,1};
ListaCalado=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaCalado(i,1)=AIS_tot2.Draught;
end
[RankingCalado,NumBarco]=sort(ListaCalado(:,1));
RankingCalado=RankingCalado';
RankingCalado=fliplr(RankingCalado);
RankingCalado=RankingCalado';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('CaladoZona6.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingCalado(n));
end
fclose('all');
```



```
% Zona 7

clc
clear all

%Ordenar los barcos de la zona 7 por su eslora
fid=fopen('BarcosZona7(mat).txt','r');
BZ7 = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=BZ7{1,1};
ListaCalado=zeros(length(ListaBarcos),1);
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    ListaCalado(i,1)=AIS_tot2.Draught;
end
[RankingCalado,NumBarco]=sort(ListaCalado(:,1));
RankingCalado=RankingCalado';
RankingCalado=fliplr(RankingCalado);
RankingCalado=RankingCalado';
NumBarco=NumBarco';
NumBarco=fliplr(NumBarco);
NumBarco=NumBarco';

%Escribir resultados en el notepad
texto=fopen('CaladoZona7.txt','at');
for n=1:length(ListaBarcos)
    b=char(ListaBarcos(NumBarco(n)));
    nombreBarco=b(1:(length(b)-5));
    fprintf(texto, '%s\t%d\n', nombreBarco, RankingCalado(n));
end
fclose('all');
```



Tipos.m

```
%% DESCRIPCIÓN GENERAL
    %Ordenar los 63 barcos por tipo de embarcación

%%
clc
clear all
fid=fopen('ListaFinal(mat).txt','r'); %Abrir la lista con los 63
barcos
LB = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
ListaBarcos=LB{1,1};
for i=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(i)));
    lista=[1:1:length(ListaBarcos)];
    type (i) = AIS_tot2.Type; %Acceder al tipo de embarcación AIS
end

%número de tipos de barcos que tenemos
type=type';
typeOR=sort(type);
contador=1;
for i=1:(length(ListaBarcos)-1)
    if typeOR(i+1)~=typeOR(i)
        contador=contador+1;
    end
end
tipos=zeros(contador,2);
contador2=1;
i=1;
for n=1:(length(ListaBarcos)-1)
    tipos(i,1)=typeOR(n);
    if typeOR(n)==typeOR(n+1)
        contador2=contador2+1;
    else
        tipos(i,2)=contador2;
        contador2=1;
        i=i+1;
    end
end
if tipos(contador,2)==0
    tipos(contador,2)=contador2;
    tipos(contador,1)=typeOR(n+1);
end

%escribir los resultados en formato cell
comparacion=cell(length(ListaBarcos),4);
j=1;
for i=1:contador
```



```
for n=1:length(ListaBarcos)
    load(char(ListaBarcos(n)));
    if AIS_tot2.Type==tipos(i,1)
        comparacion{j,1}=char(ListaBarcos(n));
        comparacion{j,2}=AIS_tot2.Type;
        comparacion{j,3}=AIS_tot2.Eslora;
        comparacion{j,4}=AIS_tot2.Draught;
        j=j+1;
    end
end
end
```



Rutas.m

%%DESCRIPCIÓN GENERAL

%%Extraer de un barco las rutas que se van a simular

%%

clc

clear all

load('Martin i soler 2.mat'); %introducir el nombre del barco que queremos analizar

Type = AIS_tot2.Type;

ID = AIS_tot2.ID;

Lon = AIS_tot2.Lon;

Lat = AIS_tot2.Lat;

DateTime = AIS_tot2.DateTime;

IMO = AIS_tot2.IMO;

MMSI = AIS_tot2.MMSI;

Eslora = AIS_tot2.Eslora;

Manga = AIS_tot2.Manga;

Draught = AIS_tot2.Draught;

t=AIS_tot2.DateTime;

t2=t-t(1);

t2v=datevec(t2);

t4=(t2v(:,4).*(3600))+(t2v(:,5).*(60))+(t2v(:,6));

tiempo=diff(t4);

[X,Y,utmzone,utmhemi] = wgs2utm(Lat, Lon, 30, 'N');

%Distancia entre puntos consecutivos

for n=1:(length(X)-1)

 r(n)=sqrt((X(n+1)-X(n))^2+(Y(n+1)-Y(n))^2);

end

%contar el número de entradas a la bahía

contador=0;

entrada=0;

salida=0;

X=AIS_tot2.Lon;

Y=AIS_tot2.Lat;

for n=1:(length(X)-3) %procedimiento análogo al de CuentaRutas.m

 if Y(n)<=36.075 && Y(n+1)>=36.075 && Y(n+2)>=36.075 && Y(n+3)>=36.075 && X(n+1)<=-5.34 && X(n+2)<=-5.34 && X(n+3)<=-5.34

 entrada=1;

 elseif X(n)>=-5.34 && X(n+1)<=-5.34 && X(n+2)<=-5.34 && X(n+3)<=-5.34 && Y(n+1)>=36.075 && Y(n+2)>=36.075 && Y(n+3)>=36.075

 entrada=1;



