

ANEJO 4

ESTUDIO MORFODINÁMICO Y DE COTA DE INUNDACIÓN DEL IH CANTABRIA



II.- ESTUDIO MORFODINAMICO Y DE LA COTA DE INUNDACIÓN DE LA PLAYA DE REGATÓN, Y. M. DE LAREDO



**REALIZACIÓN DE UN ESTUDIO MORFODINÁMICO
Y DE LA COTA DE INUNDACIÓN
DE LA PLAYA DEL REGATÓN, T. M. DE LAREDO**
INFORME FINAL



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO

SECRETARÍA GENERAL
DEL MAR

DIRECCIÓN GENERAL
DE SOSTENIBILIDAD
DE LA COSTA Y DEL MAR

ÍNDICE

ÍNDICE

ANTECEDENTES	1
1. INTRODUCCIÓN	1.1
1.1 Exposición de motivos	1.1
1.2 Planteamiento del problema	1.1
1.3 Objetivos	1.4
1.4 Estructura del documento	1.4
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	2.1
2.1 Descripción morfológica	2.1
2.2 Evolución histórica	2.3
3. DINÁMICAS ACTUANTES	3.1
3.1 Introducción	3.1
3.2 Marea astronómica	3.2
3.2.1 Fuentes de datos	3.2
3.2.2 Caracterización de la marea astronómica	3.4
3.2.3 Estudio de la propagación de la onda de marea	3.8
3.3 Marea meteorológica	3.14
3.3.1 Marea meteorológica por presión atmosférica	3.14
3.3.2 Marea meteorológica por viento	3.22
3.4 Caudal fluvial	3.28
3.4.1 Fuentes de datos	3.28
3.4.2 Caracterización del caudal del río Asón	3.29
3.4.3 Análisis del efecto del caudal del río Asón en la zona de estudio	3.30
3.5 Oleaje	3.34
3.5.1 Fuentes de datos	3.34
3.5.2 Caracterización del oleaje exterior	3.37
3.5.3 Análisis del efecto del oleaje exterior en la zona de estudio	3.42
3.5.4 Oleaje generado localmente por viento	3.45
3.6 Conclusiones	3.46

4. RÉGIMEN EXTREMAL DE INUNDACIÓN	4.1
4.1 Introducción	4.1
4.2 Cálculo de la cota de inundación	4.2
4.2.1 Marea astronómica	4.2
4.2.2 Marea meteorológica	4.3
4.2.3 Cota de inundación	4.4
4.3 Cálculo del régimen extremal de la cota de inundación	4.5
4.3.1 Metodología	4.5
4.3.2 Resultados.....	4.6
4.4 Cota de inundación teórica con los máximos temporales conocidos.....	4.8
 5. ESTUDIO MORFODINÁMICO.....	5.1
5.1 Introducción	5.1
5.2 Morfodinámica sedimentaria a largo plazo	5.3
5.3 Efectos globales originados por la recuperación de concesiones.....	5.5
5.4 Efectos en la playa del Regatón originados por la recuperación de concesiones	5.7
 6. ESTUDIO DEL PERFIL ESTABLE FUTURO	6.1
 7. CONCLUSIONES	7.1
7.1 Cálculo de la cota de inundación actual.....	7.1
7.2 Estabilidad de la playa del Regatón teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos originados por la recuperación de concensiones y la cota de inundación	7.2
 8. REFERENCIAS	8.1

ANEJOS

Anejo I. MODELO NUMÉRICO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE MSP

Anejo II. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÁMICO DE PROPAGACIÓN DE ONDA LARGA (H2D)

Anejo III. MAPAS DE INUNDACIÓN EN LA PLAYA DEL REGATÓN

ANTECEDENTES

Con fecha de 8 de Octubre de 2009, la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino solicitó a la Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria la realización de un estudio morfodinámico y de cota de inundación de la playa del Regatón (T.M. de Laredo). En dicho estudio se debía determinar la superficie necesaria de terreno para asegurar la estabilidad de la playa del Regatón, teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos que se producirán en esta zona debido a la prevista recuperación de antiguas concesiones en el estuario de Santoña, la acción de la dinámica fluvio-mareal en la zona y la elevación del nivel del mar. El resultado de este estudio permitirá establecer el dominio público marítimo-terrestre en la zona del Regatón (T.M. Laredo).

Como respuesta a esa solicitud se ha redactado este informe que ha sido elaborado por los miembros del Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantabria) de la Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria:

- Raúl Medina Santamaría, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de la Universidad de Cantabria.
- Sonia Castanedo Bárcena, Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Investigadora Ramón y Cajal de la Universidad de Cantabria.
- Ana Julia Abascal Santillana, Doctora por la Universidad de Cantabria. Investigadora postdoctoral de la Universidad de Cantabria

Santander, 23 de Octubre de 2009



IH cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL

Fdo.: Sonia Castanedo Bárcena
Investigadora responsable del estudio



Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Exposición de motivos

Las excepcionales condiciones del litoral para el desarrollo de múltiples actividades humanas han propiciado una continua migración de habitantes, industrias y servicios a las zonas costeras. Los motivos de dicha migración han evolucionado en el tiempo, siendo históricamente el comercio, la actividad portuaria y los asentamientos agrícolas en los fértiles deltas y llanuras aluviales las causas de dicha migración, mientras que en la actualidad lo son el turismo asociado al ocio y el disfrute del litoral.

En el litoral coexisten, por tanto, diferentes usos y actividades cuya gestión es un proceso complejo y a la vez necesario para evitar su deterioro y garantizar su protección. La vigente ley de costas tiene como objetivo la protección y conservación del litoral, protegiendo especialmente el dominio público marítimo terrestre. Uno de los objetivos de la ley consiste en la realización del deslinde en aquellas zonas donde no exista o sea incompleto.

Concretamente, en el término municipal de Laredo, la O.M. de aprobación del deslinde del dominio público marítimo-terrestre comprendido entre la Punta de Laredo y el límite con el Término Municipal de Laredo de fecha 12 de Diciembre de 2003, dejó sin aprobar la zona dunar de la playa del Regatón entre los vértices 04009 y 04122, para que se pudiera realizar un estudio en detalle de este tramo y proceder a tramitar un nuevo deslinde.

Para cumplir con este objetivo, en el presente estudio se estudia la estabilidad de la playa del Regatón, teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos que se producirán en esta zona debido a la prevista recuperación de antiguas concesiones en el estuario de Santoña, la acción de la dinámica fluvio-mareal en la zona y la elevación del nivel del mar.

1.2 Planteamiento del problema

El nivel del mar sufre continuas variaciones en respuesta a los diferentes forzamientos atmosféricos, marinos, tectónicos y planetarios, siendo habitual clasificar dichas oscilaciones por la escala temporal de la oscilación. Las oscilaciones más relevantes en términos de inundación costera son: el oleaje, la marea meteorológica y la marea astronómica.

El oleaje es, sin lugar a dudas, la oscilación del mar más comúnmente conocida y también la más relevante en términos de erosión litoral e inundación costera. El oleaje, generado por la acción del viento sobre la superficie del mar, es una oscilación del mar con períodos entre 3 y 30 segundos cuya magnitud, en un período de retorno de 50

años, supera los nueve metros de altura de ola significativa en las costas atlánticas españolas y los seis en las costas mediterráneas.

La marea meteorológica es una oscilación del nivel del mar debido a la acción conjunta de la variación de presión y el arrastre del viento, y su período puede ser desde varios minutos a días. Las bajas presiones atmosféricas asociadas al paso de las borrascas generan un ascenso del nivel del mar asociado a la depresión barométrica de las mismas. Las grandes borrascas extra-tropicales que afectan al litoral español, generan, de modo habitual, sobreelevaciones del orden de 30-40 centímetros y pueden llegar a generar sobreelevaciones del orden del metro. El viento, por su capacidad de arrastrar agua, es otro factor que puede dar lugar a la sobreelevación del nivel del mar en la costa. Para que la acción del viento genere una elevación del nivel del mar de entidad es necesario que la magnitud del viento sea importante, por encima de los 20 m/s, y, fundamentalmente, que se den determinadas condiciones de geometría de la costa y poco calado. En algunos lugares del mundo, bien por la magnitud de las borrascas (huracanes), bien por las características de la costa (Países Bajos, Venecia...), los efectos de la marea meteorológica, combinados con la presencia de oleaje, pueden llegar a ser devastadores.

Por último, la marea astronómica es una oscilación del nivel del mar de carácter determinista cuyo período de oscilación varía entre las 12 horas y los 19 años. La magnitud de la misma a lo largo del litoral español es muy variable, siendo la carrera de marea media en el Cantábrico de unos 3.5 m. Contrariamente a lo que pudiera parecer, la marea astronómica juega un papel de "laminación" de los eventos extraordinarios de inundación costera, puesto que la coincidencia de un evento extremo de oleaje y marea meteorológica con una marea viva equinoccial tiene un período de ocurrencia mayor. Lo habitual es que dichos eventos extremos sucedan con mareas medias y, por lo tanto, se atenúen los efectos de la sobreelevación meteorológica.

De todo lo anterior se deduce que la inundación costera es un fenómeno aleatorio fruto de la combinación de diferentes procesos de la dinámica marina. De una manera simplificada el fenómeno de inundación costera puede ser representado de acuerdo al esquema de la figura 1.1.

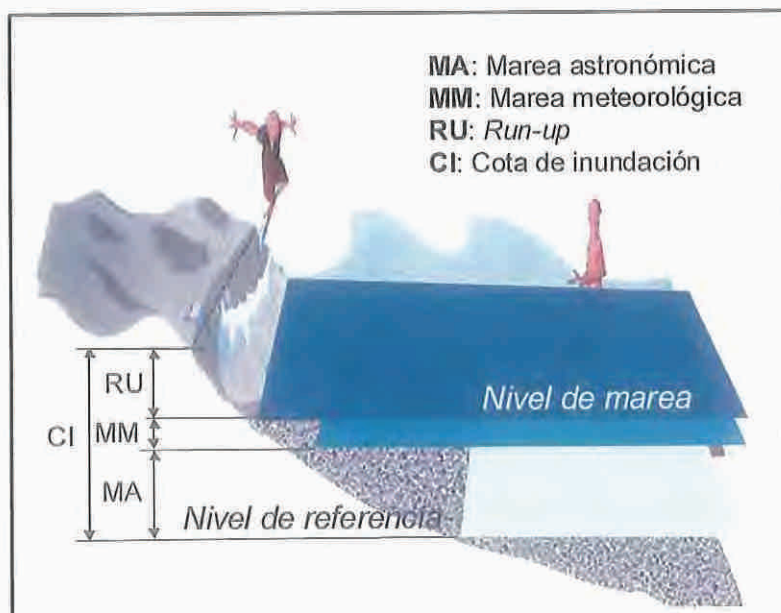


Figura 1.1. Esquema de cota de inundación (CI).

En un instante determinado, la playa está caracterizada por un nivel de marea compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe en la playa, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de playa *run-up* (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí. Además de la interacción entre los elementos (oleaje-batimetría-nivel de marea-ascenso), el fenómeno de la inundación presenta la complicación añadida de que algunos de los factores (oleaje, viento...) son variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad.

Por consiguiente, la determinación de la cota de inundación es un problema estocástico de extremos. Una de las consecuencias de que sea un problema estocástico es que no existe un "límite determinista al que llegan las olas durante el peor temporal", sino que cada nivel tendrá una probabilidad de ser sobrepasado en un temporal determinado.

Al margen del análisis estadístico, la existencia, hoy en día, de datos históricos de reanálisis de larga duración de las variables previamente citadas (viento, oleaje, marea...), suponen una fuente de información a partir de la cuál conocer los máximos temporales ocurridos en un período dado y determinar, por tanto, la cota de inundación originado por estos eventos extremos.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este estudio es determinar la estabilidad de la playa del Regatón, teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos debidos a la recuperación de antiguas concesiones en el estuario de Santoña, a la acción de la dinámica fluvio-mareal en la zona y a la elevación del nivel del mar.

Para ello se plantean una serie de objetivos específicos:

- Caracterización del nivel de marea.
- Caracterización de los caudales del río Asón.
- Caracterización del oleaje en la zona de estudio.
- Estudiar y determinar los factores que afectan a la cota de inundación en el área de estudio.
- Cálculo de la cota de inundación en la zona de estudio.
- Obtención del régimen extremal de cota de inundación en la zona de estudio.
- Representación espacial de los cuantiles de cota de inundación asociados a los periodos de retorno 10, 50, 100 y 200 años.
- Representación espacial de la cota de inundación teórica asociada a los máximos temporales conocidos.
- Analizar los cambios morfodinámicos esperables en la playa del Regatón debido a la recuperación de antiguas concesiones.
- Determinar la superficie mínima de terreno que garantice la estabilidad de la playa del Regatón teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos esperables por la recuperación de concesiones, la acción de la dinámica fluvio-mareal en la zona y la elevación del nivel del mar.

1.4 Estructura del documento

El presente documento se organiza del siguiente modo:

Capítulo 1. Introducción, donde se presenta la exposición de motivos, el planteamiento del problema y los objetivos del trabajo.

Capítulo 2. Descripción de la zona de estudio, en el que se realiza una breve descripción de la morfología de la zona, destacando las características físico-geográficas más importantes.

Capítulo 3. Dinámicas actuantes, en el que se analiza con detalle cada uno de los elementos que afectan al régimen de inundación en la playa del Regatón.

Capítulo 4. Régimen extremal de inundación, donde se calcula la cota de inundación y su régimen extremal para la playa del Regatón.

Capítulo 5. Estudio morfodinámico, donde se analiza el efecto de los cambios morfodinámicos esperables en la playa del Regatón debido a la recuperación de antiguas concesiones.

Capítulo 6. Estudio del perfil estable futuro, donde se estudia la estabilidad de la playa teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos esperables por la recuperación de concesiones y la cota de inundación calculada previamente.

Capítulo 7. Conclusiones, en el que se resumen los aspectos más relevantes del estudio y se establecen una serie de conclusiones.

Capítulo 8. Referencias, en el que se presentan las citas bibliográficas utilizadas en el estudio.

ANEJOS

Anejo I. MODELO NUMÉRICO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE MSP

Anejo II. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÁMICO DE PROPAGACIÓN DE ONDA LARGA (H2D)

Anejo III. MAPAS DE INUNDACIÓN EN LA PLAYA DEL REGATÓN



Capítulo 2

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el presente capítulo se realiza una breve descripción de la morfología de la zona, destacando las características físico-geográficas más importantes.

2.1 Descripción morfológica

La playa del Regatón forma parte del Término Municipal de Laredo, situado en la parte oriental de Cantabria. La playa se encuentra enmarcada en el estuario de Santoña y se localiza paralela a la Ría de Treto, desembocadura del río Asón. En la figura 2.1 se muestra un plano con el área de estudio (destacada por el cuadrado azul). Se puede observar que la playa se ubica en el interior del estuario, limitando con la ría de Treto, la cual discurre en dirección Sur-Norte, abriéndose en una bahía que se comunica con el mar por el Este, a través de la canal de San Martín entre el monte Buciero y el puntal de Laredo.

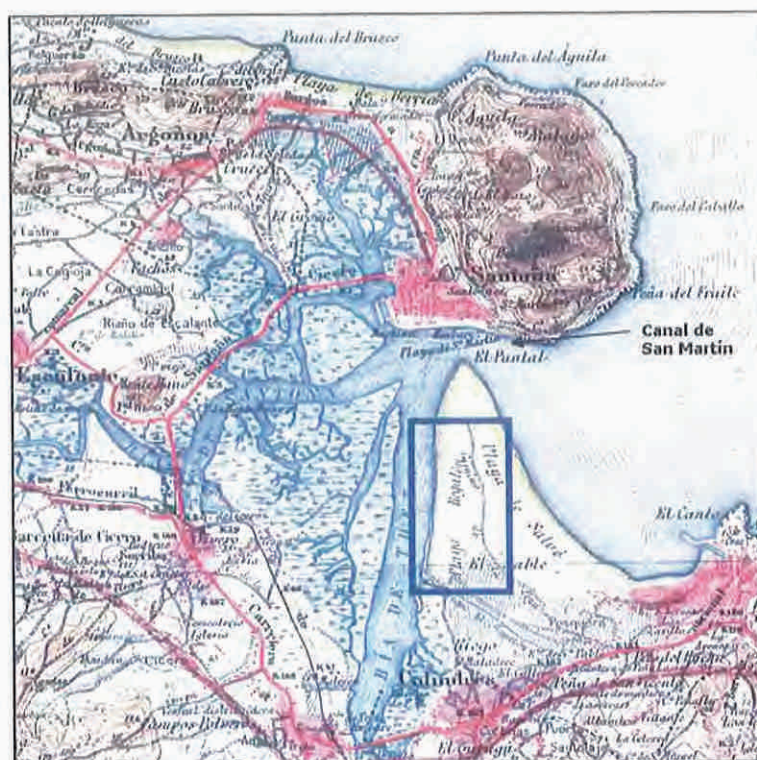


Figura 2.1. Estuario de Santoña. La zona de estudio se destaca con un cuadrado azul.

Aunque el área objeto de estudio es la playa del Regatón, la dinámica en esta zona se ve afectada por los elementos geográficos que la rodean. Se puede distinguir entre la zona exterior, que comprende la playa y batimetría exterior, y la zona interior que comprende la ría y la playa del Regatón.

En la zona exterior se encuentra la Playa de la Salvé o Playa de Laredo que se extiende desde el Puerto de Laredo hasta el Puntal (ver figura 2.1). En el Puntal se encuentra la bocana del estuario que es la frontera entre las zonas exterior e interior. A medida que nos alejamos de la Playa de Laredo hacia mar adentro, la batimetría es más regular, siendo prácticamente recta y paralela a partir de 25 m de profundidad. No existen bajos importantes, salvo los típicamente situados a la salida del estuario. En la figura 2.2 se muestra la carta náutica de la zona descrita.

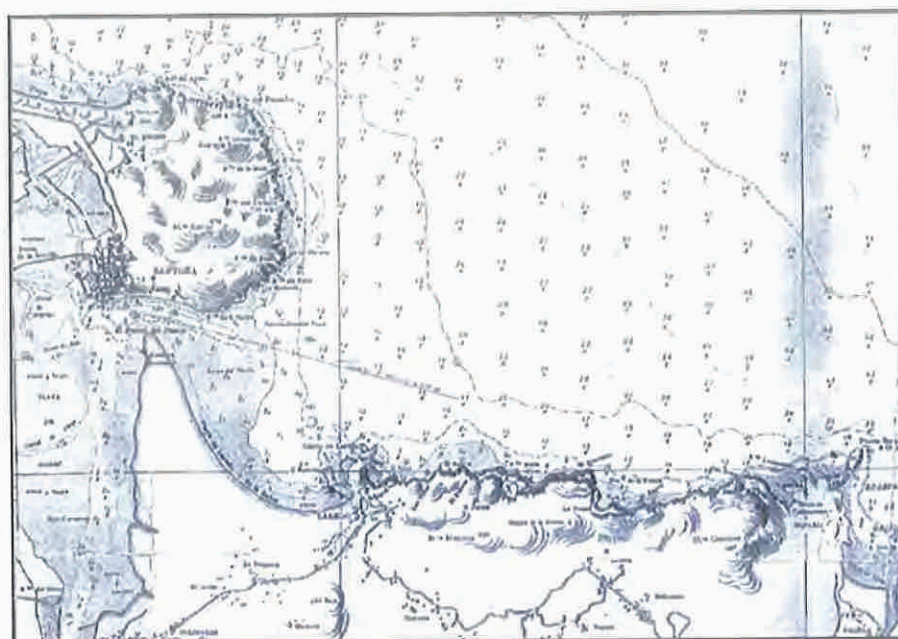


Figura 2.2. Carta náutica (nº 941, Instituto Hidrográfico de la Marina).

Al otro lado del Puntal y formando la otra margen de la bocana, se encuentra Santoña. Estas dos márgenes dejan un paso de aproximadamente 500 m de ancho. Cabe destacar, por su efecto en la propagación del oleaje, el monte Buciero localizado al Norte de la bocana. En la figura 2.3 se puede ver una imagen del Puntal, apreciándose la presencia del Monte Buciero.

En el interior del estuario, es importante mencionar la presencia del río Asón, el cuál aporta el caudal fluvial más importante al estuario de Santoña. La ubicación de la playa en la zona interior, supone que ésta tenga una protección natural respecto a la acción del viento y del oleaje presentes en el exterior.



Figura 2.3. El Puntal y el monte Buciero (Fuente: <http://livecamlaredo.com/>).

2.2 Evolución histórica

La playa del Regatón se encuentra en el estuario de Santoña, concretamente en la desembocadura del río Asón.

La evolución del estuario, y por tanto de la playa del Regatón, viene marcada por:

- La naturaleza sedimentaria propia de estos ecosistemas.
- Por la intervención humana, que ha acelerado muy notablemente los fenómenos de sedimentación natural.

Como dato ilustrativo, se puede citar a Madoz que en 1850 decía que podían “llegar buques de 500 toneladas hasta el puntal de Treto, para hacer las estaciones” y “construir barcos en la misma”.

Durante la regresión flandriense la sedimentación natural que siguió al retroceso marino contribuyó de forma importante a la reducción superficial del estuario, dando lugar a la flecha arenosa del puntal de la Salvé.

En la figura 2.4 se muestra un plano del año 1789 y uno actual en los que se puede ver la gran ocupación humana sufrida por la zona.



Figura 2.4. Plano de 1789 (superior) y actual (inferior).



Capítulo 3

DINÁMICAS ACTUANTES



3. DINÁMICAS ACTUANTES

3.1 Introducción

El régimen de inundación alcanzado en un punto de un estuario es un fenómeno especialmente complejo, tanto por el gran número de fenómenos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción entre dichos elementos.

En una primera aproximación, el fenómeno de inundación de un estuario puede ser representado de acuerdo con el siguiente esquema o modelo simple de funcionamiento: en un instante determinado el nivel del mar exterior está caracterizado por una marea astronómica y una marea meteorológica. Estas mareas se propagan por el interior del estuario modificando sus características en función de la geometría del estuario, rugosidad del lecho y la presencia de un caudal fluvial. Superpuesto a estas oscilaciones de muy largo período se encuentra el oleaje que, bajo determinadas condiciones, se propaga por el interior del estuario provocando una nueva variación de la cota de inundación de las márgenes del estuario.

En el modelo de funcionamiento anterior, se han citado una serie de dinámicas que condicionan la cota de inundación. Estas dinámicas son:

- Marea Astronómica
- Marea Meteorológica
- Caudal Fluvial
- Oleaje

Cada uno de los elementos anteriores depende, a su vez, de una serie de factores. Así, por ejemplo la marea meteorológica depende del viento, variaciones de presión... El caudal fluvial depende del régimen de precipitaciones ...

Nótese, además, que algunas de las dinámicas anteriormente señaladas (oleaje, viento...) son variables aleatorias, y que, consecuentemente, la cota de inundación es una variable aleatoria y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad de ocurrencia.

En este capítulo se analiza con detalle cada uno de los elementos que afectan al régimen de inundación en la playa del Regatón con el objeto de mostrar la importancia relativa de los mismos.

3.2 Marea astronómica

3.2.1 Fuentes de datos

La marea astronómica (MA) es la variable determinista que interviene en la cota de inundación. La MA se define como el conjunto de movimientos de ascenso y descenso del nivel del mar con períodos próximos a las 12 ó 24 horas que se producen por los efectos gravitacionales del sistema Tierra-Luna-Sol. El resto de planetas también intervienen, pero en menor medida. La amplitud de la MA en el litoral español depende del lugar, siendo de 4 m en el litoral Cantábrico, 2.5 m en la costa atlántica y de pocos centímetros para el caso del mar Mediterráneo.

La información necesaria de MA para la elaboración de este estudio se ha obtenido del mareógrafo de Santander (figura 3.1). Las series de datos han sido suministradas por el Área de Conocimiento de Medio Físico de Puertos del Estado, disponiéndose de un registro horario del nivel del mar en el período comprendido entre el 01/07/1992 y el 31/03/2009. Se ha elegido el mareógrafo de Santander, dada la relativa proximidad a la zona de estudio.

Mareógrafo de Santander

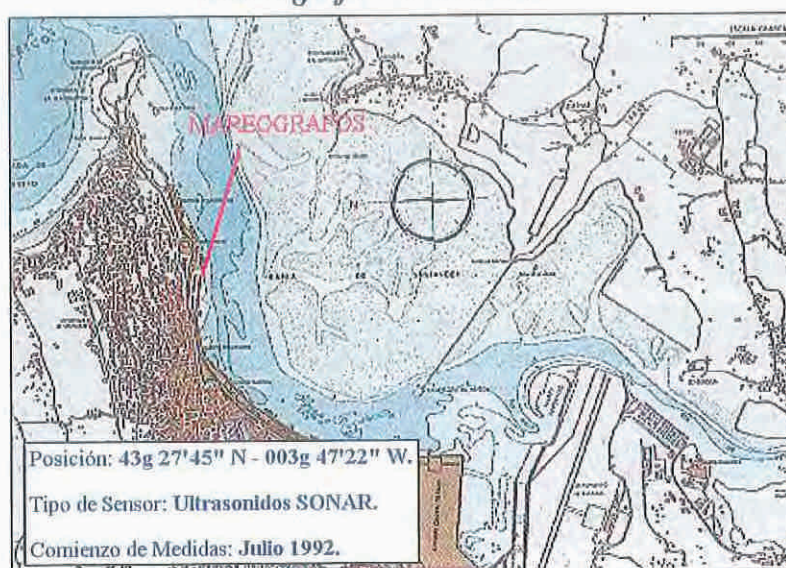


Figura 3.1. Posición y características del mareógrafo de Santander.

Niveles de referencia utilizados

En la figura 3.2, se presentan las relaciones entre el Nivel Medio del Mar (NMM) en Santander y otros niveles de referencia como son el Cero del Puerto (CP), la Pleamar Máxima Viva Equinoccial (PMVE) y la Bajamar Máxima Viva Equinoccial (BMVE). Dado que la topografía utilizada para la realización de este estudio es anterior a la

compensación general de toda la red de nivelación nacional realizada por el Instituto Geográfico Nacional en 1998, los niveles de referencia utilizados son los siguientes:

NIVEL (m)	COTA RESPECTO DEL NMMA (m)	COTA RESPECTO DEL CP (m)
PMVE	+3,054	+5,228
NMM	+0,654	+2,828
NMMA	0	+2,174
BMVE	-1,746	+0,428
CP	-2,174	0

Tabla 3.1. Cota de diferentes niveles del mar (m) respecto del Cero del Puerto.

