

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS  
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

---

---

**TESIS DOCTORAL**

**METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN DE BASES DE  
DATOS DE REANÁLISIS DE CLIMA MARÍTIMO**

---

---

**Presentada por: ANTONIO TOMÁS SAMPEDRO**

**Dirigida por: FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA  
IÑIGO J. LOSADA RODRÍGUEZ**

**Mayo, 2009**

**SECCIÓN I**

**INTRODUCCIÓN**

---



## **CAPÍTULO 1**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

---



## 1.1. Introducción.

El diseño de estructuras marítimas, como el de todas las obras ingenieriles, se realiza para cumplir una serie de funciones. Una determinada obra marítima, por ejemplo un dique exterior, se construye para crear un área abrigada en la que los barcos puedan operar con suficiente seguridad la mayor parte del tiempo posible. Para cumplir este objetivo, reducir la agitación del oleaje, es fundamental el conocimiento de la estadística del oleaje de largo plazo que interactúa con el dique; así como también la de otras variables geofísicas de clima marítimo como el nivel del mar, viento o corrientes.

Actualmente, las estructuras marinas, además de cumplir correctamente las funciones para las que han sido concebidas, deben permitir el desarrollo sostenible de todas las actividades socioeconómicas vinculadas a las costas. Esto, unido a la necesaria adecuación que se tiene que realizar de las infraestructuras costeras ante los efectos del cambio climático, hace que las estructuras marítimas que se diseñen deban ser más respetuosas con su entorno y más versátiles que hasta ahora.

Por lo tanto, para el diseño y optimización medioambiental de las estructuras marítimas es imprescindible la caracterización del clima marítimo en la ubicación concreta de cada una. De igual manera, dicha información también es necesaria para la gestión de las infraestructuras marinas y del litoral.

Para caracterizar el clima marítimo en la zona de interés son necesarios datos históricos de variables geofísicas oceanográficas de calidad, con suficiente resolución temporal y espacial, homogéneos y de largos periodos de tiempo; pero pocas veces se tiene una fuente de información que genere datos con todas estas características en la posición que interesa. Lo usual es tener distintas fuentes de información en mar abierto y necesitar la caracterización del clima marítimo cerca de la costa.

En la actualidad, tras el desarrollo de modelos numéricos capaces de reproducir el oleaje en cualquier lugar a partir de información atmosférica, se puede simular largas series temporales de oleaje, con suficientes resoluciones espacio-temporales y homogéneas; pero dichas fuentes de información suelen ser únicamente válidas para mar abierto y no siempre representan correctamente la realidad. Con lo que, en la mayoría de los casos, se utiliza la información de los modelos numéricos junto con la de otras fuentes de mejor calidad (usualmente son datos instrumentales) para complementarse, corregir las deficiencias que tengan y luego trasladar dicha información hasta donde realmente se necesita.

