

SECCIÓN 2

FUNDAMENTOS Y DESARROLLO DEL MODELO DE EVOLUCIÓN DE MEDIO-LARGO PLAZO



RESUMEN Y CONCLUSIONES

Esta sección se dedica al desarrollo del objetivo general de la Tesis, que consiste en el establecimiento de un modelo de evolución de playas de medio-largo plazo (aplicable en escalas de días a décadas). Con este fin, la sección se encuentra compuesta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2.** *Ecuaciones generales de conservación del sedimento.*
- **Capítulo 3.** *Métodos de determinación de la variación de la línea de costa.*
- **Capítulo 4.** *Desarrollo del modelo de evolución con perfil de forma constante y profundidad límite variable.*
- **Capítulo 5.** *Desarrollo del modelo de evolución de medio-largo plazo.*

CAPÍTULO 2

En este capítulo se lleva a cabo la derivación de las ecuaciones generales de conservación del sedimento, sin introducir ningún tipo de hipótesis con respecto al perfil de playa. Esta derivación es necesaria ya que la mayoría de los modelos tradicionales de evolución de largo plazo utilizan unas ecuaciones simplificadas, con las limitaciones consecuentes asociadas, destacándose entre las mismas la correspondiente al rango de aplicación de estos modelos al largo plazo.

Así pues, en este capítulo, partiendo de la ecuación fundamental de conservación de masa o de transporte del sedimento en un flujo turbulento, se realiza la integración de esta ecuación en la coordenada vertical z , y a continuación en la coordenada transversal y . Este último proceso se lleva a cabo en dos situaciones, en el caso de que el límite de integración en aguas profundas sea fijo en el tiempo y en el caso de que sea variable. Finalmente se presenta una discusión sobre las ecuaciones derivadas.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

SECCIÓN 2

❖ La derivación de las ecuaciones generales de conservación del sedimento, que son imprescindibles para el desarrollo del modelo de evolución de medio-largo plazo.

❖ La verificación de que las ecuaciones generales de conservación del sedimento sólo indican la variación temporal del área transversal en la zona de estudio, pero no establecen la variación de la línea de costa.

❖ La comprobación de la necesidad del establecimiento de un modelo de evolución de perfil de playa con el objetivo de predecir las variaciones de la línea de costa asociadas con variaciones temporales del área transversal, así como las relacionadas con una redistribución del sedimento en el perfil, disponiéndose de esta forma de una herramienta de evolución de playas válida en el medio-largo plazo.

CAPÍTULO 3

En este capítulo se describen los diferentes métodos de determinación de la variación de la línea de costa existentes en la actualidad, prestándose especial atención a los métodos que utilizan los modelos de evolución de playas en el largo plazo. Dentro de estos últimos, se analizan los que utilizan los dos modelos siguientes:

▪ *Modelos tradicionales de una línea (como el modelo GENESIS)*. Este caso es un ejemplo de integración de las ecuaciones de conservación de sedimento en el que el límite en aguas profundas es variable en el tiempo.

▪ *Modelo de una línea propuesto por Karambas (1999)*. Este caso es un ejemplo de integración de las ecuaciones de conservación de sedimento en el que el límite en aguas profundas es fijo en el tiempo.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

❖ El análisis de los diferentes métodos de determinación de la variación de la línea de costa existentes en la actualidad, con especial atención a los métodos de los modelos de evolución de largo plazo, derivándose las ecuaciones que utilizan este

RESUMEN Y CONCLUSIONES

tipo de modelos y detectándose una serie de deficiencias, cuya implicación principal es la limitación del rango de aplicación de este tipo de modelos al largo plazo.

❖ La propuesta de dos modelos para el establecimiento de la variación de la línea de costa, con el objetivo principal de extender el rango de aplicación de los modelos de evolución de largo plazo, eliminándose las deficiencias detectadas en dichos modelos.

CAPÍTULO 4

En este capítulo se desarrolla el primero de los dos modelos de evolución propuestos en el capítulo 3 y que corresponde al modelo de evolución con perfil de forma constante y profundidad límite variable.

Con este modelo sólo se pueden predecir los cambios de la línea de costa asociados a variaciones temporales del área transversal. Con el fin de obtener la dependencia entre la variación temporal del área transversal y la misma variación de la línea de costa, se asume que el perfil de playa sólo posee un tramo (tramo de rotura) y que la forma de este tramo es constante. Sin embargo, la mejora que se incorpora con este modelo es que la profundidad límite hasta la que se extiende el perfil de playa es variable, no sólo en el tiempo, sino también en el espacio.

Aunque este método constituye un avance con respecto a los modelos tradicionales de una línea, no es la herramienta adecuada en el medio-largo plazo, pues no sólo se está manteniendo la forma del tramo de rotura del perfil constante, sino que no se está considerando el perfil de playa completo. Es precisamente este último aspecto, como se podrá comprobar en el siguiente capítulo, el que permite equilibrar la cantidad de sedimento y predecir acertadamente la posición de la línea de costa.

En la primera parte de este capítulo se derivan las ecuaciones constituyentes del método propuesto partiendo de las ecuaciones generales de conservación de sedimento derivadas en el capítulo 2. En la segunda parte se estudia la zonificación

SECCIÓN 2

del perfil de playa, proponiéndose una expresión para la definición del límite de transporte longitudinal activo presente en dichas ecuaciones.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

❖ El desarrollo de un modelo de evolución con perfil de forma constante y profundidad límite variable. La utilidad de este modelo radica en ser el sustituto de los modelos de evolución de largo plazo existentes en la actualidad (modelos de una línea) en situaciones en las que las características del oleaje presentan gran variabilidad.

❖ La propuesta de una expresión (ecuación 2.100) para la definición de la profundidad de transporte longitudinal activo h_q en función de la altura de ola significativa local $H_{s\ loc}$ en dicha profundidad. Dicha expresión se ha establecido con base en datos de campo con la distribución transversal del transporte longitudinal de sedimento en la zona de rompientes en la playa de Duck. En concreto se han utilizado los datos de campo de Kraus et al. (1989), los de Rosati et al. (1990) y los de Miller (1998), establecidos los dos primeros en condiciones normales de oleaje (DUCK85, SUPERDUCK) y los últimos en condiciones de temporal (SANDYDUCK).

CAPÍTULO 5

En este capítulo se desarrolla el segundo de los dos modelos de evolución propuestos en el capítulo 3 y que corresponde al modelo de evolución de medio-largo plazo.

Con este modelo se van a poder determinar, tanto las variaciones de la línea de costa asociadas a variaciones temporales del área transversal, como las relacionadas con una redistribución del sedimento en el perfil por transporte transversal (variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se describe el modelo de evolución de medio-largo plazo, se valida dicho modelo con datos de campo y se presentan unos ejemplos de aplicación del modelo propuesto, comparándose con los modelos tradicionales de una línea.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

❖ El desarrollo del modelo de evolución de playas de medio-largo plazo con incorporación de un modelo de evolución de perfil que incluye la definición del perfil completo de playa, diferenciándose en el mismo la zona de rotura, la zona de asomeramiento o de transición, la zona exterior y la zona geológica.

❖ La validación con datos de campo del modelo desarrollado, verificándose el mismo, tanto para reproducir acertadamente la posición de la línea de costa, como el perfil completo de playa.

❖ La comprobación de que el éxito del modelo de evolución propuesto radica especialmente en considerar el perfil completo, con todos sus tramos, lo cual permite equilibrar la cantidad de sedimento y reproducir adecuadamente la posición de la línea de costa.

❖ La propuesta de dos expresiones (ecuaciones 2.127 y 2.128) para definir la profundidad $h_{e\ loc}$ que separa el tramo de asomeramiento o de transición del tramo exterior del perfil de playa. Dichas expresiones se han establecido a partir de datos de campo, obteniéndose una relación entre la profundidad indicada y la altura de ola significativa media del mes previo a la medida del perfil.

❖ La comprobación de la similitud existente entre la ecuación (2.128) y la expresión obtenida por Capobianco et al. (1997) para la determinación de la profundidad de cierre para escalas de corto a medio plazo (véase capítulo 4). Se resalta, no obstante, la necesidad de disponer de más datos de campo para poder precisar las expresiones (2.127) y (2.128) propuestas para la determinación de la profundidad $h_{e\ loc}$, así como elegir la más adecuada.

❖ La propuesta de una expresión (ecuación 2.130) para definir el límite exterior o geológico con profundidad asociada h_e . Este límite es un punto de considerable relevancia dentro del modelo de evolución propuesto, ya que la

SECCIÓN 2

batimetría completa se está definiendo hasta el mencionado punto. Dicho límite viene marcado por la geología propia de cada lugar, debiendo ser determinado del conocimiento de cada zona en particular. La expresión obtenida se ha establecido con base en los datos de campo para la definición de movimiento incipiente de Hallermeier (1981), obteniéndose una relación entre la profundidad indicada y la altura de ola significativa con período de retorno de un año. Sin embargo, merece la pena destacar que la expresión indicada se debe utilizar con reservas y en situaciones donde sea imposible la obtención de la profundidad analizada a partir del conocimiento de la zona.

❖ La comprobación de las ventajas de utilizar un modelo de evolución de medio-largo plazo frente a los modelos tradicionales de una línea mediante unos ejemplos de aplicación de ambos modelos. En el caso de que la variación de la línea de costa esté asociada a una redistribución del sedimento en el perfil y las variaciones temporales del área transversal sean nulas, los modelos tradicionales de una línea son totalmente ineficientes. Por otra parte, en el caso de que la evolución de la línea de costa esté asociada a variaciones temporales del área transversal, los modelos tradicionales de una línea son adecuados para determinar la forma de equilibrio de la línea de costa, pero son inadecuados para predecir las escalas temporales de la evolución de la misma.

CAPÍTULO 2

ECUACIONES GENERALES DE CONSERVACIÓN DEL SEDIMENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

En el anterior capítulo se estudiaron los diferentes tipos de modelos de evolución de playas existentes, comprobándose que aunque tanto en el corto-medio plazo (con los modelos de evolución de perfil y los modelos en 3D) como en el largo plazo (con los modelos de evolución de planta o modelos de una línea) se dispone de herramientas específicas para estudiar la evolución de las playas, existe una carencia importante en cuanto a modelos adecuados para cubrir el rango de escalas de medio-largo plazo.

La mayoría de los intentos realizados con el objetivo de desarrollar una herramienta válida en el medio-largo plazo se han basado en los modelos de una línea (modelos de una línea con término de transporte transversal de sedimento, modelos híbridos y modelos de N líneas), aprovechando las ventajas que estos modelos tienen en su aplicación en el largo plazo, como ya fue comentado en el anterior capítulo. Dentro de estos tres tipos de modelos que pretenden ampliar el rango de aplicación de los modelos de largo plazo al medio plazo, se ha considerado más adecuado el grupo de los modelos híbridos con incorporación de modelo de evolución de perfil.

Así es como surge esta sección de la Tesis, cuyo objetivo consiste en el desarrollo de un modelo de evolución de playas de medio-largo plazo (aplicable en escalas de días a décadas); debiéndose incluir, por lo tanto, la variabilidad experimentada por el perfil de playa.

En este capítulo se va a llevar a cabo una tarea básica para el desarrollo del modelo especificado: la derivación de las ecuaciones generales de conservación del sedimento, sin introducir ningún tipo de hipótesis con respecto al perfil de playa. Nótese que la mayoría de los modelos tradicionales de evolución de largo plazo utilizan unas ecuaciones simplificadas, con las limitaciones consecuentes asociadas, destacándose entre las mismas la correspondiente al rango de aplicación de estos modelos al largo plazo.

Así pues, partiendo de la ecuación fundamental de conservación de masa o de transporte del sedimento en un flujo turbulento, se realizará la integración de esta ecuación en la coordenada vertical z , y a continuación en la coordenada transversal y . Este último proceso se llevará a cabo en dos situaciones, en el caso de que el límite de integración en aguas profundas sea fijo en el tiempo y en el caso de que sea variable. Finalmente se realizará una discusión de las ecuaciones derivadas.

2.2. PLANTEAMIENTO DE LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DEL SEDIMENTO

La ecuación de conservación de masa o de transporte del sedimento en un flujo turbulento indica que la variación en el tiempo de la concentración de sedimento se debe a tres fenómenos: a la advección, a la difusión y a las posibles fuentes y sumideros.

La expresión matemática de la conservación de la masa de sedimento dentro del flujo turbulento queda representada mediante la ecuación (2.1), (véase Abbott y Price, 1994).

$$\boxed{\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cu_{sed}) + \frac{\partial}{\partial y}(cv_{sed}) + \frac{\partial}{\partial z}(cw_{sed}) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) + FS}$$
(2.1)

Los términos de la ecuación (2.1) se definen de la siguiente forma:

- c es la concentración de sedimento expresada en unidades de masa de sedimento por unidad de volumen de fluido.
- El término que representa el flujo de masa se expresa en unidades de masa de sedimento por unidad de área y por unidad de tiempo. Este término tiene dos

componentes, las cuales se pueden suponer aditivas, el flujo de masa advectivo y el flujo de masa difusivo (Fischer et al., 1979). El primero de estos fenómenos está asociado al hecho de que el sedimento se encuentra en un fluido en movimiento y el segundo está ligado a la existencia de un gradiente de concentraciones en el espacio, que tiene como consecuencia un proceso difusivo hacia la zona donde la concentración es más reducida.

El flujo de masa advectivo se define con la ecuación (2.2). En esta ecuación ($u_{sed}, v_{sed}, w_{sed}$) son las componentes cartesianas del vector de velocidad del sedimento.

$$\overline{q_{advectivo}} = (cu_{sed}, cv_{sed}, cw_{sed}) \quad (2.2)$$

Por otra parte, el flujo de masa difusivo se expresa con la ecuación (2.3). Este flujo sigue la Ley de Fick (Fischer et al., 1979) pero para flujos turbulentos, donde los coeficientes de difusión son en este caso unos coeficientes de difusión turbulentos o viscosidades de remolino del flujo mixto agua-sedimento ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$).

$$\overline{q_{difusivo}} = \left(-\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x}, -\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y}, -\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2.3)$$

- Por último, FS es la concentración de sedimento por unidad de tiempo originada por fuentes y sumideros, expresada en unidades de masa de sedimento por unidad de volumen de fluido y por unidad de tiempo.

Nótese que, por conveniencia, los ejes de referencia se definen de forma que sean los ejes cartesianos, x, y, z , donde el eje x representa la coordenada longitudinal a la costa y se elige en una dirección que siga la tendencia dominante de la línea de costa, el eje y se extiende hacia la zona de aguas profundas en la perpendicular al anterior y define la coordenada transversal a la misma, y el eje z la coordenada

vertical (definida positiva hacia arriba). Téngase presente que se va a seguir la evolución del punto de la playa que intercepta el eje z de referencia, denominándose dicho punto como línea de costa. En la figura 2.1 aparecen representados los ejes de referencia indicados. A partir de este momento, las componentes de cualquier término de las ecuaciones en la dirección del eje x se van a denotar como longitudinales y las componentes en la dirección del eje y se identificarán como transversales.

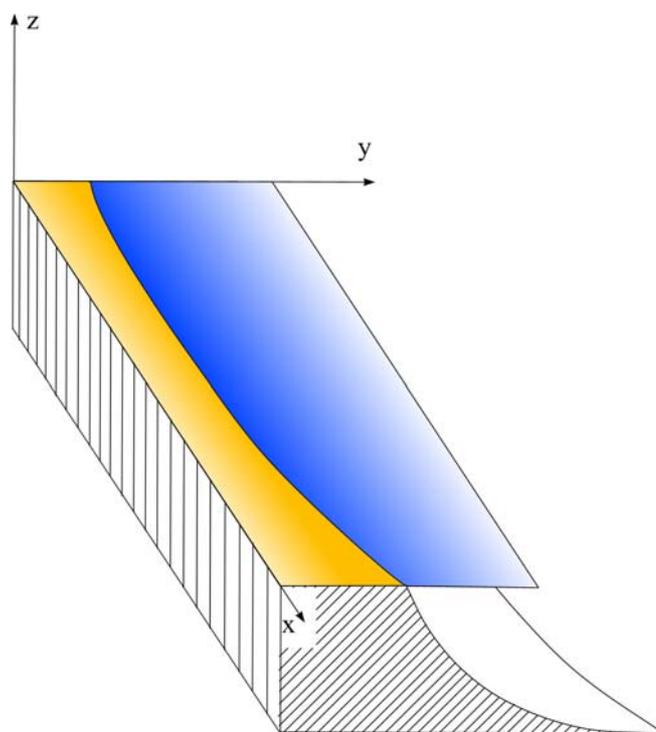


Figura 2.1- Sistema de referencia elegido

2.3. INTEGRACIÓN EN LA COORDENADA VERTICAL Z

Con el objetivo de eliminar la dependencia en vertical y obtener las correspondientes ecuaciones en dos dimensiones, se realiza una integración en la coordenada z de la ecuación de conservación de masa del sedimento.

Téngase presente que se va a utilizar la regla de Leibnitz (Abbott y Price, 1994), cuya forma general queda expresada en la ecuación (2.4).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} F(x, y) dy &= \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial}{\partial x} (F(x, y)) dy \\ &+ F(x, \beta(x)) \frac{\partial \beta(x)}{\partial x} - F(x, \alpha(x)) \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.4)$$

La integración en vertical se extiende desde la cota del fondo z_b hasta la cota de la superficie libre z_η . Al integrar cada uno de los términos de la ecuación (2.1) se obtienen las expresiones (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) y (2.11).

$$C_1 = \int_{z_b}^{z_\eta} \frac{\partial c}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{z_\eta} c dz - c_{z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial t} + c_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$C_2 = \int_{z_b}^{z_\eta} \frac{\partial (cu_{sed})}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{z_\eta} cu_{sed} dz - (cu_{sed})_{z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial x} + (cu_{sed})_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (2.6)$$

$$C_3 = \int_{z_b}^{z_\eta} \frac{\partial (cv_{sed})}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{z_\eta} cv_{sed} dz - (cv_{sed})_{z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial y} + (cv_{sed})_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (2.7)$$

$$C_4 = \int_{z_b}^{z_\eta} \frac{\partial (cw_{sed})}{\partial z} dz = (cw_{sed})_{z_\eta} - (cw_{sed})_{z_b} \quad (2.8)$$

$$C_5 = \int_{z_b}^{z_\eta} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{z_\eta} \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} dz - \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial x} + \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (2.9)$$

$$C_6 = \int_{z_b}^{z_\eta} \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{z_\eta} \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} dz - \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)_{z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial y} + \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$C_7 = \int_{z_b}^{z_\eta} \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) dz = \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z_\eta} - \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z_b} \quad (2.11)$$

Estas expresiones se simplifican notablemente teniendo en cuenta que la velocidad del sedimento en el fondo es nula y que se puede hacer uso de la condición cinemática de contorno en la superficie libre, la cual se expresa mediante la ecuación (2.12).

$$w_{sed\ z_\eta} = \frac{\partial z_\eta}{\partial t} + u_{sed\ z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial x} + v_{sed\ z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial y} \quad (2.12)$$

Adicionalmente, se impone como condición de contorno, tanto para la superficie libre, como para el fondo, que el flujo de masa difusivo normal al contorno sea nulo. Esta condición se representa con la ecuación (2.13) para la superficie libre y con la expresión (2.14) para el fondo.

$$\left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z_\eta} = \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial x} + \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)_{z_\eta} \frac{\partial z_\eta}{\partial y} \quad (2.13)$$

$$\left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z_b} = \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} + \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (2.14)$$

Al tener en cuenta las expresiones (2.12), (2.13) y (2.14), así como el hecho de que la velocidad del sedimento en el fondo es nula, se obtienen las ecuaciones (2.15) y (2.16).

$$C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{z_\eta} c dz + c_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{z_\eta} c u_{sed} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{z_\eta} c v_{sed} dz \quad (2.15)$$

$$C_5 + C_6 + C_7 = \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{z_\eta} \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{z_\eta} \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} dz \quad (2.16)$$

Nótese que la ecuación de conservación de masa de sedimento integrada en vertical se expresa mediante la ecuación (2.17).

$$C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = C_5 + C_6 + C_7 + \int_{z_b}^{z_\eta} F S dz \quad (2.17)$$

Así pues, haciendo uso de las expresiones (2.15), (2.16) y (2.17), la ecuación de conservación de masa de sedimento (ecuación 2.1) integrada en la coordenada vertical se representa mediante la ecuación (2.18).

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{z_\eta} c dz + c_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = \int_{z_b}^{z_\eta} F S dz} \quad (2.18)$$

con:

$$T_x = \int_{z_b}^{z_\eta} \left(cu_{sed} - \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) dz \quad (2.19)$$

$$T_y = \int_{z_b}^{z_\eta} \left(cv_{sed} - \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) dz \quad (2.20)$$

En las expresiones (2.19) y (2.20), tanto el transporte longitudinal T_x , como el transversal T_y , están expresados en unidades de masa de sedimento por unidad de longitud y por unidad de tiempo. Posteriormente estos transportes se expresarán en unidades de volumen por unidad de longitud y por unidad de tiempo para ser acordes con las expresiones usuales de transporte de sedimento.