En la tabla 3.1 se muestran las cotas de los diferentes niveles indicados respecto al CP y al NMMA. Se observa que el Cero del Puerto de Santander se encuentra 2,174 m por debajo del Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA).

NIVELES DE REFERENCIA

SANTANDER

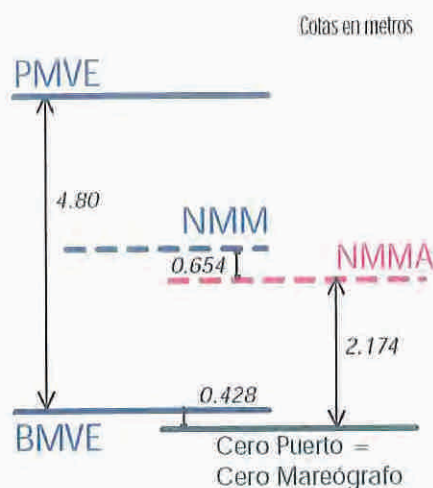


Figura 3.2. Niveles de referencia en Santander.

Generalmente, el estudio de la MA se hace mediante un análisis por componentes armónicas, a través del cual la onda de marea se divide en una suma de varias ondas de distintas frecuencias, en teoría, cada una de ellas forzada por un planeta ficticio. A partir de un registro de varios años, es posible extraer sus componentes armónicas y a partir de ellas hacer una predicción de la marea para un instante determinado.

3.2.2 Caracterización de la marea astronómica

La teoría actual permite establecer un método práctico para la determinación de mareas en puntos a lo largo de la costa y estuarios, de modo que conozcamos la marea en un punto determinado con detalle. Este método práctico, conocido como Análisis Armónico de Mareas, adopta las siguientes hipótesis de partida:

- La marea resultante en cualquier punto es suma de un número finito de constituyentes, cada uno con su propia periodicidad, desfase y amplitud.
- Estos constituyentes son armónicos simples en tiempo y son independientes entre sí.

Con estas hipótesis puede expresarse:

$$\eta = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t + \beta_i\right) \quad (3.1)$$

donde η es la marea resultante en una localización particular, compuesta por N constituyentes. La amplitud, desfase y período de cada componente son a_i , β_i y T_i respectivamente. El nivel medio del mar viene dado por a_0 .

Para llevar a cabo la predicción de la marea mediante el análisis armónico se sigue el proceso siguiente:

- Medida y análisis de la onda de marea en un punto para la obtención de las amplitudes, desfases y períodos de las componentes en ese punto.
- Empleo de esta información para predecir futuras variaciones.

En este estudio, para caracterizar la marea astronómica se ha comenzado realizando el análisis armónico de la serie de nivel del mareógrafo de Santander, con el objetivo de extraer sus componentes armónicas. Para ello se ha utilizado un conjunto de programas desarrollados en matlab, denominado t_tide (Paulowicz et al., 2002).

En la tabla 3.2 se muestran las componentes, frecuencia, amplitud y fase obtenidas en el análisis armónico.

Componente	Frecuencia (ciclos/hora)	Amplitud (m)	Fase (°)
SSA	0.0002282	0.0262	144.69
MSM	0.0013098	0.0136	1.01
MM	0.0015122	0.0174	21.08
MSF	0.0028219	0.0147	179.24
MF	0.0030501	0.0212	212.9
ALP1	0.0343966	0.0017	229.32
2Q1	0.0357064	0.0048	223.21
SIG1	0.0359087	0.0048	232.59
Q1	0.0372185	0.0247	271.03
RHO1	0.0374209	0.0045	286.53
O1	0.0387307	0.0706	324.4
TAU1	0.0389588	0.0015	114.15
BET1	0.0400404	0.0021	74.01
NO1	0.0402686	0.0104	77.07
CHI1	0.040471	0.0015	168.25
P1	0.0415526	0.0202	55.84
K1	0.0417807	0.0649	69.86
PHI1	0.0420089	0.0009	0.71
THE1	0.0430905	0.0009	30.9
J1	0.0432929	0.0025	168.23
SO1	0.0446027	0.0011	21.54
OO1	0.0448308	0.001	252.13
UPS1	0.046343	0.001	37.13
OQ2	0.0759749	0.0066	42.23
EPS2	0.0761773	0.0115	40.31
2N2	0.0774871	0.0449	57.03
MU2	0.0776895	0.0451	60.65
N2	0.0789992	0.2815	74.9
NU2	0.0792016	0.0548	77.27
M2	0.0805114	1.3429	94.06
KS2	0.0807396	0.0076	116.98
LDA2	0.0818212	0.0099	92.16
L2	0.0820236	0.0293	107.39
S2	0.0833333	0.463	127.25
K2	0.0835615	0.13	125.74
MSN2	0.0848455	0.0021	296.3
ETA2	0.0850736	0.0087	133.75
MO3	0.1192421	0.0029	140.91
M3	0.1207671	0.0132	330.62
SO3	0.122064	0.0008	349.62
MK3	0.1222921	0.0029	337.54
SK3	0.1251141	0.0048	39.71
MN4	0.1595106	0.0131	286.64
M4	0.1610228	0.0265	329.51
SN4	0.1623326	0.0016	13.87

MS4	0.1638447	0.0093	39.51
MK4	0.1640729	0.0025	48.59
S4	0.1666667	0.0005	73.61
SK4	0.1668948	0.0005	131.88
2MK5	0.2028035	0.001	125.21
2SK5	0.2084474	0.0002	276.32
2MN6	0.2400221	0.0045	134.68
M6	0.2415342	0.0082	156.69
2MS6	0.2443561	0.0077	199.3
2MK6	0.2445843	0.0024	189.08
2SM6	0.2471781	0.0016	234.84
MSK6	0.2474062	0.0015	233.91
3MK7	0.2833149	0.0002	68.47
M8	0.3220456	0.0004	267.25
SSA	0.0002282	0.0262	144.69
MSM	0.0013098	0.0136	1.01
MM	0.0015122	0.0174	21.08
MSF	0.0028219	0.0147	179.24
MF	0.0030501	0.0212	212.9
ALP1	0.0343966	0.0017	229.32
2Q1	0.0357064	0.0048	223.21
SIG1	0.0359087	0.0048	232.59
Q1	0.0372185	0.0247	271.03
RHO1	0.0374209	0.0045	286.53
O1	0.0387307	0.0706	324.4
TAU1	0.0389588	0.0015	114.15

Tabla 3.2. Constantes armónicas obtenidas del análisis armónico.

Las constantes armónicas expuestas en la tabla 3.2 han sido utilizadas para reconstruir la serie de marea. Una vez conocida la serie de marea, se han calculado las funciones de densidad y de distribución correspondientes al régimen medio de la marea astronómica (figuras 3.3 y 3.4).

En la figura 3.3 se ha representado la función de densidad de la marea astronómica, a partir de la cual se puede afirmar que el nivel del mar más probable corresponde con 2 m y 3,7 m.

Según la función de distribución, figura 3.4, el límite superior de la marea astronómica es de 5,3 m, siendo el valor del cuantil 95 % de 4,45 m y el del 50% 2,86 m.

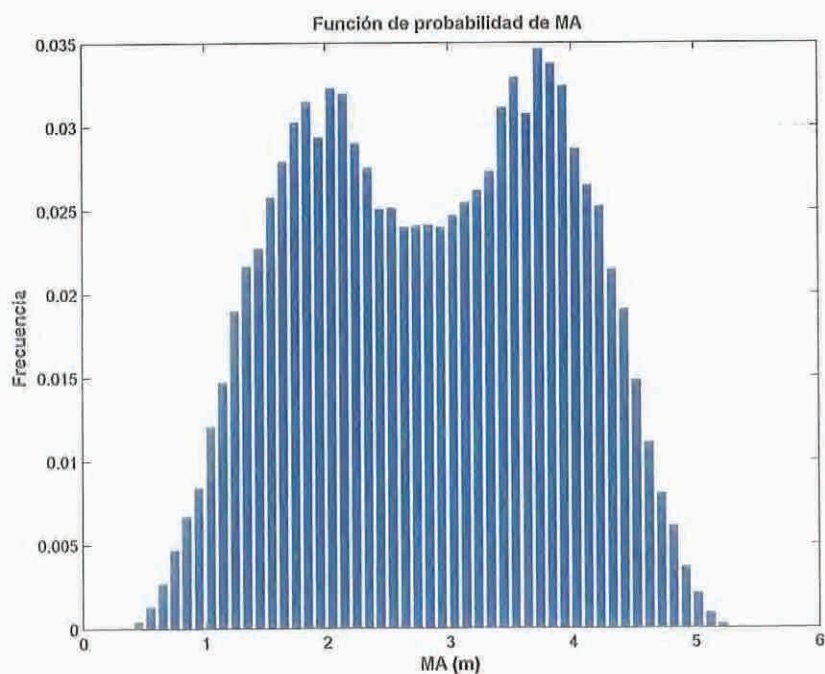


Figura 3.3. Función de probabilidad de la marea astronómica con respecto al Cero del Puerto de Santander.

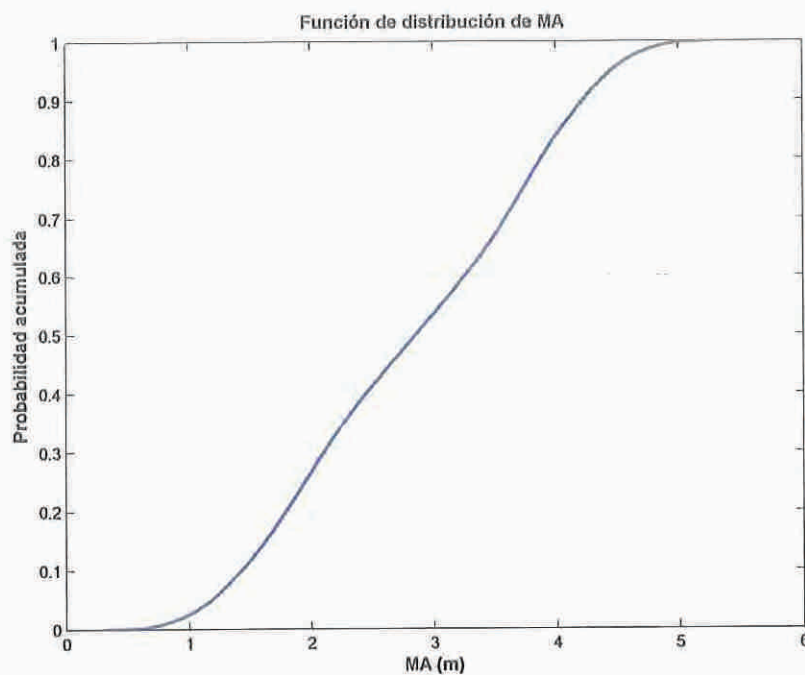


Figura 3.4. Función de distribución de la marea astronómica con respecto al Cero del Puerto de Santander.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\left(\frac{P^2}{H}\right) + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)\left(\frac{PQ}{H}\right) + gH\left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right) +$$

$$+ g\left[\frac{(P^2 + Q^2)^{1/2} P}{C^2 H^2}\right] = \varepsilon \left[\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y}\right]$$

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\left(\frac{PQ}{H}\right) + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)\left(\frac{Q^2}{H}\right) + gH\left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right) +$$

$$+ g\left[\frac{(P^2 + Q^2)^{1/2} Q}{C^2 H^2}\right] = \varepsilon \left[\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}\right]$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (3.3)$$

donde:

- P = caudal en la dirección x
- Q = caudal en la dirección y
- H = profundidad total
- η = superficie libre
- C = coeficiente de fricción de Chézy
- ε = coeficiente de viscosidad de remolino.

La resolución analítica de (3.3) sólo es posible en casos muy especiales, en los que los contornos de la ría (márgenes y batimetría) pueden expresarse por medio de funciones matemáticas simples. En los casos reales, como el estuario de Santoña, la variabilidad de los contornos hace que el sistema de ecuaciones sólo pueda ser resuelto numéricamente.

Por esta razón, para la propagación de la onda de marea por el interior del estuario resolviendo numéricamente las ecuaciones (3.3), se ha utilizado el modelo hidrodinámico bidimensional H2D, desarrollado por el IH Cantabria. En el Anejo II se presenta con más detalle la descripción del modelo numérico.

3.2.3.2 Aplicación a la zona de estudio

Con el objeto de estudiar los niveles en la playa del Regatón originados por la marea astronómica, se han realizado diferentes simulaciones numéricas de la propagación de la onda hasta la zona de estudio. A modo de ejemplo, en este apartado se muestra la propagación realizada con una marea viva, considerando un nivel de marea de 4 m respecto a la BMVE (cuantil del 95%) y período de 12,4 horas

A partir del forzamiento exterior, es decir, la onda de marea, el modelo H2D calcula la variación de nivel a lo largo del estuario, y por tanto en la playa del Regatón, y los patrones de velocidades y caudales. En la figura 3.5 se representa el nivel y las velocidades a la entrada del estuario.

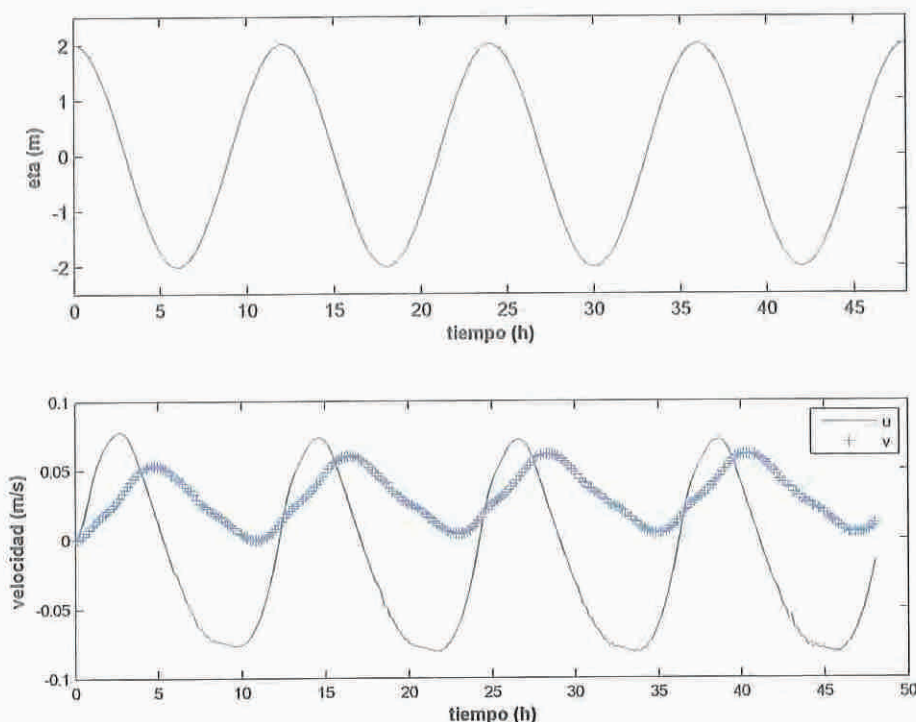


Figura 3.5. Onda de marea en el exterior del estuario.

Resolución e hipótesis

El modelo H2D divide la zona de estudio en elementos rectangulares en los que se calculan las velocidades (u , v) y el nivel (η); el conjunto de dichos elementos rectangulares forma la "malla de estudio". El primer paso a la hora de resolver un caso concreto consiste en definir dicha malla, tanto en dimensiones como en resolución espacial. Las dimensiones de la malla son función de la extensión del área a analizar y de las condiciones de contorno. La densidad de la malla (número de elementos de estudio) es una decisión de compromiso entre una mayor resolución o detalle en los resultados y un mayor tiempo de computación.

En este estudio se ha realizado la propagación de la onda de marea en una malla que se extiende desde el puente de Viar, en Limpias, al Sur, hasta la playa de Berria al Norte y desde la desembocadura, al Este, hasta Gama en el Oeste. La malla comprende un área de 128 km² (10900 x 11800 m) y tiene 109 x 118 elementos (celdas) de 100 x 100 m. En la figura 3.6 se presenta la batimetría correspondiente a la malla descrita

anteriormente. La batimetría corresponde a la situación actual y se encuentra referida al nivel medio del mar en el puerto de Santoña.

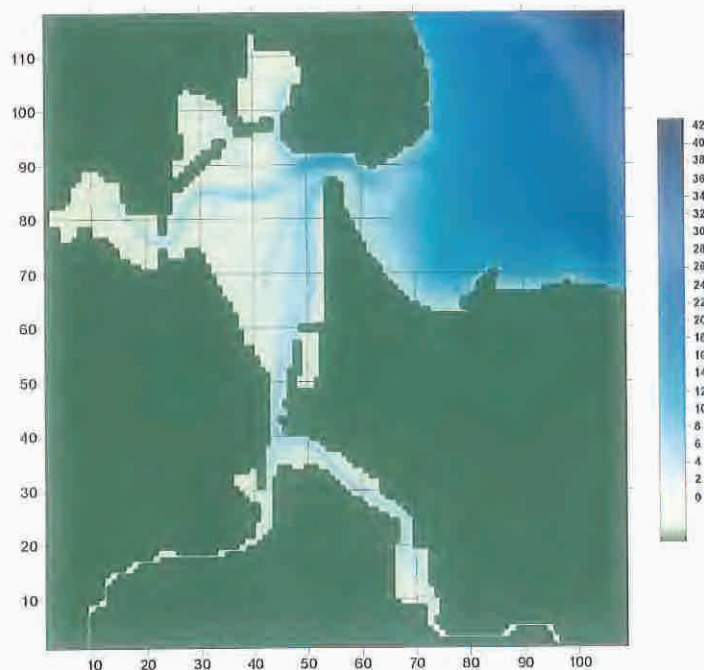


Figura 3.6. Batimetría y malla numérica utilizada para la simulación de la propagación de la onda de marea en el estuario de Santoña.

Calibración de parámetros

Para aplicar el modelo H2D se deben definir las características hidrodinámicas en los contornos y los coeficientes de rugosidad, C , y viscosidad de remolino, ε , (véase eq. 3.3). Para obtener estos datos, se han empleado las medidas realizadas durante una campaña de campo hidrodinámica realizada por el equipo técnico del IH Cantabria en Santoña en Junio de 1993. En dicha campaña se midieron simultáneamente niveles y velocidades en diferentes puntos del estuario. Una detallada descripción de esta campaña se puede encontrar en (FLTQ, 1995).

La calibración de los coeficientes consiste en ejecutar el modelo H2D con la malla de estudio, reproduciendo la misma onda de marea que la medida durante la campaña de campo. Como resultado, se obtiene la combinación de los coeficientes de rugosidad y viscosidad de remolino que dan el menor error entre los niveles calculados y los medidos, comprobándose que las velocidades calculadas sean del mismo orden de magnitud que las observadas.

Coefficiente de rugosidad por fondo, C : el modelo permite una fricción por fondo variable según la profundidad mediante la utilización de la fórmula de Colebrook:

$$C = 18 \log_{10} \left[\frac{12H}{k_s} \right] \quad (3.4)$$

donde k_s es la rugosidad de Nikuradse.

Del estudio de calibración, se encontró como valor de mejor ajuste: $k_s = 0.2$ m

Viscosidad de remolino: del estudio de calibración, se encontró como mejor valor de ajuste: $\varepsilon = 10.0$ m²/s

Condiciones de contorno, iniciales y resultados proporcionados

Como condiciones de contorno del modelo se introduce la marea de cálculo (figura 3.5) en el contorno Este.

El modelo H2D proporciona el nivel y las velocidades horizontales en el interior del estuario en todos los puntos donde se solicite y con un intervalo de tiempo dado.

3.2.3.3 Resultados

Para analizar la transformación experimentada por la amplitud de la onda de marea, se han seleccionado varios puntos de control próximos a la playa del Regatón, y se han comparado las características de la marea en estos puntos con la onda de marea exterior. En la figura 3.7 se muestra un mapa con la zona de estudio y los puntos de control seleccionados.

La figura 3.8 muestra la comparación entre la onda de marea en el exterior (rojo) y los niveles en los puntos seleccionados (representados por diferentes colores, indicados en la leyenda).

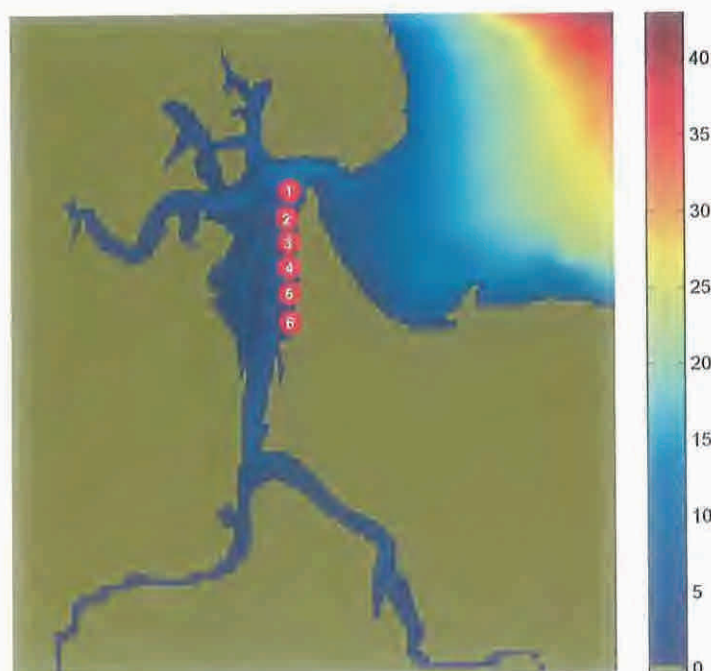


Figura 3.7. Puntos de control seleccionados.

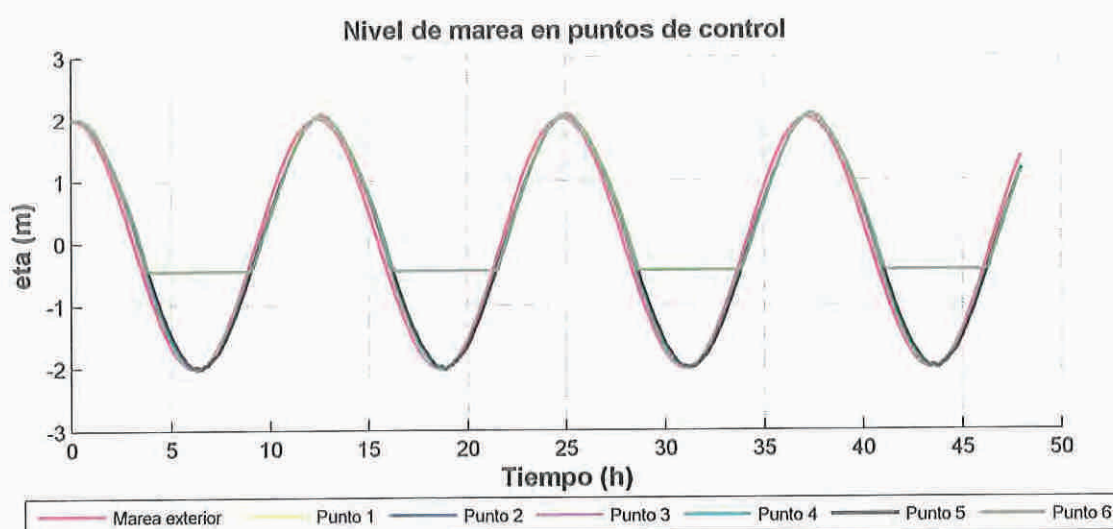


Figura 3.8. Comparación de niveles entre la marea en el exterior del estuario (rojo) y los puntos de control seleccionados.

Comparando el nivel de marea en el exterior con el nivel en la playa del Regatón, se observa que la onda prácticamente no se deforma y que las diferencias son mínimas.

Con base en estos resultados se puede asumir que el nivel de marea en la playa del Regatón es el mismo que el nivel en el exterior del estuario.

3.3 Marea meteorológica

La marea meteorológica (MM) es otra variable, en este caso aleatoria, que afecta a la cota de inundación. Este fenómeno consiste en la sobre elevación del nivel del mar debido a las variaciones de presión o viento. Las mayores elevaciones por MM están asociadas a episodios de temporales, por lo que está ligada a la ocurrencia de las mayores olas.

A continuación se va a describir, en primer lugar, el efecto de la marea meteorológica producida por la presión atmosférica en la zona de estudio y, posteriormente, la originada por el viento.

3.3.1 Marea meteorológica por presión atmosférica

3.3.1.1 Fuentes de datos

Los registros de marea meteorológica pueden obtenerse de los mareógrafos restando a la serie de nivel del mar el valor correspondiente de marea astronómica. El residuo obtenido será la MM. En este estudio se utilizarán los datos de MM proporcionados por la base de datos SIMAR-44 del Organismo Público de Puertos del Estado (OPPE), que están obtenidos a partir del modelo HAMSOM. Concretamente, se dispone de una serie temporal de 44 años de datos horarios en el período comprendido entre 1958 y 2001.

3.3.1.2 Caracterización de la marea meteorológica

Para caracterizar la marea meteorológica se ha elegido un punto de la base de datos SIMAR-44 próximo a la zona de estudio. La evolución temporal de la marea meteorológica en el punto seleccionado se muestra en la figura 3.9.

