

# Documento temático



Regeneración de playas



Ministerio de Medio Ambiente  
Dirección General de Costas

Universidad de Cantabria **UC**

**G.I.O.C.**  
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas



**DOCUMENTO TEMÁTICO**  
**REGENERACIÓN DE PLAYAS**

SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN

SECCIÓN II. CONCEPTOS PREVIOS, DINÁMICAS Y PROCESOS LITORALES

SECCIÓN III. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO Y CÁLCULO

SECCIÓN IV. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LOS PROYECTOS DE  
REGENERACIÓN DE PLAYAS

SECCIÓN V. IMPACTO AMBIENTAL

ANEJOS

ANEJO I. NOMENCLATURA

ANEJO II. FORMULACIONES

## SECCIÓN I.

### INTRODUCCIÓN

## **Sección I. Introducción**

I.	INTRODUCCIÓN .....	I.2
I.1	Proceso de planeamiento, diseño y ejecución de una regeneración de playa.....	I.2
I.2	Objetivos y alcance del documento .....	I.5
I.2.1	Marco del presente documento.....	I.5
I.2.2	Alcance del documento .....	I.6
I.2.3	Estructura del documento .....	I.8





## I. INTRODUCCIÓN

### I.1 Proceso de planeamiento, diseño y ejecución de una regeneración de playa

Antes de comenzar con el desarrollo del documento propiamente dicho, es conveniente revisar, aunque sea de modo somero, los diferentes aspectos técnicos, sociales, económicos y medioambientales que confluyen en cualquier obra de ingeniería de costas y, en particular, en una regeneración de playa. Estos aspectos se recogen, de manera esquemática, en el cuadro I.1 en el que deliberadamente se ha separado la labor que ha de realizar el equipo gestor de lo que ha de realizar el equipo técnico.

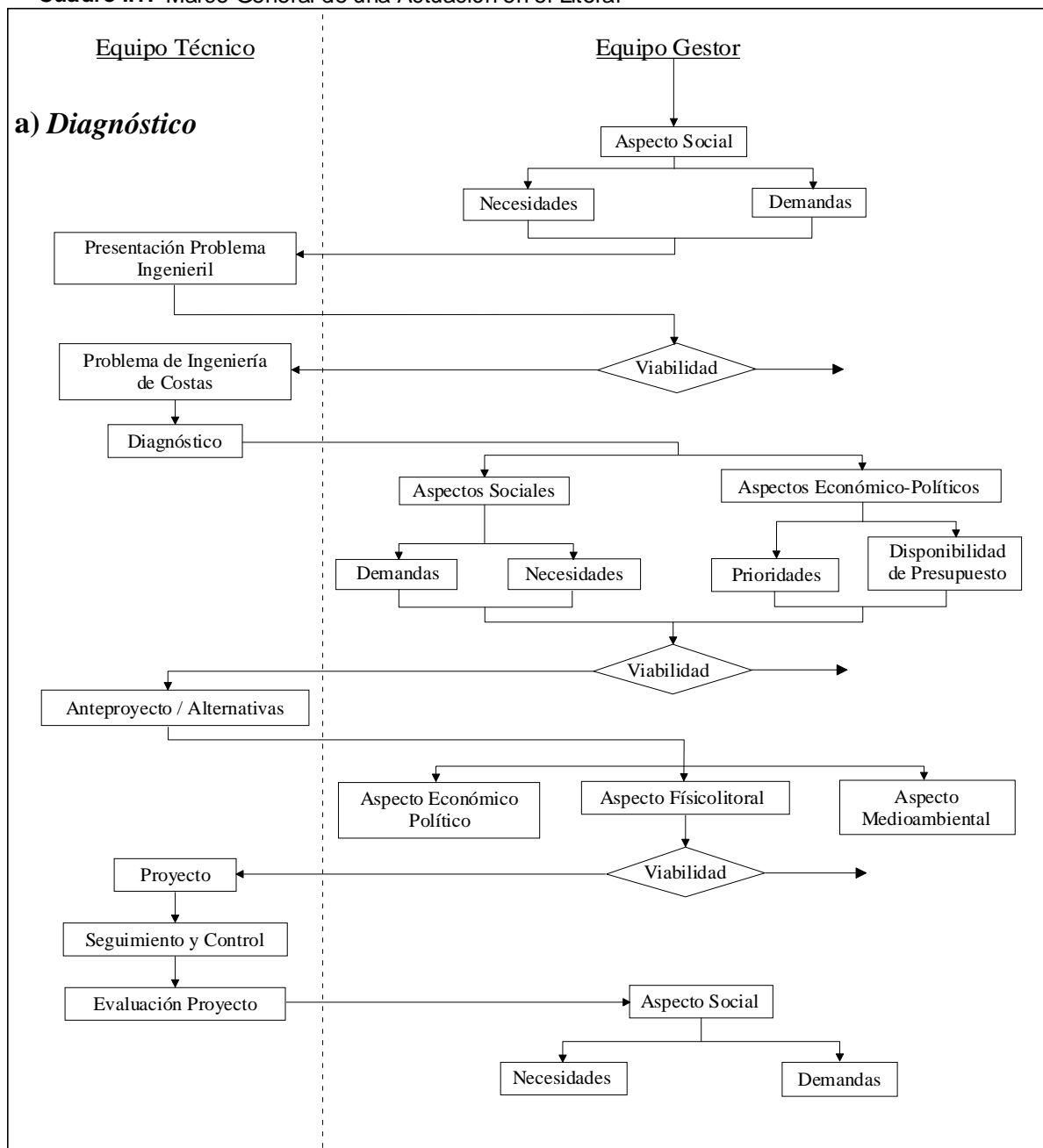
Toda actuación en la costa comienza cuando el gestor, consciente de las necesidades y/o las demandas sociales, realiza una presentación inicial del problema al equipo técnico. A partir de este momento se inician una serie de pasos en los que sucesivamente se irá concretando la actuación a realizar. En cada uno de estos pasos, el técnico aporta al gestor la información relativa al problema ingenieril para que éste, de acuerdo con otras condiciones tales como demandas y necesidades sociales, prioridades políticas, disponibilidad económica, aspectos estratégicos, ..., decida sobre la conveniencia de continuar el proceso de definición de la actuación.

En la labor del equipo técnico se pueden distinguir las siguientes fases:

- a) Diagnóstico.
- b) Anteproyecto (prediseño).
- c) Proyecto (diseño).
- d) Seguimiento y evaluación del proyecto.

#### ***a) Diagnóstico***

La fase de diagnóstico tiene como objetivo la determinación de las causas

**Cuadro I.1.** Marco General de una Actuación en el Litoral



que han originado el estado actual de una playa. Esta fase es de extrema importancia y en ella se pone de manifiesto la capacidad del equipo técnico de entender y evaluar los procesos costeros que han dado lugar a dicha situación. Si el diagnóstico realizado no es correcto difícilmente lo será la actuación propuesta.

#### **b) Anteproyecto (*prediseño*)**

La fase de anteproyecto o prediseño tiene como objetivo el establecimiento de una serie de alternativas de solución. En esta fase, se prima la obtención de un número elevado de alternativas a costa de una menor precisión en la definición de la solución, dado que el fin último es que el gestor pueda comparar las alternativas y, de acuerdo con otros condicionantes, elegir la que ha de erigirse como solución-proyecto.

#### **c) Proyecto (*diseño*)**

La fase de proyecto o diseño tiene como objetivo el cálculo detallado de la alternativa que ha sido seleccionada como alternativa solución. Este cálculo detallado suele llevar parejo la utilización de herramientas o modelos de cálculo sofisticados que requieren de un mayor número de datos de partida.

#### **d) Seguimiento y evaluación del proyecto**

La fase de seguimiento y evaluación del proyecto tiene como objetivo la verificación de que la actuación evoluciona de acuerdo con lo previsto en el diseño. Esta fase es necesaria dado que toda obra marítima está sujeta a la acción de dinámicas aleatorias (oleaje, viento, ...) por lo que siempre existe un determinado riesgo de que la actuación evolucione con una cierta variación respecto a la evolución prevista.

Estas cuatro fases son objeto de análisis del presente documento, que se centra en el establecimiento de las metodologías, así como en el desarrollo de las herramientas, que permitan al equipo técnico abordar las fases anteriormente citadas.





No será objeto del mismo las actividades propias del gestor tales como valoración de aspectos sociales, socio-económicas, ... que pueden ser encontradas en otras publicaciones específicas (por ejemplo *Beach Management manual* CIRIA report - 153) .

## I.2 Objetivos y alcance del documento

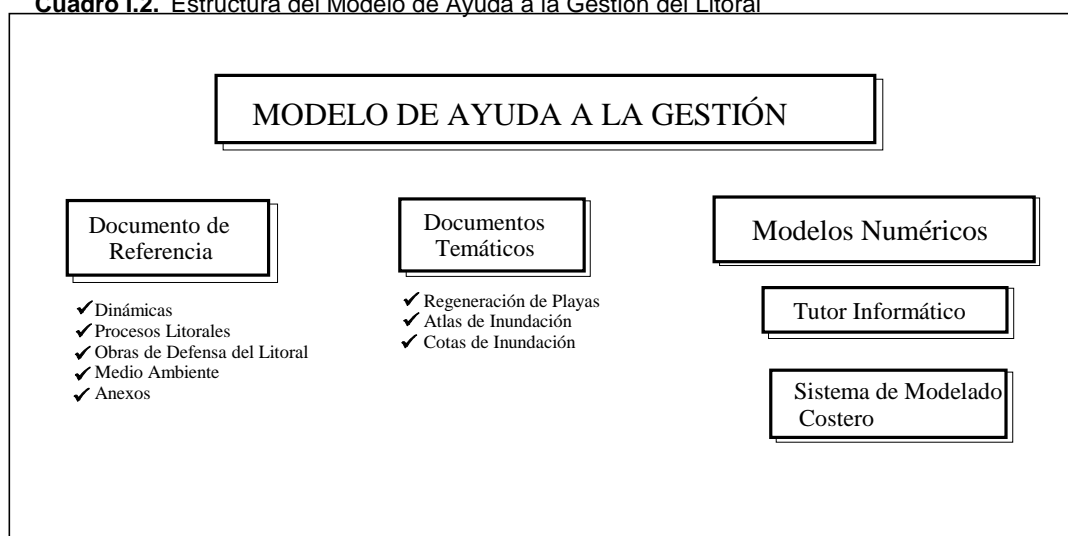
### I.2.1 Marco del presente documento

El presente documento forma parte de un conjunto de textos y modelos numéricos, denominados genéricamente *Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral*, que han sido desarrollados con el objetivo de:

- Evaluar con precisión la dinámica de los sistemas costeros.
- Diseñar con fiabilidad las estrategias de actuación necesarias.
- Establecer una metodología para el diseño, ejecución y seguimiento de las actuaciones a realizar en la costa.
- Recopilar la experiencia española en el campo de la Ingeniería Litoral.

La estructura y objetivos particulares de dichos textos y modelos es la siguiente, ver cuadro I.2:

**Cuadro I.2.** Estructura del Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral





- *Documento de Referencia*

El objetivo del Documento de Referencia es desarrollar los fundamentos teóricos que se utilizan en los Documentos Temáticos.

- *Documentos Temáticos*

El objetivo de los Documentos Temáticos es desarrollar la metodología de diseño de las diversas actuaciones en la costa.

- *Modelos Numéricos*

El objetivo de los Modelos Numéricos es doble:

- Facilitar la aplicación de la información del Documento de Referencia en soporte informático (Tutor Informático de Costas, TIC).
- Ofrecer un paquete de programas numéricos que permitan la correcta utilización de la metodología propuesta en los Documentos Temáticos (Sistema de Modelado Costero, SMC).

### **I.2.2 Alcance del documento**

El presente Documento Temático de Regeneración de Playas tiene, como ya se ha comentado, el objetivo específico de desarrollar la metodología y herramientas que permita realizar con fiabilidad todas las fases de estudio técnico de una regeneración de playa: Diagnóstico, Prediseño, Diseño y Seguimiento y evaluación de la obra.

Si bien el objetivo último del documento está perfectamente establecido, el volumen de información actualmente existente en el campo de ingeniería litoral hace necesario fijar unos criterios previos específicos que permitan decidir cuál es la información estrictamente necesaria para alcanzar los objetivos planteados. A continuación se detallan los criterios establecidos en lo referente a: Destinatario, Contenidos y Ámbito de aplicación:

**a) Destinatario**

El documento va dirigido a Ingenieros Técnicos y Superiores que desarrollan su actividad en el diseño, construcción, mantenimiento y seguimiento de playas.

**b) Contenidos**

El documento tiene un marcado carácter de “manual”, predominando los aspectos metodológicos y la descripción de las herramientas y procedimientos a utilizar frente al desarrollo de aspectos teóricos o comparación de herramientas y formulaciones existentes. Así, por ejemplo, el documento describirá la formulación de transporte de sedimentos o de perfil de playa a utilizar en función de las características de la playa, pero no realizará una descripción de todas las formulaciones existentes o una comparación entre las mismas. Este tipo de análisis puede ser encontrado, no obstante, en el documento de referencia.

Por otro lado, en la selección de formulaciones se ha tenido en cuenta el tipo de uso y usuario del presente documento, recogiendo los últimos avances en el tema, pero sin incluir formulaciones de carácter académico o en estado de investigación.

Es importante señalar que el documento aborda aspectos medioambientales y sociales, pero siempre desde la óptica de la ingeniería litoral (por ejemplo, impacto ambiental, criterios de calidad de uso de las playas, ...).

**c) Ámbito**

El ámbito de interés del documento se centra en las playas de materiales sueltos (arena, gravas) ubicadas en zonas abiertas en las que el oleaje es la dinámica predominante.



### I.2.3 Estructura del documento

El documento se ha organizado, dentro de lo posible, intentando agrupar los elementos metodológicos comunes que existen en las diferentes fases de estudio técnico de una regeneración de playa, esto es:

- Diagnóstico.
- Prediseño.
- Diseño.
- Seguimiento y evaluación.

De este modo se han redactado tres secciones diferenciadas:

- Sección III, Criterios generales de diseño y cálculo
- Sección IV, Seguimiento y evaluación del proyecto
- Sección V, Impacto ambiental

que se complementan con una Sección II dedicada a revisar los conceptos previos que se asumen como conocidos por el lector.

La Sección III, Criterios generales de diseño y cálculo, recoge los aspectos conceptuales y metodológicos que han de usarse tanto en el diagnóstico como en el prediseño y diseño de la regeneración, a excepción de los aspectos ambientales que, por motivos de exposición, son presentados en la Sección V.

Esta organización se fundamenta en el hecho de que tanto el diagnóstico como el prediseño o el diseño tienen un objetivo común: el conocimiento de la morfodinámica actual de la playa y de la evolución de la misma, diferenciándose, fundamentalmente, por el ámbito temporal y el nivel de estudio.

Así, el diagnóstico, tiene un carácter de “pasado” buscando las causas que han originado el estado actual de una playa (aunque también puede tener una componente de “a futuro” dándonos a conocer que pasará si no se actúa). El diseño y prediseño se centran en la evolución futura de una determinada actuación (en la que se puede incluir la opción de no actuar). En cualquier caso, la metodología de análisis es la misma, por lo que será presentada de manera única. En la Sección III se distinguirán, no obstante, las diferentes formulaciones que pueden utilizarse en



los estudios de prediseño y/o diseño.

La Sección IV está claramente relacionada con la fase de seguimiento de la obra en la que se persigue determinar la bondad de las predicciones sobre la evolución de la playa y, en su caso, corregir las predicciones de comportamiento y mejorar las herramientas de predicción.

La Sección V recoge los aspectos ambientales que han de ser tenidos en cuenta a lo largo de las diferentes fases de estudio y ejecución de la obra.

Por último señalar que el diagnóstico requiere de datos históricos (construcciones, oleaje, ...), mientras que la selección y definición de alternativas necesita una predicción de eventos futuros de la dinámica actuante, aspectos estos que serán tratados con detalle en la Sección III.

## **SECCIÓN II.**

### **CONCEPTOS PREVIOS, DINÁMICAS Y PROCESOS LITORALES**

---

## **Sección II. Conceptos Previos, Dinámicas y Procesos Litorales**

II.	CONCEPTOS PREVIOS, DINÁMICAS Y PROCESOS LITORALES .....	II.2
II.1	Introducción.....	II.2
II.2	Conceptos previos .....	II.2
II.3	Dinámicas (Volumen I, Documento de Referencia) .....	II.3
II.4	Procesos litorales (Volumen II, Documento de Referencia) .....	II.6

## **II. CONCEPTOS PREVIOS, DINÁMICAS Y PROCESOS LITORALES**

### **II.1 Introducción**

Tal y como se ha comentado en la Sección I, el objetivo de dotar al lector de un texto prioritariamente metodológico y práctico da como resultado que un gran número de aspectos teóricos, de indudable importancia, no sean analizados, puesto que, de hacerlo, el documento tendría una extensión tal que a buen seguro perdería su carácter práctico y, posiblemente, el hilo conductor metodológico.

Estos aspectos teóricos se han recogido en un documento aparte (Documento de Referencia) y se asume que el usuario del presente documento es conocedor de los mismos. Al objeto de que el lector pueda decidir sobre la necesidad de una revisión de dichos aspectos teóricos antes de proceder al uso de las formulaciones presentadas en este documento, en lo que sigue se realiza una somera revisión a las acciones y procesos costeros más relevantes en las playas con indicación del capítulo del Documento de Referencia en el que pueden ser encontrados.

### **II.2 Conceptos previos**

La descripción de los procesos costeros requiere la utilización de una nomenclatura y terminología específica que defina correctamente la morfología y/o la dinámica objeto de interés. Lamentablemente, la mayor parte de la terminología utilizada proviene de la lengua inglesa, no existiendo en lengua castellana traducción para muchos de esos términos. En el Anejo I del presente documento se recoge la nomenclatura inglesa y castellana de los términos relativos a morfología litoral y procesos costeros más importantes.

Por otro lado, es importante que el lector conozca aspectos relacionados con los sedimentos que usualmente forman las playas. Algunos de estos aspectos, como son los relativos a sus propiedades químicas, condicionan procesos tan importantes como la cementación de arenas por sobresaturación de carbonatos. Otros, como sus propiedades físicas (por ejemplo, distribución granulométrica, velocidad de caída, ...) juegan un papel relevante en el transporte de sedimentos existente en las playas.





## II.3 Dinámicas (Volumen I, Documento de Referencia)

Las playas se encuentran sometidas a la acción de un gran número de dinámicas tanto marinas (por ejemplo, marea, ondas infragravitatorias, ...) como atmosféricas (por ejemplo viento, presión, ..). Cada uno de ellos tiene su propia escala espacial y temporal de actuación y genera una respuesta en la playa en dichas escalas de variabilidad.

### *Oleaje*

El oleaje es, en lo que a este documento se refiere, la dinámica más importante en la estabilidad y evolución de una playa. La génesis del oleaje se debe a la acción del viento sobre la superficie del mar, estando las características del mismo (altura, periodo, forma espectral, ...) íntimamente ligados a aspectos tales como la magnitud del viento, la duración del mismo, la distancia de actuación o la distancia entre la zona de regeneración y la playa. La naturaleza aleatoria del viento y el mecanismo de generación y propagación del oleaje da como resultado que el oleaje sea, a su vez, un fenómeno aleatorio. La complejidad que supone el estudio del mismo desde un punto de vista probabilístico ha dado lugar a que históricamente el oleaje haya sido estudiado por ondas que permiten soluciones analíticas a un gran conjunto de fenómenos observables en el oleaje.

Existen diversas teorías de ondas lineal, Stokes, Boussinesq, ... que pueden ser utilizadas para representar la acción del oleaje. El uso de una u otra teoría de ondas viene condicionado por el parámetro de Ursell que relaciona la altura de ola, la profundidad y la longitud de la onda.

La teoría de ondas permite analizar los fenómenos de transformación del oleaje en su propagación desde aguas profundas hasta la playa. Estos fenómenos de propagación incluyen el asomeramiento, la refracción, la difracción, la reflexión y la rotura. Los cuatro primeros condicionan el flujo de energía que recibe la playa tanto en magnitud como en dirección, siendo de vital importancia su correcta determinación. En ese sentido cabe resaltar que, si bien existen diversas soluciones analíticas para casos de geometrías simples (ver TIC), el estudio de la propagación del oleaje en playas reales debe ser realizado por medio de modelos numéricos que resuelven los fenómenos anteriormente citados, de acuerdo con alguna teoría de ondas.

La rotura determina el modo en el que el oleaje es disipado y transformado en

turbulencia, lo cual da lugar a la generación de corrientes y a la variación del nivel medio del mar en la zona de rompientes, que a su vez son el principal motor de los cambios que acontecen en la morfología de las playas.

En la última década se ha producido un notable avance en la descripción espectral de oleaje y en la caracterización espectral de los fenómenos de propagación del mismo basado tanto en los avances teóricos del tema, como en la mayor capacidad de medida del oleaje y, en la potencia de cálculo de los ordenadores. Este avance ha permitido la incorporación de este tipo de formulación en ámbitos ingenieriles.



**OLEAJE ROMPIENDO EN UN PASEO MARÍTIMO EN SANTANDER**

Por último señalar que la naturaleza aleatoria del oleaje da como resultado una incertidumbre respecto a las características (altura, dirección, periodo, forma espectral, ...) futuras del oleaje y una necesidad de un tratamiento estadístico del problema. Este tratamiento estadístico es usualmente dividido en dos, uno relativo a estadística de corto plazo o regímenes medios y otro relativo a estadística de largo plazo o regímenes extremos. Ambos serán utilizados en este documento.



### *Marea*

La acción de la marea se manifiesta en dos aspectos bien diferenciados: un cambio en el nivel del mar y generación de corrientes.

El cambio de nivel del mar debido a la acción de la marea astronómica tiene importantes consecuencias en la morfología de las playas por cuanto modifica sustancialmente la propagación del oleaje (asomeramiento, refracción, ... y muy particularmente la zona de rotura) al variar continuamente la batimetría de la misma. Este hecho da como resultado que los perfiles de playa en mares con marea y los estados morfodinámicos en dichas playas sean diferentes que en mares sin marea.

A los cambios de nivel originados por la marea astronómica hay que añadir los generados por la dinámica atmosférica, tanto por la acción del viento como por la acción de la presión atmosférica. Esta sobreelevación añadida, conocida como marea meteorológica, tiene un carácter aleatorio debido a la propia naturaleza de los fenómenos que la generan y su estudio debe realizarse en términos probabilísticos.



**ZONA INTERMAREAL DE LA PLAYA DE BERRIA, CANTABRIA**

Las corrientes de marea son, en general, despreciadas en la zona de

rompientes debido a su escasa magnitud en relación con las corrientes generadas por la rotura del oleaje. Esta circunstancia no es aplicable, sin embargo, a playas próximas a desembocaduras de rías y estuarios, donde las corrientes de marea son preponderantes. En estas zonas se establece un equilibrio entre las dinámicas del oleaje y la dinámica mareal que da lugar a una morfología muy particular en las playas, con formación de grandes bajos mareales en la zona de bajamar.

### *Dinámicas en zona de rompientes*

La zona de rompientes constituye el ámbito espacial de mayor interés en lo que a estabilidad y evolución de una playa se refiere. En esta zona, la rotura del oleaje pone en suspensión gran cantidad de sedimento que, de este modo, es susceptible de ser transportado por las corrientes existentes. Las corrientes más importantes de la zona de rompientes son las generadas por la propia rotura del oleaje tanto en sentido transversal (corrientes de resaca y de retorno) como en sentido longitudinal. Este tipo de corrientes pueden ser estudiadas hoy en día con un grado de aproximación elevado por medio de modelos numéricos.

Añadidas a estas corrientes se encuentra un conjunto de ondas y oscilaciones cuya importancia en la generación de formas características de playas, tales como barras, barras crescénticas, “cusps”... es hoy en día admitida. Estas ondas, entre las que se encuentran las ondas infragravitatorias, las ondas subarmónicas y las ondas de cizalla están siendo objeto de un importante esfuerzo científico, por lo que es previsible que en un breve plazo de tiempo se disponga de formulaciones y de datos suficientes para que puedan ser incluidas en el diseño de las obras de regeneración de playas. Hoy en día la importancia relativa de este tipo de oscilaciones puede ser inferida a través del análisis de los estados morfodinámicos de la playa.

## **II.4 Procesos litorales (Volumen II, Documento de Referencia)**

La acción de las dinámicas descritas en el apartado anterior sobre los sedimentos de una playa da lugar a un transporte de arena y, consecuentemente a una variación del fondo.

El estudio de este conjunto de acciones y respuestas, conocido usualmente

por el nombre de procesos litorales, ha de realizarse de un modo aproximado, puesto que hoy en día el estado actual de conocimientos no permite abordar el problema en toda su complejidad. Las aproximaciones existentes se basan en dos hipótesis de partida. La primera se refiere a la tridimensionalidad de los procesos litorales y admite que el estudio de los mismos puede efectuarse analizando por separado los procesos transversales (perfil de playa) y los procesos longitudinales (planta de la playa). La segunda es relativa a la escala temporal y espacial de los procesos y a la necesidad de utilizar formulaciones específicas en función de la escala de interés.



**PLAYA ENCAJADA DEL LITORAL GALLEGO. (LA MAROSA, LUGO)**

Una de las técnicas de análisis de los procesos a largo plazo es la búsqueda de la posición de equilibrio, o posición que adoptaría la playa si las dinámicas permanecieran constantes durante el tiempo suficiente. En el caso del perfil de playa el concepto de perfil de equilibrio es ampliamente utilizado en los estudios de estabilidad y evolución de playas, existiendo diversas formulaciones tendentes a describir dicho perfil de equilibrio. En el caso de forma en planta la existencia de

una forma de equilibrio estable exige que no exista una pérdida (o ganancia) neta de arena en la playa. Esta circunstancia es normalmente observable en playas encajadas para las que son aplicables diversas formulaciones de forma en planta en equilibrio.

Las playas no encajadas están sujetas a cambios de forma debido a la existencia de gradientes en el transporte longitudinal de sedimentos. Punto clave en cualquier estudio de playas es la correcta determinación de dicho transporte longitudinal pues es quién condiciona la evolución temporal de la misma. En la actualidad existen diversas formulaciones para la determinación del transporte longitudinal en playas que abarcan desde relaciones sencillas con el flujo de energía del oleaje hasta modelos que computan los diferentes tipos de transporte (suspensión, fondo, flujo de lámina) en la acción conjunta ola-corriente. Estas formulaciones pueden ser incluidas en modelos numéricos de una-línea o modelos de n-líneas para la determinación de la evolución a medio - largo plazo de la forma en planta de una playa.

Los procesos litorales de escalas de tiempo menor, tales como la erosión del perfil de playa ante un temporal, formación de barras, ..., requieren la utilización de formulaciones empíricas “*ad hoc*” o de modelos numéricos de evolución a corto plazo.

### **SECCIÓN III.**

## **CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO Y CÁLCULO**

### **Sección III. Criterios Generales de Diseño y Cálculo**

III. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO Y CÁLCULO .....	III.2
III.1 Introducción .....	III.2
III.2 Funciones de una playa y criterios de valoración .....	III.5
III.2.1 Introducción .....	III.5
III.2.2 Funciones de una playa .....	III.7
III.2.3 Criterios de valoración .....	III.11
III.3 Cálculo de estabilidad y evolución de una playa .....	III.19
III.3.1 Conceptos previos .....	III.20
III.3.2 Metodología de cálculo .....	III.23
III.3.3 Formulaciones de diseño y prediseño .....	III.24
III.3.4 Estrategias de uso de las formulaciones.....	III.47



## III. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO Y CÁLCULO

### III.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es doble:

- a) Establecer una metodología que permita el diseño de un proyecto de regeneración de una playa.
- b) Presentar las formulaciones de cálculo necesarias para la realización de dicho proyecto.

La metodología propuesta acepta, como punto de partida, los siguientes puntos (ver cuadro III.1.1):

- ***Entendimiento de los procesos costeros***

El éxito de un diseño de regeneración de playa depende de nuestra capacidad a la hora de entender las causas que originan el estado de erosión de la playa en estudio, así como de nuestra capacidad a la hora de evaluar los procesos costeros que han dado lugar a dicha situación. Cuanto menor sea nuestro entendimiento y nuestra capacidad de evaluación de dichos procesos, menor será nuestro acierto en la predicción de la evolución del relleno.

La metodología de diseño debe explicitar al máximo los procesos involucrados, obligando al proyectista al análisis de los mismos en las escalas espaciales y temporales en las que son relevantes. En este punto es importante señalar que no se pretende recoger en este manual todas las posibles condiciones y geometrías costeras, sino establecer una metodología que permita el análisis de todas ellas.

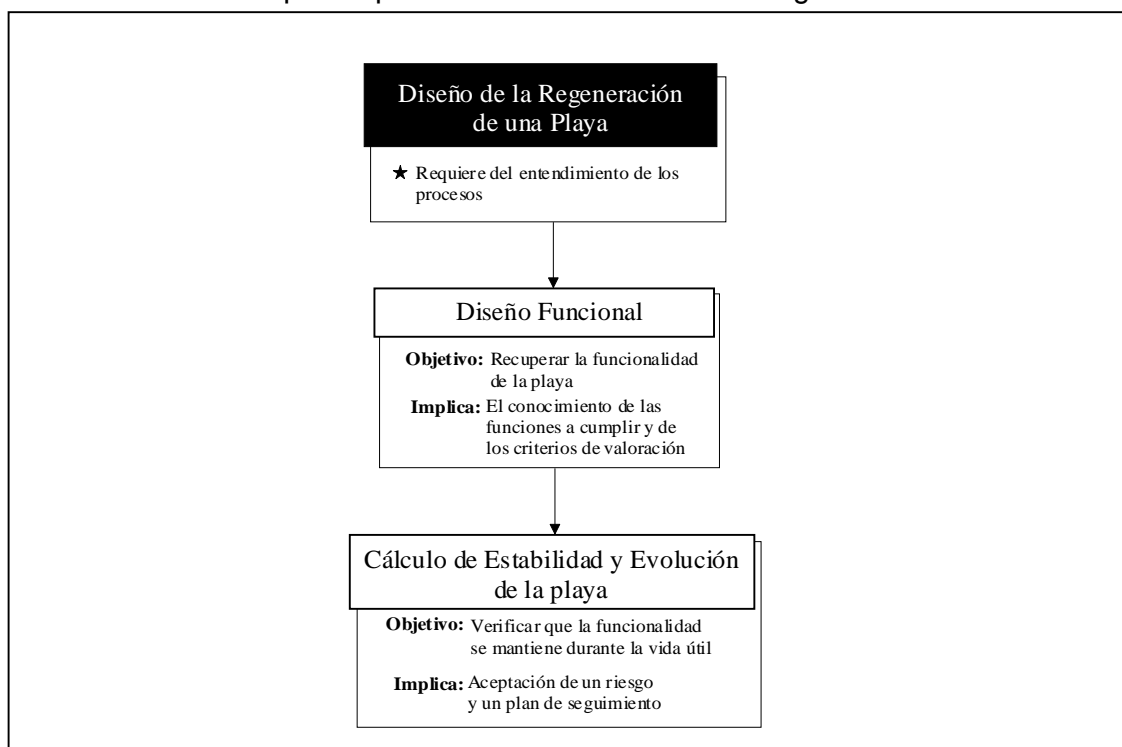
- ***Funciones de una playa***

Toda playa cumple, en mayor o menor medida, las siguientes funciones:

- Defensa de costa
- Hábitat de flora y fauna
- Uso lúdico humano

La necesidad de regeneración está siempre originada por la falta de cumplimiento de alguna de estas funciones, y el objetivo de la misma es el restablecimiento de dicha función, al menos durante un plazo de tiempo. El proyectista debe, por tanto, conocer dichas funciones, los parámetros que las gobiernan y realizar, previo a cualquier cálculo de estabilidad de la playa, un diseño funcional de la misma. Todos estos aspectos son desarrollados en el apartado III.2.

**Cuadro III.1.1.** Esquema preliminar de Diseño de una regeneración



- ***Cálculo de estabilidad de una playa***

Una vez que se ha realizado el diseño funcional de la playa, el proyectista debe garantizar que dicha funcionalidad se mantiene durante toda la vida útil de la obra. Esto requiere la realización del cálculo de la estabilidad del relleno y de su evolución en el tiempo, para lo cual se desarrolla una metodología en el apartado

### III.3.

Es importante señalar que el cálculo de la estabilidad de una playa conlleva la aceptación de un riesgo de fallo, entendiendo como tal cualquier variación entre la evolución prevista de la regeneración y la evolución real. Este riesgo tiene su origen en:

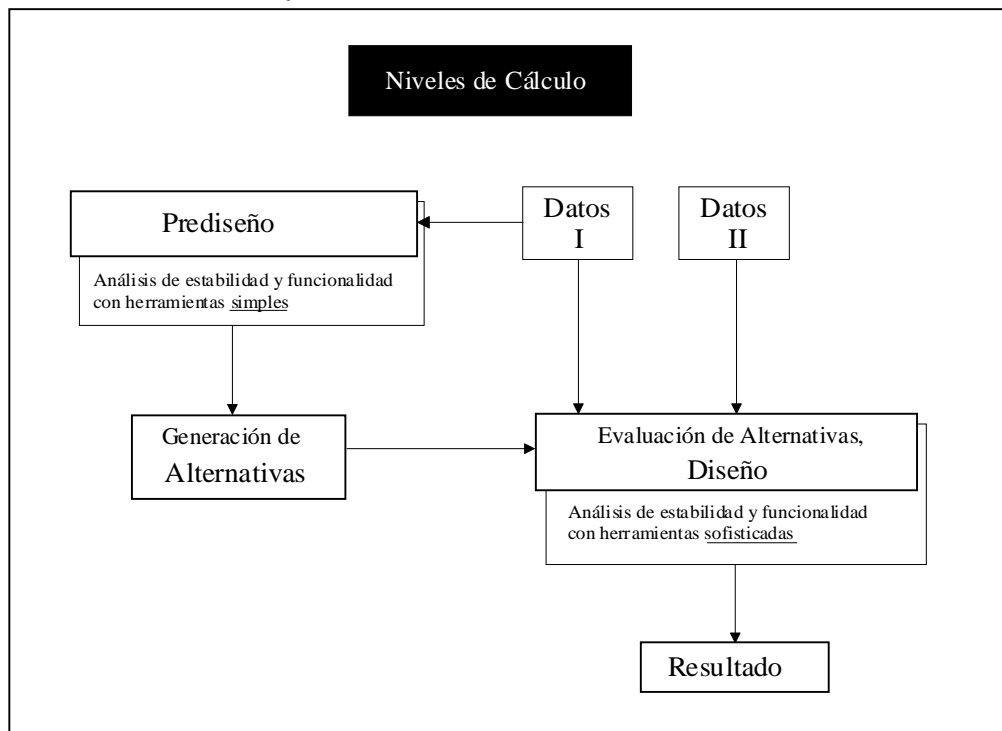
- El desconocimiento de todos los procesos involucrados.
- La validez de las hipótesis simplificativas realizadas en los cálculos.
- La naturaleza aleatoria de las dinámicas actuantes (oleaje, viento, presión, caudal fluvial,...).

Este riesgo de fallo conlleva la necesidad de:

- Un factor de resguardo de diseño.
- Un seguimiento de la obra y establecimiento de un plan de vigilancia y control.

- ***Niveles de cálculo: Prediseño y diseño***

El proceso de diseño de cualquier proyecto de ingeniería es siempre un proceso iterativo en el que se establece una serie de alternativas que son posteriormente evaluadas. Este tipo de aproximación a una solución definitiva requiere la existencia de una serie de métodos o modelos simples y rápidos que denominaremos de prediseño que permitan identificar las posibles alternativas de solución. Ver cuadro III.1.2. Posteriormente, modelos más sofisticados verificarán la bondad de un número limitado de alternativas. Nótese que el cálculo detallado exige un mayor coste temporal y económico, y suele ir ligado a unas mayores necesidades de datos de entrada no siempre disponibles. Surge entonces la necesidad de ponderar el alcance de estos métodos en función de la importancia de la obra (social o económica) dando lugar a diferentes niveles de estudio, en función de dicha importancia.

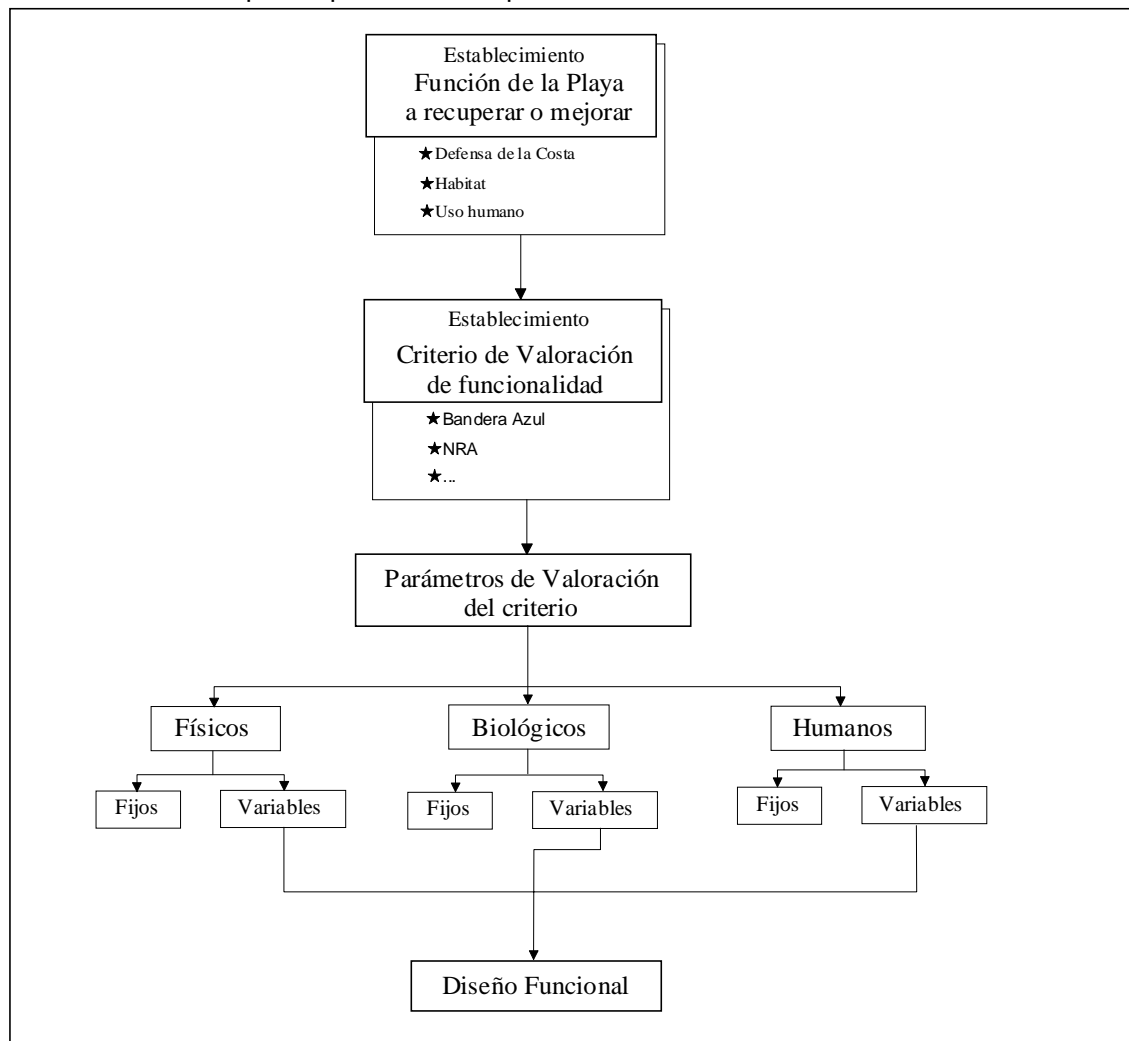
**Cuadro III.1.2.** Esquema de los diferentes niveles de cálculo

## III.2 Funciones de una playa y criterios de valoración

### III.2.1 Introducción

Las playas, como cualquier otro elemento del territorio, cumplen una serie de funciones naturales y son susceptibles de ser utilizada para un determinado número de usos humanos. Si el grado de cumplimiento de dichas funciones y usos no es el adecuado, de acuerdo con unos determinados criterios de valoración, la playa necesitará se regenerada.

El proyectista debe, por tanto, conocer: (ver cuadro III.2)

**Cuadro III.2.** Esquema preliminar del proceso de Diseño Funcional

- Cuáles son las funciones de una playa.
- Cuáles son los criterios que le permitirán valorar si la playa cumple o no sus funciones.
- Cuáles son los parámetros incluidos en los criterios de valoración que son susceptibles de modificación dentro del diseño de la regeneración.

En este apartado se analizan los puntos anteriores y, especialmente, el apartado c) relativo a los parámetros que el proyectista puede incluir en su diseño al objeto de mejorar la funcionalidad de una playa.

Antes de comenzar con el desarrollo del capítulo, es importante realizar una serie de consideraciones:

Los usos de una playa, al igual que los criterios de valoración del cumplimiento de dicho uso, varían con el tiempo, no siendo los mismos en la actualidad que hace un par de décadas. Es previsible que estos cambios de usos y criterios continúe.

Los criterios de valoración son, en cierta medida, subjetivos. Así por ejemplo, las condiciones óptimas de oleaje para baño no son las mismas para una persona que practica “*surf*” que para un niño que está aprendiendo a nadar. El proyectista debe, a priori, elegir cuál será el perfil del usuario de la playa y diseñar de acuerdo con dicho perfil.

Determinados criterios de valoración de la funcionalidad y/o calidad de una playa, como por ejemplo la *bandera azul*, recogen toda una serie de parámetros complementarios al diseño de la regeneración, tales como papeleras, servicios,... , que no son analizados en el presente documento. Se recomienda al proyectista que examine dichos requerimientos.

### III.2.2 Funciones de una playa

Las funciones de una playa pueden agruparse en tres categorías:

- Defensa de la costa.
- Hábitat de flora y fauna.
- Uso lúdico humano.

A continuación se describen brevemente algunos conceptos generales de estas funciones.

#### *Defensa de la costa*

Una de las funciones que de modo natural realizan las playas, es la disipación y reflexión de la energía del oleaje que incide sobre ellas. Esta modificación de la energía incidente evita, o al menos reduce, los efectos de la dinámica marina sobre las infraestructuras existentes en el trasdós de la playa, en particular:

- La inundación de la costa
- La acción directa del oleaje sobre las estructuras.

Es importante señalar que el modo en el que una playa realiza esta función consiste en la variación de su morfología, principalmente de su perfil. En este sentido, y si bien el tema será desarrollado con detalle posteriormente, en un primer análisis puede decirse que para que un perfil de playa pueda defender correctamente la costa, ha de contar con un volumen de arena suficiente, tanto en su perfil activo como en el perfil sumergido y en la duna. La disposición de dicho volumen (anchura y cota de la berma/duna) constituye junto con las características del sedimento (tamaño medio, permeabilidad) los parámetros que determinan la capacidad de defensa de la costa de una playa.



**ESCARPE DE PLAYA TRAS LA ACCIÓN DE UN TEMPORAL**

Otro aspecto a considerar dentro de la función de defensa de la costa, es que dicha función se realiza, de modo más relevante, bajo la acción de eventos extraordinarios de temporal, y consecuentemente, su evaluación debe hacerse bajo criterios estadísticos de presentación de dichos eventos. En playas en erosión, la evaluación del grado de defensa de costa debe hacerse no sólo en la situación actual, sino a lo largo de toda la vida útil de la misma.

### ***Hábitat de flora y fauna***

Las playas constituyen el hábitat de diversas especies tanto de flora como de fauna. Por este motivo un gran número de playas de nuestras costas se encuentran bajo la tutela de diversas figuras de protección medioambiental, tales como parques nacionales, reservas, zona Ramsar, Red Natura 2000, ..., que garantizan el uso de las mismas como hábitat natural.

Independientemente de la figura de protección existente, el proyectista debe tener en cuenta esta función de las playas en su diseño, analizando los impactos negativos que el vertido de arena pudiera ocasionar sobre un hábitat existente y los impactos positivos de la generación de un nuevo hábitat (ver sección V).

Para aquellas regeneraciones cuyo objetivo fundamental sea la restauración de un hábitat determinado debe tenerse en cuenta que:

1. Los factores más relevantes a la hora de que una playa sirva como hábitat de una determinada especie son: diámetro del sedimento, horas de inundación y movilidad del sedimento.
2. Si la movilidad del sedimento es alta, no es posible el establecimiento de la flora y de la mayor parte de los invertebrados.
3. El tamaño del sedimento, y en particular el tanto por ciento de finos, condiciona la cantidad de oxígeno y materia orgánica disponible para las especies que viven enterradas en el sustrato.
4. Las condiciones anteriores son necesarias, pero nunca suficientes para garantizar un determinado hábitat.
5. Las necesidades de diámetro de sedimento, horas de inundación y movilidad de sedimento son específicos para cada especie.





VEGETACIÓN DUNAR DE LA PLAYA DE OYAMBRE, CANTABRIA

### *Uso lúdico humano*

Las playas y zonas adyacentes, dan cabida a un gran número de actividades humanas, fundamentalmente de carácter lúdico. Con carácter general, estas actividades pueden agruparse, en función del lugar donde se realizan, en:

- **Acuáticas:** Navegación, “windsurf“, motonáutica, ...
- **Terrestres:** Solárium, paseo, voley-playa, palas, futbol ...
- **Interfase:** Baño, “surf“.

Las actividades acuáticas requieren, en la mayor parte de los casos, unas condiciones determinadas de agitación del oleaje. El cumplimiento de estas condiciones viene impuesto por la dinámica marina de la zona, y no suele ser objeto de diseño en una regeneración de playa. No obstante, el conocimiento de estos requerimientos puede aumentar el potencial uso de la regeneración (veáse por ejemplo, las directivas para la práctica de motonáutica, PIANC 1995). Las actividades terrestres pueden ser favorecidas o penalizadas de acuerdo a diversos factores susceptibles de diseño, tales como diámetro de la arena, anchura de la playa, longitud de la playa, ... Otro tanto cabe decir de las actividades de interfase cuya seguridad e incluso posibilidad de ejecución pueden ser modificadas con el

tamaño de la arena y la geometría de los contornos de la playa.



**LAS PLAYAS SON, HOY EN DÍA, LUGARES DE UN INTENSO USO COMO ZONA DE ESPARCIMIENTO**

### **III.2.3 Criterios de valoración**

Entendemos por criterio de valoración al indicador o conjunto de indicadores que permiten establecer si una playa cumple o no una determinada función. En el presente apartado se establecen los criterios de valoración que deben adoptarse a la hora de comprobar la funcionalidad de una playa, de acuerdo con las tres categorías recogidas en el apartado anterior:

- Defensa de la costa.
- Hábitat de flora y fauna.
- Uso lúdico humano.

### *Defensa de la costa*

La evaluación de la funcionalidad de una playa como “obra de defensa de costa” debe realizarse de acuerdo con los criterios establecidos en la ROM 02-90 para este tipo de obras.

En dicha publicación se recoge que, para obras sometidas a la acción de cargas variables, como es el caso del oleaje, el cálculo de la funcionalidad debe realizarse utilizando el valor característico maximal de las cargas, esto es, el valor extremal correspondiente al periodo medio de retorno ( $T$ ) asociado a una probabilidad de presentación de la carga o riesgo ( $E$ ) durante la vida útil de la obra ( $L_f$ ).

La relación entre riesgo, vida útil y periodo de retorno viene dada por:

$$E = 1 - \left( 1 - \left( \frac{L_f}{T} \right) \right)^{L_f}$$

En la citada publicación se define, además, la vida útil de la obra y el nivel de riesgo máximo admisible en función del:

- a) tipo de obra,
- b) nivel de seguridad requerido,
- c) repercusión económica de la inutilización de la obra, y
- d) la posibilidad de pérdidas humanas.

Estos valores de vida útil y nivel de riesgo se recogen en los cuadros III.3.1 y III.3.2 (tablas 3.2.3.1.2 y 2.2.1.1 de la citada publicación). El proyectista deberá, en función de las características de la obra antes mencionadas, elegir la vida útil y el riesgo que mejor definan la regeneración objeto de estudio. Con estos valores determinará el periodo de retorno y, consecuentemente, el valor de las cargas que han de usarse en el cálculo de la funcionalidad de la playa como obra de defensa de costa.

**Cuadro III.3.1.** Riesgos máximos admisibles para la determinación, a partir de datos estadísticos, de valores característicos de cargas variables para fase de servicio y condiciones extremas. (ROM 02-90)**a) Riesgo de Iniciación de Averías**

		Posibilidad de Pérdidas Humanas	
		Reducida	Esperable
Repercusión económica en caso de inutilización de la obra. Índice r: $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	Baja	0,50	0,30
	Media	0,30	0,20
	Alta	0,25	0,15

**b) Riesgo de Destrucción Total**

		Posibilidad de Pérdidas Humanas	
		Reducida	Esperable
Repercusión económica en caso de inutilización de la obra. Índice r: $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	Baja	0,20	0,15
	Media	0,15	0,10
	Alta	0,10	0,05

Se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o el de destrucción total según las características de deformabilidad y de posibilidad o facilidad de reparación de la estructura resistente.