La ecuación (2.18) merece un análisis especial, pues si se tiene en cuenta que las fuentes y sumideros son nulos en la mayoría de las situaciones reales, lo que está indicando esta ecuación es que los gradientes espaciales de todo el transporte de sedimento generado por el oleaje, esto es, del transporte por fondo adicionalmente al transporte por suspensión, se traducen en una variación temporal de la batimetría o bien de la integral en profundidad de la concentración de sedimento. Este último término se suele considerar nulo, como queda especificado en la ecuación (2.21), pues para los tamaños de sedimento usuales de las playas (tipo arenas), la concentración de sedimento se mantiene constante en la columna de agua. Excepcionalmente, para tamaños de sedimento muy finos, este término pudiera dejar de ser despreciable.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{z_\eta} cdz = 0 \quad (2.21)$$

Por consiguiente, después de haber tenido en consideración la expresión (2.21), la ecuación (2.18) queda representada con la ecuación (2.22).

$$\boxed{c_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = \int_{z_b}^{z_\eta} FSdz} \quad (2.22)$$

La concentración de sedimento en el fondo es función de la densidad del sedimento ρ_s y de la porosidad del mismo p mediante la ecuación (2.23).

$$c_{z_b} = \rho_s (1 - p) \quad (2.23)$$

La ecuación (2.22), al hacer uso de la expresión (2.23), se representa con la ecuación (2.24).

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{\rho_s (1 - p)} \left(\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \right) = \frac{1}{\rho_s (1 - p)} \int_{z_b}^{z_\eta} FSdz \quad (2.24)$$

Con carácter ilustrativo se puede verificar que partiendo de la ecuación (2.24), si se asume que la densidad de sedimento es constante a lo largo de la coordenada transversal y en la zona de interés, así como a lo largo de la coordenada longitudinal x , y se anula el término de fuentes y sumideros, se obtiene la ecuación (2.25), que es la ecuación usual que utilizan los modelos de evolución morfológica de la batimetría en una escala de corto plazo.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x^{sed}}{\partial x} + \frac{\partial q_y^{sed}}{\partial y} \right) \quad (2.25)$$

En la ecuación (2.25) se han utilizado las expresiones (2.26), (2.27) y (2.28), con el fin de presentar dicha ecuación con una notación similar a la que utilizan estos modelos. Asimismo, se debe tener en cuenta que h representa la profundidad del fondo, q_x^{sed} es el transporte de sedimento en la dirección del eje x expresado en unidades de volumen de sedimento por unidad de longitud y por unidad de tiempo y q_y^{sed} es el transporte de sedimento en la dirección del eje y expresado en unidades de volumen de sedimento por unidad de longitud y por unidad de tiempo.

$$q_x^{sed} = \frac{T_x}{\rho_s} = \frac{\int_{z_b}^{z_n} \left(cu_{sed} - \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) dz}{\rho_s} \quad (2.26)$$

$$q_y^{sed} = \frac{T_y}{\rho_s} = \frac{\int_{z_b}^{z_n} \left(cv_{sed} - \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) dz}{\rho_s} \quad (2.27)$$

$$z_b = -h \quad (2.28)$$

Después de este breve paréntesis y volviendo a la ecuación (2.24) para continuar con el proceso de derivación de las ecuaciones de la Tesis, se asume que la concentración de sedimento en el fondo es constante a lo largo de la coordenada transversal y y en la zona de interés, así como a lo largo de la coordenada longitudinal x , obteniéndose de esta forma la ecuación (2.29).

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = T_{FS} \quad (2.29)$$

En la ecuación (2.29) se han tenido en consideración las expresiones (2.30), (2.31) y (2.32); para que, como anteriormente se adelantaba, los transportes de sedimento queden expresados en unidades de volumen total por unidad de longitud y por unidad de tiempo, que es lo habitual en las expresiones disponibles para ser utilizadas en los modelos objeto de interés.

$$q_x = \frac{T_x}{\rho_s(1-p)} = \frac{\int_{z_b}^{z_\eta} \left(cu_{sed} - \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) dz}{\rho_s(1-p)} \quad (2.30)$$

$$q_y = \frac{T_y}{\rho_s(1-p)} = \frac{\int_{z_b}^{z_\eta} \left(cv_{sed} - \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) dz}{\rho_s(1-p)} \quad (2.31)$$

$$T_{FS} = \frac{I}{\rho_s(1-p)} \int_{z_b}^{z_\eta} FS dz \quad (2.32)$$

2.4. INTEGRACIÓN EN LA COORDENADA TRANSVERSAL Y

A continuación se va a realizar a la ecuación (2.29) una integración en la coordenada transversal y entre los límites en los cuales es aplicable.

El primer límite y_s indica el límite en la costa y corresponde al punto de la playa que intercepta el eje z de referencia (línea de costa).

En cuanto al segundo límite, aunque matemáticamente es arbitrario, es decir, se puede establecer a cualquier distancia en el perfil de playa, se debe elegir en función de algún criterio físico, pues la elección de este límite lleva asociado una serie de consecuencias a tener en cuenta. Existen diferentes posibilidades para su elección, pero básicamente se pueden dividir en dos.

La primera posibilidad consiste en localizar este límite en el límite exterior y_e . El límite exterior define un punto en aguas profundas en el que el transporte de sedimento se puede considerar nulo, siendo pues un límite que es invariable en el tiempo, lo cual permite simplificar considerablemente el proceso de derivación de las ecuaciones integradas transversalmente. Un esquema similar fue seguido por Karambas et al. (2001).

La segunda posibilidad consiste en ubicar este segundo límite a una distancia de la línea de costa en la que se concentra el transporte longitudinal de sedimento. Este límite se va a denotar como el límite de transporte longitudinal activo y_q y tiene el inconveniente de que es un límite variable en el tiempo. Este esquema es el que siguen algunos modelos simplificados, como es el caso del modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989).

Así pues, se va a efectuar el proceso de derivación de la ecuación integrada en la coordenada transversal y para las dos posibilidades descritas.

2.4.1. INTEGRACIÓN CON EL SEGUNDO LÍMITE FIJO EN EL TIEMPO

En este apartado se va a realizar a la ecuación (2.29) una integración en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite exterior y_e .

Los términos de la ecuación (2.29) integrados en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite exterior y_e se expresan a través de las ecuaciones (2.33), (2.34), (2.35) y (2.36).

$$I_1 = \int_{y_s}^{y_e} \frac{\partial z_b}{\partial t} dy = \frac{\partial}{\partial t} \int_{y_s}^{y_e} z_b dy - z_{b_{y_e}} \frac{\partial y_e}{\partial t} + z_{b_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial t} \quad (2.33)$$

$$I_2 = \int_{y_s}^{y_e} \frac{\partial q_x}{\partial x} dy = \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_s}^{y_e} q_x dy - q_{x_{y_e}} \frac{\partial y_e}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} \quad (2.34)$$

$$I_3 = \int_{y_s}^{y_e} \frac{\partial q_y}{\partial y} dy = q_{y_{y_e}} - q_{y_{y_s}} \quad (2.35)$$

$$I_4 = q_{FS} = \int_{y_s}^{y_e} T_{FS} dy \quad (2.36)$$

Estas expresiones se simplifican al tener en cuenta que el límite y_s se ha fijado en el punto de la playa que intercepta el eje z de referencia. Consecuentemente, la cota del fondo en el límite y_s es nula, lo cual queda expresado en la ecuación (2.37).

$$z_{b_{y_s}} = 0 \quad (2.37)$$

Asimismo, se debe tener en consideración que el límite exterior y_e es invariable en el tiempo (ecuación 2.38) y que ambas componentes del transporte de sedimento en este límite son nulas (tanto la componente en x , como indica la ecuación 2.39, como la componente en y , como se representa en la ecuación 2.40).

$$\frac{\partial y_e}{\partial t} = 0 \quad (2.38)$$

$$q_{x_{y_e}} = 0 \quad (2.39)$$

$$q_{y_{y_e}} = 0 \quad (2.40)$$

Recuérdese que la ecuación de conservación de sedimento integrada en la coordenada vertical z , y posteriormente en la coordenada transversal y , se expresa mediante la expresión (2.41).

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 \quad (2.41)$$

Por consiguiente, una vez que se introduce en la ecuación (2.41), las expresiones (2.33), (2.34), (2.35) y (2.36), y se tiene en consideración las condiciones de contorno indicadas mediante las expresiones (2.37), (2.38), (2.39) y (2.40), todos los términos de la ecuación (2.29) integrados en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite exterior y_e aparecen recopilados en la ecuación (2.42).

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t} \int_{y_s}^{y_e} z_b dy + \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_s}^{y_e} q_x dy + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} - q_{y_{y_s}} = q_{FS}} \quad (2.42)$$

La ecuación (2.42) puede ser expresada de una forma alternativa si se hace uso del cambio de notación indicado en las ecuaciones (2.43) y (2.44).

En la ecuación (2.43) el término A_y representa el área transversal entre la cota del fondo y la cota del eje z de referencia, y entre el límite en la costa y_s y el límite exterior y_e . Dicho término aparece gráficamente representado en la figura 2.2.

$$A_y = \int_{y_s}^{y_e} z_b dy \quad (2.43)$$

En la ecuación (2.44) el término Q_x hace referencia al transporte longitudinal (en la dirección del eje x) de sedimento total en la dirección transversal, integrado entre el límite en la costa y_s y el límite exterior y_e .

$$Q_x = \int_{y_s}^{y_e} q_x dy \quad (2.44)$$

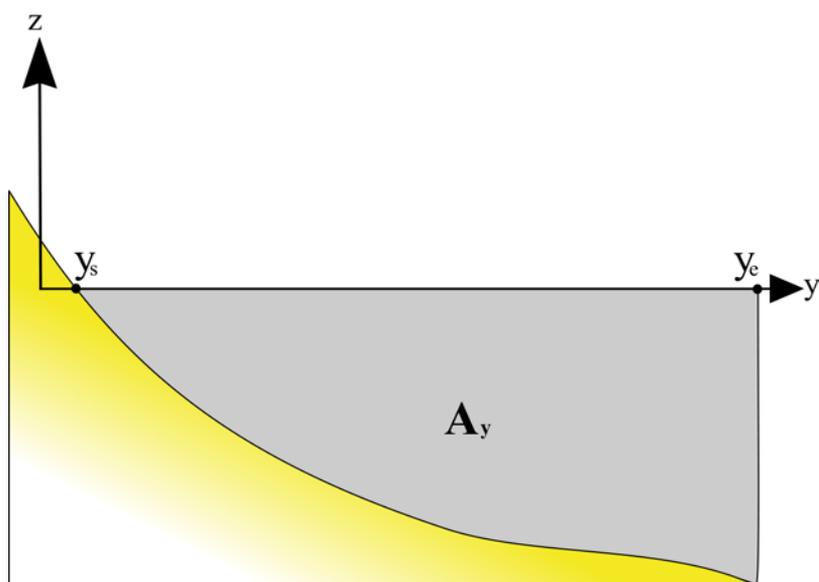


Figura 2.2- Representación del término A_y

La ecuación (2.42), una vez que se tienen en cuenta las expresiones (2.43) y (2.44), queda expresada mediante la ecuación (2.45).

$$\boxed{\frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} - q_{y_{y_s}} = q_{FS}} \quad (2.45)$$

Nótese que generalmente el término de las posibles fuentes y sumideros es nulo (véase ecuación 2.46), simplificándose aún más la ecuación (2.45).

$$q_{FS} = 0 \quad (2.46)$$

En el caso de que se cumpla la ecuación (2.46), la ecuación (2.45) se representa mediante la ecuación (2.47).

$$\boxed{\frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} - q_{y_{y_s}} = 0} \quad (2.47)$$

Así pues, la ecuación de conservación de la masa de sedimento integrada en la coordenada vertical z , y posteriormente en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite exterior y_e , se representa mediante la ecuación (2.45) o bien en el caso usual de ausencia de fuentes y sumideros mediante la ecuación (2.47).

Cabe señalar que los términos A_y y Q_x de la ecuación (2.47) poseen significado físico si los ejes cartesianos “ x , y ” coinciden con los ejes “*longitudinal*, *transversal*” del perfil de playa, perdiendo dicho significado a medida que los primeros difieren de los segundos. Por este motivo es recomendable trabajar con unas ecuaciones similares pero establecidas en unos ejes locales. En la figura 2.3 se

presenta un esquema de las coordenadas generales (x, y) en las que han sido derivadas las ecuaciones, frente a las coordenadas locales o curvilíneas (x_l, y_l) del perfil de playa (en la tangente y en la perpendicular a la línea de costa). Asimismo, aparece representada la posición de la línea de costa con respecto a los ejes generales (x_s, y_s) .

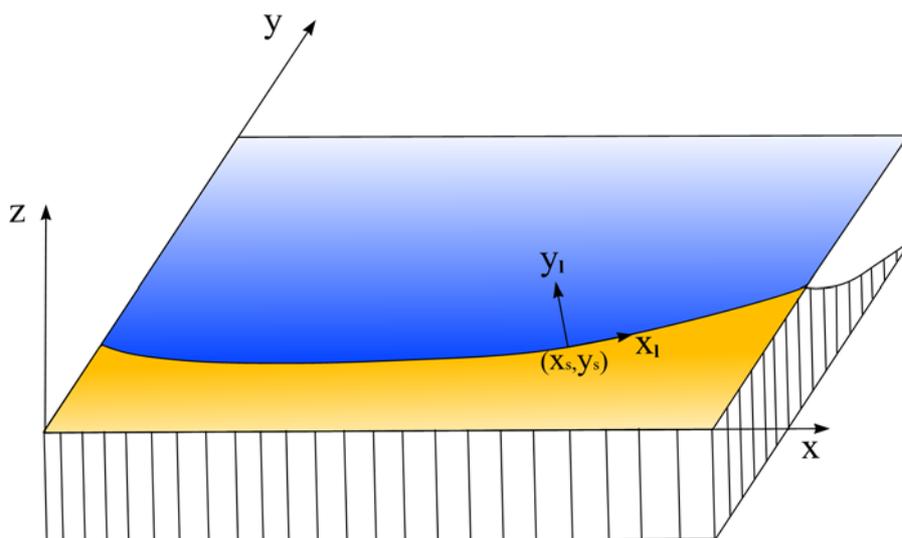


Figura 2.3- Ejes de referencia generales y locales

De acuerdo con O'Rourke y LeBlond (1972), si el radio de curvatura de la playa es grande en comparación con la anchura de la zona de rompientes, las ecuaciones (2.45) y (2.47) se expresan en ejes locales mediante las ecuaciones (2.48) y (2.49), respectivamente.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} - q_{y_l y_l s} = q_{FS} \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} - q_{y_l y_l s} = 0 \quad (2.49)$$

En las ecuaciones (2.48) y (2.49) el término A representa el área transversal del perfil de playa entre la cota del fondo y la cota del eje z de referencia, y entre el límite en la costa y el límite exterior del perfil de playa. Nótese la diferencia entre este término y el término A_y presente en las ecuaciones en ejes generales, pues este último representa el área transversal en la dirección del eje y , lo cual, en ocasiones, puede carecer de significado físico.

Téngase presente que en estas últimas ecuaciones la variación de la posición de la línea de costa y_{ls} se mide en la dirección del perfil de playa, relacionándose con la variación de la posición de la línea de costa (x_s, y_s) en ejes generales mediante la ecuación (2.50). En esta ecuación el ángulo θ indica el ángulo que forma el eje local x_l con respecto al eje general x , como se representa en la figura 2.4.

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t}, \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) = \frac{\partial y_{ls}}{\partial t} (-\sin \theta, \cos \theta) \quad (2.50)$$

El resto de los términos de las ecuaciones (2.48) y (2.49), a excepción del término de las posibles fuentes y sumideros (en el que se ha respetado la nomenclatura anterior), son equivalentes a los presentes en las ecuaciones en ejes generales, habiéndose añadido un subíndice que es indicativo de la dirección de estos transportes (en la dirección de los ejes locales).

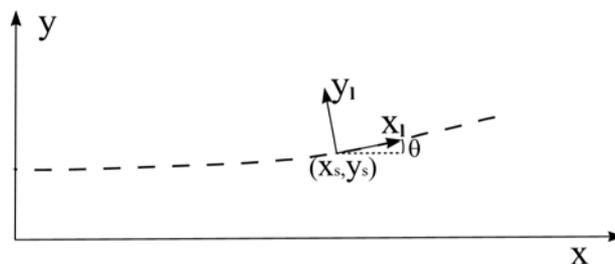


Figura 2.4- Representación del ángulo θ que relaciona el eje local x_l con el eje general x

Llegados a este punto, merece la pena comentar el significado de cada uno de los términos de la ecuación (2.49). Téngase presente, no obstante, que no es objetivo de la presente Tesis el proponer expresiones para determinar el transporte de sedimento que aparece indicado en estos términos; por lo que sólo se citarán las formulaciones más usuales sugeridas por otros autores. Con estas consideraciones se distinguen los siguientes términos:

- El primer término representa la variación temporal del área transversal del perfil de playa entre la cota del fondo y la cota del eje z de referencia, y entre el límite en la costa y el límite exterior del perfil de playa. Este término se obtiene de la ecuación (2.49), una vez conocidos los restantes términos de dicha ecuación. A partir de este término se determina la variación temporal de la posición de la línea de costa.

- El segundo término indica el gradiente longitudinal del transporte de sedimento en la misma dirección. Existen diversas expresiones para definir este término, destacándose entre las mismas la fórmula del CERC (Coastal Engineering Research Center), (véase SPM, 1977 y SPM, 1984), la versión modificada de esta última propuesta por Ozasa y Brampton (1980), que permite tener en cuenta el transporte de sedimento asociado al gradiente longitudinal de altura de ola en rotura, y la expresión propuesta por Kamphuis (1991), que incorpora la influencia del período del oleaje, del tamaño de grano del sedimento y de la pendiente del perfil en la zona de rotura (véase anejo I).

- El tercer término corresponde al transporte de sedimento en la línea de costa en la dirección del perfil de playa (y). Para calcular este término se pueden utilizar diferentes formulaciones existentes para la determinación del transporte de sedimento en la zona de ascenso-descenso (zona del swash), tales como la propuesta por Wise et al., (1996), la planteada por Leont'yev, (1996) o bien la indicada por Karambas et al. (2001), (este últimos autores utilizan la expresión propuesta por Sunamura, 1984, la cual a su vez fue empleada con este fin por Yamamoto et al., 1996).

2.4.2. INTEGRACIÓN CON EL SEGUNDO LÍMITE VARIABLE EN EL TIEMPO

En este apartado se va a realizar a la ecuación (2.29) una integración en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite de transporte longitudinal activo y_q . En el capítulo 4 se profundizará en la definición del límite de transporte longitudinal activo y se propondrá una expresión para su obtención.

Los términos de la ecuación (2.29) integrados en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite de transporte longitudinal activo y_q se expresan a través de las ecuaciones (2.51), (2.52), (2.53) y (2.54).

$$L_1 = \int_{y_s}^{y_q} \frac{\partial z_b}{\partial t} dy = \frac{\partial}{\partial t} \int_{y_s}^{y_q} z_b dy - z_{b_{y_q}} \frac{\partial y_q}{\partial t} + z_{b_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial t} \quad (2.51)$$

$$L_2 = \int_{y_s}^{y_q} \frac{\partial q_x}{\partial x} dy = \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_s}^{y_q} q_x dy - q_{x_{y_q}} \frac{\partial y_q}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} \quad (2.52)$$

$$L_3 = \int_{y_s}^{y_q} \frac{\partial q_y}{\partial y} dy = q_{y_{y_q}} - q_{y_{y_s}} \quad (2.53)$$

$$L_4 = q_{FS} = \int_{y_s}^{y_q} T_{FS} dy \quad (2.54)$$

Estas expresiones se simplifican al tener en cuenta que el límite y_s se ha fijado en el punto de la playa que intercepta el eje z de referencia. Consecuentemente, la cota del fondo en el límite y_s es nula, lo cual queda expresado en la ecuación (2.55).

$$z_{b_{y_s}} = 0 \quad (2.55)$$

Sin embargo, en este caso al ser el límite de transporte longitudinal activo y_q un límite variable en el tiempo, no se pueden hacer las simplificaciones del anterior apartado. La única condición de contorno en este límite es que el transporte longitudinal de sedimento es nulo, tal y como se indica en la ecuación (2.56).

$$q_{x_{y_q}} = 0 \quad (2.56)$$

Recuérdese que la ecuación de conservación de sedimento integrada en la coordenada vertical z , y posteriormente en la coordenada transversal y , se expresa mediante la ecuación (2.57).

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_4 \quad (2.57)$$

Por consiguiente, una vez que se introduce en la ecuación (2.57) las expresiones (2.51), (2.52), (2.53) y (2.54), y se tiene en consideración las condiciones de contorno indicadas mediante las expresiones (2.55) y (2.56), todos los términos de la ecuación (2.29) integrados en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite de transporte longitudinal activo y_q aparecen recopilados en la ecuación (2.58).

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t} \int_{y_s}^{y_q} z_b dy - z_{b_{y_q}} \frac{\partial y_q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_s}^{y_q} q_x dy + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} + q_{y_{y_q}} - q_{y_{y_s}} = q_{FS}} \quad (2.58)$$

La ecuación (2.58) puede ser expresada de una forma alternativa si se hace uso del cambio de notación indicado en las ecuaciones (2.59), (2.60), (2.61) y (2.62).