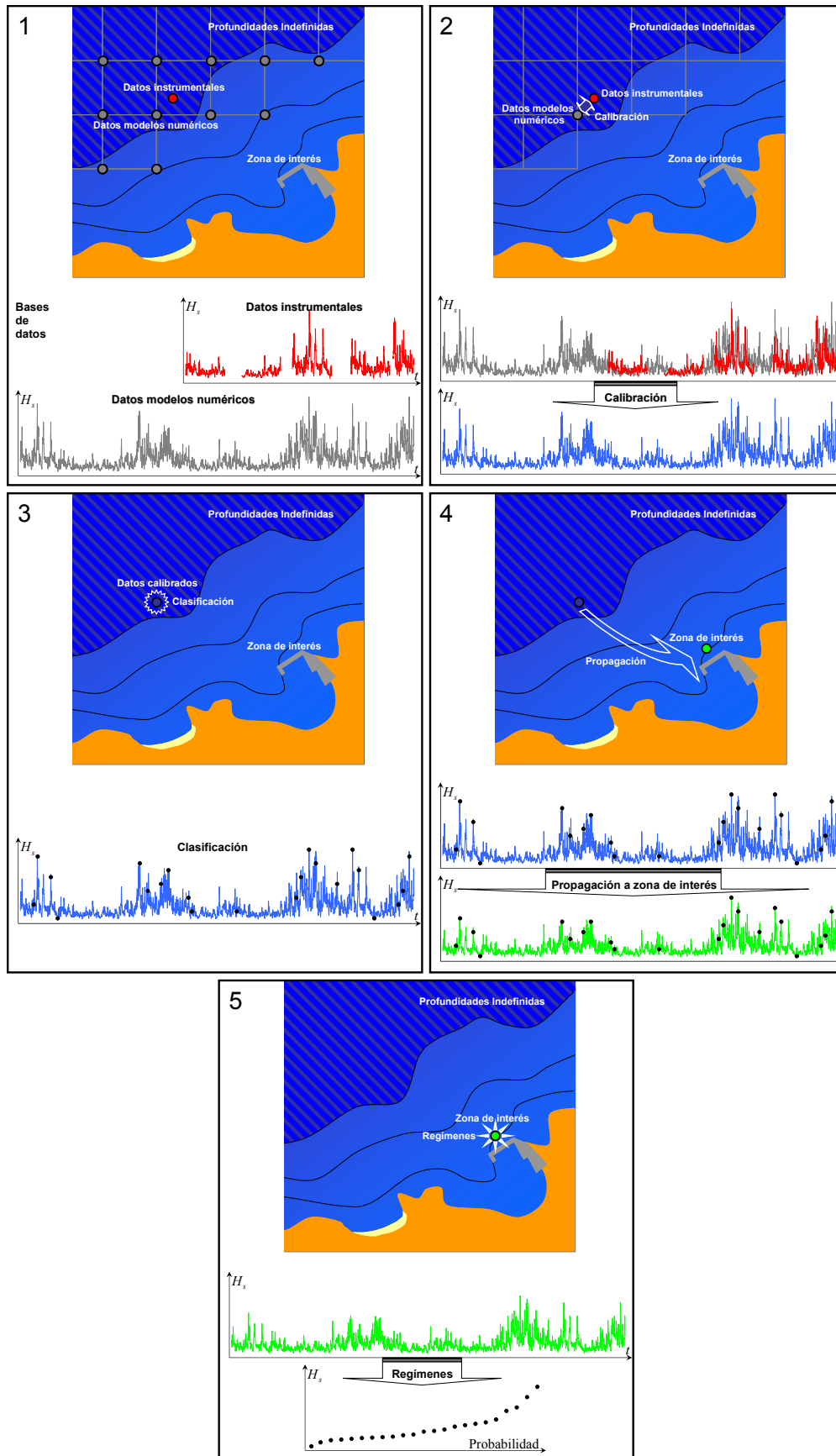


Figura 1.1. Esquema de la metodología general para caracterizar el clima marítimo en una zona de interés.

El procedimiento general para trasladar la información de oleaje con calidad hasta la zona de interés tiene varias etapas (ver figura 1.1). Primeramente se estudian las distintas bases de datos y se evalúan las carencias de cada una de ellas (1). Tras este primer análisis se corrigen las deficiencias detectadas, calibrando las bases de datos cuando sea necesario, y se caracteriza el clima marítimo en profundidades indefinidas<sup>1</sup> y mar abierto (2). Posteriormente se debería propagar el oleaje hasta la ubicación de la obra, pero usualmente existen demasiados estados de mar para que con las actuales herramientas de propagación sea eficiente la propagación de todos ellos, por lo que previamente se clasifica los datos de oleaje en profundidades indefinidas para elegir el menor número de estados de mar que sean capaces de representar la totalidad (3). Así sólo se propagan estos oleajes seleccionados (4). Finalmente se caracteriza el oleaje en la zona de interés a partir de los oleajes propagados, definiendo los regímenes de oleaje necesarios, por ejemplo, para el diseño de una obra marítima (5); lo que posibilita el conocimiento de su funcionalidad y estabilidad, entre otros. De manera que de forma esquemática se puede simplificar en los cinco puntos siguientes del mencionado procedimiento general como:

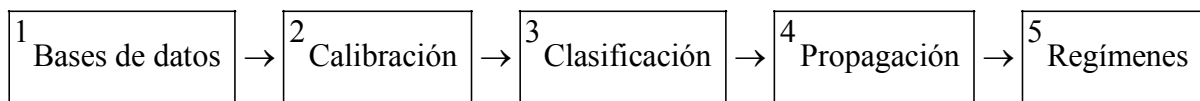


Figura 1.2. Procedimiento general para caracterizar el clima marítimo en una zona de interés.

Dentro de esta metodología general para caracterizar el clima marítimo en una posición concreta, el proceso que mejora la calidad de los datos de una fuente de información, corrigiéndolos y modificándolos a partir de comparaciones con otras fuentes de información se denomina calibración (punto 2 de la figura 1.1).

En este sentido, la presente tesis desarrolla el punto 2 (Calibración). En ella se propone una metodología de calibración de bases de datos para utilizar lo más eficientemente posible la información disponible. Se define cuándo es necesario calibrar, la mejor forma de realizarlo en función de los datos disponibles, dónde se ubican dichos datos, para qué se necesita la caracterización del clima marítimo y en qué posición se necesita esta caracterización.

Se presentarán distintas metodologías de calibración, aplicándolas al ámbito costero español y a las bases de datos de oleaje, incluyendo las bases de datos generadas numéricamente; pero

---

<sup>1</sup> Profundidades indefinidas: Profundidades a las que la dinámica del oleaje no alcanza el fondo. Esto se cumple para la siguiente relación entre la profundidad,  $h$  y la longitud de onda,  $L$ :  $h/L > 0.5$ .



sin pérdida de generalidad para poder aplicarlas fácilmente en otras zonas costeras o a otras bases de datos (nivel del mar, viento, corrientes,...).

Como se describirá en el capítulo 3, a pesar de que existen múltiples y variados métodos de calibración, no existe una metodología general de calibración ni pautas para elegir el mejor método de calibración para cada caso concreto, pues hay grandes indefiniciones de cómo calibrar algunos de ellos.