Para obras rígidas o de rotura frágil sin posibilidad de reparación se adoptará el riesgo de destrucción total.

Para obras flexibles, semirrígidas o de rotura en general reparable (daños menores que el nivel prefijado función del tipo estructural) se adoptará el riesgo de iniciación de averías. En este tipo de obras podrá adoptarse también el riesgo de destrucción total, definiendo para cada tipo estructural el nivel de daños aceptado como de destrucción total. La acción resultante se considerará como accidental.

**LEYENDA:**

- Posibilidad de Pérdidas Humanas
  - ✓ Reducida: Cuando no es esperable que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños.
  - ✓ Esperable: Cuando es previsible que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños.
- Repercusión Económica en caso de Inutilización de la Obra
 

$$\text{Índice } r = \frac{\text{Coste de pérdidas directas o indirectas}}{\text{Inversión}}$$

  - Baja:  $r \leq 5$
  - Media:  $5 < r \leq 20$
  - Alta:  $r > 20$

**Cuadro III.3.2.** Vidas útiles mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo (en años). (ROM 02-90)

Tipo de obra o Instalación	Nivel de Seguridad Requerido		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Infraestructura de carácter general	25	50	100
De carácter industrial específico	15	25	50

**LEYENDA:**

**INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL:**  
Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto.

**DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO:**  
Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo, ...).

**NIVEL 1:**  
Obras e instalaciones de interés local o auxiliares.  
Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores o deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones, ...).

**NIVEL 2:**  
Obras e instalaciones de interés general.  
Riesgo moderado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...).

**NIVEL 3:**  
Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional.  
Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).

Dicha funcionalidad quedará garantizada si la cota de inundación y el retroceso de la línea de costa asociado a la carga de diseño no generan la inundación del trasdós de la playa y/o la acción directa del oleaje sobre las infraestructuras de dicho trasdós.

La determinación de los parámetros que sirven como criterios de valoración, esto es:

- Cota de inundación.
- Retroceso de la línea de costa.

Se realizará de acuerdo con el método de cálculo desarrollado en el apartado III.3.

Nótese que la funcionalidad debe garantizarse durante toda la vida útil de la obra. Si una playa está en retroceso deberá tenerse en cuenta este hecho y verificar que la obra es funcional en todos y cada uno de los años de vida útil de la misma.

### ***Hábitat de flora y fauna***

No existe en la literatura un criterio de valoración que permita, a priori, estimar el grado de funcionalidad que alcanzará una regeneración realizada para restaurar un determinado hábitat. Varias son las razones para esta ausencia:

- La escasez de estudios específicos en el área.
- La gran cantidad de factores, algunos desconocidos, que afectan a la supervivencia de las especies.
- La diferente afección de los mismos parámetros a las diferentes especies, que da lugar a criterios diversos para cada especie.

Por este motivo, la mayor parte de las regeneraciones realizadas con este fin se han acometido intentando “mimetizar” las características existentes en la playa natural en lo que se refiere a:

- Distribución granulométrica de sedimentos.
- Disposición de la regeneración (horas de inundación).

El primer factor es el más importante dentro de los susceptibles de modificación en el diseño, y muy particularmente, la porción de finos existente en el sedimento, pues es la que condiciona la porosidad, permeabilidad y nivel de turbidez. En cualquier caso, otra serie de factores, tales como el grado de compactación o la angulosidad de la arena, que usualmente no contemplados en los

proyectos de regeneración, han sido determinantes en el fallo de algunos proyectos de regeneración.

Dado el alcance del presente Documento Temático, no es posible abordar las características de las diferentes especies de flora y fauna, por lo que se remite al lector a documentos específicos del tema, por ejemplo: *Physical and biological guidelines for beach restoration projects* (Nelson, 1985), ...

### ***Uso lúdico humano***

Existen diversos criterios de valoración destinados a la medida de la capacidad de una playa para su uso como espacio lúdico: bandera azul, NRA, escala de la Universidad de Glamorgan, ... véase cuadro III.4. Esta diversidad de criterios es consecuencia de que parte de los mismos son subjetivos, y de que varían tanto espacial como temporalmente. De este modo, la playa “óptima” no es la misma hoy que hace unas décadas y es diferente para un usuario del Mediterráneo que para otro del litoral Cantábrico donde la marea, la temperatura del aire y del agua impide o posibilita otros usos. La edad, sexo y aficiones del usuario también modifican el concepto de playa óptima.

El proyectista deberá tener en cuenta todos estos factores a la hora de diseñar la regeneración y establecer el perfil del usuario al que va dirigida la playa.

Los diferentes criterios existentes se basan en la utilización de una serie de indicadores que recogen aspectos muy variados. Los indicadores más utilizados pueden ser agrupados en tres categorías:

- Factores físicos.
- Factores biológicos.
- Factores de uso humano.

Desde el punto de vista del diseño de una regeneración de playa, algunos de estos factores vienen impuestos por la ubicación de la playa (temperatura del agua, pluviosidad, vistas, ...) y otros se escapan del alcance de un proyecto de regeneración (calidad del agua, olor, tráfico rodado en las cercanías, ...).

**Cuadro III.4.** Resumen de los parámetros incluidos en los criterios de valoración de uso humano de una playa.

	Bandera Azul Europea	Premio “Orilla del Mar” (Grupo Británico Tidy)	Guía de la “Buena Playa” (MCS)	NRA (Región del Suroeste)	Chaverri (1989)	Williams ( <i>et al</i> , 1993a)	Escala de clasificación de la calidad de una playa. Universidad de Glamorgan	Leatherman (1997)
Calidad del Agua	R	R	R		R	R	R	R
Educación e Información	R	R						
Accesos	R	R			R	R	R	R
Salvavidas / Primeros Auxilios	R	R				R	R	R
Papeleras / Contenedores	R	R			R	R	R	R
Sanitarios	R	R					R	
Aguas residuales y escombros	R	R	R	R	R	R	R	R
Seguridad de las aguas de baño					R	R	R	R
Clima					R	R	R	R
Calidad del paisaje					R	R	R	R
Material de la playa					R	R	R	R
Temperatura del agua					R	R	R	R
Flora y Fauna					R	R	R	R
Refrigerios y Quioscos	(algunos)	(algunos)				(algunos)	R	(algunos)
Regulación en el uso de la playa (mascotas, vehículos, etc)	R	R				R	R	(algunos)
Ponderado de los factores							R	R
Clasificación en función de las preferencias y prioridades de los usuarios							R	R
Cuantificación de todos o algunos de los factores			R	R		R	R	
Diferencia entre playa turística y playas vírgenes		R					R	



Los indicadores más importantes susceptibles de ser modificados dentro del diseño de una regeneración son: fundamentalmente factores físicos y factores de uso humano relativos a la seguridad en el baño e intensidad de uso. Así, de acuerdo con los trabajos de Leatherman (1997) y la Universidad de Glamorgan (1993) tenemos:

- *Geometría de la playa*

*Anchura:* Los usuarios clasifican como estrecha a una playa de menos de 20-30 m de anchura y excesivamente ancha si tiene más de 75-100 metros

*Longitud y forma:* Las playas rectas y largas son más adecuadas para intensidades de uso altas (superficie útil menor de 7 m<sup>2</sup>/persona). Las playas cortas y encajadas son preferidas si la intensidad de uso es baja.

- *Sedimento*

*Tamaño y color:* Las playas de arena fina de color blanco o dorado son las más apreciadas.

- *Intensidad de uso*

La valoración del concepto *intensidad de uso*, es subjetiva y depende del usuario y del tipo de playa (salvaje, turística, ...). En playas de tipo turístico se entiende que la playa está:

*Saturada:* para superficie útil menor que 5 m<sup>2</sup>/persona.

*Uso alto:* para superficie útil en el rango 7 - 15 m<sup>2</sup>/persona.

*Uso bajo:* para superficie útil mayores que 20 m<sup>2</sup>/persona.

- *Seguridad en el baño*

La mayor parte de los criterios de valoración de playas recogen indicadores relativos a la seguridad en el baño, tales como: anchura de la zona de rotura, corrientes longitudinales, corrientes de retorno, pendiente de la playa, tipo de rotura del oleaje, ... Todos estos parámetros están relacionados con el estado morfodinámico de la playa y son susceptibles de diseño, en tanto en cuanto lo sean la altura de ola que recibe la playa y el tamaño de la arena de aportación. Los estudios realizados relacionando el número de rescates efectuados por los

socorristas con el estado morfodinámico de la playa muestran una clara dependencia, siendo notable el hecho de que el 90% de los casos estaban asociados a la presencia de corrientes de retorno.

La valoración del nivel de seguridad de una playa y tipo de riesgo se recogen en el cuadro III.5.

**Cuadro III.5.** Nivel de seguridad en función de la altura de ola y del estado morfodinámico de la playa.

Altura de Ola (m)	3.0	10	10	10	10	10	9
	2.5	10	9	10	10	7	7
	2.0	9	7	10	9	6	5
	1.5	7	5	7	6	5	4
	1.0	4	2	4	4	3	1
	0.5	2	0	2	2	2	0
		R	LTT	TBR	RBB	LTB	D
Estado de la Playa							
R = Reflejante LTT = Barra Canaleta TBR = Barra Transversal y Rip RBB = Barra y Playa Rítmicas LTB = Barra Longitudinal y Seno D = Disipativa							

**Clasificación:**  
0: Muy segura  
10: Muy Peligrosa

**Banderas:**  
 0 - 4 Verde  
 4 - 7 Amarilla  
 > 7 Roja

**Notas:**  
(1): Para  $H > 1$  m, se asume que el baño se restringe entre el seno y el frente de playa.  
(2): Puede haber zonas localizadas de corriente de retorno en las que será necesario prohibir el baño para  $H > 1.5$  m.

### III.3 Cálculo de estabilidad y evolución de una playa

De acuerdo con lo expuesto con anterioridad, el diseño de una regeneración conlleva un diseño funcional, que tiene como objetivo la recuperación de la funcionalidad de la playa, y un cálculo de la estabilidad y de la evolución del relleno que tiene como objetivo garantizar que dicha funcionalidad se mantiene durante la vida útil de la obra.

Dado que la determinación de la estabilidad y evolución de un relleno requiere el uso de un conjunto importante de formulaciones y herramientas numéricas, ha parecido razonable presentar en un anejo independiente dicho conjunto de formulaciones con sus hipótesis y sus interrelaciones para abordar, en este apartado, únicamente los aspectos metodológicos

### III.3.1 Conceptos previos

En el presente apartado se desarrolla la metodología que se ha de utilizar en el cálculo de la estabilidad y la evolución de una playa. Es importante resaltar que las formulaciones propuestas (ver Anejo II) aceptan una serie de hipótesis de partida que han de ser conocidas por el proyectista al objeto de evitar usos indebidos de las mismas. Estas hipótesis previas se concretan en:

- Dimensionalidad de los procesos.
- Escala espacial y temporal de los procesos.

#### *Dimensionalidad de los procesos*

Todos los procesos hidrodinámicos y sedimentarios que acontecen en una playa son, en mayor o menor medida, procesos tridimensionales. Sin embargo, las limitaciones de las herramientas, formulaciones e incluso de nuestra capacidad de entendimiento de dichos procesos no nos permiten analizar dichos procesos en toda su complejidad. De este modo, surge como primera y más importante hipótesis de trabajo en el estudio de la estabilidad de una playa, la relativa a la ortogonalidad de los movimientos longitudinales y transversales de la misma.

De acuerdo con esta hipótesis de ortogonalidad, cualquier movimiento de una playa, como por ejemplo el ocurrido tras un temporal, puede ser analizado estudiando los movimientos longitudinales y transversales de la misma, los cuales se asume que son independientes entre sí. Nótese que la hipótesis de ortogonalidad permite analizar la estabilidad de una playa estudiando por separado la:

- Estabilidad del perfil de playa (eje transversal)
- Estabilidad de la planta de la playa (eje longitudinal).

La hipótesis de ortogonalidad es, en general, suficientemente aproximada a la realidad, especialmente en playas abiertas con estados morfodinámicos extremos (disipativas o reflejantes). En playas con estados morfodinámicos intermedios, o en playas encajadas con una forma en planta de gran curvatura, existe, sin embargo, una notable interacción planta-perfil, por lo que el análisis por separado del perfil y la planta debe realizarse con cautela.

### ***Escala espacial y temporal de los procesos***

Las diferentes dinámicas que afectan a una playa se presentan en escalas espaciales que van desde los centímetros (turbulencia), hasta las decenas de kilómetros (marea) y en escalas temporales que van desde los segundos (olas) hasta las décadas (ascenso del nivel medio del mar). Como respuesta a dichas dinámicas la morfología de la playa cambia, a su vez, dentro de todas esas escalas: centímetros-kilómetros, segundos-décadas, cuadro III.6.

A pesar de la potencia de cálculo de los ordenadores, y de los intentos realizados en esa dirección, no es posible (ni adecuado) calcular los cambios que acontecen en las escalas superiores, por integración de los procesos de las escalas inferiores. Esto es debido a la falta de una teoría unificada de transporte de sedimentos que retenga la influencia de todos los efectos que se producen en las diferentes escalas espaciales y temporales.

Esta carencia de teoría unificada da lugar a que los procesos que ocurren en diferentes escalas (de tiempo o espacio) deban ser analizados con diferentes herramientas o formulaciones. Es necesario, por tanto, conocer cuál es la escala de interés en cada problema particular y utilizar la formulación adecuada a dicha escala de interés.

Las escalas de las diferentes dinámicas y respuestas morfológicas de las playas suelen ser clasificadas en: Micro escala, Meso escala y Macro escala de acuerdo con la dimensión espacial y en corto plazo, medio plazo y largo plazo, véase cuadro III.6.

En una regeneración de playa las escalas de interés son la Meso escala (decenas-centenas de metro), Macro escala (km) y el largo plazo (años), pues son quienes definen la evolución del relleno a lo largo de la vida útil de la obra. Los elementos de escalas inferiores (por ejemplo, la erosión producida por un temporal)

**ESCALAS ESPACIALES DE LOS CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN PLAYAS**

Proceso	Escala Espacial (cm a Mm)	Categoría
Erosión-sedimentación secular	~400 m - 1000 m	Macroescala
Erosión-sedimentación por ciclos climáticos plurianuales	~100 m - 400 m	Macroescala
Forma en planta	~10 m - 100 m	Mesoescala
Megacusps	~1 m - 10 m	Mesoescala
Barras rítmicas	~1 m - 10 m	Mesoescala
Perfil	~1 m - 10 m	Mesoescala
Avance de una flecha	~1 m - 10 m	Mesoescala
Beach cusps	~1 m - 10 m	Mesoescala
Escarpes	~10 cm - 1 m	Mesoescala
Ripples	~10 cm - 1 m	Microescala
Suspensión y rodadura	~10 cm - 1 m	Microescala

**ESCALAS TEMPORALES DE LOS CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN PLAYAS**

Proceso	Escala Temporal (seg a siglo)	Categoría
Erosión-sedimentación secular	~10 años - 100 años	Largo plazo
Erosión-sedimentación por ciclos climáticos plurianuales	~10 años - 100 años	Largo plazo
Avance de una flecha	~10 años - 100 años	Largo plazo
Evolución de la planta	~10 años - 100 años	Largo plazo
Acreeción del perfil	~10 años - 100 años	Largo plazo
Formación de megacusps	~10 años - 100 años	Largo plazo
Evolución de barras	~10 años - 100 años	Largo plazo
Erosión del perfil	~10 años - 100 años	Largo plazo
Beach cusps	~10 años - 100 años	Largo plazo
Formación de escarpes	~10 años - 100 años	Largo plazo
Ripples	~10 años - 100 años	Largo plazo
Suspensión y rodadura	~10 años - 100 años	Largo plazo

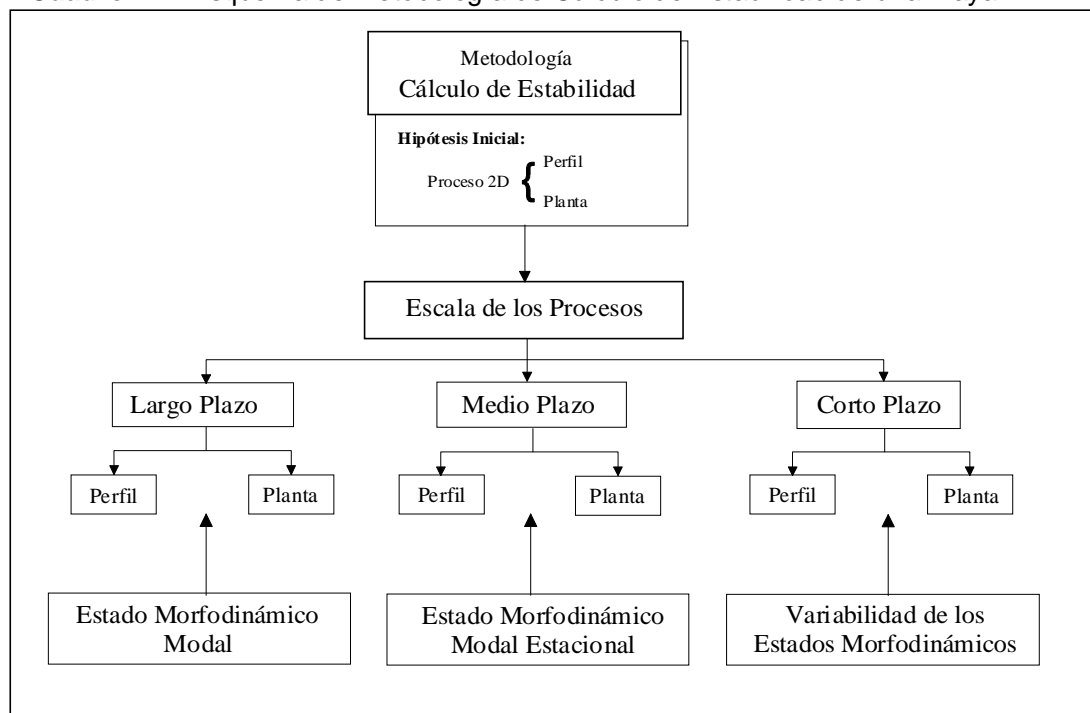
solo son relevantes si sus efectos permanecen en el tiempo, o en el espacio, en unidades cercanas a las de interés (por ejemplo, meses), o si su efecto provoca el fallo funcional de la obra (por ejemplo, el oleaje alcanza el trasdós de la playa).

El diseño de una regeneración se realizará, por tanto, con criterios y herramientas de largo plazo verificándose, posteriormente, que los eventos de corto plazo no provocan el fallo de la obra.

### III.3.2 Metodología de cálculo

La metodología propuesta para el cálculo de estabilidad y evolución de una playa queda recogida en el cuadro III.7. Los elementos más relevantes de la misma son:

- Se acepta, como hipótesis inicial, la ortogonalidad de los movimientos longitudinales y transversales de una playa. Consecuentemente, se admite que la estabilidad de la misma puede ser analizada estudiando la estabilidad de su forma en planta y su perfil.
- Los fenómenos, procesos y morfologías tridimensionales, son incluidos a posteriori por medio del análisis de los estados morfodinámicos de la playa.
- Se separa el análisis de la estabilidad y evolución de la playa de acuerdo con las diferentes escalas de variabilidad de la misma. En particular se analiza la estabilidad a Largo Plazo (años), Medio Plazo (estaciones) y Corto Plazo (temporal).
- Para cada una de estas escalas de interés se analiza la estabilidad y evolución de la forma en planta y perfil.
- El esquema anterior es independiente del nivel de cálculo y debe ser aplicado tanto a nivel de prediseño como a nivel de diseño. Obviamente las herramientas y formulaciones a emplear en cada caso, así como los datos de partida necesarios, variarán.

**Cuadro III.7.** Esquema de Metodología de Cálculo de Estabilidad de una Playa

### III.3.3 Formulaciones de diseño y prediseño

En el presente apartado se recogen, de modo resumido, el conjunto de formulaciones y herramientas numéricas que permiten realizar el cálculo de la estabilidad y de la evolución de una playa, de acuerdo con la metodología propuesta en el apartado anterior y presentada en el cuadro III.7. Es importante señalar que, en muchos casos, existen diversas formulaciones que pueden ser usadas para calcular un mismo fenómeno (por ejemplo, transporte longitudinal en playas). En este documento, sin embargo, solo se presentará una (la que a juicio del equipo redactor mejor representa el fenómeno y más se adecua a los condicionantes expresados en la Sección I relativos al tipo de usuario, contenidos y ámbito de uso del documento). Las formulaciones presentadas en este apartado son desarrolladas con un mayor detalle en el Anejo II, donde se incluyen cuadro y gráficos explicativos.

La estructura de presentación de las formulaciones es la siguiente:

- En primer lugar las formulaciones se separan de acuerdo con la escala temporal de los procesos que se pretende analizar (largo plazo, medio plazo y corto plazo).
- Dentro de cada una de estas escalas de tiempo se presentan formulaciones aproximadas, adecuadas para la realización de un prediseño, y formulaciones más sofisticadas que deben ser usadas en diseños definitivos.
- Independientemente del nivel de estudio se aborda, por separado, el cálculo del perfil y de la planta para las diversas geometrías de la playa.

Toda esta información se presenta en una serie de tablas (tablas III.1, III.2 y III.3) en las que se incluye, además, los datos de partida necesarios, el tipo de datos, y el cuadro explicativo del Anejo II en el que puede encontrarse la formulación. En lo que respecta al tipo de datos, en el apartado III.3.4 se desarrolla diferentes estrategias de tratamiento de los datos de entrada que pueden ser utilizadas en función de la tipología señalada en las tablas.

El proceso práctico de uso de la información incluida en este capítulo sería, por tanto:

- 1) Selección de la escala de estudio.
- 2) Selección del nivel de análisis (prediseño, diseño).
- 3) Selección de la formulación de perfil y planta a utilizar de acuerdo con la geometría de la playa objeto de estudio.
- 4) Revisión de la formulación en el Anejo II.
- 5) Revisión del tratamiento requerido en los datos de entrada (apartado III.3.4).

#### **III.3.3.1 Formulaciones de diseño y prediseño a largo plazo**

El objetivo del análisis a largo plazo es determinar cuál será la forma final (planta-perfil) de la playa y/o la evolución temporal de dicha forma en escala de años, al objeto de asegurar que la funcionalidad de la playa se mantiene durante la vida útil de la misma.



Las formulaciones existentes para esta escala de tiempos no intentan analizar los procesos (por ejemplo, transporte de sedimentos ola a ola) sino magnitudes agregadas de los mismos. Para el análisis del perfil y de la planta de una playa dos son los tipos de modelos más utilizados: los basados en la hipótesis de equilibrio y los basados en la ecuación de la difusión.

La hipótesis de equilibrio postula que si la acción de las dinámicas actantes se mantiene indefinidamente, la forma de la playa alcanzará una posición final constante, en equilibrio con dichas dinámicas. En la práctica no es necesario que la acción se mantenga indefinidamente sino que la respuesta de la forma sea mucho más rápida que la escala de interés.

En el caso del perfil se asume que las modificaciones del mismo se producen en escalas de tiempo que pueden ser consideradas como instantáneas en un estudio a largo plazo, lo que implica que el perfil siempre alcanza la posición de equilibrio. En el caso de forma en planta, también se puede analizar la forma final de equilibrio, aunque ésta solo tiene sentido en playas encajadas donde no hay una pérdida neta de material.

La ecuación de la difusión se basa, en cierto modo, en el mismo concepto y establece que la forma de una playa tiende hacia el equilibrio tanto más rápido cuanto más lejos se encuentre de dicha posición de equilibrio. Este tipo de formulaciones permiten determinar la evolución temporal de la forma de la playa y, por este motivo, se denominan modelos de evolución (por ejemplo, modelos de evolución de la línea de costa).

Las formulaciones seleccionadas para el análisis del perfil y de la planta en una análisis a largo plazo se recogen en la tabla III.1 y son descritas con detalle en el Anejo II. En este anejo se presentan, además, indicaciones sobre su uso y un gran número de aplicaciones de las mismas.



**PLAYAS ENCAJADAS POR MEDIO DE DIQUES EXENTOS, PLAYA DE CASTELL DE FERRO, GRANADA**

Es importante señalar que el análisis a largo plazo del perfil y de la planta de la playa debe estar acompañado de un estudio relativo a:

- a) Balance sedimentario de la zona de estudio.
- b) Estado morfodinámico modal de la playa.

**a) *Balance sedimentario***

El balance sedimentario de la zona de estudio es un cómputo, en términos de macro escala, de los aportes y pérdidas existentes en la zona de estudio. Este cómputo ha de ser tal que permita: (1) establecer las condiciones de contorno de los modelos de evolución, en el caso de playas abiertas, o (2) la constatación de que la playa es una playa encajada sin aportes o pérdidas externas.

La realización de un balance sedimentario tiene como primer elemento la identificación de los elementos más relevantes, esto es, fuentes de sedimentos, sumideros de sedimentos, tipos de sedimentos y mecanismos de transporte.

Entre las fuentes usuales se encuentran:

- Erosión de acantilados.
- Aportes fluviales.
- Aportes biogénicos.
- Aportes desde la plataforma continental.
- Aportes debidos a viento.
- Aportes humanos (regeneraciones, vertidos de dragado, ...).

Entre los sumideros usuales se encuentran:

- Depósito en estuarios, puertos y otras estructuras.
- Depósito en el trasdós de la playa por viento y/u olas.
- Transporte hacia la plataforma continental.
- Descomposición de la arena.
- Extracción humana.

Los mecanismos de transporte fundamentales a considerar son,:

- Transporte longitudinal debido al oleaje.
- Transporte transversal debido al oleaje.
- Transporte debido a la acción de corrientes de marea y viento.
- Transporte eólico.
- Transporte humano.

#### **b) *Estado morfodinámico modal de la playa***

Tal y como se ha desarrollado anteriormente, la evolución real de un tramo costero es un proceso tridimensional en el que interaccionan morfología y dinámica, tanto en perfil como en planta.

La simplificación que supone el estudio separado de perfil y planta debe ser siempre revisada por medio de un análisis del estado morfodinámico modal de la playa que aporte información sobre el grado de tridimensionalidad de los procesos,

NIVEL DE CÁLCULO	GEOMETRÍA	SECCIÓN	FORMULACIÓN	DATOS NECESARIOS	TIPO DE DATOS	CUADRO	NOTAS
Prediseño	Playa encajada	Perfil	Perfil equilibrio	$D_{50}, H_{s12}$	Equilibrio	AII.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>· En algunos casos puede ser necesario perfil equilibrio modificado.</li> <li>· No se obtiene información sobre el tiempo.</li> </ul>
		Planta	Perfil equilibrio estático	$\theta_0, (Y/L)$	Equilibrio	AII.5	
	Playa abierta	Perfil	Perfil equilibrio	$D_{50}, H_{s12}$	Equilibrio	AII.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Puede ser necesario perfil equilibrio modificado.</li> </ul>
		Planta	Modelo una línea soluciones analíticas	$H_b, \theta_b, D_{50}$	Evolución	AII.7	
Diseño	Playa encajada	Perfil	Perfil equilibrio modificado	$A, A_r, B, \Omega, H_{s12},$ geometría	Equilibrio	AII.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>· El perfil debe ser ajustado con datos de playas cercanas.</li> <li>· Necesita un modelo una línea para obtener información de evolución temporal.</li> </ul>
		Planta	Planta equilibrio estático	$\theta_0, (Y/L)$	Equilibrio	AII.5	
	Playa abierta	Perfil	Perfil equilibrio modificado	$A, A_r, B, \Omega, H_{s12},$ geometría	Equilibrio	AII.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Puede necesitar un programa de propagación de oleaje.</li> </ul>
		Planta	Modelo una línea solución numérica	$H_b(t), \theta_0(t), D_{50},$ geometría	Evolución	AII.7	

**Tabla III.1 Largo Plazo**

las formas de playa existentes (“*cusps*”, barras, ...) y la hidrodinámica asociada (“*rips*”, ondas infragravitatorias, ...) aspectos estos de gran relevancia no solo en el cálculo de la estabilidad de la playa, sino en el diseño funcional de la misma (ver apartado III.2.3).

En el análisis a largo plazo en el que nos encontramos, no es de interés la variabilidad de la morfodinámica de la playa en función de las características de oleaje y marea, sino el estado modal o más frecuente, que será el resultado de las condiciones modales energéticas de oleaje que aborda a la playa.

La caracterización del estado modal de la playa se realizará por medio de los parámetros  $\Omega$  y  $M'$ , donde:

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T}$$

$$M' = \frac{M}{H_b}$$

donde:

$H_b$	=	altura significativa en rotura
$T$	=	periodo de pico
$W_s$	=	velocidad de caída del sedimento
$M$	=	rango de marea

La determinación del estado morfodinámico se realizará utilizando el cuadro III.8.1 en playas en mares sin marea y el cuadro III.8.2 en playas en mares con marea.

**Cuadro III.8.1.a. Estados morfodinámicos de playas sin marea**

Los modelos de "estados morfodinámicos" de una playa son modelos empíricos que relacionan la forma (perfil y planta) de la playa con la hidrodinámica de la misma. Estos modelos permiten, con base en parámetros simples del oleaje incidente y de las características del sedimento de la playa, establecer de modo cualitativo la morfología de la playa y la relevancia de las diferentes dinámicas en la zona de rotura.

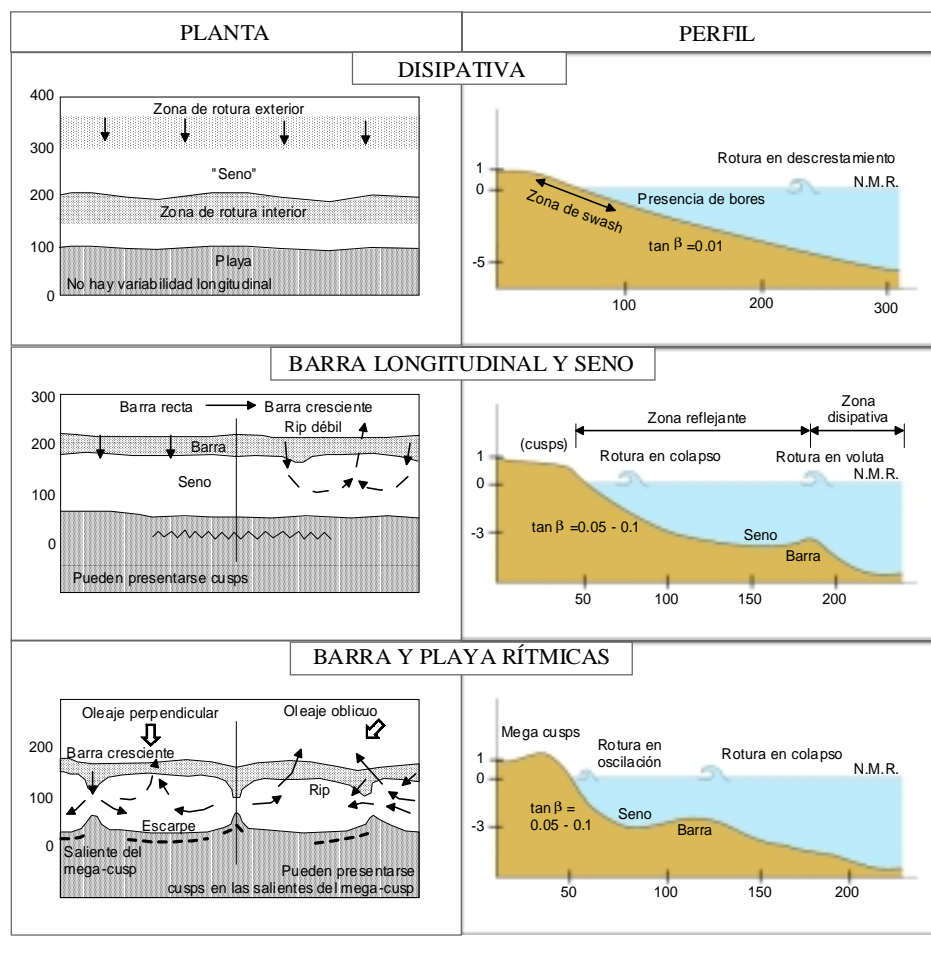
Para playas micromareales, Wright y Short (1984), definieron cuatro tipos de playas, en función del parámetro adimensional de caída de grano,  $\Omega^*$ :

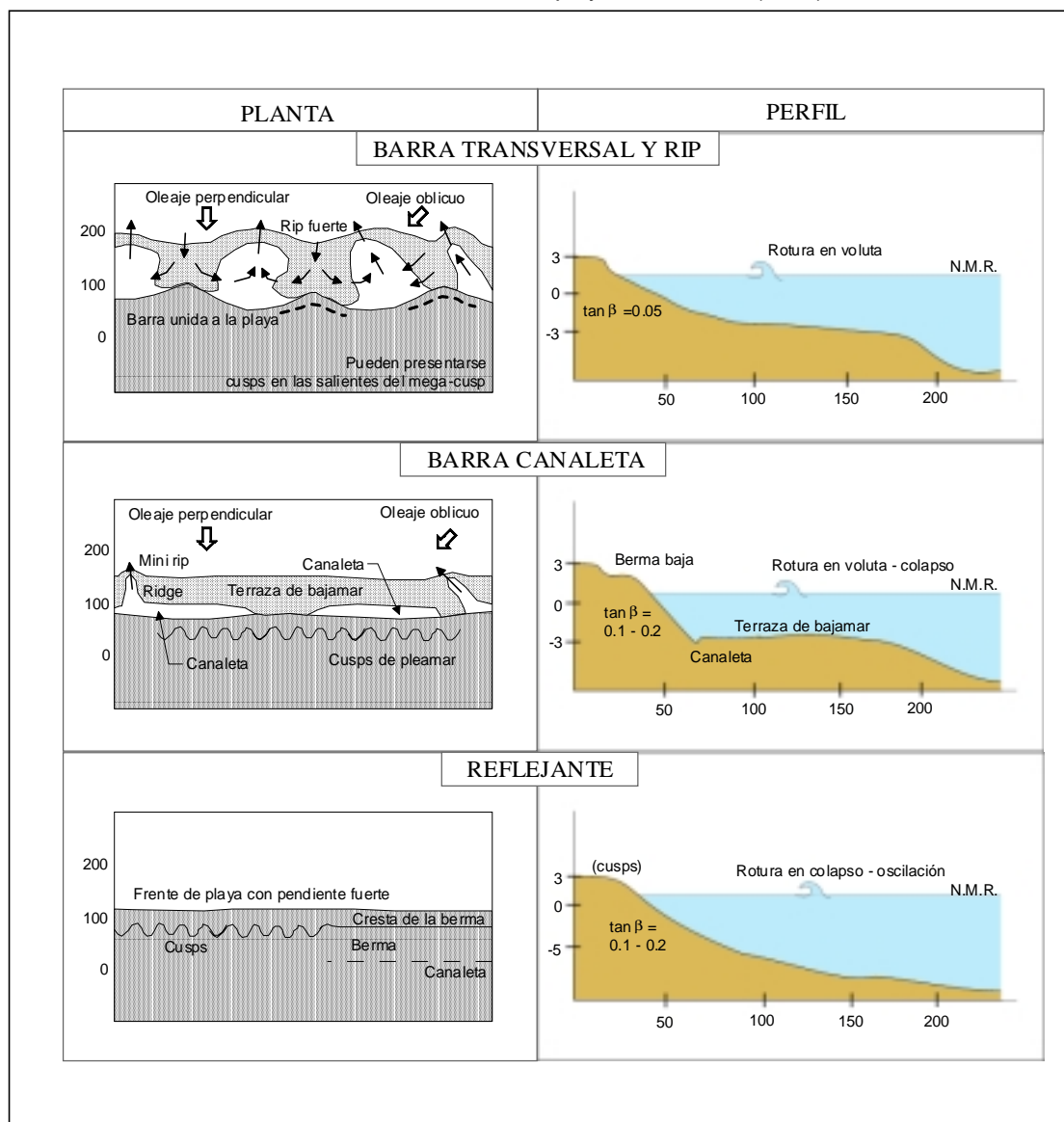
Estado Morfodinámico	$\Omega^* = \frac{H_b}{wT}$
a) Disipativa	>5,5
b) Barra longitudinal y seno	4,7
c) Barra y playa rítmicas	3,5
d) Barra transversal y corriente de retorno (rip)	3,1
e) Barra-canaleta o Terraza de bajamar	2,4
f) Reflejante	< 1,5

$H_b$  = altura de ola significativa en rotura

$T$  = periodo de pico

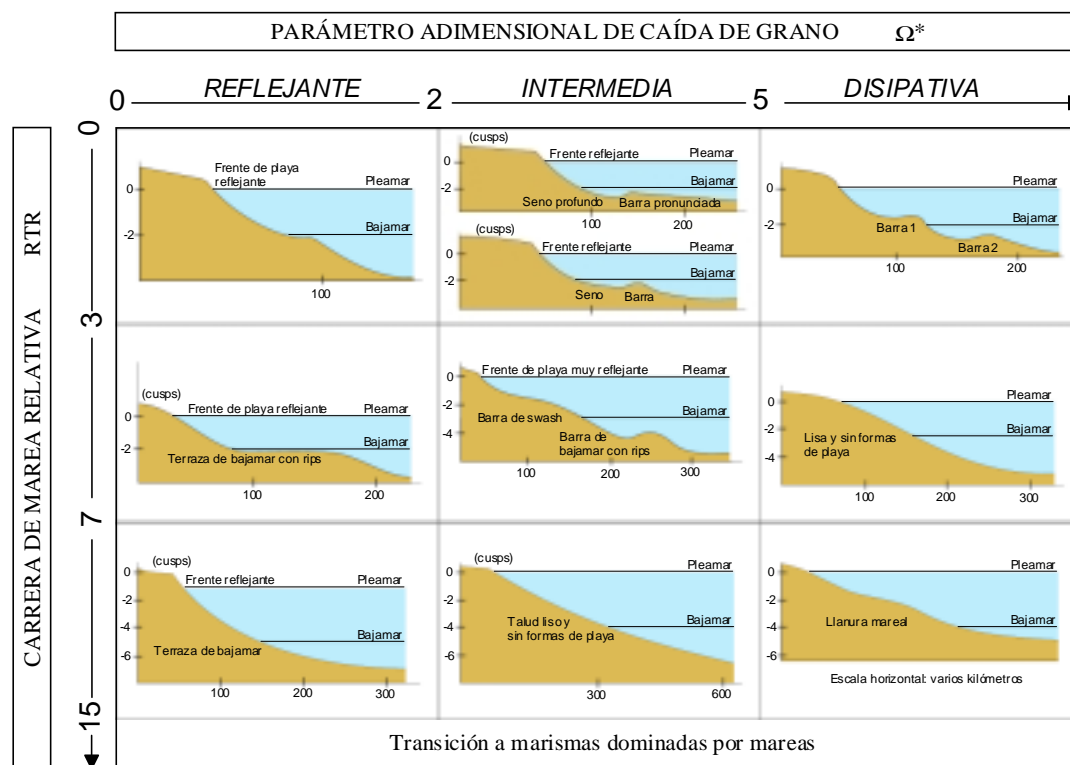
$w$  = velocidad de caída del grano



**Cuadro III.8.1.b.** Estados morfodinámicos de playas sin marea (Cont)

**Cuadro III.8.2.** Estados morfodinámicos de playas con marea

Masselink y Short (1993), completaron el modelo de Wright y Short (1984) introduciendo el efecto de la marea por medio del parámetro adimensional RTR, que mide la carrera de marea relativa a la altura de ola. Utilizando los parámetros RTR y  $\Omega^*$ , definieron los siguientes estados morfodinámicos:



Parámetro adimensional de caída del grano:  $\Omega^* = \frac{H_b}{wT}$

Carrera de marea relativa:  $RTR = \frac{MSR}{H_b}$

Donde:

$H_b$  = altura de ola significativa en rotura

$T$  = periodo de pico

$w$  = velocidad de caída del grano

$MSR$  = carrera de marea

**NOTA:** Véase Documento de Referencia para una descripción detallada de la metodología y dinámica de cada estado morfodinámico.



A partir de la clasificación obtenida en dichos cuadros se puede obtener:

- Nivel de seguridad de baño.
- Formas modales de playa.
- Hidrodinámica existente.

### **III.3.3.2 Formulaciones de diseño y prediseño a medio plazo**

El objetivo del análisis a medio plazo es determinar la variabilidad que la playa presenta en su ciclo invierno-verano tanto en lo que se refiere a su forma en planta, a su perfil y a su estado morfodinámico, al objeto de verificar que la funcionalidad de la playa es cumplida adecuadamente (por ejemplo, defensa de costa en invierno o uso lúdico en verano).

La evaluación de los fenómenos que ocurren en esta escala de tiempos presenta serias dificultades dado que su escala es demasiado grande para poder utilizar modelos de procesos (ola a ola), y demasiado pequeña para poder asumir que se ha alcanzado un equilibrio en ciertos fenómenos. En lo que sigue se realiza una revisión de las posibles vías existentes para el análisis de:

- a) perfil
- b) planta
- c) estado morfodinámico modal estacional

para, posteriormente, presentar una tabla resumen, tabla III.2

#### **a) Perfil**

Una de las características más comúnmente conocidas de los perfiles de playa es su variabilidad estacional con erosión en su parte emergida y acumulación de la zona sumergida en invierno y viceversa en verano. Este conocimiento, sin embargo, no se ha materializado en una capacidad de predicción de la misma. El motivo de esta laguna cabe encontrarlo en la escala temporal del fenómeno y en la no linealidad de los procesos involucrados en la erosión-acumulación de un perfil. De este modo, si bien se han propuesto diversos parámetros para determinar si un

perfil acumulará o erosionará en su parte emergida ante un temporal (ver apartado III.3.5 Corto plazo), no es posible conocer la respuesta acumulada ante una sucesión de eventos erosión-acumulación. Más aún, se ha comprobado numéricamente que, partiendo de una misma posición inicial de perfil y ante la misma sucesión de eventos, pero en distinto orden, la respuesta final es diferente. El problema no puede ser tratado, por tanto, desde un punto de vista determinista y debe analizarse desde una óptica estadística.

Si bien no existe ninguna formulación que permita estimar la variabilidad invierno - verano de la línea de costa, como criterio general puede decirse que:

- Es mayor cuanto mayor sea la variabilidad de los oleajes incidentes.
- Es mayor cuanto mayor sea la profundidad de cierre.
- Es mayor en estados morfodinámicos intermedios que en estados reflejantes o disipativos.

De este modo, las playas apoyadas en sustratos rocosos tienen menor variabilidad que las playas con un perfil completo de arena y una playa en una zona expuesta presenta una mayor variabilidad que otra en una zona protegida.

Es importante señalar que para que dicha variabilidad exista, ha de producirse una alternancia neta entre oleajes erosivos y oleajes acumulativos. En algunos casos, la acción del oleaje acumulativo puede ser insuficiente para eliminar de forma efectiva las barras longitudinales dando lugar a barras morfológicas o permanentes que presentan pequeñas oscilaciones, pero que no sufren una migración efectiva hacia la costa. Este hecho, que ocurre en diversas playas del Mediterráneo, podría asociarse a la ausencia de un Swell suficientemente energético para movilizar los sedimentos existentes.

#### **b) *Planta***

La forma en planta de una playa puede, también, modificar su geometría con una cadencia estacional. Varios son los factores a tener en cuenta:

1. Parte de los cambios en la forma en planta son debidos a las variaciones diferenciales en la geometría de los perfiles, (zonas abrigadas - zonas expuestas), especialmente en playas abrigadas con gran curvatura en planta.
2. La escala temporal de los cambios de forma en planta puede llegar a ser del

orden de meses, dependiendo de oleaje incidente, granulometría de la playa y extensión de la misma.

Dado que se desconoce, a priori, si una playa alcanzará durante una estación (por ejemplo verano) la posición última de equilibrio asociada a dicho oleaje estacional, cabe dos posibilidades de análisis:

a) *Asumir que se alcanza la posición de equilibrio estacional.*

En este caso se propondrán las condiciones de oleaje, fundamentalmente dirección y periodo, de cada estación y se determinará su planta de equilibrio. Esta opción es aplicable a playas encajadas y da una cota superior de la variabilidad en planta pudiendo ser utilizada a nivel de prediseño.

b) *Asumir que no se alcanza la posición de equilibrio estacional.*

En este caso se hace necesario la utilización de un modelo de evolución de la línea de costa (modelo de una línea) que permita determinar el nivel de cambio de la forma en planta ante una variación de las características del oleaje incidente. Esta opción es la más adecuada a nivel de diseño.

**c) *Estado morfodinámico modal estacional***

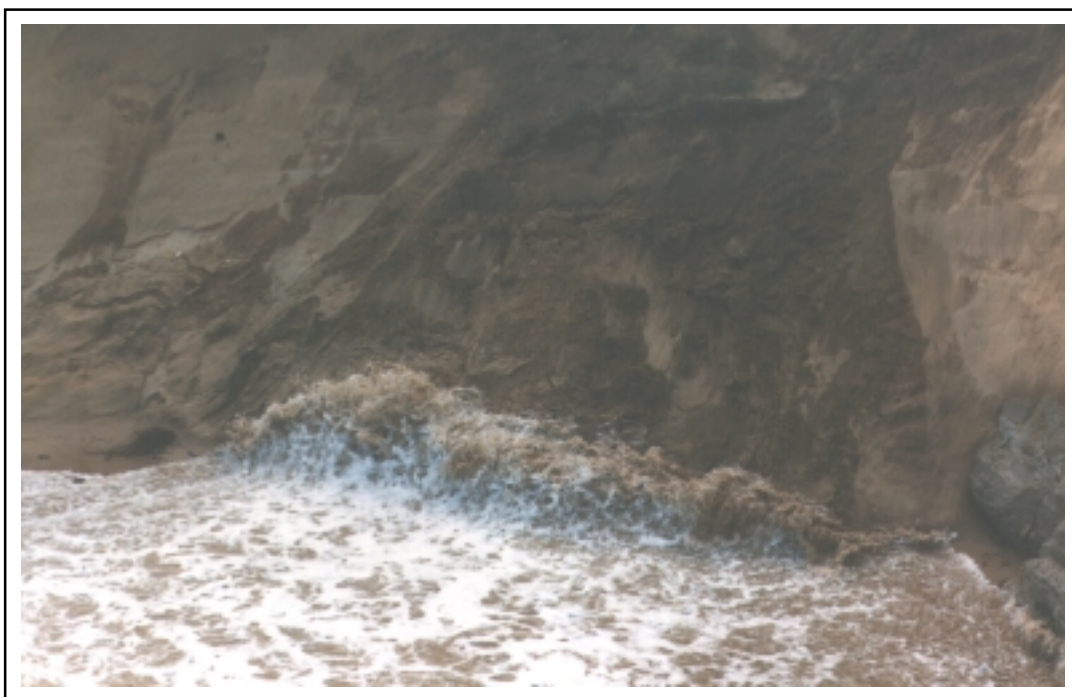
La velocidad de cambio de los estados morfodinámicos de una playa está relacionada, en mayor medida, con la respuesta del perfil de playa. En ese sentido, es razonable asumir que el estado morfodinámico de una playa es capaz de responder a los cambios estacionales de modo tal que se alcance un estado modal en equilibrio con las condiciones medias de verano y otro en equilibrio con las condiciones medias de invierno.

De este modo, deberá definirse las condiciones medias energéticas estacionales ( $H_b$ ,  $T$ ) y proceder de modo análogo a lo desarrollado en el apartado anterior (ver cuadros III.8.1 y III.8.2).

### III.3.3.3 *Formulaciones de diseño y prediseño a corto plazo*

El objetivo del diseño a corto plazo es doble: por un lado analizar la respuesta de la playa ante la acción de un evento y verificar que se cumplen los requisitos de funcionalidad, por otro, aportar información sobre los procesos costeros (sistema de corrientes, transporte potencial, ...) que permitan al proyectista entender la morfodinámica de la playa, realizar un diagnóstico de la misma y proponer alternativas de solución.

En lo que sigue se analizan las alternativas de estudio existentes, tanto para el análisis del perfil como de la planta de la playa a corto plazo presentándose, al final, una tabla resumen.



EROSIÓN DEL PIE DE UNA DUNA POR ACCIÓN DEL OLEAJE, SOMO, CANTABRIA

#### **a) Perfil**

El estudio de la respuesta del perfil de playa ante un evento de temporal se centra en la determinación de:

NIVEL DE CÁLCULO	GEOMETRÍA	SECCIÓN	FORMULACIÓN	DATOS NECESARIOS	TIPO DE DATOS	CUADRO	NOTAS
Prediseño	Playa encajada	Perfil					<ul style="list-style-type: none"> <li>· El resultado es una cota superior.</li> <li>· No se obtiene información sobre el tiempo.</li> </ul>
		Planta	Planta equilibrio estático	$\theta_0, (Y/L)$	Equilibrio	AII.5	
	Playa abierta	Perfil					
		Planta	Modelo una línea soluciones analíticas	$H_b, \theta_b, D_{50}$	Evolución	AII.7	
Diseño	Playa encajada	Perfil					<ul style="list-style-type: none"> <li>· Puede ser necesario un programa de propagación de oleaje</li> </ul>
		Planta	Modelo una línea solución numérica	$H_b(t), \theta_0(t), D_{50}, geometría$	Evolución	AII.4	
	Playa abierta	Perfil					<ul style="list-style-type: none"> <li>· Puede ser necesario un programa de propagación de oleaje</li> </ul>
		Planta	Modelo una línea solución numérica	$H_b(t), \theta_b(t), D_{50}, geometría$	Evolución	AII.4	

**Tabla III.2 Medio Plazo**

- (1) Retroceso de la línea de costa.
- (2) Forma final del perfil.
- (3) Cota de inundación del mar.