En la ecuación (2.59) el término A_y^q representa el área transversal entre la cota del fondo y la cota del eje z de referencia, y entre el límite en la costa y_s y el límite de transporte longitudinal activo y_q . Nótese que en este caso el término A_y^q representa una magnitud diferente con respecto al término A_y del anterior apartado, pues los límites de integración son diferentes.

$$A_y^q = \int_{y_s}^{y_q} z_b dy \quad (2.59)$$

En la ecuación (2.60) el término Q_x hace referencia al transporte longitudinal (en la dirección del eje x) de sedimento total en la dirección transversal, integrado entre el límite en la costa y_s y el límite de transporte longitudinal activo y_q . Aunque en este caso los límites de integración son diferentes a los del anterior apartado, como el límite y_q fue elegido precisamente en la zona de transporte longitudinal activo, el transporte longitudinal de sedimento integrado expresado mediante la ecuación (2.60) corresponde al transporte total, coincidiendo con el transporte de sedimento indicado en la ecuación (2.44) del anterior apartado.

$$Q_x = \int_{y_s}^{y_q} q_x dy \quad (2.60)$$

La ecuación (2.61) indica la relación existente entre los dos límites transversales de integración mediante la longitud l_y , que representa la zona en la que se concentra el transporte longitudinal de sedimento y que se denota como zona de transporte longitudinal activo.

$$y_q = y_s + l_y \quad (2.61)$$

En la ecuación (2.62) se introduce la notación de la profundidad de transporte longitudinal activo h_q , que representa la profundidad en el límite de transporte longitudinal activo. En el capítulo 4 se propondrá una expresión para obtener esta profundidad h_q .

$$z_{b_{y_q}} \Rightarrow -h_q \quad (2.62)$$

La ecuación (2.58), una vez que se tienen en cuenta las expresiones (2.59), (2.60), (2.61) y (2.62), queda expresada mediante la ecuación (2.63).

$$\boxed{\frac{\partial A_y^q}{\partial t} + h_q \frac{\partial y_s}{\partial t} + h_q \frac{\partial l_y}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} + q_{y_{y_q}} - q_{y_{y_s}} = q_{FS}} \quad (2.63)$$

Téngase en cuenta que generalmente el término de las posibles fuentes y sumideros es nulo (véase ecuación 2.64), simplificándose la ecuación (2.63).

$$q_{FS} = 0 \quad (2.64)$$

En el caso de que se cumpla la ecuación (2.64), la ecuación (2.63) se representa mediante la ecuación (2.65).

$$\boxed{\frac{\partial A_y^q}{\partial t} + h_q \frac{\partial y_s}{\partial t} + h_q \frac{\partial l_y}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} + q_{y_{y_q}} - q_{y_{y_s}} = 0} \quad (2.65)$$

Así pues, la ecuación de conservación de la masa de sedimento integrada en la coordenada vertical z , y posteriormente en la coordenada transversal y entre el límite en la costa y_s y el límite de transporte longitudinal activo y_q , se representa mediante la ecuación (2.63) o bien en el caso usual de ausencia de fuentes y sumideros mediante la ecuación (2.65).

Sin embargo, al igual que en el anterior apartado, cabe señalar que los términos A_y^q y Q_x de la ecuación (2.65) poseen significado físico si los ejes cartesianos “ x , y ” coinciden con los ejes “*longitudinal, transversal*” del perfil de playa, perdiendo dicho significado a medida que los primeros difieren de los segundos. Por este motivo es recomendable trabajar con unas ecuaciones similares pero establecidas en unos ejes locales. En la figura 2.3 del anterior apartado se puede consultar el esquema donde se representan los ejes de referencia generales (x , y) y los locales (x_l , y_l) del perfil de playa.

Siguiendo O’Rourke y LeBlond (1972), si el radio de curvatura de la playa es grande en comparación con la anchura de la zona de rompientes, las ecuaciones (2.63) y (2.65) se expresan en ejes locales mediante las ecuaciones (2.66) y (2.67), respectivamente.

$$\boxed{\frac{\partial A^q}{\partial t} + h_q \frac{\partial y_{l_s}}{\partial t} + h_q \frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} + q_{y_l y_{l_q}} - q_{y_l y_{l_s}} = q_{FS}} \quad (2.66)$$

$$\boxed{\frac{\partial A^q}{\partial t} + h_q \frac{\partial y_{l_s}}{\partial t} + h_q \frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} + q_{y_l y_{l_q}} - q_{y_l y_{l_s}} = 0} \quad (2.67)$$

En las ecuaciones (2.66) y (2.67) el término A^q representa el área transversal del perfil de playa entre la cota del fondo y la cota del eje z de referencia, y entre el límite en la costa y el límite de transporte longitudinal activo del perfil de playa.

Téngase presente que en estas últimas ecuaciones la variación de la posición de la línea de costa y_s se mide en la dirección del perfil de playa, relacionándose con la variación de la posición de la línea de costa (x_s, y_s) en ejes generales mediante la ecuación (2.50) indicada en el anterior apartado. Además, el término l presente en las mismas representa la longitud del perfil de playa en la que se concentra el transporte longitudinal de sedimento (zona de transporte longitudinal activo).

El resto de los términos de las ecuaciones (2.66) y (2.67), a excepción del término de la profundidad de transporte longitudinal activo y del término de las posibles fuentes y sumideros (en los cuales se ha respetado la nomenclatura anterior), son equivalentes a los presentes en las ecuaciones en ejes generales, habiéndose añadido un subíndice que es indicativo de la dirección de estos transportes (en la dirección de los ejes locales).

Llegados a este punto, merece la pena comentar el significado de cada uno de los términos de la ecuación (2.67). Téngase presente, no obstante, que no es objetivo de la presente Tesis el proponer expresiones para determinar el transporte de sedimento que aparece indicado en estos términos; por lo que sólo se citarán las formulaciones más usuales sugeridas por otros autores. Con estas consideraciones se distinguen los siguientes términos:

- El primer término representa la variación temporal del área transversal del perfil de playa entre la cota del fondo y la cota del eje z de referencia, y entre el límite en la costa y el límite de transporte longitudinal activo del perfil de playa. Este término se suele relacionar con la variación temporal de la posición de la línea de costa.
- El segundo término hace referencia a la variación temporal de la posición de la línea de costa en la dirección del perfil de playa y a la profundidad h_q . En el capítulo 4 se propondrá una expresión para obtener esta profundidad h_q .

- El tercer término hace referencia a la variación temporal de la longitud l del perfil de playa en la que se concentra el transporte longitudinal de sedimento y a la profundidad h_q . La longitud l se determina con base en un determinado perfil de playa y una profundidad límite h_q .
- El cuarto término indica el gradiente longitudinal del transporte de sedimento en la misma dirección. Este término coincide con el segundo término de la ecuación (2.49) del anterior apartado, siendo pues aplicables en este caso las mismas expresiones que las indicadas para establecer dicho término en el correspondiente apartado (véase anejo I).
- El quinto término corresponde al transporte de sedimento en el límite de transporte longitud activo en la dirección del perfil de playa (y_l). Para determinar este término se puede emplear, por ejemplo, la expresión propuesta por Bailard (1982).
- El sexto término corresponde al transporte de sedimento en la línea de costa en la dirección del perfil de playa (y_l). Este término coincide con el tercer término de la ecuación (2.49) del anterior apartado, siendo pues aplicable en este caso las mismas expresiones que las indicadas para establecer dicho término en el correspondiente apartado.

2.5. DISCUSIÓN DE LAS ECUACIONES DERIVADAS

En primer lugar, téngase presente que la discusión que se va a realizar en este apartado se refiere a las ecuaciones derivadas en el apartado 2.4.1. (véase ecuaciones 2.48 y 2.49) en el caso de que el segundo límite de integración de las mismas es fijo en el tiempo. Ahora bien, las consideraciones de este apartado son igualmente aplicables al caso de las ecuaciones derivadas en el apartado 2.4.2. en las que el segundo límite de integración de dichas ecuaciones es variable en el tiempo. Sin embargo, no se va a hacer mención directa a estas expresiones (ecuaciones 2.66 y 2.67) ya que el hecho de aparecer en las mismas un término adicional que hace referencia directa a las variaciones de la línea de costa no debe enmascarar la existencia del término de la variación temporal del área transversal; siendo necesario

para la determinación de este último término tener en cuenta todas las consideraciones que se van a realizar en el presente apartado.

Las ecuaciones generales de conservación del sedimento son ecuaciones, como su nombre indica, de conservación del sedimento, indicando si existe aumento o disminución de la cantidad del mismo en la zona de estudio (mediante el término de la variación temporal del área transversal). Nótese que estas ecuaciones no aportan información sobre la variación de la línea de costa, que es precisamente la magnitud que se pretende determinar. Por consiguiente, con el objetivo de obtener esta última magnitud, es imprescindible introducir una dependencia (externa a la ecuación de conservación del sedimento) entre la variación temporal del área transversal y la misma variación de la línea de costa.

Otra consecuencia que se deduce del estudio de las ecuaciones generales de conservación del sedimento es que, como estas ecuaciones sólo establecen las variaciones temporales del área transversal, aún en el supuesto de que se aportara la información de la dependencia entre estas variaciones y las variaciones de la línea de costa, jamás se podrían determinar las variaciones de la línea de costa en las que la variación temporal del área transversal fuera nula. Estas últimas variaciones son las que se suelen asociar a una redistribución del sedimento en el perfil por transporte transversal, erosionándose la parte emergida del perfil y acumulándose en la parte sumergida o viceversa. Téngase en cuenta que estas variaciones de la línea de costa son muy interesantes, siendo de considerable relevancia en el medio plazo. Un ejemplo de las mismas son las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano.

Con el objetivo de obtener tanto las variaciones de la línea de costa asociadas con variaciones temporales del área transversal, como las que no generan variaciones temporales de este área, se debe establecer un modelo de evolución del perfil de playa. Así pues, el modelo de evolución de medio-largo plazo que se va a desarrollar en el capítulo 5 debe incluir un modelo de este tipo y el condicionante externo de la variación temporal del área transversal obtenida con las ecuaciones generales de conservación del sedimento derivadas en este capítulo.

2.6. CONCLUSIONES

Los principales aportes de este capítulo son los siguientes:

❖ Se han derivado las ecuaciones generales de conservación del sedimento, sin introducir ningún tipo de hipótesis con respecto al perfil de playa. Estas ecuaciones son imprescindibles para el desarrollo del modelo de evolución de medio-largo plazo objeto de la Tesis, ya que las ecuaciones simplificadas que utilizan la mayoría de los modelos tradicionales de una línea no son adecuadas con este fin.

❖ Asimismo, se ha verificado que las ecuaciones generales de conservación del sedimento sólo indican la variación temporal del área transversal en la zona de estudio, pero no establecen la variación de la línea de costa. Además, aún en el supuesto de que se estableciera la dependencia entre la variación temporal del área transversal y la misma variación de la línea de costa, existen unas variaciones de esta última que no generan variaciones temporales del área transversal, sino que se encuentran relacionadas con una redistribución del sedimento en el perfil por transporte transversal.

❖ Se ha comprobado la necesidad del establecimiento de un modelo de evolución de perfil de playa con el objetivo de predecir tanto las variaciones de la línea de costa asociadas con variaciones temporales del área transversal, como las que se encuentran relacionadas con una redistribución del sedimento en el perfil, disponiéndose de esta forma de una herramienta de evolución de playas válida en el medio-largo plazo.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se van a describir los diferentes métodos de determinación de la variación de la línea de costa existentes en la actualidad, prestándose especial atención a los métodos que utilizan los modelos de evolución de playas en el largo plazo. Dentro de estos últimos se van a analizar los que utilizan los dos modelos siguientes:

- *Modelos tradicionales de una línea (como el modelo GENESIS)*. Este caso es un ejemplo de integración de las ecuaciones de conservación de sedimento en el que el límite en aguas profundas es variable en el tiempo (estas ecuaciones fueron derivadas en el capítulo anterior).

- *Modelo de una línea propuesto por Karambas (1999)*. Este caso es un ejemplo de integración de las ecuaciones de conservación de sedimento en el que el límite en aguas profundas es fijo en el tiempo (estas ecuaciones fueron derivadas en el capítulo anterior).

Finalmente, con el objetivo de eliminar las deficiencias detectadas en los anteriores modelos, se van a proponer dos métodos para el establecimiento de la variación de la línea de costa. El primero de ellos se desarrollará en el capítulo 4 y el segundo en el capítulo 5.

3.2. MÉTODOS PREVIOS DE DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

En este apartado se estudian los métodos existentes en la actualidad para la determinación de la variación de la línea de costa. Básicamente se pueden considerar dos formas extremas de obtener las variaciones de la línea de costa, distinguiéndose por una parte los modelos de evolución en planta en el largo plazo, y por otra los modelos de evolución de perfil en el corto-medio plazo. Las características esenciales de estos modelos son las siguientes:

□ *Modelos de evolución en planta en el largo plazo.* Los modelos de este tipo, como por ejemplo el modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989), sólo predicen las variaciones de la línea de costa asociadas a variaciones del área transversal. Con el fin de obtener la dependencia entre variación temporal del área transversal y la misma variación de la línea de costa, estos modelos asumen que el perfil de playa sólo posee un tramo (tramo de rotura), que la forma de este tramo es constante (en el tiempo y en el espacio) y que la profundidad límite hasta la que se define el perfil de playa es también constante (en el tiempo y en el espacio).

Consecuentemente, estos modelos no pueden predecir las variaciones de la línea de costa de medio plazo, como son, entre otras, las variaciones estacionales de la misma de invierno-verano. Así pues, sólo se pueden utilizar en escalas de tiempo en las que estas variaciones se cancelan (escalas de largo plazo). Básicamente este tipo de modelos reproduce las variaciones de la línea de costa asociadas con el gradiente longitudinal del mismo transporte de sedimento.

□ *Modelos de evolución de perfil en el corto-medio plazo.* Estos modelos, opuestamente a los anteriores, sólo predicen los cambios de la línea de costa no asociados a cambios del área transversal. Los modelos de evolución de perfil simulan la evolución del perfil de playa causada principalmente por transporte transversal de sedimento (como por ejemplo el modelo SBEACH propuesto por Larson y Kraus, 1989b). Sólo son aplicables en escalas de tiempo muy pequeñas (horas, pocos días). Otra característica relevante de estos modelos es que no consideran el transporte longitudinal de sedimento.

3.3. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA CON LOS MODELOS TRADICIONALES DE UNA LÍNEA

Como los modelos tradicionales de una línea han sido muy utilizados hasta la fecha como herramienta de evolución en el largo plazo, este apartado se dedica a la derivación de las ecuaciones simplificadas que utilizan este tipo de modelos.

La mayoría de los modelos tradicionales de una línea, como por ejemplo el modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989), resuelven una versión simplificada de las ecuaciones generales derivadas en el anterior capítulo. Teniendo en consideración las características de este tipo de modelos que fueron indicadas en el anterior apartado, estos modelos, ya de partida, cuentan con limitaciones de considerable relevancia, no pudiéndose reproducir los cambios de la línea de costa de medio plazo, entre los que se encuentran, por ejemplo, las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano. Por lo tanto, su rango de aplicación se limita al largo plazo.

3.3.1. ECUACIÓN BASE EN EL CASO DE PERFIL DE FORMA Y PROFUNDIDAD LÍMITE CONSTANTES

Con el objetivo de obtener las ecuaciones que utilizan los modelos tradicionales de una línea, se van a derivar las ecuaciones de conservación del sedimento en el caso de perfil de playa de forma y profundidad límite hasta la que se define el perfil constantes. Con este fin, se parte de la ecuación (2.65) en ejes generales establecida en el capítulo 2, la cual se obtuvo al integrar la ecuación de conservación del sedimento en vertical y transversalmente desde el límite en la costa y_s hasta el límite variable en el tiempo y_q (límite de transporte longitudinal activo) y en el caso de ausencia de fuentes y sumideros. Téngase presente que aunque en realidad se debiera partir de la ecuación (2.67) determinada en ejes locales, como los modelos analizados asumen que la variación longitudinal (en la coordenada x) de la posición de la línea de costa es pequeña, hacer referencia a ejes generales o a ejes locales es similar.

En la ecuación (2.68) se presenta otra versión de la ecuación (2.65), en la que se ha utilizado la expresión (2.61) para relacionar ambos límites de integración transversal mediante la longitud l_y .

$$\frac{\partial A_y^q}{\partial t} + h_q \frac{\partial y_q}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} + q_{y_{y_q}} - q_{y_{y_s}} = 0 \quad (2.68)$$

Una de las hipótesis simplificadoras fundamentales en la que se basan los modelos tradicionales de una línea, consiste en asumir que la forma del perfil de playa, así como la profundidad h_q asociada al límite de transporte longitudinal activo, son invariables en el tiempo (también en el espacio). Con estas consideraciones, el término de la variación temporal del área transversal se puede representar mediante la ecuación (2.69).

$$\frac{\partial A_y^q}{\partial t} = h_q \left(\frac{\partial y_s}{\partial t} - \frac{\partial y_q}{\partial t} \right) = h_q \frac{\partial y_s}{\partial t} - h_q \frac{\partial y_q}{\partial t} \quad (2.69)$$

Al introducir la expresión (2.69) en la ecuación (2.68) se obtiene la expresión (2.70), la cual es una versión simplificada de la ecuación general (2.65) para el caso de perfil de playa de forma y profundidad límite hasta la que se define el perfil constantes.

$$\boxed{h_q \frac{\partial y_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} + q_{y_{y_q}} - q_{y_{y_s}} = 0} \quad (2.70)$$

3.3.2. ECUACIÓN SIMPLIFICADA DEL MODELO GENESIS

Otra de las simplificaciones consideradas por los modelos tradicionales de una línea, como el modelo GENESIS, consiste en establecer que en el límite en la costa y_s el producto de la componente en el eje x del transporte de sedimento en este límite por la derivada de dicho límite con respecto al eje x es nulo, como queda expresado en la ecuación (2.71) y como ya se indicó previamente.

$$q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} = 0 \quad (2.71)$$

Por consiguiente, la ecuación (2.70) se simplifica aún más, obteniéndose la expresión (2.72).

$$\boxed{h_q \frac{\partial y_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{y_{y_q}} - q_{y_{y_s}} = 0} \quad (2.72)$$

Con la idea de presentar la ecuación (2.72) con una simbología similar a la utilizada por el modelo GENESIS, se tienen en consideración las expresiones (2.73), (2.74) y (2.75). Estas expresiones simplemente representan un cambio de notación.

$$y_s \Rightarrow y \quad (2.73)$$

$$Q_x \Rightarrow Q \quad (2.74)$$

$$q_{y_{y_s}} - q_{y_{y_q}} \Rightarrow q \quad (2.75)$$

Asimismo, se debe tener en cuenta que en el modelo GENESIS se calcula el término h_q en función de la elevación de la berma D_B y de la profundidad de cierre D_C como se indica en la ecuación (2.76).

$$h_q = D_B + D_C \quad (2.76)$$

Al introducir en la ecuación (2.72) las expresiones (2.73), (2.74), (2.75) y (2.76) se obtiene la ecuación (2.77).

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{I}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \tag{2.77}$$

La ecuación (2.77) es la ecuación típica de los modelos tradicionales de una línea. En la figura 2.5 aparecen representados estos términos.

El término q de la expresión (2.77) se calcula en el modelo GENESIS mediante la ecuación (2.78). En dicha ecuación q_s es la componente en el eje y del transporte de sedimento en la costa y q_0 es la misma componente del transporte de sedimento en el límite de transporte longitudinal activo.

$$q = q_s + q_0 \tag{2.78}$$

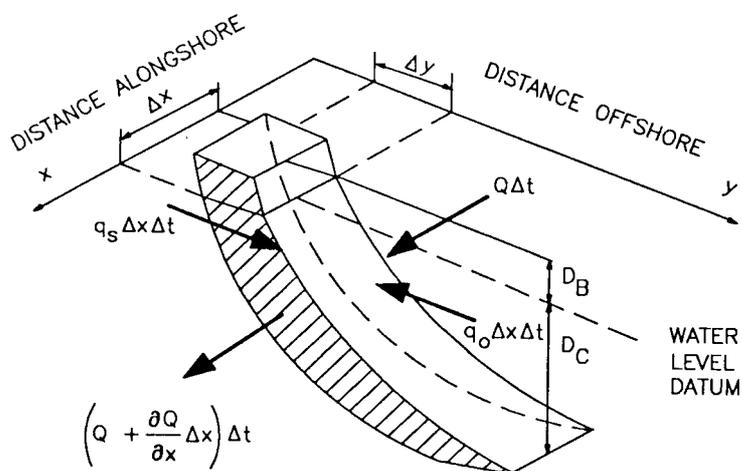


Figura 2.5- Términos de la ecuación simplificada del modelo GENESIS (tomada de Hanson y Kraus, 1989)

3.4. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA CON EL MODELO DE UNA LÍNEA PROPUESTO POR KARAMBAS (1999)

En este apartado se va a describir el método simplificado para determinar la posición de la línea de costa propuesto por Karambas (1999). Dicho método parte de la ecuación de conservación de sedimento derivada en el caso en el que el límite en aguas profundas es fijo en el tiempo.