A continuación se va a plantear en líneas generales que es lo que se necesita para realizar el diseño de una obra marítima (ubicación y tipo o forma de la información necesaria). Una vez descritas las necesidades de información final de oleaje, la metodología general presentada en las figuras 1.1 y 1.2 debe conservar dichas características al trasladar la información desde profundidades indefinidas hasta la zona de interés. En cuanto al punto 2 (Calibración), posteriormente se va a resumir qué aspectos de dicha problemática están resueltos y cuáles no han sido eficazmente solucionadas con los actuales métodos de calibración. A raíz de todo ello y de las carencias metodológicas en las calibraciones vigentes, se fijan los objetivos a resolver por esta tesis y la metodología general para solucionar dichos objetivos. Finalmente en el último apartado de este primer capítulo se presenta la estructura que se ha dado a este trabajo.

### **1.2. Necesidades para el diseño de obras marítimas.**

Como se establece en la ROM-00 (2001) toda obra marítima se construye para satisfacer, durante un determinado intervalo de tiempo, diversos requerimientos de fiabilidad, funcionalidad y operatividad. Por lo tanto para su diseño es imprescindible conocer las acciones que va a soportar en ese intervalo de tiempo (vida útil).

En estructuras marinas, una acción fundamental es el oleaje, aunque también lo son otras como el nivel del mar o el viento, pero en cada ubicación la interacción del mar con la tierra y las acciones meteorológicas es distinta, por lo que el oleaje de la posición concreta de la obra es diferente al resto y es necesario establecerlo.

En función de la obra, la caracterización del oleaje necesitará más o menos precisión en ciertos aspectos. Por ejemplo, si se diseña un dique exterior, será fundamental caracterizar los oleajes más energéticos; en cambio si se diseña una playa puede ser más importante conocer la dirección media del oleaje. Así, generalmente se tienen en cuenta cuatro aspectos para caracterizar el oleaje o el clima marítimo en una posición:

- Régimen medio: es la distribución media de probabilidad, escalar o direccional, de un parámetro de estado de mar, como por ejemplo  $H_s$  (ver  $F(H_s)$  en la figura 1.3, que determina la probabilidad de no excedencia de cada valor  $H_{si}$ ). Si no se especifica el periodo de tiempo sobre el que se promedia se asume que es anual. Para su correcta caracterización suele ser suficiente tener series de oleaje de más de 5 a 10 años (series cortas a medias), aunque es preferible disponer de la mayor cantidad de datos posible.

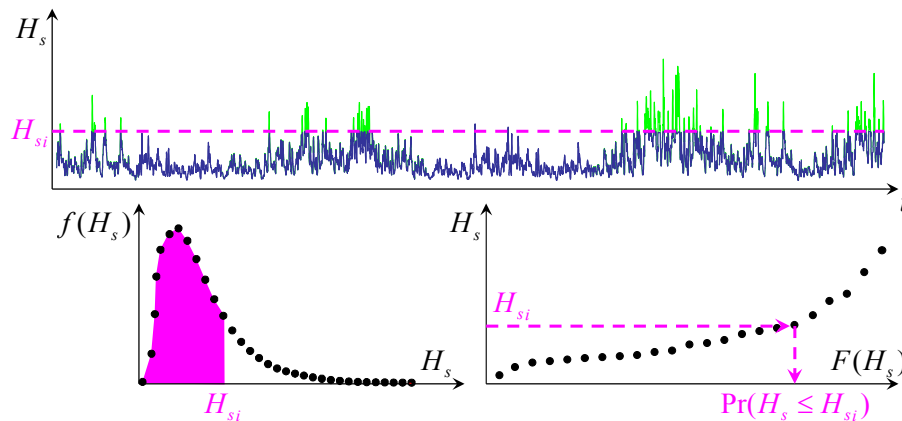


Figura 1.3. Esquema del régimen medio de  $H_s$ . En la parte superior se representa la serie temporal de  $H_s$  y en la parte inferior la función de densidad,  $f(H_s)$ , (izquierda) y la función de distribución,  $F(H_s)$ , (derecha).

- Persistencias: el régimen de persistencias describe las rachas o periodos continuados de situaciones en que un determinado parámetro supera un cierto nivel de corte. Por ejemplo en la figura 1.4, para un nivel de corte  $H_{si}$ , se determina la distribución de probabilidad de las duraciones continuadas de  $H_s$  (denotada por  $D_j$ ) condicionadas a ser mayores que  $H_{si}$  ( $F(D/H_s)$ ). Es deseable que la serie original de datos sea continua, sin huecos, para que sirva para caracterizar las persistencias, siendo aconsejable tener como mínimo series de duraciones medias (entre 10 y 20 años).

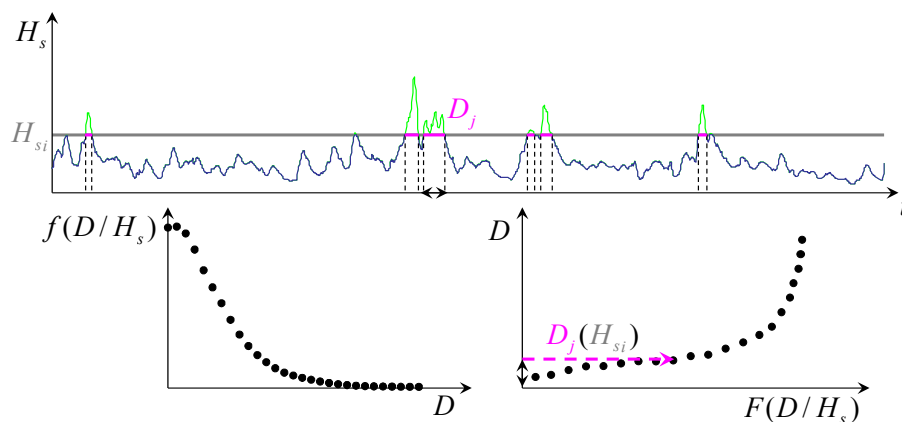


Figura 1.4. Esquema del régimen de persistencias (o duraciones) de  $H_s$ . En la parte superior se representa una serie temporal de  $H_s$  en la que se señala las duraciones  $D_j$  para un nivel de corte  $H_{si}$ . En la parte inferior se representa la función de densidad,  $f(D/H_s)$ , (izquierda) y la función de distribución,  $F(D/H_s)$ , (derecha).