### *Retroceso de la línea de costa y forma final del perfil*

La determinación de la respuesta de la forma de un perfil a la acción de un temporal, y en particular la estima del retroceso de la línea de costa ante un evento de temporal requiere el uso de un modelo de evolución morfológica de perfil.

Existen dos tipos diferenciados de modelos de evolución morfológica de perfil:

1. *Modelos empíricos o cerrados.*

Estos modelos establecen, a priori, el perfil de equilibrio que alcanzará el perfil si la acción dura tiempo suficiente y determinan los cambios del perfil en función del grado de desequilibrio del mismo.

2. *Modelos de procesos o abiertos.*

Estos modelos no establecen a priori ningún perfil final, sino que determinan en cada instante el transporte de sedimentos debido a las condiciones hidrodinámicas y sedimentarias locales dejando que el perfil evolucione libremente.

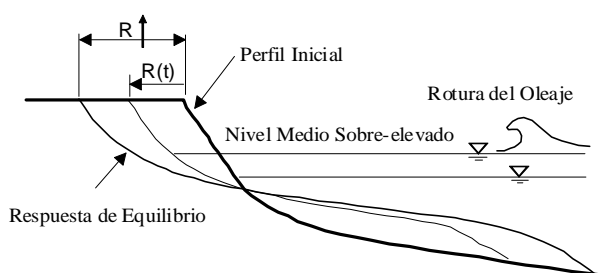
La vía empírica o cerrada permite aproximaciones simples al problema, como la propuesta por Kriebel y Dean (1993), según la cual el retroceso de la línea de costa se produce a una velocidad proporcional al desequilibrio del mismo, lo que conduce a una evolución de carácter exponencial. (Ver cuadro III.9.1.)

La vía de procesos requiere la existencia de varios modelos numéricos interconectados, (ver cuadro III.9.2):

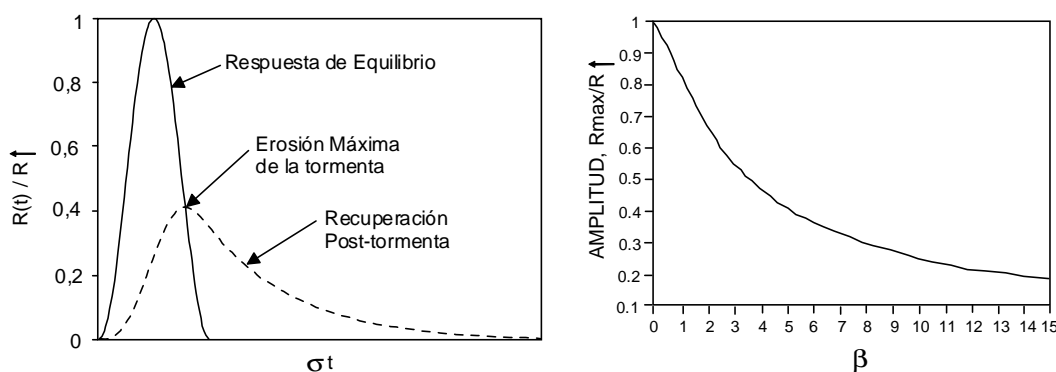
- *Módulo hidrodinámico:* que calcula el oleaje y las corrientes a lo largo del perfil.

**Cuadro III.9.1. Modelo aproximado de retroceso de la línea de costa ante un temporal.**

Cuando se produce un ascenso del nivel del mar, el perfil de playa erosiona la parte superior y acumula arena en la zona sumergida. Si el ascenso tiene duración suficiente, el perfil adoptará una nueva posición de equilibrio después de haber retrocedido la costa una magnitud  $R \uparrow$ , ver Cuadro A.II.2. Si la duración no es suficiente, el perfil habrá retrocedido una magnitud  $R(t)$ .

**RESPUESTA DEL PERFIL DE PLAYA**

Kriebel y Dean (1993), proponen que la velocidad de cambio (erosión) del perfil es proporcional al grado de desequilibrio del mismo, y de sarrollan una aproximación a  $R(t)$  basada en el método de convolución. El resultado más relevante de este modelo es que, dado que la respuesta del perfil no es instantánea, el retroceso máximo ante un ascenso de tipo  $\sin^2(\pi/T_D)$ , como se presenta en la Figura, es menor que el que predice la teoría de equilibrio.

**RETROCESO DEBIDO A LA TORMENTA Y PREDICCIÓN DE LA RECUPERACIÓN DEL PERFIL DE PLAYA**

La máxima erosión,  $R_{max}$ , es función del parámetro  $\beta$ , que mide la relación entre la duración del ascenso,  $T_D$ , y la escala de variación del perfil,  $T_s$  (tiempo que tarda el perfil en alcanzar el 63% del retroceso).

$$\beta = \frac{2\pi T_s}{T_D}$$

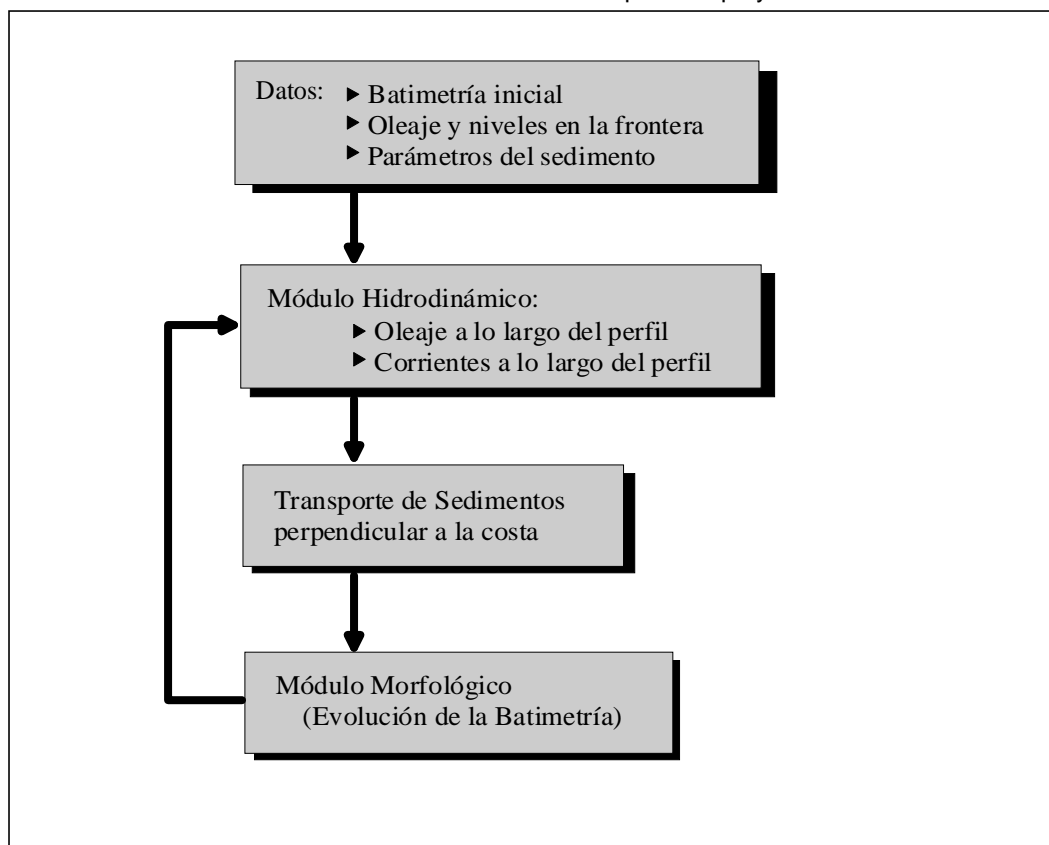
$$T_s \approx 320 \frac{H_b^{3/2}}{g^{1/2} A^3} \left( 1 + \frac{h^*}{B} + \frac{m W^*}{h^*} \right)^{-1}$$

(ver Cuadros A.II.1 y A.II.4.6 para la definición de la notación)

- *Módulo de transporte*: que evalúa el transporte por fondo y en suspensión a lo largo del perfil.
- *Módulo morfológico*: que actualiza la batimetría en cada paso de tiempo.

Esta vía es la seguida en el modelo PETRA presentado en el S.M.C.

**Cuadro III.9.2.** Módulos del modelo de evolución del perfil de playa





### *Cota de inundación*

La cota de inundación, o cota máxima alcanzada por la acción conjunta de la marea astronómica, marea meteorológica y ascenso del oleaje en una playa, es una variable aleatoria que ha de obtenerse como suma de las variables deterministas y aleatorias anteriormente citadas.

En el Documento Temático “Cotas de Inundación”, se desarrolla con detalle la metodología de cálculo de esta variable y se incluyen unos atlas de cota de inundación en playas del litoral español obtenidos con base en los datos de oleaje y marea del programa de Clima Marítimo (Puertos del Estado - CEDEX).

A nivel de prediseño, y como valor orientativo, puede adoptarse como nivel de cota de inundación el obtenido como suma del nivel de marea (astronómico + meteorológico) propuesto por la ROM 02.91 para las diferentes fachadas (ver cuadro III.10) más el nivel máximo de ascenso por oleaje propuesto por Holman (1986).

### **b) *Planta***

La evolución a corto plazo de la forma en planta de una playa puede ser analizada por medio de la utilización conjunta de una serie de modelos numéricos que interactúan entre sí, ver cuadro III.11. Estos modelos incluyen:

- Propagación de oleaje (OLUCA)
- Sistema de corrientes (COPLA)
- Transporte de sedimentos y evolución morfológica (MOPLA)

La metodología de uso de los programas anteriores se presenta en los manuales de referencia y usuario del S.M.C.

**Cuadro III.10.a. Niveles de cálculo de prediseño (ROM 02.90)**

<p>A falta de datos más específicos podrá adoptarse como cota máxima alcanzada por el oleaje en una playa, a la suma del nivel de marea (asociado a la marea astronómica y meteorológica) facilitado por la ROM 02.90 y el ascenso del 2% debido al oleaje (Run-up del 2%) obtenido a partir de la formulación de Holman (1986).</p> <p>Cota máxima <math>\approx</math> Nivel de marea + Ascenso oleaje (2%)</p>					
		Mar con marea astronómica	Mar sin marea astronómica significativa	Zonas con marea astronómica sometidas a corrientes fluviales	Corriente fluvial no afectada por mareas
En condiciones normales de operación	Nivel máximo	PMVE	NM + 0,3 m	PMVE y MNI	MNI
	Nivel mínimo	BMVE	NM – 0,3 m	BMVE y NME	NME
En condiciones extremas	Nivel máximo	PMVE + 0,5 m	NM + 0,8 m	PMVE y NmaxA	NmaxA
	Nivel mínimo	BMVE – 0,5 m	NM – 0,8 m	BMVE y NminE	NminE

**LEYENDA**

PMVE: Pleamar máxima viva equinoccial.  
 BMVE: Bajamar mínima viva equinoccial.  
 NM: Nivel Medio del Nivel del Mar referido al cero hidrográfico de las costas.

$$NM = \frac{PMVE + BMVE}{2}$$

CARRERA DE MAREA (Astronómica):  $h = PMVE - BMVE$   
 MNI: Media de los niveles máximos anuales en corrientes fluviales.  
 NME: Nivel Medio de Estiaje en corrientes fluviales.  
 NmaxA: Nivel Máximo de Avenida correspondiente al periodo de retorno asociado al máximo riesgo admisible.  
 NminE: Nivel Mínimo de Estiaje correspondiente al periodo de retorno asociado al máximo riesgo admisible.  
 A falta de datos más precisos podrán adoptarse los siguientes NM y Carreras de Marea aproximados:

Fachada Marítima	Puerto	NM (en m)	Carrera de Marea (en m)	Fachada Marítima	Puerto	NM (en m)	Carrera de Marea (en m)
Norte	Pasajes	2,30	4,60	Galicia	Burela	2,15	4,50
	Bilbao	2,25	4,60		Ferrol	2,10	4,50
	Castro Urdiales	2,25	5,30		La Coruña	2,05	4,50
	Santander	2,30	5,40		Malpica	2,05	4,00
	San Vicente de la Barquera	2,30	5,20		Villagarcía	2,05	4,00
	Gijón	2,30	4,60		Marín	1,90	4,00
	Avilés	2,20	4,60		Vigo	1,95	4,00
	Luarca	2,40	4,70				

**Cuadro III.10.b.** Niveles de cálculo de prediseño (Cont.) (ROM 02.90)

Fachada Marítima	Puerto	NM (en m)	Carrera de Marea (en m)	Fachada Marítima	Puerto	NM (en m)	Carrera de Marea (en m)
Suratlántica	Ayamonte	1,75	3,60	Canarias	San Sebastián de la Gomera	1,15	2,40
	Huelva	1,85	3,70		La Estaca	1,70	3,00
	Sevilla (esclusa) (en estiaje)*	0,65	2,50		Puerto de la Luz	1,50	3,00
	Chipiona	1,80	3,50		Mogán	1,25	2,60
	Rota	1,80	4,00		Arrecife de Lanzarote	1,50	3,00
	Cádiz	1,80	4,00		Puerto del Rosario	1,45	2,90
	Barbate	1,40	3,20		Algeciras	0,60	1,30
	Tarifa	0,70	1,60		Ceuta	0,60	1,40
Canarias	Santa Cruz de Tenerife	1,30	2,70	Surmedi- terránea	Málaga	0,50	0,80
	Los Cristianos	1,20	2,50		Melilla	0,30	0,60
	Santa Cruz de la Palma	1,25	2,60		Almería	0,30	0,60

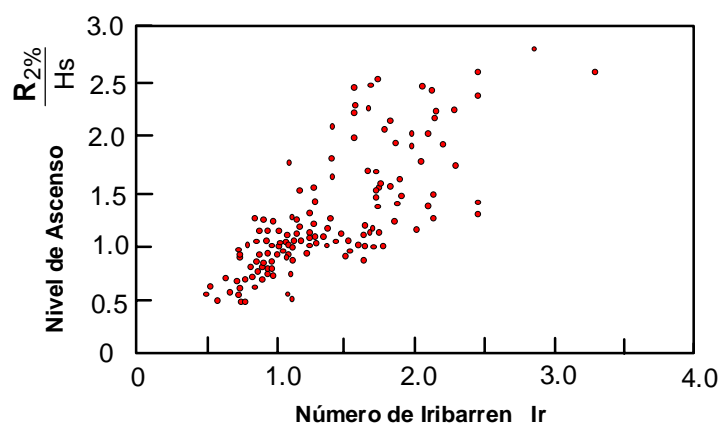
NOTA:

(\*) Aproximadamente el caudal fluvial influye aumentando la pleamar en 0,6 mm y en 1 mm la bajamar por cada m<sup>3</sup>/s. En crecidas extremas se ha llegado a estimar 8.000 m<sup>3</sup>/s. El caudal de estiaje puede descender a 10 m<sup>3</sup>/s.

Basado en datos de campo, Holman (1986) propuso, para la determinación del ascenso debido al oleaje del 2% (ascenso que es superado por el 2% de las olas), la expresión:

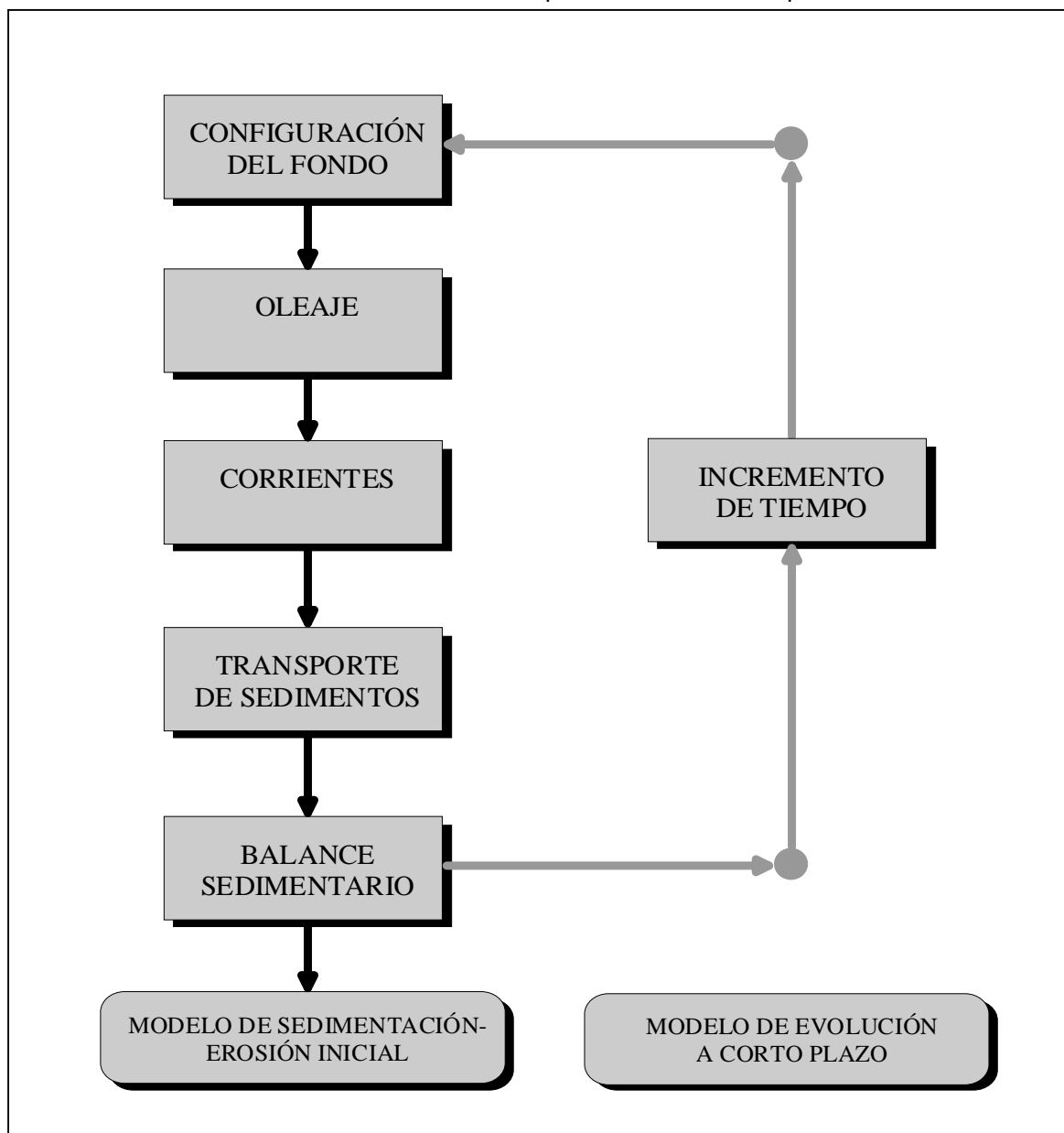
$$R_{2\%} = (0,78 Ir + 0,2) H_s$$

Donde:  $H_s$  es la altura de ola significante e  $Ir$  es el número de Iribarren



NIVEL DE CÁLCULO	GEOMETRÍA	SECCIÓN	FORMULACIÓN	DATOS NECESARIOS	TIPO DE DATOS	CUADRO
Prediseño	Playa encajada	Perfil	Evolución perfil equilibrio Cota inundación	$H_s, T_D$ $H_s, I_{rb}$	Condición extrema	III.9 III.10
		Planta	--			
	Playa abierta	Perfil	Evolución perfil equilibrio Cota inundación	$H_s, T_D$ $H_s, I_{rb}$	Condición extrema	III.9 III.10
		Planta	--			
Diseño	Playa encajada	Perfil	Modelo evolución perfil Cota inun. probabilística	$H_b(t), D_{50}, geometría$ --	Condición extrema	Ver Manuales PETRA y S.M.C.
		Planta	Modelo 2DH de playas	$H_o(t), \theta_o(t), T(t), D_{50},$ $geometría$	Condición extrema + Condición media	Ver Manuales MOPLA y S.M.C.
	Playa abierta	Perfil	Modelo evolución perfil Cota inun. probabilística	$H_b(t), D_{50}, geometría$ ---	Condición extrema	Ver Manuales PETRA y S.M.C.
		Planta	Modelo 2DH de playas	$H_o(t), \theta_o(t), T(t), D_{50},$ $geometría$	Condición extrema + Condición media	Ver Manuales MOPLA y S.M.C.

### III.3. Corto Plazo

**Cuadro III.11.** Modelo de evolución a corto plazo de la forma en planta

### III.3.4 Estrategias de uso de las formulaciones

Las formulaciones presentadas en los cuadros anteriores utilizan diferentes tipos de datos de entrada y persiguen objetivos tan dispares como la determinación del retroceso de la línea de costa ante un evento extraordinario de oleaje o la descripción del sistema de corrientes de playa en situación media de verano. Es evidente que, la estrategia de uso de las formulaciones y/o de los datos de entrada no es la misma y debe ser acorde al objetivo perseguido. En el presente apartado se detalla la estrategia de uso de las formulaciones de cálculo de estabilidad y evolución de playa, de acuerdo con los objetivos planteados en cada escala de tiempo de estudio, ver tabla III.4.

ESCALA DEL ESTUDIO	TIPO DE FORMULACIÓN	DATOS PREDISEÑO	DATOS DISEÑO
Largo y Medio Plazo	Equilibrio	Valores medios de parámetros involucrados ( $D_{50}$ , $\theta_0$ , ...)	Valores medios + Variabilidad valores medios + Ajustes playas cercanas
	Evolución	Agrupación de datos de series temporales ( $H_b(t)$ , $\theta_b(t)$ , ...)	Agrupación de datos + Simulación de eventos aleatorios
Corto Plazo	Condiciones extremas	Acción correspondiente a periodos de retorno	Acción correspondiente a periodos de retorno
	Condiciones medias	Valores característicos: * Frecuentes + * Excepcionales de interés	Valores característicos: * Frecuentes + * Excepcionales de interés

**Tabla III.4. Datos necesarios en función del tipo de formulación usada**

### III.3.4.1 *Largo plazo*

#### *Formulaciones de equilibrio*

Las formulaciones de equilibrio, tanto de perfil como de planta, no dependen de ninguna variable temporal, pudiendo ser asimiladas a formulaciones con cargas permanentes (ver ROM 02-90), esto es, cargas constantes en posición y magnitud o con variación lenta o despreciable en comparación con su valor medio.

Para este tipo de formulaciones, y a nivel de prediseño, bastará con utilizar el valor medio de las variables de entrada ( $D_{50}$ ,  $\theta_0$ ,  $H_{s12}$ ). A nivel de diseño, sin embargo, será necesario analizar la variabilidad o dispersión de las variables respecto a su valor medio. De acuerdo con la ROM 02-90 se estudiarán los valores correspondientes a probabilidades de excedencia del 5% y del 95% respectivamente.

Es importante recordar en este punto que la variabilidad de los resultados puede estar originada no solo por la variabilidad de los datos de entrada ( $D_{50}$ ,  $\theta_0$ ), sino por la propia variabilidad dentro de la formulación que está basada en ajustes (por ejemplo, parámetro  $A$  -  $D_{50}$ ). En ese sentido, a nivel de diseño es imprescindible que los parámetros de las formulaciones ( $A$ ,  $\theta_0$ ) estén verificados con ajustes en playas cercanas a la zona de estudio.

#### *Formulaciones de evolución*

Las formulaciones de evolución a largo plazo tienen como objetivo la determinación de la posición media o más probable de la playa a lo largo del tiempo y utilizan datos de variables ( $H_b(t)$ ,  $\theta_0(t)$ ,  $T(t)$ ) temporales aleatorias. La utilización de este tipo de formulaciones requiere dos tipos de actuaciones complementarias una de la otra:

- a) Agrupación de datos.
- b) Simulación de eventos aleatorios.

La primera está relacionada con la imposibilidad de abordar el problema de manera continua (por ejemplo, oleaje de centímetro en centímetro, dirección de minuto en minuto) lo que da lugar a una agrupación de los datos en sectores y rangos de oleaje.

La segunda responde a la naturaleza aleatoria y no lineal del problema que da

lugar a que la energía que recibe una playa en un año no tiene porqué ser igual a la energía media anual y, más aún, dos años de la misma energía media pero con eventos de temporal con diferente secuencia dan como resultado una evolución diferente.

### a) *Agrupación de datos*

El objetivo de la agrupación de datos es representar el clima marítimo de una zona por medio de un número reducido de condiciones representativas de modo tal que, dichas condiciones representativas permitan estimar adecuadamente el transporte de sedimentos y la evolución de la línea de costa a largo plazo.

El punto de partida de todos los métodos de agrupación de datos es una tabla de probabilidad de presentación de oleajes por alturas de ola, dirección y periodo. Esta tabla representa, ya de por sí, una primera agrupación de datos y el objetivo es reducir el número de casos de dicha tabla. Los diferentes criterios de agrupación se basan en la expresión:

$$\bar{Q} = \left( \frac{\sum_i f_i Q_i}{\sum f_i} \right)$$

donde  $Q_i$  es el transporte de la i-ésima-combinación de ola-dirección,  $f_i$  es la frecuencia de presentación de la i-combinación y  $\bar{Q}$  es el transporte medio.

Steijn (1982) propone utilizar el parámetro  $P_i$  (potencia longitudinal  $P = (E C_g \sin 2 \theta_r)$ ) como representativo de  $Q_i$ . Chesher y Miles (1992) proponen que, para cada sector de interés,  $\theta_0$ , el transporte depende fundamentalmente de  $H^2$  por lo que puede obtenerse una altura de ola representativa del transporte medio como:

$$H_R = \left( \frac{\sum f_i H_i^2}{\sum f_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$



El proceso de agrupación sería, en este caso:

- Seleccionar las direcciones de interés.
- Obtener la altura de ola representativa para cada sector.

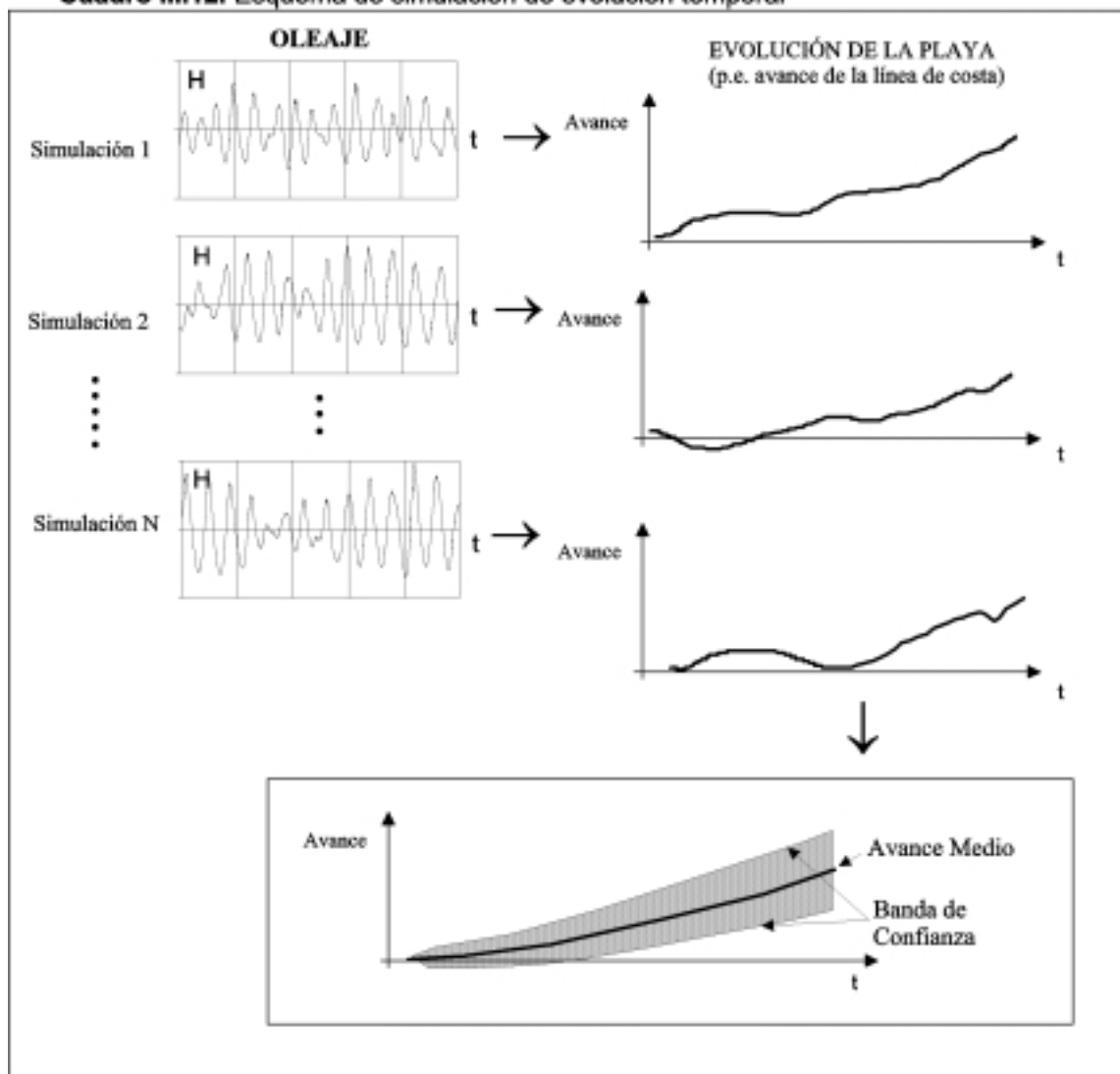
#### **b) *Simulación de eventos aleatorios***

Salvo que en el proceso de agrupación de datos se haya seleccionado una única dirección y altura de ola representativa, en cuyo caso solo existe un evento con probabilidad de ocurrencia igual a la unidad (opción válida en prediseño con modelos analíticos), existirán diversos eventos posibles de dirección y altura de ola representativa, cada uno de los cuales tiene una probabilidad de ocurrencia.

La manera de proceder en este caso es realizar una simulación de Montecarlo que genere una serie temporal de eventos posibles, de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia. Esta simulación deberá repetirse un número suficiente de veces al objeto de poder evaluar cuál será la evolución media y la dispersión de la evolución en torno a dicha media, (ver cuadro III.12).

#### **III.3.4.2 *Medio plazo***

En el análisis a medio plazo se utiliza el mismo tipo de formulaciones de equilibrio y de evolución que en el análisis a largo plazo y los objetivos del análisis son análogos, por lo que la estrategia de uso de los mismos es idéntica a lo expresado en el apartado III.3.4.1 (ver tabla III.4).

**Cuadro III.12.** Esquema de simulación de evolución temporal

### **III.3.4.3 Corto plazo**

#### ***Formulaciones de condiciones extremas***

Uno de los objetivos del análisis a corto plazo es determinar la respuesta de la playa ante la acción de un temporal al objeto de verificar que se garantiza su función de defensa de costa, tanto en lo que se refiere al retroceso de la línea de costa, como a la cota de inundación alcanzada.

Estas formulaciones de variables aleatorias (oleaje, marea meteorológica, ...) y la selección de los valores representativos de las mismas debe realizarse, de acuerdo con la ROM 02-90, a partir de datos estadísticos de las mismas. La citada publicación establece la vida útil y el riesgo aceptable en las obras de defensa de costa en función de una serie de parámetros. A partir de dicha vida útil y riesgo se determina el periodo de retorno o lo que es lo mismo, el valor representativo de la carga que ha de utilizarse en la formulación de condiciones extremas. Estos aspectos han sido desarrollados con detalle en el apartado III.2.3 Criterios de valoración (ver también cuadros III.3).

La altura de ola en función del periodo de retorno en las diferentes fachadas españolas, así como el periodo asociado a dicha ola, pueden obtenerse en la ROM 03-91. La cota de inundación en función del periodo de retorno para las diferentes fachadas puede ser obtenida, análogamente, en el Documento Temático “Cota de Inundación”

#### ***Formulaciones de condiciones medias***

El segundo objetivo del estudio de la estabilidad de una playa a corto plazo es el análisis de los procesos morfodinámicos de la misma, que permita la correcta caracterización de la dinámica litoral de la zona de estudio. La imposibilidad de analizar todas las combinaciones de altura de ola - dirección - periodo - marea conlleva la necesidad de seleccionar un número reducido de casos que permitan, de una manera adecuada, alcanzar los objetivos previstos.

Es importante señalar que la selección de los casos a estudiar no se ha de realizar con criterios de agregación, como se hizo en los modelos de evolución, puesto que el objetivo que se persigue es diferente. En el presente tipo de análisis se persigue la caracterización de la dinámica litoral, por lo que es necesario seleccionar lo que denominaremos “casos característicos”. Esos casos característicos deben cubrir las:

- a) Situaciones más frecuentes.
- b) Situaciones de interés especial.

En lo que sigue se desarrolla una serie de criterios para la selección de los casos característicos, no obstante es importante señalar que alguna de las situaciones excepcionales de interés responden a circunstancias geométricas locales (por ejemplo, ola máxima que rompe en el sustrato rocoso en el que apoya la playa, ...) siendo el proyectista quien debe definir estos casos excepcionales.

**a) *Situaciones más frecuentes***

**Marea:** En mares con marea deberá analizarse, al menos, la dinámica litoral en situación de pleamar y bajamar. En playas cercanas a desembocaduras o afectadas por corrientes mareales de bahías y estuarios deberá analizarse, además, la situación de media marea llenante y media marea vaciante, con inclusión de las corrientes mareales.

**Altura de ola:** Se considerará, al menos, una situación de baja energía (por ejemplo, altura media anual, oleaje medio de verano, ...) y una situación de alta energía (por ejemplo, temporal de retorno 1 a 5 años, oleaje medio de invierno, ...) para cada una de las direcciones de interés.

**Periodo:** Salvo que así se estime como situación excepcional de interés, se adoptará como periodo el asociado a la altura de ola escogida, de acuerdo con la ROM 03-91.

**Dirección:** Se considerarán, al menos, todos los sectores que presenten una probabilidad de ocurrencia mayor que el 15% del tiempo calculando dicho porcentaje con los valores propuestos en la ROM 03-91 para los sectores posibles en la playa objeto de estudio y excluyendo las calmas.

**b) *Situaciones de interés especial***

Entre estas situaciones destacamos:

- Temporal de periodo de retorno dado.
- Direcciones poco frecuente pero excepcionalmente energéticas.
- Periodos diferentes al periodo medio asociado a la altura de ola significativa, en el caso de espectros bimodales (por ejemplo, Mar de Alborán).

## **SECCIÓN IV**

### **SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LOS PROYECTOS DE REGENERACIÓN DE PLAYAS**

---

## **Sección IV. Seguimiento y Evaluación de los Proyectos de Regeneración de Playas**

IV.	SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LOS PROYECTOS DE REGENERACIÓN DE PLAYAS .....	IV.2
IV.1	Introducción .....	IV.2
IV.2	Planificación de las campañas de seguimiento de playas .....	IV.3
IV.3	Escalas espacio-temporales de los cambios morfológicos en las playas .....	IV.11
IV.3.1	Clasificación temporal de los procesos de cambio de las playas: procesos tendencia, semiperiódicos y singulares .....	IV.15
IV.4	Planificación espacio-temporal de las campañas de seguimiento de playas .....	IV.17
IV.4.1	Definiciones para la planificación de seguimientos de procesos en playas .....	IV.18
IV.4.2	Técnicas de muestreo en el seguimiento de playas .....	IV.20
IV.4.3	El muestreo temporal en las campañas de seguimiento playas .....	IV.21
IV.4.4	El muestreo espacial en las campañas de seguimiento playas .....	IV.34
IV.5.	Ejemplo: diseño del seguimiento de un cambio singular. Playa de Somo. Santander .....	IV.36
IV.5.1	Antecedentes .....	IV.36
IV.5.2	Objetivo del seguimiento .....	IV.39
IV.5.3	Estudio de los procesos morfodinámicos. Selección de los procesos objetivo del seguimiento .....	IV.39
IV.5.4	Funcionales y variables de medida .....	IV.43
IV.5.5	Escalas de espacio y tiempo involucradas en los procesos objetivo .....	IV.44
IV.5.6	Diseño temporal del seguimiento .....	IV.45
IV.5.7	Diseño espacial del seguimiento .....	IV.46

## **IV. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LOS PROYECTOS DE REGENERACIÓN DE PLAYAS**

### **IV.1 Introducción**

Las playas son estructuras altamente flexibles, que se deforman en respuesta a la acción de causas naturales, como el oleaje y el viento, o por las actuaciones humanas. La arena componente de la playa no siempre queda aislada en la misma, sino que forma parte del balance sedimentario litoral, con frecuencia asociado a escalas de espacio y tiempo muy superiores a las correspondientes al tramo de playa que se pretende estudiar.

Dado el carácter aleatorio del clima, el comportamiento de una playa sólo puede ser analizado de una forma estadística. Aunque fuera posible determinar la secuencia exacta de eventos climáticos que se producirán en una playa, los modelos de evolución de playas existentes en la actualidad sólo son válidos para determinados rangos de las escalas de espacio y tiempo. Por ello, no es posible determinar la evolución a largo plazo de una playa ante una determinada secuencia climática mediante la aplicación de dicha secuencia a los modelos de evolución a corto plazo.

Para resolver los inconvenientes anteriores, se emplea modelos de “equilibrio”, que analizan el comportamiento de la playa ante situaciones estables medias o límites. El conocimiento de estos estados de equilibrio, facilita una herramienta para la predicción de la evolución de la playa. Sin embargo, estos modelos idealizan la realidad, por lo que una parte importante de la información sobre la variabilidad de la playa se pierde. Por ello, todas las actuaciones en playas deben ir acompañadas de campañas de tomas de datos que faciliten información sobre la citada variabilidad y permitan la mejora de los modelos predictivos en todas las escalas.

Se denomina seguimiento de una playa a la ejecución de una serie de campañas de toma y análisis de datos de la playa, que faciliten información sobre el estado de la playa y su evolución en el tiempo y el espacio. Los seguimientos de playas aportan información experimental con los siguientes objetivos:



- 1- Determinar la situación evolutiva de una playa.
- 2- Determinar la bondad de las predicciones sobre la evolución de una playa.
- 3- Corregir las predicciones de comportamiento.
- 4- Mejorar las herramientas de predicción.

La mayoría de los seguimientos de playa se diseñan con el objetivo 2. Este capítulo, sin embargo aborda el problema general del diseño de seguimientos para cualquiera de los objetivos señalados. El objetivo 4, sin embargo, tiene un carácter mucho más específico y entra más en el campo experimental, por lo que queda fuera del alcance de este Manual.

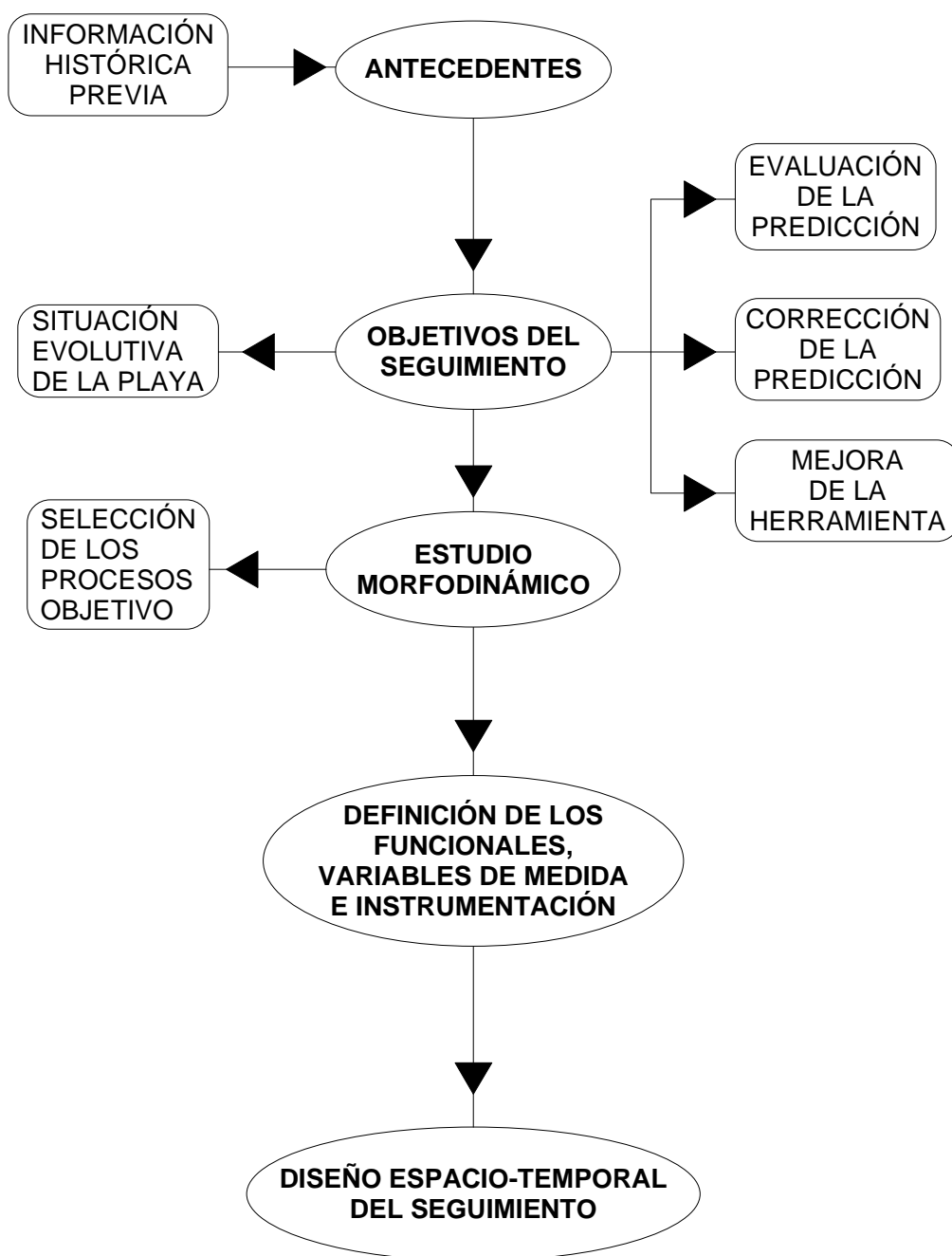
## **IV.2 Planificación de las campañas de seguimiento de playas**

Los seguimientos de playas se diseñan con el objeto de determinar la evolución de una playa determinada en el espacio y en el tiempo. La mayoría de los seguimientos se diseñan a posteriori de una determinada actuación en la playa, con el objeto de determinar su rendimiento y mejorar la predicción. En algunos casos, es la necesidad de evaluación de la evolución natural de la playa la que motiva el seguimiento. En este caso, el seguimiento sirve a la toma de decisión sobre la actuación a realizar.

Este apartado resume la metodología a seguir en la planificación de una campaña de seguimiento de playas. En el diseño de un seguimiento deberá llevarse a cabo los siguientes pasos (ver también el cuadro IV.1):

### **1- *Antecedentes***

Este apartado contiene un resumen de toda la información histórica relevante a la actuación realizada en la playa que será objeto de seguimiento.



## ETAPAS DEL PROYECTO DE UN SEGUIMIENTO

Cuadro IV.1

Con carácter general, las actuaciones en playas consisten en la creación, regeneración o mantenimiento de las mismas para cumplir uno o varios de los siguientes objetivos funcionales de carácter general:

- 1) Creación, regeneración o mantenimiento de valores paisajísticos, recreacionales y turísticos.
- 2) Protección de la línea de costa o mantenimiento de una determinada infraestructura.
- 3) Creación, regeneración o mantenimiento de un hábitat específico.

Como se ha indicado anteriormente, no es necesario que una playa haya sufrido una determinada actuación para que sea objeto de seguimiento. En muchos casos, es la necesidad de información sobre los procesos naturales a largo plazo lo que determina la necesidad del seguimiento. En este caso, el seguimiento facilitará la decisión sobre la actuación a realizar.

## **2- *Objeto del seguimiento***

En el apartado IV.1 se ha indicado que los objetivos generales de los seguimientos de playas es alguno de los siguientes:

- 1- Determinar la situación evolutiva de una playa.
- 2- Determinar la bondad de las predicciones sobre la evolución de una playa.
- 3- Corregir las predicciones de comportamiento.
- 4- Mejorar las herramientas de predicción.

La consecución de estos objetivos se realizará mediante el seguimiento de uno o varios de los procesos de la dinámica de la playa.

### **3- *Estudio de los procesos morfodinámicos en la playa. Selección de los procesos objetivo del seguimiento***

Como se ha indicado en el párrafo anterior, el seguimiento de una playa se concreta en la evaluación espacio-temporal de alguno de los procesos que tienen lugar en la misma, ver por ejemplo la tabla IV.1.

El conocimiento general de la morfodinámica de la playa objeto del seguimiento permitirá la selección de aquellos procesos que serán objeto de evaluación (que constituyen los objetivos específicos del seguimiento). El análisis morfodinámico de la playa objeto del seguimiento deberá hacerse siguiendo las recomendaciones de las secciones 2 y 3 de este Documento Temático. En la tabla IV.1 se indican algunos de los procesos generales que son objeto de seguimiento en playas y las variables de medida involucradas en su determinación.

### **4- *Funcionales, variables de medida e instrumentación***

Una vez seleccionados los procesos objetivo del seguimiento es necesario definir los funcionales que cuantifican el proceso objetivo del seguimiento. Estos funcionales dependerán de una serie de variables que deberán medirse en la playa con una resolución espacio-temporal y precisión a determinar. La tabla IV.2 muestra algunos ejemplos de posibles procesos objetivo y las variables que sería necesario medir para un seguimiento completo del mismo. Por lo que respecta a la instrumentación requerida, la tabla IV.3 facilita la elección de la instrumentación más adecuada para la medida de cada variable.

### **5- *Escalas de espacio y tiempo involucradas en los procesos objetivo***

La definición temporal (secuencia de campañas) y espacial (resolución espacial de las medidas) del seguimiento depende de las escalas espacio - temporales de los procesos objetivo del seguimiento. El apartado IV.3 de este documento analiza las escalas espacio-temporales de diferentes procesos involucrados en la dinámica de playas.

PROCESO	VARIABLES DE MEDIDA (ENTRE PARÉNTESIS, POSIBLES ALTERNATIVAS)
Oleaje escalar fuera de la zona de rotura	(1) $\eta(x_0, y_0, t)$ , (2) $\eta_{tt}(x_0, y_0, t)$ , (3) $p(x_0, y_0, z_0, t)$
Oleaje direccional.	(1) $\eta(x_i, y_i, t)$ , (2) $\eta_{tt}(x_i, y_i, t)$ , (3) $p(x_i, y_i, z_i, t)$ ; $i=1, 2, 3$ (4) $\eta_x(x_0, y_0, t)$ , $\eta_y(x_0, y_0, t)$ , $\eta_{tt}(x_0, y_0, t)$ (5) $p(x_0, y_0, z_0, t)$ , $u(x_0, y_0, z_0, t)$ , $v(x_0, y_0, z_0, t)$ (6) $\eta(x_0, y_0, t)$ , $u(x_0, y_0, z_0, t)$ , $v(x_0, y_0, z_0, t)$ (7) Medida de oleaje escalar + imagen de radar.
Corrientes	(1) $u(x_0, y_0, z_0, t)$ , $v(x_0, y_0, z_0, t)$ , $w(x_0, y_0, z_0, t)$ (2) $x(z_0, t)$ , $y(z_0, t)$ de un flotante. (3) $c(x, y, z, t)$ de colorante en un área.
Ondas largas en playas	(1) $p(x_i, y_i, z_i, t)$ , $u(x_i, y_i, z_i, t)$ , $v(x_i, y_i, z_i, t)$ , $i=1, \dots, k$ ; $k \gg 3$ (2) $\eta(x_i, y_i, t)$ , $u(x_i, y_i, z_i, t)$ , $v(x_i, y_i, z_i, t)$ , $i=1, \dots, k$ ; $k \gg 3$
Transporte de sedimentos	(1) $c(x, y, z, t)$ , $u(x, y, z, t)$ , $v(x, y, z, t)$ (2) $M(x, y, z, t)$ , $u(x, y, z, t)$ , $v(x, y, z, t)$ (3) $c(x, y, t)$ de trazadores de arena. (4) $M(x, y, z, t)$ almacenada en trampas de arena.
Evolución geométrica de la playa	(1) $h(x, y, t)$ (2) $x=f(y, t)$ de una batimétrica o línea singular determinada.