```
end
if Y(n)>=36.075 && Y(n+1)<=36.0755 && Y(n+2)<=36.075 &&
Y(n+3)<=36.075 && entrada==1
    salida=1;
elseif X(n)<=-5.34 && X(n+1)>=-5.34 && X(n+2)>=-5.34 &&
X(n+3)>=-5.34 && entrada==1
    salida=1;
end
if entrada==1 && salida==1
    contador=contador+1;
    entrada=0;
    salida=0;
end
end
Entradas=contador;

%contar el número de rutas de entrada
%guardar las coordenadas x e y de cada ruta de entrada en un cell
rutaentrada
interr=0;
rutaentrada=cell(Entradas,3);
contador=0;
for n=1:(length(X)-6)
    if Y(n)<=36.075 && Y(n+1)>=36.075 && Y(n+2)>=36.075 &&
Y(n+3)>=36.075 && X(n+1)<=-5.34 && X(n+2)<=-5.34 && X(n+3)<=-5.34
        entrada=1;
    elseif X(n)>=-5.34 && X(n+1)<=-5.34 && X(n+2)<=-5.34 &&
X(n+3)<=-5.34 && Y(n+1)>=36.075 && Y(n+2)>=36.075 && Y(n+3)>=36.075
        entrada=1;
    end
    if Y(n)>=36.075 && Y(n+1)<=36.0755 && Y(n+2)<=36.075 &&
Y(n+3)<=36.075 && entrada==1
        salida=1;
    elseif X(n)<=-5.34 && X(n+1)>=-5.34 && X(n+2)>=-5.34 &&
X(n+3)>=-5.34 && entrada==1
        salida=1;
    end
    if entrada==1 && interr==0
        if r(n)<2 && r(n+1)<2 && r(n+2)<2 && r(n+3)<2 && r(n+4)<2
&& r(n+5)<2 && r(n+6)<2 %&& r(n+7)<2
            interr=1;
        end
    else
        x(n)=X(n);
        y(n)=Y(n);
    end
end
if entrada==1 && salida==1
```



```
        contador=contador+1;
        entrada=0;
        salida=0;
        interr=0;
        rutaentrada{contador,1}=x;
        rutaentrada{contador,2}=y;
        x=0;
        y=0;
    end
end

%determinar cuales son las coordenadas iniciales de cada ruta

for i=1:Entradas
    x=rutaentrada{i,1};
    y=rutaentrada{i,2};
    for n=1:length(x)
        if x(n) || 0
            xini=x(n);
            break;
        end
    end
    if xini>-5.34
        xini=-5.34;
    end
    for n=1:length(y)
        if y(n) || 0
            yini=y(n);
            break;
        end
    end
    if yini<36.075
        yini=36.075;
    end
    vectorxfinal(i)=x(length(x));
    vectoryfinal(i)=y(length(y));
    xfinmedia=mean(vectorxfinal);
    yfinmedia=mean(vectoryfinal);
    angulo=atan((yfinmedia-yini)/(xini-xfinmedia))*180/pi;
%Determinar el angulo de cada ruta
    rutaentrada{i,3}=angulo;
    vectorangulo(i)=angulo; %vector con todos los angulos de todas
las rutas
end
```