- **Régimen extremal:** representa la probabilidad de que el valor máximo de un parámetro de estado de mar, en un periodo de tiempo determinado, no supere un cierto valor de dicho parámetro ( $F(\max(H_s))$ ). Usualmente, se representa el número medio de años (periodo de retorno) que transcurren entre eventos extremos de  $H_s$  (ver figura 1.5). Así, cuanto más larga sea la serie de oleaje, mayor número de eventos extremos tendrá y será mejor para caracterizar el régimen extremal. Generalmente se consideran series largas de oleaje de más de 20 ó 30 años.

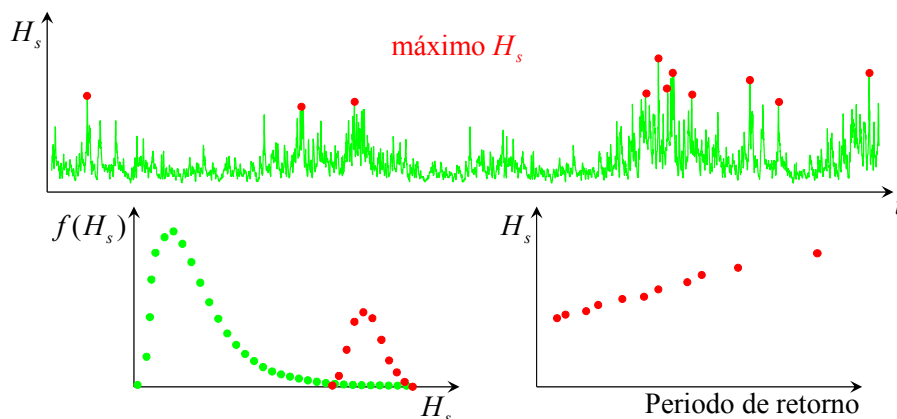


Figura 1.5. Esquema del régimen extremal de  $H_s$ . En la parte superior se representa una serie temporal de  $H_s$  en la que se señala los máximos de  $H_s$ . En la parte inferior se representa las funciones de densidad de  $H_s$  y de sus máximos,  $f(H_s)$ , (izquierda) y la función de distribución,  $F(H_s)$ , en función del periodo de retorno (derecha).

- **Tendencias:** las tendencias y las variaciones interanuales de los distintos parámetros representativos de las variables que caracterizan el oleaje en un lugar son las variaciones de dichos parámetros a escala interanual. Para su correcta determinación son necesarias series históricas de oleaje muy largas (40 años o más). En la figura 1.6 se presenta un croquis del significado de la tendencia media de  $H_s$ .

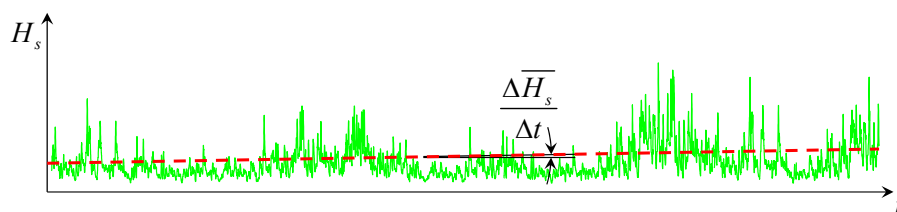


Figura 1.6. Esquema de la tendencia de la media de  $H_s$ . Se señala la pendiente de la curva de la media temporal de  $H_s$ .

Cabe señalar que los datos para caracterizar el clima marítimo en una posición deben ser homogéneos y de calidad, es decir, que hayan sido medidos o generados con los mismos procedimientos a lo largo de toda la serie y que representen correctamente la realidad.

También deben tener resoluciones temporales suficientes para definir correctamente los eventos más energéticos y transitorios, los temporales.

En la tabla 1.1 se resumen las características necesarias (N) y aconsejables (A) de los datos de oleaje que sirven para determinar los distintos aspectos de la caracterización del clima marítimo en la ubicación de la obra. En función del tipo de obra y su diseño se necesitarán caracterizar alguno o todos los regímenes del oleaje, con ello se definirán las características necesarias de los datos de oleaje para el diseño de una obra marítima concreta.

¿Qué se necesita?	R. Medio	Persistencias	R. Extremal	Tendencias
Serie corta	N			
Serie media	A	N		
Serie larga		A	N	
Serie muy larga			A	N
Serie continua		N	A	
Serie homogénea	A	N	N	N

Tabla 1.1. Características necesarias y aconsejables de los datos para definir los diferentes regímenes del oleaje.