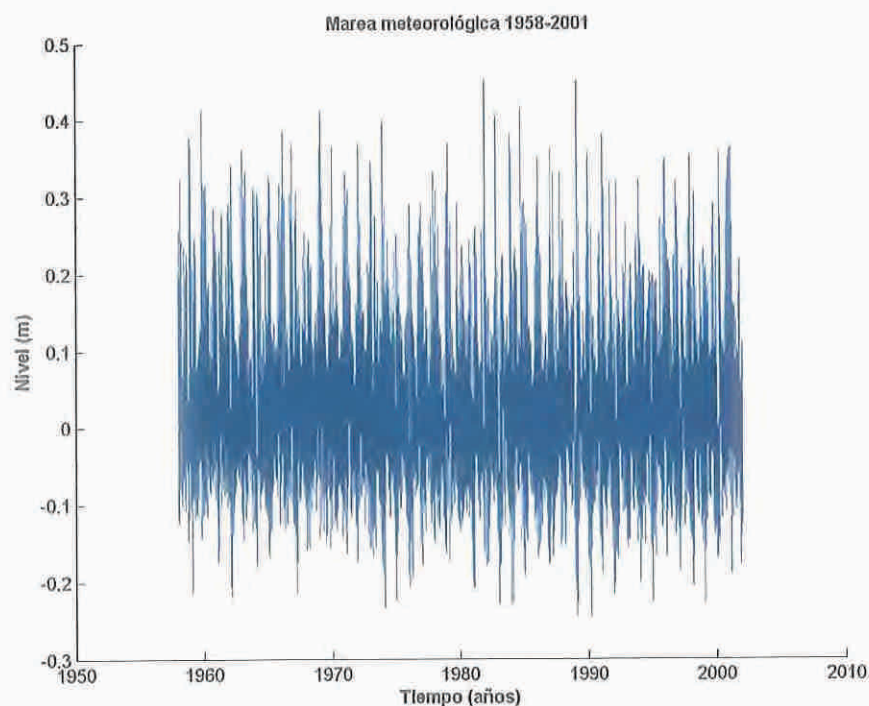


Figura 3.9. Serie de marea meteorológica proporcionada por la base de datos SIMAR-44 en el período 1958-2001.

La marea meteorológica tiene carácter aleatorio y su régimen medio sigue una distribución aproximadamente normal (ver figuras 3.10 y 3.11).

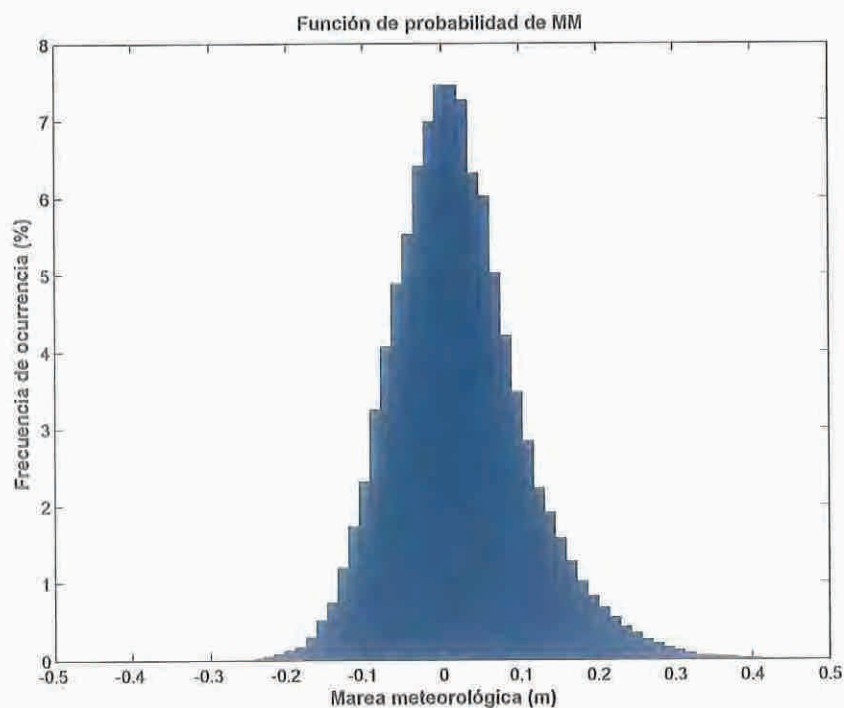


Figura 3.10. Función de probabilidad de la marea meteorológica.

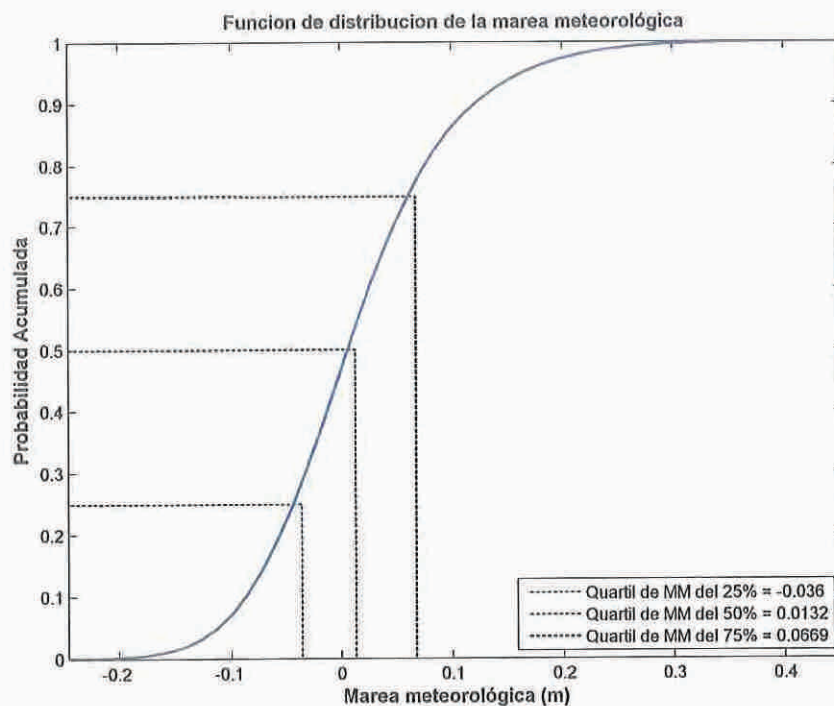


Figura 3.11. Función de distribución de la marea meteorológica.

A partir del histograma se puede afirmar que el valor más probable de MM está comprendido entre -0.02 m y 0.01 m. Los valores máximos y mínimos son de -0.25 y 0.45, siendo el valor del cuantil del 95%, 0.16 m.

En la figura 3.12 se presenta el régimen extremal de la marea meteorológica calculado a partir de los valores máximos anuales. Utilizando esta gráfica se puede obtener el nivel de MM para diferentes periodos de retorno. Por ejemplo, se obtiene un nivel de 0,41 m, 0,45 m y 0,46 m para un periodo de retorno de 10, 50 y 100 años respectivamente.

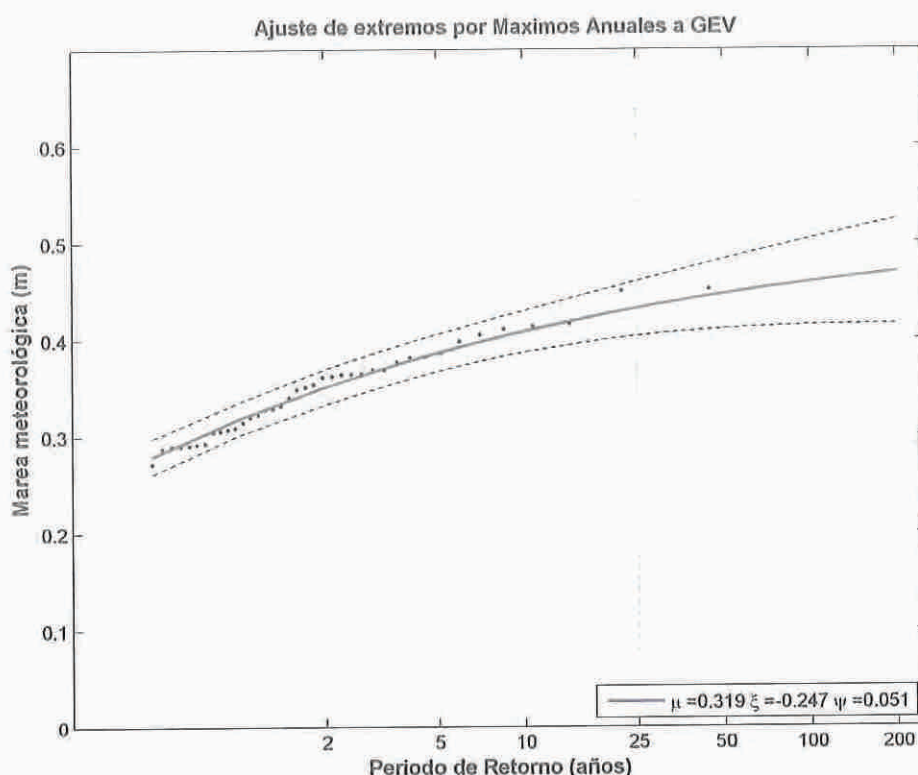


Figura 3.12. Régimen extremal de la marea meteorológica.

3.3.1.3 Análisis de la marea meteorológica por presión en la zona de estudio

Como se ha comentado con anterioridad, la marea meteorológica se combina con la marea astronómica y se propaga y transforma en el interior del estuario. Para estudiar su propagación y sus características en la playa del Regatón, se ha realizado un estudio hidrodinámico utilizando el modelo H2D descrito previamente.

Para el objetivo perseguido en este estudio de determinar la cota de inundación, es importante conocer si para obtener el nivel del mar en la playa del Regatón es necesario propagar conjuntamente la onda de marea astronómica y meteorológica desde el exterior

del estuario a la zona de estudio, o por el contrario, se pueden sumar directamente sus efectos, una vez propagados individualmente.

Para dar respuesta a esta pregunta se ha realizado un análisis hidrodinámico, propagando la onda de marea astronómica y meteorológica hasta la zona de estudio. El objetivo del análisis es doble, por un lado comprobar si la combinación de la marea astronómica y meteorológica es un proceso lineal, y por otro lado, conocer el nivel en la playa del Regatón.

El nivel de marea meteorológica utilizado en el análisis se ha seleccionado con base en la caracterización estadística presentada anteriormente. Como muestra la figura 3.9, la marea meteorológica está acotada superiormente a 0,5 m, no llegándose a alcanzar este valor en los 44 años de registro. Por lo tanto, para realizar el análisis hidrodinámico se ha considerado un nivel de 0,5 m.

Con respecto a la marea astronómica, se ha considerado un nivel de marea de 4 m respecto a la BMVE (cuantil del 95%) y período de 12,4 horas.

El análisis se ha realizado planteando dos simulaciones diferentes:

- Simulación 1: Propagación conjunta de la onda de marea astronómica y meteorológica desde el exterior a la playa del Regatón.
- Simulación 2: La onda de marea meteorológica, debido a su escala de actuación espacial, aumenta 0,5 m el nivel en todo el estuario. Por tanto, en esta simulación se modifica el nivel del mar en el estuario y se propaga la onda de marea astronómica sobre ese nivel.

Los puntos de control seleccionados previamente (ver figura 3.7) se han utilizado para comparar los resultados obtenidos en las dos simulaciones.

En ambos casos, y al igual que en el apartado anterior, como condiciones de contorno del modelo se introduce la marea de cálculo en el contorno Este.

3.3.1.3.1 Resultados

Para reflejar la transformación de la onda de marea astronómica y meteorológica según progresa en el interior del estuario y mostrar las características en la playa del Regatón, a continuación se representan los niveles en los puntos seleccionados (ver figura 3.7). En rojo y azul se muestra, respectivamente, la onda de marea obtenida en la primera y segunda simulación.

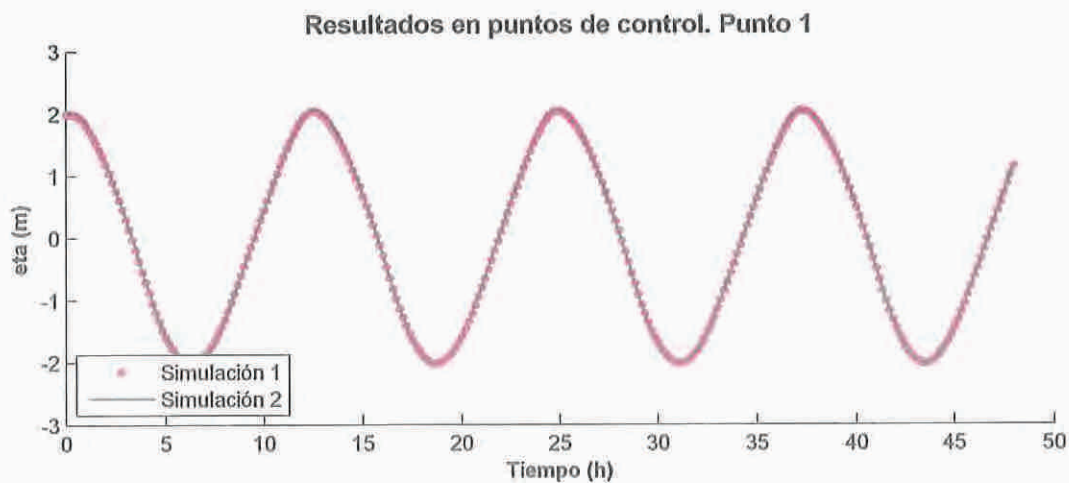


Figura 3.13. Comparación de niveles obtenidos en la simulaciones 1 y 2 en el punto 1.

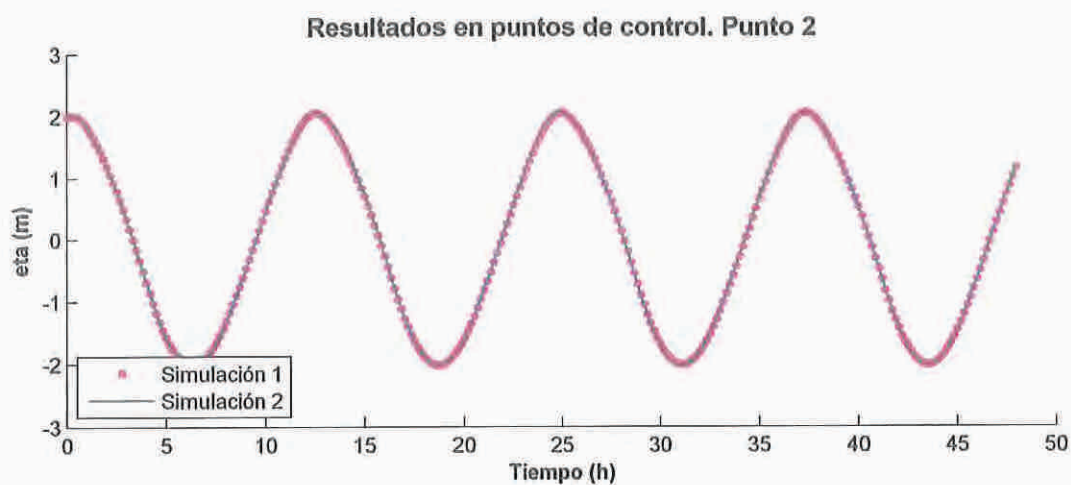


Figura 3.14. Comparación de niveles obtenidos en la simulaciones 1 y 2 en el punto 2.



Figura 3.15. Comparación de niveles obtenidos en la simulaciones 1 y 2 en el punto 3.



Figura 3.16. Comparación de niveles obtenidos en la simulaciones 1 y 2 en el punto 4.



Figura 3.17. Comparación de niveles obtenidos en la simulaciones 1 y 2 en el punto 5.

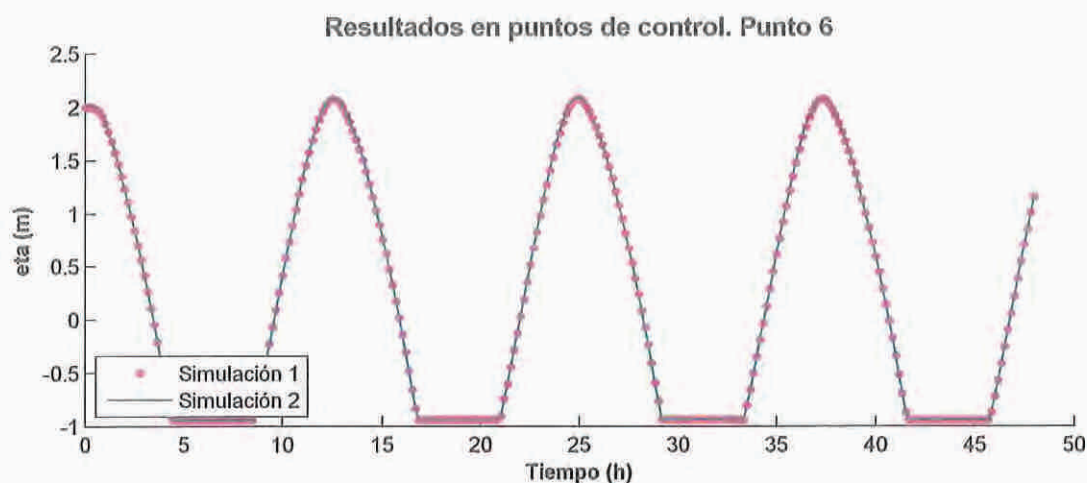


Figura 3.18. Comparación de niveles obtenidos en la simulaciones 1 y 2 en el punto 6.

Las diferencias obtenidas en ambos casos son menores del 0.5%, por lo que se puede considerar que el efecto de la marea astronómica y meteorológica es un proceso lineal. Por otro lado, la comparación entre los resultados en los diferentes puntos, muestra que las diferencias máximas (entre el punto 1 y el punto 6) son de aproximadamente el 5%, lo que implica que la onda de marea astronómica y meteorológica no se deforma al propagarse hasta la playa del Regatón.

3.3.2 Marea meteorológica por viento

La acción continuada del viento sobre la lámina de agua del mar puede provocar el arrastre de la misma. Si este arrastre se produce en la dirección de un área cerrada, el agua se acumula en ésta, produciendo un ascenso del nivel medio del mar. La elevación del nivel medio del mar depende de la intensidad del viento, trayectoria, duración, forma de la costa, configuración y rugosidad del fondo. Sin embargo, los principales factores que controlan el ascenso son la velocidad del viento y el calado de la lámina de agua. Cuanto mayor sea la velocidad del viento y menor sea el calado, la sobreelevación por viento es mayor.

En este apartado se estudia cuál sería el efecto del viento en el nivel del mar de la playa del Regatón.

3.3.2.1 Fuentes de datos

En este estudio se utilizarán los datos de viento de la base de datos SIMAR-44 del Organismo Público de Puertos del Estado (OPPE), generados con el modelo REMO. Estos datos comprenden el período de tiempo desde el año 1958 hasta el 2001 con información de la velocidad y dirección media del viento en intervalos de 1 hora.

3.3.2.2 Caracterización del viento

Para caracterizar el viento en la zona de estudio se ha seleccionado un punto, localizado en la coordenada 3,21 °W y 43,54 °N, de la base de datos SIMAR-44. Con estos datos se ha realizado un análisis estadístico del régimen de viento.

Las figuras 3.19 y 3.20 muestran la función de probabilidad y de distribución de la velocidad del viento. A partir de esta información se muestra que el viento más probable está comprendido en el rango 4,13-4,61 m/s, siendo el valor del cuantil 95% de 10.9 m/s.

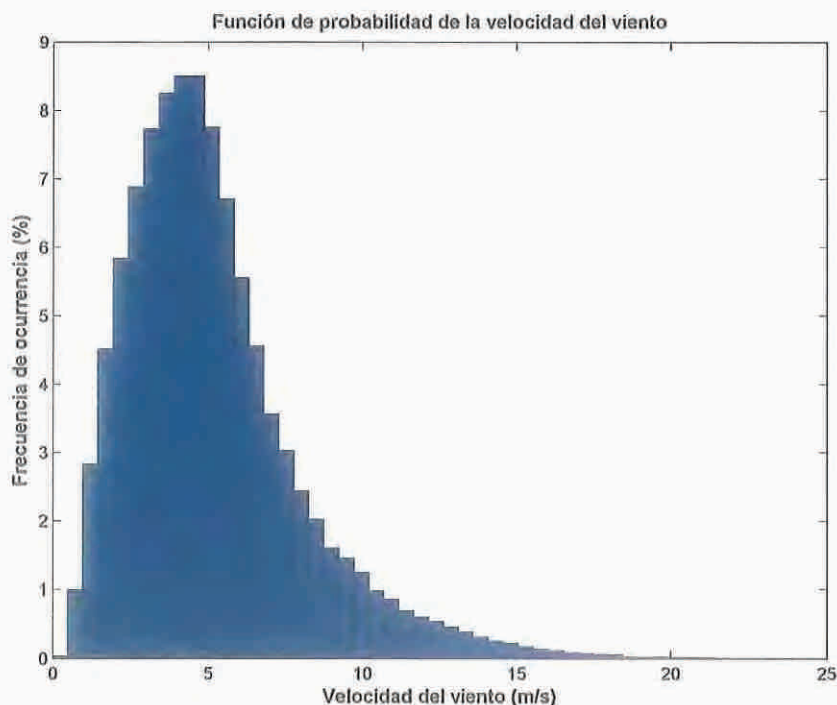


Figura 3.19. Función de probabilidad de la velocidad del viento.

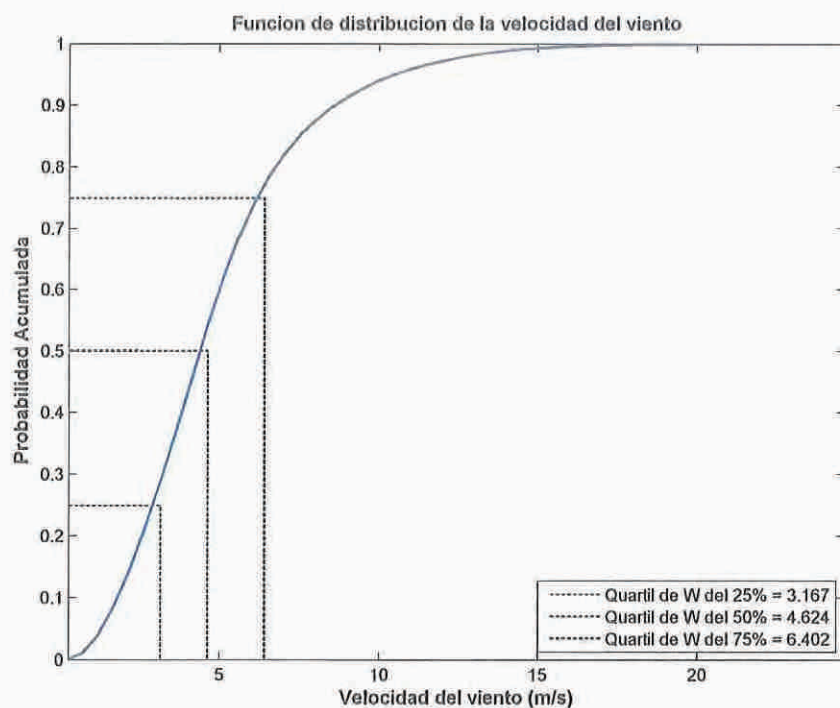


Figura 3.20. Función de distribución de la velocidad del viento.

En la tabla 3.3 se presenta un resumen con los resultados estadísticos obtenidos, mostrándose para cada dirección del viento su probabilidad de ocurrencia, así como el valor del cuantil 50, 90 y 99% del módulo de la velocidad del viento.

TABLA ESTADÍSTICOS BASICOS

Variable medida: Viento (W)

direcciones(°)	prob.direccion	W _{50%}	W _{90%}	W _{99%}
N	0.0700	4.1623	7.4463	11.9341
NNE	0.0731	4.1248	6.6787	11.2536
NE	0.0778	4.2974	6.4438	9.5619
ENE	0.0686	4.3326	6.6727	8.9869
E	0.0538	4.1196	6.5391	9.0420
ESE	0.0402	3.8359	6.1070	8.6333
SE	0.0308	3.5780	5.8116	8.5723
SSE	0.0352	3.6376	6.6343	9.5554
S	0.0318	4.6194	7.5949	10.4363
SSW	0.0538	4.9943	8.2521	11.2003
SW	0.0552	5.0708	8.2170	11.0557
WSW	0.0432	4.3957	8.3125	12.5019
W	0.0599	5.1982	11.3447	16.6495
WNW	0.1156	6.5700	12.7835	17.6105
NW	0.1103	5.8417	10.6626	15.5900
NNW	0.0808	4.6665	8.5066	13.3133

Tabla 3.3. Descriptores básicos del viento (W).

3.3.2.3 Análisis de la sobreelevación por viento en la zona de estudio

Para conocer la sobreelevación por viento se ha realizado un estudio hidrodinámico, similar a los presentados anteriormente, utilizando el modelo hidrodinámico H2D.

Para comprobar el efecto que el viento tiene en el nivel del mar, se ha propagado una marea viva, considerando un nivel de marea de 4 m respecto a la BMVE (cuantil del 95%) y período de 12,4 horas, bajo condiciones de viento que pudieran originar sobreelevación importante en la zona de estudio. Para ello, de la tabla 3.3 se han escogido cuatro direcciones y el valor de la velocidad del viento del cuantil 99%. Los

eventos seleccionados (ver tabla 3.4) se han utilizado para propagar la onda de marea en el interior del estuario.

Dirección	Módulo (m/s)
WNW	18
NNE	12
W	17
SW	12

Tabla 3.4. Eventos de viento simulados.

Para cada punto de control seleccionado previamente (ver figura 3.7) se ha comparado el nivel de la onda de marea despreciando el efecto del viento con el nivel obtenido en cada uno de los eventos de viento simulados.

3.3.2.3.1 Resultados

Para reflejar la transformación de la onda de marea astronómica por efecto del viento en la playa del Regatón, a continuación se representan alguno de los resultados obtenidos. Para cada punto de control se han simulado las cuatro condiciones de viento expuestas en la tabla 3.4. A modo de ejemplo, se presenta para los puntos 2, 3, 4 y 5, los resultados obtenidos con viento del WNW, NNE, W y SW respectivamente. En rojo se muestra el nivel de marea sin la contribución del viento, y en azul, considerando el efecto del viento.