```
%determinar el angulo este, oeste y angulo medio (en caso de un
barco del que elijamos 3 rutas)
contador=0;
l=length(vectorangulo);
for i=1:length(vectorangulo) %eliminar los angulos negativos
    i=i-contador;
    if vectorangulo(i)<0
        vectorangulo(i)=[];
        contador=contador+1;
    end
end
angulomedio=0.5*max(vectorangulo)+0.5*min(vectorangulo);
anguloeste=0.7*(max(vectorangulo)-angulomedio)+angulomedio;
angulooeste=-0.7*(max(vectorangulo)-angulomedio)+angulomedio;

for i=1:Entradas %volver a incluir todas las rutas, hasta aquellas
con ángulo negativo
    vectorangulo(i)=rutaentrada{i,3};
end

%Determinar las rutas que mejor se ajustan a los angulos calculados
anteriormente (3este, 3 centro, 3 oeste)
for i=1:Entradas
    rutamedia(i)=abs(vectorangulo(i)-angulomedio);
    rutaeste(i)=abs(vectorangulo(i)-anguloeste);
    rutaoeste(i)=abs(vectorangulo(i)-angulooeste);

end
rutamedia=rutamedia';
rutaeste=rutaeste';
rutaoeste=rutaoeste';

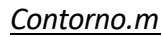
[minmedia,pos]=sort(rutamedia);
[mineste,poseste]=sort(rutaeste);
[minoeste,posoeste]=sort(rutaoeste);

if Entradas >=3
    for i=1:3
        rutamedia2(i)=pos(i);
        rutaeste2(i)=poseste(i);
        rutaoeste2(i)=posoeste(i);
    end
end
Entradas

clear rutamedia
```



```
clear rutaeste  
clear ruta oeste
```



```
load('CONTORNOEXT3.txt');
XCext3=CONTORNOEXT3(:,1);
YCext3=CONTORNOEXT3(:,2);
Cext3UTM=[ '30 S'; '30 S'; '30 S'; '30 S'; '30 S'; '30 S'; '30 S'];
[LatCext3,LonCext3]=utm2deg(XCext3,YCext3,Cext3UTM);
```



RepresentacionRutas.m

%%DESCRIPCIÓN GENERAL

 %Representar las rutas para su elección

%%

Contorno %Cargar las coordenadas del contorno

CargarZonas %Cargar las coordenadas de las zonas

%Fijamos los límites

Lim1x=[-5.46 -5.33];

Lim1y=[36.075 36.075];

Lim2x=[-5.34 -5.34];

Lim2y=[36.06 36.21];

hold on

plot(Lim1x, Lim1y, 'k', 'linewidth', 2);

plot(Lim2x, Lim2y, 'k', 'linewidth', 2);

plot(LonZ1, LatZ1, 'r', 'linewidth', 2)

plot(LonZ2, LatZ2, 'r', 'linewidth', 2)

plot(LonZ3, LatZ3, 'r', 'linewidth', 2)

plot(LonZ4, LatZ4, 'r', 'linewidth', 2)

plot(LonZ5, LatZ5, 'r', 'linewidth', 2)

plot(LonZ6, LatZ6, 'r', 'linewidth', 2)

plot(LonZ7, LatZ7, 'r', 'linewidth', 2)

plot(LonCext, LatCext, 'k', 'linewidth', 2);

plot(LonCext2, LatCext2, 'k', 'linewidth', 2);

axis([-5.460000000000000 -5.330000000000000 36.060000000000002
36.210000000000004])

Se emplean los resultados obtenidos en el script "Rutas.m" por lo que se deberá ejecutar inmediatamente después de él.

%%Rutas centrales

plot(rutaentrada{rutamedia2(1),1}, rutaentrada{rutamedia2(1),2}, 'b.')

plot(rutaentrada{rutamedia2(2),1}, rutaentrada{rutamedia2(2),2}, 'y.')

plot(rutaentrada{rutamedia2(3),1}, rutaentrada{rutamedia2(3),2}, 'g.')

%%Rutas este

plot(rutaentrada{rutaeste2(1),1}, rutaentrada{rutaeste2(1),2}, 'b.')

plot(rutaentrada{rutaeste2(2),1}, rutaentrada{rutaeste2(2),2}, 'g.')

plot(rutaentrada{rutaeste2(3),1}, rutaentrada{rutaeste2(3),2}, 'k.')

%%Rutas oeste

plot(rutaentrada{rutaoeste2(1),1}, rutaentrada{rutaoeste2(1),2}, 'b.')

plot(rutaentrada{rutaoeste2(2),1}, rutaentrada{rutaoeste2(2),2}, 'g.')

plot(rutaentrada{rutaoeste2(3),1}, rutaentrada{rutaoeste2(3),2}, 'k.')



FicheroMAT.m