Las características que deben tener las series de oleaje en la zona objetivo (ver tabla 1.1) están condicionadas a los datos existentes, que suelen estar en profundidades indefinidas, pero no deben verse transformadas por las técnicas que llevan dicha información hasta la zona de interés. Por ello, las técnicas y métodos de calibración de esta tesis deben conservar las características necesarias de los datos de oleaje para definir correctamente los regímenes frente a la obra marítima objeto de estudio.

### 1.3. Motivación.

En este apartado se resumen las conclusiones a las que se ha llegado tras el estudio del estado actual en las metodologías de calibración de bases de datos de oleaje (que será ampliamente desarrollado en el capítulo 3), y que sirven de motivación para la elaboración de esta tesis. Estas reflexiones se enmarcan en el estado actual de las bases de datos de oleaje, entre las que destacan las de modelado numérico (reanálisis) que como ya se ha comentado generan datos de excelentes características, con una gran cobertura espacial en mar abierto, pero que deben ser calibrados o validados con datos instrumentales.

Se ha podido comprobar que aunque a lo largo de la historia se han desarrollado multitud de métodos de calibración, aún no existe una metodología de general aplicación que defina la forma de actuar para cada supuesto de datos disponibles e información necesaria para caracterizar los regímenes de cada caso concreto.

Históricamente la manera de calibrar ha sido buscando una relación paramétrica sencilla para determinar la variable calibrada a partir de su variable original sin corregir. Para ello generalmente se ha utilizado la regresión lineal clásica (aunque han ido evolucionando desde las regresiones clásicas, simétricas, EIV,...) para relacionar la variable original sin calibrar con una de referencia que representa con exactitud el oleaje. Con este tipo de regresiones que definen un modelo de regresión lineal (recta) se corrige si una variable está sesgada respecto a otra, mejorando los estadísticos medios, pero no se tienen en cuenta las diferentes tendencias que pueden tener los valores extremos frente a los medios. En la figura 1.7 se representa un esquema del ajuste de una línea recta  $Y = \alpha + \beta X$ . Otro problema de éste tipo de modelos es que si la línea no pasa por el origen, como en el caso presentado, se pueden producir irregularidades, cambios de signo o inhomogeneidades en la calibración de los valores próximos a 0.

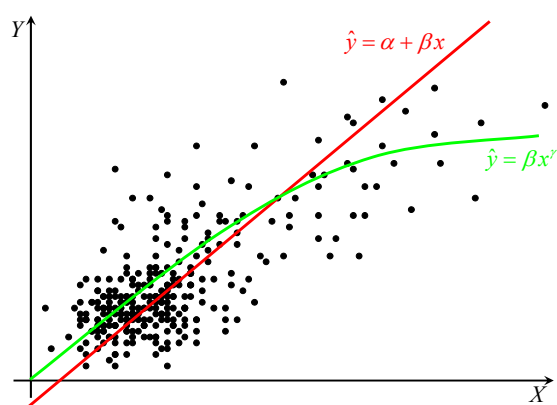


Figura 1.7. Esquema de ajustes de relaciones lineales y potenciales.

Una forma de poder calibrar correctamente el régimen medio-alto del oleaje, si tiene una tendencia distinta al régimen medio, es utilizar relaciones potenciales como la presentada en la figura 1.7,  $Y = \beta X^\gamma$ , que como pasa por el origen, también evita introducir inhomogeneidades en los valores próximos a 0. Pero a diferencia con las relaciones lineales, cuando han sido utilizadas este tipo de expresiones potenciales, generalmente se determinan sus parámetros de ajuste de manera que las funciones de distribución de probabilidad o los regímenes de oleaje de ambas variables coincidan.

Sin embargo los mejores métodos para calibrar el régimen medio son los no paramétricos; en ellos no se define la relación de calibración (lineal o no lineal), sino que adoptan la distorsión necesaria para cada dato. Para ello, es necesario que los datos (a calibrar y de referencia) sean simultáneos, como en las regresiones. Sin embargo, cuando no se tiene información coincidente con los datos a calibrar no se corrigen los datos originales, por lo que es frecuente que los datos más energéticos (menos frecuentes) no se calibren. Así cuando se quiere calibrar todo el intervalo de probabilidades de una variable, únicamente se puede calibrar ajustando

los regimenes medios con parametrizaciones no lineales (potenciales o logarítmicas, por ejemplo), asumiendo que la tendencia de calibración del régimen medio-alto es válida para los datos más energéticos (régimen extremal).

A modo de resumen, y tras haberse comprobado que no existe una metodología general para calibrar las bases de datos de oleaje de reanálisis con datos instrumentales; para los diferentes supuestos de datos disponibles, en la tabla 1.2 se resumen las características (pros y contras) de los distintos métodos o técnicas de calibración existentes, que serán estudiadas en detalle en el capítulo 3.