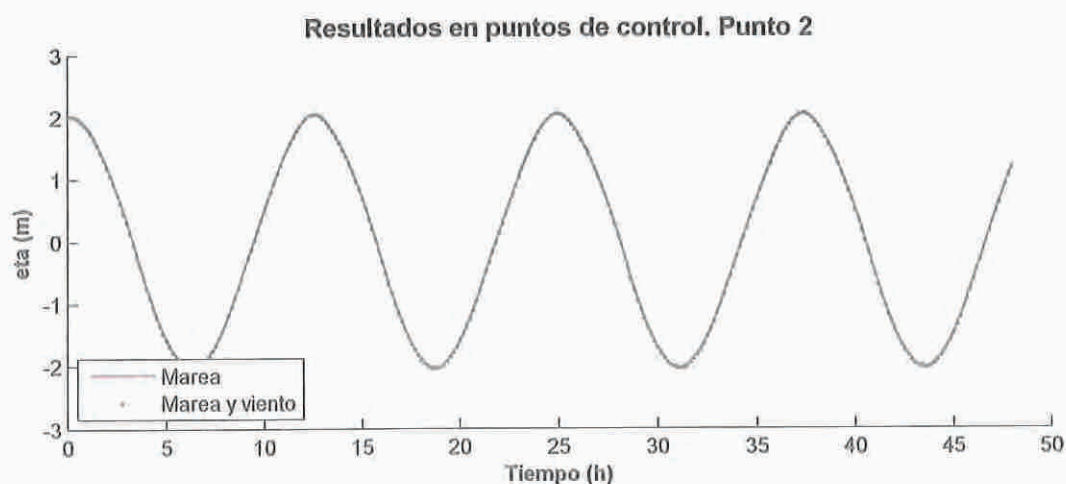


Figura 3.21. Comparación del nivel de la onda de marea propagada sin considerar el efecto del viento (rojo) y considerando un viento de 18 m/s del WNW (azul) obtenidos en el punto 2.

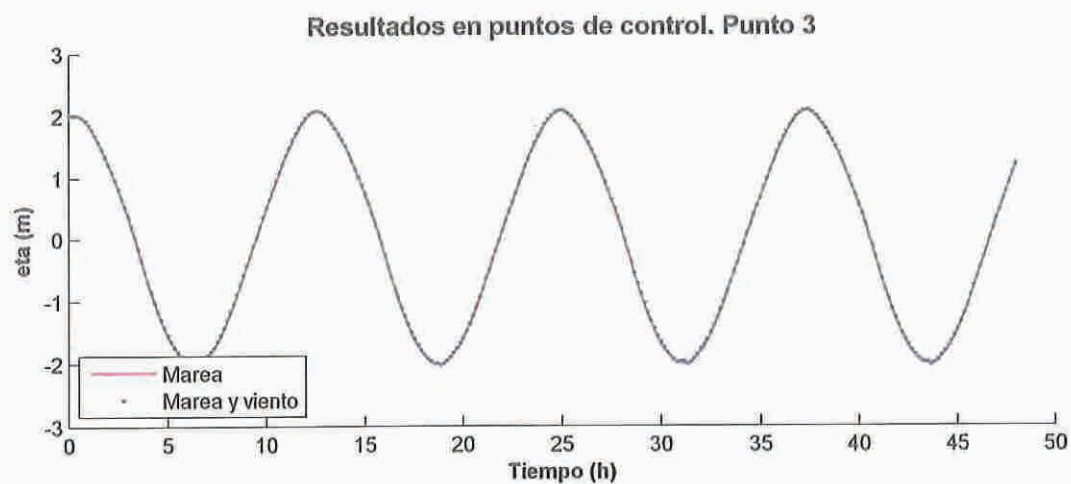


Figura 3.22. Comparación del nivel de la onda de marea propagada sin considerar el efecto del viento (rojo) y considerando un viento de 12 m/s del NNE (azul) obtenidos en el punto 3.

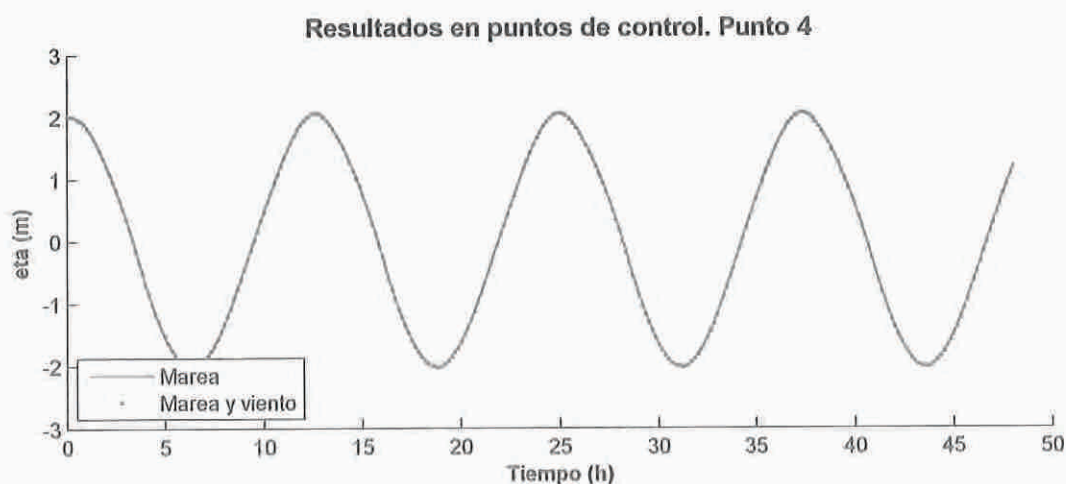


Figura 3.23. Comparación del nivel de la onda de marea propagada sin considerar el efecto del viento (rojo) y considerando un viento de 17 m/s del W (azul) obtenidos en el punto 4.

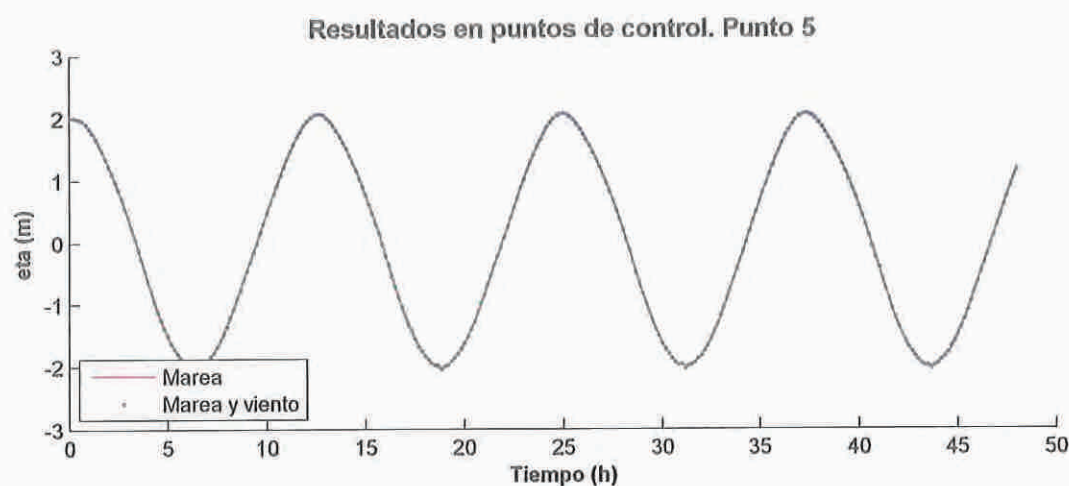


Figura 3.24. Comparación del nivel de la onda de marea propagada sin considerar el efecto del viento (rojo) y considerando un viento de 12 m/s del S (azul) obtenidos en el punto 5.

Los resultados presentados muestran diferencias comprendidas entre 1 y 2 cm, por lo que el efecto del viento en el régimen del nivel puede ser despreciado frente a la contribución de la marea astronómica.

3.4 Caudal fluvial

3.4.1 Fuentes de datos

De todos los ríos que desembocan en la ría de Treto, solamente el Río Asón presenta unas aportaciones relevantes comparables con los caudales que diariamente se ponen en movimiento debido a la onda de marea astronómica. El río Asón tiene una longitud de 39 km y un desnivel entre nacimiento y desembocadura de unos 540 m. La superficie de la cuenca es de unos 535 km², con un índice de compacidad de 1.323 y un índice de pendiente de 0.182.

Para la realización de este estudio se dispone de datos de caudal fluvial del río Asón de la estación de aforo localizada en la localidad de Coterillo de Ampuero. La serie disponible abarca 34 años hidrológicos y ha sido recopilada en el marco del proyecto "Estudio de los recursos hídricos de los ríos de la vertiente norte de Cantabria", realizado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria para el Gobierno de Cantabria (Octubre 2007).

En la figura 3.25 se muestra la localización de la cuenca del Asón y de la estación de aforo de Coterillo.

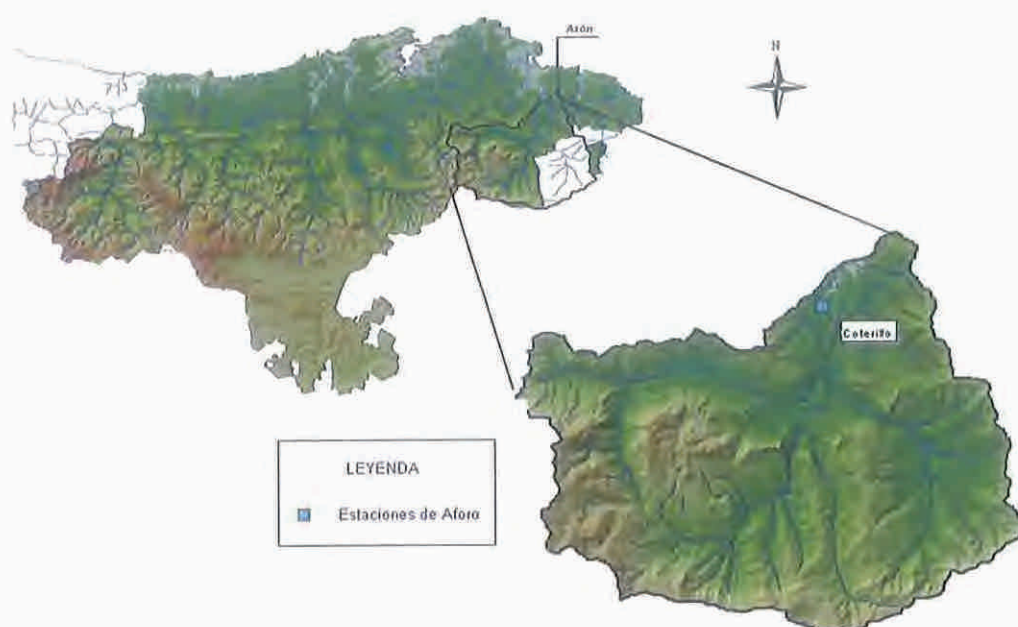


Figura 3.25. Cuenca del Asón y estación de aforo de Coterillo (Fuente: "Estudio de los recursos hídricos de los ríos de la vertiente norte de Cantabria", IH Cantabria, Universidad de Cantabria, 2007).

3.4.2 Caracterización del caudal del río Asón

De los datos de la estación de aforo de Coterillo de Ampuero se puede extraer la siguiente información:

Caudal medio: 21.95 m³/s

Caudal máximo: 793.50 m³/s (correspondiente a la fecha 12-01-1979)

En la figura 3.26 se muestran los resultados del régimen extremal calculados a partir de los valores máximos anuales.

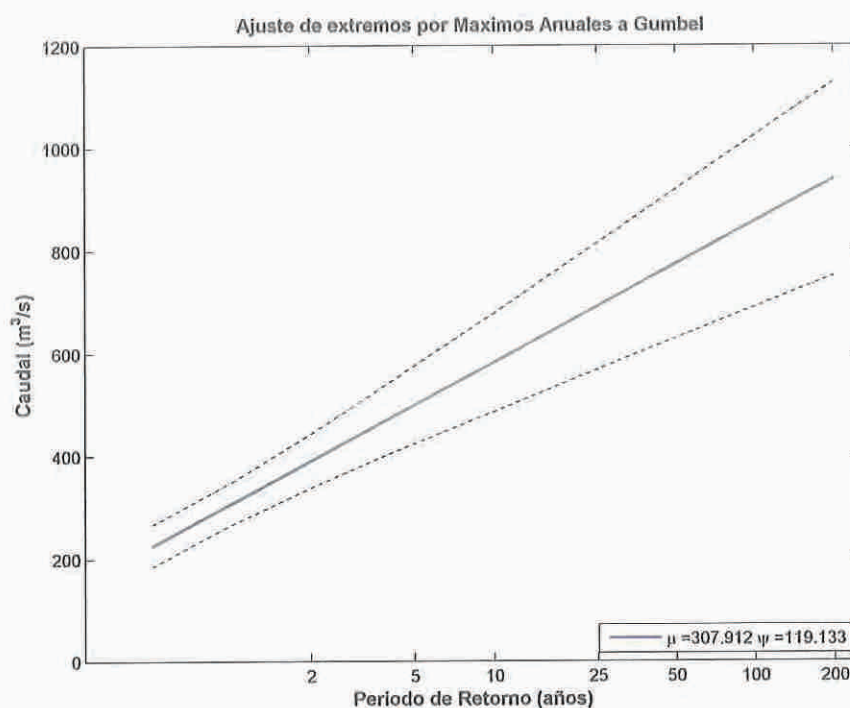


Figura 3.26. Régimen extremal del caudal del río Asón.

Del régimen extremal se obtienen los caudales de avenida para distintos períodos de retorno:

Período de retorno (años)	20	50	100	200
Caudal (m ³ /s)	665	774	856	939

Tabla 3.5. Caudales de avenida.

El régimen extremal muestra que el caudal de avenida del río Asón es importante, por lo que se requiere estudiar cuál sería su efecto en la cota de inundación de la playa del Regatón.

3.4.3 Análisis del efecto del caudal del río Asón en la zona de estudio

Para comprobar el efecto que el caudal del río Asón tiene en la cota de inundación alcanzada en la playa del Regatón, se ha realizado un estudio hidrodinámico utilizando el modelo H2D descrito previamente. Para ello se ha propagado una marea viva, con nivel de marea de 4 m respecto a la BMVE (cuantil del 95%) y período de 12,4 horas, considerando un evento extremo del caudal del río. Para cada punto de control seleccionado previamente (ver figura 3.7) se ha analizado el efecto del río en el nivel de marea. Para ello se ha comparado el nivel considerando caudal nulo y el nivel considerando un caudal de avenida. Para tener en cuenta el evento más extremo, y que por tanto provocaría el mayor efecto sobre el nivel, se ha considerado el caudal máximo registrado en la estación de aforo ($793 \text{ m}^3/\text{s}$).

Como condiciones de contorno del modelo hay que introducir la marea de cálculo (figura 3.5) en el contorno Este, mientras que en el contorno Sur se impone una condición de caudal de avenida de $793 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.4.3.1 Resultados

Para reflejar la transformación de la onda de marea astronómica por efecto del caudal del río Asón y mostrar las características en la playa del Regatón, a continuación se representan los niveles en los puntos de control. En rojo se muestra el nivel del mar obtenido considerando sólo marea astronómica y en azul considerando marea y un caudal de avenida de $793 \text{ m}^3/\text{s}$.

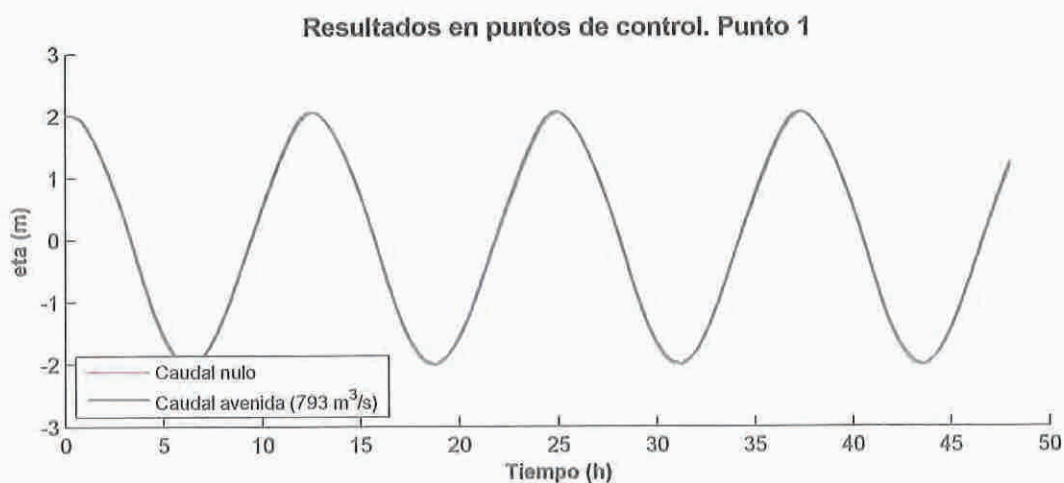


Figura 3.27. Comparación de niveles obtenidos considerando caudal nulo y caudal de avenida en el Punto 1.

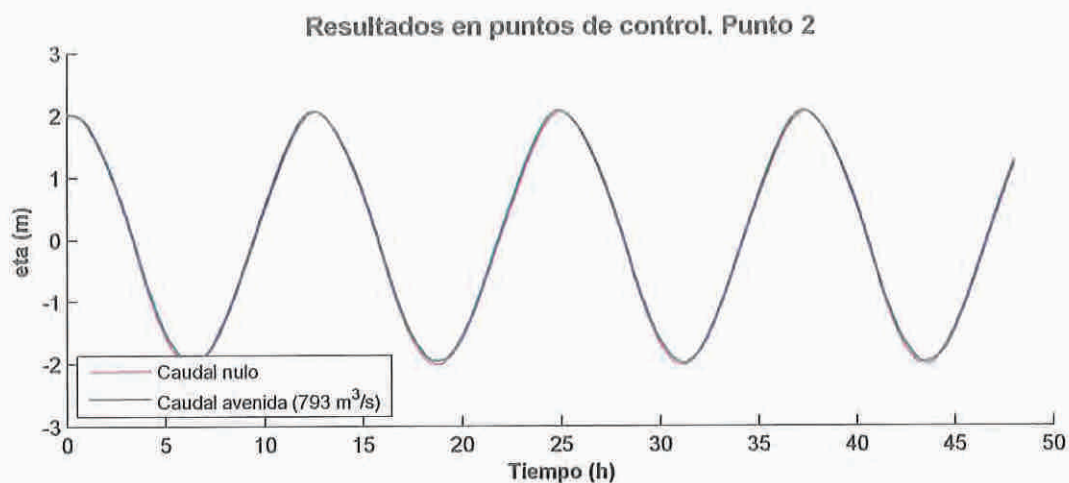


Figura 3.28. Comparación de niveles obtenidos considerando caudal nulo y caudal de avenida en el Punto 2.

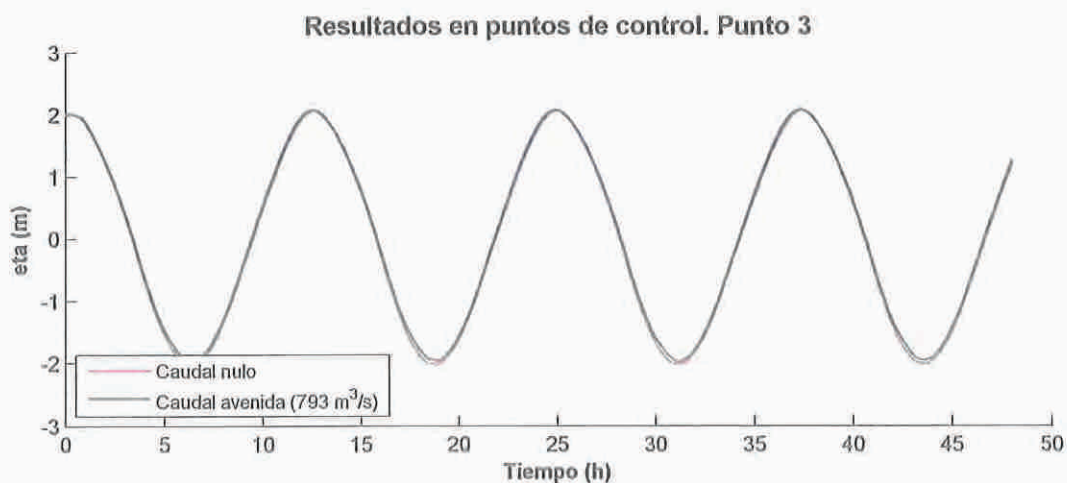


Figura 3.29. Comparación de niveles obtenidos considerando caudal nulo y caudal de avenida en el Punto 3.

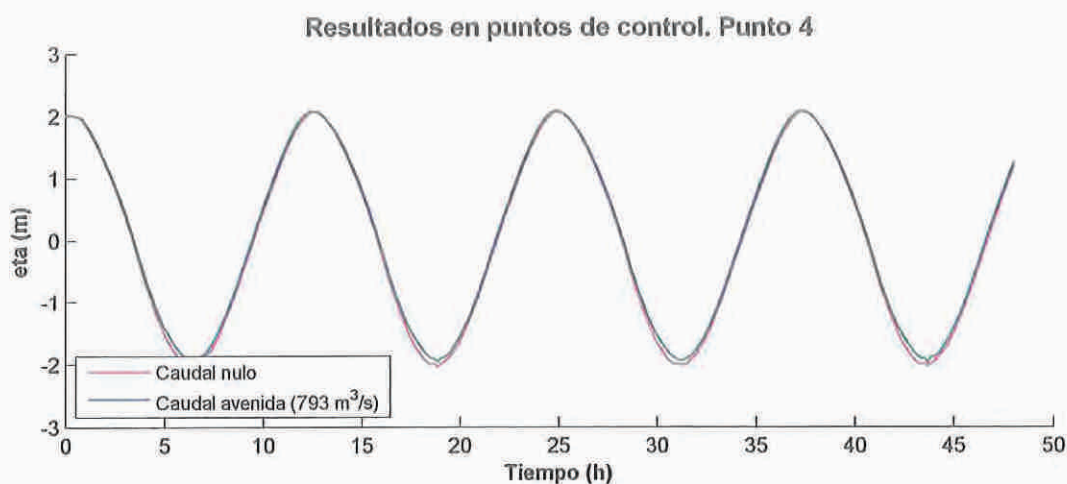


Figura 3.30. Comparación de niveles obtenidos considerando caudal nulo y caudal de avenida en el Punto 4.

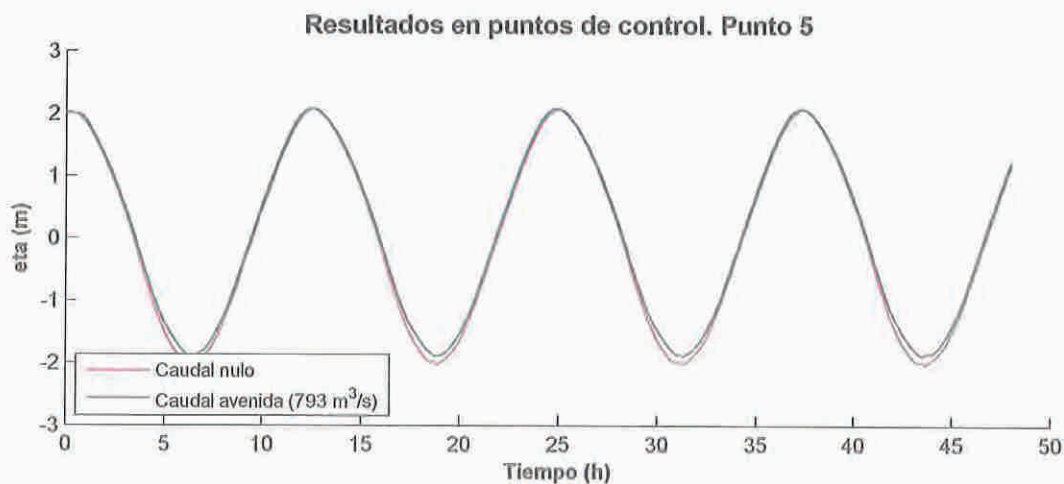


Figura 3.31. Comparación de niveles obtenidos considerando caudal nulo y caudal de avenida en el Punto 5.

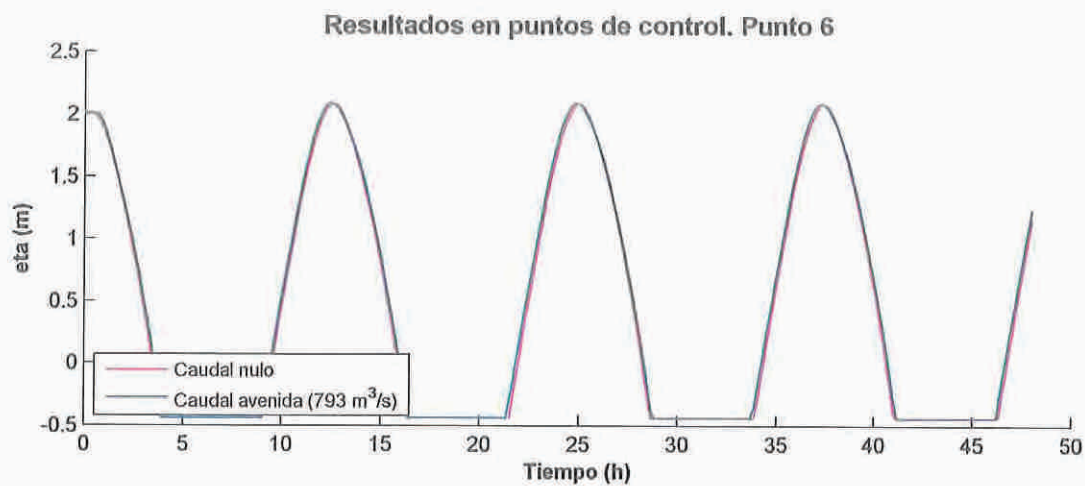


Figura 3.32. Comparación de niveles obtenidos considerando caudal nulo y caudal de avenida en el Punto 6.

Los resultados obtenidos muestran que los valores máximos de la elevación de la superficie libre no se ven afectados por el caudal del río, por lo que se concluye que su efecto puede despreciarse en este estudio.