$\eta$ :	Desplazamiento vertical de la superficie libre.
$\eta_{tt}$ :	Aceleración de la superficie libre.
$\eta_x, \eta_y$ :	Pendientes de la superficie libre.
$u, v, w$ :	Componentes horizontales y vertical de la velocidad.
$c$ :	Concentración.
$p$ :	Presión.
$h$ :	Cota del terreno o del fondo.
$M$ :	Masa.
$x, y, z, t$ :	Coordenadas de espacio y tiempo.

Tabla IV.2. Procesos y variables de medida

OBJETIVO DE LA ACTUACIÓN	PROCESOS OBJETIVO DEL SEGUIMIENTO	VARIABLES DE MEDIDA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PROCESO
Paisajístico, recreacional o turístico.	<input type="checkbox"/> Extensión de la playa seca. <input type="checkbox"/> Extensión de playa intermareal. <input type="checkbox"/> Retroceso de la línea del pie de duna. <input type="checkbox"/> Evolución morfodinámica de la playa.  <input type="checkbox"/> La calidad física y microbiológica del agua.	<input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría <input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría. <input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría. <input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría, velocidades, presiones o sup. libre del mar. <input type="checkbox"/> Transparencia del agua, microbiología del agua.
Defensa de costas.	<input type="checkbox"/> La erosión del pie de la duna. <input type="checkbox"/> Evolución de las formas rítmicas en el frente de playa <input type="checkbox"/> Variación del volumen total de arena en la playa. <input type="checkbox"/> Transporte longitudinal de sedimentos.  <input type="checkbox"/> Ondas largas en playas.	<input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría. <input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría. <input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría. <input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría, velocidades, presiones o sup., concentración sed. suspensión, concentración trazador. <input type="checkbox"/> Cota del terreno, altura y período del oleaje, granulometría, velocidades, presiones o sup. libre del mar.
Creación, regeneración o mantenimiento de un hábitat específico.	<input type="checkbox"/> Extensión y calidad del sedimento. <input type="checkbox"/> Calidad de las aguas.  <input type="checkbox"/> Flora y fauna acuática y del bentos.	<input type="checkbox"/> Cota, altura y período oleaje, granulometría, composición del sedimento. <input type="checkbox"/> Cota, altura y período oleaje, granulometría, composición del sedimento, transparencia del agua, materia disuelta, temperatura, nutrientes, plancton. <input type="checkbox"/> Cota, altura y período oleaje, granulometría, composición del sedimento, transparencia del agua, materia disuelta, temperatura, nutrientes, plancton, flora y fauna acuática y del bentos.

**Tabla IV.1. Objetivos, criterios de éxito y parámetros de evaluación del rendimiento de actuaciones en playas.**

## 6- *Diseño espacio-temporal del seguimiento para cada uno de los procesos objetivo*

Este apartado constituye el núcleo de este capítulo de planificación de campañas de seguimiento de playas. En el apartado IV.4 de éste documento se facilitan los criterios para el establecimiento de la secuencia temporal y la resolución espacial de campañas y subcampañas, así como la definición de la precisión requerida en la medidas.

Finalmente, el apartado IV.5 presenta un ejemplo de planificación del seguimiento de una actuación en una playa.



TOPOGRAFÍA DE UNA PLAYA POR NIVELACIÓN CONVENCIONAL

VARIABLE	SENSOR O EQUIPO	APLICACIÓN Y COMENTARIOS
$\eta$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Varilla electrónicas.....</li> <li>- Ecosonda en el fondo.....</li> <li>- Ultrasonico aéreo.....</li> <li>- Radar.....</li> <li>- Video.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona de rompientes. Plataformas off-shore. Relativa fragilidad. Necesitan un soporte.</li> <li>- Fuera de la zona de rompientes. La lectura en tiempo real exige una boya de comunicaciones.</li> <li>- Zona de rompientes. Plataformas off-shore. Sensibilidad a la climatología. Requieren un soporte.</li> <li>- Medida de oleaje direccional. Necesita un sensor puntual de sup. libre para el calibrado de la señal.</li> <li>- Tipo de rotura, extensión de la zona de rompientes, etc.</li> </ul>
p	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformación.....</li> <li>- Piezoresistivos.....</li> <li>- Oscilador de cuarzo.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuera y dentro de la Zona de Rompientes Buena relación calidad-precio.</li> <li>- “ “ “ “ . Alta precisión. Coste elevado.</li> <li>- “ “ “ “ . Alta precisión . Coste elevado. Señal digital.</li> </ul>
u, v, w	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electromagnéticos.....</li> <li>- Puntuales doppler.....</li> <li>- Perfiladores doppler.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resolución espacial y temporal media. Muy robustos. Insensible a burbujas o sedimento en suspensión</li> <li>- Alta resolución espacial y temporal. La señal se perturba por la presencia de burbujas o sedimento en suspensión.</li> <li>- Fuera de la Zona de Rompientes. Resolución espacial y temporal limitada. Sustituyen a rosarios de correntímetros puntuales.</li> </ul>
$\eta_{it}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acelerómetros.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medida de oleaje fuera de la Zona de Rompientes y de alteada en barcos de batimetría. Son los sensores principales de las boyas escalares de medida de oleaje.</li> </ul>
$\theta$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compás electrónico.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acompaña a los equipos que requieren orientación: correntímetros, boyas direccionales, etc.</li> </ul>
$\eta_x, \eta_y$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclinómetros electrónicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boyas de oleaje direccionales, compensadores de movimiento (balance y cabeceo) de los barcos de batimetría.</li> </ul>
h	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estación total y prisma.....</li> <li>- DGPS diferencial y antena.....</li> <li>- Fotogrametría.....</li> <li>- Estación total y trineo con prisma...</li> <li>- DGPS y trineo con antena.....</li> <li>- Ecosonda y DGPS en embacación...</li> <li>- Ecosonda multihaz y DGPS.....</li> <li>- Láser y DGPS desde el aire.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Topografía. Áreas pequeñas, muy flexible.</li> <li>- Topografía. Áreas pequeñas, muy flexible.</li> <li>- Topografía. Áreas extensas. Alta resolución.</li> <li>- Batimetría. Adecuado para la Zona de Rompientes en playas de arena. Máx.. prof.: 8 m.</li> <li>- Batimetría. Adecuado para la Zona de Rompientes en playas de arena. Máx.. prof.: 8 m.</li> <li>- Batimetría fuera de la Zona de Rompientes Áreas pequeñas. Recomendado compensadores de movimiento del barco: <math>a_z, \eta_x, \eta_y</math>.</li> <li>- Batimetría fuera de la Zona de Rompientes Áreas extensas. Alta resolución. Recomendado compensadores de movimiento.</li> <li>- Topo-batimetría. Prof. máx.: 40 m. Áreas extensas. Rendimiento típico: 8 Km<sup>2</sup>/h con resolución de malla de 4 m.</li> </ul>
c	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reflexión óptica (OBS).....</li> <li>- Reflexión acústica (ABS).....</li> <li>- Transmisión de rayos <math>\gamma</math>.....</li> <li>- Bombas de succión o botellas.....</li> <li>- Trampas de sedimento.....</li> <li>- Trazadores de arena fluorescente....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medida indirecta de la concentración de sedimento en suspensión. Requieren un calibrado con una muestra de sedimento real.</li> <li>- Lo mismo que los OBS. Oferta muy limitada en el mercado de estos equipos.</li> <li>- Son los únicos que miden directamente la masa de sedimento interpuesta, por lo que sólo requieren un calibrado inicial.</li> <li>- Toma de muestras del sedimento en suspensión. Sólo válido para valores promedio.</li> <li>- Para la medida del transporte medio en suspensión o por fondo. Dentro de la Z.R. dan muchos problemas.</li> <li>- Medida directa transporte total sedimentos. Arena trazadora: misma granulometría que la nativa. Muy costoso.</li> </ul>
Toma de muestras de sedimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dragas o dragalinas bivalvas.....</li> <li>- Tubos de muestreo por gravedad....</li> <li>- Tubos de muestreo por presión.....</li> <li>- Tubos con vibración.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muestras alteradas de la superficie del fondo. Penetración máxima de unos 0.10 m.</li> <li>- Muestras poco alteradas en sedimentos blandos a firmes. Penetración máxima de hasta 10 m.</li> <li>- Pueden ser pirotécnicos o de gas comprimido. Muestras poco alteradas en sedimentos firmes a duros. Penetración máxima de hasta 3 m.</li> <li>- Muestras poco alteradas en sedimentos blandos a firmes. Penetración máxima de hasta 6 m. Profundidad máxima de 40 m.</li> </ul>

**Tabla IV.3. Variables de medida, sensores tipo, aplicaciones y comentarios.**





SENSORES DE VELOCIDAD Y DE PRESIÓN PARA LA MEDIDA DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS  
EN LA PLAYA DE USGO, CANTABRIA

### **IV.3 Escalas espacio-temporales de los cambios morfológicos en las playas**

Los proyectos de regeneración de playas se basan principalmente en el conocimiento de la interacción entre la dinámica marina y los sedimentos. Este conocimiento, todavía incompleto, se plasma en una serie de modelos, altamente empíricos, de planta, perfil y transporte, que facilitan predicciones sobre las geometrías media y extremas de la playa y su evolución a medio y largo plazo.

Las dinámicas actuantes sobre la playa movilizan los sedimentos y modifican la forma de la playa. Estas dinámicas: oleaje, corrientes, variaciones del nivel medio, aportaciones fluviales, etc., y los cambios de forma producidos son clasificables en determinadas escalas de espacio y tiempo. De esta manera, los modelos desarrollados para el estudio de la hidrodinámica, procesos de transporte y cambios

de forma, suelen ser válidos en escalas acotadas en un rango espacio-temporal determinado.

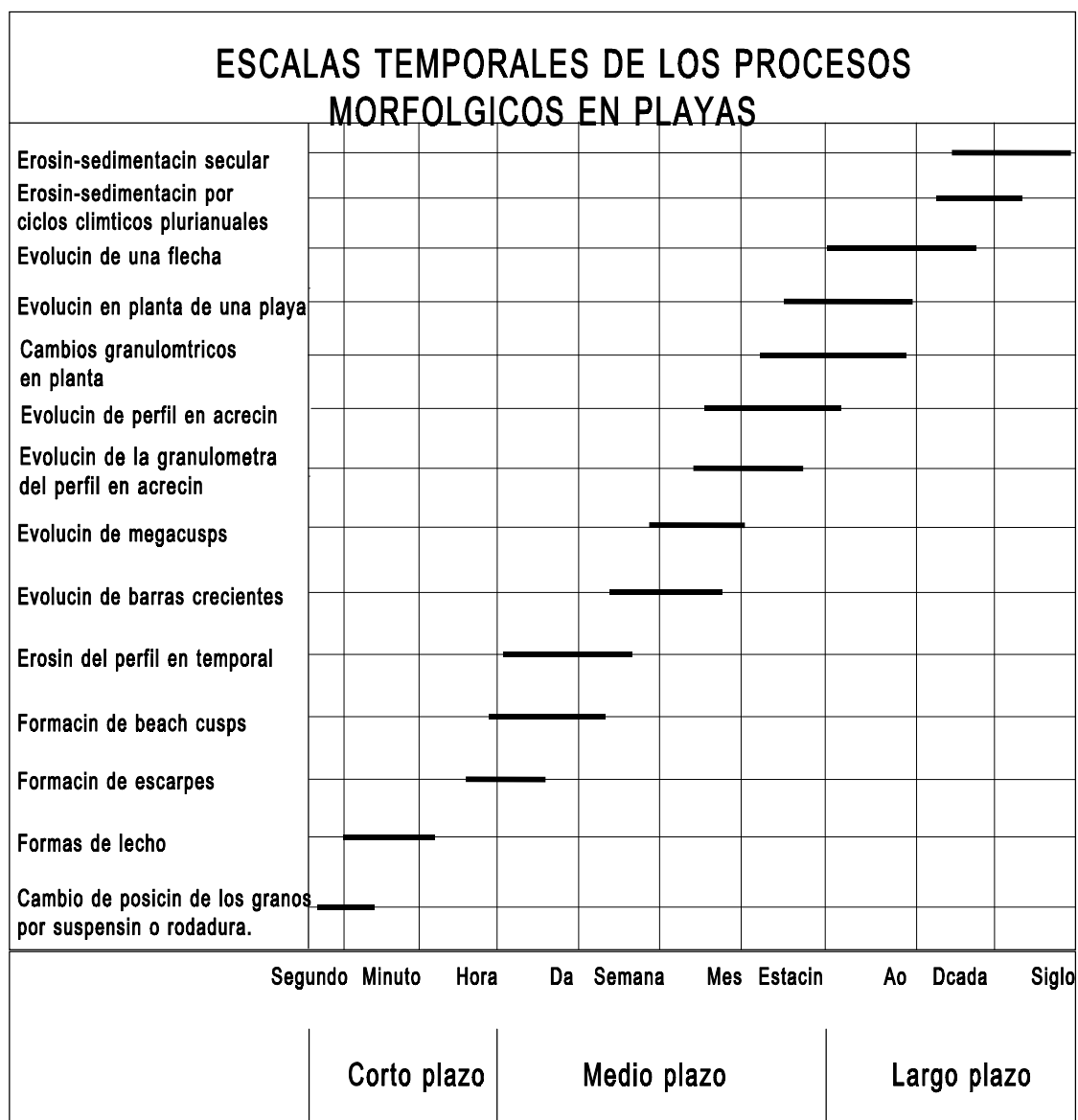
Cuando se pretende medir un determinado proceso, es necesario definir a priori las características del rango, resolución y precisión de las medidas. Si el proceso que se pretende medir se encuentra mezclado con otras dinámicas, la toma de datos con una resolución espacio-temporal adaptada exclusivamente a la escala espacio - temporal del proceso que se mide, puede dar lugar a problemas de “solapamiento” debido a la presencia de ruido en escalas menores, producidos por el resto de los procesos. Esto obliga por lo tanto a la introducción de filtros que eliminen dichos ruidos, para lo que será necesario conocer asimismo las características de los procesos que se pretende filtrar.

De lo indicado en el párrafo anterior se concluye que para la correcta definición temporal y espacial del seguimiento de un proceso se requiere el conocimiento previo de las escalas espacial y temporal de los procesos involucrados. Una selección incorrecta del espaciado entre medidas o del intervalo temporal entre las mismas puede producir un juego de datos insuficiente o incorrecto para la evaluación del comportamiento de una playa.

De los procesos que tienen lugar en una playa, los de cambio de forma son de especial interés en el seguimiento de las realimentaciones de playa. Por ello, este Capítulo se referirá principalmente a estos procesos, aunque los criterios y métodos que se presentan son fácilmente extrapolables a otros tipos de procesos, como es el caso de los hidrodinámicos.

Las escalas espaciales y temporales de los procesos que actúan en una playa están relativamente ligadas, por lo que podrían ser definidas conjuntamente. Sin embargo, en el diseño de las campañas de seguimiento, tiene una gran importancia la definición independiente de las medidas tanto en el espacio como en el tiempo.

En las figuras IV.1 y IV.2 se presenta las escalas espacio-temporales de algunos de los cambios morfológicos más importantes que tienen lugar en las playas. Estos cambios se han dividido en corto, medio y largo plazo o pequeña, media y gran escala, de una manera arbitraria. En lo sucesivo en este Capítulo, las extensión-espacio temporal de los cambios estará referida a las figuras IV.1 y IV.2.



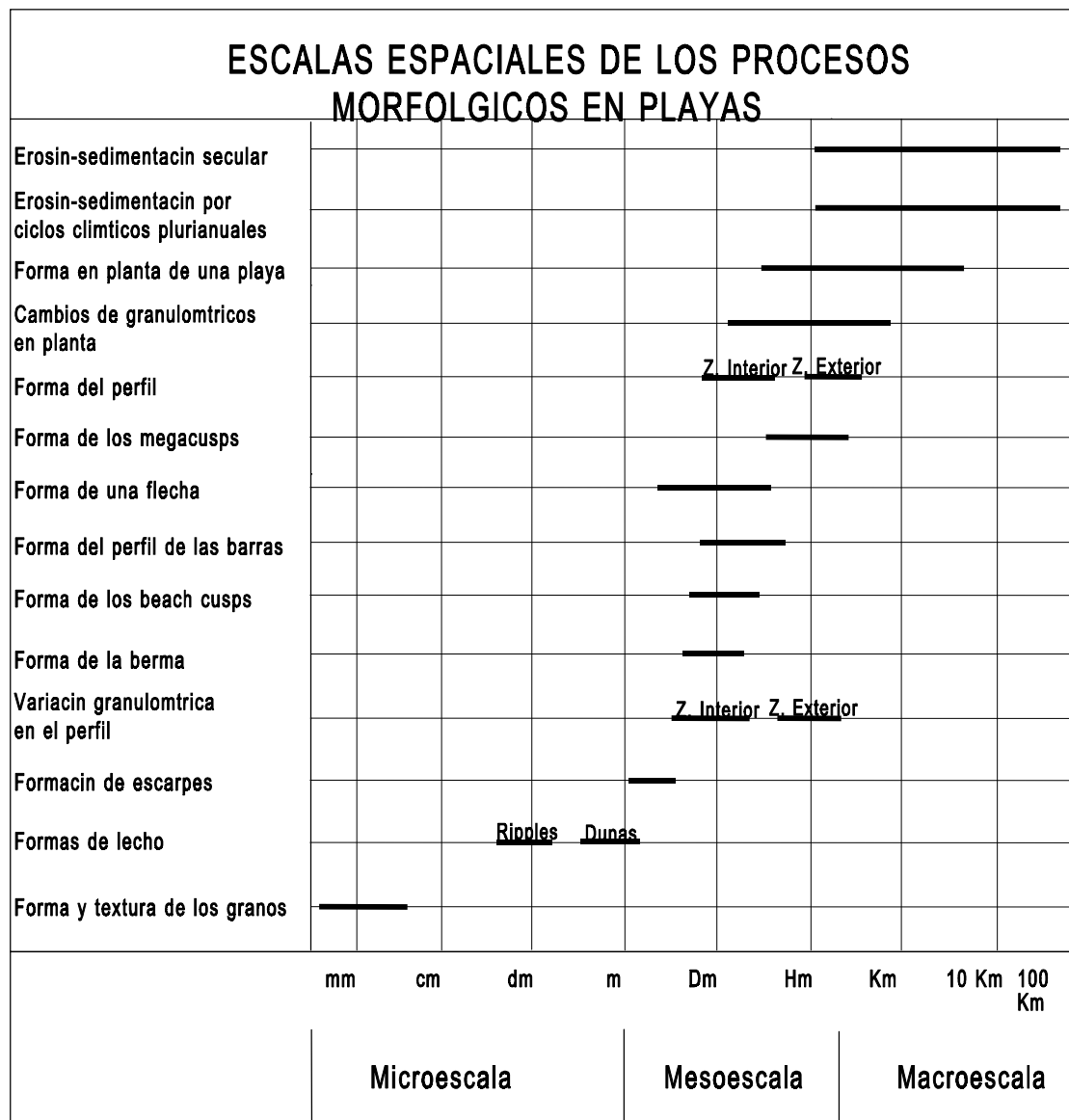


Figura IV.2

### **IV.3.1 Clasificación temporal de los procesos de cambio de las playas: procesos tendencia, semiperiódicos y singulares**

Aunque se conozca de forma aproximada las escalas temporales de los procesos objeto del seguimiento, a la hora de determinar la extensión y frecuencia espacio - temporal de las medidas, es importante distinguir si dichos procesos son o no periódicos. En este sentido, clasificaremos los procesos en tendencia, semiperiódicos y singulares.

#### **IV.3.1.1 *Procesos tendencia***

Son aquellos procesos, periódicos o no que, en el intervalo de duración del seguimiento muestran una variación constante con el tiempo. En un principio, los procesos de este tipo quedan determinados con dos muestras del mismo realizadas en dos instantes del tiempo.

Es importante destacar, que los procesos tendencia pueden corresponder a procesos periódicos o singulares con cualquier escala espacial o temporal. Lo que distingue un proceso tendencia es que el período de observación o seguimiento es muy pequeño en comparación con la escala del mismo.

Por regla general, la experiencia humana es capaz de detectar sin problemas la periodicidad de los procesos con escala temporal del orden de años o décadas, pues las duraciones de los seguimientos pueden ser del orden del período de oscilación. Sin embargo, los procesos con escalas temporales superiores a la centena de años sólo pueden ser detectados con seguimientos de duración muy inferior al período de los mismos, por lo que son siempre definidos como procesos tendencia.

#### **IV.3.1.2 *Procesos semiperiódicos***

Son aquellos procesos que presentan pautas de período predecibles. Están asociados a las variaciones más o menos rítmicas del clima marítimo o de la dinámica marina: cambios estacionales de los regímenes de viento, oleaje y corrientes y movimientos asociados a las mareas astronómicas. Los cambios que provocan en la playa se detectan como avances o retrocesos en la línea de costa, modificaciones en la orientación de la misma, formación o desaparición de formas rítmicas de escala variable y/o modificaciones en la dinámica.

Como la aleatoriedad de las causas climáticas se traslada a las respuestas, estos cambios deben definirse de una manera estadística, principalmente por sus valores medios y desviaciones.

#### **IV.3.1.3 *Procesos singulares***

Son aquellos que se producen como respuesta a una modificación extraordinaria de la dinámica marina o de las condiciones de contorno de la playa. El cambio que provocan estas acciones en la forma de la playa se amortigua con el tiempo hasta que se vuelve a alcanzar el equilibrio primitivo o un nuevo equilibrio. En la definición de los intervalos entre campañas habrá que tener en cuenta que la velocidad de cambio disminuye progresivamente con el tiempo. Los eventos semiperiódicos de largo período pueden ser tratados como singulares si el período de recuperación del equilibrio es menor que el período medio de repetición del evento, por lo que su evolución se suele estudiar como la de un suceso aislado.

Cuando el evento singular es debido a causas naturales impredecibles como es el caso de maremotos, temporales extraordinarios, grandes riadas o mareas meteorológicas, es importante la planificación de la medida de la magnitud del cambio y de la recuperación posterior de la playa. La situación inicial se define como un cambio puntual brusco que se amortigua de forma exponencial con el tiempo.

En el caso de que los eventos singulares sean debidos a actuaciones humanas como es el caso de realimentaciones, dragados o modificaciones de las condiciones de contorno de la playa, la planificación del seguimiento debe realizarse en el mismo proyecto.

En cualquier caso, la característica fundamental a tener en cuenta en la planificación del seguimiento de estos procesos, es la amortiguación de la velocidad de cambio con el tiempo, por lo que los intervalos entre campañas de seguimiento de estos cambios también se deberán modificar con el tiempo.

#### **IV.4 Planificación espacio-temporal de las campañas de seguimiento de playas**

En este apartado se presenta los criterios y la metodología de la planificación espacio-temporal de las campañas de seguimiento de playas. Las metodologías que se indican asumen que ya han sido determinadas las escalas espacio - temporales de los procesos objetivo del seguimiento.

En particular, se presenta los criterios que permiten determinar la duración y extensión de un seguimiento, frecuencia y número de campañas, espaciado entre los puntos de toma de datos y el proceso a seguir para la integración espacial y temporal de los datos con objeto de suavizar o filtrar los cambios en escalas menores de la estudiada.

En general, los cambios espacio-temporales de menor escala que más error introducen en las campañas son los debidos a la formación y migración de las formas rítmicas longitudinales (beach cusps, megacusps y barras rítmicas), asociados a su vez con los cambios transversales barra-berma debidos a las fluctuaciones del clima marítimo. Otro ejemplo de cambio rítmico temporal en las playas con marea son las pequeñas oscilaciones semanales de la berma debido a la alternancia de las mareas vivas y muertas.

Las escalas espacio-temporales de los cambios que se pretende evaluar mediante el seguimiento son esenciales para la definición de duración y extensión de la campaña y de la frecuencia temporal y espacial de la toma de datos en cada campaña.

#### IV.4.1 Definiciones para la planificación de seguimientos de procesos en playas

El seguimiento de una determinada área de una playa (extensión) a lo largo de un tiempo determinado (duración) se realiza de forma discreta en el tiempo y espacio, dividiéndose temporalmente en **campañas y subcampañas** y espacialmente en **sectores**.

##### IV.4.1.1 Duración y extensión de las campañas de seguimiento de playas

La **duración de un seguimiento** es el período de tiempo durante el que se realizará el seguimiento. La duración del seguimiento deberá ser como mínimo, del orden de la escala temporal del proceso, tal como se define en la figura IV.1.

La **extensión del seguimiento** es el área de la playa afectada por el seguimiento. De la misma manera que en el caso de la duración, la extensión espacial del seguimiento deberá ser como mínimo, del orden de la escala longitudinal del proceso que se pretende evaluar, tal como se indica en la figura IV.2.

##### IV.4.1.2 Definiciones relativas al muestreo temporal

La toma de datos de cualquier proceso se realiza siempre de una manera discreta. Dado que los procesos de playas son en general función del espacio y tiempo, la discretización deberá realizarse en ambos espacios (temporal y espacial).

Un seguimiento se divide temporalmente en campañas. Una **campana de medidas** es el conjunto de trabajos de campo realizados sobre los sectores de medida y durante un intervalo de tiempo que se traducen, tras procesos de integración espacial y temporal, en una definición promediada de las condiciones de la playa durante la citada campaña. Cada campaña de medidas puede estar subdividida en **subcampañas** que permitan el filtrado de oscilaciones temporales de menor escala.

El **intervalo entre campañas** es el período de tiempo que transcurre entre el inicio de dos campañas sucesivas. Este intervalo está relacionado con la escala



temporal y el tipo de proceso que se pretende medir. Definidos los intervalos entre campañas y conocida la duración de la misma, se obtiene el **número de campañas**.

La **duración máxima de una campaña** es el período máximo de tiempo durante el que se realiza la toma de datos en esa campaña. Esta limitación máxima es obligada si se quiere que el resultado de la campaña, tras las correspondientes integraciones espacio-temporales, pueda ser asimilado como un punto del proceso fijo en el tiempo. La duración de una campaña debe ser inferior al intervalo entre campañas pero debe ser suficientemente larga como para permitir la promediación, mediante **subcampañas**, de las oscilaciones producidas por procesos de corto período, en el caso de ser previsibles.

En el caso de que sean previsibles variaciones periódicas o semiperiódicas de la playa en escalas de tiempo inferiores a la escala del proceso que se estudia, será preciso dividir la toma de datos de una campaña en subcampañas. Como las oscilaciones de menor escala que se pueden controlar son semiperiódicas, el **número mínimo de subcampañas** será de 3.

De la misma manera que en el caso de las campañas, el **intervalo entre subcampañas** y la **duración de cada subcampaña** estará relacionado con la escala temporal de los procesos que se pretende filtrar.

Este proceso de discretización temporal de la toma de datos puede descender en cascada hasta el nivel mínimo permitido por la resolución de los equipos de toma de datos.

#### **IV.4.1.3 Definiciones relativas al muestreo espacial**

Si la dimensión de la playa objeto del seguimiento es elevada, o en el caso de que en la misma puedan diferenciarse zonas con morfodinámicas distintas, es conveniente dividir la misma en **sectores de medida**, que son las áreas específicas de la playa en las que se realizará las medidas. El **número mínimo de sectores** de medida en una playa será 3. Este número se reducirá solamente para evitar el solape de los sectores de medida.

Dentro de cada sector se definirá la distancia entre puntos de muestreo o **resolución espacial del muestreo** para las diferentes zonas en que se divida el sector

de medida. La resolución espacial del muestreo será tal que permita identificar todas las variaciones de la variable que se mide que superen la resolución requerida.

#### **IV.4.1.4 Rango, resolución y precisión de las medidas**

El **rango** de una serie de medidas de una magnitud es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de las medidas. La **resolución** en la medida de una variable es el mínimo valor del incremento de la misma que se pretende detectar en el seguimiento. En las campañas de campo, la resolución de la medida de una variable y la resolución espacial del muestreo están íntimamente ligadas, pues a medida que aumenta la resolución con la que se pretende realizar una medida, aumenta la resolución espacial requerida, al aumentar las perturbaciones de pequeña escala que superan la resolución.

Para poder medir una variable con una resolución determinada es importante que la **precisión de medida**, diferencia entre el valor medido y el real, de los equipos de medida sea superior a la resolución

La definición de la resolución y precisión de las medidas es importante en los seguimientos porque incide directamente en su costo (en su relación con la resolución espacial de muestreo) y en la selección de los equipos de medida.

#### **IV.4.2 Técnicas de muestreo en el seguimiento de playas**

Durante la planificación de un seguimiento, y en particular, al determinar la secuencia temporal de muestreo y la resolución espacial de la toma de datos, es importante examinar si existen variaciones de la variable de medida por encima de la resolución requerida, en escalas espacio-temporales menores de las estudiadas. Si el intervalo de muestreo o la resolución espacial del seguimiento son mayores que los necesarios para definir estas variaciones, aparecerá un "ruido" en la toma de

datos que puede invalidar los análisis posteriores. Para la eliminación de estos ruidos en la toma de datos sólo existen dos alternativas:

- 1- Tratar de identificar los cambios de menor escala mediante una disminución del intervalo de muestro y de la resolución espacial del muestreo. Esta alternativa requiere un intervalo entre campañas igual a la mitad del período de los cambios de menor escala que se quiere identificar y una resolución espacial igual a la mitad de la longitud de onda de la perturbación. Esta opción permite identificar los cambios de menor escala, a expensas de un mayor costo económico en la toma, proceso y almacenamiento de los datos.
- 2- Filtrado de los cambios de menor escala mediante un promediado temporal y espacial.

En primer lugar, se realizará el filtrado espacial, incluyendo en cada dato correspondiente a una posición en el espacio el promediado de al menos tres puntos separados entre si la mitad de la longitud de la perturbación que se filtra. El punto del espacio al que corresponde el promedio es el punto central.

Seguidamente, se realizará el promediado temporal, de manera que cada dato de un instante determinado del tiempo se compondrá con el promedio de al menos tres datos tomados a intervalos de tiempo mitad del período de la perturbación de menor escala que se quiere identificar. El punto en el tiempo al que corresponde el promedio será el punto central.

El intervalo entre promedios (o campañas) y el espacio entre sectores de medida estará definido por el proceso de estudio, de escala mayor. Esta segunda opción, puede ser una solución más económica que la anterior aunque requiere una planificación más compleja.

#### **IV.4.3 El muestreo temporal en las campañas de seguimiento de playas**

Como se ha indicado anteriormente, el seguimiento de una playa se divide temporalmente en campañas. En el caso de que sea previsible la aparición de ruidos en la medida de una campaña debidos a procesos de menor escala que el medido, las campañas se dividen a su vez en subcampañas. El objetivo de las subcampañas es el filtrado temporal de estos ruidos de menor escala.

El intervalo de tiempo entre subcampañas debe ser, como máximo, la mitad del período,  $T_s$ , característico del proceso de menor escala que se quiere filtrar, es decir  $T_s / 2$ .

Si denominamos  $M(x,y,z,t)$  a la variable objeto del muestreo, el filtrado temporal se realizará promediando los valores de  $M$  obtenidos en las subcampañas mediante la expresión:

$$\overline{M}(\overline{X}, t_0) = \frac{1}{4} \left[ M\left(\overline{X}, t_0 - \frac{T_s}{2}\right) + 2 M(\overline{X}, t_0) + M\left(\overline{X}, t_0 + \frac{T_s}{2}\right) \right] \quad (1)$$

Este filtrado temporal puede extenderse hacia la alta frecuencia tanto como sea necesario para eliminar las oscilaciones que por su magnitud puedan generar ruido en la señal principal.

#### IV.4.3.1 *El muestreo temporal del seguimiento de procesos de tipo tendencia*

Como se ha indicado, los cambios del tipo tendencia que no se detectan como semiperiódicos o singulares, suelen ser cambios de gran escala temporal, de tipo secular con escalas temporales superiores a la centena de años. Estos cambios afectan a todo el perfil de la playa en la unidad fisiográfica.

Para un proceso sea detectado como de tipo tendencia, la duración,  $D$ , del seguimiento debe ser muy inferior a la escala temporal del proceso. *Asumiendo que los procesos con escalas de tiempo inferiores al siglo deben ser estudiados como procesos semiperiódicos o singulares*, la duración del seguimiento de un proceso de tipo tendencia no debe ser inferior a los 10 años.

Teóricamente es suficiente con dos campañas, localizadas en los extremos del intervalo temporal del seguimiento, para determinar un proceso de tipo tendencia. Sin embargo, dada la incertidumbre que pesa siempre sobre la naturaleza de estos procesos, se recomienda realizar al menos cinco campañas, por los que el intervalo mínimo entre campañas será de 2 años.

Para el filtrado de las oscilaciones estacionales, se dividirá cada campaña en tres subcampañas semestrales, integrando, mediante la ecuación (1), los resultados

de las tres campañas en una "situación media anual" que se asignará a la fecha central de las tres subcampañas.

La duración de cada subcampaña no deberá superar el veinteavo del período del cambio que se pretende filtrar. Como la variación que se filtra es la anual, la duración de cada subcampaña podrá extenderse hasta un máximo aproximado de 15 días, siempre que no se produzcan eventos singulares (como es el caso de un temporal) dentro del período de toma de datos. Como resumen:

<b>Duración mínima del seguimiento</b>	$D \geq 10$ años
<b>Intervalo mínimo entre campañas:</b>	$IT \geq 2$ años.
<b>Número de campañas:</b>	$N \geq 5$ (incluida la inicial)
<b>Número de subcampañas:</b>	$N_1 = 3$
<b>Intervalo entre subcampañas:</b>	$IT_1 = 6$ meses.
<b>Duración de cada subcampaña:</b>	$D_1 \leq 15$ días

**Tabla IV.4. El muestreo temporal del seguimiento de procesos de tipo tendencia.**

#### **IV.4.3.2 El muestreo temporal del seguimiento de procesos semiperiódicos**

Todos los procesos que tienen lugar en las playas, asociados al clima marítimo muestran una cierta periodicidad, asociada a los ciclos climáticos estacionales. Las perturbaciones climáticas de menor escala que la estacional introducen una variabilidad aleatoria que se reproduce en los procesos. Como resultado de esta componente aleatoria ningún proceso en playas puede entenderse como periódico puro. Por ello se denomina a estos procesos semiperiódicos. Dos parámetros estadísticos importantes en la definición de un cambio semiperiódico son el período medio,  $\bar{T}$ , y la desviación típica,  $\sigma_t$ , del período.

La duración del seguimiento de un cambio periódico debe ser de al menos un período. En el caso de un cambio semiperiódico, esta duración debe aumentarse, al menos con la desviación típica,  $\sigma_t$ , del período:

$$D \geq \bar{T} + \sigma_t \quad (2)$$

El intervalo de muestreo máximo de procesos periódicos es la mitad del período. Dada la incertidumbre existente en la definición del período en los procesos semiperiódicos, el intervalo máximo entre campañas, IT, deberá ser la mitad de la diferencia entre el período medio y la desviación típica del período:

$$IT \leq \frac{I}{2} (\bar{T} - \sigma_t) \quad (3)$$

Con las condiciones expresadas en (2), el n<sup>o</sup> de campañas será siempre mayor que 3. Una expresión que permite determinar el n<sup>o</sup> mínimo de campañas es la siguiente:

$$N = RDN \left[ 3 \frac{\bar{T} + \sigma_t}{\bar{T} - \sigma_t} \right] \quad (4)$$

donde RDN indica el redondeo al entero superior.

En el caso de que se prevean oscilaciones de la línea de costa con períodos inferiores a los de los cambios que se pretende medir, de período medio  $\bar{T}_1$ , se hará preciso que cada una de las campañas se divida en al menos 3 subcampañas, realizadas a intervalos  $\bar{T}_1 / 2$ , que cubran el período de la oscilación menor que se pretende filtrar. Los resultados de cada campaña se obtendrán mediante la integración de los de las 3 subcampañas siguiendo la expresión (1).

Como resumen, para cambios semiperiódicos:

<b>Duración del seguimiento</b>	$D \geq \bar{T} + \sigma_t$
<b>Número mínimo de campañas</b>	$N \geq RDN \left( 3 \frac{\bar{T} + \sigma_t}{\bar{T} - \sigma_t} \right)$
<b>Intervalo entre campañas</b>	$IT \leq \frac{\bar{T} - \sigma_t}{2}$
<b>Número de subcampañas (caso de ser necesarias)</b>	$N_1=3$
<b>Intervalo entre subcampañas</b>	$IT_1 = \frac{\bar{T}_1}{2}$
<b>Duración de cada subcampaña</b>	$D_1 \leq \frac{\bar{T}_1}{10}$

**Tabla IV.5. El muestreo temporal del seguimiento de procesos semiperiódicos**

#### **IV.4.3.4 El muestreo temporal del seguimiento de procesos singulares**

La principal característica de los procesos singulares es que provocan un cambio rápido de la playa, definido por un determinado valor,  $M_0$ , de la variable de control,  $M$ . Una vez producido el cambio, la playa tenderá a retornar a una situación de equilibrio, que se definirá por un valor de equilibrio,  $M_e$ , de la variable de control, ver figura IV.3. La velocidad con que se produce el retorno al equilibrio es

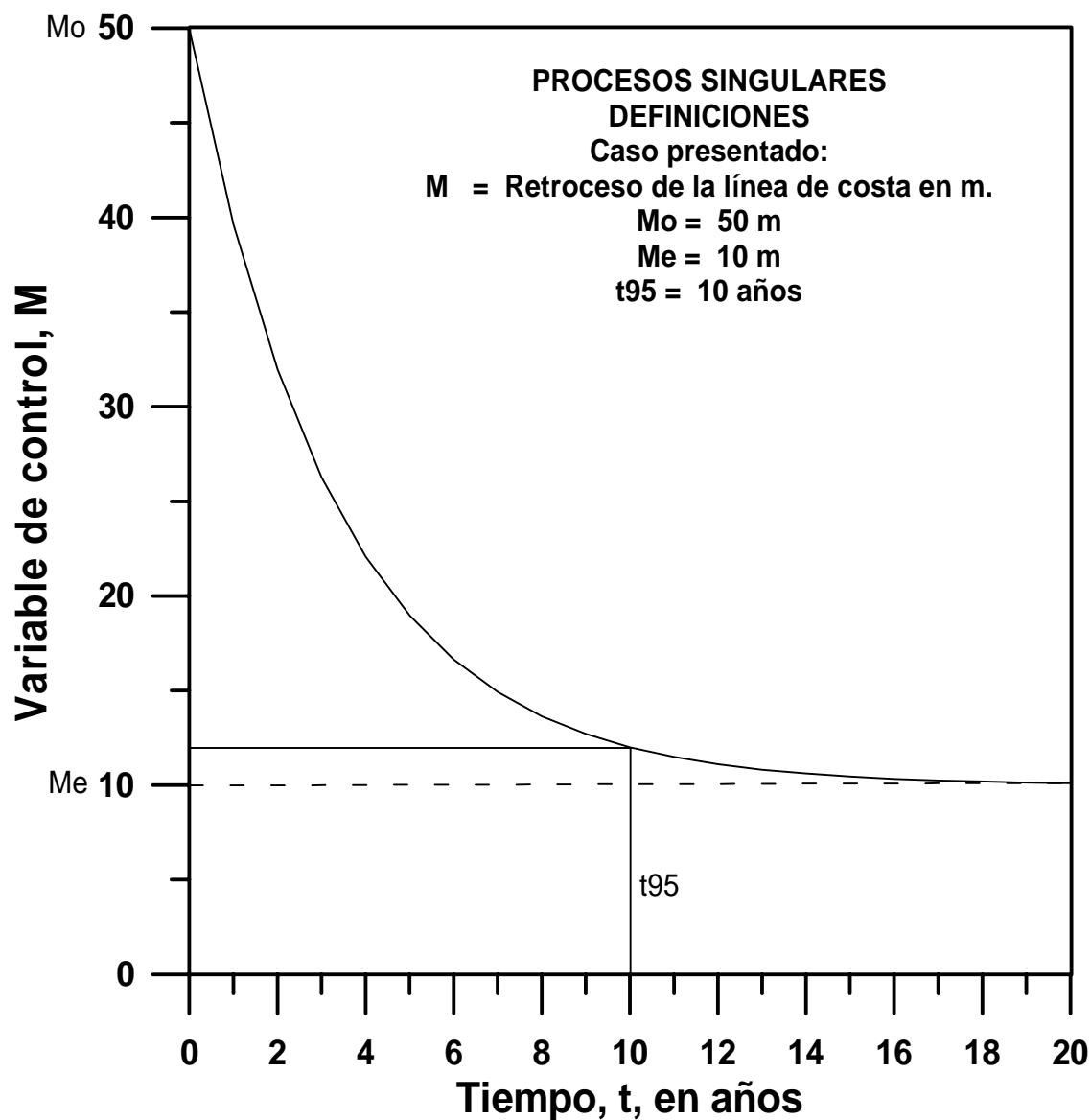


Figura IV.3

variable con el tiempo: más acelerado inmediatamente después de la perturbación inicial y muy lento en las proximidades de la situación de equilibrio. Dada esta



evolución, parece razonable diseñar la secuencia temporal de campañas del seguimiento de forma que las variaciones que se observen de una campaña a otra se mantengan aproximadamente constantes.

Como la aproximación al equilibrio es asintótica, la duración del proceso de retorno al equilibrio es en principio infinita. Por ello, la definición de la duración de retorno al equilibrio se realizará mediante el tiempo en que la variable  $M$  ha recuperado un porcentaje determinado del cambio. Se propone utilizar el tiempo que tarda en recuperarse el 95%,  $t_{95}$ , ver figura IV.3.

Es evidente que, a medida que un proceso se aproxima a la situación de equilibrio, el cambio se ralentiza, haciendo que el tiempo que se tarda en alcanzar la situación de equilibrio sea de difícil definición mediante un modelo. Por ello, es preferible definir la escala de tiempos del proceso de recuperación del equilibrio mediante el tiempo que se tarda en alcanzar un porcentaje del cambio total necesario para alcanzar el equilibrio. En lo sucesivo, denominaremos  $t_{95}$  al tiempo, medido desde el momento de la perturbación, que tardará en alcanzarse el 95% del cambio desde la situación original, representada por el valor  $M_0$  de la variable de control y la situación de equilibrio, representado por  $M_e$ . Este tiempo  $t_{95}$  será una buena estimación de la duración del seguimiento.

El valor de equilibrio de la variable de control,  $M_e$ , y el tiempo  $t_{95}$  deberán determinarse a priori, utilizando los modelos disponibles en ingeniería de costas. Así, por ejemplo, si la variable  $M$  es la posición de la línea de costa, se podrá utilizar un modelo de evolución de línea de costa para la estimación del valor de  $M_e$  y  $t_{95}$ .

Conocido  $M_e$ , si se desea que el cambio de la variable  $M$  observado entre cada dos campañas sea constante,  $\Delta M$ , el  $n_1$  de campañas a realizar, además de la inicial, será  $N = (M_e - M_0) / \Delta M$ . Si el origen de tiempos es el instante de la perturbación inicial, los tiempos de realización de las campañas se pueden obtener buscando en la curva  $M = f(t)$  obtenida con el modelo de evolución, los tiempos correspondientes a los valores  $M = M_0 + k \Delta M$ , con  $k = 1, 2, 3, \dots, N$ .

En el caso de que no se disponga de un modelo de evolución, una aproximación al problema de la determinación de las fechas de las campañas consiste en asumir que la variación de la variable  $M$  de seguimiento es proporcional al desequilibrio existente, es decir:

$$\frac{dM}{dt} = A (M - M_e) \quad (5)$$

donde A es la constante de proporcionalidad y  $M_e$  es el valor de equilibrio. Si asumimos que el 95% del cambio desde  $M_0$  hasta  $M_e$  se alcanza al cabo de un tiempo  $t=t_{95}$  y que se conoce la situación inicial,  $M=M_0$ , para  $t=0$ , la solución de la ecuación (5) es:

$$M = M_e + (M_0 - M_e) 0.05^{t/t_{95}} \quad (6)$$

Si se desea realizar “N” campañas además de la inicial y que el incremento,  $\Delta M$ , del valor de M entre dos campañas sucesivas sea constante, el tiempo desde el origen en el que se realizará la campaña “k” se puede obtener de la expresión (6):

$$t_k = \frac{t_{95}}{\ln 0.05} \ln \frac{N - k}{N} ; \quad k < N \quad (7)$$

La última campaña se realizará en el tiempo  $t_{95}$ .

El número mínimo de campañas, además de la inicial (que determina  $M_0$ ) deberá ser 4 para asegurarse una definición mínima del proceso.

Si no se ha realizado una estimación del tiempo  $t_{95}$ , o no se confía en la estimación obtenida mediante un modelo de evolución, se puede utilizar el propio seguimiento para la realización de dicha estimación de  $t_{95}$ . Si en el instante  $t_d$  se ha medido un valor  $M_d$ , una estimación de  $t_{95}$  puede ser obtenida directamente de la ecuación (7):

$$t_{95} = \frac{t_d \ln(0.05)}{\ln \left( \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \right)} \quad (8)$$

En este caso, la primera campaña que se realice (después de la campaña inicial, que determina  $t=0$  y  $M_0$ ), tendrá como objetivo la determinación del periodo de evolución hasta el equilibrio. Una vez estimado  $t_e$ , se podrá realizar el programa de campañas siguiendo los tiempos indicados por la expresión (7).

En el caso de existir oscilaciones semiperiódicas con período medio,  $\bar{T}_1$ , se filtrarán siguiendo el mismo proceso de integración de subcampanas indicado en el apartado anterior.

Como resumen, en el caso de seguimientos de cambios singulares:

<b>Duración del seguimiento</b>	$D \geq t_{95}$ Estimado mediante un modelo del proceso objeto del seguimiento, o a partir de la información de la primera campaña, según la ecuación (8)
<b>Número mínimo de campañas</b>	$N = 5$ Incluida la inicial.
<b>Intervalo entre campañas <math>k</math> y <math>k+1</math></b>	$IT(k, k+1) = t_{k+1} - t_k$ , según ecuación (7)
<b>Número de subcampanas ( en caso de ser necesarias)</b>	$N_I = 3$
<b>Intervalo entre subcampanas</b>	$IT_I = \bar{T}_1 / 2$
<b>Duración de cada subcampana</b>	$\leq \bar{T}_1 / 10$

**Tabla IV.6. El muestreo temporal del seguimiento de procesos singulares**

En la tabla IV.7 se resume la planificación temporal de los seguimientos de playas.

PROCESO	D	IT	N	Ns	Intervalo entre subcampanas	Duración máxima de las subcampanas
Tendencia	$\geq 10$ años	$\geq 2$ años	5	3	6 meses	15 días
Semi-periódico	$\bar{T} + \sigma_t$	$(\bar{T} - \sigma_t) / 3$	Expresión (4)	3	$\bar{T}_1 / 3$	$\bar{T}_1 / 10$
Singular	$\geq t_{95}$	Expresión (7)	5	3	$\bar{T}_1 / 3$	$\bar{T}_1 / 10$

**Tabla IV.7. Resumen del diseño temporal de un seguimiento****Ejemplo:**

Una realimentación de una playa provoca en una sección de la misma un avance de la línea de costa de 50 m. Utilizando un modelo de evolución de línea de costa, el proyectista estima que se volverá a la situación original en aproximadamente 10 años.

Además de la evolución hacia el equilibrio, la playa experimenta variaciones periódicas debidas a las oscilaciones estacionales, de período  $\bar{T}_1 = 1$  año.

Mediante un seguimiento, se desea conocer la curva real de retroceso con el tiempo.

Se pide:

1. Determinar la programación de campañas de campo del seguimiento .
2. Tras la primera campaña, se observa un retroceso de la línea de costa de 10 m. Corregir dicha programación con la información obtenida tras la primera campaña.

Solución:

Dado que el tiempo esperado para alcanzar el equilibrio es de 10 años, se diseña un seguimiento de 10 años de duración, en el que se asume que el 95% del cambio se habrá producido al cabo de estos 10 años, por lo que

En este caso,  $M_0 = 50$ ,  $M_e = 0$  y  $t_{95} = 3650$  días

Duración del seguimiento,  $t_{95} = 10$  años.

El n.º de campañas, además de la inicial (realizada inmediatamente después de terminada la realimentación), será  $N=4$ .