Calibración	Pros	Contras
Paramétricas utilizando regresiones lineales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrige correctamente sesgos del régimen medio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesita datos coincidentes.</li> <li>• Si los datos están desfasados temporalmente pueden no calibrarse correctamente.</li> <li>• No corrige correctamente el régimen medio-alto cuando existen distintas tendencias de calibración entre el régimen medio y medio-alto.</li> <li>• Si la relación de calibración tiene término independiente, pueden introducirse inhomogeneidades.</li> </ul>
Paramétricas con relaciones potenciales ajustadas a partir de comparación de regimenes medios.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es necesario que existan datos coincidentes en tiempo.</li> <li>• Corrige correctamente el régimen medio y medio-alto, e incluso modifica el régimen extremal asumiendo la misma tendencia de corrección que el régimen medio-alto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si la relación de calibración tiene término independiente, pueden introducirse inhomogeneidades.</li> <li>• Es necesario controlar las correcciones del régimen extremal.</li> </ul>
No paramétricas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adopta la corrección necesaria de cada dato del régimen medio.</li> <li>• No es necesario definir ninguna relación de calibración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesita datos coincidentes.</li> <li>• No modifica el régimen medio-alto o el régimen extremal si no existe suficiente información para ello.</li> </ul>

Tabla 1.2. Características de los métodos de calibración existentes.

Las técnicas de calibración han ido evolucionado a lo largo del tiempo con la aparición de distintas fuentes de información. Históricamente, los datos visuales desde barcos en ruta fueron la primera fuente de información para el diseño de obras marítimas, siendo muy utilizados hasta la actualidad, pero deben ser calibrados debido a que son una fuente de información subjetiva al observador que las realiza. Las bases de datos visuales fueron inicialmente calibradas mediante regresiones lineales clásicas con información de barcos meteorológicos, aunque posteriormente (desde los años 70) también se ha utilizado boyas

oceanográficas; finalmente con ambas fuentes de información se ha determinado relaciones de calibración no lineales comparando sus regímenes medios escalares.

Desde los años 80, con la aparición de datos de  $H_s$  medidos por los altímetros de radar de los satélites, se inició una revolucionaria nueva fuente de información con profundas repercusiones, pues su cobertura es global. Con los satélites se registra una información de una contrastada calidad, pero debe ser calibrada, utilizando para ello básicamente regresiones EIV (ver en el capítulo 3 sus características) con datos de boyas.

Prácticamente coincidentes con la aparición de los datos de satélites se desarrollaron los primeros modelos numéricos de generación de oleaje, también a escala global, cuyas enormes bases de datos deben ser calibradas para eliminar los errores intrínsecos a todo modelo matemático. Para ello, se han ido desarrollando diferentes métodos de calibración con la información conjunta de boyas y satélites fundamentalmente. Un grupo de técnicas de calibración corrigen las bases de datos de reanálisis globalmente, como por ejemplo las basadas en regresiones lineales múltiples EIV o más recientemente las calibraciones no paramétricas. Aunque también existen calibraciones de una zona particular, con validez local, mediante comparaciones de regímenes.

Como se ha comentado anteriormente, en el momento actual, ordinariamente se usan datos de reanálisis en profundidades indefinidas de la zona de estudio calibradas con información instrumental. Dichas calibraciones, cuando son globales, corrigen únicamente las desviaciones medias (en las paramétricas lineales) o son generales para grandes zonas (en las no paramétricas); en cambio las calibraciones particulares para una zona concreta con información instrumental de esa misma zona (denominadas calibraciones puntuales) suele ser mucho más eficientes, pero en muchos casos no existe suficiente información instrumental cercana, en cuyo caso la única opción viable actualmente son las calibraciones globales.

Así, por ejemplo, si la única información instrumental que se tiene para calibrar los datos de modelado numérico son las tres boyas mostradas en la figura 1.8 (Mahón, Capdepera y Dragonera), habrá zonas costeras de las islas donde no existen boyas cercanas (con un clima marítimo parecido), como por ejemplo los puntos rojos señalados uno entre Ibiza y Formentera y el otro en Mallorca (Bahía de Alcudia); por lo que los clásicos métodos de calibración puntual no pueden aplicarse. Habría que utilizar los métodos de calibración globales, que asumen similar el clima marítimo de todas las islas Baleares, incurriendo con esta hipótesis en una simplificación demasiado comprometida. Para resolver este problema sería necesario desarrollar un nuevo método de calibración (calibración espacial) que fuera

capaz de calibrar una zona cuando no existe información instrumental próxima con el mismo clima marítimo.



Figura 1.8. Situación de las boyas de oleaje en el archipiélago balear (imagen tomada de <http://earth.google.es/>).

Finalmente, los distintos métodos de calibración existentes han despreciado la información de la direccionalidad del oleaje, calibrando únicamente las variables escalares del oleaje con independencia de su dirección. Así por ejemplo en el caso presentado de las islas Baleares (ver figura 1.8) los métodos globales de calibración darían correcciones iguales para todas las direcciones, enmascarando o distorsionando de manera incorrecta el oleaje en zonas donde las distintas direcciones del oleaje pueden tener necesidades de calibración diferentes; ya que los oleajes en el mar Balear presentan una marcada direccionalidad y es posible que los modelos numéricos no generen con la misma fiabilidad los distintos oleajes.

A partir del resumen presentado en la tabla 1.2 de los métodos de calibración existentes, en la tabla 1.3 se muestran una serie de conclusiones y características que, a modo de resumen, presentan las metodologías generales de calibración actuales (calibración puntual, global y espacial).