3.5 Oleaje

3.5.1 Fuentes de datos

3.5.1.1 Datos de reanálisis

El desarrollo de modelos de previsión de oleaje de última generación y la existencia de información meteorológica digitalizada hace posible en la actualidad, la creación de datos de oleaje a partir de la aplicación de los modelos de previsión a las condiciones meteorológicas de tiempo pasado. De las diferentes fuentes disponibles en el presente estudio, se ha elegido, por su resolución espacial y temporal, la base de datos SIMAR-44 de reanálisis de oleaje del Organismo Público de Puertos del Estado (OPPE).

Los datos obtenidos mediante el reanálisis no pueden ser utilizados directamente, pues están sometidos a los errores asociados a las imprecisiones de los modelos meteorológicos y de oleaje. Por ello, requieren ser calibrados con los datos instrumentales o de satélite.

La base de datos SIMAR-44 contiene los parámetros de estado de mar obtenidos durante un período de tiempo de 44 años (1958 a 2001). Esta información es el resultado de la aplicación del modelo numérico WAM de generación de oleaje a la información meteorológica almacenada en los citados 44 años.

La información se divide en 385560 estados de mar, de una hora de duración, de donde se han utilizado los siguientes parámetros:

- Altura de ola significativa, H_s
- Período medio, T_m
- Período de pico, T_p
- Dirección media de propagación, θ_m

La base de datos de SIMAR-44 consta de dos oleajes tipo SWELL y uno tipo SEA, de donde se obtiene el espectro direccional de energía, como se muestra en la figura 3.32. De este espectro resultante se calculan los diferentes momentos y parámetros de estado de mar derivados: altura de ola significativa, H_s , período de pico, T_p , período medio, T_m y dirección media de propagación θ_m .

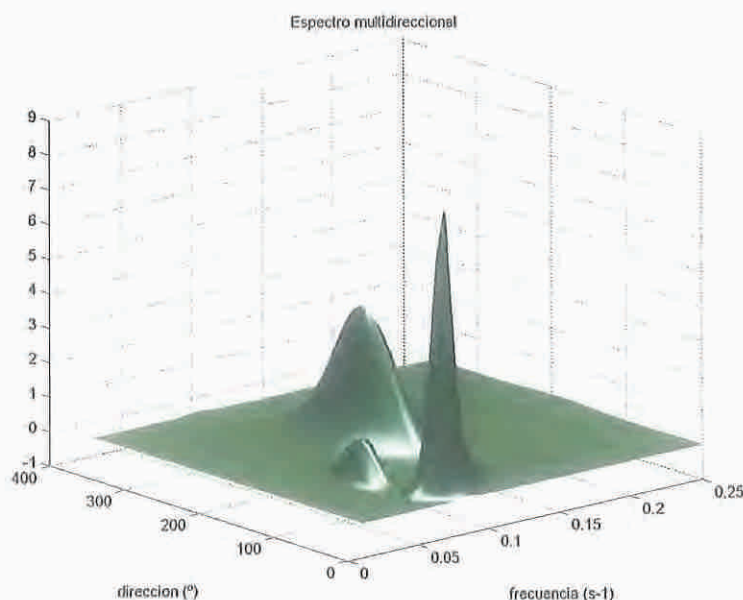


Figura 3.32. Ejemplo de un espectro compuesto de oleajes tipo SWELL y SEA.

Como se ha explicado, la información de esta base de datos debe ser tratada para su posterior uso, ya que están sujetos a errores. Para su calibración se han utilizado los datos instrumentales de la boya de Bilbao.

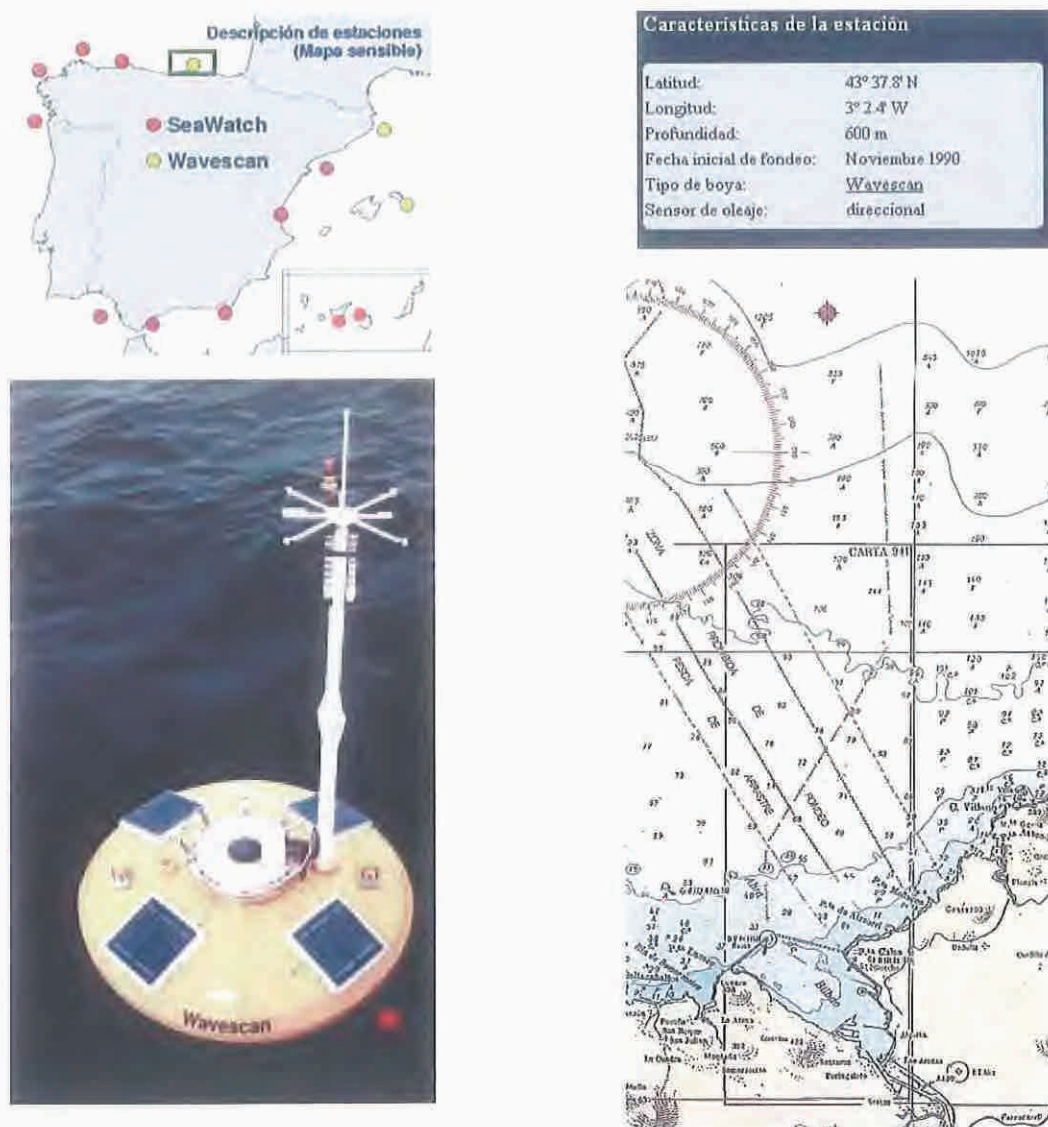
En este estudio se han considerado los siguientes dos puntos de reanálisis:

- En primer lugar, se ha utilizado un punto en las mismas coordenadas que la Boya de Bilbao, esto es, $3,04^{\circ}$ W y $43,63^{\circ}$ N. Este punto ha permitido realizar la calibración de los datos de reanálisis con la boya.
- En segundo lugar, se ha utilizado un punto ($3,4^{\circ}$ W, $43,475^{\circ}$ N) en aguas profundas en la proximidad de la zona de estudio. Este punto ha servido para caracterizar el clima marítimo en profundidades indefinidas en la zona objeto de interés.

3.5.1.2 Boya REMRO de Bilbao

Como ya se ha comentado, para la verificación de los datos de altura de ola significativa y período de pico de la base de datos numérica se ha utilizado la boya direccional REMRO de Bilbao (ver figura 3.33). Esta boya direccional está habilitada desde noviembre de 1990 a 600 m de profundidad. En total se tienen 20908 datos de registros horarios.

En la figura 3.33 se indican las características de la boya utilizada.



La calibración se ha realizado tanto para la altura de ola como para los períodos. En el caso de la altura de ola se han ajustado los datos a una ley de tipo potencial, como se expresa a continuación:

$$Hs_{calibrada} = b \cdot (Hs)^c \quad (3.5)$$

En el caso de los períodos se ha realizado una calibración direccional, diferenciando sectores de 22,5°. Así, por lo tanto, se ha establecido una transformación de los regímenes de períodos para cada uno de los sectores de procedencia del oleaje. Posteriormente se ajustaron los datos para cada una de las direcciones indicadas a una ley de tipo potencial, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Tm_{calibrada} = a + b \cdot (Tm)^c \quad (3.6)$$

3.5.2 Caracterización del oleaje exterior

Para caracterizar el oleaje exterior en la zona objeto de interés, se ha utilizado el punto en profundidades indefinidas de la base de datos SIMAR-44, ubicado en las coordenadas 3,4° W y 43,475° N. Los datos, una vez calibrados, se han utilizado para realizar el análisis estadístico del régimen de oleaje.

En las figuras 3.34 y 3.35 se muestran la función de probabilidad y la función de distribución para la altura de ola significativa. A partir de estas gráficas se puede observar que la altura de ola significativa más probable es 0,79 m y que el valor del cuantil 95% es 3.05 m.

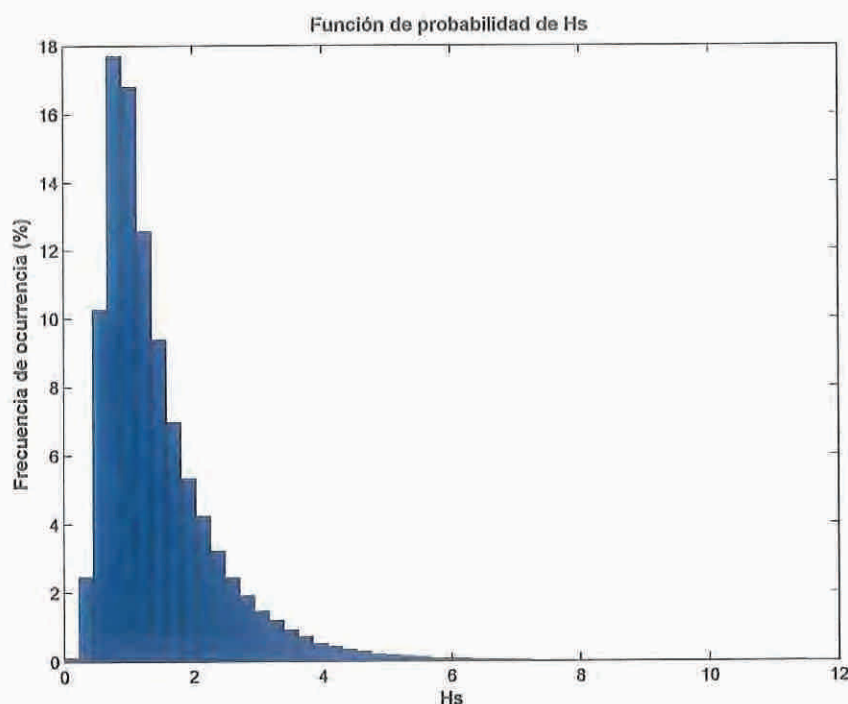


Figura 3.34. Función de probabilidad de la altura de ola significativa (H_s).

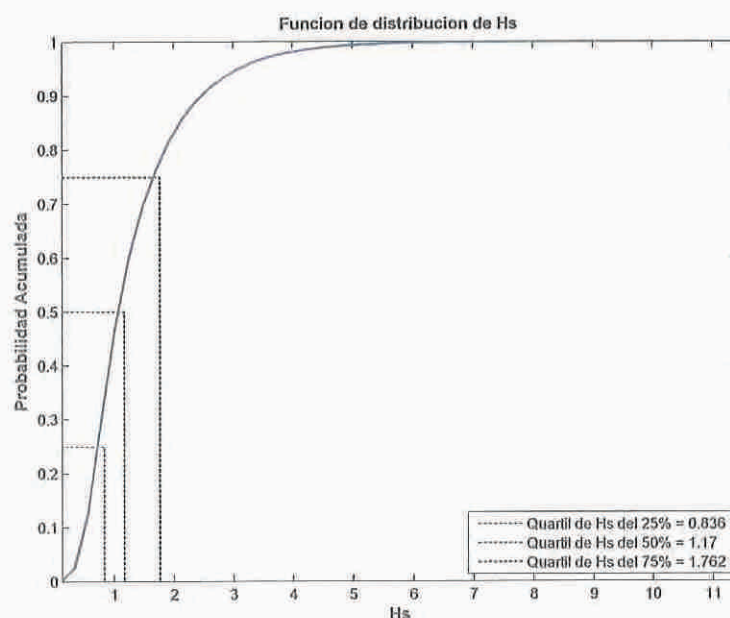


Figura 3.35. Función de distribución de la altura de ola significativa (H_s).

La rosa de oleaje, presentada en la figura 3.36, muestra que los oleajes reinantes y dominantes en profundidades indefinidas provienen del cuarto cuadrante, de los sectores NNW, NW y N.

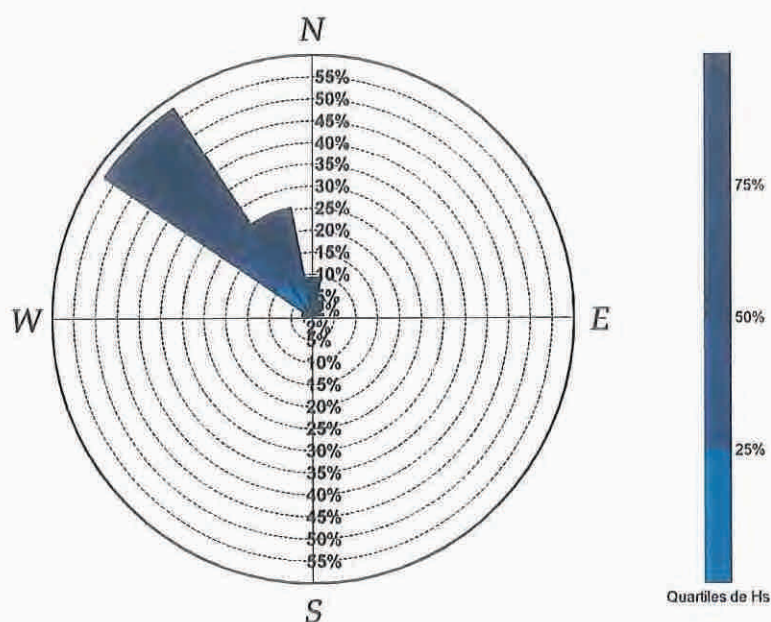


Figura 3.36. Rosa de oleaje en profundidades indefinidas.

En la tabla 3.6 se presenta un resumen con los resultados estadísticos obtenidos, mostrándose para cada dirección de altura de ola significativa su probabilidad de ocurrencia, así como el valor del cuantil 50, 90 y 99%.

TABLA ESTADÍSTICOS BÁSICOS

Variable medida: Altura de ola significativa (H_s)

direcciones(°)	prob.direccion	$H_{s_{50\%}}$	$H_{s_{90\%}}$	$H_{s_{99\%}}$
N	0.0923	0.9479	1.8898	3.6640
NNE	0.0430	1.0075	1.8197	2.9182
NE	0.0066	1.0720	1.7085	2.6473
ENE	0.0003	0.8320	1.4619	2.9199
E	0.0001	0.7756	0.8994	1.0552
ESE	0.0000	0.7237	0.7896	0.8140
SE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSE	0.0000	0.5150	0.6304	0.6304
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.6570	0.7180	0.7180
SW	0.0000	0.7540	0.7637	0.7637
WSW	0.0000	0.7309	0.7820	0.7820
W	0.0000	0.7303	0.8406	0.8456
WNW	0.0257	0.7919	1.2504	1.6911
NW	0.5762	1.3460	2.8204	4.9772
NNW	0.2557	1.0435	2.3320	4.5593

Tabla 3.6. Descriptores básicos de la altura de ola significativa (H_s).

Para caracterizar el oleaje, se han obtenido los regímenes medios y extremales de altura de ola y período de pico en profundidades indefinidas con base en los datos de reanálisis calibrados correspondientes al punto indicado anteriormente.

Los regímenes medios anuales de oleaje en profundidades indefinidas están definidos como la distribución en el año medio de un parámetro del estado de mar en profundidades indefinidas. El régimen de altura de ola significativa se ha ajustado mediante una distribución Lognormal, mientras que el régimen medio del período de pico, se ha ajustado mediante una distribución normal. En las figuras 3.37 y 3.38 se muestra el régimen medio para ambas variables.

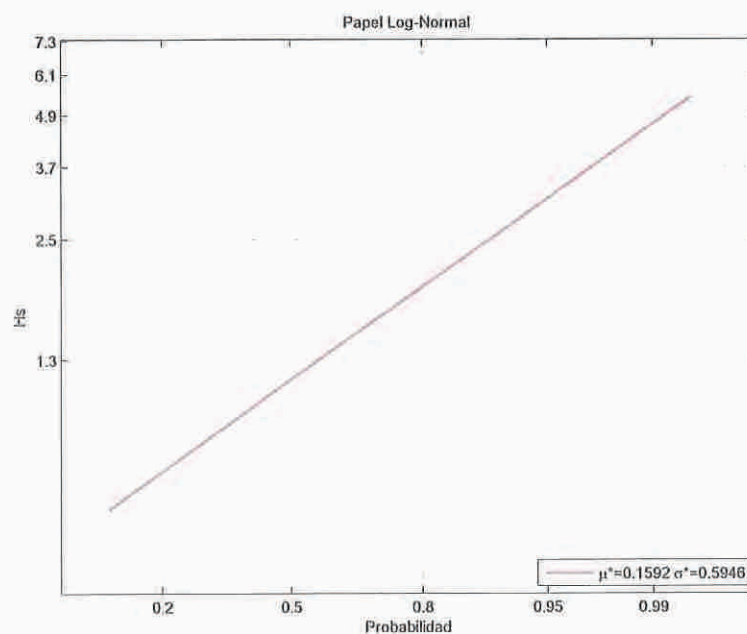


Figura 3.37. Régimen medio de la altura de ola significativa (H_s).

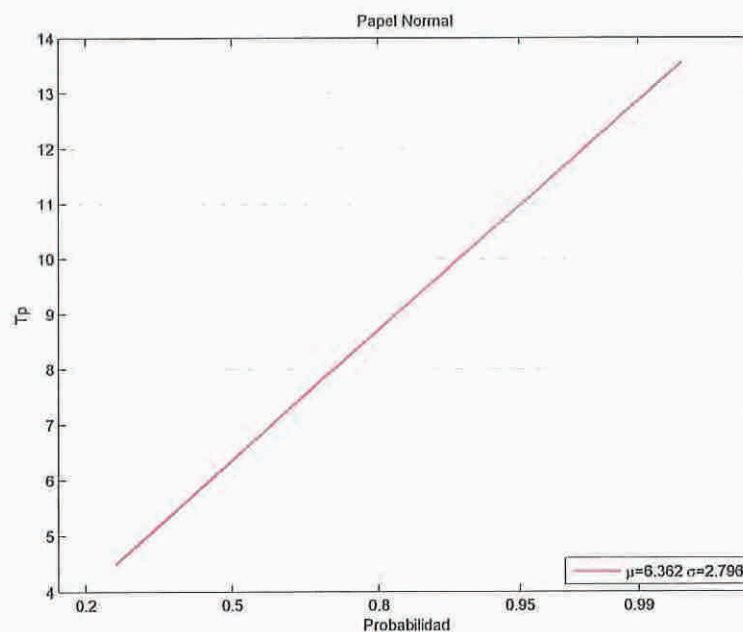


Figura 3.38. Régimen medio del período de pico (T_p).

El régimen extremal anual se define como la distribución del valor máximo anual de una variable de estado de mar, y se obtienen ajustando una función de distribución a los valores máximos anuales de la variable en cuestión. En la figura 3.39 se presenta el régimen extremal de la altura de ola significativa, pudiéndose observar el ajuste (línea azul continua) a una distribución Gumbel y sus bandas de confianza al 95% (línea negra discontinua). Los parámetros de esta distribución también se indican en la figura 3.39. En la figura 3.40 se muestran los mismos resultados para el periodo de pico.

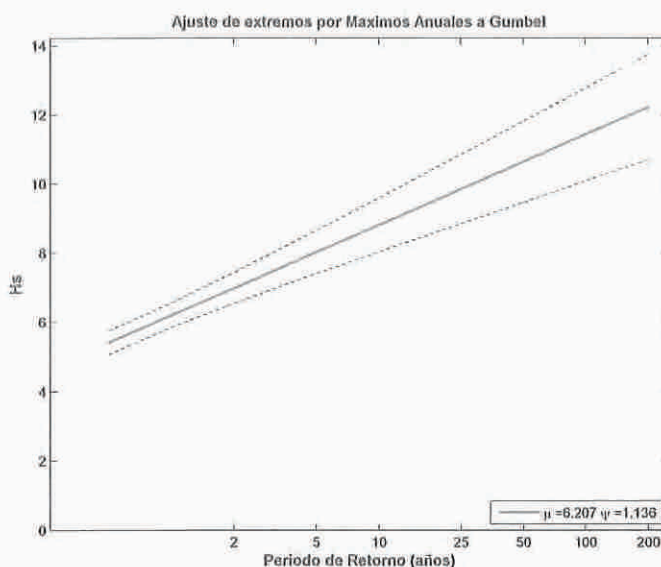


Figura 3.39. Régimen extremal de la altura de ola significativa (H_s).

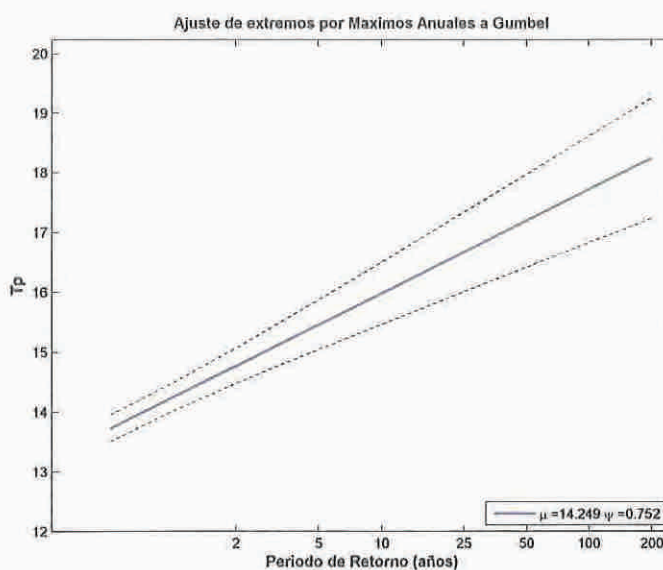


Figura 3.40. Régimen extremal del periodo de pico (T_p).

A partir de la figura 3.39 se establece que la altura de ola significativa con período de retorno de 2 años corresponde a 6,9 m y con periodo de retorno de 10 años corresponde a 8,8 m.

Con respecto al periodo de pico, en la figura 3.40 se observa que el período de pico con periodo de retorno de 2 años corresponde a 14,7 s y el de período de pico con periodo de retorno de 10 años es de 15,9 s.

3.5.3 Análisis del efecto del oleaje exterior en la zona de estudio

La ubicación de la playa del Regatón en el interior del estuario de Santoña, protegida por el monte Buciero y el Puntal de Laredo, hace que se encuentre especialmente abrigada frente a los oleajes exteriores, por lo que *a priori* se esperaría un efecto poco importante del oleaje en esta zona. Para cuantificar la oscilación del nivel del mar por efecto del oleaje exterior, se ha considerado un oleaje característico de los temporales anuales, y se ha propagado desde el exterior hasta la playa del Regatón.

Con base en la descripción estadística presentada en el apartado anterior, se ha simulado un oleaje procedente del Norte con 5 m de altura significativa y 12 s de período de pico. El análisis estadístico previo mostró que el oleaje más frecuente y más energético es el procedente de las direcciones NW y NNW (ver tabla 3.6). Sin embargo, la presencia del monte Buciero protege la playa del Regatón frente a oleajes procedentes de estos sectores. Por este motivo y para considerar un caso con mayor efecto en la zona de estudio, se ha seleccionado un oleaje que alcanza el monte Buciero procedente del Norte. Como muestra la tabla 3.6, el oleaje procedente de esta dirección origina alturas de ola importantes, con un valor de 3,66 m en el cuantil del 99%.

3.5.3.1 Propagación del oleaje hacia el interior del estuario de Santoña

Al propagarse el oleaje hacia la costa, se producen fenómenos de modificación del mismo que afectan a la distribución espacial de la energía (refracción, reflexión, asomeramiento, rotura, fricción por fondo, etc.). En geometrías reales, estos procesos deben simularse con la ayuda de modelos numéricos. En este estudio se ha utilizado el modelo numérico MSP para la propagación del oleaje desde profundidades intermedias hasta las inmediaciones de la zona de estudio. El modelo MSP, cuya descripción detallada puede encontrarse en el Anejo I, resuelve la ecuación de la pendiente suave o "mild-slope equation" en su aproximación elíptica.

La resolución de la ecuación de la pendiente suave fue introducida inicialmente por Berkhoff (1972), y desarrollada por Behrendt (1985). Esta ecuación es de tipo elíptico, necesitándose para su resolución condiciones de contorno a lo largo de todo el dominio de integración; éstas pueden ser: a) reflexión total o parcial en contornos fijos, b) onda

incidente conocida o condición de radiación en contornos abiertos. La ecuación ha sido resuelta por un método híbrido de elementos finitos desarrollado originalmente por Behrendt (1985), capaz de resolver la ecuación de Helmholtz con fondo variable dentro de contornos costeros y portuarios con geometrías complejas. El modelo MSP incorpora la posibilidad de describir con detalle la reflexión de cada uno de los contornos. Asimismo, incorpora el efecto de la difracción, refracción, asomeramiento, rotura y disipación por fondo.