Las fechas (en días desde la campaña inicial) en que se realizará cada campaña se obtendrán de la expresión (7) y el valor esperado de la posición de la línea de costa, de la expresión (6):

Campaña inicial:	$k=0$	$t_0 = 0$	días	$M = 50.0$ m
1ª campaña:	$k=1$	$t_1 = 350$	“	$M = 37.5$ “
2ª campaña	$k=2$	$t_2 = 845$	“	$M = 25.0$ “
3ª campaña	$k=3$	$t_3 = 1689$	“	$M = 12.5$ “
4ª campaña	$k=4$	$t_4 = 3650$	“	$M = 2.5$ “ (95% del cambio)

Campaña	Subcampaña	Fecha de ejecución: (días desde campaña 0)	Variable medida	Variable promedio	Posición estimada de la costa (m)
$C_0$	No existen	0	$M_0$	$M_0$	50
$C_1$	$S_{11}$ $S_{21}$ $S_{31}$	168 350 533	$M_{11}$ $M_{21}$ $M_{31}$	$\bar{M}_1 =$ $M_{11} + 2M_{21}$ $+M_{31}$	37.5
$C_2$	$S_{12}$ $S_{22}$ $S_{32}$	663 845 1028	$M_{12}$ $M_{22}$ $M_{32}$	$\bar{M}_2 =$ $M_{12} + 2M_{22}$ $+M_{32}$	25
$C_3$	$S_{13}$ $S_{23}$ $S_{33}$	1507 1689 1872	$M_{13}$ $M_{23}$ $M_{33}$	$\bar{M}_3 =$ $M_{13} + 2M_{23}$ $+M_{33}$	12.5
$C_4$	$S_{14}$ $S_{24}$ $S_{34}$	3468 3650 3832	$M_{14}$ $M_{24}$ $M_{34}$	$\bar{M}_4 =$ $M_{14} + 2M_{24}$ $+M_{34}$	2.5

**Tabla IV.8. Planificación temporal inicial del seguimiento de un cambio singular del ejercicio propuesto**

Cuando el período entre campañas es inferior a un año, las oscilaciones estacionales, de período anual no pueden ser filtradas. Esto ocurre con la situación inicial, que será el resultado de una sola subcampaña de medida. Dado que se espera oscilaciones estacionales, cada campaña estará compuesta por un promediado de tres subcampañas, realizadas en los tiempos  $t_{1k}=t_k - (\bar{T}_1/2)$ ,  $t_{2k}=t_k$ , y  $t_{3k}=t_k + (\bar{T}_1/2)$ . Si los valores de la variable de control  $M$  en la subcampaña  $i$  de la campaña  $k$  son  $M_{ik}$ , el valor promediado, asignado al tiempo  $t_k$  será  $\bar{M}_k = M_{1k} + 2M_{2k} + M_{3k}$ .

Como resumen, los tiempos con respecto a la campaña inicial (fin de la realimentación) en los que se realizará campañas y subcampañas son los indicados en la tabla IV.8.

Como puede observarse en la tabla IV.8, la primera campaña constará de tres subcampañas, que se realizarán alrededor del primer año tras la realimentación, y de cuyo promedio se obtendrá el valor de  $M_d$  correspondiente al tiempo central de la campaña,  $t_d = 350$  días.

Si tras este promediado, se ha observado un retroceso real de 10 m, mientras que el retroceso estimado era de 12.5 m, se puede corregir la programación de la campaña, de manera que se incluya esta información. Utilizando la ecuación (8), la nueva estimación del tiempo en que se alcanzará el equilibrio será:

$$t_{95} = 350 \ln(0.05) / \ln(40/50) = 4699 \text{ días}$$

Campaña	Subcampaña	Fecha de ejecución: (días desde campaña 0)	Variable medida	Variable promedio	Posición estimada de la costa (m)
$C_1$ (inicial)	$S_{11}$	168	$M_{11}$	$\bar{M}_1 =$ $M_{11} + 2M_{21} + M_{31}$	40 (medido)
	$S_{21}$	350	$M_{21}$		
	$S_{31}$	533	$M_{31}$		
$C_2$	$S_{12}$	757	$M_{12}$	$\bar{M}_2 =$ $M_{12} + 2M_{22} + M_{32}$	26.7
	$S_{22}$	939	$M_{22}$		
	$S_{32}$	1121	$M_{32}$		
$C_3$	$S_{13}$	1891	$M_{13}$	$\bar{M}_3 =$ $M_{13} + 2M_{23} + M_{33}$	12.2
	$S_{23}$	2073	$M_{23}$		
	$S_{33}$	2255	$M_{33}$		
$C_3$	$S_{14}$	4517	$M_{14}$	$\bar{M}_4 =$ $M_{14} + 2M_{24} + M_{34}$	2.0
	$S_{24}$	4699	$M_{24}$		
	$S_{34}$	4881	$M_{34}$		

**Tabla IV.9. Planificación temporal del seguimiento de un cambio singular del ejercicio propuesto, modificada tras la primera campaña**

luego, si la tendencia observada tras la primera campaña se mantuviera, el 95% de la situación de equilibrio se alcanzará casi a los trece años tras la realimentación, en vez de los 10 estimados inicialmente. Tomando ahora como campaña inicial la campaña 1, la programación inicial se podrá modificar para tener en cuenta esta nueva estimación del tiempo de equilibrio. De esta manera, se obtiene la tabla IV.9.

Esta corrección de la planificación mediante los resultados medidos puede realizarse al finalizar cada nueva campaña.

#### **IV.4.4 El muestreo espacial en las campañas de seguimiento de playas**

Al igual que ocurre en el muestreo temporal, las variaciones espaciales que se pretende medir en la playa muestran irregularidades en todas las escalas de longitud. Cuando el proceso objetivo de la medida tiene una escala espacial superior a las perturbaciones, la adaptación de la escala espacial del muestreo al proceso objetivo dará lugar a que las perturbaciones de menor escala aparezcan en los datos, produciendo un ruido que en ocasiones puede ocultar el proceso objeto de la medida.

Como se ha indicado anteriormente, una alternativa posible es el aumento de la resolución espacial del muestreo en todo el área de trabajo, de manera que todas las perturbaciones de interés puedan ser identificadas. Una vez obtenidos los datos, un proceso de suavizado o filtrado puede filtrar las perturbaciones de menor escala. Obviamente, el aumento de la resolución espacial implica un mayor costo económico, tanto de la campaña como del posterior proceso de tratamiento y almacenamiento de la información.

La segunda alternativa propuesta es tratar el problema en dos escalas, por un lado la escala del proceso objetivo y por otro el de las perturbaciones. En una primera aproximación, la resolución espacial del muestreo se define de acuerdo con la escala espacial del proceso que se pretende medir. En una segunda aproximación, y sobre las secciones de medida determinadas por la primera escala se determina la resolución que permita definir, y posteriormente filtrar, las perturbaciones de escala menor, que deberá de hacerse también por orden decreciente de escalas.

De acuerdo con lo anterior, en la escala espacial principal se definirá algunas zonas representativas de la playa, que denominaremos en lo sucesivo sectores. El ni



de sectores que se definan en una playa dependerá de la uniformidad longitudinal de la misma, con un mínimo de 3, salvo en el caso de producirse solape de las áreas de medida. De esta manera, antes de realizar la definición de los sectores, será preciso dividir la playa en zonas de morfodinámica diferenciada. Dentro de cada zona diferenciada se definirá al menos un sector de medida.

La dimensión longitudinal,  $Y$ , de los sectores será tal que permita el filtrado de las oscilaciones espaciales longitudinales de menor escala. Para ello, la dimensión longitudinal del sector de medida deberá ser del orden de la escala longitudinal del proceso que se pretende filtrar. La dimensión transversal,  $X$ , será aquella en la que el proceso a medir sea detectable.

La resolución espacial longitudinal de la medida en cada sector debe ser tal que permita el filtrado de las oscilaciones espaciales no relevantes para el proceso de medida, lo que significa un mínimo de tres puntos, separados entre sí  $Y/2$ , siendo  $Y$  la escala longitudinal de las oscilaciones. Dado que los procesos de menor escala son diferentes en las distintas zonas del sector (duna, playa seca, zona intermareal, playa sumergida), deberá definirse la escalas longitudinales  $Y$  en cada una de estas zonas y realizar el muestreo de acuerdo con estas escalas.

La resolución transversal de la medida dependerá específicamente de la variabilidad transversal del proceso principal que se mide, por lo que no se puede definir a priori ninguna regla general, aunque es evidente que deben recogerse todos los puntos singulares: máximos, mínimos, puntos de inflexión o de discontinuidad, etc., así como al menos tres puntos en las zonas donde el proceso varía monótonamente.

## **IV.5. Ejemplo: diseño del seguimiento de un cambio singular. Playa de Somo. Santander**

### **IV.5.1 Antecedentes**

El sistema de playa de Somo, en la entrada de la Bahía de Santander, figura IV.4, constituye una playa - puntal que se ha desarrollado básicamente en los últimos 2000 años. La dirección del cambio natural ha sido hacia un paulatino aumento de la superficie de playa y una consolidación del sistema dunar del puntal, los cuales fijaron la bocana de la bahía de Santander en una posición al abrigo de la Península de la Magdalena, frente a la isla de la Torre. Al mismo tiempo se consolidaba el

sistema dunar de la parte Este de la playa, con una importante zona de dunas, que en la zona de Latas alcanzaban alturas superiores a los 20 m.

A partir del año 1800, el Puerto y la ciudad de Santander iniciaron actuaciones sobre la Bahía que incidieron sobre el equilibrio dinámico del sistema de playas:

Por un lado, se inician actuaciones de relleno de zonas intermareales, con el propósito de saneamiento, vías de comunicación y reclamación de tierras al mar. Estas actuaciones, redujeron en 150 años el prisma de marea de la Bahía de Santander a la mitad. Esta reducción del volumen de agua que penetra por la bocana durante las mareas redujo asimismo el área de la canal de entrada, con el consiguiente avance del Puntal hacia el Norte, estrechando la canal de navegación del Puerto de Santander.

Por otro lado, la actividad del puerto, con barcos progresivamente de mayor tamaño hizo que se iniciaran las tareas de dragado, impulsadas además por la reducción del área de la canal de navegación. Las arenas de dragado, que de forma natural son transportadas por el oleaje y las corrientes hacia el Puntal eran transportadas hasta altamar por las dragas y retiradas del sistema, de manera que, hasta 1980 se había perdido cerca de  $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  de arena.

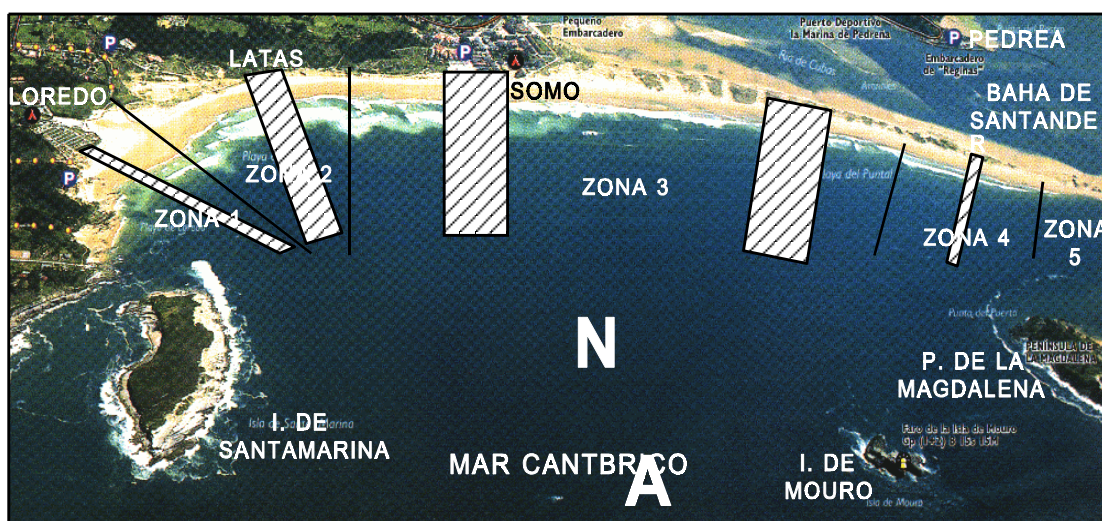


Figura IV.4. Playa de Somo. Situación de las zonas del seguimiento

En 1980, estas pérdidas de arena y actuaciones de dragado comenzaron a hacerse patentes en la playa a través de:

- ☐ Desaparición del bajo de las Quebrantas, que separaba las dinámicas de la zona de Somo de la del Puntal.
- ☐ Avance del Puntal hacia el Oeste, internándose en la bahía, al mantener el dragado la margen Sur de la canal al Sur de la posición de equilibrio.
- ☐ Retrocesos del perfil de playa en la zona de Latas, lo que hace emerger en la playa sumergida un bajo rocoso y retroceder la línea de dunas.
- ☐ Deterioro del sistema dunar del Puntal, estableciéndose zonas bajas no vegetadas que son rebasadas en temporales. Estos rebases transportan arena hacia la parte interior del Puntal, perdiéndose a corto plazo para la playa.

Ante la alarma causada por los efectos del retroceso y la posibilidad de que el mismo pudiera alcanzar la urbanización del pueblo de Somo, la Universidad de Cantabria recibió el encargo de la Autoridad Portuaria y de la Dirección General de Costas de realizar estudios del sistema de playas con el objeto de proponer actuaciones que detuvieran el proceso de degradación del sistema de playas sin afectar a la operatividad del puerto de Santander. Los estudios realizados se basaron en un seguimiento topo-batimétrico de la playa y varias campañas hidrodinámicas.

Como resultado de estos estudios, se determinó la morfodinámica del sistema de playas, cuantificándose los diferentes procesos (transporte de sedimentos hacia el Puntal, retroceso de la playa en Latas, avance del Puntal hacia el Oeste, etc.). Desde el punto de vista de las actuaciones de dragado de la Autoridad Portuaria, se puso de manifiesto:

- a) La inoperatividad de los dragados preventivos en el talud del Puntal más allá de lo estrictamente necesario, dado que el desequilibrio creado acelera los procesos de transporte hacia el Puntal.
- b) La absoluta necesidad de detener la pérdida de arena en el sistema, que de continuar afectaría a la urbanización de Somo y a la estabilidad del propio Puntal.

Como propuesta de actuación para el mantenimiento del equilibrio actual se propuso las siguientes líneas de actuación:

- 1- Definición de las cotas límites de la canal de navegación en la zona del Puntal. Estas cotas incluyen unas cotas mínimas las cuales, de ser superadas, exigen un dragado del canal y unas cotas máximas, que no deben ser superadas por el dragado.
- 2- Establecimiento de un sistema permanente de seguimiento de la topobatimetría del canal de navegación en la zona del Puntal, que permita la toma de decisiones con respecto al punto 1.
- 3- Vertido de todas las arenas dragadas en el sistema de playas, para evitar la pérdida de arena en el sistema. Este vertido deberá realizarse en la zona de Latas, lo más arriba posible en el perfil de la playa.
- 4- Cierre y revegetación de todas las zonas de rebase del Puntal.

Todas las actuaciones propuestas en el apartado anterior suponen una alteración de la dinámica sedimentaria en la playa de Somo. El dragado del Puntal acelera el proceso de transporte hacia el Oeste y corta el flujo natural de sedimentos hacia el bajo mareal de las Quebrantas. La demanda de sedimento es suministrada por el resto de la playa, comenzando por la zona de Latas, donde se produce el cambio de dinámica de transporte. La aportación de la arena dragada en esta zona

debería mantener a largo plazo el equilibrio de la playa, salvo posibles pérdidas hacia alta mar.

#### **IV.5.2 Objetivo del seguimiento**

El objeto de este seguimiento la evaluación de la actuación de dragado en el Puntal - vertido en la playa sumergida en la zona de Latas, en lo que respecta al equilibrio del sistema de playa y dunas de Somo.

#### **IV.5.3 Estudio de los procesos morfodinámicos. Selección de los procesos objetivo del seguimiento**

La playa de Somo-el Puntal, con una longitud de unos 4 Km presenta varias zonas con dinámica diferenciada.

##### **Zona 1: Loredó**

Esta zona, ver figura IV.4, se sitúa en los primeros 400 m del extremo Este de la playa. En esta zona la línea de costa describe un arco de casi 40º bajo la influencia de la difracción en la isla de Santamarina. En la parte N de este arco, la playa se apoya en los bajos y restingas de roca que prolongan el acantilado, dejando entre ellos dos pequeñas playas encajadas. Por el sur, el arco toma la alineación SW, hacia las dunas de la zona de Latas. El límite de esta zona se puede situar en la desembocadura del arroyo de Latas.

La playa en esta zona es intermedia, con una altura de ola que disminuye progresivamente hacia el Norte. En períodos de temporal, esta disminución de altura de ola establece una corriente en la zona de rompientes con dirección hacia la isla de Santamarina. En épocas de buen tiempo, una corriente muy débil debida a incidencia oblicua, se dirige hacia el Sur. Esta zona se ha mantenido relativamente estable en los últimos 50 años.

### Zona 2: Latas

Esta zona, ver figura IV.4, se extiende unos 500 m hacia el Oeste desde el arroyo de Latas (límite de la Zona 1). La característica topo-batimétrica más destacable de esta zona es la presencia de un bajo rocoso sobre el que se apoya el perfil de playa entre las cotas -6 y -8. Este bajo refracta el oleaje, incrementando la altura de ola sobre el mismo. Como consecuencia de este incremento de altura de ola, en condiciones de temporal se produce un importante bucle en las corrientes de rotura, que penetrando por el centro de la zona, divergen hacia el Este y Oeste. La corriente del Este tiene continuidad con la corriente de la zona de rompientes existente en la Zona 1, mientras que la del Oeste desagua por una importante corriente de retorno situada en el límite Oeste de esta zona.

La emergencia del bajo rocoso es una consecuencia de la pérdida progresiva de arena en el sistema de playas. El cambio de dinámica producido por esta emergencia ha provocado una importante erosión en el sistema dunar de esta zona, con un retroceso de la línea de dunas de más de 50 m en los últimos 30 años. Este retroceso ha provocado un cambio de alineación perceptible de la playa que se puede percibir hasta las proximidades de la urbanización de Somo, ya dentro de la Zona 3.

Debido al cambio de la dinámica del sistema de corrientes que se establece en esta zona, divergiendo hacia el Este y el Oeste, las actuaciones de dragado en el Puntal, que demandan un transporte de sedimentos hacia el Oeste a lo largo de la playa, establecen una demanda constante de arena con origen en esta sección, que por lo tanto ha sido la más afectada por las pérdidas de arena.

### Zona 3: Somo

Esta zona, ver figura IV.4, corresponde a la parte central y más extensa de la playa, extendiéndose unos 2000 m hacia el Oeste desde la Zona 2. Dentro de esta zona se encuentra la urbanización de Somo y en los últimos 1000 m de la misma la playa se separa del acantilado, conformando un sistema dunar bajo con la Bahía de Santander en la parte Sur del mismo.

La playa es en esta zona típicamente intermedia con barras rítmicas relativamente activas en bajamar. En algunas zonas aparecen en la parte baja del perfil intermareal de la playa estratos de arena cementada, lo que es un indicativo del retroceso experimentado por el perfil en esta zona, que en su parte Este ha debido adaptarse al retroceso del perfil en la Zona 2. El retroceso en la parte Oeste ha sido

prácticamente imperceptible. En la parte Oeste de esta zona comienza una gradual disminución de la altura de ola debida a la difracción en la península de La Magdalena y el perfil de la playa intersecciona claramente la canal de navegación.

La característica dinámica más importante de esta zona es la presencia de oscilaciones rítmicas de la batimetría de la barra, asociadas a oscilaciones longitudinales rítmicas de la altura de ola provocadas por la difracción en la Isla de Mouro. Estas oscilaciones se manifiestan en la zona en forma de corrientes rítmicas (se contabilizan unos 7 bucles), con una longitud de onda característica de unos 300 m.

#### Zona 4: Transición del Puntal

Comprende esta zona, ver figura IV.4, unos 500 m desde el final de la zona 3. En esta zona, la disminución de la altura de ola como consecuencia de la difracción en la península de La Magdalena es muy importante y el perfil de playa queda colgado en el talud de la canal de navegación. Por ello, la playa presenta una disposición peculiar, con un talud que se rigidiza progresivamente hacia el Oeste y una plataforma de bajamar relativamente plana y que se hace progresivamente más estrecha hacia el Oeste, desapareciendo completamente en el límite Oeste de la zona.

La característica dinámica más importante de esta zona es la presencia en la zona de rompientes de una corriente longitudinal hacia el Oeste, con una corriente de retorno en el límite Oeste de la zona, en el punto donde finaliza la plataforma de bajamar y desaparece la zona de rotura. La proximidad de la bocana hace que las corrientes mareales comiencen a ser importantes en la dinámica de esta zona. La curvatura del Puntal hace que estas corrientes mareales tengan dirección hacia el Oeste en la línea de costa, independientemente de que el estado de la marea sea llenante o vaciante. La playa se configura como reflejante con plataforma de bajamar, aunque con la peculiaridad de la limitación del perfil que impone la presencia de la canal de navegación.



### Zona 5: El Puntal.

Comprende esta zona, ver figura IV.4, los últimos 500-600 m de la flecha. Esta zona se ha formado en los últimos 50 años y es una consecuencia directa de los dragados en la canal de navegación. En esta zona la playa conforma el cantil Sur de la canal de navegación, presentando pendientes muy importantes que provocan deslizamientos de arena ocasionales. Las corrientes mareales son muy importantes, mientras que el oleaje sólo es capaz de transportar arena por la parte superior del talud donde las olas rompen en colapso o en oscilación. El transporte neto longitudinal de sedimento es hacia el Oeste. Por lo que respecta al movimiento transversal de sedimento, parte del transporte longitudinal cae a la canal de navegación, estrechando la misma, especialmente durante los temporales. Durante las mareas vivas, parte del sedimento incorporado a la canal es barrido hacia la zona de las Quebrantas (en el límite Oeste de la zona 3). Como la posición de equilibrio de la canal queda al N de la posición actual, se hace necesario el dragado para el mantenimiento de la misma. Como se ha indicado en la introducción, este dragado debe limitarse al mínimo imprescindible, lo que exige un seguimiento muy detallado de esta zona para que sirva de apoyo a las actividades de dragado.

Las oscilaciones del Puntal en la Zona 5 son de corto período, asociados al ritmo de las mareas vivas/muertas, a los temporales esporádicos y a las actividades del dragado, por lo que la definición del seguimiento en esta zona queda fuera de este seguimiento de largo plazo. En cualquier caso, dado que esta zona requiere un seguimiento mayor resolución espacial y temporal que el resto de la playa, se asumirá que cualquier información sobre la evolución a largo plazo de esta zona podrá ser obtenida de la integración de la información obtenida.

En la situación previa a las actuaciones el balance sedimentario del sistema de playas se encuentra desequilibrado con una pérdida neta de sedimento debida al dragado. El desequilibrio generado por el dragado en el Puntal demanda arena del resto de la playa, con origen en la zona de Latas, que es la que experimenta mayores retrocesos. Las actuaciones propuestas pretenden:

- 1- Reducir el coste de los dragados, limitando los mismos al mínimo compatible con la funcionalidad de la canal de navegación del puerto de Santander.
- 2- Detener el progresivo deterioro de la playa, que puede comprometer la urbanización de Somo y la propia estabilidad de la canal de navegación, en el caso de que el Puntal llegara a ser afectado.



El proceso cuya evolución será objeto del seguimiento es la evaluación del balance sedimentario. Los volúmenes dragados y vertidos son directamente medidos por la autoridad portuaria, por lo que el seguimiento deberá medir los transportes en la playa o en su caso, la respuesta topo-batimétrica de la misma.

Dado que la medida topo-batimétrica es más simple que la del transporte, el seguimiento se realizará mediante una serie de campañas de medidas topo-batimétricas. Estas medidas deberán permitir la determinación de la estabilidad de la playa a largo plazo en cada uno de los tramos de morfodinámica diferenciada anteriormente indicados.

Complementariamente, se tomará información de:

- ☐ Zonas y volúmenes de dragado y zonas de vertido.
- ☐ Distribución espacio - temporal de la granulometría del sedimento en la playa y en la draga.
- ☐ Condiciones de oleaje.

#### **IV.5.4 Funcionales y variables de medida**

El seguimiento deberá permitir la obtención de los siguientes funcionales:

- Variación espacial y temporal del volumen de arena sobre la cota -12, imponiendo un contorno fijo en la costa.
- Variación temporal de la cota +5 de la playa.
- Variación espacial y temporal de la granulometría del sedimento.

Las medidas que se realizarán en el seguimiento son los siguientes:

- Volúmenes de dragado y vertido:  $V(t)$
- Granulometría del sedimento dragado:  $D(t)$
- Topo-batimetría de la playa:  $h(x, y, t)$
- Granulometría de la playa:  $D(x, y, t)$
- Condiciones de oleaje:  $H_s$ ,  $T_z$  . (Se utilizarán los datos de la Boya de Punta Lucero de Bilbao).

#### IV.5.5 Escalas de espacio y tiempo involucradas en los procesos objetivo

La respuesta del sistema de playa, de 4 Km de longitud a actuaciones de dragados del orden de la centena de millar de  $m^3$  al año es del orden de décadas. Esto quiere decir que los primeros años después del inicio de las actuaciones la respuesta de la playa seguirá la tendencia observada antes del inicio de las actuaciones correctoras. Esta tendencia histórica se modificará con el tiempo a medida que comience a manifestarse el efecto de las medidas correctoras. El tratamiento temporal de este seguimiento deberá ser contemplado por lo tanto como un cambio singular, cuyas consecuencias tienden a estabilizarse en una situación de equilibrio con el tiempo. Como primera aproximación se toma un valor del tiempo de equilibrio de  $t_{95} = 20$  años. Esta aproximación podrá ser corregida a la vista de los resultados obtenidos en las primeras campañas.

Desde el punto de vista espacial, ya se ha determinado la situación y extensión de las zonas de la playa en la que se manifiestan morfodinámicas diferentes. El seguimiento deberá realizarse en cada una de estas zonas.

Dado que los procesos objetivo son de largo plazo y de una escala de Km, habrá que tener en cuenta que las campañas, que se realizan en instantes discretos en el tiempo, vendrán contaminadas por el ruido de los movimientos estacionales (de período anual) y las oscilaciones espaciales de las formas rítmicas, cuyas oscilaciones pueden ser mayores que las del proceso objetivo.

Por lo que respecta a las formas rítmicas, en el frente de playa son de esperar beach cusps de unos 30 m de longitud de onda y megacusps de unos 200 - 300 m de longitud de onda. En el resto de la playa intermareal y sumergida, la escala de las variaciones longitudinales es del mismo orden que los megacusps, es decir 200 - 300 m. Por ello, y la resolución de la toma de datos será suficiente como para permitir el filtrado de estos movimientos.

#### IV.5.6 Diseño temporal del seguimiento

Como se ha indicado en el apartado anterior, el proceso de evolución de la playa es de largo plazo y exige la planificación de una campaña de seguimiento de larga duración, asumiéndose que se alcanzará un equilibrio al cabo de unos 20 años y que el proceso es singular, es decir, partiendo de una perturbación inicial, tiende a amortiguarse con el tiempo. Si la respuesta se ralentiza de una manera exponencial, y se plantean 7 campañas durante este período (incluida la inicial), los tiempos de realización de estas campañas se pueden obtener de la expresión (7).

Como puede verse en la tabla IV.10, la primera campaña se realizará durante el primer año después del inicio de la actuación. Las sucesivas campañas se van distanciando progresivamente, de manera que las dos últimas campañas se separan 8 años.

Dado que las oscilaciones anuales del perfil y planta son muy importantes, superiores al movimiento medido en los primeros años, es importante filtrar estos movimientos estacionales. Para ello, cada una de las campañas deberá dividirse en tres subcampañas, separadas entre sí la mitad del período de la oscilación, es decir 6 meses. Cada subcampaña deberá realizarse en un tiempo máximo de  $12/10 \approx 1$  mes a la hora de realizar la integración de las subcampañas, la campaña central tendrá un peso doble. En la misma tabla IV.10 se indican los tiempos de realización de las subcampañas.

Como puede observarse en la tabla IV.10, durante los primeros dos años, las subcampañas se realizarán cada 6 meses, de manera que en la integración se solapan las campañas a partir de la campaña nº3, deja de producirse dicho solape.

Campaña	T <sub>k</sub> según (5) (meses)	T <sub>k</sub> diseño (años)	T Subcampaña (años)
0	Inicio	Inicio	T01=-0.5 T02= 0 T03= 0.5
1	15	1	T11= T03 T12=1 T13=1.5
2	32	2	T21=T13 T22=2 T33=2.5
3	56	5	T31=4.5 T32=5 T33=5.5
4	88	7	T41=6.5 T42=7 T43=7.5
5	143	12	T51=11.5 T52=12 T53=12.5
6	240	20	T61=19.5 T62=20 T63=20.5

**Tabla IV.9. Diseño temporal del seguimiento****IV.5.7 Diseño espacial del seguimiento****IV.5.7.1 Diseño espacial de la campaña 0**

La campaña 0 marca la referencia de comparación para todas las campañas sucesivas. Por ello se extiende a toda la playa activa y zona de duna.

Para la topografía de la campaña cero deberá realizarse un vuelo fotogramétrico y un batimetría con sonda multihaz de toda la playa sumergida hasta

la cota -12, intermareal, emergida y dunas que sirva de base de comparación al resto de seguimientos. La resolución espacial del vuelo y batimetría será:

- Zona de duna: 5 m.
- Playa seca y frente de playa: 10 m
- Playa intermareal y playa sumergida hasta cota -12 m: 30 m.
- Zonas de roca: 1 m.

La precisión vertical de las medidas será de 0.1 m

#### ***IV.5.7.2 Diseño espacial de las campañas 1 a 6***

Las limitaciones económicas impiden que cada subcampaña se realice mediante un levantamiento completo de alta precisión similar al de la campaña 0 inicial. Por ello es preciso limitar el seguimiento al mínimo necesario para alcanzar el objetivo del mismo, es decir, poder evaluar el resultado a largo plazo de las actuaciones realizadas. Estas limitaciones sólo pueden realizarse si se conoce el comportamiento actual de la playa, de manera que sea posible su división en zonas más o menos homogéneas, sobre las que se puede definir la campaña mínima requerida.

El diseño espacial del seguimiento se realiza estableciendo una sección de medida en cada una de las zonas anteriormente indicadas.

##### ***Diseño espacial del seguimiento en la Zona 1***

Esta zona se caracteriza por una relativa uniformidad, por lo que las únicas formas rítmicas longitudinales previsibles son beach cusps que pueden aparecer en el talud de playa en las raras ocasiones en que la playa se encuentra en condiciones reflejantes debido a un prolongado período de buen tiempo.

Dada la pequeña extensión longitudinal de esta zona y su relativa uniformidad longitudinal, el seguimiento topo-batimétrico de esta zona se limitará al levantamiento de una franja de 50 m de anchura en la parte central de la misma, ver figura IV.4. La resolución y precisión de la malla de datos será la misma que la utilizada en la campaña cero.

### Diseño espacial del seguimiento en la Zona 2

La Zona 2 contiene abundantes afloramientos rocosos y comprende un solo bucle de corriente longitudinal de posición fija, debido a que su causa es la rotura sobre los bajos rocosos. Por ello, la forma en planta de la playa en esta zona se mantiene aproximadamente constante, salvo eventuales beach cusps en el talud de playa en los períodos de buen tiempo. Por ello, el seguimiento en esta zona se limitará a una franja de 200 m centrada en el bajo rocoso, en la zona de máximo retroceso de la planta de la playa, ver figura IV.4. Las resoluciones espaciales y precisión de la malla serán las mismas indicadas en la campaña 0.

### Diseño espacial del seguimiento en la Zona 3

La zona 3 presenta habitualmente barras rítmicas activas en bajamar, que se reflejan en el frente de playa en megacusps. En las raras ocasiones en las que se produce un prolongado período de buen tiempo, las barras se aproximan a la playa, formando barras crecientes rítmicas cortadas por canales de retorno. La posición de estas barras y megacusps está asociada a variaciones rítmicas de la altura de ola debidas a la difracción en la Isla de Mouro, y su posición sólo es estacionaria de forma aproximada. Como la escala longitudinal de estas formas es del orden de los 300 m, las áreas de medida que se establezcan en esta zona deberán integrar información en al menos una anchura de playa de esa magnitud.

La erosión de la Zona 2 afecta de manera diferente a la parte Este y Oeste de la Zona 3. Por ello, se definen en esta zona 2 sectores de medida de 300 m de longitud cada uno, ver figura IV.4:

Sector Este, que se inicia a unos 500 m al Oeste del límite Oeste de la Zona 2.

Sector Oeste, que se inicia 500 m al Este del límite Este de la Zona 3.

La resolución horizontal y precisión vertical de las medidas será la misma que en la campaña 0.

#### *Diseño espacial del seguimiento en la Zona 4*

Dada la pequeña dimensión longitudinal de esta zona y la ausencia de formas rítmicas de gran escala, (suelen aparecer beach cusps de unos 20 m de longitud de onda en el talud de playa), el seguimiento se limitará a una franja de 50 m de anchura en el centro de la zona, ver figura IV.4. La resolución horizontal y precisión vertical de las medidas será la misma que en la campaña 0.

#### *Diseño espacial del seguimiento en la Zona 5*

Como se ha indicado, el seguimiento en esta zona está relacionado con las labores de mantenimiento del canal de navegación, que requiere una resolución temporal y espacial muy superior a la planteada para este seguimiento de largo plazo. Por ello, se supone que toda la información de evolución a largo plazo de esta zona puede ser integrada de los datos del seguimiento de corto plazo.

## **SECCIÓN V**

---

### **IMPACTO AMBIENTAL**



## **Sección V. Impacto Ambiental**

V.	IMPACTO AMBIENTAL.....	V.2
V.1	Introducción.....	V.2
V.2	Desarrollo del modelo .....	V.3
	V.2.1 Esquema metodológico .....	V.3
	V.2.2 Contenido del estudio de impacto ambiental.....	V.6
V.3	Desarrollo de los contenidos .....	V.8
	V.3.1 Introducción .....	V.8
	V.3.2 Análisis del proyecto .....	V.8
	V.3.3 Análisis del medio .....	V.9
	V.3.4 Análisis de los impactos .....	V.12
	V.3.5 Selección de alternativas .....	V.18
	V.3.6 Medidas correctoras.....	V.18
	V.3.7 Plan de vigilancia ambiental.....	V.19
	V.3.8 Memoria de síntesis .....	V.20
V.4	Aplicación del modelo a las fases de redacción del proyecto ....	V.21



## V. IMPACTO AMBIENTAL

### V.1 Introducción

En la presente sección se presenta un modelo para la evaluación del impacto ambiental en proyectos de regeneración de playas. El modelo que se propone presenta las siguientes características:

- Emplea variables ordinales y cuasi-proporcionales, haciendo posible de esta manera la integración de un amplio contenido de información, buscando además la mayor adecuación conceptual.
- Define una función de valoración.
- Cumple con los requisitos de la legislación española, al incluir los criterios de valoración que contempla el Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Por otra parte, el modelo realiza las siguientes aportaciones:
  - La importancia de los impactos se hace en función de la valoración desagregada de sus efectos. De esta manera la valoración se hace más fiable y más cuasi-proporcional.
  - Se considera que cada elemento y/o proceso ambiental afectado contribuye con distinto peso al impacto global.
  - Se proporciona una metodología de asignación de pesos (ponderación de los diferentes elementos y/o procesos ambientales afectados), elegido en razón de su simplicidad y fiabilidad.
  - Se proporciona una metodología de selección de alternativa multicriterio, elegido en razón de su simplicidad y fragilidad.
- El modelo contempla diferentes niveles de análisis de alternativas:



- (1) Nivel I que se corresponde con la fase inicial de redacción del proyecto y que tiene como objeto la localización de impactos críticos en alternativas;
- (2) Nivel II que se corresponde con la fase de anteproyecto, con el objetivo de seleccionar y/o clasificar las diferentes alternativas desde la perspectiva ambiental,
- (3) Nivel III que se corresponde con la fase de proyecto, con el objetivo de realizar el análisis detallado de los impactos y el diseño de las medidas correctoras y el plan de vigilancia ambiental.

## **V.2 Desarrollo del Modelo**

### **V.2.1 Esquema metodológico**

El estudio de Impacto Ambiental que acompaña al Proyecto es documento único. Sin embargo, esto no implica que tenga que desarrollarse de una sola vez. Por el contrario, el Estudio de Impacto Ambiental se concibe como un canal de información que en cada fase o toma de decisión proporcionará la dimensión ambiental del proyecto.

Para los tipos de proyecto en cuestión se ha considerado los siguientes tres niveles de redacción del Proyecto:

- Estudios previos
- Anteproyecto
- Proyecto construido.

Los correspondientes estudios ambientales y sus objetivos se muestran en la siguiente tabla:

NIVEL DE REDACCIÓN DEL PROYECTO	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL	OBJETIVOS
Estudios Previos	Nivel I: Estudio preliminar de impacto ambiental	Localización de impactos críticos en alternativas
Anteproyecto	Nivel II: Estudio o Informe de impacto ambiental	- Selección de alternativas
Proyecto constructivo	Nivel III: Estudio detallado de impacto	Diseño y proyecto de las medidas correctoras Plan de vigilancia ambiental

**Tabla V.1 Niveles de estudio de impacto ambiental**

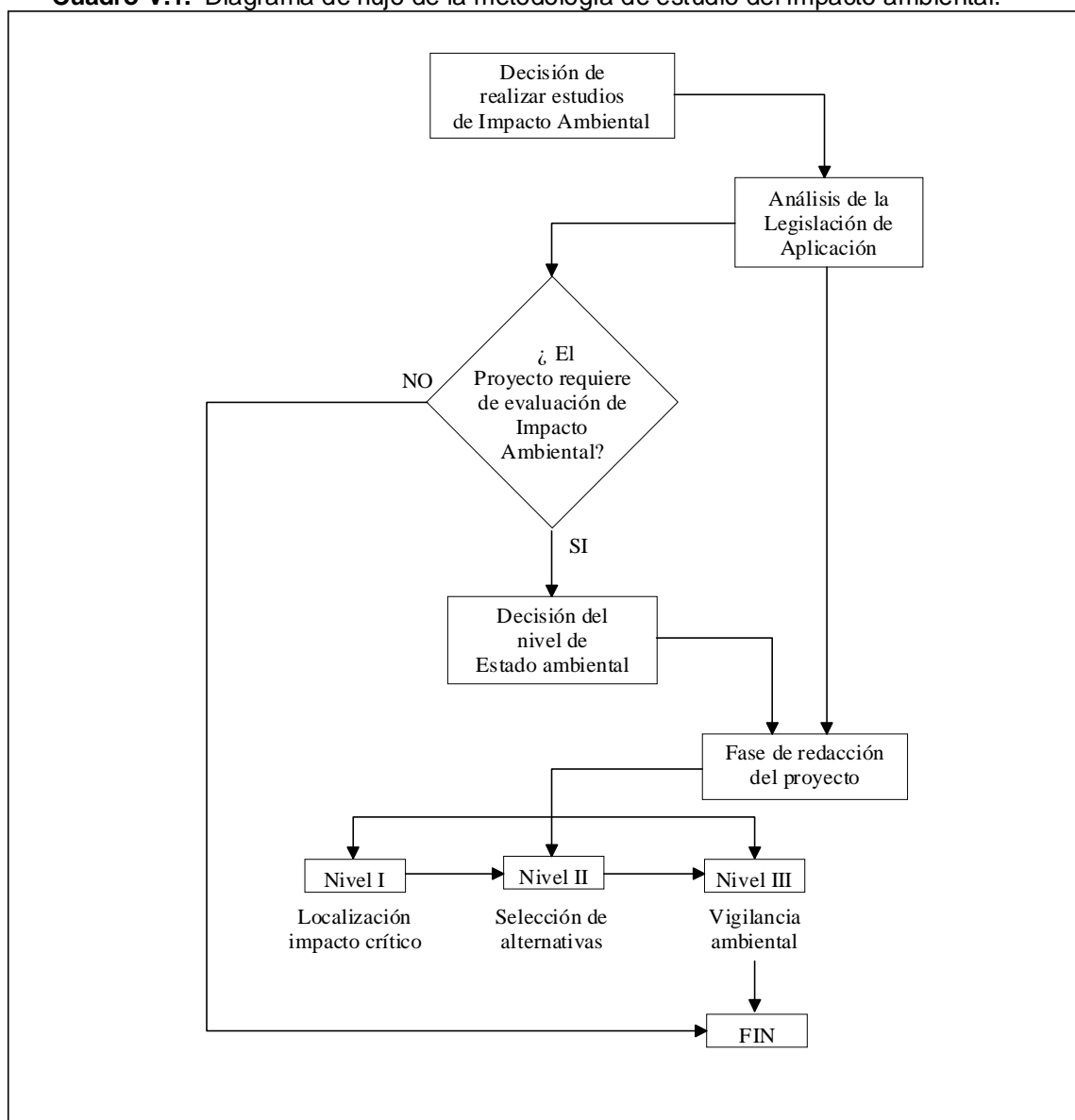
Los estudios ambientales se organizan de forma escalonada y en paralelo a las distintas fases de redacción del proyecto.

La situación ideal será aquella en la que el equipo técnico de redacción y el campo de especialistas ambientales se integren desde un primer momento.

En el cuadro V.1 se muestra el diagrama de flujo metodológico del modelo propuesto.

La primera decisión a tomar consistirá en la necesidad u obligación de que el Proyecto en cuestión requiera o no de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA). El análisis de la normativa específica y sectorial en los ámbitos de la Unión Europea, estado español, autonómico y local, en esta materia determinará tal decisión.

La segunda cuestión a resolver es el nivel o alcance que deba tener el estudio de impacto ambiental. La fase de redacción del proyecto y la legislación específica sobre EIA serán las claves para resolver esta decisión.

**Cuadro V.1.** Diagrama de flujo de la metodología de estudio del impacto ambiental.



## **V.2.2. Contenido del estudio de impacto ambiental**

El estudio de impacto ambiental que acompañará al Proyecto en su redacción final tendrá el siguiente contenido:

### **1. INTRODUCCIÓN**

- 1.1. Antecedentes*
- 1.2. Marco legislativo*
- 1.3. Objetivos y alcance del Estudio*
- 1.4. Consultas realizadas*
- 1.5. Metodología*
- 1.6. Equipo redactor*

### **2. ANÁLISIS DEL PROYECTO**

- 2.1. Objetivo y justificación del proyecto*
- 2.2. Alternativas*
- 2.3. Previsiones de desarrollo*
- 2.4. Proyectos asociados*
- 2.5. Descripción de las características básicas del Proyecto*
- 2.6. Programa del proyecto*

### **3. ANÁLISIS DEL MEDIO**

- 3.1. Definición del entorno de afectación*
- 3.2. Estudio del entorno*
  - 3.2.1. Medio físico*
  - 3.2.2. Medio biológico*
  - 3.2.3. Medio perceptual*
  - 3.2.4. Medio social*
- 3.3. Valoración del entorno*

### **4. ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS**

- 4.1. Definición de las acciones de impacto*
- 4.2. Definición de los elementos y/o procesos susceptibles de impacto*
- 4.3. Definición de las hipótesis de impacto*
- 4.4. Valoración de los impactos*

### **5. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

### **6. MEDIDAS CORRECTORAS**



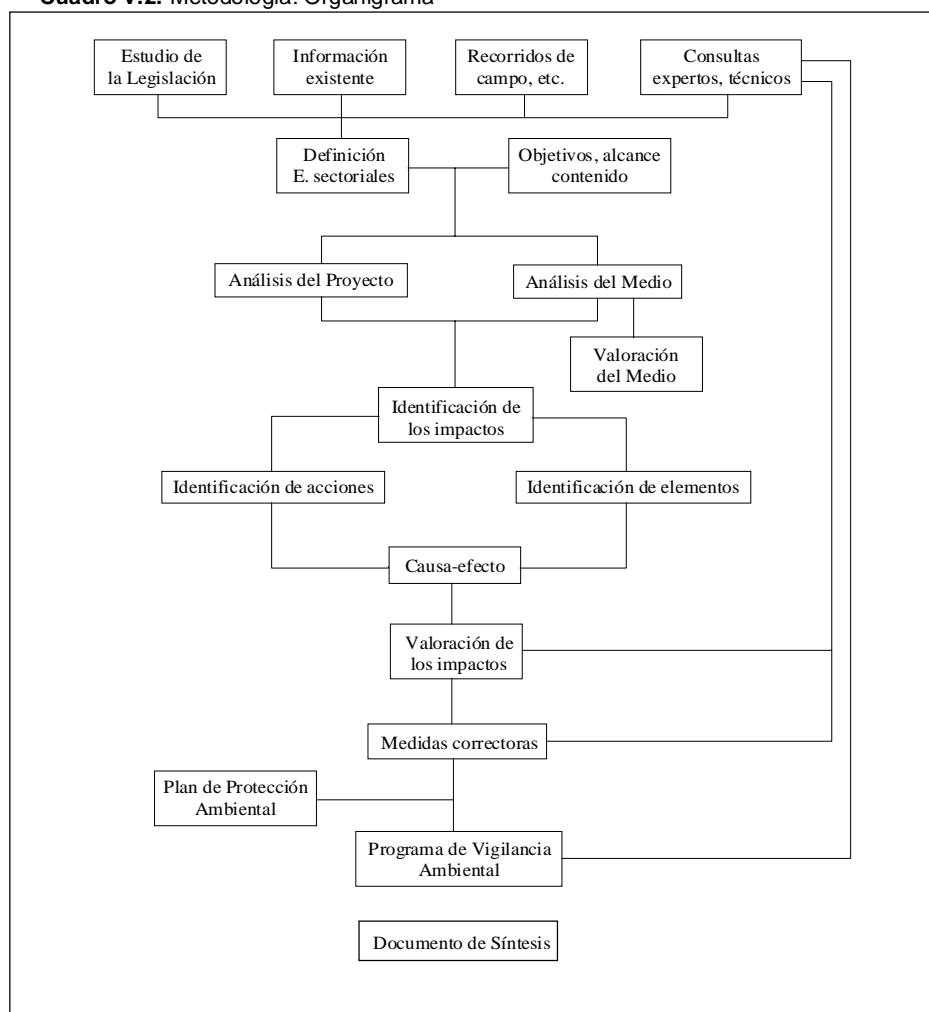
## 7. PLAN DE VIGILANCIA AMBIENTAL

## 8. MEMORIA RESUMEN

## 9. BIBLIOGRAFÍA

La información para el desarrollo de este contenido se irá aportando de forma escalonada según las fases de redacción del proyecto y correspondientes niveles del estudio ambiental. En el cuadro V.2 se presenta un diagrama de desarrollo del contenido del Estudio de Impacto Ambiental.

**Cuadro V.2. Metodología: Organigrama**





## V.3 Desarrollo de los contenidos

A continuación se detallan los contenidos que ha de incluirse en cada uno de los epígrafes anteriormente citados.

### V.3.1 Introducción

En los distintos apartados de este punto deberá destacarse los siguientes aspectos:

- Promotor de la obra
- Objetivos y alcance final del Estudio de Impacto Ambiental, de ahí la necesidad de la revisión de la legislación de aplicación.
- Consultas realizadas, por propia iniciativa del equipo redactor y/o promovida por el Órgano con competencia en Medio Ambiente, siguiendo el procedimiento administrativo de EIA según legislación vigente.
- Equipo redactor: donde figure el coordinador responsable del equipo y cada uno de los integrantes del mismo, con su titulación académica y la parte del estudio - o estudio sectorial- en que intervino.

### V.3.2 Análisis del proyecto

#### *Objetivo*

La finalidad de este capítulo es la siguiente:

- Conocer la necesidad y justificación del proyecto.
- Facilitar, mediante el conocimiento del proyecto la identificación de las acciones del mismo que pudieran ser causa de impacto ambiental.

#### *Método*

Análisis detallado, desde la perspectiva ambiental, de las posibles actividades, obras y actuaciones susceptibles de causar impacto para cada una de las alternativas que contemple, y en cada una de sus posibles fases a saber:





- Fase de prospección.
- Fase de construcción.
- Fase de existencia.
- Fase de funcionamiento o explotación.
- Fase de abandono o de obsolescencia.

### V.3.3 Análisis del medio

#### *Objetivo*

La finalidad de este capítulo es la siguiente:

- Facilitar la identificación de elementos ambientales y procesos que puedan ser alterados por el proyecto.
- Posibilitar la relación causa-efecto de los impactos.
- Caracterizar y valorar la calidad del medio en la situación sin proyecto y, en consecuencia, poder:
  - Valorar los impactos (por comparación con la calidad del medio en la situación con proyecto).
  - Valorar los resultados del programa de Vigilancia Ambiental.

#### *Método*

Para el desarrollo de este análisis del medio es necesario:

- La delimitación del entorno de afectación del Proyecto.
- El estudio del medio afectado.
- La valoración del medio afectado.
- *Delimitación del entorno*

Se denomina entorno del proyecto a la parte del medio que interactúa con el Proyecto. En consecuencia, el ámbito geográfico del entorno se corresponde con el área de extensión de las interacciones que se pretenden analizar. Es decir, cada uno de los elementos y/o procesos afectados tendrá su



propia cuenca espacial que deberá ser delimitada. El ámbito total será la envolvente territorial que integre a la totalidad de los espacios afectados por el Proyecto. Es necesario, por ello, tener un conocimiento previo -o de partida- de los elementos y/o procesos afectados. Esta delimitación podrá, por tanto, modificarse -ampliarse o reducirse- a lo largo del estudio de impacto ambiental.

- *Estudio del entorno (o conjunto de entornos) de afectación.*

Delimitado el entorno de afectación se procederá a su análisis, mediante estudios sectoriales que comprenderán los distintos componentes integrantes del mismo, a saber:

- \* **Ámbito natural:**

- Medio físico:

- Aire
    - Clima
    - Suelo
    - Agua
    - Procesos:

- Dinámica marina
      - Dinámica sedimentaria
      - Procesos erosivos
      - Calidad del medio
      - etc.