```
%% DESCRIPCIÓN GENERAL
    %Guardar la información necesaria de los casos de simulación que
    %posteriormente será empleada en el modelo numérico

ruta3=[pwd, '\RESULTADOS\ENTREGA26NOV(2)\'];%Ruta de salida
mkdir(ruta3);

%% Ruta
clear rox
clear roy
clear velro
clear angro
clear tro
clear trorel
clear rru

%Liberemos la que corresponda y asignamos la posición 1, 2 o 3 según
lo obtenido en RepresentacionRutas.m
ruta=rutamedia(1)
%ruta=rutamedia()
%ruta=rutamedia()
    if Entradas<=2
        rox2=rutaentrada{1,1}; %Elegir si de las dos entradas nos
interesa la primera o la segunda
        roy2=rutaentrada{1,2};
    else
        rox2=rutaentrada{ruta,1}; %Debemos establecer aqui que ruta
queremos extraer
        roy2=rutaentrada{ruta,2};
    end
    contador=0;
    for i=1:length(rox2)
        if rox2(i)==0
            contador=contador+1;
        else
            break;
        end
    end
end

%Obtenemos le tiempo relativo, las coordenadas y la fecha juliana
%necesario haber ejecutado previamente "Rutas.m"
for i=1:(length(rox2)-(contador))
    rox(i)=rox2(i+contador); %coordendas x de la ruta
    roy(i)=roy2(i+contador); %coordenadas y de la ruta
    tro(i)=t(i+contador); %tiempo calendario de la ruta
    trorel(i)=t4(i+contador); %tiempo relativo ruta
```



```
end
rox=rox';
roy=roy';
roxG=rox;
royG=roy;
for i=1:(length(rox)-1)
    rru(i)=r(i+contador-1); %distancia entre puntos de la ruta
    tiemporu=tiempo(i+contador-1); %distancia en tiempo de la ruta
    velro(i)=r(i+contador-1)./tiempo(i+contador-1); %velocidad a
lo largo de la ruta
end
angro=rutaentrada{ruta,3}; %angulo de la ruta
[X,Y,utmzone,utmhemi] = wgs2utm(roy,rox,30,'N');

%% Cortamos la ruta por requerimientos del programa de simulación
(coordenadas UTM)
for i=1:length(X)
    i=1;
    if Y(i)<3998912.3298
        Y(i)=[];
        X(i)=[];
        rox(i)=[];
        roy(i)=[];
        tro(i)=[];
        trorel(i)=[];
    else
        break;
    end
end
for i=1:length(X)
    i=1;
    if X(i)<279761.3033
        Y(i)=[];
        X(i)=[];
        rox(i)=[];
        roy(i)=[];
        tro(i)=[];
        trorel(i)=[];
    else
        break;
    end
end
trorel=trorel';
trorel=trorel-trorel(1);

%tenemos en cuenta el posible cambio de día
for i=1:length(trorel)
    if trorel(i)<0
```