3.4.1. DERIVACIÓN DE LAS ECUACIONES

Karambas (1999) analizó las ecuaciones de conservación del sedimento realizando una integración transversal hasta un límite muy alejado exterior y fijo en el tiempo. Este autor no utilizó un modelo de evolución de perfil, sino que trabajó con la ecuación (2.47) en ejes generales establecida en el capítulo 2, la cual se obtuvo al integrar la ecuación de conservación del sedimento en vertical y transversalmente desde el límite en la costa y_s hasta el límite exterior fijo en el tiempo y_e y en el caso de ausencia de fuentes y sumideros. La ecuación (2.47) se escribe de nuevo en la expresión (2.79).

$$\frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} - q_{y_{y_s}} = 0 \quad (2.79)$$

El interés de Karambas (1999) se centró en establecer una dependencia simple entre la variación temporal del área transversal indicada en la ecuación (2.79) y la misma variación de la línea de costa. Sin embargo, el método que propuso para la determinación de la variación de la línea de costa en función de la variación temporal del área transversal no es muy acertado, como se podrá comprobar a continuación.

Téngase en cuenta que el sistema de referencia utilizado por Karambas (1999) no coincide con el empleado en la presente Tesis (eje y con origen en el límite exterior y_e y definido positivo hacia la costa, eje z definido positivo hacia abajo); por lo que, para ser consecuente con la notación empleada en esta Tesis, se ha cambiado la notación de las expresiones propuestas por el mencionado investigador.

Karambas (1999) calcula, en primer lugar, una profundidad media \bar{d} definida mediante la ecuación (2.80).

$$\bar{d} = -\frac{I}{(y_e - y_s)} \int_{y_s}^{y_e} z_b dy = -\frac{A_y}{(y_e - y_s)} \quad (2.80)$$

Teniendo en consideración la ecuación (2.80), el término del área transversal se obtiene con la ecuación (2.81).

$$A_y = -\bar{d}(y_e - y_s) \quad (2.81)$$

Por lo tanto, el término de la variación temporal del área transversal se determina con la ecuación (2.82).

$$\frac{\partial A_y}{\partial t} = \frac{\partial(-\bar{d}(y_e - y_s))}{\partial t} = -\bar{d} \left(\frac{\partial y_e}{\partial t} - \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) - (y_e - y_s) \frac{\partial \bar{d}}{\partial t} \quad (2.82)$$

La ecuación (2.82) se puede simplificar, pues el límite exterior es fijo en el tiempo, obteniéndose la ecuación (2.83).

$$\frac{\partial A_y}{\partial t} = \frac{\partial(-\bar{d}(y_e - y_s))}{\partial t} = \bar{d} \frac{\partial y_s}{\partial t} - (y_e - y_s) \frac{\partial \bar{d}}{\partial t} \quad (2.83)$$

Con el objetivo de establecer una expresión simple y directa para la determinación de la variación de la línea de costa, Karambas (1999) realiza la hipótesis de que las variaciones temporales de la profundidad media son despreciables en comparación con las correspondientes variaciones de la línea de costa. Esta hipótesis se indica en la expresión (2.84).

$$\frac{\partial \bar{d}}{\partial t} \ll \frac{\partial y_s}{\partial t} \quad (2.84)$$

Este investigador traduce la hipótesis indicada en la expresión (2.84) en despreciar el segundo término de la ecuación (2.83) frente al primero. Sin embargo, esto no es rigurosamente cierto y se comentará a continuación. Con estas consideraciones, la ecuación (2.83) se transforma en la expresión (2.85), la cual es la expresión que utiliza Karambas (1999) para la determinación de la variación temporal del área transversal.

$$\frac{\partial A_y}{\partial t} = \bar{d} \frac{\partial y_s}{\partial t} \quad (2.85)$$

Al introducir la expresión (2.85) dentro de la ecuación (2.79) se obtiene la variación de la línea de costa, como se indica en la ecuación (2.86).

$$\boxed{\bar{d} \frac{\partial y_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q_{x_{y_s}} \frac{\partial y_s}{\partial x} - q_{y_{y_s}} = 0} \quad (2.86)$$

3.4.2. DEFICIENCIAS

La propuesta de Karambas (1999) posee una serie de deficiencias, que se van a comentar a continuación:

En primer lugar, es esperable que el término de las variaciones temporales del área transversal no esté acotado, es decir, en función de los condicionantes externos, este término puede ser nulo (sólo transporte transversal de sedimento) o incluso pudiera ser elevado (casos de considerable gradiente de transporte longitudinal de sedimento). Así pues, teniendo en cuenta la definición del término de la profundidad media (véase ecuación 2.80), así como las anteriores consideraciones especificadas para el término de la variación temporal del área transversal, la hipótesis que utiliza Karambas (1999) de que las variaciones temporales del término de profundidad media son pequeñas, sólo puede ser cierta en el caso de que el denominador de la expresión (2.80) sea grande ($y_e - y_s$) o bien en el caso de que el incremento de tiempo entre dos instantes sucesivos de la evolución sea pequeño.

Con respecto a esta última opción (que pretende obtener variaciones temporales del área transversal pequeñas), al requerir que los incrementos de tiempo sean pequeños, invalida el modelo con el objetivo de ser aplicable en el largo plazo.

En cuanto a la primera opción (denominador de la expresión 2.80 grande), la hipótesis de Karambas (1999) indicada en la expresión (2.84) no implica que el segundo término de la ecuación (2.83) sea nulo (pues es un producto de dos términos), lo cual ya se adelantó justo después de presentar la hipótesis en cuestión.

Nótese que mediante la propuesta de Karambas (1999) los resultados obtenidos de la variación de la línea de costa son totalmente dependientes de la profundidad media elegida. El anterior autor utilizó una profundidad media de 1 metro cuando intentó simular la evolución de la línea de costa en Angelochori (Macedonia, Grecia). Posteriormente Karambas et al. (2001) aplicaron el método del primero a la playa de La Malagueta (Málaga), utilizando un valor de la profundidad media igual al doble de la profundidad de rotura.

Finalmente, se puede concluir que el método propuesto por Karambas (1999) para la determinación de la variación temporal del área transversal no es adecuado con el objetivo de desarrollar un modelo de evolución de medio-largo plazo. Al final, su método sigue un esquema similar a los modelos tradicionales de una línea (como el modelo GENESIS), trasladando el perfil de playa, con la única diferencia en que ahora la profundidad hasta la que se traslada el perfil de playa es la profundidad media. Así pues, es imprescindible desarrollar una herramienta que incorpore la variabilidad experimentada por el perfil de playa (modelo de evolución de perfil).

3.5. MÉTODOS PROPUESTOS DE DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Entre las dos posibilidades extremas de determinación de la variación de la línea de costa utilizadas por los modelos existentes en la actualidad y que fueron descritas en el apartado 3.2., existe un abanico de métodos posibles. En la Tesis se proponen dos métodos: el primero de ellos consiste en una mejora de los modelos tradicionales de una línea y el segundo es el modelo de evolución de medio-largo plazo que se propone. Las características esenciales de estos métodos son las siguientes:

□ *Modelo de evolución con perfil de forma constante y profundidad límite variable.* Este modelo consiste en una mejora de los modelos tradicionales de una línea, por lo que sólo se van a predecir los cambios de la línea de costa asociados a cambios del área transversal. Al igual que en el modelo GENESIS, con el fin de obtener la dependencia entre la variación temporal del área transversal y la misma variación de la línea de costa, se asume que el perfil de playa sólo posee un tramo (tramo de rotura) y que la forma de este tramo es constante. Sin embargo, la mejora que se incorpora con este método consiste en que el perfil se extiende hasta una profundidad límite variable, no sólo en el tiempo, sino también en el espacio, en función de las características locales del oleaje.

Por consiguiente, este método no es la herramienta adecuada en el medio-largo plazo y su utilidad radica en ser el sustituto de los modelos de largo plazo (de

una línea) para situaciones en las que las características del oleaje presentan gran variabilidad. En el capítulo 4 se desarrolla dicho método.

□ *Modelo de evolución de medio-largo plazo.* Este modelo es la herramienta propuesta para el medio-largo plazo, reproduciéndose tanto las variaciones de la línea de costa asociadas a variaciones temporales del área transversal, como las que no están relacionadas con estas variaciones, sino con una redistribución del sedimento en el perfil por transporte transversal. En el capítulo 5 se desarrolla este método.

3.6. CONCLUSIONES

Los principales aportes de este capítulo son los siguientes:

❖ Se han analizado los diferentes métodos de determinación de la variación de la línea de costa existentes en la actualidad, prestándose especial atención a los que utilizan los modelos de evolución de largo plazo. Se han derivado las ecuaciones que utilizan este tipo de modelos, detectándose una serie de deficiencias, cuya implicación principal es la limitación del rango de aplicación de este tipo de modelos al largo plazo.

❖ Finalmente, con el objetivo principal de extender el rango de aplicación de los modelos de evolución de largo plazo, se han propuesto dos modelos para el establecimiento de la variación de la línea de costa que serán desarrollados en los dos capítulos siguientes.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DEL MODELO DE EVOLUCIÓN CON PERFIL DE FORMA CONSTANTE Y PROFUNDIDAD LÍMITE VARIABLE

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a desarrollar el primero de los dos modelos de evolución propuestos en el capítulo 3 y que corresponde al modelo de evolución con perfil de forma constante y profundidad límite variable.

Con el presente modelo sólo se van a predecir los cambios de la línea de costa asociados a variaciones temporales del área transversal. Con el fin de obtener la dependencia entre la variación temporal del área transversal y la misma variación de la línea de costa, se asume que el perfil de playa sólo posee un tramo (tramo de rotura) y que la forma de este tramo es constante. Sin embargo, la mejora que se incorpora con este modelo es que la profundidad límite hasta la que se extiende el perfil de playa es variable, no sólo en el tiempo, sino también en el espacio.

Aunque este método constituye una mejora con respecto a los modelos tradicionales de una línea, no es la herramienta adecuada en el medio-largo plazo, pues no sólo se está manteniendo la forma del tramo de rotura del perfil constante, sino que no se está considerando el perfil de playa completo. Es precisamente este último aspecto, como se podrá comprobar en el siguiente capítulo, el que permite equilibrar la cantidad de sedimento y predecir acertadamente la posición de la línea de costa.

Así pues, la utilidad del presente modelo se limita a ser el sustituto de los modelos de largo plazo (de una línea) en situaciones en las que las características del oleaje presentan gran variabilidad.

En la primera parte de este capítulo se van a derivar las ecuaciones constituyentes del método que se propone, para lo cual se parte de las ecuaciones generales de conservación de sedimento derivadas en el capítulo 2. En la segunda parte se va a estudiar la zonificación del perfil de playa, proponiéndose una expresión para la definición del límite de transporte longitudinal activo presente en dichas ecuaciones.

4.2. ECUACIÓN BASE EN EL CASO DE PERFIL DE FORMA CONSTANTE Y PROFUNDIDAD LÍMITE VARIABLE

Con el fin de obtener la ecuación base del método presente, se parte de la ecuación (2.67) derivada en el capítulo 2 y que se obtuvo al integrar las ecuaciones en ejes locales en vertical y transversalmente desde el límite en la costa hasta el límite de transporte longitudinal activo variable en el tiempo y en el caso de ausencia de fuentes y sumideros.

En la ecuación (2.88) se presenta otra versión de la ecuación (2.67), en la que se ha utilizado la expresión (2.87) para relacionar ambos límites de integración transversal mediante la magnitud l , tal y como se indica en la figura 2.6.

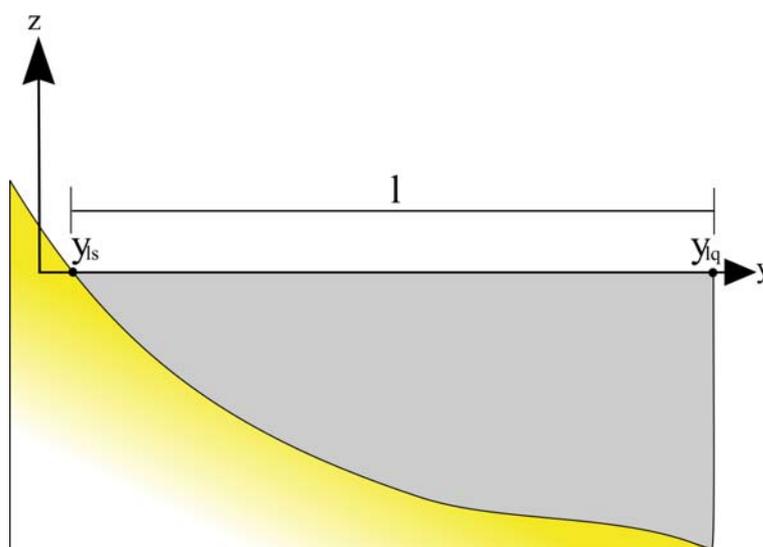


Figura 2.6- Relación entre los límites de integración transversal

Téngase presente que en ambas ecuaciones, con el objetivo de diferenciar los límites de integración transversal en ejes locales frente a los ejes generales, se ha cambiado la notación de ambos límites (y_{ls} representa la posición de la línea de costa en ejes locales, y_{lq} indica el límite de transporte longitudinal activo en ejes locales). En la figura 2.6 se presenta el esquema indicado.

$$y_{lq} = y_{ls} + l \quad (2.87)$$

$$\frac{\partial A^q}{\partial t} + h_q \frac{\partial y_{lq}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} + q_{y_{lq}} - q_{y_{l_{ys}}} = 0 \quad (2.88)$$

Como el perfil de playa se ha definido hasta un límite variable, para obtener la variación temporal del área transversal del perfil, se puede elegir una de las dos posibilidades siguientes:

1. *Método aproximado.* Este método simplificado consiste en determinar la variación temporal del área transversal sin necesidad de utilizar una expresión para definir la forma del perfil de playa. Tal y como se observa en la figura 2.7, la variación temporal del área transversal del perfil queda identificada en la zona sombreada de dicha figura.

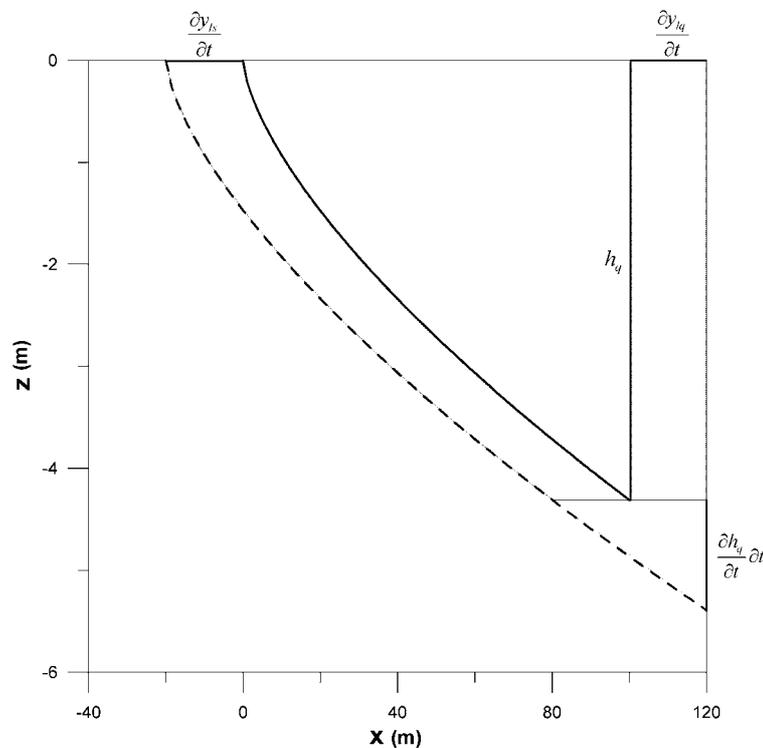


Figura 2.7- Variación del área transversal

Teniendo en consideración el esquema de la figura 2.7, la variación del área transversal se determina de una forma aproximada como se indica en la expresión (2.89). La primera parte de la expresión (2.89) corresponde al área de toda la zona sombreada a excepción de la zona casi triangular inferior; pero la segunda, que indica precisamente esta zona casi triangular, se calcula aproximadamente al asimilarse a un triángulo.

$$\frac{\partial A^q}{\partial t} \approx h_q \left(\frac{\partial y_{ls}}{\partial t} - \frac{\partial y_{lq}}{\partial t} \right) + \left(\frac{l}{2} \frac{\partial h_q}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial y_{ls}}{\partial t} - \frac{\partial y_{lq}}{\partial t} \right) \quad (2.89)$$

Al introducir la expresión (2.89) en la ecuación (2.88), y teniendo en consideración la expresión (2.87) para relacionar los dos límites de integración transversal de las ecuaciones mediante la magnitud l , se obtiene la ecuación (2.90).

$$h_q \frac{\partial y_{ls}}{\partial t} - \left(\frac{l}{2} \frac{\partial h_q}{\partial t} \right) \frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} + q_{y_{l,y_lq}} - q_{y_{l,y_{ls}}} = 0 \quad (2.90)$$

Llegados a este punto, merece la pena resaltar el hecho de que la ecuación obtenida para determinar la variación de la línea de costa en el caso de forma y profundidad límite del perfil constante es independiente de la forma del perfil (véase ecuación 2.70 del capítulo 3). Sin embargo, en este caso para poder determinar el término de la variación temporal de la longitud l , no queda más remedio que asumir una determinada forma del perfil de playa (recuérdese que l representa la distancia entre el límite en la línea de costa y_{ls} y el límite de transporte longitudinal activo y_{lq} , definido por la profundidad h_q). Para la definición de la forma del perfil de playa se puede utilizar una expresión de tipo potencial con exponente m y parámetro de forma A_m , o bien la clásica expresión de Dean con exponente $2/3$.

2. *Método exacto.* Este método consiste en determinar la variación temporal del área transversal teniendo en cuenta una expresión para definir la forma del perfil de playa. En el caso de que se utilice una expresión de tipo potencial con exponente m y parámetro de forma A_m para definir esta forma, la variación temporal del área transversal se puede determinar exactamente mediante las expresiones (2.91) o (2.92), en función de si la variación temporal de la profundidad h_q es positiva o negativa.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_q}{\partial t} > 0 \Rightarrow \frac{\partial A^q}{\partial t} = \frac{3}{5A_m^{\frac{5}{3m}-1}} \left(\left(h_q + \frac{\partial h_q}{\partial t} \partial t \right)^{\frac{5}{3m}} - (h_q)^{\frac{5}{3m}} \right) \\ - \frac{h_q}{A_m^{\frac{1}{m}}} \left(\left(h_q + \frac{\partial h_q}{\partial t} \partial t \right)^{\frac{1}{m}} - (h_q)^{\frac{1}{m}} \right) \end{aligned} \quad (2.91)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_q}{\partial t} < 0 \Rightarrow \frac{\partial A^q}{\partial t} = - \frac{3}{5A_m^{\frac{5}{3m}-1}} \left(\left(h_q + \frac{\partial h_q}{\partial t} \partial t \right)^{\frac{5}{3m}} - (h_q)^{\frac{5}{3m}} \right) \\ + \frac{\left(h_q + \frac{\partial h_q}{\partial t} \partial t \right)}{A_m^{\frac{1}{m}}} \left(\left(h_q + \frac{\partial h_q}{\partial t} \partial t \right)^{\frac{1}{m}} - (h_q)^{\frac{1}{m}} \right) \end{aligned} \quad (2.92)$$

Finalmente, con este método la variación de la línea de costa se determinará introduciendo o bien la expresión (2.91) o bien la expresión (2.92) dentro de la ecuación (2.88).

Como la particularidad de este método es que la profundidad h_q asociada al límite de transporte longitudinal activo no se considera constante (variable en el tiempo y en el espacio), sino que es función de las características locales del oleaje, se va a profundizar en la definición de este límite.

4.3. ESTUDIO DEL LÍMITE DE TRANSPORTE LONGITUDINAL ACTIVO

En este apartado se va a analizar la definición del límite de transporte longitudinal activo, así como la determinación de la profundidad h_q asociada a este límite. Este límite, como ya se comentó en el capítulo 2, aunque matemáticamente es arbitrario, es decir, se puede establecer a cualquier distancia en el perfil de playa, se debe elegir en función de algún criterio físico, pues la elección de este límite condiciona el cálculo de los diferentes términos de las ecuaciones generales. Con la intención de recoger el principal transporte de sedimento generador de las variaciones de la línea de costa en el caso de asumir perfil de playa con forma constante, este límite delimita la zona de transporte longitudinal activo.

El límite de transporte longitudinal activo se obtiene con base en un determinado perfil de playa y una profundidad límite h_q . En cuanto al perfil de playa, se puede hacer uso de las muchas formulaciones existentes en la literatura aplicables a zonas donde los efectos de la refracción-difracción no son importantes, o bien se puede utilizar la formulación de perfil que se propone en la sección 4 de la presente Tesis, que ha sido especialmente desarrollada para zonas donde los efectos de la refracción-difracción son relevantes. Con respecto a la profundidad límite, existen diferentes criterios para su determinación, centrándose el presente apartado en su estudio.