Calibración	Pros	Contras
Puntual.	<p>Existen metodologías de calibración puntual escalar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paramétricas utilizando regresiones lineales.</li> <li>• Paramétricas con relaciones potenciales ajustadas a partir de comparación de regímenes medios.</li> <li>• No paramétricas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existen metodologías de calibración puntual direccional generales.</li> <li>• Las metodologías de calibración puntuales escalares existentes no corrigen de forma fiable los oleajes más energéticos.</li> </ul>



Calibración	Pros	Contras
Global.	Existen metodologías de calibración puntual escalar: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paramétricas utilizando regresiones lineales.</li> <li>• No paramétricas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existen metodologías de calibración puntual direccional generales.</li> <li>• Las metodologías de calibración puntuales escalares existentes no corrigen de forma fiable los oleajes más energéticos.</li> </ul>
Espacial.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existen metodologías de calibración espacial.</li> </ul>

Tabla 1.3. Características de las metodologías generales de calibración.

## 1.4. Objetivos.

Considerando los aspectos planteados en los apartados anteriores, en lo referente al estado de conocimiento actual sobre las metodologías de calibración de bases de datos de oleaje para la caracterización del clima marítimo necesario en el diseño de obras marítimas, se fijan una serie de objetivos generales y específicos a resolver por esta tesis.

Cabe señalar que los objetivos (y la metodología) de esta tesis debieran definirse tras la descripción del estado de conocimiento actual de los métodos de calibración de bases de datos de oleaje. Pero debido a la extensión de dicha información y para poder introducir de forma concisa esta tesis, se ha considerado dar una estructura a esta tesis en la que se fijan los objetivos y la metodología en este primer capítulo (planteamiento del problema), dejando para el capítulo 2 la descripción de los datos de oleaje y para el capítulo 3 el estado de conocimiento. Como se comentará posteriormente, estos tres primeros capítulos conforman la sección I de esta tesis (Introducción).

### 1.4.1. Objetivos generales.

El objetivo fundamental de esta tesis es definir una metodología de calibración de bases de datos de oleaje para definir lo más correctamente posible (con la información disponible) el clima marítimo en una ubicación dada, especificando criterios para elegir los mejores métodos de calibración adaptándose a los datos disponibles e información necesaria.

El objetivo de definir una metodología de calibración subyace a la necesidad de caracterizar y conocer correctamente el clima marítimo en España, como base para el correcto diseño de obras marítimas. Así se proporciona la información necesaria para cumplir los requerimientos

de seguridad, funcionalidad, sostenibilidad, adaptación ante el cambio climático,...que actualmente demanda la sociedad.

### **1.4.2. Objetivos específicos.**

A continuación se definen una serie de objetivos más específicos, a solucionar por esta tesis:

- A pesar de que la metodología de calibración se circunscribe al oleaje del ámbito costero español, se planteará de la forma más general posible para que se pueda aplicar a otras zonas y a otras variables geofísicas.
- Las técnicas que van a ser implementadas o desarrolladas asegurarán la rigurosidad estadística de la calibración, pero no siempre será necesario utilizar las técnicas más sofisticadas, sino que se tratarán de utilizar las herramientas más simples y seguras, sin pérdida de precisión, para facilitar su uso y difusión.
- Se definirán una serie de criterios y recomendaciones para validar y verificar los resultados de las calibraciones de los distintos métodos empleados.
- Las distintas técnicas de calibración tendrán que corregir consecuentemente los oleajes más energéticos, que son los que condicionan el diseño de las obras marítimas. También deberán considerar la dirección del oleaje para calibrar, definiéndose métodos de calibración direccionales para corregir correctamente los oleajes que presentan diferenciadas características direccionales.
- Se va a definir un método de calibración espacial para resolver el problema de caracterizar el clima marítimo en una posición donde no hay datos instrumentales próximos, entendiendo por próximos los que tienen un parecido clima marítimo.

## **1.5. Metodología.**

Previamente a la definición de la metodología de calibración de las bases de datos de oleaje se va a estudiar pormenorizadamente las distintas técnicas de calibración existentes, así como las fuentes de información de datos de oleaje actuales.

De las fuentes de información y bases de datos de oleaje que existen, se van a estudiar sus tipos, características y clasificaciones, atendiendo más detalladamente a los del ámbito costero

## CAPÍTULO 1

español. De esta manera se podrá utilizar la información que suministran las diferentes bases de datos de que se disponga, de la manera lo más eficiente posible.

Se prestará especial atención a las bases de datos de satélites y de reanálisis por su gran calidad y cobertura espacial, así como su evolución y mejora continua a futuro. También se aprovechará la privilegiada información que se dispone en las costas españolas con las redes de boyas existentes.

De las bases de datos de reanálisis se va a aprovechar que son continuas durante largos periodo de tiempo y que tienen muy buenas resoluciones espaciales y temporales para generar información homogénea, continua y en la posición que interesa, pero previamente siempre se deberá calibrar con datos instrumentales (boya y/o satélites) para garantizar la calidad de dicha información.

Dentro de la metodología de calibración general, se van a definir diferentes técnicas de calibración particulares para resolver los diferentes casos de calibración que se pueden plantear, en función de los datos disponibles e información que es necesario caracterizar.