A continuación se describe la batimetría y la malla utilizadas para propagar el oleaje, así como los resultados obtenidos.

Batimetría

En la figura 3.41 se presenta la batimetría utilizada para propagar el oleaje exterior hasta la playa del Regatón. La batimetría corresponde a la situación actual y se encuentra referida al nivel medio del mar en el puerto de Santoña.

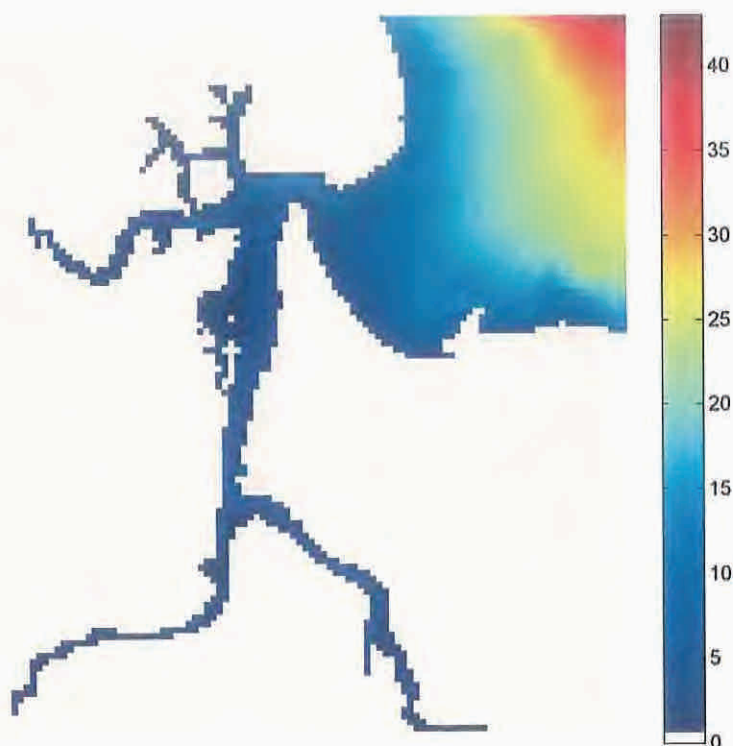


Figura 3.41. Batimetría general de la zona de estudio (batimétricas referidas al nivel medio del mar en el puerto de Santoña).

Malla de propagación

La malla de propagación es generada de forma específica, según el período y la dirección del oleaje que se desea propagar y el nivel de marea, ya que la malla de elementos finitos depende de la longitud de onda local, calculada en cada punto del dominio. La malla de cálculo utilizada para propagar el oleaje exterior hasta la playa del Regatón se muestra en la figura 3.42.

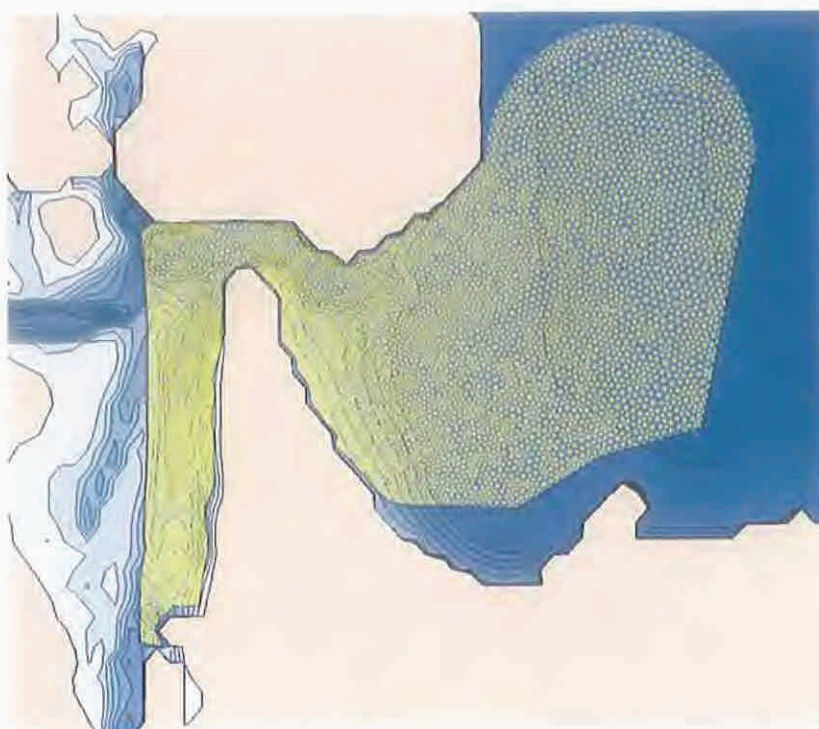


Figura 3.42. Malla de cálculo para propagar el oleaje exterior.

Resultado de las propagaciones

Como se mencionó con anterioridad, se ha propagado un oleaje procedente del Norte con 5 m de altura de ola significativa y 12 s de período de pico. Teniendo en cuenta que se quiere analizar el efecto sobre el nivel del mar, las propagaciones se han realizado durante la pleamar, considerando una carrera de marea de 4,5 m.

En la figura 3.43 se muestra la gráfica de isoalturas resultante. Se puede observar como en la playa del Regatón la altura de ola es menor de 5 cm en todo el área de estudio.

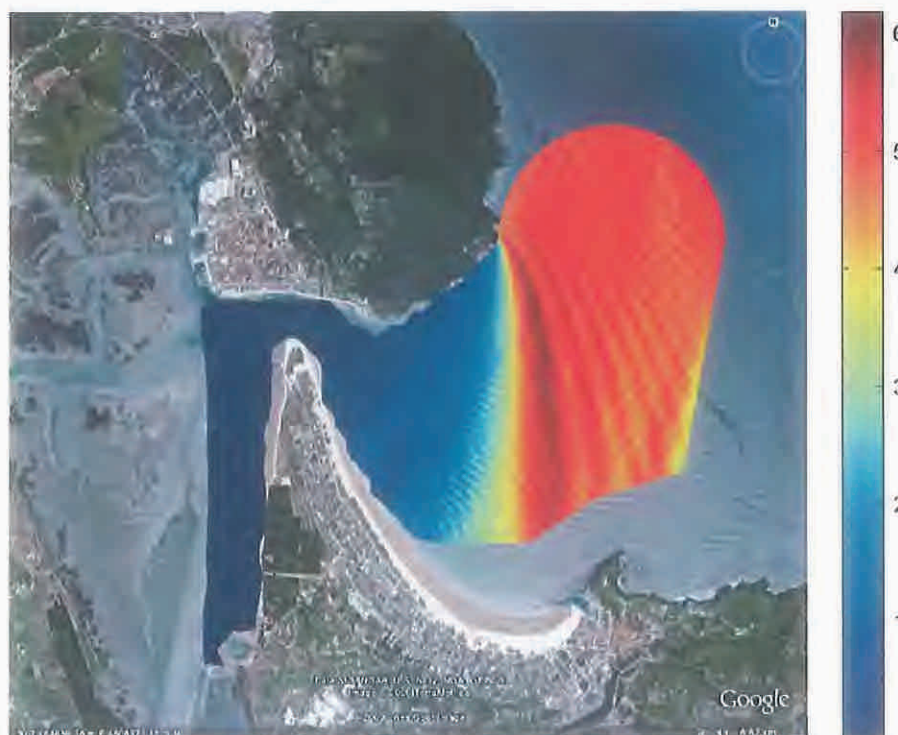


Figura 3.43. Gráfica de isoalturas para el caso de $H_s=5$ m, $T_p=12$ s, $\theta=N$ y carrera de marea de 4,5 m.

Con base en estos resultados la variación de nivel en la playa del Regatón debido al efecto del oleaje exterior puede considerarse despreciable.

3.5.4 Oleaje generado localmente por viento

La acción del viento en el interior del estuario, genera oscilaciones de corto período que dependen de la velocidad del viento y de la distancia o *fetch*. A partir de estos parámetros es posible calcular las características del oleaje generado. Estos oleajes se caracterizan por poseer períodos cortos y amplitudes relativamente pequeñas.

Para estudiar el oleaje generado por viento local en la playa del Regatón, se ha considerado un evento extremo, que represente las condiciones que mayor elevación podrían originar sobre el área de estudio. Se ha considerado un viento procedente del oeste, por ser la dirección que presenta mayor *fetch* y, por tanto, la que podría tener mayor efecto en el nivel de la zona de estudio. Considerando el análisis estadístico realizado a los datos de viento (ver tabla 3.3) se ha seleccionado para la dirección oeste el valor del cuantil del 99% de la velocidad del viento, correspondiente a 17 m/s.

Conocida la velocidad del viento y considerando un *fetch* de 2 km, se ha calculado la magnitud y período del oleaje mediante los ábacos correspondientes (Shore Protection Manual, 1984) y se ha obtenido un oleaje de 0,45 m y período 2,2 s. Aunque la elevación es importante, se observa que las oscilaciones son de muy corto período, por lo que no son relevantes a efectos de régimen de nivel del mar.

3.6 Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado la influencia que las diferentes dinámicas, concretamente la marea astronómica, la marea meteorológica, el caudal y el oleaje, tienen en la cota de inundación de la playa del Regatón.

Del análisis realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las aportaciones fluviales son despreciables en cuanto a variación de la cota del nivel del mar en la playa del Regatón. En condiciones de avenida, los niveles en la playa del Regatón no se ven afectados.
- La variación de nivel del mar debido a la sobreelevación por viento y al efecto del oleaje, tanto exterior como generado localmente por viento, pueden considerarse despreciables frente a la contribución de la marea astronómica.
- Las dinámicas más relevantes en la cota de inundación son:
 - La marea astronómica.
 - La marea meteorológica por presión atmosférica.
- En lo que se refiere a la marea astronómica, el análisis hidrodinámico muestra que la onda de marea en la playa del Regatón es igual que la exterior, de tal forma, que las cotas de pleamar en la playa del Regatón son sensiblemente iguales a las exteriores.
- En lo que se refiere a la marea meteorológica, el análisis hidrodinámico muestra que la onda de marea astronómica y meteorológica no se deforma ni se disipa, con respecto a la marea en el exterior, al propagarse hasta la playa del Regatón por lo que su efecto se puede analizar de forma lineal.

Capítulo 4

RÉGIMEN EXTREMAL DE INUNDACIÓN

4. RÉGIMEN EXTREMAL DE INUNDACIÓN

4.1 Introducción

En el Capítulo 3 se ha puesto de manifiesto que la cota de inundación de un punto cualquiera en la playa del Regatón es una variable aleatoria que depende funcionalmente de otras variables. De las diferentes dinámicas que pueden afectar a la cota de inundación, se ha demostrado que la marea astronómica y la marea meteorológica son los factores más relevantes, pudiéndose despreciar otras dinámicas como el efecto del oleaje, del viento o del caudal del río.

Del párrafo anterior se desprende que, al objeto de obtener la cota de inundación en la zona de estudio es necesario resolver:

- La obtención de una variable aleatoria (marea meteorológica)
- La obtención de una variable determinista (marea astronómica)
- La obtención de una variable aleatoria (cota de inundación) combinación de las variables anteriores.

En este capítulo se calculará el régimen extremal de inundación en la playa del Regatón, el cuál indica la probabilidad de que se presenten las máximas inundaciones posibles. En primer lugar se determinará el régimen extremal considerando como variables de entrada la carrera de marea astronómica y el nivel de marea meteorológica.

Adicionalmente al análisis estadístico del régimen de nivel, se calculará la cota de inundación teórica asociada a los máximos temporales conocidos. Hoy en día se dispone de datos de reanálisis de larga duración, tanto de marea meteorológica como de marea astronómica, y de series temporales de nivel del mar. Estos registros suponen una fuente de información que permite conocer los máximos temporales ocurridos en el pasado. Utilizando las bases de datos descritas en el Capítulo 3, se determinarán los eventos extremos de marea astronómica y meteorológica, y se calculará la cota de inundación teórica de los máximos temporales conocidos.

Finalmente, se analizarán los cambios morfodinámicos esperables en la playa del Regatón debido a la futura recuperación de antiguas concesiones localizadas en el estuario de Santoña y se estudiará la estabilidad de la playa teniendo en cuenta dichos cambios y la cota de inundación calculada previamente. Los resultados de este análisis se presentarán en los Capítulos 5 y 6.

De forma general, la estructura de análisis utilizada es la siguiente:

- Predecir la marea astronómica en la zona de estudio durante un intervalo temporal suficientemente amplio, que permita el análisis estadístico de extremos.
- Combinar la marea astronómica con la marea meteorológica para obtener la cota de inundación durante el mismo período de tiempo.
- Realizar un análisis de extremos de la serie de nivel para determinar el régimen extremal de la cota de inundación.
- Obtener el valor de la cota de inundación para diferentes períodos de retorno.
- Calcular la cota de inundación teórica con los máximos temporales conocidos.
- Estudiar la estabilidad de la playa del Regatón teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos esperables por la recuperación de antiguas concesiones y la cota de inundación.

4.2 Cálculo de la cota de inundación

Tal y como se ha explicado anteriormente, la inundación costera es un fenómeno aleatorio fruto de la combinación de diferentes procesos de la dinámica marina. En la playa del Regatón, las dinámicas relevantes son la marea astronómica y la marea meteorológica, por lo que la cota de inundación se puede calcular como la suma de ambos factores:

$$CI = MA + MM \quad (4.1)$$

A continuación se va a describir el proceso de cálculo de la cota de inundación y de las variables que la condicionan.

4.2.1 Marea astronómica

El primer paso para determinar la cota de inundación consiste en la predicción de la marea astronómica en la zona de estudio durante un intervalo temporal suficientemente amplio, que permita el análisis estadístico de extremos.

Utilizando las constantes armónicas resultantes del análisis armónico realizado en el Capítulo 3 (ver tabla 3.2) se ha predicho la marea astronómica durante 400 años, en el

período comprendido entre 1958 y 2358. La predicción se ha realizado con el programa *t_tide* mencionado anteriormente (ver Capítulo 3).

En la figura 4.1 se muestra la serie de marea astronómica de 400 años.

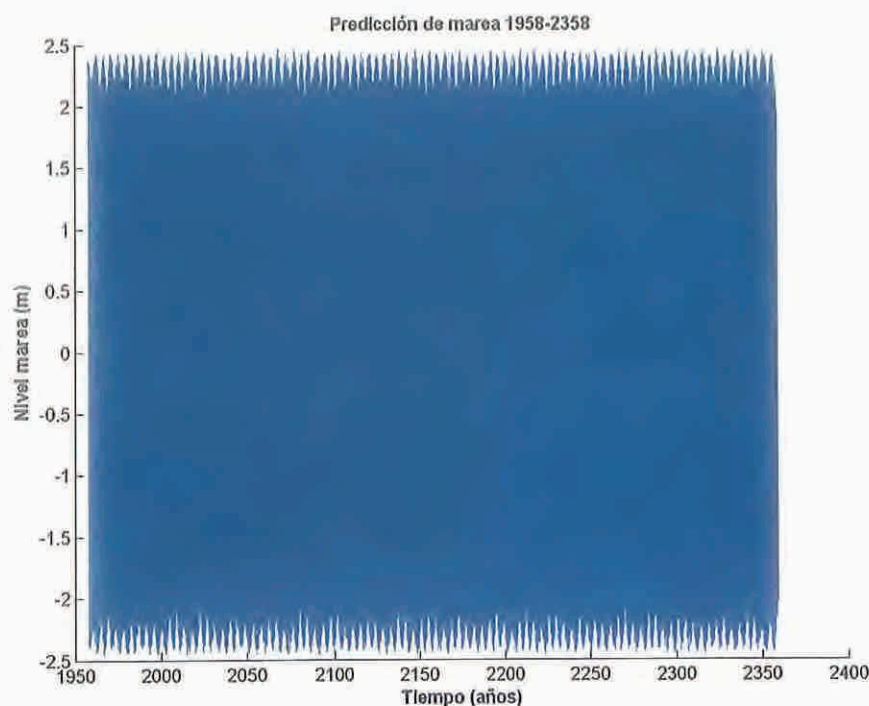


Figura 4.1. Predicción de marea astronómica en el período 1958-2358 (respecto al NMM).

4.2.2 Marea meteorológica

Como se ha comentado en el Capítulo 3, en este estudio se han utilizado datos de marea meteorológica proporcionados por la base de datos SIMAR-44, correspondientes a una serie temporal de 44 años de duración en el período 1958-2001.

La longitud de la serie de marea meteorológica es limitada para realizar un análisis extremal. Por lo tanto, para disponer de un registro mayor, se ha repetido consecutivamente en el tiempo hasta completar un período de 400 años, el mismo período considerado para la marea astronómica.

Debido a que la marea meteorológica es un proceso aleatorio, su repetición en el tiempo y la combinación con la marea astronómica, permitirá generar de forma aleatoria

la cota de inundación producida por ambas dinámicas. En la figura 4.2 se muestra la serie de marea meteorológica reconstruida en el período 1958-2358.

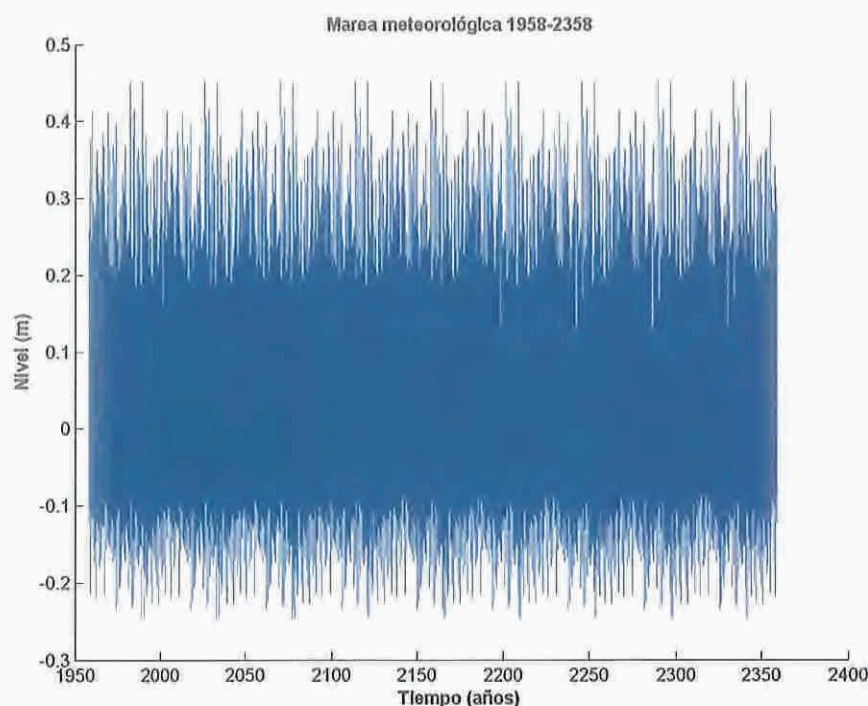


Figura 4.2. Serie de marea meteorológica reconstruida en el período 1958-2358.

4.2.3 Cota de inundación

Como se ha explicado previamente, la cota de inundación se va a calcular como la suma de la marea astronómica y la marea meteorológica (ecuación 4.1).

Debido a que el efecto de las dinámicas actuantes, como se mostró en el Capítulo 3, no varía espacialmente en la zona de estudio, se ha calculado la cota de inundación de forma general para toda la playa del Regatón.

En la figura 4.3 se muestra la serie de nivel (respecto al NMMA) resultante de la suma de la marea meteorológica y la marea astronómica durante 400 años, en el período comprendido entre 1958 y 2358.

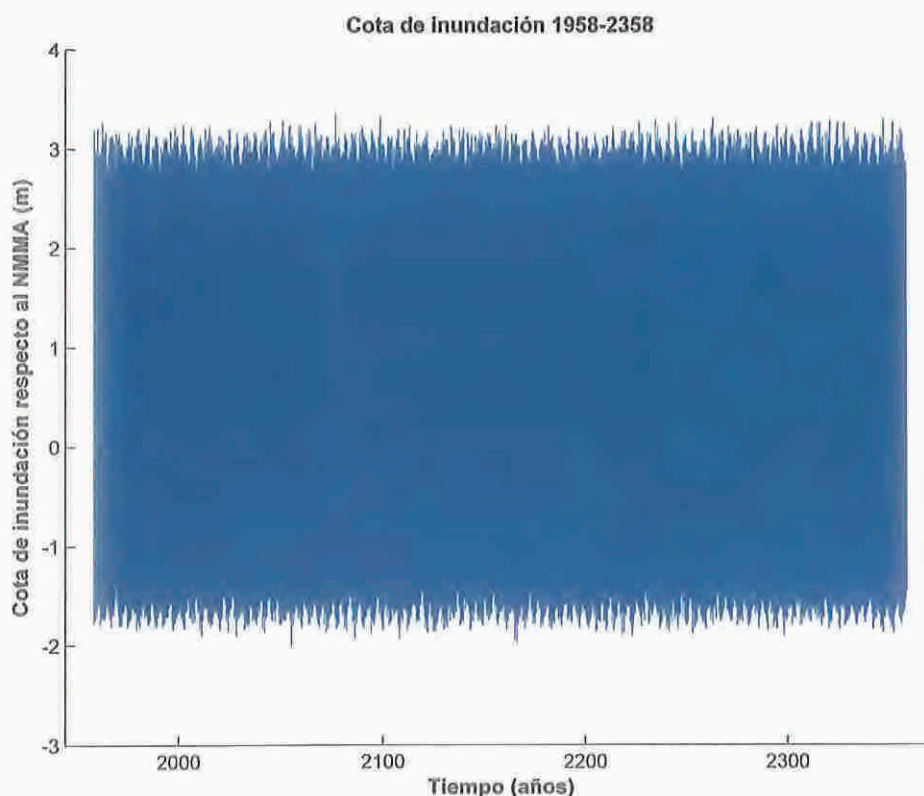


Figura 4.3. Cota de inundación (MA+MM) en el período 1958-2358 (respecto al NNMA).

4.3 Cálculo del régimen extremal de la cota de inundación

Una vez obtenidos los valores de cota de inundación en la zona de estudio se obtendrá su régimen extremal.

4.3.1 Metodología

Con el fin de obtener el régimen extremal, se debe tener en cuenta que los valores extremos se ajustan a una de estas tres distribuciones: Gumbel, Fréchet y Weibull, según el teorema de las tres colas (*Fisher y Tippett, 1928*). Estos tres tipos pueden ser combinados en una única expresión denominada distribución de valores extremos generalizados (GEV) con la siguiente expresión:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{\xi(x - \mu)}{\psi} \right)^{-\left(\frac{1}{\xi}\right)} \right] \quad (4.2)$$

donde:

μ : es el parámetro de localización.

ψ : es el parámetro de escala.

ξ : es el parámetro de forma.

Cuando $-0.05 < \xi < 0.05$ resulta la distribución de Gumbel.

Cuando $\xi > 0.05$ resulta la distribución de Fréchet.

Cuando $\xi < -0.05$ resulta la distribución de Weibull.

Para determinar los regímenes extremos, la distribución de extremos generalizada se puede aplicar, bien al valor máximo anual, o bien sobre todos los valores que superan un umbral determinado (POT). En este apartado se presenta el régimen extremal de la cota de inundación obtenido al aplicar el método POT.

4.3.2 Resultados

En la figura 4.4 se presenta el régimen extremal de la cota de inundación respecto al NMMA, pudiéndose observar el ajuste (línea azul continua) a una distribución Weibull y sus bandas de confianza al 95% (línea negra discontinua). Los parámetros de esta distribución también se indican en la figura 4.4.

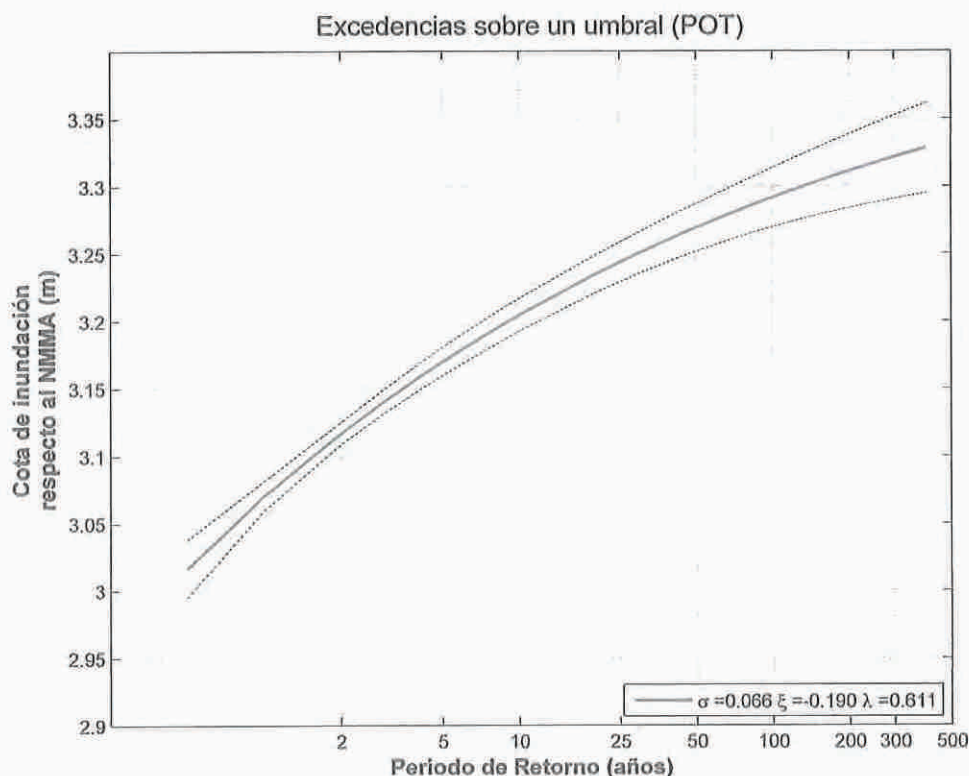


Figura 4.4. Régimen extremal de la cota de inundación con respecto al nivel medio del mar en Alicante (NMMA).

A partir de la figura 4.4 se puede obtener el período de retorno en años asociado a los diferentes niveles del mar. Los resultados para los períodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 200 años se muestran en la tabla 4.1. En el Anejo III se presentan los mapas correspondientes a los períodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años.