- Medio biótico (en cada tipo de medio afectado: estuario, playa, duna, litoral, nerítico, etc):

- Flora y vegetación
    - Fauna
    - Ecosistemas: relaciones, procesos, estabilidad, dinámica etc.

- Medio perceptual:

- Paisaje

- \* **Ámbito social:**

- Sistema territorial:

- Usos del suelo y del litoral



Infraestructura  
Análisis del planeamiento  
Núcleos de población

- Sistema demográfico:
  - Evolución de la población
  - Estructura de la población
  - Población activa (ocupada y en paro)
  - Nivel de instrucción y estilo de vida
  - Aceptación social del proyecto
- Sistema socio-cultural
  - Patrimonio histórico:
    - Monumentos
    - Yacimientos arqueológicos
    - etc,
  - Sistema cultural:

La valoración se realizará mediante la aplicación de un criterio o combinación de criterios que reflejen de la forma más objetiva posible el mérito que tiene un espacio (en su conjunto o en virtud de algunos de los elementos que lo componen: especies, recursos, patrimonio, fragilidad visual, signos culturales, productividad, etc.) para su protección y/o conservación.

Se presenta a continuación el conjunto de criterios que, sin carácter excluyente, se aplicará para la valoración e interpretación del medio:

- Legislativo: se aplicará en aquellos casos, aspectos, y/o medios en los que exista una legislación sectorial vigente, tal como residuos tóxicos y peligrosos, niveles de inmisión en calidad de aire, normativa de calidad del agua para baño, producción de moluscos, etc.
- Rareza: se refiere a la escasez de un recurso, espacio (dunas, turberas, etc), especies, etc. dentro de un ámbito geográfico (local, regional, nacional, internacional).
- Singularidad: hace mención este criterio al carácter de excepcionalidad que



podiera presentar un determinado elemento del medio, por su *interés ecológico* (especies endémicas, por ejemplo), *grado de protección* (especies o hábitat protegidos por legislación), *interés geológico*, *interés cultural*, *científico*, *educativo*, etc.

- **Naturalidad:** estima el estado de conservación de la biocenosis, indicando el grado de empobrecimiento causado por la influencia humana.
- **Fragilidad:** representa el grado de vulnerabilidad del medio (o de sus elementos: paisaje, comunidad biológica..) frente a los cambios producidos en el medio ambiente.
- **Diversidad:** se puede referir a especies (biodiversidad), hábitats, recursos, paisaje y, en general, de cualquier elemento del medio. Define la probabilidad de encontrar un elemento distinto dentro de una población total. La biodiversidad indica el grado de estructuración y complejidad de un ecosistema.
- **Grado de aislamiento:** mide la posibilidad de dispersión de los elementos del ecosistema. En general, se considera que las poblaciones aisladas son más sensibles a los cambios ambientales.
- **Productividad:** se refiere a la capacidad de producción de materia orgánica por unidad de biomasa (tasa de renovación de la biomasa tanto de los ecosistemas naturales como de los administrados por el hombre).

#### V.3.4 Análisis de los impactos

##### *Objetivo*

La identificación y posterior valoración global de los impactos, para cada alternativa:

##### **Método para la identificación de impactos:**

Para la formulación de las hipótesis de impacto se definirá una matriz de impacto causa-efecto. La base para ello es el análisis del Proyecto y de su entorno, y se procederá a la:



- Identificación de acciones que puedan ser causa de impactos.
- Identificación de elementos y/o procesos del medio susceptibles de ser alterados por el Proyecto.
- Identificación de los impactos, cruzando cada acción con el conjunto de elementos y procesos del medio.



**ESCOMBROS Y VERTIDOS INCONTROLADOS EN LA PLAYA DE PEDREGALEJO, MÁLAGA**

Se propone a continuación una matriz específica para este tipo de proyecto. Esta matriz deberá ser adaptada a cada tipo concreto de proyecto, toda vez que los impactos se producen como una relación de un proyecto determinado en una determinada y concreta geografía.

Como métodos de apoyo para la definición concreta de la matriz de impacto se proponen los siguientes:



- Escenarios de comparación.
- Consulta a expertos.
- Técnicas de grafos.

***Método para la valoración de los impactos:***

La valoración se realizará mediante un procedimiento numérico que expresará para cada impacto de cada alternativa:

- la importancia del impacto.
- la importancia del elemento o proceso impactado.

***- Método para la estimación de la importancia del impacto***

Criterios: los criterios a tener en cuenta son los que figuran en el Real Decreto 1131/88, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/86, de 28 de junio, de Evaluación de impacto ambiental:

- \* Signo
- \* Intensidad ( C )
- \* Extensión (Ex)
- \* Momento (Mo)
- \* Persistencia (PE)
- \* Reversibilidad (RV)
- \* Acumulación (AC)
- \* Efecto (EF)
- \* Periodicidad (PR)
- \* Recuperabilidad (RC)

La importancia del impacto se estimará mediante la siguiente expresión:

$$I = \pm C \cdot V$$

siendo:

$I$	=	Importancia del impacto
$C$	=	Intensidad del impacto



$V$  = Función de los efectos del impacto, que se estima de la siguiente manera:

$$V = 1/10 (Ex + Mo + PE + RV + AC + PR + EF + 3RC)$$

Los valores que pueden tomar los distintos criterios son los siguientes:

<b>Naturaleza</b> Impacto beneficioso Impacto perjudicial	+ -	<b>Persistencia (PE)</b> Fugaz Temporal Permanente Crítico	1 4 8 +2
<b>Intensidad ( C )</b> Baja Media Alta Muy alta Total	1 2 4 8 10	<b>Reversibilidad (RV)</b> Corto plazo Medio plazo Irreversible Crítica	1 4 8 +2
<b>Extensión (Ex)</b> Puntual Parcial Extensión Total Crítica	1 2 4 8 +2	<b>Acumulación (AC)</b> Simple Acumulativo Sinérgico Muy sinérgico	1 2 4 8 10
<b>Momento (Mo)</b> Largo plazo Medio plazo Inmediato Crítico	1 4 8 +2	<b>Periodicidad (PR)</b> Irregular o aperiódico y discontinuo Periódico Continuo Crítico	1 4 8 +2
<b>Recuperabilidad (RC)</b> Recuperable inmediato Recuperable medio plazo Mitigable y/o compensable Irrecuperable Crítico	1 2 4 8 +2	<b>Efecto (EF)</b> Directo (proceso) Directo (elemento) Indirecto (proceso) Indirecto (elemento) Crítico	8 4 2 1 +2

**Tabla V.2 Valores de los criterios de evaluación**

La importancia del impacto toma valores comprendidos entre 1 y 100.



*- Método para la estimación de la importancia del elemento o proceso impactado*

Mediante panel de expertos se procederá a ponderar los distintos elementos (o procesos) impactados. Se repartirá 100 puntos entre dichos elementos, mediante alguno de los procedimientos siguientes:

- Ordenación por rango
- Ordenación por grados escalares
- Comparación por pares
- Ordenación y comparación por pares.

*- Método para estimar el grado de impacto global de cada alternativa*

El impacto de cada alternativa se estimará mediante la siguiente expresión:

$$I G_j = \sum_{i=1}^n P_i (UCA_0 - UCA_j)$$

siendo:

- $IG_j$  = impacto global de la alternativa  $j$
- $P_i$  = peso del impacto  $i$
- $UCA_0$  = unidades de calidad ambiental en la situación preoperacional (estado cero, sin proyecto)
- $UCA_j$  = unidades de calidad ambiental con proyecto según la alternativa  $j$ .

Se procederá para ello de la siguiente manera:

1. Obtención de los valores de importancia de cada impacto en cada fase del proyecto y para cada alternativa:  $I_{ij}^k$  = valor de importancia del impacto  $i$  en la alternativa  $j$  en la fase  $k$  del proyecto.
2. Selección de los impactos ( $I_{ij}$ ) de las distintas fases para cada alternativa.
3. Estimación de los valores  $I_{ij}$  en la situación preoperacional.

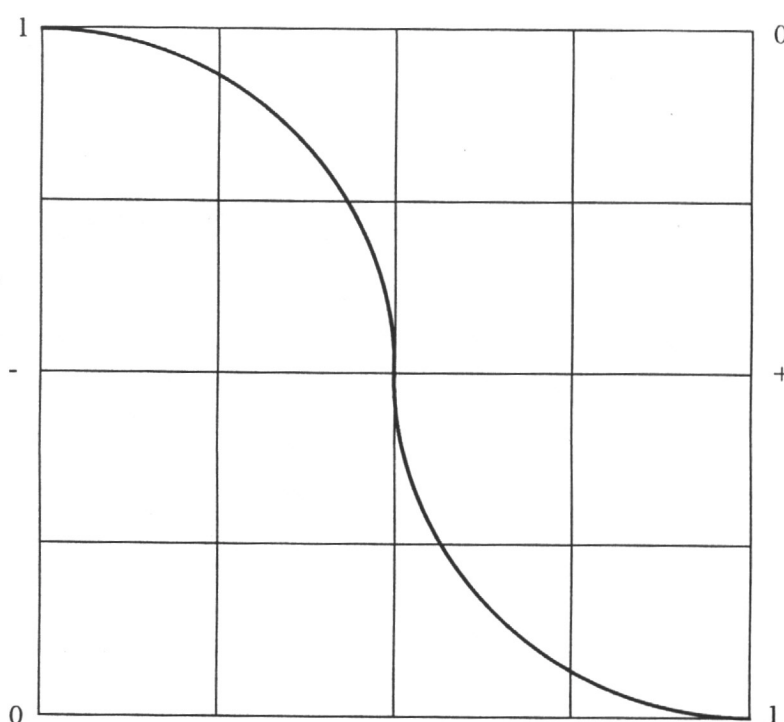




4. Transformación de los valores de importancia  $I_{ij}$  por sus correspondientes valores de unidades de calidad ambiental ( $UCA_{ij}$ ).

La calidad ambiental correspondiente a cada impacto es función de su valor de importancia:  $UCA_{ij} = f(I_{ij})$

La función de transformación es la siguiente:



**Figura V.1 Función de transformación**

Los valores de importancia se transforman en valores de calidad ambiental que están comprendidos entre 0 y 1.

Para aquellos valores de importancia negativos se utiliza la escala 0-1 de la ordenada de la izquierda, y para los valores de importancia positivos la escala 1-0 de la derecha.

5. Ponderación de los valores de la calidad ambiental debido a cada impacto por el correspondiente peso relativo dado a cada elemento impactado:  $P_i \cdot UCA_{ij}$  unidades de calidad ambiental ponderada del impacto  $i$  en la



alternativa  $j$ .

6. Obtención del impacto global de cada alternativa aplicando la expresión:

$$I G_j = \sum_{i=1}^n P_i (UCA_0 - UCA_j)$$

### V.3.5 Selección de alternativas

El valor de impacto global obtenido para cada alternativa permite la clasificación de las mismas en función de su incidencia medioambiental y, por tanto, la selección de la más adecuada desde la perspectiva ambiental.

### V.3.6 Medidas correctoras

En este punto se proponen y justifican las medidas que:

- Evitarán
- Disminuirán
- Compensarán

los impactos de la alternativa seleccionada.

En la valoración de cada alternativa se tuvo en cuenta la posibilidad de aplicación de estas medidas para los impactos negativos, por lo que no es necesario una nueva valoración. Definidas las medidas se elabora un programa de aplicación de las mismas según las diferentes fases de desarrollo del Proyecto (construcción, funcionamiento).



### V.3.7 Plan de vigilancia ambiental

#### *Objetivo*

Serán los establecidos por la normativa vigente: Real Decreto 1131/1988 de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental, y por el Decreto de Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente a la Autonomía donde se ubique el Proyecto si fuera de aplicación al mismo.

#### *Contenido*

El contenido deberá ir dirigido a:

1. Informar al órgano administrativo responsable\*<sup>1</sup> de cuales son los aspectos del medio y/o del Proyecto que deberá ser objeto de vigilancia, en cada fase del Proyecto.
2. Elaborar la lista de impactos residuales cuya total corrección no sea posible y de los que se deriven efectos notables sobre el medio ambiente, los recursos naturales o sus procesos dinámicos esenciales.
3. Elaborar un método sistemático “*ad hoc*” sencillo y económicamente realizable para llevar a cabo la vigilancia ambiental.

#### *Método*

El método sistemático se elaborará en función de los siguientes puntos:

1. Identificación de elementos, procesos ambientales a controlar y vigilar en cada fase del Proyecto.
2. Selección de los indicadores ambientales para estimar la evolución de la calidad del medio respecto de los elementos y procesos a controlar.

---

<sup>1</sup> El órgano con competencia sustantivo según Legislación.



3. Definición de un programa de medidas en el tiempo y en el espacio para medir los indicadores seleccionados.
4. Valoración de los resultados respecto de la calidad ambiental en la situación preoperacional y/o situación de partida que se decida (inicial de explotación del proyecto...). En esta valoración se deberá determinar:
  - El grado de acierto en la identificación y valoración de los impactos.
  - La eficacia de las medidas correctoras llevadas a cabo y la necesidad de en tal caso de nuevas medidas.
  - La identificación de impactos no identificados o de forma incorrecta en el Estudio de Impacto Ambiental y la necesidad de proponer medidas para su prevención y corrección.
  - La necesidad de perfeccionamiento del Plan de Vigilancia Ambiental.
5. Preparación de un informe periódico basado en el punto anterior.

### V.3.8 Memoria de síntesis

Cuando sea conveniente, por el volumen que pueda llegar a alcanzar el Estudio de Impacto Ambiental, o por imperativo legal, se redactará un documento de síntesis que comprenderá:

- Las conclusiones relativas a la viabilidad de las actuaciones propuestas.
- Las conclusiones relativas al examen y elección de las alternativas.
- La propuesta de prevención y corrección de los impactos.
- La propuesta del Plan de Vigilancia Ambiental.

Este documento no deberá exceder de 25 páginas<sup>2</sup> y se redactará en términos

---

<sup>2</sup>Según el R.C. 1131/88 que desarrolla la ley específica de Evaluación de Impacto Ambiental para todo el Estado Español (R.D.L. 1302/86).



asequibles a la comprensión general.

## V.4 Aplicación del modelo a las fases de redacción del proyecto

El modelo propuesto se desarrollará a lo largo de toda la redacción del Proyecto (ver Figura V.1), en los siguientes términos:

### Nivel I:

#### *Objetivo:*

Se corresponde con los estudios previos y el objetivo del Estudio preliminar en la identificación de impactos críticos en alternativas.

#### *Procedimiento:*

Efectuada para cada alternativa su correspondiente valoración de importancia de los impactos identificados ( $I_{ij}^k$ ), se considerarán impactos críticos aquellos que:

- a) Superan el valor de 75 y,
- b) Afecten a elementos y/o procesos esenciales del entorno de afectación, tales como:
  - Estructuración y funcionamiento del ecosistema: dinámica marina, productividad biológica, especies biológicas estructurantes del sistema.
  - Espacios o especies protegidas por legislación.
  - Usos legítimos del medio marino: baños, cultivos, pesquerías, etc...

### Nivel II:

#### *Objetivo:*

Se corresponde con la fase de anteproyecto y el objetivo es la



valoración del impacto global ( $IG_j$ ) de cada alternativa y la selección de alternativas.

*Procedimiento:*

Mediante lo expuesto en los puntos V.3.4 y V.3.5

**Nivel III:**

Estudio detallado de Impacto Ambiental.

*Objetivo:*

Diseño y proyecto de las medidas correctoras:

- Plan de vigilancia ambiental
- Memoria de síntesis

*Procedimiento:*

Según lo expuesto en los puntos V.3.6 y V.3.7 y V.3.8 respectivamente.



**ANEJO I**

---

**NOMENCLATURA**



## **Anejo I. Nomenclatura**

AI.	NOMENCLATURA.....	AI.2
AI.1	Introducción.....	AI.2
AI.2	El perfil de las playas .....	AI.3
	AI.2.1 Definiciones .....	AI.3
	AI.2.2 Variaciones del perfil: playas disipativas y reflejantes .....	AI.5
AI.3	La Forma en planta de las playas .....	AI.9
	AI.3.1. Definiciones .....	AI.9
AI.4	La hidrodinámica de las playas .....	AI.10
	AI.4.1 Definiciones .....	AI.10
	AI.4.2 La rotura del oleaje.....	AI.13



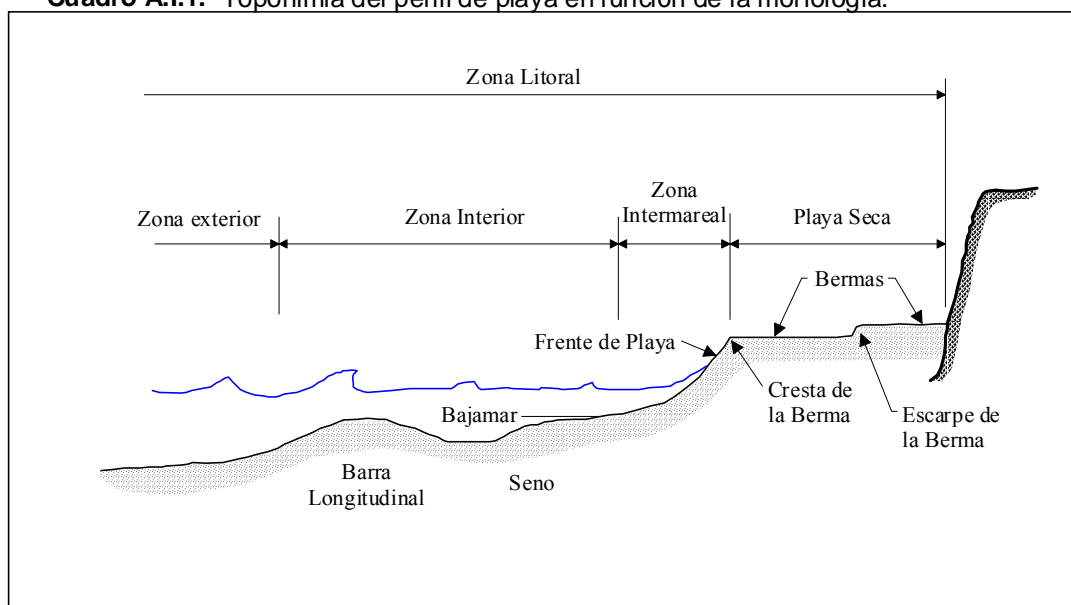
## AI. NOMENCLATURA

### AI.1 Introducción

Este Anejo se dedica a la recopilación de la nomenclatura que se usa en el documento. En cuanto a la definición de los términos empleados, se acepta la nomenclatura del *Coastal Engineering Research Center*, CERC, tomada del *Shore Protection Manual* (1984). En algunos casos no existe terminología específica en Castellano. Dada la amplia difusión de la terminología Inglesa, se presentarán, siempre que sea posible, todos los términos en ambos idiomas, Castellano e Inglés, respectivamente.

Se define **Playa (*Beach*)** como la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje. Queda claro pues que la definición de playa no puede separarse de la hidrodinámica. Esta definición de playa coincide prácticamente con la definición de **Zona Litoral (*Litoral Zone*)** dada por Komar en el cuadro A.I.1. No hay que confundir esta definición morfodinámica de la playa con la definición, mas amplia, dada por la Ley de Costas, que incluye en la playa toda la Zona Costera adyacente a la misma tal como se define a continuación.

Las playas se enmarcan dentro de la **Zona Costera (*Coastal Zone*)**, que comprende el área de la plataforma continental y de la costa en la que los procesos morfodinámicos vienen determinados por la dinámica marina. Su desarrollo hacia tierra y hacia el mar depende por lo tanto de la tipología de la costa, de la plataforma continental, y del clima marítimo de la zona. Por ejemplo, en una costa baja y arenosa, sometida a fuertes vientos, comprende el área dunar interior de la playa, cuya dinámica depende de la capacidad de aportación de arena desde la playa por parte del oleaje y de la acción de los vientos costeros. En una desembocadura, comprenderá toda la zona sometida a la acción de las mareas. Por la parte del mar, su alcance depende también del clima marítimo en la zona, abarcando todas las zonas de la plataforma continental cuya morfología depende de la acción del oleaje o de las corrientes provenientes de la costa.

**Cuadro A.I.1.** Toponimia del perfil de playa en función de la morfología.

## AI.2 El perfil de las playas

### AI.2.1 Definiciones

Se define **Perfil de Playa, (*Beach Profile*)** como la variación de la profundidad del agua,  $h$ , con la distancia a la línea de costa,  $x$ , en dirección normal a la misma. Esta definición asume que la playa es localmente, de batimetría recta y paralela, por lo que la **Línea de Costa, (*Shoreline*)** puede ser representada por una curva de nivel cualquiera de la playa. Es bastante habitual el tomar el nivel medio del mar para la definición de la línea de costa. En playas con marea es conveniente indicar que nivel se emplea en la definición de la línea de costa. La extensión del perfil hacia tierra y hacia el mar viene determinado por su corte con los límites hacia tierra y hacia el mar de la playa, es decir, por los límites de la zona litoral.

En el cuadro A.I.1 se ha indicado algunos de los términos relativos a las zonas en que se divide el perfil. Sus definiciones son las siguientes:



**Playa seca (*Backshore*):** Zona del perfil de playa comprendida entre el límite de tierra de la playa y el inicio del frente de playa.

**Berma (*Berm*):** Zona cuasi-horizontal de la playa seca formada por la deposición de sedimento debida al oleaje. Su límite por el lado del mar es el brusco cambio de pendiente que se produce hacia el frente de playa, denominado **Borde de la Berma (*Berm Edge*)**. Cuando, tras una temporada de gran actividad del oleaje (Invierno), se sucede un período de calma (Verano), una nueva berma, **Berma de Verano** se puede añadir a la anterior, **Berma de Invierno**, con un nivel horizontal inferior (debido a que el ascenso del oleaje es inferior). Marcando la separación entre las dos bermas puede haber una zona de mayor pendiente, correspondiente a frente de playa de Invierno.

**Escarpe de Playa (*Beach Scarp*):** Escalón vertical en la playa seca formado por la erosión de la berma producida por un temporal.

**Zona Intermareal (*Foreshore*):** Zona de la playa comprendida entre la parte exterior de la berma y el límite de descenso del oleaje en bajamar.

**Frente de Playa (*Beach Face*):** Sección de la playa que queda expuesta a la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje. En caso de mares con marea, el frente de playa queda definido por la zona de ascenso - descenso en pleamar.

**Escalón de Playa (*Beach Step*):** Zona de mayor pendiente que aparece en ocasiones en el límite inferior del frente de playa. Suele contener sedimentos mas gruesos que en el resto del perfil.

**Terraza de Bajamar (*Low Tide Terrace*):** Parte de la zona intermareal situada entre el límite inferior del frente de playa y el límite de descenso del oleaje en bajamar.

**Canaleta de Bajamar (*Runnel*):** Depresión en la terraza de bajamar que puede aparecer inmediatamente por debajo del frente de playa. Puede estar asociada al seno de una barra creciente muy próxima al frente de playa.

**Barra Longitudinal (*Longshore Bar*):** Acumulación de arena cuasi paralela a la Línea de Costa. Puede haber varias barras en el perfil de la playa. La barra mas interior puede quedar expuesta en bajamar.



**Cresta de la barra (*Bar Crest*):** Zona de mayor elevación de la barra longitudinal.

**Seno de la Barra (*Longshore Trough*):** Depresión en el perfil de playa paralela a la línea de costa, asociada con la Barra. Se produce inmediatamente hacia el interior de la barra.

**Playa Sumergida (*Submerged Beach*):** Zona de la playa comprendida entre el límite de descenso del oleaje en bajamar y el límite exterior del perfil. En la literatura inglesa se divide en (*Inshore*), zona de movimiento activo de sedimento, comprendida desde el nivel de descenso en bajamar hasta la zona exterior de la barra y (*Offshore*), en la zona exterior.

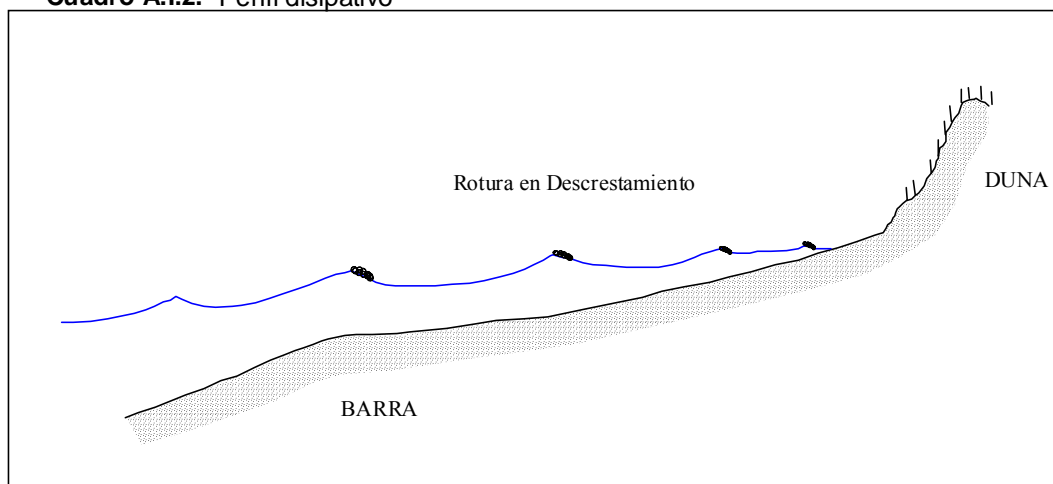
#### **AI.2.2 Variaciones del perfil: playas disipativas y reflejantes**

El perfil de las playas cambia constantemente como respuesta a los cambios del transporte transversal de sedimentos que produce la dinámica marina, especialmente el oleaje. Los cambios mas notorios son los asociados a los desplazamientos de las barras y el avance o retroceso de la berma. Estos cambios morfológicos generan toda una tipología de formas de playa. De entre las múltiples formas posibles de perfil, existen dos extremas que presentan una geometría en planta aproximadamente bidimensional, es decir, en las que el perfil representa bastante aproximadamente la morfología de la playa. Estas dos formas extremas del perfil se denominan perfil disipativo y reflejante.

El **perfil disipativo**, cuadro A.I.2, es característico de playas de arena fina y niveles de energía elevados. En general, el frente de playa no puede ser distinguido de la terraza de bajamar y la zona intermareal tiene un talud ligeramente cóncavo con pendientes bajas y sin formaciones destacables. Asimismo, no existen bermas que delimiten la zona de playa seca, por lo que el perfil cóncavo se inicia prácticamente en el pie de duna o en el acantilado en su caso. La playa sumergida suele presentar una o varias barras longitudinales, con senos y crestas poco marcados.



**Cuadro A.I.2.** Perfil disipativo

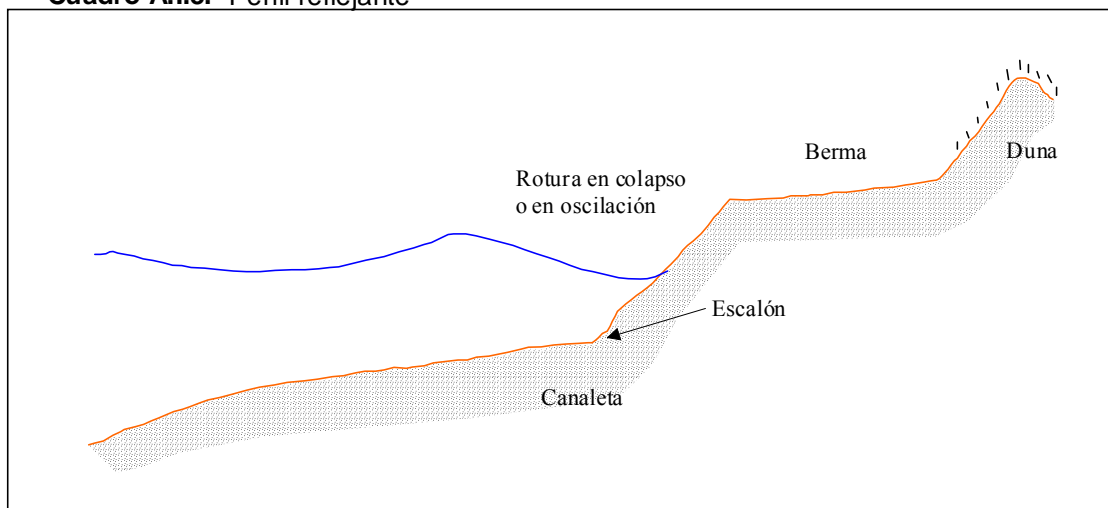


**ROTURA DE OLAJE EN PLAYA DISIPATIVA, VALDEARENAS, CANTABRIA**



El **perfil reflejante**, cuadro A.I.3, se presenta en playas de arenas medias a gruesas, con niveles de energía bajos. En este caso, el borde de la berma marca claramente el inicio del frente de playa. En la playa seca pueden apreciarse restos de bermas y escarpes correspondientes a perfiles mas retrasados producidos por condiciones de oleaje mas energéticas. Sobre el frente de playa son frecuentes los *beach cusps* y suele existir un escalón en la parte inferior del frente de playa compuesto de materiales mas gruesos, después del cual la pendiente del perfil baja considerablemente, conservando una forma cóncava. Si la playa es macromareal, el escalón del pie del frente de playa queda arrasado por la acción del oleaje y una plataforma de bajamar de pendiente suave queda al descubierto en bajamar. Esta plataforma queda frecuentemente inundada en bajamar por la surgencia freática que se produce en la parte inferior del frente de playa. En la playa sumergida no se aprecian barras.

**Cuadro A.I.3.** Perfil reflejante





ROTURA DEL OLEAJE EN PLAYA REFLEJANTE, USGO, CANTABRIA

Entre estos dos tipos extremos de morfología del perfil se presenta toda una gama de estados intermedios. Estos estados de playa no se pueden definir mediante un sólo perfil, pues son básicamente tridimensionales y la morfología está fuertemente relacionada con los sistemas circulatorios que se establecen en las playas.

Algunas playas muestran una gran variabilidad en su perfil, respondiendo a condiciones de oleaje fuertemente variables. En las latitudes templadas, las playas medianamente expuestas, con tamaños de grano medio a fino, de 0.2 a 0.3 mm, sufren condiciones de oleaje con fuertes variaciones estacionales. En general, el nivel medio de energía y los extremos de los temporales son muy superiores en los meses invernales. Tras una temporada de sufrir repetidos temporales, las citadas playas alcanzan una posición de cuasi-equilibrio que se aproxima bastante a la de las playas disipativas, y se dice que la playa ha alcanzado su **Perfil de Invierno**. Contrariamente, tras largos períodos de calma, mas frecuentes en los meses estivales, la playa recupera un perfil cercano al reflejante, indicándose que la playa





ha alcanzado su **Perfil de Verano**. Estos términos de 'perfil de Invierno' y 'perfil de Verano', son pues relativos y pueden no corresponderse, en un momento determinado con la estación del año en la que se encuentra el citado perfil, sino con el aspecto que presenta la playa en un momento determinado.

### AI.3 La forma en planta de las playas

Como se ha indicado en el apartado anterior, las playas de perfil disipativo y las reflejantes, muestran características longitudinales relativamente uniformes en la macroescala, por lo que quedan bien definidas morfológicamente por su perfil. Las playas intermedias, sin embargo, presentan grandes variaciones longitudinales en el perfil, por lo que en las mismas, no puede hablarse de un perfil tipo.

Las formas en planta a las que nos referiremos a continuación son las que aparecen en los estados de playa intermedios entre el disipativo y el reflejante. Estas formas en planta son el resultado de la interacción de la hidrodinámica y el sedimento a media escala y no hay que confundirlas con las formas a gran escala en planta de las playas, resultado de sus condiciones de contorno, como pueden ser el abrigo por bajos, cabos, canales de marea, obras artificiales, etc.

#### AI.3.1. Definiciones

Por lo que respecta a las formas en planta, los términos más comunes que se emplearán son los siguientes:

**Barras Crecientes (*Crescentic Bars*):** Barra claramente asimétrica, con el talud del lado de tierra mucho mas pendiente, que del lado del mar, indicando un desplazamiento de la barra hacia tierra. Estas barras suelen estar cortadas longitudinalmente por canales de retorno.

**Canales de Retorno (*Rip Channels*):** Zonas de mayor profundidad que cortan transversalmente las barras longitudinales y crecientes. Pueden quedar expuestos en bajamar y están asociados a la hidrodinámica de las corrientes en la zona de rompientes.



**Barras Transversales (*Trasverse Bars*):** Barra que se extiende en dirección aproximadamente perpendicular a la línea de costa. Frecuentemente su lado de tierra queda unido al frente de playa. Entre las barras transversales existen siempre canales de retorno.

**(*Beach Cusps*):** Formas rítmicas de entrantes y salientes que se forman en el frente de playa, con longitud de onda del orden de la decena de metros.

**(*Megacusps*):** Formas rítmicas de entrantes y salientes que se forman en el frente de playa, asociadas a secuencias longitudinales rítmicas de barras crecientes o transversales. Los entrantes en el frente de playa suelen estar enfrentados con los canales de retorno, mientras que los salientes coinciden con la zona de avance hacia tierra de la barra. Su longitud de onda es del orden de la centena de metros.

**(*Ripples*):** Formas rítmicas del lecho de las playas, de dimensiones horizontales del orden de los decímetros.

## AI.4 La hidrodinámica de las playas

Este apartado se dedica a repasar la nomenclatura relativa a conceptos de la hidrodinámica de las playas.

### AI.4.1 Definiciones

En el cuadro A.I.4, se presenta las divisiones que normalmente se utilizan a la hora de describir el flujo del oleaje sobre las playas. Sus definiciones son las siguientes:

**Ola Rota (*Bore*):** El origen del término bore proviene de la onda de marea que se propaga como un resalto móvil en estuarios de poca profundidad y con grandes carreras de marea. Por su similitud en la forma y en la hidrodinámica, se aplica también a la onda progresiva producida tras la rotura del oleaje.

**Zona de Rotura (*Breaker Zone*):** Es la porción de la zona interior en la que se produce la rotura del oleaje. Si el oleaje fuera regular, se denominaría Línea de Rotura y determinaría el límite del lado del mar de la zona interior.



**Zona de Rompientes (*Surf Zone*):** Porción del área interior en la que se propagan los bores producidos tras la rotura

**Zona de Ascenso-Descenso (*Swash Zone*):** Porción de la zona interior sobre la que se produce la alternancia de ascenso y descenso del oleaje, quedando el fondo cubierto y descubierto alternativamente por el oleaje. Este flujo de ascenso-descenso sólo es notorio para las oscilaciones de onda corta (oleaje) en la zona del frente de playa.

**Zona Interior (*Nearshore Zone*):** Comprende la zona entre el máximo ascenso del oleaje en la playa y el límite hacia el mar de la rotura del oleaje. Incluye las zonas de ascenso - descenso, de rompientes y de rotura.

Otros términos de la hidrodinámica del oleaje que se emplearán se definen a continuación.

**Ondas Gravitatorias (*Gravity Waves*):** Son las ondas generadas por el viento y controladas por la gravedad y la fricción. Corresponden a la banda del espectro de energía entre 1 y 25 segundos, aproximadamente.

**Ondas Subarmónicas (*Subarmonic Waves*):** Ondas de frecuencia múltiplo de la onda principal que se producen por efecto del asomeramiento no lineal de una onda en profundidades reducidas. En general sólo el primer subarmónico, (doble frecuencia que la onda generadora) es detectable en las playas.

**Ondas Infragravitatorias (*Infragravity Waves*):** Ondas de gravedad de período superior a los 30 segundos, generadas por los grupos de ondas gravitatorias y controladas por la gravedad y la fricción.

**Tensión de Radiación (*Radiation Stress*):** Es el flujo de la cantidad de movimiento horizontal de la onda, promediado en un período del oleaje y en profundidad.

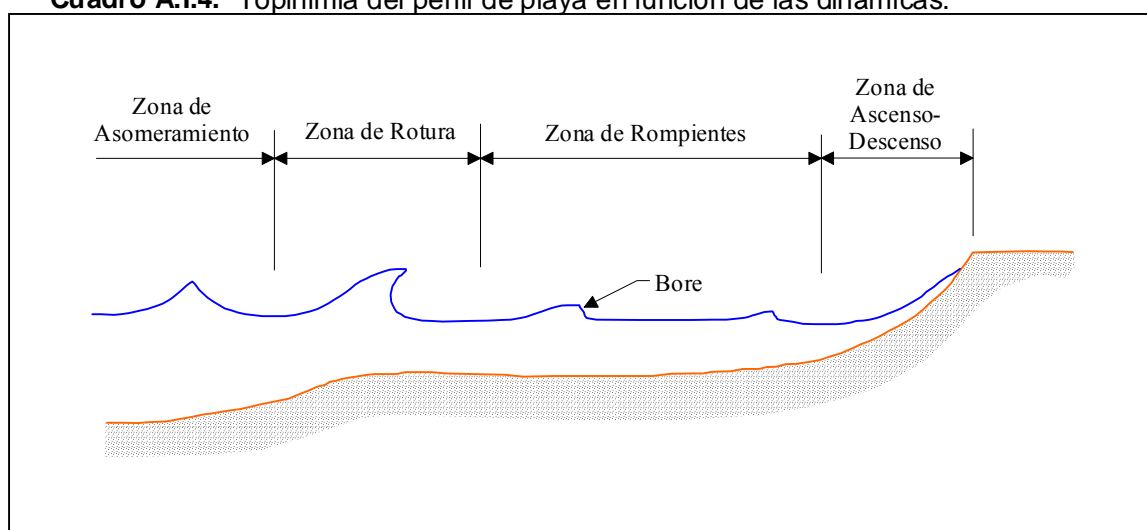
**(*Set - Up*):** Ascenso del nivel medio que se produce en la zona de rompientes, con un máximo en la intersección del nivel medio en movimiento con el perfil de playa.



**(Set - Down):** Descenso del nivel medio que se produce por los procesos del asomeramiento simple antes de la rotura de las olas, con un mínimo en la zona de rotura.

**Corriente Longitudinal (*Longshore Current*):** Corriente que se produce principalmente en la zona interior, paralela a la línea de costa, generalmente generada por el proceso de rotura del oleaje.

**Cuadro A.I.4.** Topinimia del perfil de playa en función de las dinámicas.



**Corriente de Retorno (*Rip Current*):** Corriente fuerte que fluye hacia el mar desde la costa, a través de la zona interior. Se muestra como una banda de agua agitada, debido a que al fluir sobre un Canal de Retorno de mayor profundidad que el entorno, el oleaje incidente rompe con dificultad, pero la corriente provoca el peraltamiento del mismo. La corriente de retorno se suele dividir en tres zonas: 1) **Corrientes de Alimentación (*Feeders*)**, que fluyen hacia el rip paralelamente a la costa, 2) **Cuello del Rip (*Rip Neck*)**, donde las corrientes de alimentación convergen en un flujo estrecho y rápido que se mueve hacia el mar a través de la zona de rompientes y 3) **Cabeza del Rip (*Rip Head*)**, situado del lado del mar de la zona de rotura, donde se expande y disipa el Rip.

**(*Surf Beat*):** Oscilación de largo período que se produce en las playas debido al asomeramiento y amplificación de las ondas infragravitatorias.



**Corriente de Resaca (*Undertow*):** Corriente en dirección al mar que se produce en la zona de rompientes, en las proximidades del fondo. Es una corriente gravitatoria de compensación por el efecto de bombeo hacia tierra y sobreelevación (*set-up*) que provoca la ola rota.

#### AI.4.2 La rotura del oleaje

Cuando el oleaje se propaga en profundidades decrecientes, su longitud de onda disminuye, por lo que el peralte aumenta. Cuando se alcanza una determinada relación entre el peralte, profundidad,  $h$  y pendiente del fondo, definida por un **Criterio de Rotura**, la ola se vuelve inestable y rompe. Un criterio de rotura sencillo, válido para playas de pendiente suave,  $\tan\beta(L/h) \ll 1$  es  $H_{rot} = \gamma h$ , donde  $\gamma$  se denomina **Índice de Rotura**, y su valor es aproximadamente 0.8.

El tipo de rotura del oleaje depende del peralte del mismo y de la pendiente del fondo. El Número de Iribarren  $I_r$  (o *Surf Similarity Parameter*) es un parámetro ampliamente aceptado como controlador del tipo de rotura. Si  $\beta$  es la pendiente del fondo, el  $n_1$  de Iribarren viene dado por:

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

Dado que en las playas se utiliza con frecuencia la altura de ola en rotura,  $H_b$ , para la definición de la dinámica, se suele utilizar el número de Iribarren en rotura,  $I_{rb}$ , definido por:

$$I_{rb} = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}}$$



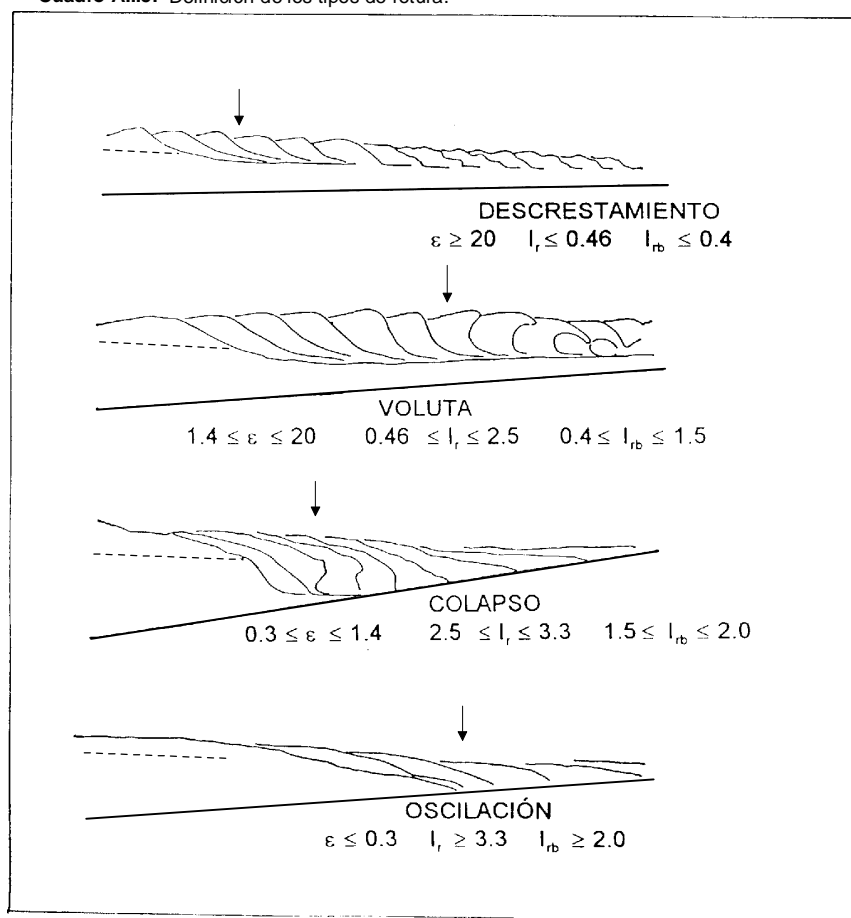
Se utilizará mas adelante también el parámetro de escala de rompiente,  $\varepsilon$ , mediante, definido por:

$$\varepsilon = \frac{a_b \omega^2}{g \tan^2 \beta} = \frac{\pi}{I_{rb}^2}$$

Donde  $a_b$  y  $\omega$  son la amplitud y frecuencia angular del oleaje incidente,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\tan \beta$  la pendiente del fondo e  $I_r$  el número de Iribarren.

El cuadro A.I.5 muestra varias secciones transversales de la zona de rompientes con las formas de los distintos tipos de rotura, junto con varios valores de  $I_r$ ,  $I_{rb}$  y  $\varepsilon$ , que las delimitan. Esto tipos de rotura se describen a continuación:

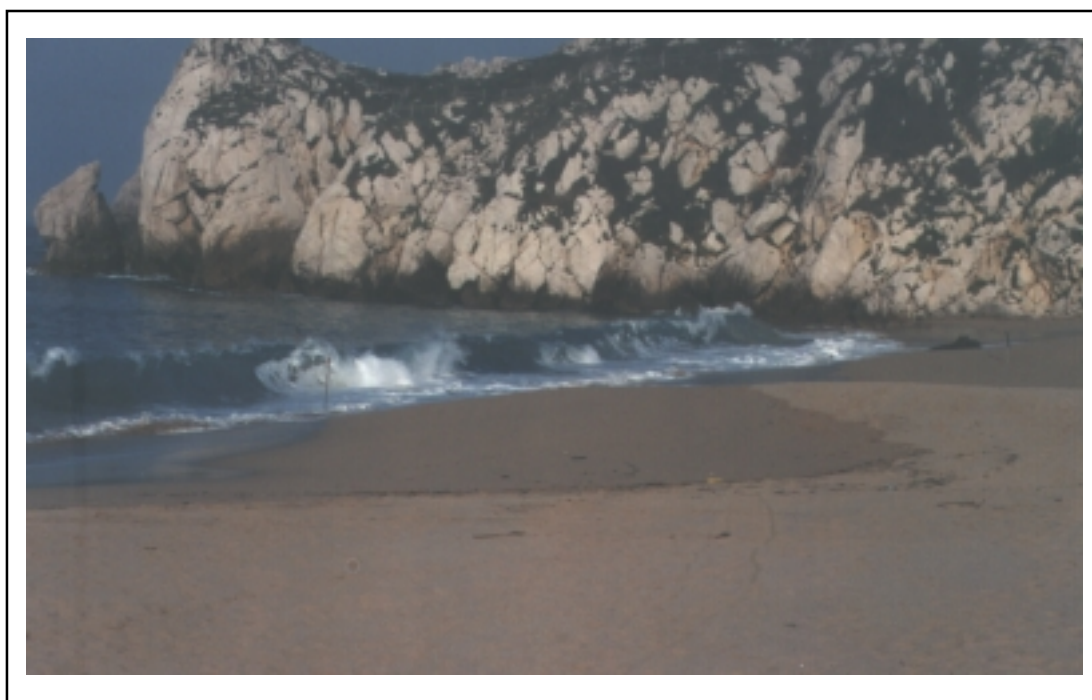
Cuadro A.I.5. Definición de los tipos de rotura.





**Oscilación (*Surging*):** Cuando las olas ascienden y descienden por el talud, con un mínimo de aire atrapado. El período de ascenso - descenso es menor que el período del oleaje y la reflexión es muy elevada. Este tipo de rotura se produce cuando  $I_r > 3.3$ , o  $I_{rb} > 2$ .

**Colapso (*Colapsing*):** A medida que el ni de Iribarren disminuye, el frente de la onda se aproxima a la vertical. Cuando  $I_r$  se aproxima a 3,  $2.5 < I_r < 3.3$  o  $1.5 < I_{rb} < 2$ , la ola comienza a desmoronarse por su base y colapsa. El aire queda parcialmente atrapado, formado espuma. El período de ascenso - descenso coincide con el período del oleaje y el flujo sobre el talud alcanza valores máximos. La reflexión comienza a disminuir debido a la pérdida de energía por turbulencia.



ROTURA DEL OLEAJE EN COLAPSO

**Voluta (*Plunging*):** Este tipo de rotura, muy frecuente en playas, se produce en un rango de números de Iribarren, comprendido entre  $0.46 < I_r < 2.5$ , o  $0.40 < I_{rb} < 1.5$ . La ola que rompe lanza su cresta hacia delante, rompiendo claramente en la base de la ola, encerrando una considerable cantidad de aire. El chorro que alcanza el agua penetra violentamente la superficie, levantando otra onda por delante de la



original e inyectando turbulencia hasta el fondo. El 'roller' generado por el volteo introduce una fuerte rotación en el flujo y el aire atrapado escapa a la superficie de forma explosiva. El conjunto de estos fenómenos disipa una considerable cantidad de energía en los primeros momentos de la rotura. Posteriormente, la ola continua rota formando un resalto móvil, 'bore', hasta llegar a la zona de ascenso - descenso por el talud de playa, que es mucho menor que en los casos de colapso u oscilación. El  $m$  de ondas en la zona de rompientes oscila desde 1 en las cercanías del colapso hasta 3 en las cercanías del descrestamiento. El coeficiente de reflexión es menor que en el caso de colapso.



ROTURA DEL OLEAJE EN VOLUTA

**Descrestamiento (*Spilling*):** Si  $I_r$  continua disminuyendo por debajo de 0.46 (0.4 para  $I_{rb}$ ), el chorro de la voluta se hace progresivamente mas débil, por lo que comienza a afectar sólo a la parte superior de la onda, permaneciendo el resto prácticamente inalterado. La disipación de energía es muy gradual, pero dado la gran longitud del área de rompientes (más de 3 ondas simultáneamente en la zona de





rompientes), este tipo de rotura transforma eficientemente la energía del movimiento oscilatorio. La zona de ascenso-descenso por el talud de playa es mínima, pero las variaciones transversales del nivel medio (*set-up*) son máximas, pues una buena parte de la cantidad de movimiento asociada al movimiento oscilatorio se emplea en modificar el nivel medio (y en el caso de incidencia oblicua, a crear las corrientes longitudinales). El coeficiente de reflexión es mínimo.