En una fase previa a la propuesta de una expresión para la determinación de la profundidad h_q , se va a realizar un breve repaso de las diferentes formulaciones para zonificar el perfil de playa.

4.3.1. ZONIFICACIÓN DEL PERFIL DE PLAYA

Hallermeier (1981) propuso una zonificación del perfil de playa en función de la variabilidad de éste y del tipo de transporte dominante. A continuación se describe la delimitación propuesta por el anterior investigador, empleando exactamente las definiciones utilizadas por éste.

- *Zona litoral*. Durante un año típico, el transporte longitudinal de sedimento significativo y el transporte transversal de sedimento intenso asociados al oleaje quedan restringidos a zonas con profundidad menor que la profundidad d_l . La zona litoral queda precisamente delimitada por esta profundidad. Hallermeier (1981) menciona que la profundidad d_l es un límite de profundidad máxima para la erosión y transporte de sedimento hacia aguas profundas para condiciones de oleaje anuales extremas, correspondiendo al límite de cambio apreciable estacional del perfil de playa. Es la zona de cambios intensos del fondo causados por oleaje extremal casi rompiendo y sus corrientes asociadas.

- *Zona de asomeramiento*. Durante un año típico, el transporte transversal de sedimento significativo asociado al oleaje queda restringido a zonas con profundidad menor que la profundidad d_l . La zona de asomeramiento queda definida entre la profundidad d_l y la profundidad d_i . La profundidad d_i es un límite de profundidad de agua máxima para movimiento incipiente de sedimento (arena) en fondo plano para las condiciones de oleaje medias.

- *Zona exterior*. Se denomina a la zona con profundidades mayores que la profundidad d_i .

El límite entre la zona exterior y la de asomeramiento venía definido por Hallermeier (1981) mediante la ecuación (2.93).

$$d_i \approx (H_s - 0.3\sigma) T_{sm} \left(\frac{g}{5000D_{50}^*} \right)^{0.5} \quad (2.93)$$

con: H_s , la altura de ola significativa local media anual; T_{sm} , el período del oleaje significativo medio anual; σ , la desviación estándar de la altura de ola significativa y D_{50}^* , el diámetro medio del material situado a una cota de $1.5 d_l$. Sin embargo, el propio Hallermeier asume que el movimiento de material a dicha profundidad es incipiente, y por lo tanto, las variaciones del perfil son mínimas.

El límite entre la zona de asomeramiento y la zona litoral, denotado como d_l , es lo que denomina profundidad de cierre del perfil h_c . Hallermeier (1981) aproximó este parámetro mediante la ecuación (2.94).

$$h_c = d_l = 2H_s + 11\sigma \quad (2.94)$$

Teniendo en consideración la descripción previa de las diferentes zonas del perfil, a efectos prácticos la formulación de Hallermeier (1981) que se suele emplear para definir la profundidad de cierre se basa en la ecuación (2.95).

$$h_c = 2.28H_{s12} - 68.5 \frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \quad (2.95)$$

con: H_{s12} , la altura de ola significativa local que es excedida 12 horas al año y T_s , el período significativo asociado a la H_{s12} .

Asimismo, Birkemeier (1985), utilizando numerosos datos de campo de perfiles de playa, planteó la ecuación (2.96) para definir la profundidad de cierre.

$$h_c = 1.75H_{s12} - 57.9 \frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \quad (2.96)$$

La expresión (2.96) puede ser aproximada si se tienen en cuenta las relaciones entre el período y la altura de ola significativa propuestas en el código ROM 03-91 (Oleaje. Anejo I: Clima Marítimo en el Litoral Español, véase MOPT, 1992), aplicándose a la H_{s12} como se indica en la expresión (2.97).

$$T_s \approx 5.7 \sqrt{H_{s12}} \quad (2.97)$$

Introduciendo la expresión (2.97) en la ecuación (2.96) se obtiene la expresión (2.98).

$$h_c \approx 1.57 H_{s12} \quad (2.98)$$

La expresión (2.98) también fue obtenida por Birkemeier (1985) sin necesidad de proponer una relación entre altura de ola y período, sino que fue establecida con los datos de campo de perfiles de playa comentados previamente y que sirvieron como base para la determinación de la ecuación (2.96).

Admitiendo que el índice de rotura en oleaje irregular es aproximadamente $H_{sb}=0.55h_b$ ($h_b=1.8H_{sb}$), la profundidad de cierre definida por Birkemeier (1985) puede interpretarse como la zona de rotura correspondiente a un temporal que sólo es excedido doce horas al año. En el litoral español H_{s12} coincide sensiblemente con el temporal de período de retorno de un año.

Sin embargo, no se debe olvidar que la profundidad de cierre es una variable estadística asociada a la escala temporal que se desea estudiar. Así por ejemplo, para el estudio del corto a medio plazo (semanas a meses), se han propuesto otras expresiones para la determinación de dicha profundidad. Capobianco et al. (1997) propusieron una expresión de tipo potencial, la cual se indica en la ecuación (2.99). En dicha expresión k_C representa una constante. En el caso de definir la profundidad analizada por variaciones de la batimetría de diez centímetros, k_C adoptó un valor de 2.8.

$$h_c = k_C H_{s12}^{0.67} \quad (2.99)$$

Nicholls et al. (1998) aplicaron la expresión (2.99) al caso de la playa de Duck y comprobaron su validez en el caso analizado. Ahora bien, es necesario determinar el valor óptimo de k_C para otros casos de aplicación. Nótese que la ecuación (2.99) predice valores más elevados de la profundidad de cierre con respecto a las expresiones propuestas por Hallermeier (1981), (véase ecuación 2.95) y Birkemeier (1985), (véase ecuación 2.98).

4.3.2. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE TRANSPORTE LONGITUDINAL ACTIVO

Una vez realizado el análisis del anterior apartado, se va a proponer una expresión para definir la profundidad h_q en el límite de transporte longitudinal activo. Este límite va a representar, lo que en el anterior apartado se denotaba como zona litoral; pues se pretende delimitar la zona donde los cambios del perfil son intensos y se va a identificar como la zona de transporte longitudinal activo (pues está asociada al transporte longitudinal de sedimento).

La profundidad límite buscada pretende recoger el transporte longitudinal de sedimento, por ser el factor fundamental en la determinación de la variación de la línea de costa que se incluye en el presente método. Asimismo, esta profundidad debe delimitar una zona con una dinámica alta, pues en ella se va a asumir que el tramo de rotura del perfil de equilibrio se ha establecido en escalas temporales del orden de las horas.

En primer lugar, y con base en las anteriores ideas, ha sido necesario realizar un proceso de búsqueda de datos de campo que proporcionaran información sobre la distribución transversal del transporte longitudinal de sedimento. Sin embargo, existen relativamente pocos datos de campo con buena calidad. En esta Tesis se han utilizado los datos de campo de Kraus et al. (1989) y los de Rosati et al. (1990), los cuales fueron obtenidos mediante la utilización de trampas de sedimento en la zona de rompientes en la playa de Duck (dichos datos corresponden a DUCK85 y a SUPERDUCK, respectivamente). Ahora bien, como todas estas medidas se encuentran asociadas a condiciones de oleaje relativamente suaves y normales, se

buscaron datos de campo en condiciones de oleaje más severas de temporal, utilizándose con este fin las medidas proporcionadas por Miller (1998), (en este caso se utilizaron sensores tipo OBS-Optical Backscatter Sensor para la medida de concentraciones de sedimento y otros para la medida de corrientes), las cuales también fueron efectuadas en la playa de Duck (SANDYDUCK, véase Miller, 1998 y Miller, 1999). Adicionalmente a las anteriores referencias, en Bayram et al. (2001) se puede consultar una descripción de los datos utilizados.

La base de datos completa descrita en el párrafo anterior fue analizada, determinándose la zona en la que todo el transporte longitudinal de sedimento se encontraba recogido. Una vez definida esta zona, y con base en los perfiles de campo de la playa de Duck para cada uno de los casos, se determinó la profundidad asociada al límite de transporte longitudinal activo.

Finalmente se buscaron relaciones entre la profundidad límite anterior h_q y las características de cada medida en campo, encontrándose una dependencia entre la mencionada profundidad y la altura de ola significativa local $H_{s\ loc}$ en dicha profundidad para cada perfil analizado. Dicha dependencia se indica en la ecuación (2.100), así como en la figura 2.8, en la que también se pueden diferenciar los datos utilizados, diferenciándose por su procedencia. Merece la pena destacar la similitud entre la expresión (2.100) propuesta y la ecuación (2.98) indicada en el anterior apartado para definir la profundidad de cierre del perfil.

$$\boxed{h_q = 1.7 H_{s\ loc}} \quad (2.100)$$

En la tabla 2.1 se pueden consultar las características de las medidas de campo que se han utilizado para el establecimiento de la expresión (2.100). En esta tabla se indica la procedencia de cada medida de campo, la clave del caso (para su posible identificación en el caso de que se recurra a las referencias originales), la altura de ola significativa local $H_{s\ loc}$, el período de pico T_p y la profundidad h_q de transporte longitudinal activo determinada.

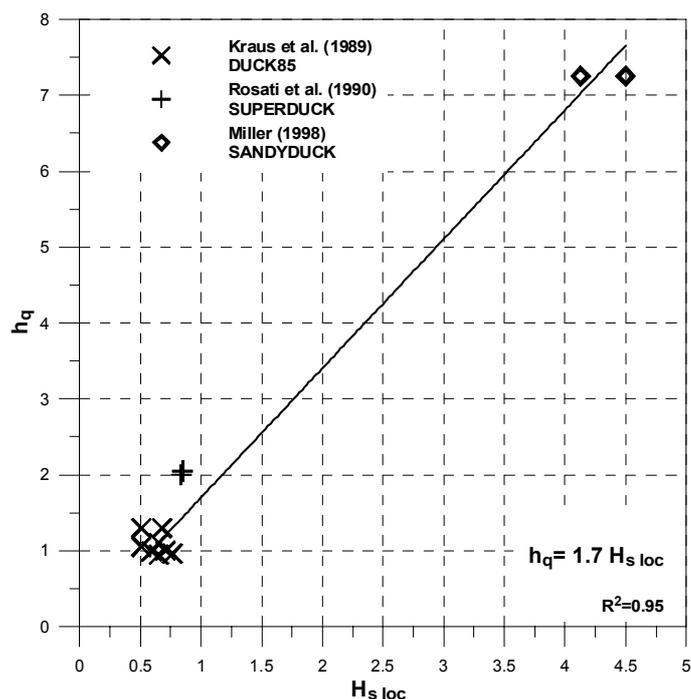


Figura 2.8- Relación entre la profundidad h_q y la altura de ola significativa local $H_{s\ loc}$

| <i>PROCEDENCIA</i> | <i>CASO</i> | $H_{s\ loc} (m)$ | $T_p (seg)$ | $h_q (m)$ |
|--------------------|-------------|------------------|-------------|-----------|
| <i>DUCK85</i> | 859050957 | 0.707 | 11.4 | 1.000 |
| <i>DUCK85</i> | 859051057 | 0.650 | 11.2 | 1.103 |
| <i>DUCK85</i> | 859051352 | 0.764 | 10.9 | 0.963 |
| <i>DUCK85</i> | 859051528 | 0.650 | 11.1 | 0.950 |
| <i>DUCK85</i> | 859060916 | 0.679 | 12.8 | 1.300 |
| <i>DUCK85</i> | 859061018 | 0.509 | 13.1 | 1.300 |
| <i>DUCK85</i> | 859061303 | 0.594 | 10.1 | 0.990 |
| <i>DUCK85</i> | 859061400 | 0.509 | 11.2 | 1.055 |
| <i>SUPERDUCK</i> | 8609161116 | 0.850 | 10.1 | 2.050 |
| <i>SUPERDUCK</i> | 8609191016 | 0.830 | 10.1 | 2.000 |
| <i>SANDYDUCK</i> | 970401 | 4.130 | 8.0 | 7.250 |
| <i>SANDYDUCK</i> | 980204 | 4.500 | 12.8 | 7.250 |

Tabla 2.1- Características de las medidas de campo utilizadas

Como se puede observar en la tabla 2.1, la influencia del período de pico del oleaje en la determinación de la profundidad de transporte longitudinal activo es menor, y de hecho se puede incluir dentro de la altura de ola, como ya se indicó en el anterior apartado al analizar la profundidad de cierre.

4.4. CONCLUSIONES

Los principales aportes de este capítulo son los siguientes:

❖ Se ha desarrollado un modelo de evolución con perfil de forma constante y profundidad límite variable. La utilidad de este modelo radica en ser el sustituto de los modelos de evolución de largo plazo existentes en la actualidad (modelos de una línea) en situaciones en las que las características del oleaje presentan gran variabilidad.

❖ Se ha propuesto una expresión (ecuación 2.100) para la definición de la profundidad de transporte longitudinal activo h_q en función de la altura de ola significativa local $H_{s\ loc}$ en dicha profundidad. Dicha expresión se ha establecido con base en datos de campo con la distribución transversal del transporte longitudinal de sedimento en la zona de rompientes en la playa de Duck. En concreto se han utilizado los datos de campo de Kraus et al. (1989), los de Rosati et al. (1990) y los de Miller (1998), establecidos los dos primeros en condiciones normales de oleaje (DUCK85, SUPERDUCK) y los últimos en condiciones de temporal (SANDYDUCK).

CAPÍTULO 5

DESARROLLO DEL MODELO DE EVOLUCIÓN DE MEDIO-LARGO PLAZO

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a desarrollar el segundo de los dos modelos de evolución propuestos en el capítulo 3 y que corresponde al modelo de evolución de medio-largo plazo.

Con este modelo se van a poder determinar tanto las variaciones de la línea de costa asociadas a variaciones temporales del área transversal, como las que no están relacionadas con estas variaciones, sino con una redistribución del sedimento en el perfil por transporte transversal (como por ejemplo las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano).

El presente capítulo se encuentra dividido en los siguientes apartados: en primer lugar se describirá el modelo de evolución de medio-largo plazo, posteriormente se validará dicho modelo con datos de campo, y finalmente se presentarán unos ejemplos de aplicación del modelo propuesto y comparación con los modelos tradicionales de una línea.

5.2. PROPUESTA DEL MODELO DE EVOLUCIÓN

La descripción del modelo de evolución se va a realizar en las siguientes fases: inicialmente se especificarán los fundamentos del modelo, a continuación se establecerá la zonificación del perfil de playa utilizada en el mismo, posteriormente se desarrollará el modelo de evolución de perfil que incorpora el perfil completo de playa, indicándose las expresiones para definir este perfil completo, y finalmente se determinará la variación de la línea de costa.

5.2.1. FUNDAMENTOS DEL MODELO

Con el objetivo de obtener las variaciones de la línea de costa relacionadas con variaciones temporales del área transversal, así como las asociadas a una

redistribución del sedimento en el perfil, se debe establecer un modelo de evolución del perfil de playa.

El modelo de evolución del perfil de playa debe incluir una definición del perfil completo de la misma. En el modelo propuesto se diferencian cuatro zonas en el perfil de playa, en las que se establecen los tres tramos de perfil siguientes: tramo de rotura, tramo de asomeramiento o de transición y tramo exterior. El tramo de rotura es conocido y se encuentra en equilibrio con el estado de mar incidente. El tramo de asomeramiento se encuentra en evolución y es el que realiza la transición entre el tramo de rotura (condición de continuidad) y el tramo exterior. El tramo exterior se encuentra acotado exteriormente por la condición geológica propia de la zona (límite exterior fijo en el tiempo) e interiormente por un límite local asociado a cada condición de oleaje.

Las variaciones de la línea de costa se determinan mediante el modelo de evolución de perfil, el cual posee como condicionante externo la variación temporal del área transversal obtenida con las ecuaciones generales de conservación del sedimento derivadas en el capítulo 2. En concreto se debe utilizar la expresión (2.49) obtenida en ejes locales (del perfil de playa) en dicho capítulo. Recuérdese que dicha ecuación corresponde a la integración de la ecuación de conservación de sedimento en vertical y transversalmente desde el límite en la costa (denotado en estos ejes como y_{ls}) hasta el límite exterior fijo en el tiempo (denotado en estos ejes como y_{le}) y en el caso de ausencia de fuentes y sumideros. La ecuación (2.49) se escribe de nuevo en la expresión (2.101).

$$\boxed{\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} - q_{y_{l}y_{ls}} = 0} \quad (2.101)$$

5.2.2. ZONIFICACIÓN DEL PERFIL DE PLAYA EN EL MODELO

En el modelo de evolución propuesto se considera el perfil completo de playa. Dicho perfil se encuentra diferenciado (en cada instante de tiempo) en cuatro zonas, las cuales aparecen representadas en la figura 2.9 y se describen a continuación:

- *Zona de rotura*. En esta zona se asume que el perfil de playa se encuentra en equilibrio con el estado de mar incidente. El tramo de rotura del perfil se extiende desde el nivel de pleamar hasta la profundidad de rotura en bajamar h_{rt} .

- *Zona de asomeramiento o de transición*. Esta zona se encuentra en evolución, constituyendo la transición entre la zona de rotura (condición de continuidad) y la zona exterior. Este tramo se desarrolla desde la profundidad de rotura en bajamar hasta la profundidad exterior local en bajamar $h_{e\ loc}$. La profundidad $h_{e\ loc}$ se encuentra asociada a cada condición de oleaje, definiéndose en el apartado 5.3.3. la forma de obtener dicha profundidad.

- *Zona exterior*. La zona exterior es el tramo del perfil que permanece inalterado entre dos instantes de tiempo sucesivos de la evolución del mismo. El tramo exterior se extiende desde la profundidad exterior local en bajamar $h_{e\ loc}$ hasta la profundidad exterior o geológica en bajamar h_e . Este último límite constituye un límite fijo en el tiempo (límite fijo de las ecuaciones de conservación del sedimento derivadas en el capítulo 2, y_e en ejes generales o bien y_{le} en ejes locales) y queda condicionado por la geología propia de la zona. El método de determinación de la profundidad h_e se especifica en el apartado 5.3.4.

- *Zona geológica*. La zona hacia aguas profundas con respecto a la profundidad h_e se denomina zona geológica. Téngase siempre presente que las ecuaciones de conservación del sedimento que utiliza el modelo de evolución son las que fueron precisamente integradas en el capítulo 2 hasta este límite exterior fijo en el tiempo con profundidad asociada h_e .

Así pues, el modelo de evolución debe considerar estas zonas para la definición del perfil completo de playa. Cada una de ellas posee dinámicas de distinta rapidez (de más rápidas en la zona de rotura a más lentas en la zona exterior).

Para una mayor claridad de la zonificación del perfil de playa se puede consultar la figura 2.9. Téngase presente que CM representa la carrera de marea y que el eje z tiene el origen en el nivel de pleamar y es positivo por encima de este nivel. Asimismo, nótese que el eje horizontal corresponde al eje local y_l definido en la dirección del perfil de playa, pero con el origen desplazado de la posición de la línea de costa.

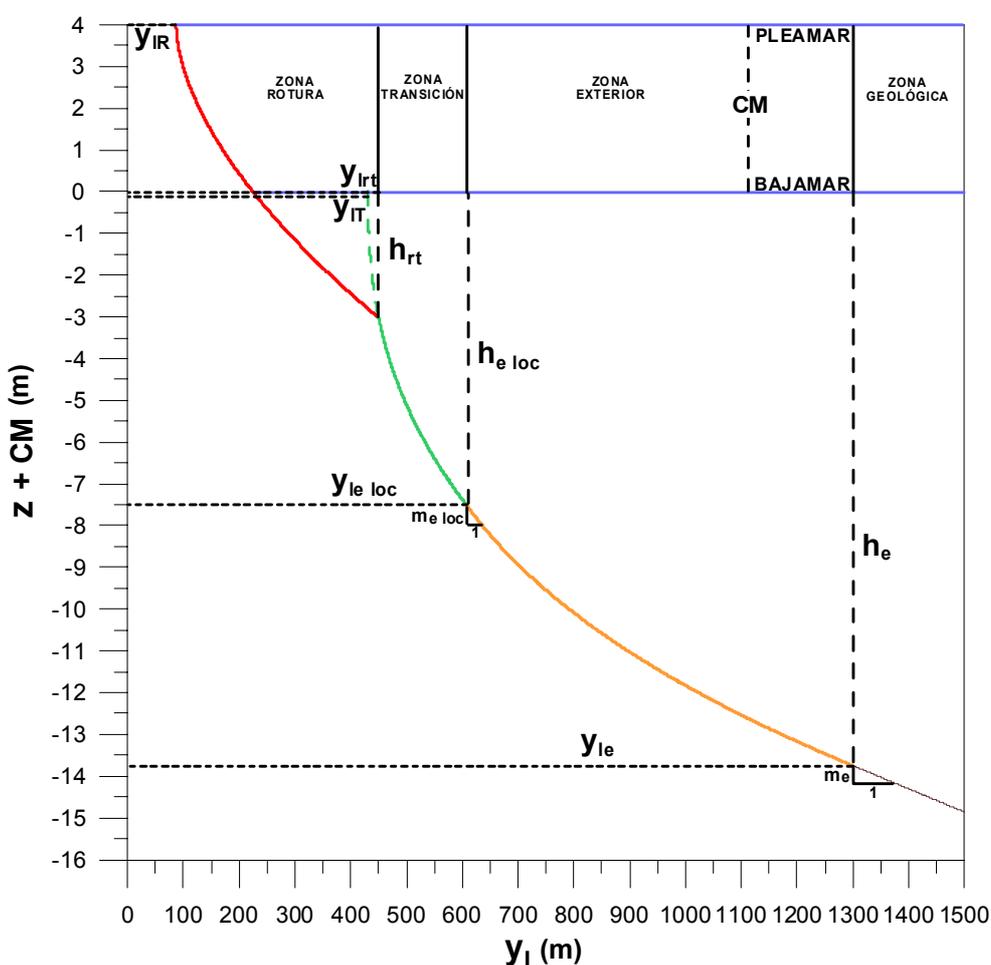


Figura 2.9- Representación esquemática de la zonificación del perfil de playa en el modelo de evolución propuesto

5.2.3. EXPRESIONES DE DEFINICIÓN DEL PERFIL COMPLETO DE PLAYA

En este apartado se van a describir las expresiones para definir el perfil de playa en cada una de las zonas especificadas en el anterior apartado, las cuales se utilizan en el modelo de evolución propuesto. En dichas expresiones se debe tener en consideración que la variable h (denotada como h_R , h_T o h_E , haciendo referencia al tramo de rotura, al de transición o al exterior) se define con el mismo origen que el eje z de referencia (el eje z se encuentra definido con origen en el nivel de pleamar y siendo positivo por encima de este nivel), pero en sentido opuesto al mismo, indicando de esta forma la profundidad. En cuanto al eje horizontal, se debe tener en cuenta que corresponde al eje local y_l definido en la dirección del perfil de playa. Sin embargo, a diferencia de lo indicado en la figura 2.3, el origen de este eje local no se ha ubicado en la posición de la línea de costa. Todas estas consideraciones se deben tener presentes para el resto del capítulo.