Período de retorno (años)	10	25	50	100	200
Cota de inundación (m) respecto al NMMA	3,20	3,24	3,27	3,29	3,31

Tabla 4.1. Cota de inundación con respecto al NMMA para los períodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 200 años.

Es importante destacar que estos valores pueden aumentar si se cumplen las previsiones de ascenso del nivel del mar estimado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Concretamente, las proyecciones futuras de elevación del nivel medio

del mar global para el horizonte del año 2050, dan un valor de 15 cm, en consonancia con el escenario promedio A1B señalado en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC.

4.4 Cota de inundación teórica con los máximos temporales conocidos

Cómo se ha comentado con anterioridad, las series temporales de larga duración suponen una fuente de información para conocer los máximos temporales ocurridos en el pasado. Los datos del mareógrafo de Santander, que abarcan el período 1992-2009, han sido utilizados para determinar el mayor evento del nivel del mar registrado en dicho período y calcular la cota de inundación teórica correspondiente.

En la figura 4.5 se muestra la serie temporal de nivel del mar (respecto al NMMA) del mareógrafo de Santander en el período 1992-2009. El valor más alto observado fue registrado el día 24/12/1995, fecha en la que se alcanzó un nivel de marea astronómica de 2,98 m (respecto al NMMA) y un nivel de marea meteorológica de 0,22 m. Por lo tanto, la cota de inundación teórica con el máximo temporal conocido (CI_{MTC}) es de 3,20 m. En el Anejo III se adjunta el mapa de cota de inundación teórica para el nivel del mar alcanzado ese día.

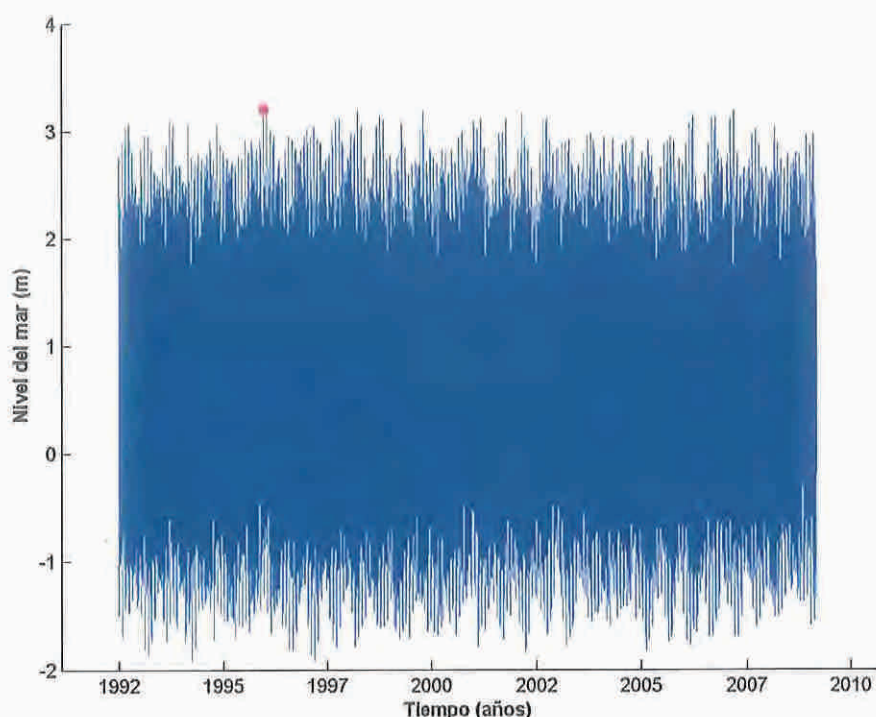


Figura 4.5. Nivel del mar (respecto al NMMA) registrado por el mareógrafo de Santander en el período 1992-2009. El círculo rojo indica el máximo evento registrado.

Capítulo 5

ESTUDIO MORFODINÁMICO

5. ESTUDIO MORFODINÁMICO

5.1 Introducción

El estudio de cota de inundación realizado en los capítulos anteriores corresponde a la situación actual del estuario de Santoña. Sin embargo, dado que el estuario está sometido a cambios que afectan a la respuesta del mismo frente a la acción de las diferentes dinámicas, el régimen de inundación se ve modificado por dichos cambios.

A lo largo de su evolución, la superficie inundable de las marismas de Santoña se ha visto reducida debido, en parte, a numerosas concesiones otorgadas para su desecación y posterior uso agrícola o urbano (ver figura 5.1). Actualmente, algunas de estas concesiones se mantienen en uso, mientras que otras se han recuperado o se encuentran abandonadas y en proceso de naturalización. La progresiva recuperación de estas zonas, supondrá cambios hidromorfológicos del estuario que afectarán a la estabilidad de la playa del Regatón.

Para analizar este aspecto, en este capítulo se describe la morfodinámica sedimentaria a largo plazo de la zona de estudio y se presentan los efectos esperables en el estuario de Santoña originados por la recuperación de las concesiones mencionadas. Una vez presentados los cambios morfodinámicos globales del estuario, se analizará su influencia en la playa del Regatón.

Finalmente, en el capítulo siguiente, se estudiará la estabilidad de la playa del Regatón teniendo en cuenta estos cambios morfodinámicos y la cota de inundación calculada previamente.

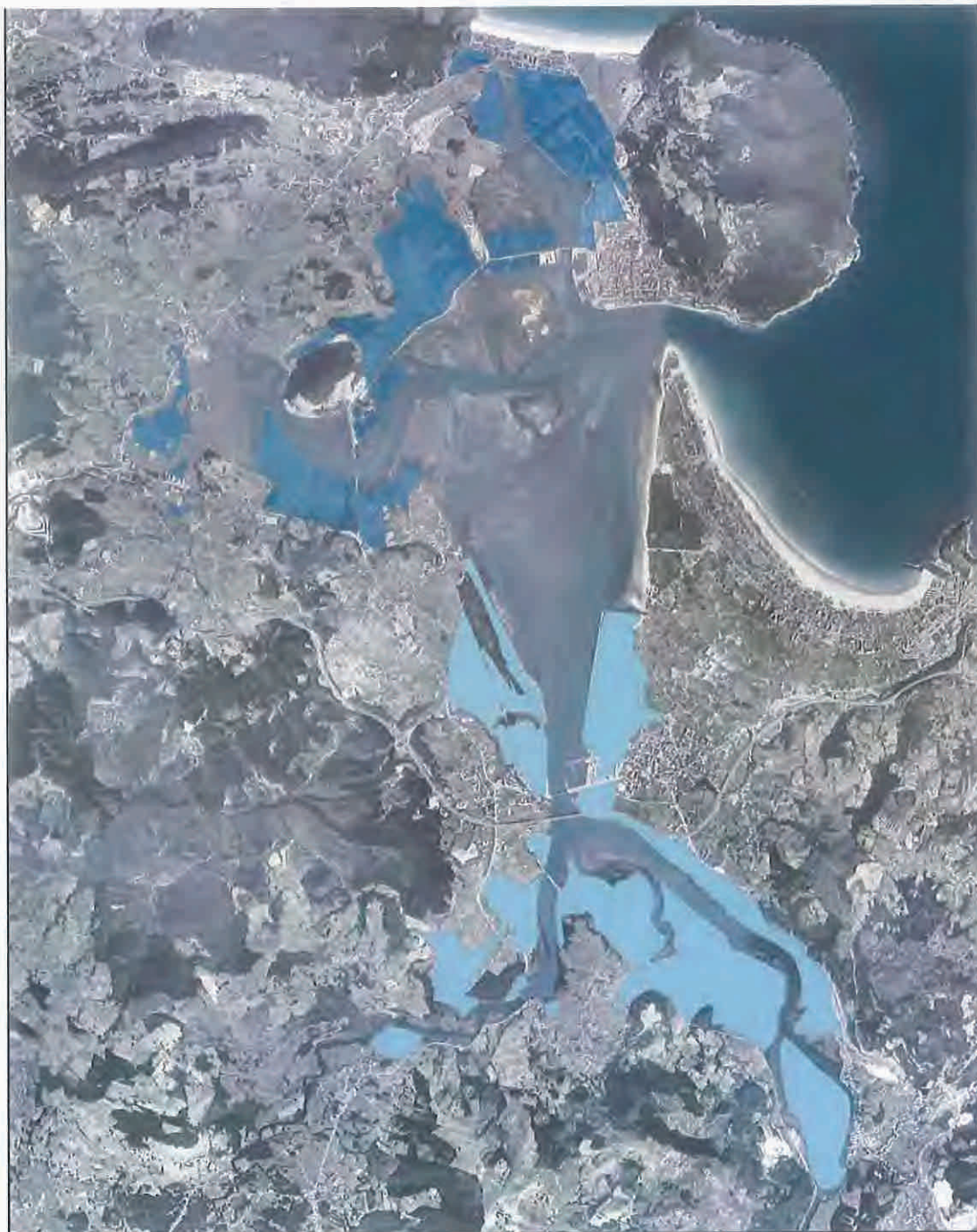


Figura 5.1. Concesiones en el estuario de Santoña. En azul claro se destacan las concesiones cuya recuperación influiría en la morfodinámica de la playa del Regatón.

5.2 Morfodinámica sedimentaria a largo plazo

A pesar del constante trasiego de material que se produce en el corto plazo, las desembocaduras y rías presentan una configuración con elementos morfológicos característicos cuya identificación es posible en todas ellas. De este modo, se puede observar la presencia de una zona angosta y profunda que constituye la boca de la desembocadura propiamente dicha y una serie de bajos exteriores, una canal principal, canales secundarios y las denominadas llanuras mareales. Otras características morfológicas de las desembocaduras, son:

- La boca de la desembocadura siempre se ubica en la zona de menor oleaje, y presenta una sección asimétrica en forma de V. Esta asimetría es tanto más acusada cuanto mayor es el gradiente de altura de ola que incide en la sección de la boca.
- Los bajos exteriores son, en general, tres: Dos laterales y uno central, también denominado barra. En el caso de las desembocaduras que se ubican al abrigo de un cabo o dique, los dos bajos laterales quedan reducidos a un solo bajo.

La morfodinámica sedimentaria en una desembocadura consiste en un equilibrio dinámico, observándose una morfología media y una cierta variabilidad en torno a esa morfología media. Diversos autores han estudiado esta morfología media proponiendo relaciones empíricas en función de los parámetros del estuario, dentro de los cuales el más relevante es el prisma de marea (volumen de agua que entra y sale de un estuario durante un ciclo de marea). Algunas de estas relaciones tomadas de Van Dongeren (1992), son las que se presentan seguidamente.

El área de la sección transversal de la desembocadura es directamente proporcional al prisma de marea del estuario (O'Brien, 1969):

$$Ac = A \cdot 10^{-2} \cdot \Omega \text{ para desembocaduras sin diques} \quad (5.1)$$

$$Ac = B \cdot 10^{-2} \cdot \Omega \text{ para desembocaduras con diques} \quad (5.2)$$

donde Ac es el área de la sección transversal de la desembocadura en media marea (km^2), Ω es el prisma de marea correspondiente a una marea viva (km^3) y A y B son constantes empíricas.

La sección transversal Ac representa el área crítica correspondiente al caudal máximo de llenante o de vaciante. La sección no podrá ser menor que Ac , ya que la velocidad de la corriente se incrementaría erosionando el sedimento y recuperando la sección de equilibrio. Mientras que tampoco podrá ser mayor que Ac , puesto que la velocidad de la corriente mareal disminuiría depositándose sedimento y nuevamente recuperando el área de equilibrio. Por lo que, a largo plazo la desembocadura tiende a presentar una sección crítica en equilibrio dinámico. Es decir, la sección de la desembocadura oscila entorno a un valor medio de Ac , ya que la velocidad en la desembocadura varía a lo largo del ciclo

de marea y además, no todas las mareas presentan la misma intensidad (mareas vivas/ mareas muertas).

Del estudio de esta relación se puede decir que, la única forma de alterar el área de equilibrio, es actuando sobre el prisma de marea. Las reducciones drásticas del prisma de marea a través de la consolidación de las marismas, provocarán la reducción del área de la sección transversal de la desembocadura. Por otro lado, modificaciones que conlleven el aumento del prisma de marea, producirán un aumento de la sección de la desembocadura.

También relacionado con este parámetro (prisma de marea), Walton y Adams (1976) formularon una relación del volumen de arena de los bajos exteriores en función de Ω :

$$V = C \Omega^{1.23} \quad (5.3)$$

donde:

- V es el volumen de arena de los bajos exteriores (m^3)
- Ω es el prisma de marea (m^3)
- C es una constante de proporcionalidad

En cuanto al interior del estuario, Eysink (1990, 1991) desarrolló formulaciones que relacionan el volumen de los canales mareales con el prisma de marea. Eysink (1990) propuso la siguiente relación:

$$V_{MSL} = F \Omega^{1.5} \quad (5.4)$$

donde V_{MSL} es el volumen (m^3) de los canales mareales en media marea y F es el coeficiente de proporcionalidad a calibrar.

Por otro lado, Eysink (1991) propuso la siguiente relación:

$$V_{MLW} = E \Omega^{1.566} \quad (5.5)$$

donde V_{MLW} es el volumen (m^3) de los canales mareales con respecto al nivel de bajamar y E representa un coeficiente de proporcionalidad.

Existe otra relación empírica propuesta por Eysink (1990) y Renger y Partenscky (1974) que relaciona el área total de la bahía con el área de los bajos interiores:

$$\frac{A_f}{A_b} = 1 - G \sqrt{A_b} \quad (5.6)$$

donde:

- A_b representa el área total de la bahía (en $10^6 m^2$);

- A_f representa el área total de las marismas (10^6 m^2).

Según esta relación, un aumento del área de la bahía implica una reducción de la relación entre el área de la bahía y de las marismas.

5.3 Efectos globales originados por la recuperación de concesiones

En este apartado se presentan los cambios originados en el estuario de Santoña como consecuencia de la recuperación de las concesiones representadas en la figura 5.1. Los cambios morfodinámicos esperables a largo plazo se han calculado aplicando las relaciones empíricas recogidas en el apartado anterior. Para ello, en primer lugar se ha obtenido el valor actual de los parámetros morfodinámicos más importantes del estuario: área de la desembocadura (A_c), volumen del bajo exterior (V), volumen de los canales interiores del estuario (V_{MLW}) y superficie ocupada por bajos mareales (A_f). Posteriormente, se ha determinado la variación a largo plazo de los distintos elementos morfológicos.

En la tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos. Como puede observarse, la recuperación de las concesiones supondría un aumento del 53% del prisma de marea (Ω) existente en la actualidad, lo que se traduciría en un aumento del 53% del área crítica de la desembocadura necesaria para alcanzar el equilibrio del estuario. El aumento del volumen del bajo exterior ascendería al 68.5% y el volumen de los canales interiores aumentaría al 94%.

Área recuperada (m^2)	10407499
Aumento Ω (m^3)	27631531
Aumento Ω (%)	52.7
Aumento A_c (m^2)	1643
Aumento A_c (%)	52.7
A_c final (m^2)	4758
Aumento V (m^3)	3107449
Aumento V (%)	68.4
V final (m^3)	7651773
Aumento V_{MLW} (m^3)	7433372
Aumento V_{MLW} (%)	94.1
V_{MLW} final (m^3)	15329665
A_b final (m^2)	26546763
Aumento A_f (m^2)	-781061
Aumento A_f (%)	-12.9
A_f final (m^2)	5274417

Tabla 5.1. Estimación de la variación de los parámetros que definen la morfología de estuario de Santoña en el caso de que se recuperen las concesiones.

Con esos resultados se ha cuantificado los principales efectos que se producirían en los elementos más importantes del estuario de Santoña si se recuperara el total de las concesiones:

- El aumento de la sección de la desembocadura en un 53%, implicaría un aumento de la anchura de la desembocadura de unos 165 m (suponiendo que no aumenta la profundidad de la sección). Suponiendo que la playa de San Martín desaparece (considerando una anchura actual de la playa de unos 50 m), los otros 115 metros de anchura se perderán de la playa del Puntal. Por lo tanto, este aumento de anchura de la desembocadura podrá originar los siguientes efectos:
 - Aumento de la anchura de la canal y, por tanto, desaparición de la Playa de San Martín.
 - Retroceso del Puntal del orden de 1 m por cada 240.000 m³ que aumente el prisma de marea.
- Las canales mareales aumentan su volumen en un 94%, lo cual implica una erosión de sus contornos (anchura y profundidad) del orden de 27.000 m³ por cada 100.000 m³ que aumente el prisma de marea. En el estudio de detalle del estuario de Santoña (FLTQ, 1995), se determinó que en las zonas de las canales mareales, el 61% del material del estuario es arena y el 38% son finos. Considerando que los finos se pierden fuera del estuario y que el resto, la fracción arenosa, se queda en el estuario, depositándose por ejemplo, en el bajo exterior, el total del volumen de arena procedente de la erosión de las canales que podría depositarse en el bajo exterior ascendería a unos 4.534.360 m³.
- El aumento del 68.5% del volumen del bajo exterior implica un déficit de sedimento en dicha zona del orden de 3.107.449 m³, es decir, del orden de 11.250 m³ por cada 100.000 m³ que aumente el prisma de marea. Como se ha mencionado anteriormente, el volumen requerido por el bajo exterior en el corto plazo procederá principalmente de la playa de La Salvé (Puntal) y en el largo plazo puede proceder de la erosión de los canales mareales. Por lo tanto, se pueden analizar dos escenarios:
 - A corto plazo, teniendo en cuenta que la longitud de la playa de La Salvé es aproximadamente de 3.7 Km, la playa experimentará un retroceso de unos 70 m/ml de playa. Es decir, se producirá 1 m de retranqueo por cada 400.000 m³ de aumento del prisma de marea.
 - A largo plazo, el volumen aportado por los canales mareales (4.534.360 m³ aproximadamente) es suficiente para satisfacer toda la demanda de arena del bajo exterior (3.107.499 m³).

5.4 Efectos en la playa del Regatón originados por la recuperación de concesiones

Los resultados presentados en el apartado anterior muestran que el principal efecto de la recuperación de las concesiones se manifestaría en un cambio en el ancho de la desembocadura, en el volumen de los canales mareales y en el volumen del bajo exterior.

De los tres factores citados, el más relevante y que podría afectar a la zona de estudio es el incremento en el volumen de los canales mareales, especialmente el de la ría de Treto, que discurre paralelo a la playa del Regatón (ver figura 5.2).

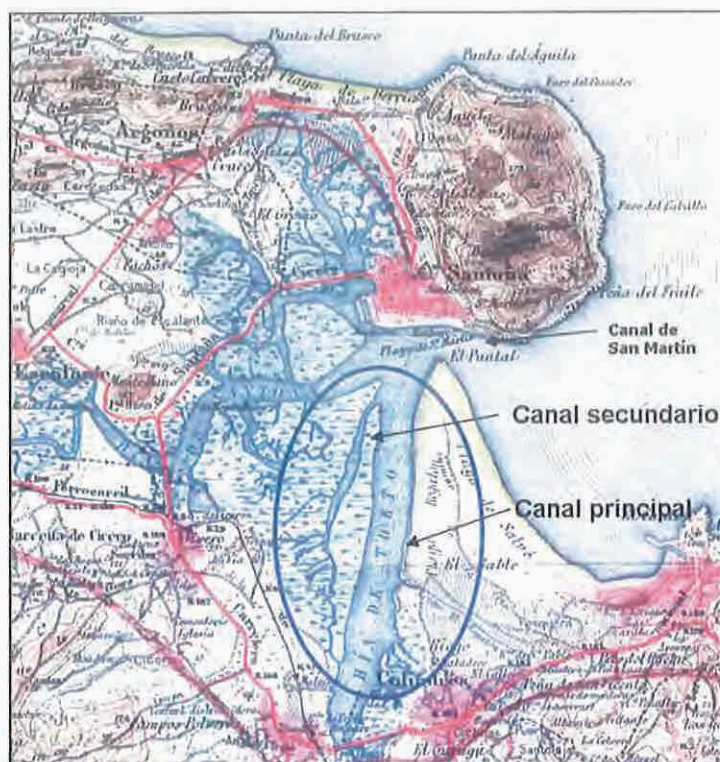


Figura 5.2. Mapa del estuario de Santoña destacando los canales próximos a la playa del Regatón.

El prisma de marea y el volumen de los canales están relacionados, de tal forma, que cuanto mayor es el incremento del prisma de marea mayor es el aumento del volumen. Desde el punto de vista hidrodinámico este comportamiento se explica de la siguiente forma: al aumentar el prisma de marea debido a la recuperación de las concesiones, el volumen de agua que tiene que entrar y salir de la bahía en un ciclo de marea es mayor y por tanto el caudal en el interior de la bahía tienen que aumentar; dicho aumento del caudal genera una mayor erosión de los canales aumentando su profundidad y, por tanto, su volumen.

Para conocer el volumen final (V_f) de los canales es necesario determinar, en primer lugar, el volumen actual (V_0) de los mismos. Utilizando la batimetría expuesta en la figura 5.3 se ha calculado el volumen actual con respecto al nivel de bajamar, obteniéndose los siguientes valores:

Canal	$V_0 (m^3)$
Principal (Ría de Treto)	3.830.871
Secundario	182.595

Tabla 5.2. Volumen actual de los canales principal (ría de Treto) y secundario.

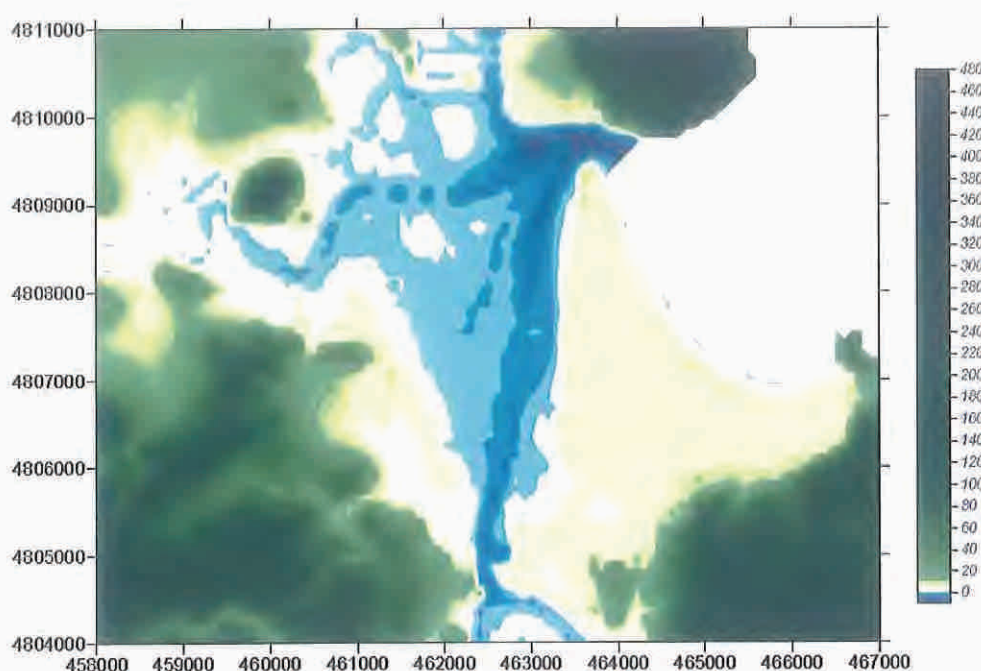


Figura 5.3. Batimetría utilizada para calcular el volumen actual de los canales (referida respecto al NMMA).

Por otro lado, el volumen de los canales y el prisma de marea se relacionan a través de las ecuaciones 5.4 y 5.5 presentadas anteriormente. De dichas formulaciones se deduce que para determinar el aumento de volumen de los canales, es necesario conocer el incremento en el prisma de marea originado por la recuperación de las concesiones. Para ello, en primer lugar se ha estimado el incremento de prisma de marea originado por la recuperación de las concesiones que afectarían al canal de la ría de Treto (destacadas en azul claro en la figura 5.1), el más influyente en la zona de estudio. La recuperación de esta zona incrementaría el prisma de marea en aproximadamente $14.389.338 m^3$ lo que supondría un aumento del prisma de marea total del estuario en un 27,5%. Este

aumento del prisma mareal influiría directamente en los canales adyacentes a la playa del Regatón (referidos en la figura 5.2 como canal principal o ría de Treto y canal secundario), aumentando su volumen aproximadamente un 44,2%. Este porcentaje supone un incremento de 1.773.952 m³ con respecto al volumen actual, correspondiendo un 4,55% al aumento del canal secundario y un 95,45% al aumento del canal principal. Por lo tanto, el volumen final de cada canal después de la recuperación sería el siguiente:

Canal	V _f (m ³)
Principal (Ría de Treto)	5.524.108
Secundario	263.310

Tabla 5.3. Volumen final de los canales principal y secundario.

El incremento de volumen de los canales mareales cambiará su geometría, modificando sus contornos (anchura y profundidad) hasta ajustarse a la nueva situación de equilibrio. De esta forma, los canales se erosionarán para permitir el paso del incremento de prisma mareal. Considerando el canal de la ría de Treto, por ser el que influirá en la zona de estudio, se puede prever que la erosión de sus contornos afecte a la playa del Regatón.

Los cambios experimentados por el canal para adaptarse a las nuevas condiciones hidrodinámicas, serán tales que tienda a mantener su configuración de equilibrio. En una primera aproximación, esto implica que se conserve la tensión tangencial por fondo (τ_b), que para un canal ancho puede expresarse como:

$$\tau_b = \rho g I h \quad (3)$$

donde, ρ es la densidad, g es la gravedad, I es la pendiente hidráulica y h es la profundidad.

Teniendo en cuenta que ρ , g e I permanecen inalterables, para que τ_b permanezca constante es necesario que la profundidad no varíe de forma importante, por lo que los cambios se producirán principalmente en la anchura del canal. Por otro lado, puesto que el canal alcanzará una situación de equilibrio, la geometría final será equivalente a la inicial. Conociendo el volumen inicial y final del canal después de recuperar las concesiones, y considerando que la configuración final es proporcional a la inicial, se ha estimado el cambio que sufrirá en profundidad y anchura.