**ROTURA DEL OLEAJE EN DESCRESTAMIENTO**

## **ANEJO II**

---

### **FORMULACIONES**

## **Anejo II. Formulaciones**

AII. FORMULACIONES.....	AII.2
AII.1 Introducción .....	AII.2
AII.2 Perfil de equilibrio (Prediseño) .....	AII.2
AII.3 Perfil de equilibrio modificado (Diseño) .....	AII.12
AII.4 Forma en planta.....	AII.21



## **AII. FORMULACIONES**

### **AII.1 Introducción**

En el presente Anejo se presentan, de modo resumido, las formulaciones propuestas en la Sección III del presente documento para el análisis del cálculo de estabilidad y análisis de la evolución de una playa a medio y largo plazo. El objetivo del anejo es que el lector pueda encontrar, de una manera rápida, las fórmulas y parámetros necesarios para poder utilizar las formulaciones. No es objeto del anejo, sin embargo, la justificación de las mismas o la comparación con otras formulaciones que resuelvan el mismo fenómeno. En lo que se refiere a las formulaciones utilizadas para el cálculo de estabilidad y análisis de la evolución de una playa a corto plazo, y dado que estas han de ser utilizadas con ayuda de programas informáticos, se remite al lector a los manuales de referencia de los programas desarrollados dentro del Sistema de Modelado Costero, SMC:

- Oleaje (Oluca)
- Corrientes (Copla)
- Erosión-sedimentación de la planta de la playa (Eros)
- Transporte y Evolución del perfil de playa (Petra)

### **AII.2 Perfil de equilibrio (Prediseño)**

La respuesta de un perfil de playa a la acción de las dinámicas actuantes se produce en escalas de tiempo de corta duración (horas en el caso de erosión por un temporal, semanas-meses en el caso de acumulación), que pueden ser consideradas como instantáneas dentro de un estudio a Largo Plazo (y cuasi-instantáneas en un análisis a medio plazo).

Consecuentemente, dentro de un estudio a Largo Plazo el aspecto más relevante de un perfil de playa es su perfil de equilibrio, que puede ser definido como el perfil final que se produce en una playa con un tamaño de grano concreto expuesta a unas condiciones de oleaje constantes. Es importante señalar que el perfil de equilibrio no pretende explicar los mecanismos o procesos de transporte en un perfil de playa, sino solamente su forma final.

Nótese que un “perfil de equilibrio” tal y como se describe en el párrafo



anterior solo puede ser obtenido en el laboratorio donde se puede fijar el oleaje incidente. En la naturaleza, la variación del nivel del mar y del oleaje dan como resultado que el perfil de equilibrio, en sentido estricto, no exista nunca. No obstante, dado que las variaciones de los diferentes agentes (oleaje, nivel, ...) están acotadas, también lo estará a variabilidad del perfil pudiéndose admitir en la naturaleza la existencia de una situación modal o perfil de equilibrio medio que sufre variaciones en función de la dinámica actuante.

La definición del perfil de equilibrio de una playa conlleva la determinación de: (ver cuadro AII.1)

- Forma del perfil de equilibrio.
- Profundidad de cierre del perfil.

### ***Forma del perfil de equilibrio***

Diversos autores han propuesto formulaciones empíricas al objeto de representar el perfil de equilibrio de una playa, (ver Doc. Referencia) de todas ellas la más comúnmente utilizada es la propuesta, inicialmente, por Bruun (1954) y posteriormente por Dean (1977). Esta forma de perfil, conocida como perfil parabólico, adopta la expresión:

$$h = Ax^{2/3}$$

donde:

$h$	=	profundidad del agua
$x$	=	distancia desde la costa
$A$	=	parámetro de forma.

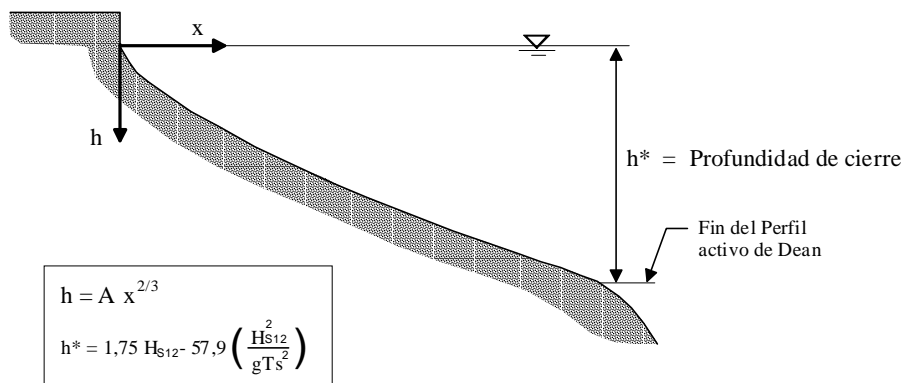
El parámetro de forma,  $A$ , fue ajustado por Dean (1987) en función de la velocidad de caída del grano,  $\omega$  (m/s).

$$A = k\omega^{0.44}$$

con  $k = 0.51$ . (Ver cuadro AII.1).

**Cuadro A.II.1. Perfil de Equilibrio**

La expresión parabólica del perfil de equilibrio ( $h = Ax^{2/3}$ ) fue inicialmente obtenida por vía empírica a partir de ajustes de playas naturales, Bruun (1954). Posteriormente, Dean (1977) mostró que dicha expresión es consistente con la hipótesis de que la disipación de energía por unidad de volumen en la zona de rompientes es constante. El perfil de equilibrio no establece cual es el límite del mismo mar adentro, siendo usual adoptar por tal límite, la profundidad de cierre,  $h^*$ , obtenida por Birkemeier (1985).

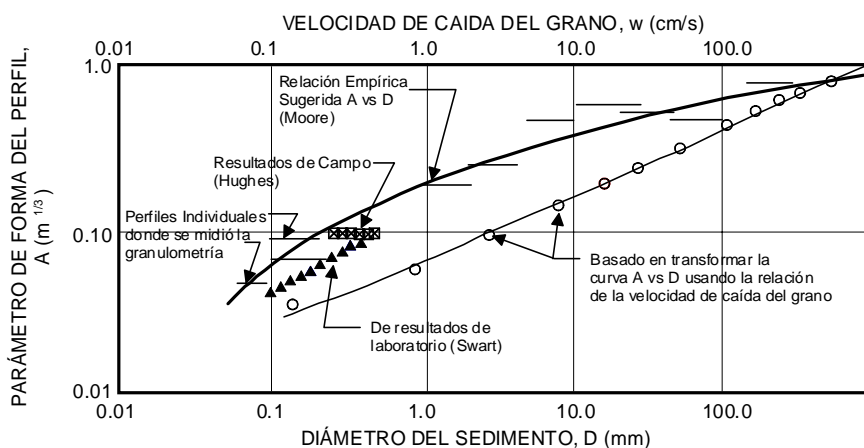
**PERFIL DE EQUILIBRIO, Dean (1977)**

A = Parámetro de forma (ver Figura siguiente)

$H_{S12}$  = Altura de ola significativa superada 12 horas al año

$T_s$  = Periodo significativo del oleaje

Moore (1982) encontró una relación empírica entre el tamaño del grano,  $D_{50}$  y el parámetro de forma A. Esta relación ha sido posteriormente modificada por Dean (1987) expresándola en términos de la velocidad de caída de grano,  $w$ . Es aconsejable, no obstante, verificar las relaciones A -  $w$  en casos reales con datos de playas próximas.



$$A \text{ (m}^{1/3}\text{)} = K w^{0.44} \text{ (m/s)}$$

Valor propuesto por Dean (1987):  $K=0,51$

Media Perfil emergido Mar Cantábrico:  $K=0,65$

Media Perfil sumergido Mar Cantábrico:  $K=0,55$

De manera aproximada, y para arenas de densidad  $\rho_s = 2,65 \text{ tn/m}^3$ , la velocidad de caída del grano puede obtenerse como:

$$w \text{ (m/s)} = 1,1 \cdot 10^6 D^2 \text{ (m)} \quad D < 0,1 \text{ mm}$$

$$w \text{ (m/s)} = 273 D^{1,1} \text{ (m)} \quad 0,1 < D < 1 \text{ mm}$$

$$w \text{ (m/s)} = 4,36 D^{0,5} \text{ (m)} \quad D > 1 \text{ mm}$$

D = Diámetro del sedimento



Dean mostró que los valores de  $A$  varían suavemente a lo largo de grandes distancias en una misma costa y que son razonablemente constantes en el tiempo. No obstante, el valor de  $A$  (o de  $k$ ) debe ser, si es posible, ajustado en cada proyecto de regeneración con datos de la playa y/o playas adyacentes a la zona a regenerar.

### *Profundidad de cierre*

De acuerdo con el modelo teórico de perfil de equilibrio propuesto por Dean, el perfil de equilibrio solo es válido dentro de la zona de rotura del oleaje. Quiere esto decir, que la extensión del citado perfil varía a lo largo del tiempo en función del oleaje existente.

Dentro de los estudios de Largo Plazo de estabilidad de playas es usual utilizar la denominada “profundidad de cierre” como un límite de aplicación del perfil de equilibrio. Esta profundidad está relacionada con el transporte de sedimentos y se aplica a la posición mar adentro en la cual las variaciones verticales del perfil a lo largo del tiempo son tan reducidas que no son distinguibles de los errores de medida.

Nótese que se admite que pueda existir movimiento de arena más allá de la profundidad de cierre, pero en magnitud despreciable.

Birkemeier (1985) utilizando datos de medidas de perfiles de playa obtuvo una expresión para la profundidad de cierre,  $h_*$

$$h_* = 1.75H_{s12} - 57.9 \left( \frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right)$$

donde:

- |           |   |  |
|-----------|---|--|
| $H_{s12}$ | = | altura de ola significativa que es excedida doce horas al año, medida en la playa a una profundidad $h$ , tal que $h_* < h < 2h_*$ |
| $T_s$     | = | periodo de pico.   |

La expresión anterior ha sido verificada en las costas españolas con resultados satisfactorios. Por otro lado, si se adopta un valor medio de  $T_s = 5.7 \sqrt{H_s}$  (ROM 03-91) el valor de la profundidad de cierre puede expresarse como:



$$h_* \cong 1.57 H_{S12}$$

De acuerdo con esta expresión, la profundidad de cierre en las diferentes fachadas definidas por la (ROM 03-91) es:

<b>Fachada (ROM 03-91)</b>	<b>Boya</b>	<b>H<sub>S12</sub> (m)</b>	<b>h* (m)</b>
I	Gijón	5.7	9
II	Coruña	7.0	11
III	Silleiro	7.0	11
IV	Cádiz	3.8	6.0
V	Málaga	2.8	4.5
VI	Palos	3.5	5.5
VII	Valencia	2.5	4.0
VIII	Rosas	3.8	6.0

Estos valores pueden servir como primera aproximación del valor de  $h_*$  en playas abiertas en las que el valor de la altura de ola significativa en aguas profundas (ROM) y la altura de ola significativa local sean análogas.

Un aspecto importante a destacar es que el concepto de profundidad de cierre es un concepto estadístico que define una condición media anual. En periodos de tiempo más cortos, (por ejemplo, un verano) la profundidad de cierre puede ser mucho menor. Por contra, si examinamos cuál es el valor de la profundidad de cierre con datos de un número elevado de años, se observa que dicho valor aumenta con el número de años, al ser mayor la probabilidad de ocurrencia de eventos de temporal más importantes. No obstante, este aumento es lento y asintótico, dado que la duración de los grandes temporales llega a ser menor que el tiempo de respuesta del perfil, no pudiéndose establecer un perfil de equilibrio totalmente desarrollado.

El valor de profundidad de cierre dado en la expresión de Birkemeier (1985) debe entenderse como valor en el año medio y no debe ser utilizado como valor extremal en un cálculo de máxima erosión.





### AII.2.1 Aplicaciones del perfil de equilibrio

El concepto de perfil de equilibrio puede ser utilizado para obtener una respuesta rápida y aproximada de las modificaciones a que se verá sometido el perfil de playa por efecto de:

- Variación del nivel de mar. Cuadro AII.2.
- Vertido de arena. Cuadro AII.3.

#### *Variación del nivel del mar*

En los casos que se desarrollan a continuación se asume que la variación del nivel del mar permanece constante en el tiempo siendo posible aceptar que se alcanza una nueva posición de equilibrio. En el apartado AII.4 se analiza el caso de duraciones cortas.

##### *a) Marea meteorológica*

Un ascenso del nivel medio del mar,  $S$ , por efecto de la marea meteorológica provocará un aumento de la profundidad de agua en cualquier punto del perfil de playa. En estas condiciones el perfil de equilibrio no estará en “equilibrio” y sufrirá un ascenso,  $S$ , para acomodarse al nuevo nivel del mar. Como este ascenso debe producirse a costa de la arena existente en el perfil (hipótesis playa bidimensional) se producirá un retroceso,  $R$ , general del perfil.

Imponiendo como hipótesis que:

- en el nuevo nivel del mar se establecerá un perfil de equilibrio con forma idéntica al existente antes del ascenso del nivel del mar
- el volumen de arena debe conservarse

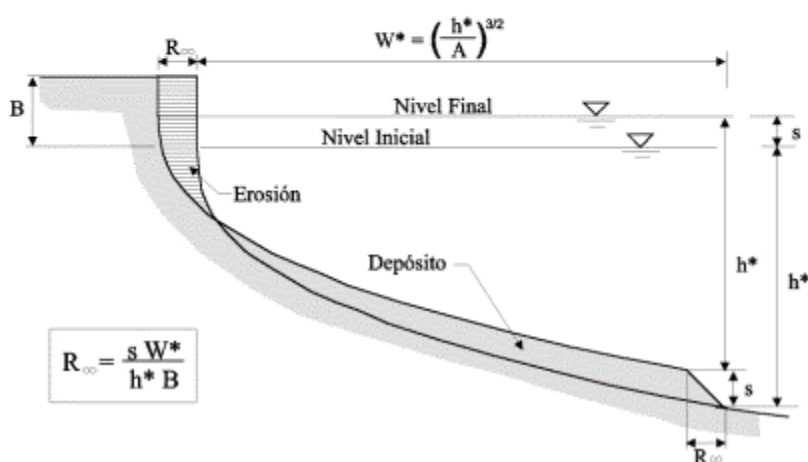
se obtiene como valor del retroceso:



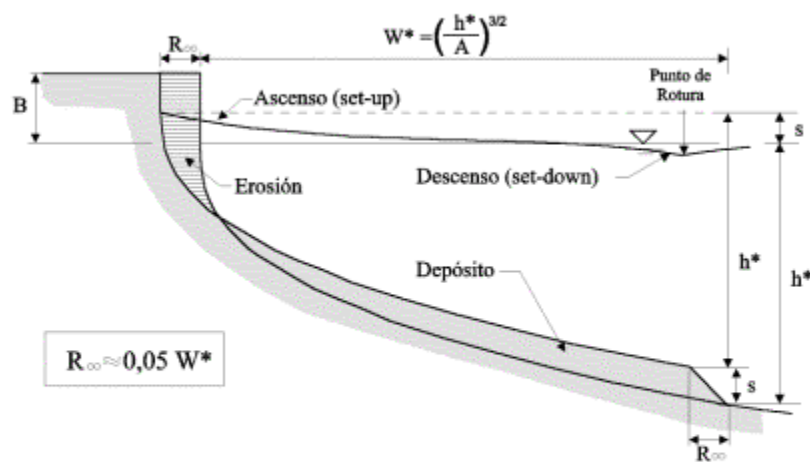
### Cuadro A.II.2. Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Variación del Nivel del Mar

Un ascenso del nivel del mar, genera un déficit de arena en el perfil sumergido, que debe ser compensado con un retroceso del perfil. Si la duración del ascenso del nivel es suficiente, el perfil adoptará una nueva posición de equilibrio compensándose volúmenes de arena erosionados y acumulados. En las Figuras adjuntas, se muestra el retroceso de equilibrio,  $R_{\infty}$ , en el caso de ascenso por marea meteorológica y ascenso por rotura del oleaje, "set-up". Si la duración del ascenso no es suficiente, el retroceso será menor que  $R_{\infty}$ , (ver Cuadro III.9).

#### 1. MAREA METEOROLÓGICA



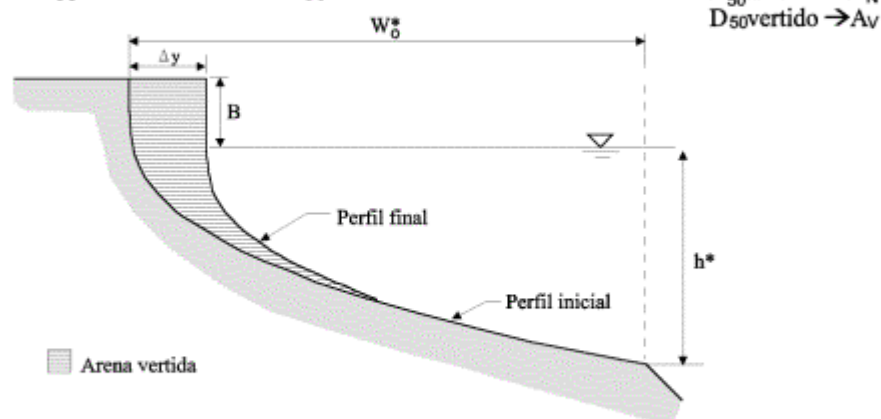
#### 2. SOBRE ELEVACIÓN POR OLAJE



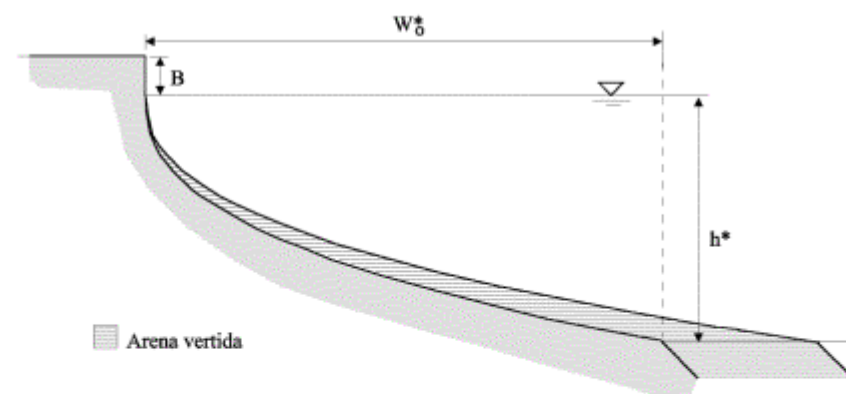
$R_{\infty}$  = Retroceso de equilibrio  
s = Sobre elevación  
B = Altura de la Berma  
h\* = Profundidad de cierre (Cuadro A.II.1)  
W\* = Distancia horizontal de la Línea de Costa a h\*  
A = Parámetro de forma del perfil (Cuadro A.II.1)

**Cuadro A.II.3. Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Vertido de Arena**

El concepto de perfil de equilibrio puede ser utilizado para determinar el avance de la playa,  $\Delta y$ , que se obtiene al realizar un vertido de arena de  $V$  ( $m^3/m$ ). Dos son los casos posibles:

1.  $D_{50}$  Arena de Vertido  $>$   $D_{50}$  Arena Nativa

$$V = B\Delta y + \frac{A_N \Delta y^{5/3}}{\left[1 - \left(\frac{A_N}{A_V}\right)^{3/2}\right]^{2/3}}$$

2.  $D_{50}$  Arena de Vertido  $<$   $D_{50}$  Arena Nativa

$$V = B\Delta y + \frac{3}{5} h^{5/2} \left\{ \left[ \frac{\Delta y}{h^{3/2}} + \left(\frac{1}{A_V}\right)^{3/2} \right]^{5/3} A_N - \left(\frac{1}{A_V}\right)^{3/2} \right\}$$

**NOTA:** En el Tutor Informático de Ingeniería de Costas (TIC), se proporciona un programa para la resolución del avance conseguido con un vertido dado, y el vertido necesario para un avance dado.



$$R = \frac{S \cdot W_*}{h_* + B}$$

donde:

$W_*$	=	extensión del perfil
$h_*$	=	profundidad de cierre
$B$	=	altura de la berma.

#### b) *Sobreelevación de oleaje*

La rotura del oleaje genera una modificación del nivel medio del mar (set-up) que, al contrario que en el caso anterior, no es constante a lo largo del perfil. Si se incluye dicha variación del nivel medio del mar en la determinación del perfil de equilibrio se obtiene como expresión del nuevo perfil de equilibrio:

$$h = \frac{A x^{\frac{2}{3}} - \eta_b - K h_b}{1 - K}$$

donde:

$K$	=	constante que depende del índice de rotura ( $K \cong 0.18$ )
$\eta_b$	=	descenso del nivel del mar en la zona de rotura

Nótese que la distancia,  $x$ , a la que se alcanza,  $h = 0$ , esto es, el retroceso del perfil debido a la sobrelevación por rotura es:

$$x = \left( \frac{\eta_b + K h_b}{A} \right)^{\frac{3}{2}}$$

que aproximadamente es:



$$R = x \cong 0.05 W_*$$

### ***Vertido de arena***

Cuando se añade un volumen de arena,  $V$ , a un perfil de playa, el relleno evolucionará hasta conseguir una posición de equilibrio. Dependiendo de los parámetros  $A$  del material nativo y de relleno, que denominaremos  $A_N$  y  $A_F$  respectivamente, puede ocurrir que el relleno intercepte, no intercepte o sea sumergido, tal y como se presenta en el cuadro AII.3.

Si el material de relleno es más grueso que el nativo, el perfil interceptará al nativo. Si el material de relleno es igual o más fino, no habrá intersección. Es importante señalar que aún en el caso de vertido de material más fino, puede obtenerse un avance de la línea de costa si el volumen vertido es suficiente.

La formulación de perfil de equilibrio puede utilizarse para obtener una estima del volumen de arena de aportación necesario para conseguir un aumento de la playa seca dado. En el cuadro AII.3 se presentan varios casos posibles encontrándose en el tutor informático un programa para su resolución.

Es interesante resaltar que, para un aumento de la playa seca dado, el factor que inicialmente más influye en el volumen de aportación necesario es la relación entre el parámetro  $A$  de la arena nativa y de la arena de aportación  $\left(\frac{A_F}{A_N}\right)$ . Sin embargo, para valores de  $\left(\frac{A_F}{A_N}\right) > 1.2$  esta dependencia disminuye. Quiere esto decir que el incremento de playa seca que se obtiene con un volumen de arena dado es prácticamente el mismo si disponemos de arena de aportación  $A_F = 2 A_N$  que si colocamos arena de aportación  $A_F = 3 A_N$ .

Utilizando el programa informático Tutor de Ingeniería de Costas (TIC), desarrollado dentro del Sistema de Modelado Costero (SMC), puede calcularse los volúmenes de aportación necesarios para un avance dado o el avance que se consigue con un volumen de arena dado.



### AII.3 Perfil de equilibrio modificado (Diseño)

La expresión del perfil de equilibrio propuesta en el apartado anterior lleva implícita una serie de hipótesis que, si bien pueden ser aceptables a nivel de prediseño, no son adecuadas en niveles superiores de diseño. Entre estas hipótesis tenemos:

- El perfil es un perfil completo de arena desde el origen hasta la profundidad de cierre.
- Todo el flujo de energía de oleaje que incide sobre el perfil es disipado por rotura, no existiendo ninguna otra afección externa (reflexión, refracción, ...).
- El nivel del mar es constante, esto es, no hay marea.

En los últimos años se han propuesto una serie de modificaciones al perfil de equilibrio al objeto de incluir estos efectos allí donde son relevantes. Las expresiones obtenidas son, en algunos casos, de una cierta complejidad lo cual reduce su utilización a efectos de prediseño, otras, sin embargo, no presentan dificultad añadida, por lo que pueden seguir siendo utilizadas incluso en estudios a nivel de prediseño.

Entre estas formulaciones de perfil de equilibrio modificadas se encuentran: (Cuadro AII.4)

- *Perfil con muro.* Cuadro AII.4.1
- *Perfil con laja.* Cuadro AII.4.2
- *Perfil con refracción-difracción.* Cuadro AII.4.3
- *Perfil con reflexión.* Cuadro A II 4.4
- *Perfil con estrán lineal.* Cuadro AII.4.5
- *Perfil compuesto o bi-parabólico.* Cuadro AII.4.6
- *Perfil de gravas.* Cuadro AII.4.7

#### ***Perfil con muro. Cuadro AII.4.1***

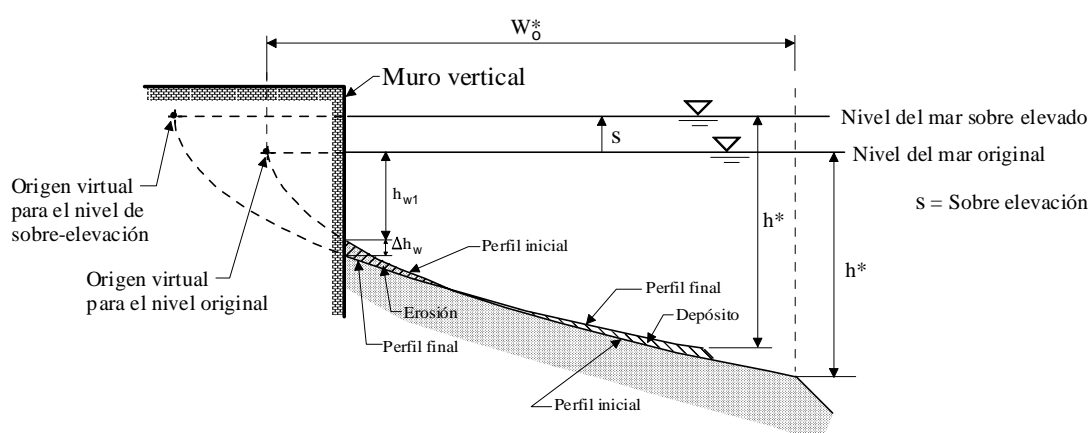
Numerosas playas están limitadas en su lado de tierra por barreras rígidas verticales tales como acantilados, paseos marítimos o muros de defensa. Este tipo de playas ha sido objeto de un gran número de estudios, cuyo fin era determinar si el muro afectaba a la erosión que dicho perfil presentaba ante un temporal. El resultado de dichos estudios muestra que la diferencia fundamental de estas playas con respecto al caso de la inexistencia del muro es que, en caso de temporal, el perfil no puede retroceder por detrás del muro, por lo que los equilibrios volumétricos de



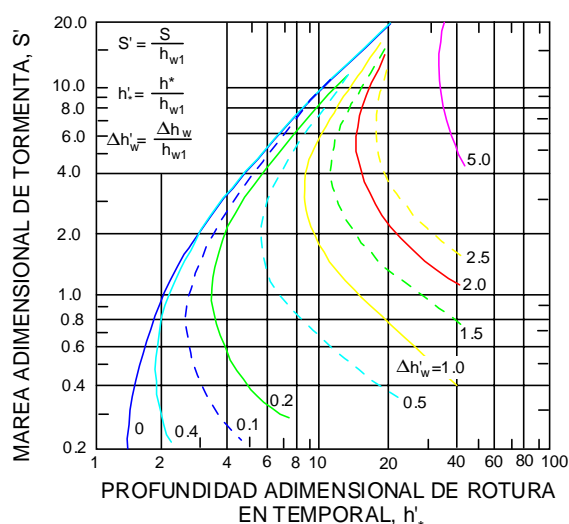
material deben realizarse con el sedimento existente frente al muro.

#### Cuadro A.II.4.1. Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Perfil con Muro

El perfil de una playa situada frente a un muro puede ser representado por un perfil de equilibrio (ver Cuadro A.II.1) que tiene el origen en un punto ubicado en el trasdós del muro (origen virtual). Este tipo de perfiles responde ante un ascenso del nivel del mar de manera análoga a un perfil completo (ver Cuadro A.II.2) si bien el equilibrio volumétrico de arena debe realizarse con la arena existente frente al muro.



El incremento de calado,  $\Delta h$ , en el pie de muro del muro, en el supuesto de que el ascenso tiene una duración suficiente, puede ser estimado usando la Figura siguiente:





No obstante, sí suele apreciarse en este tipo de playas una erosión o pérdida de material en la zona adyacente al muro. Esta erosión se debe básicamente a dos efectos: (1) el efecto del transporte de sedimento hacia el mar para formar el nuevo perfil de equilibrio correspondiente al nivel del mar sobreelevado y (2) un fenómeno local de la interacción entre el muro y el oleaje (véase Kraus (1987) para una descripción detallada del fenómeno).

En cualquier caso en términos macroscópicos, es decir obviando el efecto local descrito en (2), el perfil de equilibrio de una playa ubicada frente a un muro puede ser representado por un perfil parabólico cuyo origen (virtual) está ubicado en la zona de tierra como si no existiera muro.

#### ***Perfil con laja. Cuadro AII.4.2***

Con cierta frecuencia las playas no presentan un perfil completo de arena estando su parte sumergida apoyada en una rasa o laja rocosa. Si la laja tiene suficiente entidad las olas romperán sobre ella y la cantidad de energía que recibe la playa estará controlada por la geometría de la laja, esto es, por su calado y su anchura.

Dado que la disipación por rotura sobre un fondo rígido horizontal es superior que la acontecida sobre una playa natural, el resultado final es que la energía que alcanza la playa, tras pasar la laja, es menor que la que alcanzaría a una playa natural en la misma profundidad. Puesto que la energía total a disipar por la playa tras la laja es menor que la de una playa completa, la playa con laja necesitará una longitud menor para disipar la energía, lo que se traduce en una pendiente mayor. Esta mayor pendiente puede ser tenida en cuenta modificando el valor del parámetro de forma,  $A$ , que, en este caso, no será función exclusiva del tamaño de la arena sino de las características de la laja. Ver cuadro AII.4.2.

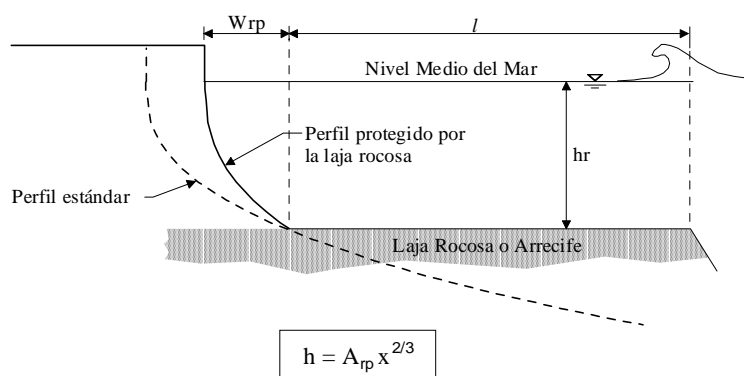
#### ***Perfil con refracción-difracción. Cuadro AII.4.3***

La formulación de perfil de equilibrio asume que todo el flujo de energía que alcanza la playa es disipado por rotura. En la hipótesis de playa indefinida recta y paralela todas las secciones de la playa reciben el mismo flujo de energía y el problema puede ser planteado de modo bidimensional, esto es, por unidad de anchura.

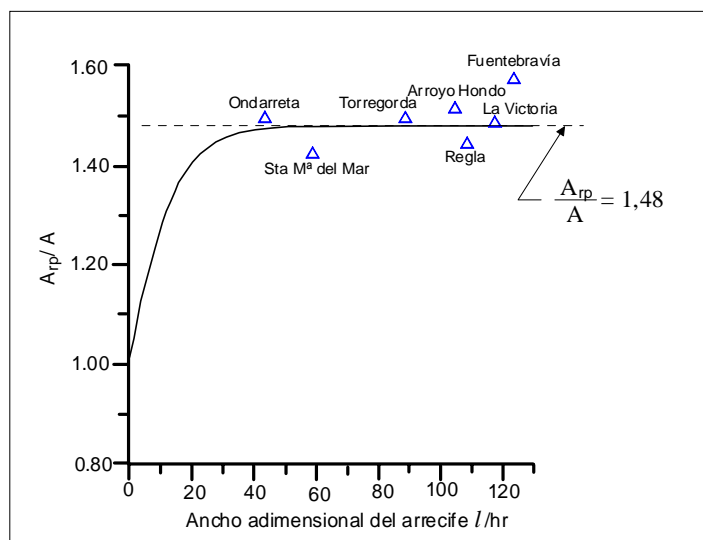



**Cuadro A.II.4.2. Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Perfil apoyado en Laja rocosa.**

Muñoz (1996) comprobó que los perfiles de playa apoyados en una laja rocosa presentaban una pendiente superior a la que correspondería al tamaño de grano de la playa. El motivo de esta mayor pendiente radica en la disipación de la energía del oleaje debido a la rotura sobre la laja.



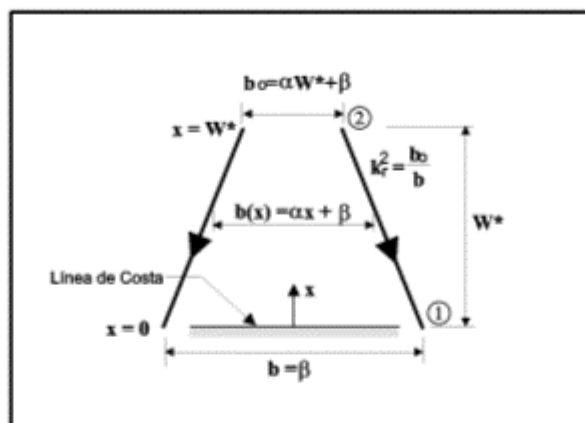
El perfil apoyado en una laja puede ser representado por un perfil parabólico (ver Cuadro A.II.1) con un factor de forma,  $A_{rp}$ , mayor que el asociado al tamaño de grano,  $A$ . La relación entre  $A_{rp}$  y  $A$  queda reflejada en la siguiente Figura:



**Nota:** Para que el perfil con laja pueda ser aplicado, debe verificarse que la anchura de la laja,  $l$ , sea superior a 20-30 hr.


**Cuadro A.II.4.3. Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Perfil con Refracción-Difracción.**

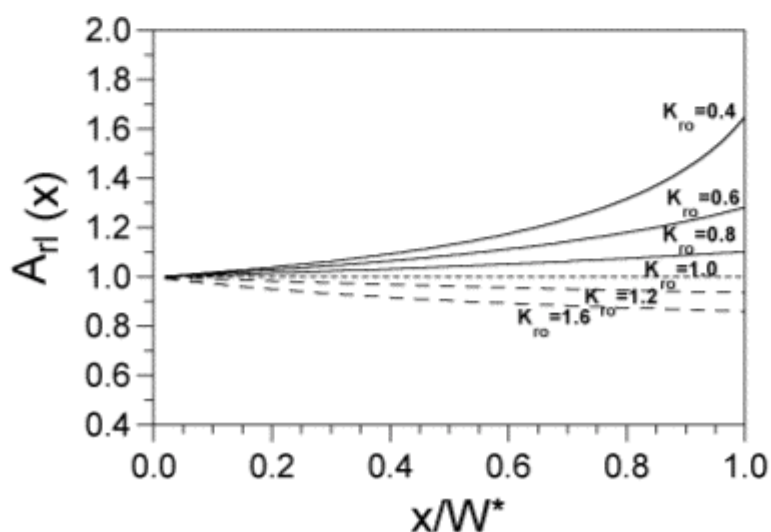
Haciendo uso de la hipótesis propuesta por Dean (1987) según la cual la disipación por unidad de volumen es constante en la zona de rotura, González, *et al* (1997) obtuvieron expresiones del perfil de equilibrio para playas en las que existan zonas de concentración o expansión de rayos. En la Figura adjunta, se presenta el caso de expansión lineal de los rayos:



En este tipo de playas, el perfil puede ser representado por la expresión:

$$h = A_r A x^{2/3}$$

donde,  $A_r$  es el factor de forma asociado al tamaño del grano (ver Cuadro A.II.1) y,  $A_r$ , es un parámetro que depende del coeficiente de refracción en la zona de rotura,  $K_r$  (donde  $K_r = f(\alpha)$ ). En la Figura siguiente, se presenta el caso de expansión lineal,  $A_{rl}$ .





En playas donde los efectos de propagación (refracción-difracción) son importantes, la hipótesis de bidimensionalidad no es aplicable y debe considerarse la convergencia/divergencia de los rayos dentro de la zona de rotura.

De este modo, si nos encontramos en una zona de divergencia de rayos (por ejemplo, zonas protegidas), los perfiles de playa son más rígidos que en playas abiertas para el mismo tipo de arena, y viceversa en el caso de perfiles en zona de convergencia de rayos.

La variación de la pendiente del perfil puede ser tomada en cuenta modificando el factor de forma,  $A$ , por medio de un coeficiente  $A_r$  que es función del coeficiente de refracción medio en el perfil y de la forma que los rayos convergen/divergen en la zona de rotura. En el cuadro AII.4.3 presentan los valores de  $A_r$  para diferentes formas de convergencia/divergencia de rayos.

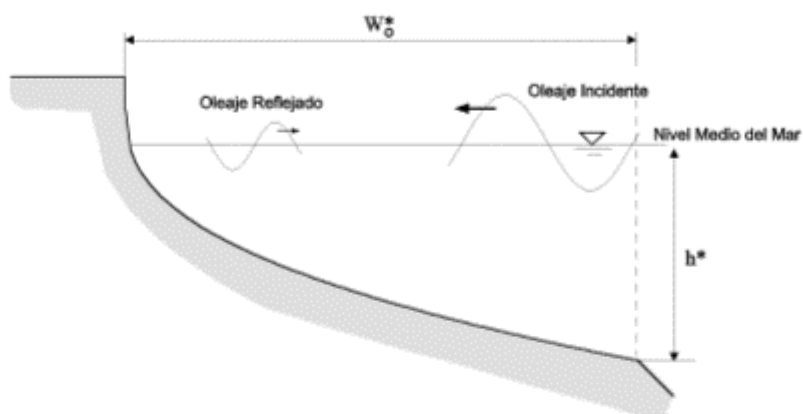
#### ***Perfil con reflexión. Cuadro AII.4.4***

Una de las hipótesis básicas de la formulación de perfil de equilibrio es que toda la energía del oleaje es disipada por rotura. Esta hipótesis es válida para playas disipativas, pero no es adecuada para playas reflejantes donde parte de la energía del oleaje es devuelta al mar por reflexión de la misma contra el perfil.

Este último aspecto puede ser contemplado en la formulación de perfil de equilibrio obteniéndose una expresión para la forma del perfil que incluye la parte de la disipación a través del parámetro de una forma,  $A$ , y la parte de la reflexión, por medio de un nuevo parámetro de forma,  $B$ , que depende del nivel de reflexión de la playa. Es importante señalar que los valores del parámetro  $A$  en la formulación de perfil con reflexión difieren de los encontrados por Dean en la formulación de perfil parabólico sin reflexión que han sido presentados en el cuadro AII.1. Esto es debido a que dichos valores se refieren a valores de mejor ajuste, consecuentemente, al variar la formulación varían los parámetros de ajuste. Los valores de  $A$  y  $B$  que han de utilizarse en la formulación de perfil con reflexión se encuentra en el cuadro AII.4.4.


**Cuadro A.II.4.4. Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Perfil con Reflexión**

En algunas playas, la hipótesis de que toda la energía incidente es disipada por rotura no es adecuada, siendo necesario incluir el efecto de la reflexión.



González (1995) encontró que este tipo de perfil de playas pueden ser representados por la expresión:

$$x = \left(\frac{h}{A}\right)^{3/2} + \frac{9}{2}B\left(\frac{h}{A}\right)^3$$

donde B es un parámetro que mide el nivel de reflexión y A el nivel de disipación. Los ajustes propuestos por Bernabeu, *et al* (1997), para dichos parámetros son:

$$B = 32 \cdot 10^{-4} \exp\left[-0,44 \cdot \left(\frac{H}{wT}\right)\right]$$

$$A = k w^{0,44}$$

$$k = 0,47 + 0,68 \exp\left[-0,44 \cdot \left(\frac{H}{wT}\right)\right]$$

Donde H es la altura de ola, w es la velocidad de caída del grano y T es el periodo del oleaje



### ***Perfiles con estrán lineal. Cuadro AII.4.5***

La formulación de perfil de equilibrio parabólico presentada en el apartado anterior, predice una pendiente del perfil infinita, esto es vertical, en la línea de costa, lo cual no representa la realidad. La explicación de esta discrepancia cabe encontrarla, de acuerdo con Dean (1991), en el hecho de que la formulación de perfil de equilibrio asume que el único proceso relevante en la formulación del perfil es la disipación por rotura del oleaje. Sin embargo, la zona cercana a la orilla, y dado que la altura de ola es de pequeña magnitud, otros procesos tales como la acción de la gravedad o el ascenso-descenso del oleaje en el estrán, deben ser tenidos en cuenta.

La inclusión de estos procesos da lugar a una forma lineal del perfil en la zona adyacente a la costa tal y como se recoge en el cuadro AII.4.6. Es importante señalar que esta modificación del perfil no es relevante a la hora del cálculo del volumen de arena de aportación de una regeneración, pero sí puede llegar a serlo en lo referente a la anchura de la playa o retroceso ante un temporal, ya que tiene en cuenta la influencia de la pendiente de la zona del estrán debida al oleaje.

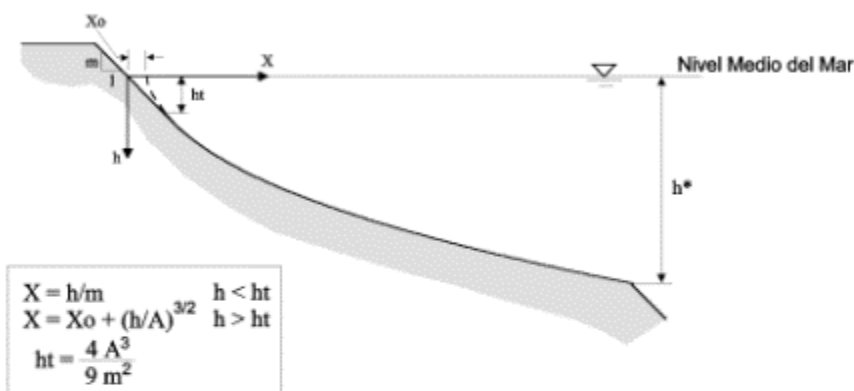
### ***Perfil compuesto o bi-parabólico. Cuadro AII.4.6***

Recientemente diversos autores han puesto de manifiesto que los perfiles de playa quedan mejor representados si su descripción se realiza por medio de dos perfiles diferenciados (Inman et al, 1993; González, 1995; Bernabeu 1999; Medina et al , 2000; Gómez-Pina, 2000). El primero abarcaría desde la línea de costa de pleamar hasta la profundidad de rotura del oleaje en bajamar, denominándose perfil de rotura, mientras que el segundo se extendería desde dicha profundidad de rotura hasta la profundidad de corte, denominándose perfil de asomeramiento.

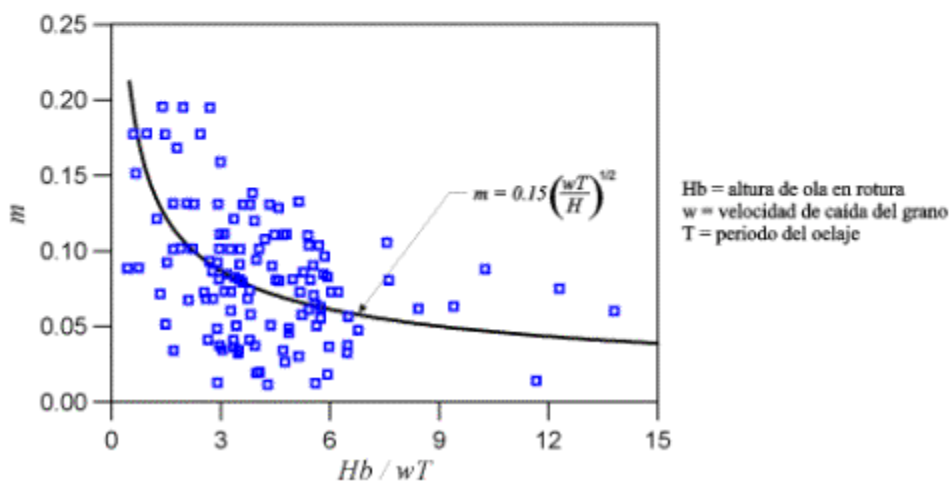
Este tipo de representación del perfil permite una “más adecuada” caracterización de los diferentes procesos que conforman los perfiles de playa (rotura-asomeramiento) y, por tanto, cabe esperar de ellos una mejora sustancial en los ajustes de perfiles reales. Más aún, la caracterización de los procesos en la definición del perfil permite la incorporación de las modificaciones descritas en los apartados anteriores (reflexión, refracción...), e incluso la existencia de marea, de un modo mas coherente. Por el contrario, si se desea utilizar este tipo de formulaciones para pronosticar “a priori” la forma de un perfil, es necesario dar valores a un número de parámetros muy superior al del caso mono-parabólico. Dado que los valores que, hoy en día, existen en la literatura para la determinación de estos

**Cuadro A.II.4.5.** Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Perfil con estrán lineal.

El perfil parabólico predice una tangente vertical en el origen del mismo, que no se presenta en la naturaleza. Una representación más adecuada de ese tramo del perfil viene dada por una pendiente constante, m. Kriebel, *et al* (1991) propusieron una representación combinada del perfil de equilibrio lineal-parabólica fijando el límite,  $h_t$ , entre uno y otro cuando la pendiente de ambos coincide.



Como valor del parámetro de forma, A, puede adoptarse el asociado al tamaño del grano (ver Cuadro A.II.1). El valor de la pendiente del estrán puede ser obtenida de los trabajos de campo de Sunamura (1984), mostrados en la siguiente Figura:





parámetros están basados en un limitado número de ajustes a playas reales, su utilización debe ser realizada con cautela. Las formulaciones a utilizar para ambos perfiles, así como los valores de los parámetros de ajustes se detallan en el cuadro AII.4.6

#### ***Perfiles de gravas. Cuadro AII.4.7***

Si bien el perfil de equilibrio parabólico ha sido utilizado con éxito en un espectro muy amplio de diámetros de sedimento, véase rango de valores ajustados del parámetro *A* en el cuadro AII.1, diversos autores han realizado ensayos de laboratorio específicos para la determinación del perfil de equilibrio de una playa de gravas.

Estas playas presentan ciertas características singulares, tales como:

- a) alta permeabilidad,
- b) elevado coeficiente de reflexión,
- c) roturas en colapso-oscilación,
- d) zona de ascenso-descenso importante ...

que las confiere una forma ligeramente diferente, Powell (1990). Es necesario destacar, no obstante, que los modelos paramétricos existentes para este tipo de playas, como el presentado en el cuadro AII.4.7 han sido obtenidos con resultados de laboratorio y no están completamente validados frente a datos de playas reales, Powell (1990).

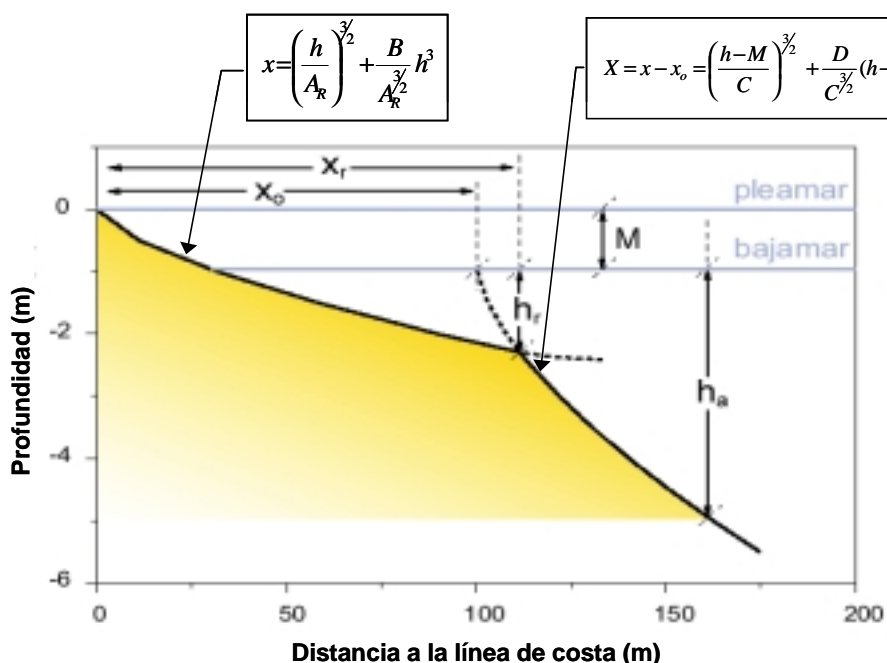
### **AII.4 Forma en planta**

Las hipótesis en las que se basa el análisis a largo plazo de la forma en planta de una playa son dos, la ya comentada ortogonalidad entre perfil y planta y la diferente escala temporal de los procesos perfil-planta. Esta diferente escala temporal de los procesos da lugar a que en los estudios de forma en planta se asuma que el perfil de playa siempre ha alcanzado su posición de equilibrio (sea cual sea). De este modo, la evolución a largo plazo de la forma en planta de una playa se realiza manteniendo constante la forma del perfil.