- Perfil de equilibrio en zona de rotura.

En la zona de rotura se asume que el perfil de playa se encuentra en equilibrio con el estado de mar incidente. Así pues, para definir este tramo se puede utilizar alguna de las muchas formulaciones de perfil de equilibrio existentes en la literatura aplicables a zonas donde los efectos de la refracción-difracción no son importantes, o bien se puede utilizar la formulación de perfil de equilibrio que se propone en la sección 4 de la presente Tesis, la cual ha sido especialmente desarrollada para zonas donde los efectos de la refracción-difracción son relevantes.

Ahora bien, con la intención de estudiar el modelo de evolución planteado, en esta Tesis se ha utilizado una formulación en particular, indicándose en la ecuación (2.102). Esta expresión potencial posee el origen de profundidad en el nivel de pleamar (origen de z y de h) y es aplicable desde este nivel hasta la profundidad de rotura en bajamar h_{rt} (recuérdese que el parámetro CM representa la carrera de marea).

$$h_R = A_R (y_l - y_{lR})^{m_R} \Rightarrow y_{lR} \leq y_l \leq y_{lT} \quad (2.102)$$

$$0 \leq h_R \leq h_{rt} + CM$$

Nótese que se ha elegido una expresión de tipo potencial, siguiendo en la línea de otros investigadores como Vellinga (1984), Boon y Green (1989) y Larson et al. (1999) entre otros. Con dicha expresión se pueden considerar las variaciones de forma del perfil asociadas no sólo al tamaño de grano, sino también las relacionadas con las condiciones del oleaje en la zona de estudio, de una forma no excesivamente complicada y mediante sus dos parámetros A_R y m_R . El parámetro y_{lR} (véase figura 2.9) representa la posición, con respecto al origen del eje local y_l del perfil de playa, del origen de la expresión potencial propuesta para la definición del tramo de rotura del perfil (en el caso particular de que el origen del eje local y_l se ubicara en la posición de la línea de costa el parámetro y_{lR} sería nulo). Por lo tanto, este parámetro indica la posición de la línea de costa. Los parámetros A_R , m_R y h_{rt} son datos de partida que deben ser introducidos en el modelo de evolución, pues como ya fue comentado previamente el establecimiento de una formulación de perfil de equilibrio para el tramo de rotura no es el objetivo presente.

- Perfil de evolución en zona de asomeramiento o de transición.

Este tramo del perfil se define siguiendo la ecuación (2.103). Al igual que en el tramo anterior, se ha elegido una expresión de tipo potencial por las mismas razones. El origen de profundidad de esta expresión potencial se ubica en el nivel de bajamar. La magnitud y_{lT} (véase figura 2.9) indica la posición, con respecto al origen del eje local y_l del perfil de playa, del origen de la expresión potencial propuesta para la definición de este tramo. Sin embargo, en este caso los parámetros y_{lT} , B_T y m_T se determinan con base en el modelo de evolución, al imponer que este tramo se encuentra en evolución, permitiendo realizar la transición entre el tramo de rotura (condición de compatibilidad entre ambos tramos de perfil) y el tramo exterior. Téngase presente que para profundidades más elevadas que la profundidad $h_{e\ loc}$ el perfil de playa permanece inalterado entre dos instantes de tiempo sucesivos, comenzando el tramo exterior del mismo. Por consiguiente, este tramo le impone una

condición de contorno al tramo de asomeramiento o de transición. En el apartado 5.3.3. se propondrá una expresión, a partir de datos de campo, para establecer la profundidad $h_{e\ loc}$. Dicha profundidad posee considerable importancia en el modelo de evolución.

$$\begin{aligned} h_r = B_T (y_l - y_{IT})^{m_r} + CM \Rightarrow y_{lrt} < y_l \leq y_{le\ loc} \\ h_{rt} + CM < h_T \leq h_{e\ loc} + CM \end{aligned} \quad (2.103)$$

- Perfil de evolución en la zona exterior.

Este tramo del perfil sólo se debe establecer en el instante inicial del modelo de evolución, pues al comenzar con el modelo se debe definir la batimetría entre la profundidad $h_{e\ loc}$ en el instante inicial y la profundidad h_e . A partir de este momento, con el modelo de evolución propuesto el tramo exterior queda automáticamente establecido en cada momento, pues es la zona del perfil de playa que permanece inalterada entre la profundidad $h_{e\ loc}$ en cada instante y la profundidad h_e .

Llegados a este punto, conviene indicar que otro aspecto de considerable relevancia es la determinación de la profundidad h_e . Con este fin, no queda más remedio que conocer la zona objeto de estudio. Sin embargo, en el apartado 5.3.4. se propondrá una expresión para la obtención de esta profundidad.

La definición del tramo exterior inicial se puede establecer de diferentes formas, como por ejemplo directamente si se dispone del perfil medido, o bien se puede utilizar una expresión de tipo potencial como las indicadas anteriormente, la cual se presenta en la ecuación (2.104). Se debe tener en cuenta que en la ecuación (2.104) la expresión potencial tiene su origen de profundidad en el nivel de bajamar y que los parámetros de esta expresión se denotan como $B_{E\ INI}$, $y_{IE\ INI}$ y $m_{E\ INI}$.

$$h_{E\ INI} = B_{E\ INI} (y_l - y_{IE\ INI})^{m_{E\ INI}} + CM \Rightarrow y_{le\ loc} < y_l \leq y_{le} \quad (2.104)$$

$$h_{e\ loc} + CM < h_{E\ INI} \leq h_e + CM$$

Téngase presente que aunque el límite común de las expresiones (2.103) y (2.104) se ha definido en $(y_{le\ loc}, h_{e\ loc})$, como se va a analizar el perfil de playa justo en el instante inicial de la evolución, a partir de este momento se va a denotar como $(y_{le\ loc\ INI}, h_{e\ loc\ INI})$. Así pues, una vez conocidos $(y_{le\ loc\ INI}, h_{e\ loc\ INI})$, (y_{le}, h_e) y m_e , para determinar los parámetros $B_{E\ INI}$, $y_{IE\ INI}$ y $m_{E\ INI}$ de la expresión potencial indicada en la ecuación (2.104) se utilizarán las tres condiciones de contorno siguientes:

1. *El límite exterior local inicial pertenece al tramo exterior inicial*, como se indica en la ecuación (2.105), (al desarrollar la expresión 2.105 se comprueba que es independiente de la carrera de marea CM).

$$h_{E\ INI} (y_{le\ loc\ INI}) = h_{e\ loc\ INI} + CM \quad (2.105)$$

2. *El límite exterior o geológico pertenece siempre al tramo exterior*, como se indica en la ecuación (2.106), (al desarrollar la expresión 2.106 se comprueba que es independiente de la carrera de marea CM).

$$h_{E\ INI} (y_{le}) = h_e + CM \quad (2.106)$$

3. *Mantenimiento de una pendiente m_e en el final del tramo exterior*, esto es, en el punto con profundidad h_e . Esta condición queda representada mediante la ecuación (2.107).

$$\frac{dh_{E\ INI}(y_{le})}{dy} = m_e \quad (2.107)$$

De la combinación de las ecuaciones (2.105), (2.106) y (2.107) se obtiene la ecuación implícita (2.108). A partir de esta ecuación se determina el parámetro $m_{E\ INI}$.

$$h_{e\ loc\ INI} = \left(\frac{m_e}{m_{E\ INI}} \right)^{m_{E\ INI}} \frac{1}{h_e^{m_{E\ INI}-1}} \left(y_{le\ loc\ INI} - y_{le} + \frac{h_e m_{E\ INI}}{m_e} \right)^{m_{E\ INI}} \quad (2.108)$$

Una vez conocido el anterior parámetro, se determinan los parámetros $y_{IE\ INI}$ y $B_{E\ INI}$ a partir de las expresiones (2.109) y (2.110), respectivamente.

$$y_{IE\ INI} = y_{le} - \frac{h_e m_{E\ INI}}{m_e} \quad (2.109)$$

$$B_{E\ INI} = \left(\frac{m_e}{m_{E\ INI}} \right)^{m_{E\ INI}} \frac{1}{h_e^{m_{E\ INI}-1}} \quad (2.110)$$

Merece la pena recalcar que las expresiones derivadas para definir el tramo exterior (ecuaciones 2.108, 2.109 y 2.110), sólo se utilizan en el instante inicial del modelo de evolución. Además, es conveniente recordar que los datos de entrada necesarios para la obtención de las mismas han sido: la definición del límite exterior local inicial ($y_{le\ loc\ INI}$, $h_{e\ loc\ INI}$), la definición del límite exterior o geológico (y_{le} , h_e) y la pendiente del perfil de playa en este último límite (m_e).

5.2.4. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

En este apartado se va a determinar la variación de la línea de costa; con este fin, se va a utilizar el modelo de evolución de perfil descrito y la ecuación (2.101) de conservación del sedimento.

Con el objetivo de obtener las variaciones temporales del área transversal del perfil con el modelo de evolución, se van a utilizar las expresiones planteadas en el anterior apartado para la determinación del tramo de rotura y del tramo de asomeramiento o de transición del perfil (ecuaciones 2.102 y 2.103). Asimismo, téngase en cuenta que aunque se va a seguir la misma nomenclatura que en el anterior apartado para la definición de los parámetros de cada tramo de perfil, se va a añadir un subíndice, el cual hace referencia al instante de la evolución (subíndice 1 para el instante 1 o t_1 y subíndice 2 para el instante 2 o t_2).

En primer lugar, se van a plantear de nuevo las expresiones para los dos tramos del perfil de playa (rotura, ecuación 2.111 y transición, ecuación 2.112) para ambos instantes. El subíndice i hace referencia, o bien al instante 1 o al instante 2.

- *Perfil de equilibrio en zona de rotura.*

$$\begin{aligned} h_{Ri} = A_{Ri} (y_l - y_{lRi})^{m_{Ri}} &\Rightarrow y_{lRi} \leq y_l \leq y_{lri} \\ 0 \leq h_{Ri} &\leq h_{rri} + CM \end{aligned} \quad (2.111)$$

- *Perfil de evolución en zona de asomeramiento o de transición.*

$$\begin{aligned} h_{Ti} = B_{Ti} (y_l - y_{lTi})^{m_{Ti}} + CM &\Rightarrow y_{lri} < y_l \leq y_{leloci} \\ h_{rri} + CM &< h_{Ti} \leq h_{eloci} + CM \end{aligned} \quad (2.112)$$

Téngase en consideración que los parámetros de ambos tramos del perfil de playa para el instante 1 o t_1 son conocidos (A_{R1} , y_{lr1} , m_{R1} , B_{T1} , y_{lT1} y m_{T1}). En cuanto a los correspondientes parámetros para el instante 2 o t_2 , son conocidos los parámetros A_{R2} y m_{R2} . Para la obtención de los otros cuatro parámetros (y_{lr2} , B_{T2} , y_{lT2} y m_{T2}) se utilizan las siguientes condiciones:

1. *Continuidad del perfil de playa en el punto de rotura h_{r2}* (y_{lr2} es la distancia a la que se alcanza la profundidad h_{r2}). Dicho punto pertenece al tramo de rotura y al tramo de asomeramiento o de transición del perfil, como se indica en la expresión (2.113).

$$h_{R2}(y_{lr2}) = h_{T2}(y_{lr2}) + CM = h_{r2} + CM \quad (2.113)$$

2. *Continuidad del perfil de playa en el punto con profundidad asociada $h_{e\ loc2}$* ($y_{le\ loc2}$ es la distancia a la que se alcanza la profundidad $h_{e\ loc2}$). Esta condición se indica en la ecuación (2.114) y corresponde a la condición de contorno que el tramo exterior impone al tramo de asomeramiento o de transición. En la zona de aguas más profundas que la profundidad $h_{e\ loc2}$, el perfil de playa permanece inalterado.

$$h_{T2}(y_{le\ loc2}) = h_{e\ loc2} \quad (2.114)$$

3. *Continuidad de la pendiente $m_{e\ loc2}$ del perfil de playa en el punto con profundidad asociada $h_{e\ loc2}$* ($y_{le\ loc2}$ es la distancia a la que se alcanza la profundidad $h_{e\ loc2}$). Esta condición aparece especificada en la expresión (2.115) y corresponde a la segunda condición de contorno que el tramo exterior impone al tramo de asomeramiento o de transición.

$$\frac{dh_{T2}(y_{le\ loc2})}{dy} = m_{e\ loc2} \quad (2.115)$$

4. Esta condición corresponde a *la conservación del sedimento* que la ecuación (2.101) impone al modelo de evolución de perfil. Así pues, dicho modelo está condicionado externamente por la variación temporal del área transversal V_A establecida mediante la ecuación (2.101). De esta última ecuación se obtiene la variación temporal del área transversal del perfil V_A , como se indica en la expresión (2.116).

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\partial Q_{x_l}}{\partial x_l} + q_{y_{l_{ys}}} = V_A \quad (2.116)$$

Téngase en cuenta que la expresión (2.116) corresponde a la ecuación de conservación del sedimento representada en ejes locales (con el perfil de playa) integrada en vertical y transversalmente hasta el límite exterior fijo en el tiempo y_{le} con profundidad asociada h_e . Como en cada instante de la evolución el perfil de playa permanece inalterado en profundidades mayores que la profundidad $h_{e\ loc2}$ del último instante, para determinar la variación temporal del área transversal, la integración hasta el límite y_{le} es equivalente a integrar hasta el límite $y_{le\ loc2}$ con profundidad asociada $h_{e\ loc2}$ (recuérdese que el tramo exterior del perfil es la zona de éste que permanece inalterada en cada instante de la evolución, no habiendo pues en este tramo variaciones temporales del área transversal del perfil).

Teniendo en cuenta la ecuación (2.117) para la definición del área transversal del perfil de playa, en el modelo de evolución el término de la variación temporal del área transversal se calcula con la ecuación (2.118).

$$A = \int_{y_{l1}}^{y_{l2}} z_b dy_l \quad (2.117)$$

$$\frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{y_{lR2}}^{y_{le\ loc\ 2}} z_{b2} dy_l - \int_{y_{lR1}}^{y_{le\ loc\ 2}} z_{b1} dy_l}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{y_{lR2}}^{y_{le\ loc\ 2}} -h_2 dy_l - \int_{y_{lR1}}^{y_{le\ loc\ 2}} -h_1 dy_l}{t_2 - t_1} \quad (2.118)$$

La ecuación (2.118) se combina con la ecuación (2.116), pues esta última le impone a la primera la variación temporal del área transversal entre los instantes t_1 y t_2 (lo cual queda indicado con el término $[V_A]_{t_1}^{t_2}$), obteniéndose la ecuación (2.119).

$$\frac{\int_{y_{lR1}}^{y_{le\ loc\ 2}} h_1 dy_l - \int_{y_{lR2}}^{y_{le\ loc\ 2}} h_2 dy_l}{t_2 - t_1} = [V_A]_{t_1}^{t_2} \quad (2.119)$$

El primer término del numerador de la ecuación (2.119) se debe determinar numéricamente. Sin embargo, el segundo término del numerador de la mencionada ecuación se calcula introduciendo las expresiones analíticas para el perfil de playa propuestas, tal y como queda expresado en la ecuación (2.120).

$$\int_{y_{lR2}}^{y_{le\ loc\ 2}} h_2 dy_l = \int_{y_{lR2}}^{y_{lT2}} \left(A_{R2} (y_l - y_{lR2})^{m_{R2}} \right) dy_l + \int_{y_{lT2}}^{y_{le\ loc\ 2}} \left(B_{T2} (y_l - y_{lT2})^{m_{T2}} + CM \right) dy_l \quad (2.120)$$

De la ecuación (2.119) se despeja el término calculado analíticamente en la ecuación (2.120), como se indica en la ecuación (2.121). Nótese que en esta expresión A_{TOT} es conocido, siendo determinado numéricamente.

$$\int_{y_{IR2}}^{y_{le\ loc2}} h_2 dy_l = \int_{y_{IR1}}^{y_{le\ loc2}} h_1 dy_l - [V_A]_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = A_{TOT} \quad (2.121)$$

La expresión (2.121) se combina con la ecuación (2.120), obteniéndose de esta forma la ecuación (2.122).

$$\int_{y_{IR2}}^{y_{le\ loc2}} h_2 dy_l = A_{TOT} = \frac{A_{R2}}{m_{R2} + I} (y_{lr2} - y_{IR2})^{m_{R2}+1} + \frac{B_{T2}}{m_{T2} + I} \left((y_{le\ loc2} - y_{IT2})^{m_{T2}+1} - (y_{lr2} - y_{IT2})^{m_{T2}+1} \right) + CM (y_{le\ loc2} - y_{lr2}) \quad (2.122)$$

Resolviendo conjuntamente las ecuaciones (2.113), (2.114), (2.115) y (2.122), se determinan las cuatro incógnitas (y_{IR2} , B_{T2} , y_{IT2} y m_{T2}).

La expresión para determinar el parámetro m_{T2} no es explícita, dicho parámetro se obtiene de la resolución de la ecuación (2.123).

$$\frac{A_{R2}^{\frac{-1}{m_{R2}}}}{m_{R2} + I} (h_{r2} + CM)^{\frac{m_{R2}+1}{m_{R2}}} + \left(\frac{CM m_{T2}}{m_{e\ loc2} h_{e\ loc2}^{\frac{1-m_{T2}}{m_{T2}}}} \right) \left(h_{e\ loc2}^{\frac{1}{m_{T2}}} - h_{r2}^{\frac{1}{m_{T2}}} \right) + \left(\frac{m_{T2}}{(m_{T2} + I) m_{e\ loc2} h_{e\ loc2}^{\frac{1-m_{T2}}{m_{T2}}}} \right) \left(h_{e\ loc2}^{\frac{m_{T2}+1}{m_{T2}}} - h_{r2}^{\frac{m_{T2}+1}{m_{T2}}} \right) = A_{TOT} \quad (2.123)$$

Una vez determinado el parámetro m_{T2} con la ecuación (2.123), el resto de los parámetros se determinan de la siguiente forma:

- El parámetro y_{IT2} se determina con la expresión (2.124). Esta expresión se ha obtenido de la combinación de las ecuaciones (2.114) y (2.115).

$$y_{IT2} = y_{leloc2} - \frac{m_{T2} h_{e loc2}}{m_{e loc2}} \quad (2.124)$$

- El parámetro B_{T2} se calcula con la ecuación (2.125). Dicha expresión se ha establecido al utilizar las expresiones (2.114) y (2.124).

$$B_{T2} = \left(\frac{m_{e loc2}}{m_{T2}} \right)^{m_{T2}} \frac{I}{h_{e loc2}^{m_{T2}-1}} \quad (2.125)$$

- Finalmente el parámetro y_{IR2} se obtiene con la expresión (2.126). Esta expresión se ha determinado a partir de la ecuación (2.113). Nótese que el parámetro y_{IR2} define la posición de la línea de costa.

$$y_{IR2} = y_{IT2} + \left(\frac{h_{rt2}}{B_{T2}} \right)^{\frac{1}{m_{T2}}} - \left(\frac{h_{rt2} + CM}{A_{R2}} \right)^{\frac{1}{m_{R2}}} \quad (2.126)$$

5.3. VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO CON DATOS DE CAMPO

En el presente apartado se va a analizar la validez del modelo de evolución propuesto por comparación del mencionado modelo con datos de campo. Asimismo, también se van a proponer expresiones para determinar la profundidad $h_{e\ loc}$, así como la profundidad h_e . En una fase posterior se va a realizar una comparación entre los perfiles medidos y los determinados con el modelo propuesto frente a los obtenidos con los modelos tradicionales de una línea, como el modelo GENESIS.