Las distintas técnicas de calibración tendrán que corregir consecuentemente los oleajes más energéticos, que son los que normalmente condicionan el diseño de las obras marítimas y de los que usualmente menos información instrumental se dispone. Para ello, se van a definir criterios de ajuste y caracterización del régimen medio con los que se represente lo más fielmente posible los oleajes más severos (rama alta del régimen medio). No se emplearán técnicas basadas en los regímenes extremales, pues con ellos se acota el rango de validez de la calibración únicamente a los oleajes más energéticos y pocas veces es posible definir correctamente regímenes extremales con datos instrumentales (debido a su escasez).

También se describirán y definirán otras técnicas de calibración no basadas en los regímenes medios, que podrán utilizarse cuando no sea necesario la caracterización del régimen extremal, como las calibraciones basadas en los diagramas de dispersión o las calibraciones no paramétricas.

Para resolver el problema de caracterizar el clima marítimo en una posición donde no hay datos instrumentales con un clima marítimo similar, se va a definir el método de calibración espacial. Como se explicará a lo largo de la tesis, dicho método de calibración aprovecha las correlaciones espaciales de los datos de reanálisis para calibrar el oleaje en una posición con información instrumental relativamente lejana.

Así mismo, se adecuarán todos los métodos de calibración para calibrar direccionalmente los oleajes que presentan diferenciadas características direccionales, de manera que sean válidos y aplicables con generalidad a todos los casos de oleajes existentes.

Pese a que la metodología de calibración conviene que sea general, a su vez, debe poder definirse fácilmente en los casos concretos de calibración de bases de datos de oleaje reales para el diseño de obras marítimas determinadas. Por ello se presentarán casos prácticos de aplicación de las metodologías definidas por esta tesis, permitiendo a su vez demostrar la importancia de incorporar el proceso de calibración en el diseño de obras marítimas.

## **1.6. Organización de la Tesis.**

La presente tesis se ha estructurado en 2 secciones y en 11 capítulos. Recogiéndose en la Sección I los tres primeros capítulos (Capítulo 1, 2 y 3) y en la Sección II los ocho restantes (Capítulo 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11). En la Sección I se introduce el problema y la necesidad de calibrar las bases de datos de oleaje, describiendo las bases de datos de oleaje y el estado del arte de los métodos de calibración actuales. En la Sección II se presentan las aportaciones de esta tesis, realizando una completa clasificación de las metodologías de calibración, explicando y aplicando cada uno de los distintos métodos desarrollados.

El Capítulo 1, en el que se incluye este apartado, ha introducido la calibración de los datos oceanográficos dentro de la metodología general para caracterizar el clima marítimo en una zona de interés, presentando su problemática específica. También se ha resumido los problemas que ya están resueltos y cuáles quedan aún por solucionar, lo que motiva la definición de una serie de objetivos a solventar por esta tesis.

En el Capítulo 2 se describe pormenorizadamente los datos de oleaje, estudiando sus parámetros, sus fuentes de información y las bases de datos de oleaje existentes en la actualidad.

En el Capítulo 3 se presenta el estado de conocimiento actual de las técnicas estadísticas de tratamiento de datos (destacando las diferentes técnicas de regresión) y el estado del arte de las metodologías de calibración de bases de datos de oleaje.

En el Capítulo 4 se desarrolla y clasifica una completa metodología de calibración para caracterizar el clima marítimo en profundidades indefinidas bajo cualquier supuesto y disponibilidad de bases de datos de oleaje en España.

## CAPÍTULO 1

En el Capítulo 5 se describen las distintas metodologías de calibración puntual paramétricas definidas en profundidades indefinidas, tanto escalares como direccionales, aplicándolas a distintos casos.

El Capítulo 6 desarrolla, mediante un ejemplo de aplicación, la metodología de calibración puntual con información en profundidades reducidas, tanto escalar como direccional.

En el Capítulo 7 se describe la completa metodología de calibración puntual no paramétrica, escalar y direccional, desarrollada e implementada para el ámbito costero español.

En el Capítulo 8 se explica la metodología de calibración espacial escalar, presentando los resultados de una zona del Mar Mediterráneo con la que se calibra todas las costas del archipiélago Balear.

El Capítulo 9 desarrolla la novedosa metodología de calibración espacial direccional, presentando los resultados en la misma zona del Mar Mediterráneo que se utilizó con la calibración espacial escalar.

En el Capítulo 10 se aplica la metodología de calibración puntual paramétrica direccional  $QQ$  (explicada en el Capítulo 5) para caracterizar los regímenes extremales de oleaje en aguas abiertas a lo largo del litoral español, presentando las diferencias en los resultados respecto a utilizar las bases de datos de oleaje sin calibrar.

Finalmente en el Capítulo 11 se incluyen una serie de conclusiones propias de la sección II, resumiendo las contribuciones de esta tesis y las futuras líneas de investigación.

Posteriormente, se presentan dos anejos. En el Anejo I se presenta la descripción de una serie de distribuciones estadísticas utilizadas para el ajuste y caracterización del régimen medio de oleaje, así como las distorsiones necesarias para estimar sus parámetros a través del método de los papeles probabilísticos. En el Anejo II se detalla la técnica estadística de descomposición en funciones empíricas ortogonales, que reduce la información redundante en variables de alta dimensionalidad, utilizada en esta tesis de manera innovadora para calibrar espacialmente.