En la figura 5.4 se muestra un ejemplo de un perfil transversal al canal, mostrando la configuración inicial (rojo) y la configuración final (azul marino y azul claro) después del cambio. Se observa cómo después de recuperadas las concesiones, aumenta la profundidad y la anchura, lo que afectaría a la playa del Regatón. En término medio se puede decir que la anchura del canal se incrementará entre 50-70 m y la profundidad

entre 0.10 y 0.50 m. El incremento de anchura se repartirá a ambos lados del canal, siendo mayor en la zona donde el sedimento esté menos consolidado, y por lo tanto, sea más fácilmente erosionable. La sección occidental, localizada en la zona de marisma, está constituida de fangos y material cohesivo, mientras que la sección oriental, adyacente a la playa del Regatón, está formada principalmente de arena. Teniendo en cuenta el tipo de sedimento existente, es esperable que la erosión se produzca principalmente en la margen oriental del canal, es decir, en la playa del Regatón. Sin embargo, y puesto que no se dispone de información sobre el grado de cohesión del sedimento, no se puede determinar el incremento de anchura en cada margen del canal. Por lo tanto, se puede concluir que la playa del Regatón se erosionará como mínimo 25-35 m, si se asume que el aumento de anchura se repartirá simétricamente a ambos lados del canal, y como máximo 50-70 m, si se considera que toda la erosión se produce sobre la playa del Regatón.

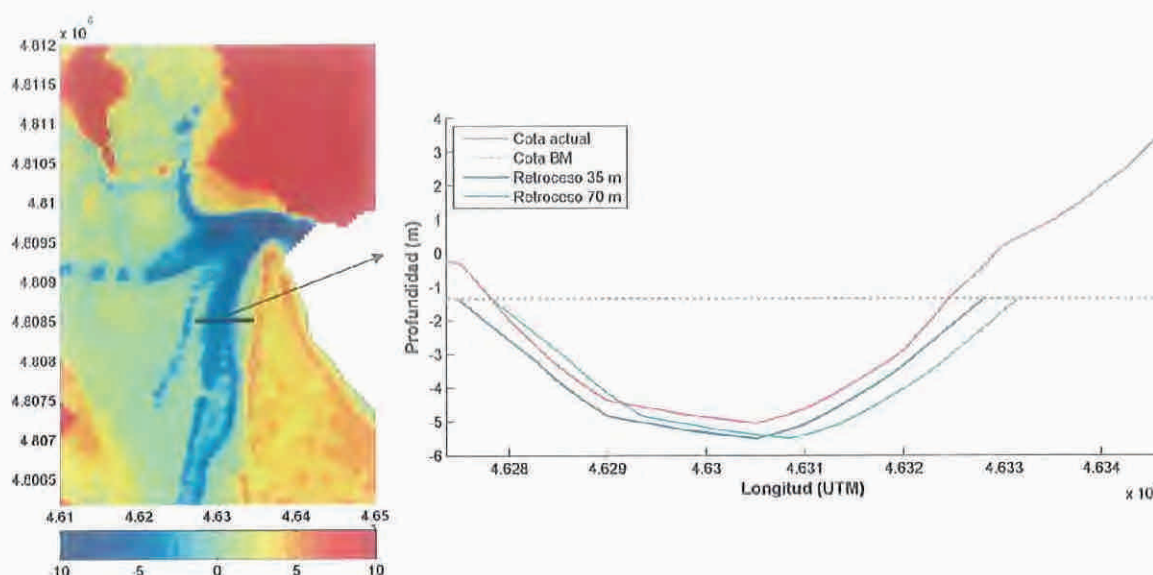


Figura 5.4. Perfil transversal de la ría de Treto. En rojo se muestra la geometría inicial del canal. En azul marino se muestra la geometría final considerando que la erosión se produce de forma simétrica en ambos lados del canal. En azul claro se presenta la geometría final considerando que toda la erosión se produce en la playa del Regatón.

La erosión experimentada por la playa afectará al primer cordón dunar, que retrocederá para adaptarse a las nuevas condiciones hidrodinámicas. Como consecuencia, la defensa natural que representan las dunas disminuirá y por lo tanto, la playa del Regatón estará más expuesta frente a eventos de inundación. En el capítulo siguiente se analiza con más detalle este aspecto.



Capítulo 6

ESTUDIO DEL PERFIL ESTABLE FUTURO



6. ESTUDIO DEL PERFIL ESTABLE FUTURO

Como se ha comentado previamente, el estuario de Santoña está sometido a cambios que afectan a la repuesta del mismo frente a la acción de las diferentes dinámicas, modificando sus condiciones hidromorfológicas y afectando a la estabilidad de la playa del Regatón.

Para adaptarse a estos cambios, la playa se verá sometida a procesos de erosión y sedimentación, que modificarán su perfil hasta alcanzar una nueva situación de equilibrio. Concretamente, y como se ha demostrado previamente, la anchura de la playa disminuirá, lo que provocará el retroceso del perfil de playa, y por lo tanto del cordón dunar, hasta alcanzar su nueva configuración estable.

Por lo tanto, en este capítulo se estudiará la estabilidad de la playa del Regatón teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos que se producirán en esta zona debido a la recuperación de antiguas concesiones en el estuario de Santoña, la acción de la dinámica fluvio-mareal en la zona y la elevación del nivel del mar.

Tal y como se ha demostrado previamente, la anchura de la playa del Regatón disminuiría como mínimo 25-35 m y como máximo 50-70 m si se recuperan las concesiones localizadas en el interior del estuario de Santoña. Como se ha comentado anteriormente, no se dispone de información suficiente para determinar el retroceso exacto de la playa, por lo que se ha considerado como valor medio aproximadamente 50 m. Para estudiar los cambios que experimentará la playa para adaptarse a las nuevas condiciones existentes y alcanzar una configuración morfodinámica estable, se han analizado diferentes perfiles transversales a la playa del Regatón. Considerando el perfil y la cota de inundación calculada y teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos presentados anteriormente, se ha determinado el perfil estable futuro.

Para explicar más claramente el proceso seguido, en la figura 6.1b se muestra un ejemplo en el que se compara el perfil actual (línea azul) y futuro (línea roja) del transecto indicado en la figura 6.1a. La línea verde discontinua representa la cota de inundación en los máximos temporales conocidos, correspondiente a 3,20 m (ver Capítulo 4). Se puede observar, que en la situación actual (línea azul) la cota de inundación alcanza el sistema dunar. Bajo las condiciones dinámicas futuras, la anchura de la playa disminuye como mínimo 25-35 m, y en término medio 50 m, lo que origina el retroceso del perfil. En esta situación, la duna se erosiona por efecto de la inundación y se desplaza hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Por lo tanto el límite actual del cordón dunar (indicado por un círculo azul en la figura 6.1b) se desplaza espacialmente (círculo rojo). Este desplazamiento representa la extensión mínima necesaria para permitir la movilidad del perfil de la playa y garantizar su estabilidad.

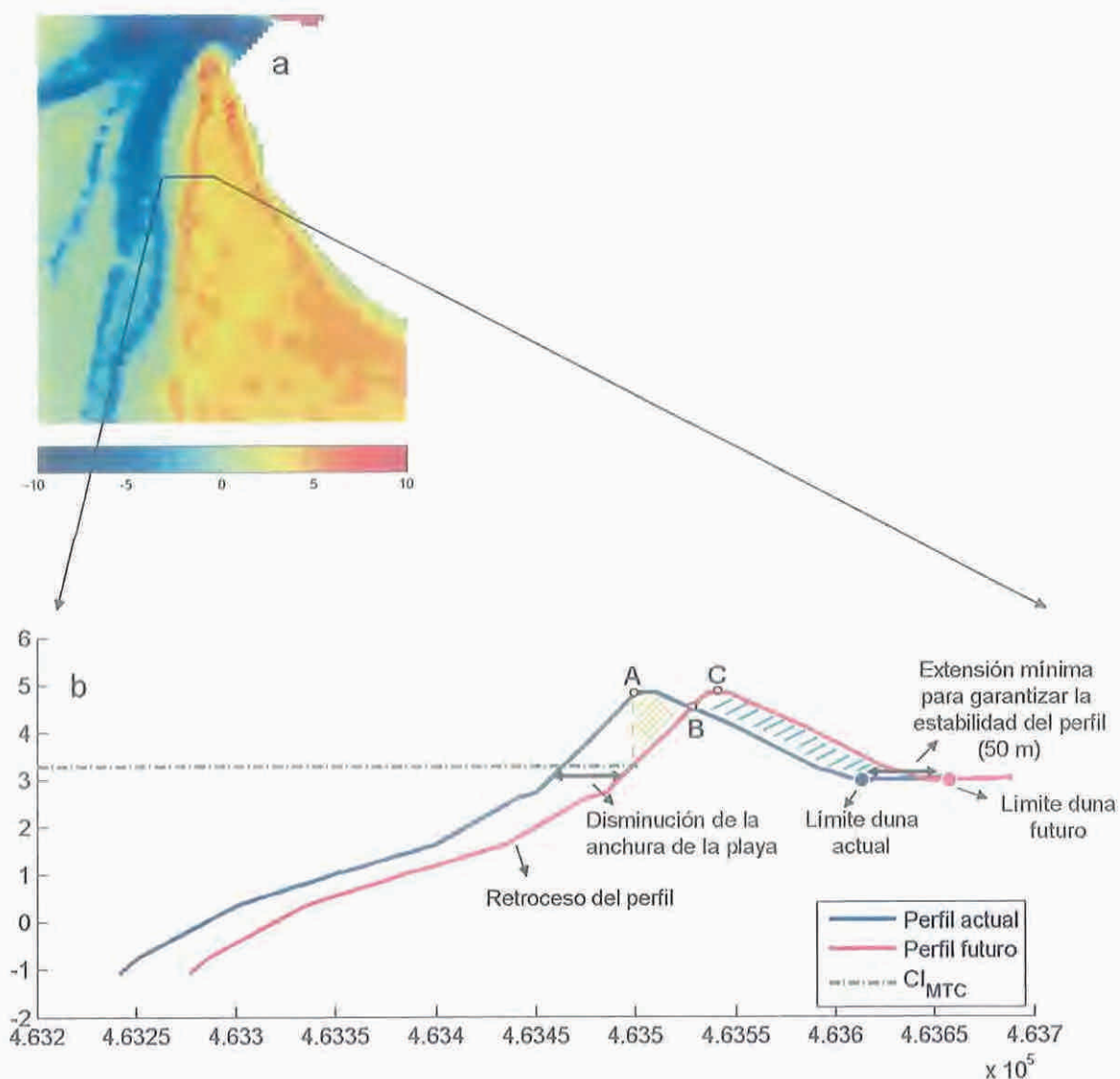


Figura 6.1. Ejemplo de un perfil transversal en la playa del Regatón. En azul se muestra la situación actual y en rojo el perfil medio previsible en el futuro. La línea verde discontinua representa la cota de inundación correspondiente a los máximos temporales conocidos (CI_{MTC}).

Los cambios experimentados por la playa para adaptarse a las nuevas condiciones de equilibrio se pueden describir en tres fases:

1. Fase 1: debido a la recuperación de las concesiones, el perfil de playa retrocederá como mínimo unos 25-35 m y en término medio 50 m. De esta forma, la inundación socavarán y erosionará el frente del cordón dunar originando un escarpe pronunciado desde el punto más alto de la duna (punto A en la figura 6.1).
2. Fase 2: el efecto del viento y del oleaje erosionarán y suavizarán el escarpe inicial (zona sombreada de amarillo en la figura 6.1). Como resultado de esta erosión la cota de la duna disminuirá (punto B en la figura 6.1).
3. Fase 3: posteriormente, el viento transportará el sedimento y la duna alcanzará un nuevo equilibrio (zona sombreada en azul claro y punto C de la figura 6.1).

Por lo tanto, la forma media del frente dunar existente actualmente retrocederá unos 50 m si se recuperan las concesiones en el estuario de Santoña. Es importante destacar que el perfil medio variará ante eventos extremos de inundación, y que por lo tanto, el retroceso del perfil puede ser mayor, puntualmente, en respuesta a dichos eventos. Para permitir este retroceso y garantizar la estabilidad de la playa se necesita como mínimo 50 m a partir del trasdós del sistema dunar actual.

En la figura 6.2 se presenta un mapa de la playa del Regatón en el que se muestra la línea que une los puntos del trasdós del primer cordón dunar futuro. En la misma figura se muestran, a modo de ejemplo, algunos de los perfiles transversales analizados (línea azul) para establecer esta posición, destacando el trasdós del primer cordón dunar actual (puntos rojos).

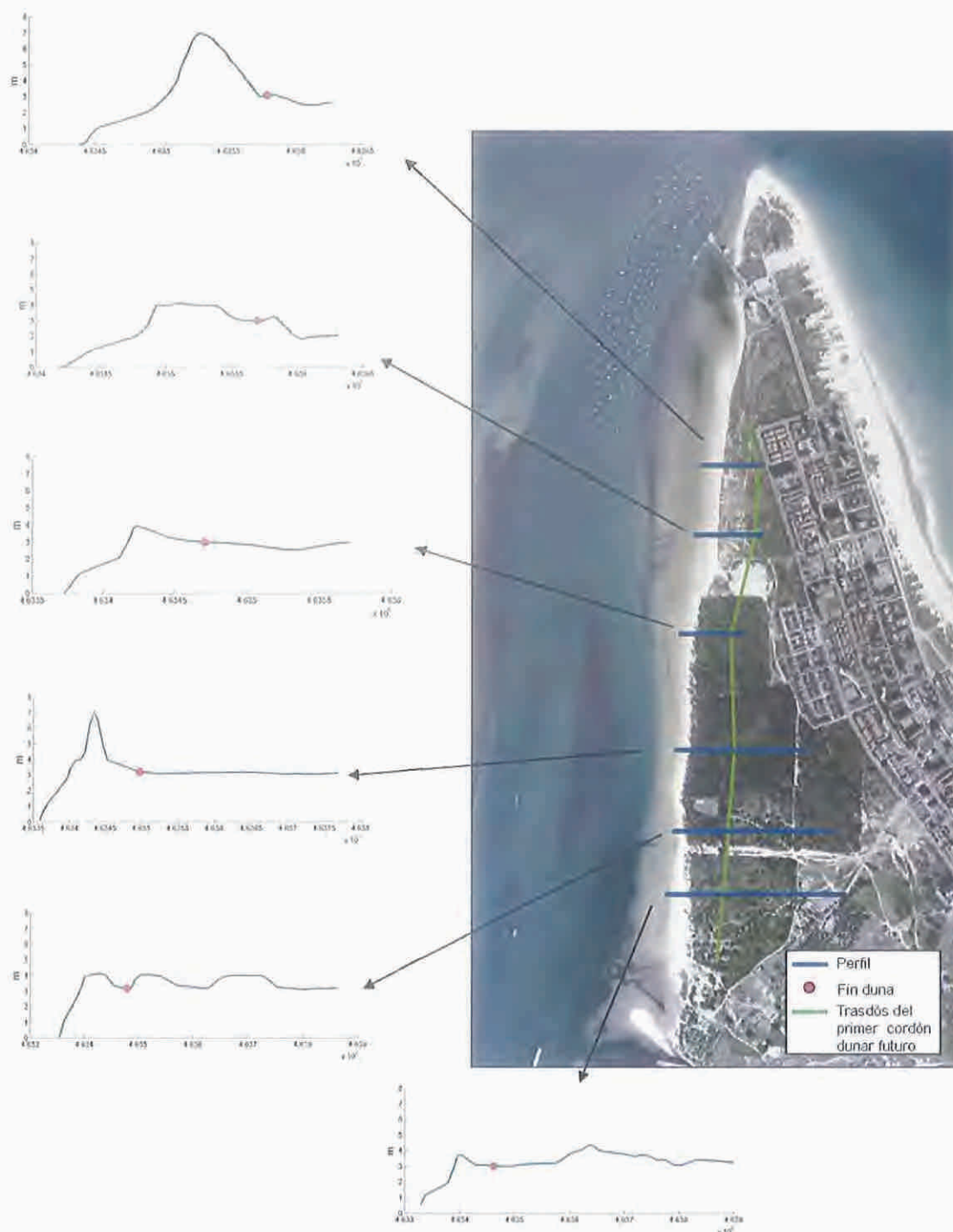


Figura 6.2. Localización del trasdós del primer cordón dunar futuro (línea verde). Los gráficos representan perfiles transversales a la playa del Regatón. La posición de la línea verde ha sido calculada retranqueando 50 m el trasdós del primer cordón dunar actual (puntos rojos).



Capítulo 7

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

El objetivo general de este estudio ha consistido en determinar la estabilidad de la playa del Regatón, teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos que se producirán en esta zona debido a la prevista recuperación de antiguas concesiones en el estuario de Santoña y a la cota de inundación.

En este capítulo se recogen las principales conclusiones extraídas del estudio.

7.1 Cálculo de la cota de inundación actual

- La variación del nivel del mar debido al efecto del oleaje, tanto del oleaje exterior como del oleaje generado localmente por viento, puede considerarse despreciable.
- Las aportaciones fluviales son despreciables en cuanto a variación de la cota del nivel del mar en la playa del Regatón. En condiciones de avenida, los niveles en la playa del Regatón no se ven afectados.
- El efecto del viento en el nivel del mar de la playa del Regatón, puede ser despreciado frente a la contribución de la marea astronómica.
- Por lo tanto, del análisis de las diferentes dinámicas que afectan el régimen de niveles se concluye que las más relevantes son:
 - La marea astronómica.
 - La marea meteorológica.
- En lo que se refiere a la marea astronómica, del análisis hidrodinámico realizado se concluye:
 - Al propagarse la onda de marea por el interior del estuario hasta la playa del Regatón, no sufre deformación.
 - De este modo, las cotas de pleamar en la playa del Regatón son iguales a las exteriores.
- La onda de marea astronómica y meteorológica no se deforma, con respecto a la marea en el exterior, al propagarse hasta la playa del Regatón, por lo que su efecto se puede analizar de forma lineal.
- El régimen extremal de la cota de inundación en la playa del Regatón, proporciona un nivel del mar de 3,20, 3,27, 3,29 y 3,31 m respecto al NMMA para un período de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente.
- La cota de inundación teórica calculada con los máximos temporales conocidos es de 3,20 m respecto al NMMA.

- Estos valores pueden aumentar si se cumplen las previsiones de ascenso del nivel del mar estimado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), que considera un aumento del nivel medio del mar de 15 cm para el horizonte del año 2050.

7.2 Estabilidad de la playa del Regatón teniendo en cuenta los cambios morfodinámicos originados por la recuperación de concensiones y la cota de inundación

Con respecto al análisis de la estabilidad de la playa del Regatón, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los principales cambios morfodinámicos previstos para el estuario de Santoña se pueden resumir en tres: incremento de la anchura de la desembocadura, del volumen de los canales mareales y del volumen del bajo exterior.
- Estos cambios no modificarán la importancia de las dinámicas actuantes. La sobreelevación por viento y la influencia del caudal fluvial en el nivel de marea seguirán siendo despreciables, por lo que la cota de inundación continuará estando dominada por la marea astronómica y meteorológica y por el ascenso del nivel medio del mar de largo periodo.
- El efecto originado por la recuperación de las concesiones está asociado al aumento del volumen de los canales mareales, especialmente el de la ría de Treto.
- Para adaptarse al nuevo prisma de marea los canales se erosionarán, modificando sus contornos (profundidad y anchura) y afectando a la playa del Regatón. En término medio se puede estimar que la anchura del canal se incrementará entre 50-70 m y la profundidad entre 0.10 y 0.50 m. Por lo tanto, la playa del Regatón se retranqueará como mínimo 25-35 m si se asume que el aumento de anchura se repartirá simétricamente a ambos lados del canal, y como máximo 50-70 m, si se considera que toda la erosión se produce sobre la playa del Regatón.
- Como consecuencia, el primer cordón de dunas se erosionará y la playa quedará más expuesta a los eventos de inundación.
- Para mantener la estabilidad de la playa y permitir el movimiento del cordón dunar, la forma media del frente dunar existente actualmente retrocederá unos 50 m cuando se lleve a cabo la restauración de las marismas (ver figuras 6.1 y 6.2).
- En la figura 7.1 se muestra el mapa de cota de inundación teórica para el máximo temporal conocido, ocurrido el día 24/12/1995, y la línea que une los puntos del trasdós del primer cordón dunar futuro.

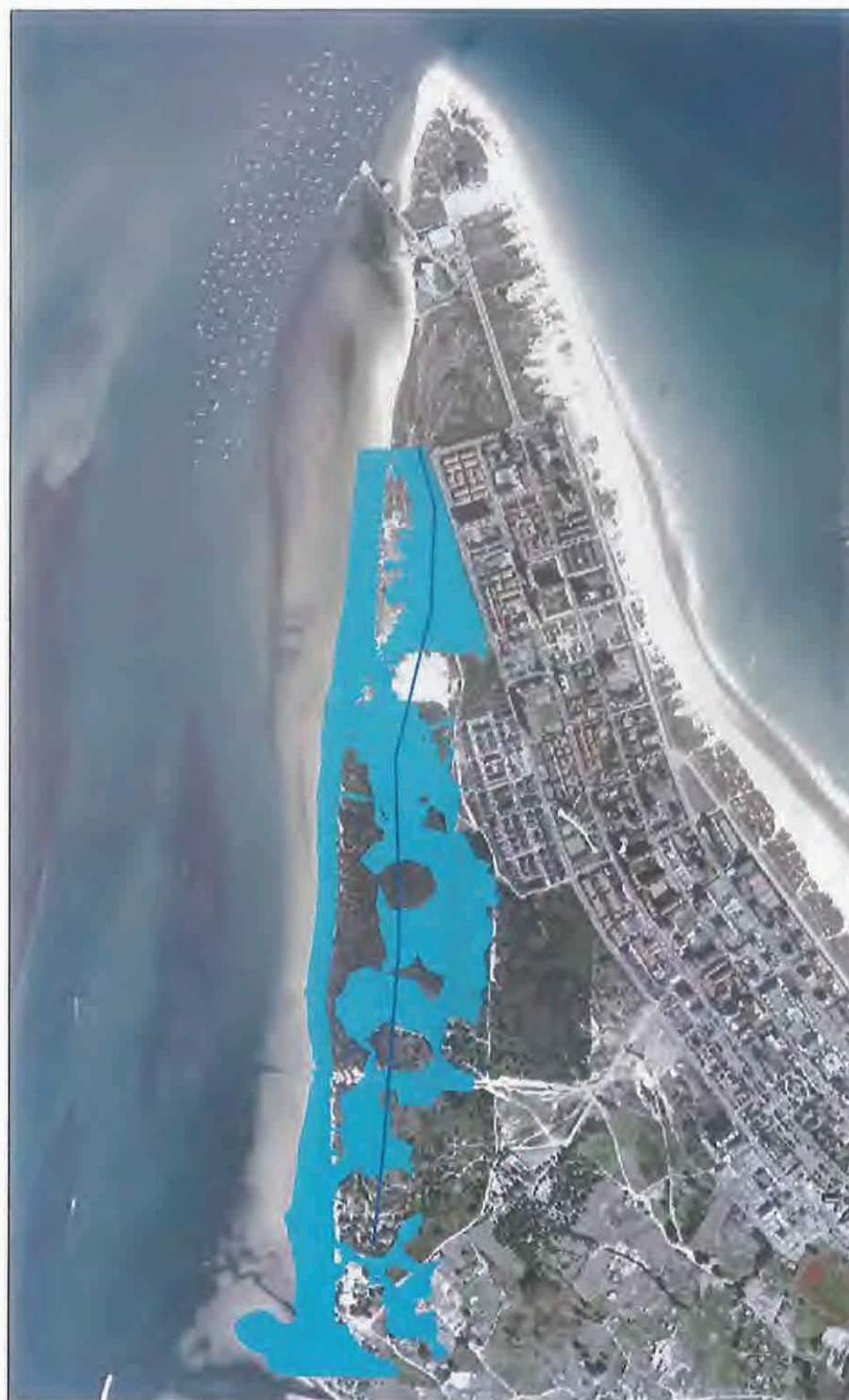


Figura 7.1. Cota de inundación teórica para el máximo temporal conocido (azul claro), ocurrido el día 24/12/1995, y línea que une los puntos del trasdós del primer cordón dunar futuro (línea azul oscuro).



Capítulo 8

REFERENCIAS

8. REFERENCIAS

Behrendt, L., 1985. *A Finite Element Model for Water Wave Diffraction Including Boundary Absorption and Bottom Friction*, Series Paper 37, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engrg., Technical Univ. of Denmark.

Berkhoff, J.C.W., 1972. *Computation of Combined Refraction - Diffraction*, Proc. 13th International Coastal Engineering Conference, 741-790.

CERC, 1984. *Shore Protection Manual*, Vol. I., 4th edition, US. Army Coastal Engineering Research Center.

Dongeren, A. van, 1992. *A model of the morphological behaviour and stability of channels and flats in tidal basins*. M. SC. Thesis, report H 824.55, Delft University of Technology/DELFT HYDRAULICS.

Eysink, W.D., 1990. *Morphologic response of tidal basins to changes*. Proceedings 22nd International Conference on Coastal Engineering, Delft.

Eysink, W.D., 1991. *Simple morphologic relationships for estuaries and tidal channels - handy tools for engineering*. Proceedings of International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, (2), 1003-1013.

Fisher, R.A., y L.H.C. Tippett, 1928. *Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample*. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 24, 180-190.

FLTQ, 1995. *Estudio hidrodinámico y biológico de las marismas de Santoña*.

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, 2007. *Estudio de los recursos hídricos de los ríos de la vertiente norte de Cantabria*.

O'Brien, M.P., 1969. *Equilibrium flow areas of inlets in sandy coasts*. J. Waterw. Harbors Coastal Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 95, 43-52.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S., 2002. *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE*, Computers and Geosciences, 28, 929-937.

Renger, E., y Partenscky, H.W., 1974. *"Stability criteria for tidal basins"*. Proc. 14th Coastal Engineering Conference, ASCE vol. 2, pp. 1605-1618.

Walton, T.L., Adams, W.D., 1976. *"Capacity of inlet outer bars to store sand"*. Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, New York, pp. 1919-1937.