5.3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

En primer lugar, téngase presente que uno de los puntos más relevantes del modelo de evolución planteado es la relación entre el tramo de asomeramiento o de transición y el tramo exterior. Precisamente para poder comprobar este funcionamiento, los datos de campo a utilizar no se deben limitar a la zona intermareal, siendo pues necesario disponer de la zona del perfil sumergido. Esta es la razón principal por la que se han utilizado los perfiles medidos en la playa de Somo (Cantabria), la cual se presenta en la figura 2.10, pudiéndose observar en la mencionada figura el perfil en el que se han tomado los datos.

Las medidas de la evolución del perfil en la playa de Somo (Cantabria), así como los tamaños de grano, han sido extraídos de los informes realizados por la Fundación Leonardo Torres Quevedo de la Universidad de Cantabria para el Puerto de Santander (véase Fundación Leonardo Torres Quevedo, 1988 y 1992).

El tamaño de grano del perfil indicado en la figura 2.10 queda caracterizado con un D_{50} de 0.26 milímetros en el nivel de pleamar, de 0.25 milímetros en la zona media intermareal y de 0.27 milímetros en el nivel de bajamar.

Las campañas analizadas en el seguimiento de la evolución del perfil estudiado abarcan tres años, siendo la separación temporal entre las mismas adecuada para recoger la información de los cambios de medio plazo (invierno-

verano) experimentados por la línea de costa. En la tabla 2.2 se puede consultar una descripción de las campañas analizadas, con las fechas en las que fueron llevadas a cabo.

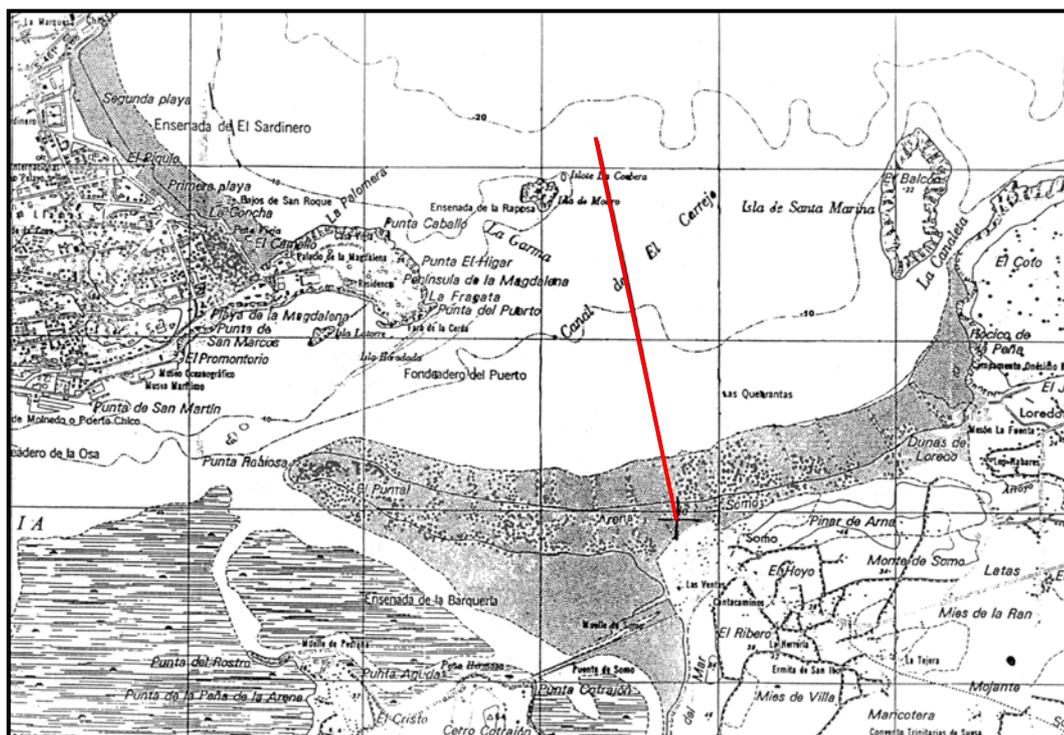


Figura 2.10- Localización del perfil utilizado para la validación del modelo de evolución

| <i>CAMPAÑA</i> | <i>FECHA</i> |
|----------------|--------------|
| <i>C1</i> | 18/12/87 |
| <i>C2</i> | 13/02/88 |
| <i>C3</i> | 16/04/88 |
| <i>C4</i> | 29/08/88 |
| <i>C5</i> | 10/03/89 |
| <i>C6</i> | 31/01/91 |

Tabla 2.2- Campañas utilizadas en el seguimiento de la evolución del perfil de playa

Para la determinación del oleaje en profundidades indefinidas se ha contado con los datos de previsión a partir del régimen de vientos y presiones de las series proporcionadas por Puertos del Estado. Posteriormente este oleaje ha sido propagado hasta la profundidad exterior del perfil analizado.

5.3.2. APLICACIÓN DEL MODELO

Téngase en cuenta que en el análisis de la evolución del perfil de la playa de Somo (Cantabria), se debe reproducir todo el transporte de sedimento, tanto el que genera variaciones temporales del área transversal del perfil (se suele relacionar principalmente con el gradiente longitudinal de sedimento), como el que no las genera (se suele asociar con transporte transversal de sedimento). Con el objetivo de la aplicación del modelo de evolución al caso del perfil analizado, las variaciones temporales del área transversal son un dato de partida que se le debe imponer al modelo y que se han determinado de la comparación de los perfiles medidos en las campañas sucesivas. Sin embargo, no se debe olvidar que tal y como ya fue comentado en la propuesta del modelo de evolución, en el estudio de un caso general dentro del modelo de evolución de medio-largo plazo propuesto, estas variaciones del área transversal se obtendrán con base en las ecuaciones generales de conservación del sedimento derivadas en el capítulo 2.

Para la aplicación del modelo de evolución, lo primero que se debe establecer es el punto con profundidad asociada la profundidad h_e . Dicha punto, con base en el análisis de todas las campañas realizadas, se define con las coordenadas $y_{le}=1300$ m, $h_e=13.75$ m. Asimismo, debe ser definida la pendiente m_e ($m_e=0.00555$) en dicho punto para el establecimiento del tramo exterior inicial, (recuérdese que esta pendiente sólo es necesaria con el objetivo de proponer una expresión de tipo potencial para el tramo exterior inicial siguiendo lo comentado en el apartado 5.2.3. Ahora bien, existen otras opciones para el establecimiento del tramo en cuestión, como puede ser la introducción de este tramo del perfil medido tal cual). Llegados a este punto, es relevante recordar que el tramo exterior inicial es necesario para tener una definición completa de la batimetría.

En la figura 2.11 se presenta el perfil inicial, el cual corresponde a la campaña *CI*. Adicionalmente, en dicha figura se puede apreciar la definición del límite exterior o geológico determinado previamente.

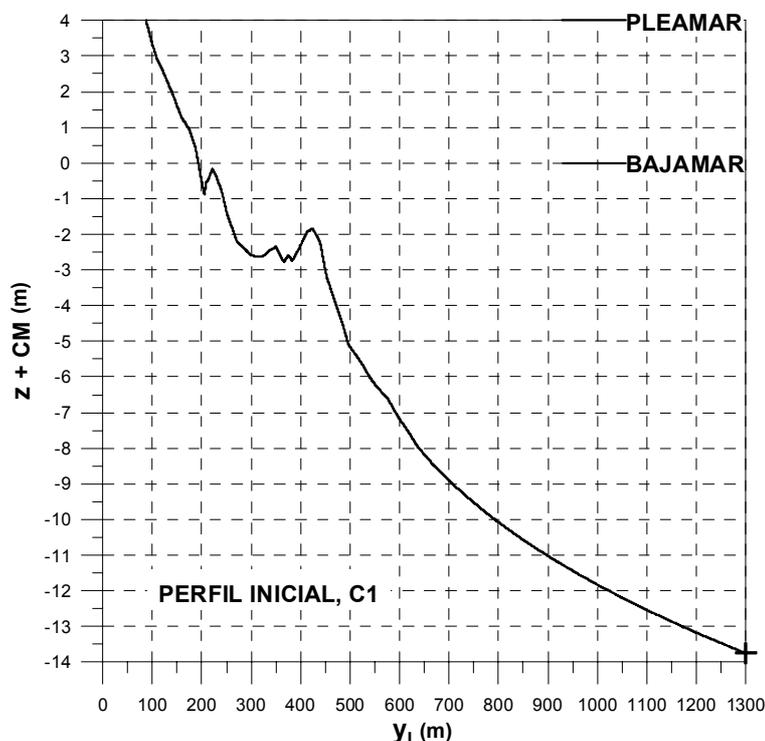


Figura 2.11- Perfil inicial medido en la campaña *CI*

Por otra parte, como ya fue comentado en el apartado 5.2.3., otros datos necesarios en el modelo son las características del tramo de rotura del perfil. Este tramo se encuentra en equilibrio con el estado de mar incidente, definiéndose con una expresión de tipo potencial. Así pues, se necesita definir los parámetros A_R y m_R de dicha expresión (véase ecuación 2.102), así como la profundidad h_{rt} hasta la que se desarrolla dicho tramo. Todos estos parámetros fueron determinados para cada una de las campañas analizadas mediante un ajuste por mínimos cuadrados de la expresión potencial a los perfiles medidos, presentándose los mismos en la tabla 2.3. Asimismo, téngase presente que la carrera de marea *CM* en la zona de estudio es de 4 m.

| CAMPAÑA | A_R | m_R | h_{rt} | $h_{e\ loc}$ |
|----------------|--------|--------|----------|--------------|
| C2 | 0.2754 | 0.5220 | 2.07 | 7.00 |
| C3 | 0.0810 | 0.7080 | 0.70 | 4.80 |
| C4 | 0.0506 | 0.8175 | 1.40 | 3.27 |
| C5 | 0.1580 | 0.6031 | 1.52 | 6.72 |
| C6 | 0.1046 | 0.6830 | 2.10 | 6.00 |

Tabla 2.3- Parámetros de los diferentes tramos del perfil para cada una de las campañas

Finalmente, el último parámetro a tener en cuenta en el modelo de evolución, es la profundidad $h_{e\ loc}$. Esta profundidad se determinó en cada campaña mediante la delimitación del tramo de perfil que permanecía inalterado entre dos campañas sucesivas. En la tabla 2.3 también se presentan los valores determinados para dicha profundidad.

En el siguiente apartado se mostrarán los perfiles medidos, así como los determinados con el modelo de evolución propuesto al utilizar los parámetros indicados en la tabla 2.3, para las campañas C2, C3, C4, C5 y C6, respectivamente.

5.3.3. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE EXTERIOR LOCAL ASOCIADO A $h_{e\ loc}$

Con base en los valores determinados para la profundidad $h_{e\ loc}$ en cada una de las campañas (véase tabla 2.3), se pretende establecer una expresión que permita predecir dicha profundidad. Como punto de partida se toma como referencia las expresiones (2.98) y (2.99) indicadas en el capítulo 4 para la obtención de la profundidad de cierre y la ecuación (2.100) propuesta en el mismo capítulo para el establecimiento de la profundidad en el límite de transporte longitudinal activo. En estas expresiones, las tres profundidades se relacionan con la altura de ola, pues la influencia del período del oleaje es menos relevante. Siguiendo esta idea, se

comprueba que la profundidad $h_{e\ loc}$ también se encuentra asociada con la altura de ola.

Así pues, se han analizado varias posibilidades de elección de la altura de ola propagada hasta la profundidad exterior del perfil analizado más adecuada para la determinación de la profundidad objeto de estudio:

- Una de las opciones analizada fue la de relacionar la profundidad $h_{e\ loc}$ con algún valor característico de la altura de ola existente entre campañas sucesivas. Esto se llevó a cabo para la altura de ola significativa máxima entre campañas, así como para la altura de ola significativa media entre campañas. Sin embargo, con ninguna de estas alternativas se consiguieron resultados satisfactorios. Además, es relevante tener en cuenta que la elección de un parámetro de oleaje representativo de lo que ocurre entre campañas no es una elección adecuada, pues es bastante sensible a la separación temporal entre las mismas. Como consecuencia, una relación establecida de esta forma no podría ser general. Es más, si se dispusiera de una frecuencia más elevada de perfiles medidos, es bastante probable que la relación establecida fuera diferente.

- Por consiguiente, se debe buscar algún valor característico de la altura de ola independiente de la separación temporal entre campañas. Con este idea, se ha determinado para cada campaña el valor medio semanal de la altura de ola significativa correspondiente a la semana previa a la campaña correspondiente, así como el valor medio mensual de la altura de ola significativa correspondiente al mes previo a la campaña en cuestión ($H_s\ media\ mes\ previo$). Del estudio de ambas posibilidades, aunque con la primera opción no se consiguieron resultados aceptables, con la segunda se obtuvieron dos relaciones adecuadas entre ambos parámetros.

En la figura 2.12 se presentan las dos relaciones determinadas, así como los datos utilizados para su obtención, indicándose la campaña asociada a cada uno. La primera relación obtenida (representada en línea continua en la figura 2.12) se indica en la ecuación (2.127) y corresponde a una relación lineal entre ambos parámetros. Nótese la semejanza entre dicha expresión y la expresión (2.98) del capítulo 4 para el

establecimiento de la profundidad de cierre, así como con la expresión (2.100) del mismo capítulo para la determinación de la profundidad en el límite de transporte longitudinal activo. Los diferentes coeficientes presentes en estas ecuaciones corresponden a los diferentes parámetros característicos de la altura de ola en las mismas.

$$h_{e\ loc} = 2.1 H_{s\ media\ mes\ previo} \quad (2.127)$$

La segunda relación (representada en línea discontinua en la figura 2.12) sigue la propuesta de Capobianco et al. (1997), consistiendo de esta forma en una expresión de tipo potencial, como se indica en la ecuación (2.128). Los anteriores investigadores plantearon una expresión de tipo potencial para la determinación de la profundidad de cierre para escalas de corto a medio plazo (semanas a meses), la cual fue indicada en el capítulo 4 (véase ecuación 2.99). Nótese la similitud entre la expresión (2.128) y la ecuación (2.99) propuesta por Capobianco et al. (1997), (exponente 0.58 de la ecuación 2.128 frente al 0.67 de Capobianco et al., 1997; coeficiente 3.32 de la ecuación 2.128 frente al 2.8 de Capobianco et al., 1997).

$$h_{e\ loc} = 3.32 \left(H_{s\ media\ mes\ previo} \right)^{0.58} \quad (2.128)$$

Ahora bien, aunque de la observación de la figura 2.12 la relación (2.128) parece más idónea que la (2.127), para poder tomar una decisión de cuál de estas expresiones es más adecuada, no queda más remedio que disponer de más datos de campo. Por lo tanto, con los datos disponibles en la presente Tesis cualquiera de ellas es acertada.

Téngase en cuenta que el hecho de obtener una relación entre la profundidad $h_{e\ loc}$ y la altura de ola significativa media mensual concuerda con lo ya expuesto de

que el tramo de asomeramiento o de transición del perfil de playa, a diferencia del tramo de rotura, no se encuentra en equilibrio con el estado de mar incidente, sino que este tramo se encuentra en evolución, constituyendo una zona con una dinámica más lenta que la del tramo anterior. Siguiendo esta idea, parece lógico que la profundidad $h_{e\ loc}$, que separa el tramo de asomeramiento o de transición del tramo exterior, se encuentre asociada con unas características de oleaje no instantáneas.

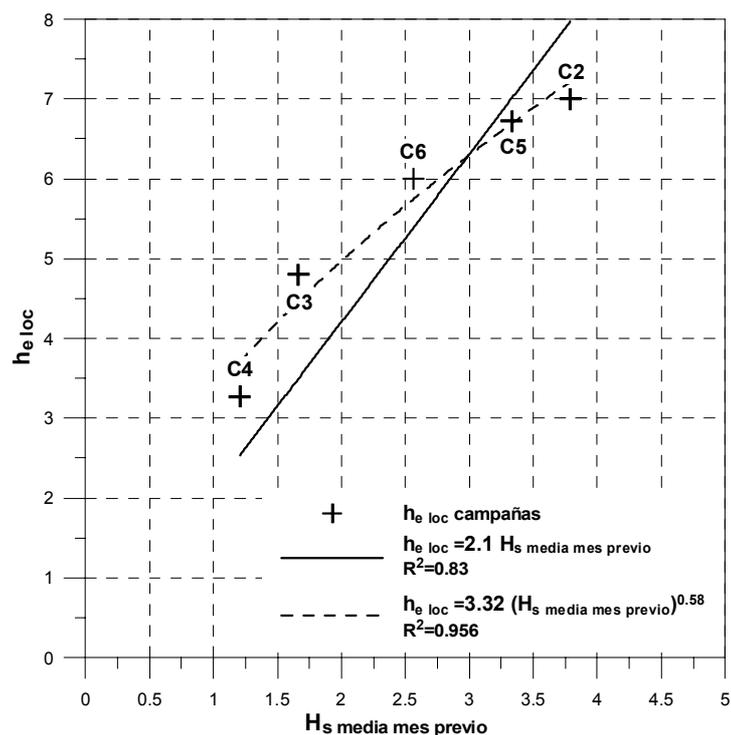


Figura 2.12- Relaciones entre la profundidad $h_{e\ loc}$ y la altura de ola significativa media del mes previo a la campaña H_s media mes previo

APLICACIÓN DE LAS EXPRESIONES A LOS DATOS DE CAMPO

En las figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17 se presentan los perfiles medidos para las campañas C2, C3, C4, C5 y C6, respectivamente. Asimismo, se muestran los perfiles determinados con el modelo de evolución propuesto en el caso de utilizar los valores de la profundidad $h_{e\ loc}$ estimados con base en las campañas e indicados en la tabla 2.3, así como en el caso de aplicar las dos relaciones propuestas previamente para la determinación de la profundidad $h_{e\ loc}$ (ecuaciones 2.127 y 2.128).

De la observación de las figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17, se puede verificar el modelo de evolución propuesto, pudiéndose reproducir acertadamente no sólo el perfil completo, sino también la posición de la línea de costa. También se puede comprobar que los resultados del modelo de evolución son adecuados, tanto para el caso de que la profundidad $h_{e\ loc}$ se determine con base en las campañas, como en el caso de que se aplique cualquiera de las dos formulaciones propuestas en este apartado (ecuaciones 2.127 y 2.128) para la obtención de dicha profundidad.