### Cuadro A.II.4.6. Aplicaciones del perfil de equilibrio. Perfil biparabólico

El perfil de equilibrio compuesto puede representarse por medio de dos perfiles parabólicos, uno con origen en la cota de pleamar, denominado perfil de rotura, y otro, denominado perfil de asomeramiento, con el origen en la cota de bajamar y desplazado en vertical, de tal forma, que su intersección con el perfil de rotura coincide con la profundidad donde el oleaje rompe (Bernabéu, 1999):



Donde:

- $x$  = distancia a la línea de costa (la línea de costa coincide con el origen del perfil de rotura)
- $x_0$  = distancia del origen del perfil de rotura al origen del perfil de asomeramiento
- $x_r$  = distancia de la línea de costa al punto de rotura del oleaje
- $h$  = profundidad
- $h_r$  = profundidad de rotura (respecto a la bajamar)  $\approx 1.1 H$
- $h_a$  = profundidad final del perfil de asomeramiento (respecto a la bajamar)  $\approx 3 H$
- $A_R$  = parámetro de forma del perfil de rotura (asociado a la disipación por rotura)
- $B$  = parámetro de forma del perfil de rotura (asociado a la reflexión)
- $C$  = parámetro de forma del perfil de asomeramiento (asociado a la disipación por fricción)
- $D$  = parámetro de forma del perfil de asomeramiento (asociado a la reflexión)
- $M$  = carrera de marea modal
- $H$  = altura de ola significativa media mensual a la profundidad  $h_a$ , en bajamar

$$x_0 = \left( \frac{h_r + M}{A_R} \right)^{3/2} - \left( \frac{h_r}{C} \right)^{3/2} + \frac{B}{A_R^{3/2}} (h_r + M)^3 - \frac{D}{C^{3/2}} h_r^3$$

$$x_r = \left( \frac{h_r + M}{A_R} \right)^{3/2} + \frac{B}{A_R^{3/2}} (h_r + M)^3$$

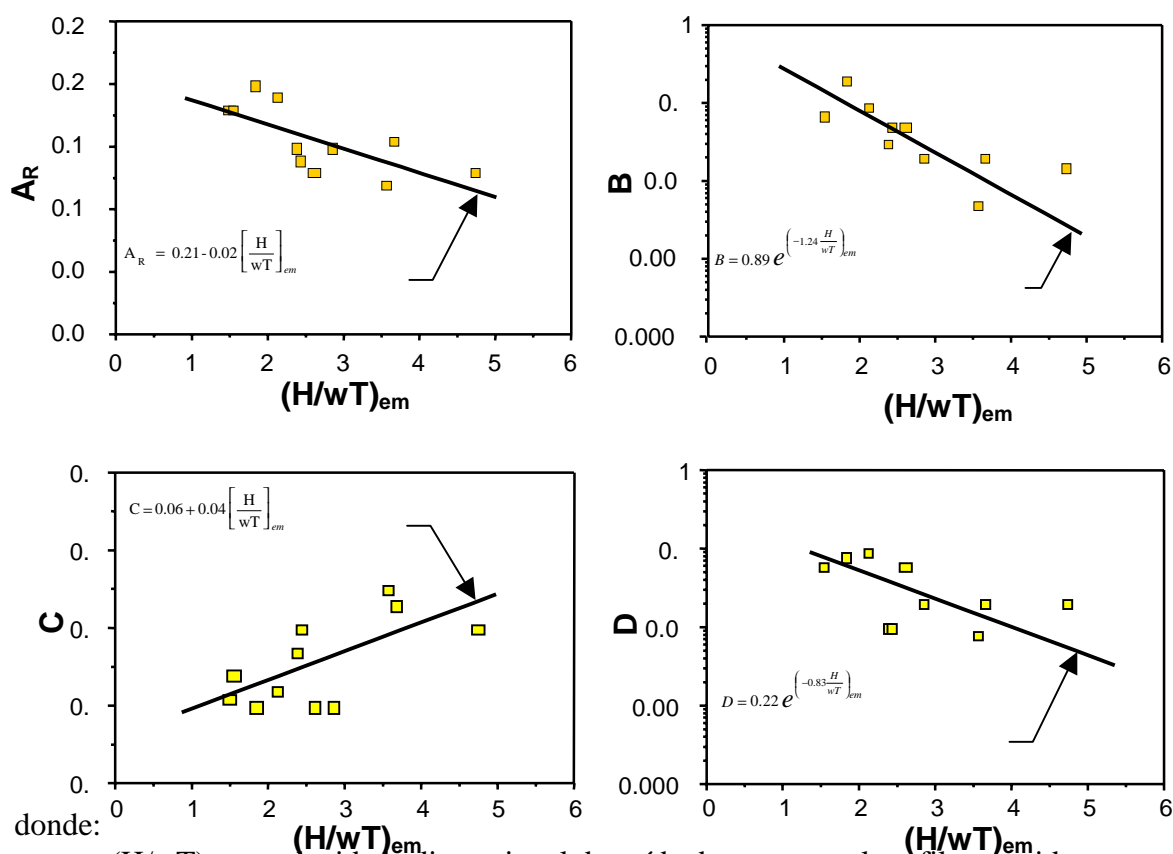



**Cuadro A.II.4.6. (Cont.) Aplicaciones del perfil de equilibrio. Perfil biparabólico**

La carrera de marea, M, se encuentra definida por la cota de la pleamar modal. En la siguiente Tabla, se presenta la carrera de marea modal característicos de distintas playas en España:

Playa	Carrera de marea (m)
Vizcaya	3.65
Asturias	3.25
Huelva	2.65
Cádiz	2.65

Los parámetros que controlan la forma de cada uno de los perfiles,  $A_R$ , B, C y D, se han obtenido ajustando perfiles de playas medidos a lo largo de todo el litoral Español, y se representan en función de la altura de ola, el periodo del oleaje y la velocidad de caída del grano:



donde:

$(H/wT)_{em}$  = velocidad adimensional de caída de grano en el perfil emergido

T = periodo de pico del oleaje medio mensual

w = velocidad de caída de grano:

$$w = 1.1 \cdot 10^6 D_{50}^2 \quad \text{para } D_{50} < 0.1 \text{ mm}$$

$$w = 273 D_{50}^{1.1} \quad \text{para } 0.1 < D_{50} < 1 \text{ mm}$$

$$w = 4.36 D_{50}^{0.5} \quad \text{para } D_{50} > 1 \text{ mm}$$

$D_{50}$  = diámetro medio de la arena de la playa en el perfil emergido en metros



Dentro del análisis del equilibrio de la forma en planta de una playa a largo plazo cabe distinguir los siguientes casos:

- *Playas en equilibrio estático (transporte longitudinal nulo)*

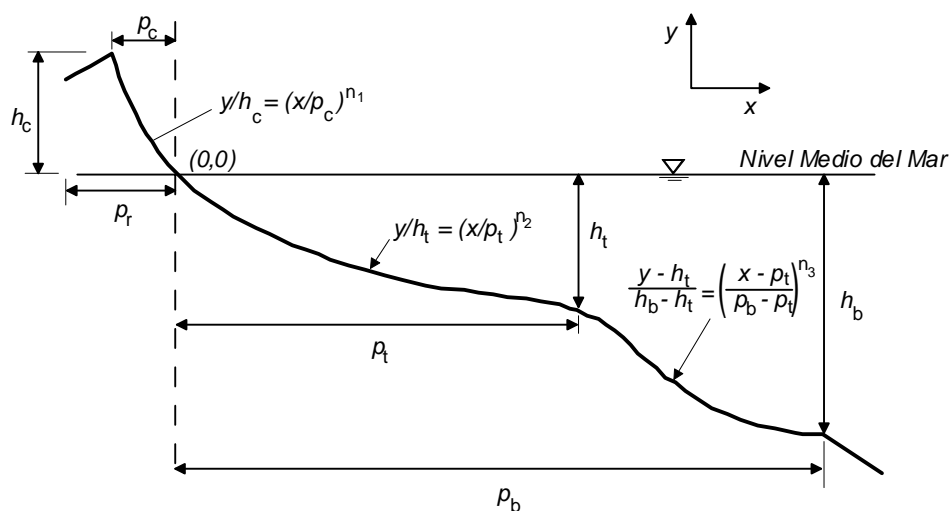
Esta situación, típica de playas encajadas, tómbolos y salientes puede ser analizada con modelos empíricos de planta de equilibrio, donde solo se persigue la determinación de la forma final de equilibrio.

- *Playas en equilibrio dinámico o en desequilibrio (transporte longitudinal no nulo)*

En este tipo de playas, la variable tiempo es importante siendo necesario el uso de modelos de evolución de la línea de costa tipo modelos de una línea. Estos modelos podrán ser analíticos para los casos de geometrías simples, o numéricos para los casos de geometrías complejas.

#### Cuadro A.II.4.7. Aplicaciones del Perfil de Equilibrio. Perfil de gravas.

El modelo paramétrico de perfiles de gravas desarrollado por Powel (1990), fue diseñado para simular playas de material grueso como gravas y cantos rodados. Un esquema del perfil se muestra en la Figura y puede aplicarse en el rango  $20 < H_s / \Delta D_{n50} < 250$ .



El modelo paramétrico se describe con las siguientes ecuaciones, donde las definiciones de los parámetros se muestran en la Figura. El perfil se encuentra definido por la duración de la tormenta y Powel (1990) sugiere que la reconfiguración completa del perfil ocurrirá con sólo 500 olas.



### *Predicción elemental del Perfil de Playa*

1. Límite del Run-up,  $p_r$ 

$$p_r/H_s = 6.38 + 3.25 \ln(H_s/L_{om})$$
2. Posición de la cresta,  $p_c$ 

$$p_c D_{50}/H_s L_{om} = -0.23(H_s T_m g^{1/2}/D_{50}^{3/2})^{-0.588}$$
3. Elevación de la cresta,  $h_c$ 

$$h_c/H_s = 2.86 - 62.69(H_s/L_{om}) + 443.29(H_s/L_{om})^2$$
4. Posición de la transición,  $p_t$ 

Para  $H_s/L_{om} < 0.03$ :

$$p_t D_{50}/H_s L_{om} = 1.73(H_s T_m g^{1/2}/D_{50}^{3/2})^{-0.81}$$

Para  $H_s/L_{om} \geq 0.03$ :

$$p_t D_{50} = 55.26 + 41.24(H_s^2/L_{om} D_{50}) + 4.90(H_s^2/L_{om} D_{50})^2$$
5. Profundidad de la transición,  $h_t$ 

Para  $H_s/L_{om} < 0.03$ :

$$h_t/H_s = -1.12 + 0.65(H_s^2/L_{om} D_{50}) - 0.11(H_s^2/L_{om} D_{50})^2$$

Para  $H_s/L_{om} \geq 0.03$ :

$$h_t/D_{50} = -10.41 - 0.025(H_s^2/D_{50}^{3/2} L_{om}^{1/2}) - 7.5 \cdot 10^{-5}(H_s^2/D_{50}^{3/2} L_{om}^{1/2})^2$$
6. Posición de la profundidad de cierre,  $p_b$ 

$$p_b/D_{50} = 28.77(H_s/D_{50})^{0.92}$$
7. Profundidad de cierre,  $h_b$ 

$$h_b/L_{om} = -0.87(H_s/L_{om})^{0.64}$$
8. Curva 1, cresta al nivel medio en reposo
 
$$\frac{y}{h_c} = \left( \frac{x}{p_t} \right)^{n_1}$$

Donde

$$n_1 = 0.84 + 23.93 H_s/L_{om} \text{ para } H_s/L_{om} < 0.03$$

Y

$$n_1 = 1.56 \text{ para } H_s/L_{om} \geq 0.03$$
9. Curva 2, nivel medio en reposo a la transición
 
$$\frac{y}{h_t} = \left( \frac{x}{p_t} \right)^{n_2}$$

Donde

$$n_2 = 0.84 - 16.49 H_s/L_{om} + 290.16 (H_s/L_{om})^2$$
10. Curva 3, de la transición a la profundidad de cierre
 
$$\frac{y - h_t}{h_b - h_t} = \left( \frac{x - p_t}{p_b - p_t} \right)^{n_3}$$

Donde

$$n_3 = 0.45 \text{ para } H_s/L_{om} < 0.03$$

Y

$$n_3 = 18.6 (H_s/L_{om}) - 0.1 \text{ para } H_s/L_{om} \geq 0.03$$

*Posición del Perfil de Playa estimado*

La posición del Perfil de Playa propuesta en sentido perpendicular a la costa puede establecerse al desplazar el perfil hasta que exista un equilibrio de áreas entre las secciones inicial y final. Esto implica que el transporte litoral neto paralelo a la costa es nulo.

Nota:

$H_s$  = altura de ola significativa

$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$  = densidad relativa

$\rho_s$  = densidad del sedimento

$\rho$  = densidad del agua

$D_{n50}$  = diámetro nominal medio del sedimento

$L_{om}$  = longitud de onda media en aguas profundas

$T_m$  = periodo del oleaje medio

$g$  = aceleración de la gravedad

$D_{50}$  = diámetro del sedimento que es excedido por el 50% del peso de la muestra

#### AII.4.1 Playas en equilibrio estático

Se entiende que una playa ha alcanzado una forma en planta de equilibrio si dicha forma en planta no varía bajo la acción de un oleaje incidente constante en el tiempo. Si además de mantener una forma constante en el tiempo, el transporte litoral neto es nulo, la playa estará en equilibrio estático.

Nótese que para que esto ocurra es necesario que las corrientes longitudinales se anulen existiendo, por tanto, un equilibrio entre las corrientes generadas por el gradiente de altura de ola y por la incidencia oblicua del oleaje en la zona de rompiente. Estableciendo como condición la igualdad entre ambas corrientes puede encontrarse la forma en planta de la playa requerida para satisfacer la igualdad. Nótese que en este análisis solo se busca el estado final de equilibrio, no siendo de interés el tiempo requerido para que la playa alcance dicho equilibrio. En el caso que se desee conocer el tiempo hasta el equilibrio, la playa debe ser estudiada como una playa en desequilibrio.

Si no existe ningún obstáculo en la propagación del oleaje, no existirán gradientes de altura de ola y, consecuentemente, la condición de equilibrio exige que la playa sea paralela a los frentes de onda. Si existen elementos que generen gradientes, como por ejemplo diques, cabos o salientes que ocasionen la difracción del oleaje, la forma en planta de la playa adoptará una curvatura en forma de “gancho” o “medio-corazón” característica, fácilmente reconocible en:



- Playas apoyadas en un saliente o encajadas. Cuadro AII.5.
- Tómbolos y hemitómbolos. Cuadro AII.6.

Antes de continuar es importante resaltar que la existencia de una playa en equilibrio, tal y como se ha definido en el párrafo anterior, no es posible en la naturaleza, puesto que el oleaje está continuamente cambiando. Sin embargo, la reducida velocidad de cambio de la forma en planta, en relación con la velocidad de cambio de las características del oleaje, da como resultado que la forma en planta no sea capaz de responder instantáneamente a los cambios del oleaje y tienda a ubicarse, como se desarrollará más adelante, en disposición de equilibrio con las características medias energéticas del mismo.

La playa tendrá, por tanto, una posición de equilibrio modal, con oscilaciones alrededor de dicha posición media. Estas oscilaciones son, por lo general, débiles salvo que exista una marcada direccionalidad estacional del oleaje. En cualquier caso en el análisis a largo plazo debe considerarse exclusivamente la posición de equilibrio media anual, siendo las oscilaciones objeto del análisis de medio plazo.

### ***Playas apoyadas en un saliente o encajadas. Cuadro AII.5***

La presencia de un cabo o un dique genera una zona en la que los efectos de difracción producidos por dicho obstáculo son apreciables (regiones 2 y 3 del cuadro III.12). Más allá de dicha zona, (región 1) el oleaje no se ve modificado y por lo tanto la playa en equilibrio en la zona no modificada ha de ser paralela a los frentes de onda. El límite que separa la zona de influencia de la difracción, de la zona inalterada (punto  $P_0$ ) es función de la distancia en número de longitudes de onda ( $Y/L$ ), que existe entre el punto de control o punto de difracción y la prolongación de la línea de costa que pasa por  $P_0$ , medida en una perpendicular a los frentes de onda.

Conocida dicha distancia ( $Y/L$ ), se puede determinar el ángulo  $\alpha_{\min}$  que forma la normal a los frentes que pasa por el punto de control y la línea que une el punto de control y el punto  $P_0$ . El valor de  $\alpha_{\min}$  ha sido ajustado en diversas playas del litoral español y queda reflejado en el cuadro AII.5. Para el cálculo de la longitud de onda ha de utilizarse la profundidad existente en el punto de control y el periodo reflejado en la gráfica del cuadro AII.5 según la fachada en estudio.

La forma de la línea de la costa, o forma en planta de la playa, en la zona de



sombra (regiones 2 y 3), viene definida por la expresión parabólica:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2$$

donde  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  y  $\beta$  son función de  $\alpha_{\min}$  (ver cuadro AII.5).

Es importante señalar que la expresión parabólica señalada anteriormente es válida aún en el caso que la playa no sea completa, es decir una playa encajada entre dos salientes y donde solo existe parte de las regiones 3 y 2. En este caso se procederá prolongando ficticiamente la línea de costa hasta el punto  $P_0$  y utilizando las mismas expresiones de  $\alpha_{\min}$ ,  $(Y/L)$  definidas anteriormente.

En mares con marea la expresión parabólica es válida tanto para la línea de pleamar como la de bajamar (nótese que no son líneas paralelas al variar  $(Y/L)$ ). Otro aspecto digno de mención es que la forma en planta de equilibrio estático es independiente de la granulometría de la arena y de la altura de ola incidente, siendo los parámetros que gobiernan la forma en planta la dirección de los frentes en la zona del punto de control y la distancia adimensional entre el punto de control y la línea de costa  $(Y/L)$ . Respecto a estos parámetros cabe destacar:

- *Dirección de los frentes*

Tal y como se ha comentado con anterioridad, la forma en planta de una playa no es capaz de responder instantáneamente a los cambios de dirección del oleaje y tiende a ubicarse en una posición en equilibrio con las condiciones medias energéticas del oleaje. Consecuentemente, la dirección de los frentes que ha de utilizarse en el estudio de largo plazo de la forma en planta es la definida por el flujo

$$\vec{F}_p = \sum_{i=1}^N H_i^2 \vec{C}_{g_i}$$

medio anual de energía en el punto de control,  $\vec{F}_p$

donde  $C_g$  es la celeridad de grupo,  $H$  es la altura de ola y  $N$  son todos los oleajes del año.

No obstante, se verificará esta dirección con la disposición de playas



adyacentes.

- *Distancia adimensional*

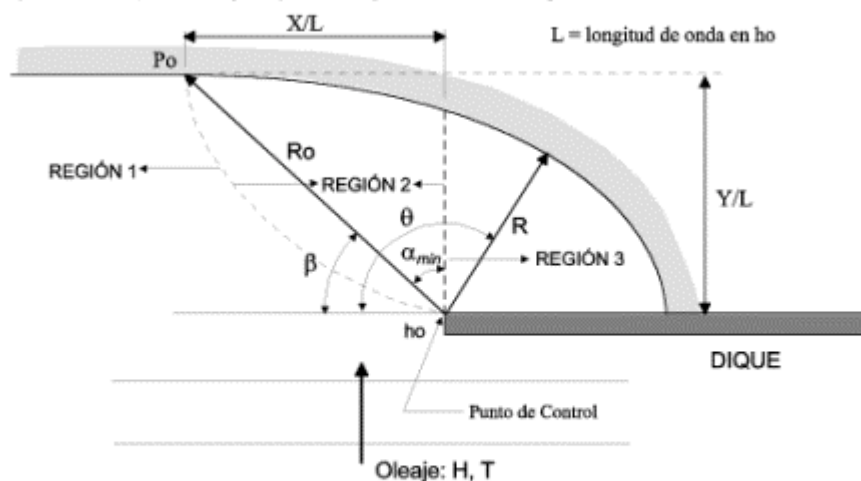
La influencia de distancia adimensional es especialmente relevante en el caso de playas cercanas al punto de control. Para valores de  $(Y/L)$  mayores que 8, la variación de  $\alpha_{\min}$  con la distancia  $(Y/L)$  es de escasa magnitud.

Por último, señalar que la validez de la expresión parabólica de la forma en planta requiere que:

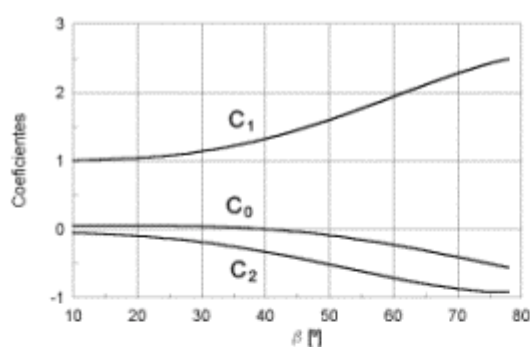
- Los gradientes longitudinales de altura de ola en la playa, estén gobernados únicamente por los fenómenos de refracción y difracción del punto de control, (no existen obstáculos posteriores).
- El sistema de corrientes de equilibrio sea el asociado, únicamente, al oleaje, (no es válido en el caso de corrientes de marea, desembocaduras, ...).
- Solo exista un punto de difracción, o varios siempre que no interactúen mutuamente.

**Cuadro A.II.5. Forma en planta de Equilibrio Estático. Playas encajadas**

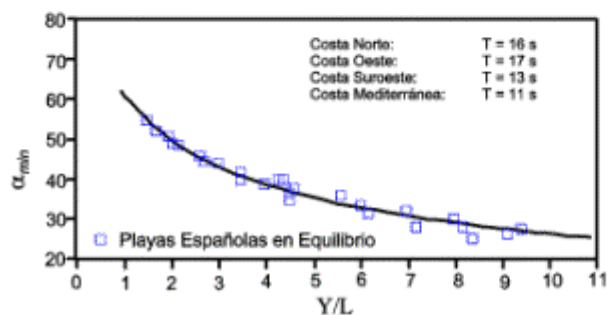
La forma en planta de equilibrio estático de una playa encajada puede ser representada por la expresión parabólica de Hsu y Evans (1989). En las Figuras y Tablas adjuntas se definen los parámetros necesarios de dicha formulación:



$$\frac{R}{R_o} = C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta} + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2$$



El uso de dicha expresión para el diseño de playas puede ser realizado por medio de la metodología desarrollada por González (1995). Esta metodología propone que el ángulo,  $\beta = 90^\circ - \alpha_{min}$ , está determinado por la distancia,  $(Y/L)$ , entre la playa y el punto de control, pudiendo obtenerse los valores de  $\alpha_{min}$  de la Figura adjunta:



$\beta^\circ$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
20	0.054	1.040	-0.094
22	0.054	1.053	-0.109
24	0.054	1.069	-0.125
26	0.052	1.088	-0.144
28	0.050	1.110	-0.164
30	0.046	1.136	-0.186
32	0.041	1.166	-0.210
34	0.034	1.199	-0.237
36	0.026	1.236	-0.265
38	0.015	1.277	-0.296
40	0.003	1.322	-0.328
42	-0.011	1.370	-0.362
44	-0.027	1.422	-0.398
46	-0.045	1.478	-0.435
48	-0.066	1.537	-0.473
50	-0.088	1.598	-0.512
52	-0.112	1.662	-0.552
54	-0.138	1.729	-0.592
56	-0.166	1.797	-0.632
58	-0.196	1.866	-0.671
60	-0.227	1.936	-0.710
62	-0.260	2.006	-0.746
64	-0.295	2.076	-0.781
66	-0.331	2.145	-0.813
68	-0.368	2.212	-0.842
70	-0.405	2.276	-0.867
72	-0.444	2.336	-0.888
74	-0.483	2.393	-0.903
76	-0.522	2.444	-0.912
78	-0.561	2.489	-0.915
80	-0.600	2.526	-0.910

La dirección del oleaje que se ha de utilizar en la metodología, corresponde con el del flujo medio de energía que alcanza el punto de control, independientemente que la playa sea completa (llegue hasta Po) o no.





### **Tómbolos y hemitómbolos. Cuadro AII.6**

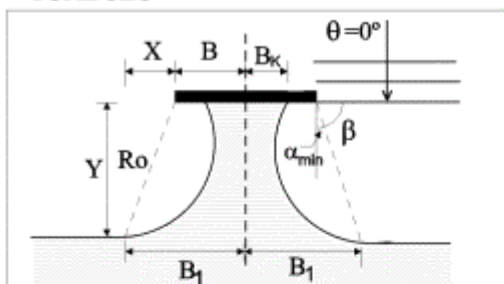
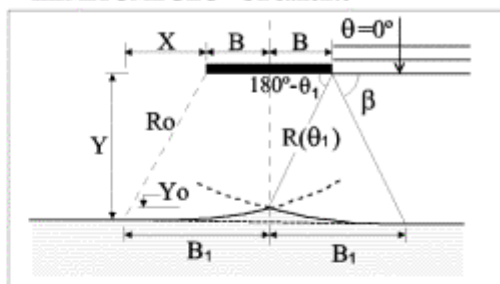
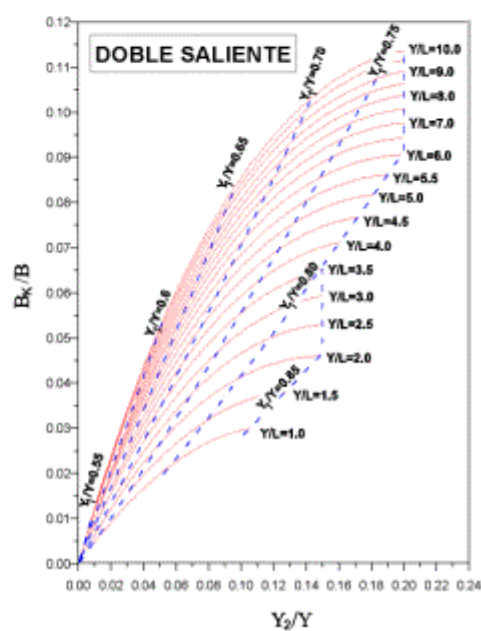
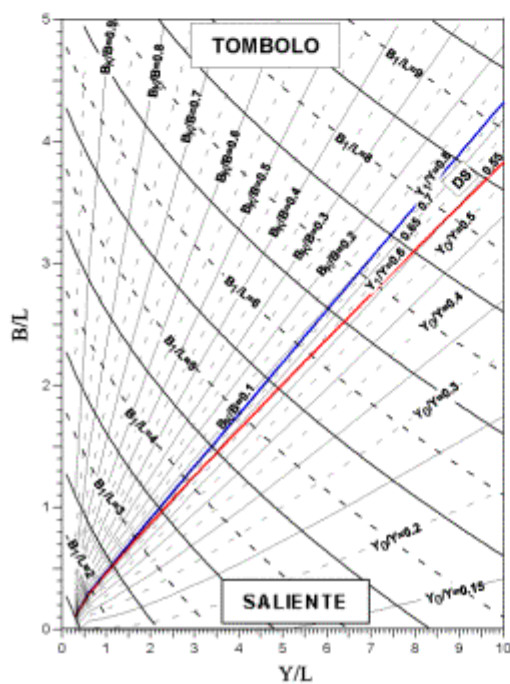
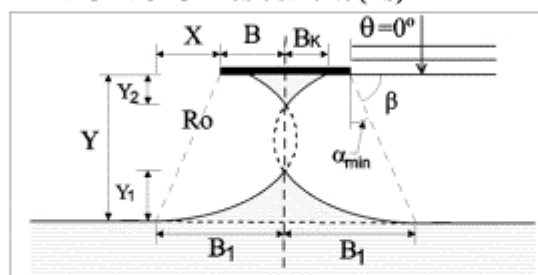
Un caso particular de forma en planta de equilibrio estático es la que se origina al abrigo de un dique exento o una isla. En este caso la formulación presentada en el apartado anterior nos permite determinar no solo la forma que adoptará la línea de costa, sino otros parámetros de interés en la fase de diseño, tales como:

- Si se formará tómbolo o hemitómbolo.
- Anchura de la playa en el dique exento en el caso de tómbolo.
- Magnitud del saliente en el caso del hemitómbolo.

Cabe señalar que en el caso del hemitómbolo se viola la hipótesis de no interacción entre dos puntos de difracción, por lo que la magnitud del saliente que se obtiene de la formulación parabólica es aproximada y por exceso, debiéndose utilizar la tabla recogida en el cuadro AII.6.

**Cuadro A.II.6. Tómbolos y Hemitómbolos****PLAYAS EN EQUILIBRIO ESTÁTICO (FORMA EN PLANTA)**

Gráficas para la determinación de la forma en planta de un Tómbolo o de un Hemitómbolo con un saliente o doble saliente.  $L$  es la longitud de onda del oleaje incidente, cuyas crestas son paralelas a la costa. El resto de los parámetros se identifican en las figuras.

**TÓMBOLO****HEMITÓMBOLO - Un saliente****HEMITÓMBOLO - Doble saliente (DS)**



### ***AII.4.2 Playas en equilibrio dinámico o en desequilibrio***

Tal y como se ha comentado anteriormente, se entiende que una playa ha alcanzado una forma en planta de equilibrio si dicha forma no varía bajo la acción de un oleaje incidente constante en el tiempo. Este equilibrio se denomina dinámico si se establece bajo la presencia de transporte longitudinal de arena, es decir, existe transporte pero no gradientes de transporte lo que da lugar a un mantenimiento del volumen global de arena dentro de la unidad fisiográfica.

En una playa en desequilibrio el transporte longitudinal sí genera gradientes de transporte y, consecuentemente, se establecen zonas de erosión y de acumulación que cambian la forma de la línea de costa.

En ambos casos, el estudio de la forma en planta de la playa requiere la determinación del transporte longitudinal de sedimentos y de los posibles cambios en la línea de costa que dicho transporte genera. Un aspecto importante es que este tipo de análisis no solo persigue el establecimiento de la forma final de la forma en planta, sino que también es objeto de análisis la evolución de dicha forma en planta a lo largo del tiempo. Por este motivo, este tipo de modelos suelen denominarse: modelos de evolución de la línea de costa.

Dentro de los modelos de evolución de la línea de costa, el más simple es el denominado modelo de “una línea”. Este modelo asume que todas las curvas batimétricas de la playa siguen por igual el movimiento de la línea de costa, por lo que se puede describir la evolución completa sin más que determinar la posición de una línea: la línea de costa. La forma del perfil de playa es irrelevante dentro de este análisis, siempre que sea constante a lo largo del tiempo, lo cual es, como ya se ha comentando, una hipótesis adecuada dentro de un estudio a largo plazo.

Los modelos de una línea, cuadro AII.7.1, se fundamentan en el principio de conservación del volumen de arena entre dos perfiles de playa. Si la cantidad de material que ha sido introducido entre dichos perfiles es mayor que la que ha salido, la línea de costa avanza hacia el mar y viceversa.

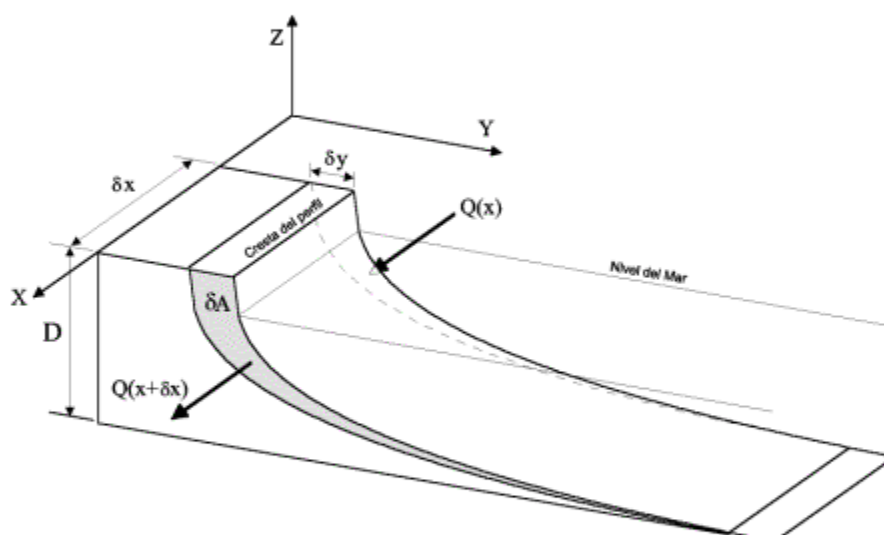


### Cuadro A.II.7.1. Fundamentos de los modelos de una línea.

Si el transporte longitudinal ( $Q$ ) varía a lo largo de la costa, la sección transversal ( $A$ ) de la playa en una posición dada ( $x$ ) cambiará en el transcurso del tiempo ( $t$ ). Esto puede expresarse con la siguiente ecuación de conservación del sedimento de la playa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t}$$

Los cambios en la sección transversal provocarán un avance o retroceso del perfil de playa, en sentido perpendicular a la línea de costa.



El cambio en la sección transversal ( $A$ ) es igual al cambio en la posición de los contornos del perfil ( $y$ ), multiplicado por una profundidad representativa ( $D$ ). Esto resulta en la ecuación:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

En la práctica, el perfil de playa no avanzará o retrocederá en la misma proporción en todas las profundidades. Usualmente se considera el movimiento de un contorno en particular, esto conduce a la terminología del modelo de una línea. La profundidad  $D$  en la ecuación se conoce como la profundidad de cierre.



$$\frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

donde:

$Q$  = transporte longitudinal  
 $D$  = profundidad del perfil  
 $x, y, t$  = ejes longitudinal, transversal y tiempo.

Una vez especificado el transporte longitudinal,  $Q$ , y las condiciones de contorno, la ecuación puede ser resuelta.

En función de la complejidad de la expresión de  $Q$  y de las condiciones de contorno la resolución puede ser analítica o numérica. Normalmente, las condiciones reales de una playa no pueden ser analizadas de manera rigurosa por medio de soluciones analíticas, dado que exigen serias simplificaciones, y se requiere la resolución numérica. No obstante, estas soluciones analíticas son adecuadas para estudios de prediseño. En lo que sigue se analizará:

- Soluciones analíticas sin difracción. Cuadro AII.7.2
- Soluciones analíticas con difracción. Cuadro AII.7.3
- Soluciones numéricas. Cuadro AII.7.4

### ***Soluciones analíticas sin difracción. Cuadro AII.7.2***

En caso de que no existan diques u otros elementos que generen variaciones longitudinales de la altura de ola, la ecuación de continuidad del volumen de arena puede ser expresada como una ecuación de difusión:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$



donde  $G$  puede ser interpretado como un coeficiente de difusión que mide la escala temporal de los cambios de la línea de costa ante una perturbación (acción del oleaje). Existen diversas soluciones teóricas a la ecuación anterior, que pueden encontrarse en Larson et al. (1987), entre éstas destacamos:

- *Vertido rectangular*

El caso más simple, que puede ser analizado con la ecuación de la difusión, corresponde a la evolución de un relleno rectangular de una longitud,  $l$ , efectuado en una playa recta. En este caso puede demostrarse que, en ausencia de erosión de fondo, la fracción de material,  $M$ , que permanece en el rectángulo donde fue depositado depende del parámetro  $\frac{\sqrt{Gt}}{l}$ , ver cuadro AII.7.2. Para valores de  $M$  entre 1 y 0.5, puede utilizarse como expresión aproximada:

$$M = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{Gt}}{l}$$

en particular, el tiempo que ha de transcurrir hasta que el 50% del material haya desaparecido de la zona de vertido es:

$$t_{50\%} = 0.172 \frac{l^2 \text{ (km)}}{H_b^{5/2} \text{ (m)}}$$

En caso de que exista una erosión de fondo constante,  $E$ , puede demostrarse que para valores de  $\left(\frac{\sqrt{Gt}}{l}\right) < 0.5$  el tiempo requerido para que una fracción  $M$  de material permanezca en el área de vertido es:

$$t_M = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$



$$b = \frac{2E(M - 1)}{\Delta y_0} - \frac{4G}{M l^2}$$

$$a = \left( \frac{E}{\Delta y_0} \right)^2$$

$$c = (1 - M)^2$$

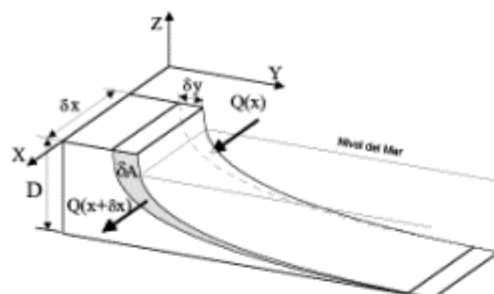
donde  $\Delta y_0$  es la anchura de la playa seca.

- *Barrera litoral*

Otro supuesto que admite solución analítica es la presencia de una barrera litoral al transporte (supuesto que dicha barrera no genera efectos importantes de reflexión y/o difracción). La presencia de esta barrera litoral generará una acumulación de arena aguas arriba de la misma y una erosión aguas abajo.

**Cuadro A.II.7.2. Modelos de una línea. Soluciones analíticas sin difracción**

Si la magnitud del transporte longitudinal,  $Q$ , y la altura de ola,  $H_{sb}$ , son constantes en  $x$  y  $t$ , la ecuación de conservación del sedimento se transforma en una ecuación de difusión del tipo:



$$\frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$$G = \frac{2Q}{D}$$

$$Q = \frac{H_{rmsb}^2 * C_{gb} * K}{16 (s-1) (1-p)}$$

donde:

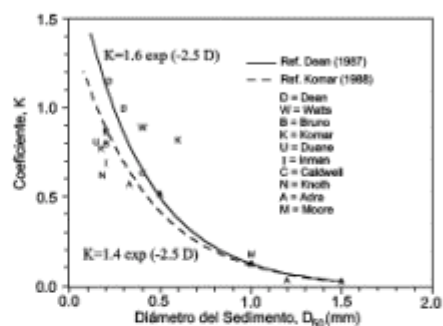
$H_{rmsb}$  = altura media cuadrática en rotura

$C_{gb}$  = celeridad de grupo en rotura

$s$  = densidad relativa:  $\rho_s/\rho$

$p$  = porosidad ( $\sim 0.35$ )

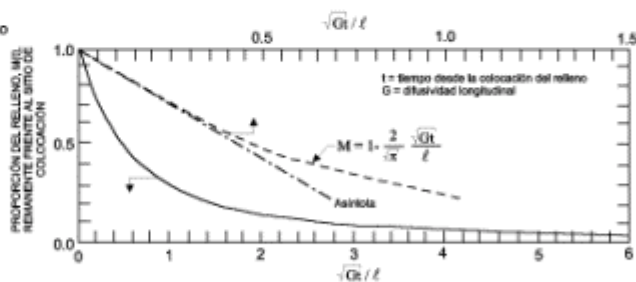
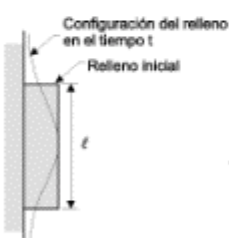
$K$  = constante (ver Figura)



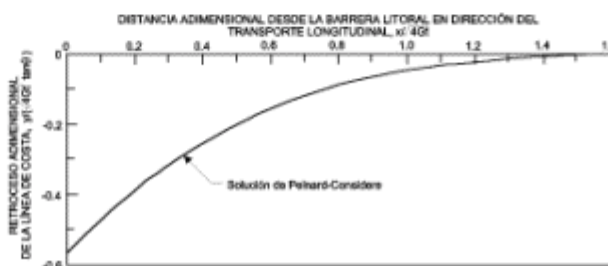
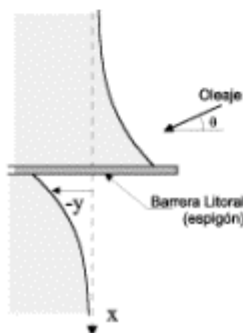
Esta ecuación puede ser resuelta en una serie de geometrías analíticas, véase Larson, *et al* (1987).

A continuación se presenta la solución de la evolución de la línea de costa para dos casos.

### 1. RELLENO RECTANGULAR



### 2. BARRERA LITORAL







### ***Soluciones analíticas con difracción. Cuadro AII.7.3***

En caso de que exista variación de la altura de ola a lo largo del eje longitudinal, la ecuación de conservación del volumen de arena adopta la forma:

$$\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x}$$

Larson y otros (1997) obtuvieron diversas soluciones de dicha ecuación para los casos de:

- Dique exento
- Muro semi-infinito
- Espigones transversales

Es importante señalar que las soluciones anteriores tiene en cuenta la variación longitudinal del transporte asociado a la rotura oblicua del oleaje, debida a variaciones en la altura de ola y en el ángulo de rotura, pero no contemplan el transporte asociado a los gradientes de altura de ola que suponen despreciables.

### ***Soluciones numéricas. Cuadro AII.7.4***

Cuando las condiciones geometrías son complejas y generan cambios de las variables que afectan al transporte litoral (por ejemplo, diques, cabos, bajos, cañones submarinos) se hace necesario resolver la ecuación de conservación del volumen de arena por medio de una aproximación numérica.

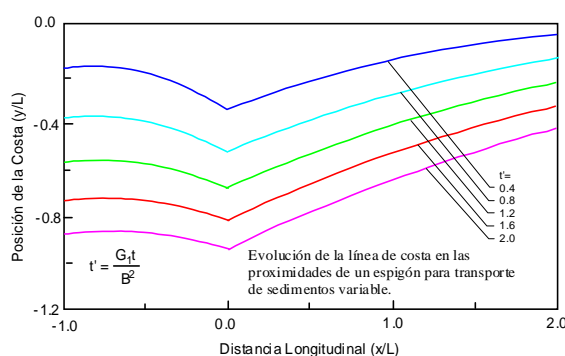
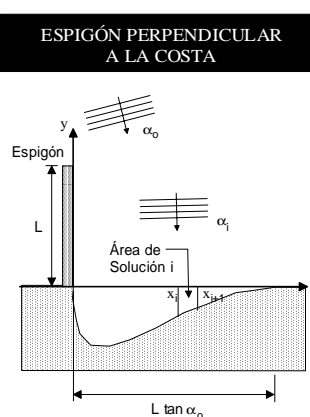
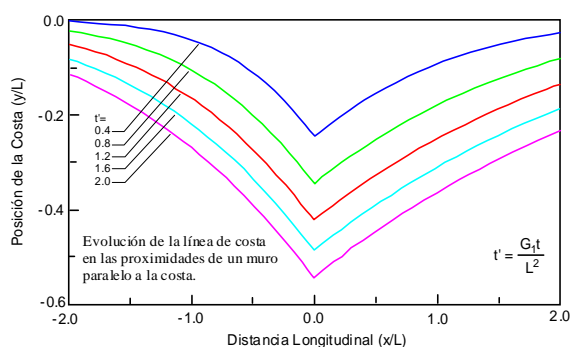
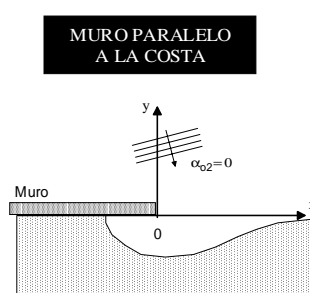
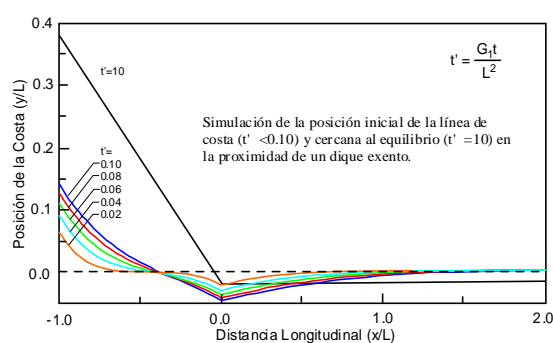
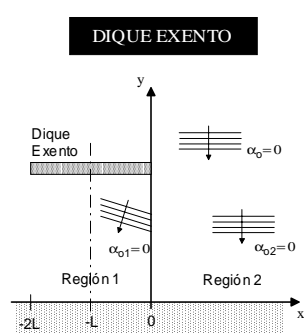
La aproximación numérica divide la playa en pequeños elementos y establece las relaciones de compatibilidad entre ellos. Este tipo de modelos permite, en principio, estimar la evolución en planta de una playa sea cual sea su forma inicial, con cualquier tipo de estructuras y bajo la acción de cualquier oleaje incidente, considerando el transporte longitudinal debido, tanto a la rotura oblicua del oleaje, como a los gradientes de altura de ola. (Ver manual de referencia S.M.C.). En el manual de referencia del modelo de una línea del S.M.C. se detallan las ecuaciones y el modo de uso de este tipo de modelos.

**Cuadro A.II.7.3. Modelos de una línea. Soluciones analíticas con difracción**

En el caso general de variación longitudinal del coeficiente de difusión,  $G$ , (véase definición en el Cuadro A.II.7.2), la ecuación de conservación de arena adopta la expresión:

$$\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x}$$

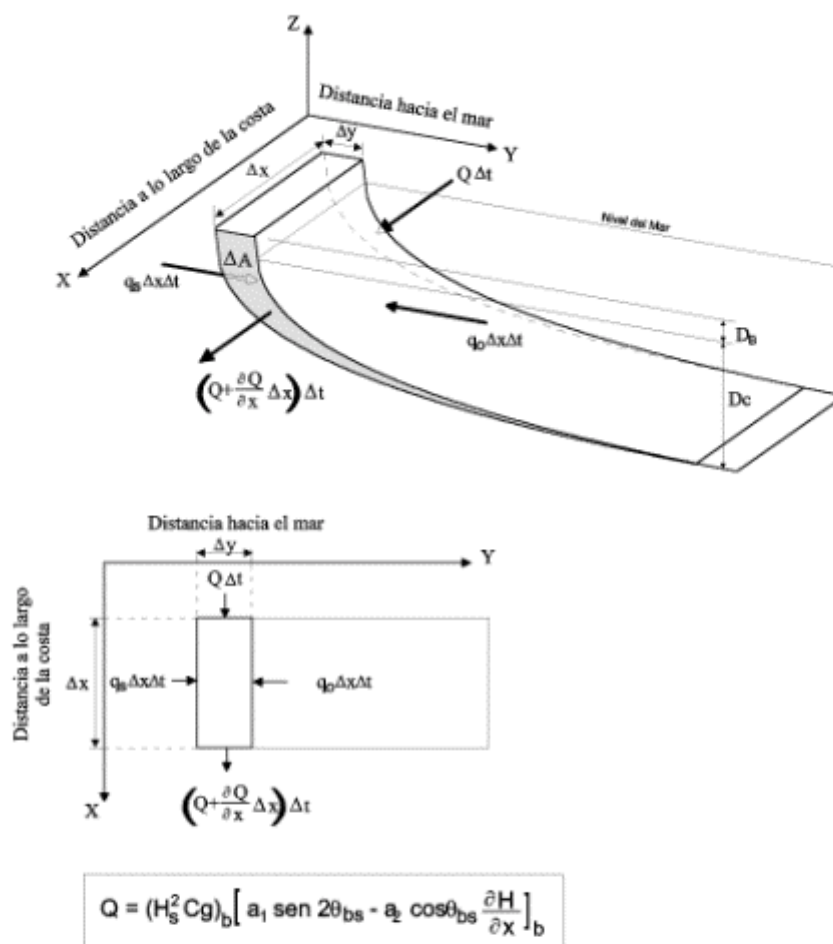
Esta ecuación puede ser resuelta para una serie de geometrías analíticas, véase Larson, *et al* (1997). En las Figuras siguientes se presenta la evolución de la línea de costa en tres supuestos:

**Casos del Tutor****Ejemplo de la solución analítica**

**NOTA:** Los gráficos anteriores corresponden a soluciones para valores concretos de los datos de entrada (p.e. ángulo de incidencia del oleaje), por lo que no son válidos para otros valores. Véase referencia Larson, *et al* (1997) para mayor detalle.



Cuadro A.II.7.4. Modelos de una línea. Soluciones numéricas.



Donde:

$H_s$  = Altura de ola significativa

$Cg$  = Celeridad de grupo

$b$  = subíndice que indica la condición de rotura

$\theta_{bs}$  = ángulo que forma el frente de ola en rotura y la línea de costa

$$a_1 = \frac{K_1}{16((\rho_s/\rho) - 1)(1-p)(1.416)^{5/2}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8((\rho_s/\rho) - 1)(1-p) \tan \beta (1.416)^{7/2}}$$

$K_1, K_2$  = coeficientes empíricos, se tratan como parámetros de calibración

$\rho_s$  = densidad de la arena (2.650 kg / m<sup>3</sup> para arena de cuarzo)

$\rho$  = densidad del agua (1.030 kg / m<sup>3</sup> para el agua marina)

$p$  = porosidad de la arena del fondo (0,35 - 0,4)

$\tan \beta$  = pendiente media del fondo de la línea de costa a la profundidad de cierre