```
        trorel(i)=trorel(i)+3600*24;
    end
end

%%Ajustamos a un polinomio de grado 10

figure(1)
plot(trorel,X,'b-')
px=polyfit(trorel,X,10);
x2=polyval(px,trorel);
hold on
plot(trorel,x2,'r-')
axis('equal')
title('AJUSTE POLINOMIO GRADO 10')
xlabel('t') % x-axis label
ylabel('X')
hold off
figure(2)
plot(trorel,Y,'b-')
py=polyfit(trorel,Y,10);
y2=polyval(py,trorel);
hold on
plot(trorel,y2,'r-')
axis('equal')
title('AJUSTE POLINOMIO GRADO 10')
xlabel('t') % x-axis label
ylabel('Y')

figure(3)
plot(X,Y,'b-',polyval(px,trorel),polyval(py,trorel),'r-')

%%Obtención de los gráficos

CONTORNO
CargarZonas

%Gráfico variación de la velocidad
figure(4)
plot(velro)
title('Evolución de la velocidad')
ylabel('Velocidad (m/s)')

%Mapa con la variación de velocidad
vel=roxG*0;
CoordZ=vel;
```



```
for i=1:(length(vel)-1)
    vel(i)=velro(i);
end
figure(5)
plot4(roxG,royG,CoordZ,vel,'linewidth',2)
az = 0;%ver en plano xy
el = 90;
view(az, el);
Lim1x=[-5.50 -5.32];
Lim1y=[36.075 36.075];
Lim2x=[-5.34 -5.34];
Lim2y=[36.06 36.21];

hold on
plot(Lim1x,Lim1y,'k','linewidth',2);
plot(Lim2x,Lim2y,'k','linewidth',2);
plot(LonZ1,LatZ1,'r','linewidth',2)
plot(LonZ2,LatZ2,'r','linewidth',2)
plot(LonZ3,LatZ3,'r','linewidth',2)
plot(LonZ4,LatZ4,'r','linewidth',2)
plot(LonZ5,LatZ5,'r','linewidth',2)
plot(LonZ6,LatZ6,'r','linewidth',2)
plot(LonZ7,LatZ7,'r','linewidth',2)
plot(LonCext,LatCext,'k','linewidth',2);
plot(LonCext2,LatCext2,'k','linewidth',2);
plot(LonCext3,LatCext3,'k','linewidth',2);
axis([-5.46 -5.32 36.07 36.19])
title('Variación de velocidad')
    xlabel('Longitud') % x-axis label
    ylabel('Latitud')
    a=max(vel);
    b=min(vel);
caxis([b a]) %cambiar los limites del colobar
hold on
figure(5)
plot(velro)
title('Evolución de la velocidad')
    ylabel('Velocidad (m/s)')

%Distancia del centroide al barco
load('centroides.txt');
[X,Y,utmzone,utmhemil] = wgs2utm(roy,rox,30,'N');%cambio de
coordenadas a utm
Xcent1=centroides(1,1);
Ycent1=centroides(1,2);
distancia=zeros(length(rox),1);
for i=1:7
    for n=1:length(rox)
```



```
        distancia(n)=sqrt((centroides(i,1)-
X(n))^2+(centroides(i,2)-Y(n))^2); %distancia entre cada par de punto
y el centroide
    end
    figure(i+5)
    plot(trorel,distancia)
    Titulo='Evolución de la distancia con el tiempo al centro de
la zona ';
    NumZona=num2str(i);
    title(strcat(Titulo,NumZona));
    xlabel('Tiempo relativo(seg)') % x-axis label
    ylabel('Distancia (metros)') % y-axis label
end

%% Escribir resultados

WAKE.Name=AIS_tot2.Name;
WAKE.Type=AIS_tot2.Type;
WAKE.ID=AIS_tot2.ID;
WAKE.IMO=AIS_tot2.IMO;
WAKE.MMSI=AIS_tot2.MMSI;
WAKE.Eslora=AIS_tot2.Eslora;
WAKE.Manga=AIS_tot2.Manga;
WAKE.Calado=AIS_tot2.Draught;
WAKE.Angulo=angro;
WAKE.Lon=rox;
WAKE.Lat=roy;
WAKE.Vel=velro
WAKE.TimeRel=trorel;
WAKE.TimeCalen=tro;
WAKE.CoeeficientesAjusteY=py;
WAKE.CoeeficientesAjusteX=px;
save([ruta3,'SHIP_38.mat'],'WAKE','-mat')
```