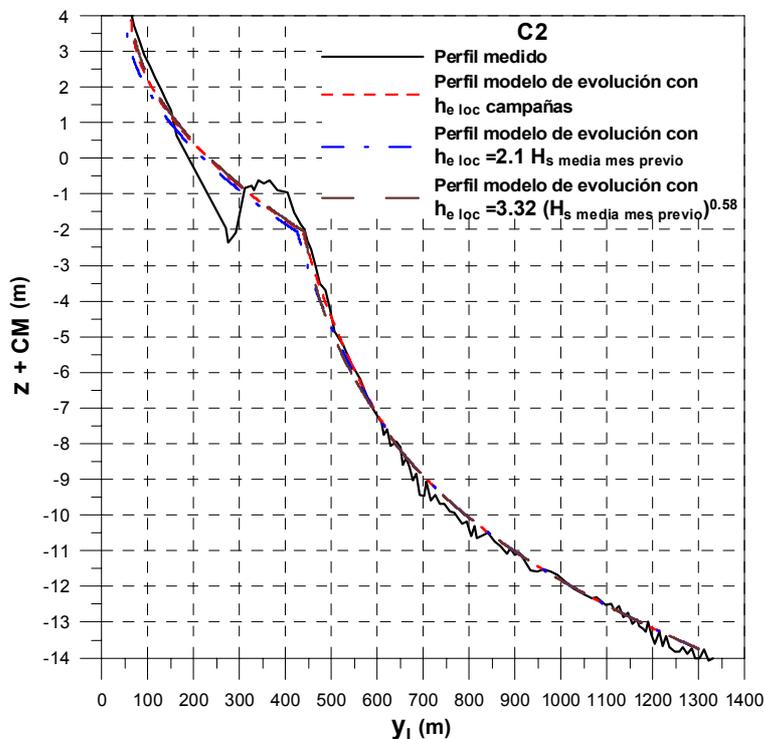


Figura 2.13- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto con diferentes valores de $h_{e\ loc}$ para la campaña C2

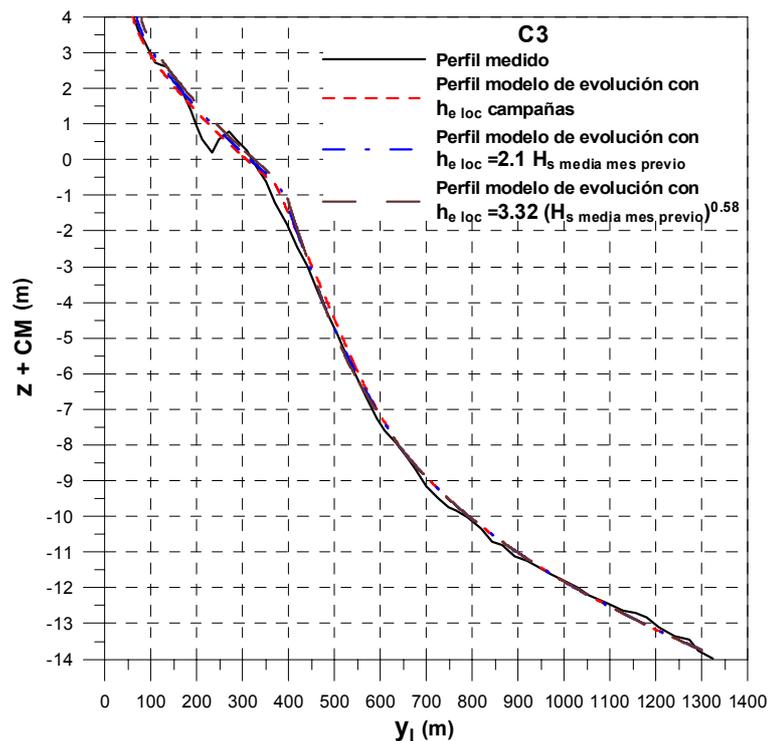


Figura 2.14- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto con diferentes valores de $h_{e\ loc}$ para la campaña C3

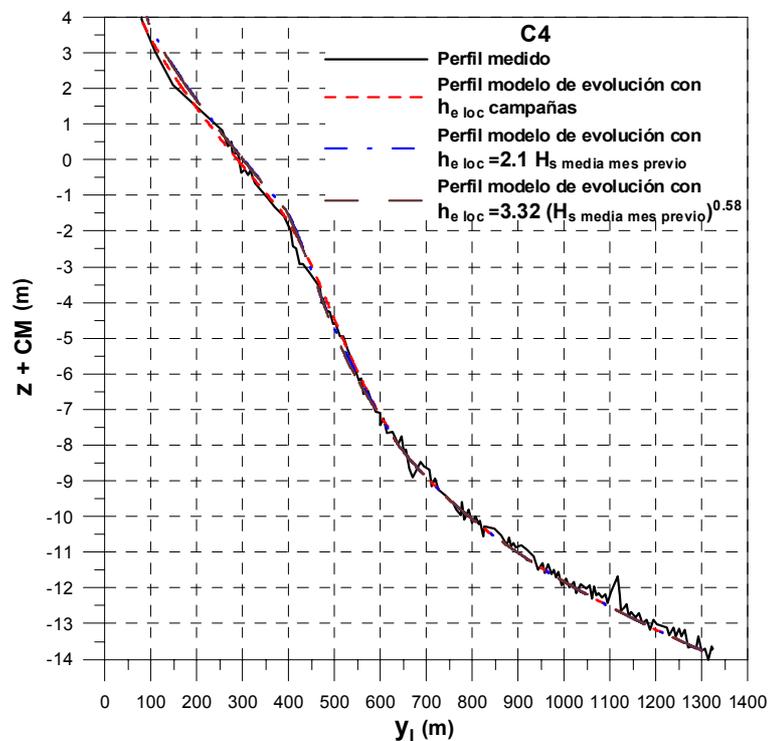


Figura 2.15- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto con diferentes valores de $h_{e\ loc}$ para la campaña C4

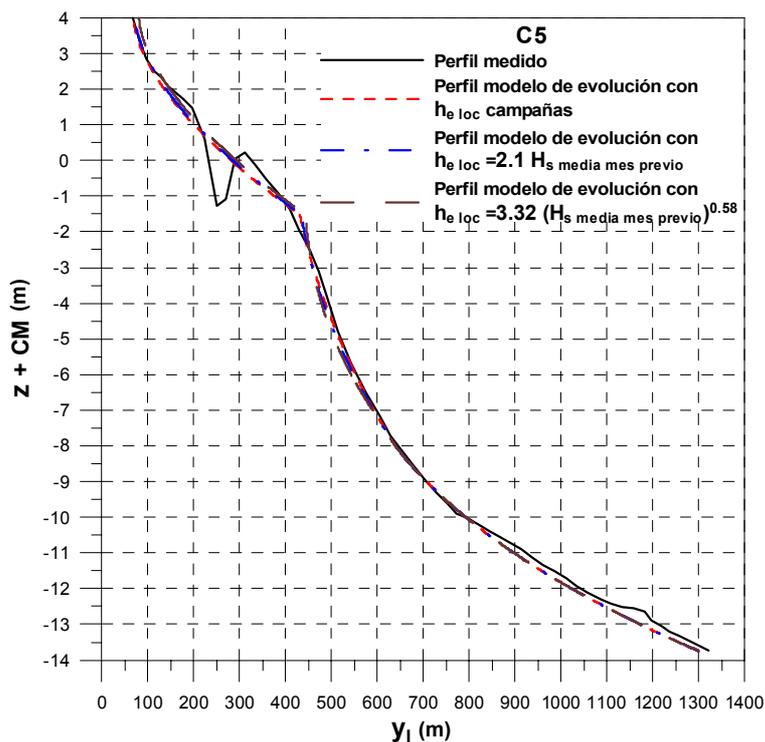


Figura 2.16- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto con diferentes valores de $h_{e\ loc}$ para la campaña C5

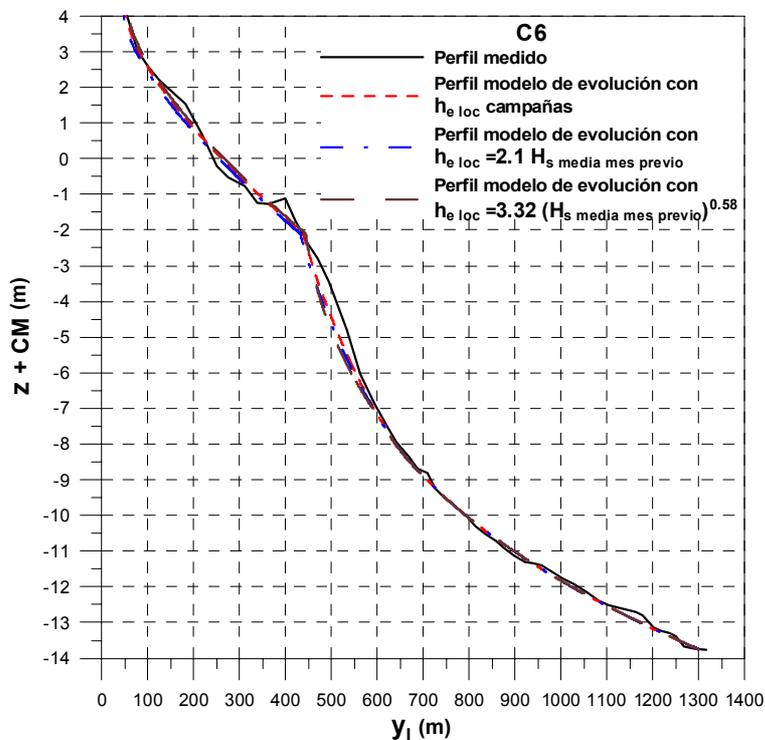


Figura 2.17- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto con diferentes valores de $h_{e\ loc}$ para la campaña C6

Asimismo, del estudio de las diferentes campañas se puede observar que el modelo es especialmente bueno en el caso de condiciones de verano con ausencia de barras, como ocurre en la campaña *C4* (véase figura 2.15). Por otra parte, en el caso de existencia de barras, como se utiliza un perfil de tipo potencial para el tramo de asomeramiento o transición, se consigue un peor ajuste de este tramo cuando las barras están moviéndose hacia la costa (barras ascendiendo), como sucede en las campañas *C3* (véase figura 2.14) y *C5* (véase figura 2.16).

Otro hecho relevante es que, a pesar de utilizar una expresión de tipo potencial para el tramo de rotura del perfil, que tiene el inconveniente de adquirir pendiente infinita en la línea de costa, se está reproduciendo satisfactoriamente la posición de la línea de costa. Nótese que el éxito del modelo de evolución radica especialmente en considerar el perfil completo, con todos sus tramos, lo cual permite equilibrar la cantidad de sedimento y reproducir idóneamente la posición de la línea de costa.

Finalmente, aunque se ha comprobado la validez del modelo, sería conveniente disponer de más datos de campo para poder precisar las expresiones (2.127) y (2.128) propuestas para la determinación de la profundidad $h_{e\ loc}$, así como elegir la más adecuada.

5.3.4. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE EXTERIOR O GEOLÓGICO ASOCIADO A h_e

La determinación del límite exterior o geológico con profundidad asociada la profundidad h_e es un punto de considerable relevancia dentro del modelo de evolución propuesto. Asimismo, recuérdese que este límite exterior corresponde al límite fijo en el tiempo hasta el que se integraron las ecuaciones generales de conservación del sedimento. El tramo exterior del perfil se encuentra precisamente acotado exteriormente por esta profundidad e interiormente por la profundidad $h_{e\ loc}$. La importancia de una elección adecuada de este límite exterior radica en que la batimetría completa se está definiendo hasta el mencionado punto. Por consiguiente, debe ser un límite que garantice que en las condiciones pésimas (oleaje extremal) el

perfil de playa se encuentre contenido en él. En estas condiciones, el límite exterior (asociado con la profundidad h_e) se podría asimilar con el límite exterior local (definido con la profundidad $h_{e\text{ loc}}$).

El límite exterior o geológico es un punto que viene marcado por la geología propia de cada lugar. Por lo tanto, debe ser determinado del conocimiento de cada zona en particular. Sin embargo, en este apartado se va a proponer una expresión para la determinación de la profundidad h_e asociada al mencionado límite, la cual sólo se debe utilizar con reservas y en situaciones donde sea imposible su obtención a partir del conocimiento de la zona.

Para el entendimiento del estudio que se lleva a cabo en este apartado, es muy importante tener en consideración el capítulo 4 en el que se realizó una descripción de la zonificación del perfil de playa. En concreto, siguiendo la notación de Hallermeier (1981), se pretende definir la profundidad de movimiento incipiente d_i de separación entre la zona de asomeramiento y la zona exterior. Utilizando los datos de campo de Hallermeier (1981), se ha determinado la dependencia entre la altura de ola que es excedida doce horas al año H_{s12} y la profundidad d_i . Esta dependencia es de tipo potencial y se encuentra indicada en la ecuación (2.129), así como en la figura 2.18.

$$d_i = 2.85 H_{s12}^{1.71} \quad (2.129)$$

En el litoral español H_{s12} coincide sensiblemente con el temporal de período de retorno de un año. Así pues, este parámetro se puede asimilar con la altura de ola significativa con período de retorno (T_{retorno}) de un año, calculándose la profundidad h_e mediante la ecuación (2.130). En esta ecuación $H_{s\ T_{\text{retorno}}=1}$ representa la altura de ola significativa con período de retorno de un año.

$$\boxed{h_e = 2.85 H_{s\ T_{\text{retorno}}=1}^{1.71}} \quad (2.130)$$

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el límite exterior indicado en la ecuación (2.130) posee un límite interior del cual no se debe bajar y es precisamente el límite de la profundidad $h_{e\ loc}$ establecido bien mediante la ecuación (2.127) o bien mediante la ecuación (2.128). Por lo tanto, para calcular la profundidad h_e se utilizará la expresión (2.130) y posteriormente se comprobará que el valor obtenido es más elevado que el determinado con la expresión elegida para la obtención de la profundidad $h_{e\ loc}$ (o la expresión 2.127 o la 2.128). En el caso de que esto no ocurra, la profundidad h_e se calculará con la expresión elegida para el establecimiento de la profundidad $h_{e\ loc}$.

Por último, no se debe olvidar que el límite exterior queda definido, además de por la profundidad h_e , por la distancia y_e .

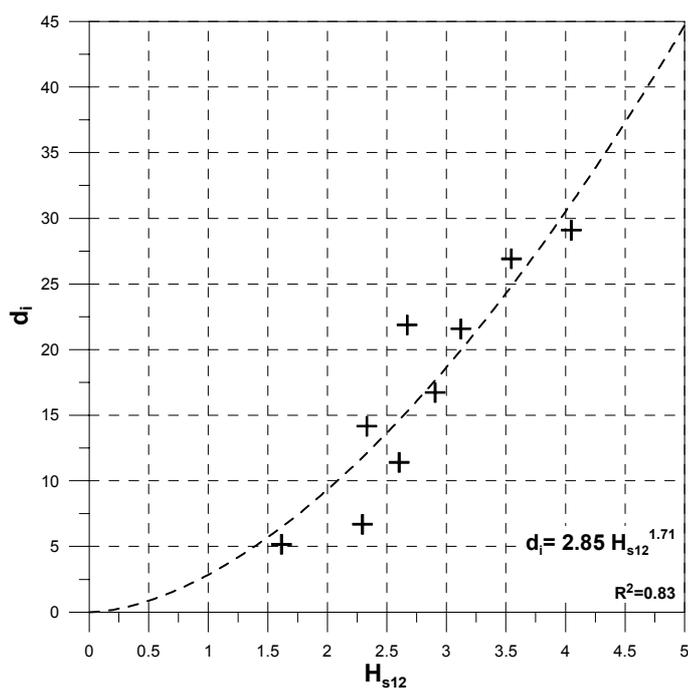


Figura 2.18- Relación entre la profundidad d_i de movimiento incipiente y la altura de ola significativa que es excedida doce horas al año H_{s12} obtenida a partir de los datos de campo de Hallermeier (1981)

5.3.5. COMPARACIÓN DEL MODELO PROPUESTO CON LOS MODELOS TRADICIONALES DE UNA LÍNEA

En este apartado se van a utilizar los datos de campo de la playa de Somo (Cantabria) con el objetivo de efectuar un análisis comparativo entre el modelo de evolución de medio-largo plazo propuesto (con modelo de evolución de perfil) y los modelos tradicionales de una línea. Téngase presente que aunque a lo largo de este apartado se va a hacer referencia al modelo GENESIS (por ser el modelo más utilizado dentro de los modelos tradicionales de una línea), el análisis que va a ser llevado a cabo puede ser igualmente extensible al resto de los modelos tradicionales de una línea.

En el modelo GENESIS la variación de la línea de costa se calcula con la ecuación (2.77) indicada en el capítulo 3. En dicha ecuación el término de dentro del paréntesis del numerador se ha determinado con base en la comparación de los perfiles medidos en las campañas sucesivas, siguiendo lo comentado en el apartado 5.3.2.

En cuanto a los términos restantes de la ecuación (2.77) del capítulo 3, se ha considerado que la elevación de la berma D_B es nula y que la profundidad de cierre D_C coincide con la suma de la carrera de marea CM y la profundidad h_e utilizada en el modelo de evolución ($D_C=17.75$ metros). Aunque esto último se ha llevado a cabo para ser consecuentes con los valores utilizados en el modelo de evolución propuesto, téngase en cuenta que en el caso de emplear unos valores diferentes de los mencionados parámetros, la posición de la línea de costa cambiaría. Ahora bien, en estas situaciones se obtendrían mayores diferencias entre la posición de la línea de costa medida y la estimada con el modelo GENESIS. Así pues, se puede decir que el valor utilizado para la suma de la elevación de la berma y de la profundidad de cierre es el que consigue minimizar las diferencias entre la posición de la línea de costa medida y la determinada con el modelo GENESIS.

Téngase presente que el modelo GENESIS considera un solo tramo del perfil de playa, definiéndose con un perfil de tipo Dean o, lo que es lo mismo, con un perfil de tipo potencial con exponente $2/3$. Es relevante indicar que aunque se ha

considerado un parámetro de forma del perfil de Dean que conserva la cantidad de sedimento del perfil inicial ($A_d=0.165 m^{1/3}$), la variación de la línea de costa con el modelo GENESIS es independiente de la elección de este parámetro (el modelo GENESIS utiliza una formulación para definir el parámetro de forma del perfil potencial con exponente 2/3 en función del tamaño de grano del sedimento).

En la figura 2.19 se presenta la posición de la línea de costa para cada una de las campañas descritas en el apartado 5.3.1. En dicha figura se comparan los valores medidos en campo frente a los determinados con el modelo propuesto (con modelo de evolución de perfil) al utilizar la expresión (2.127) para la definición de la profundidad $h_{e\ loc}$ (con la expresión 2.128 es similar, véase apartado 5.3.3.) y frente a los obtenidos con el modelo GENESIS.

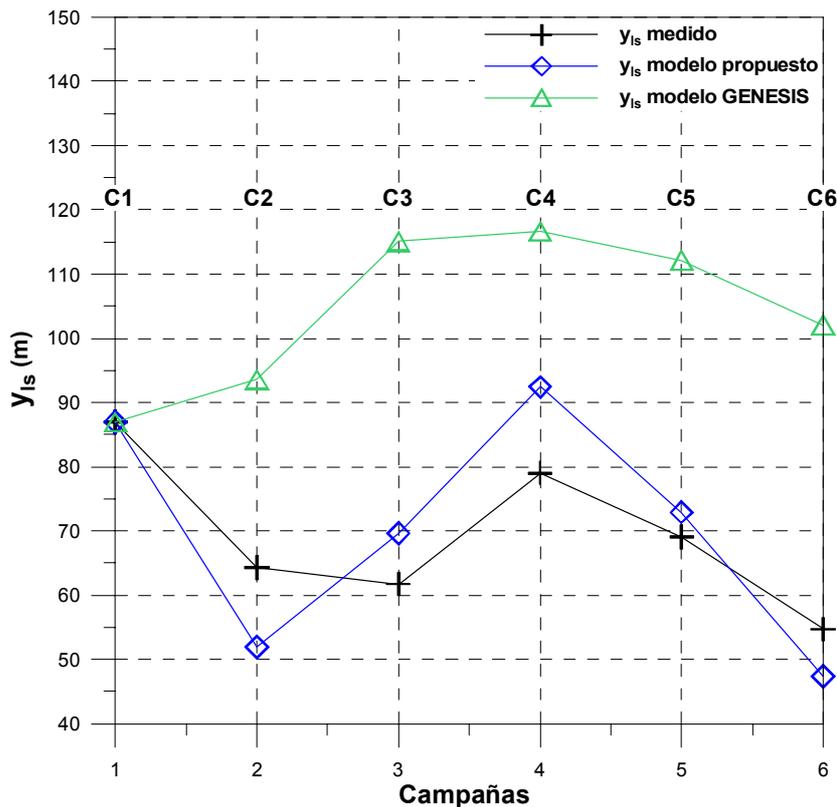


Figura 2.19- Comparación de la posición de la línea de costa medida frente a los valores determinados con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS

De la observación de la figura 2.19 se puede comprobar que el modelo propuesto predice más adecuadamente la posición de la línea de costa si se compara con el modelo GENESIS. Además, recuérdese lo comentado previamente, en este último modelo se han elegido unos parámetros óptimos. En realidad, el modelo GENESIS no trabaja con el perfil definido hasta una profundidad de cierre tan elevada, siendo en este caso las diferencias aún mayores con respecto a la posición de la línea de costa medida.

En las figuras 2.20, 2.21, 2.22, 2.23 y 2.24 se presentan los perfiles medidos, los determinados con el modelo de evolución propuesto utilizando la ecuación (2.127), y los obtenidos con el modelo GENESIS, para cada una de las campañas.

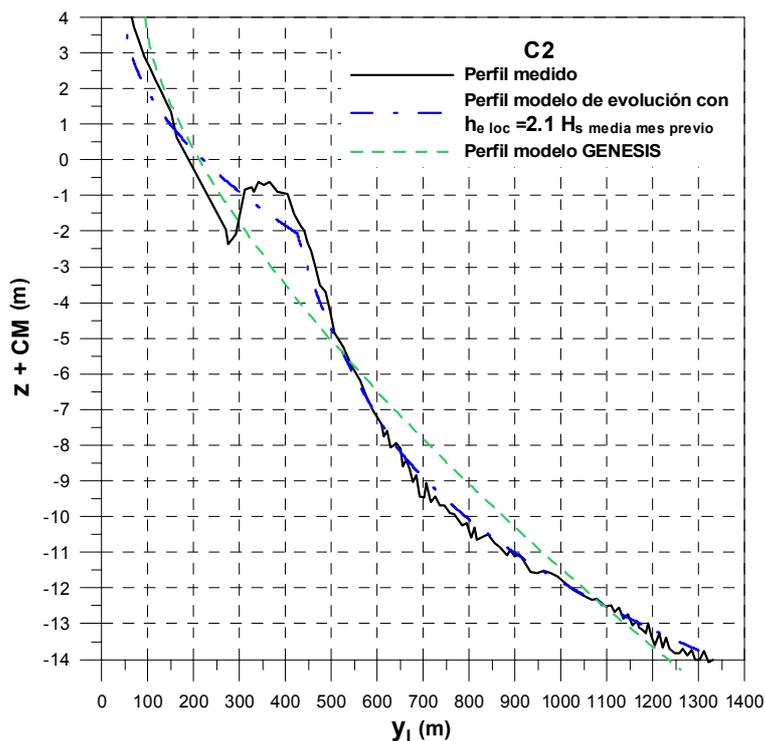


Figura 2.20- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS para la campaña C2

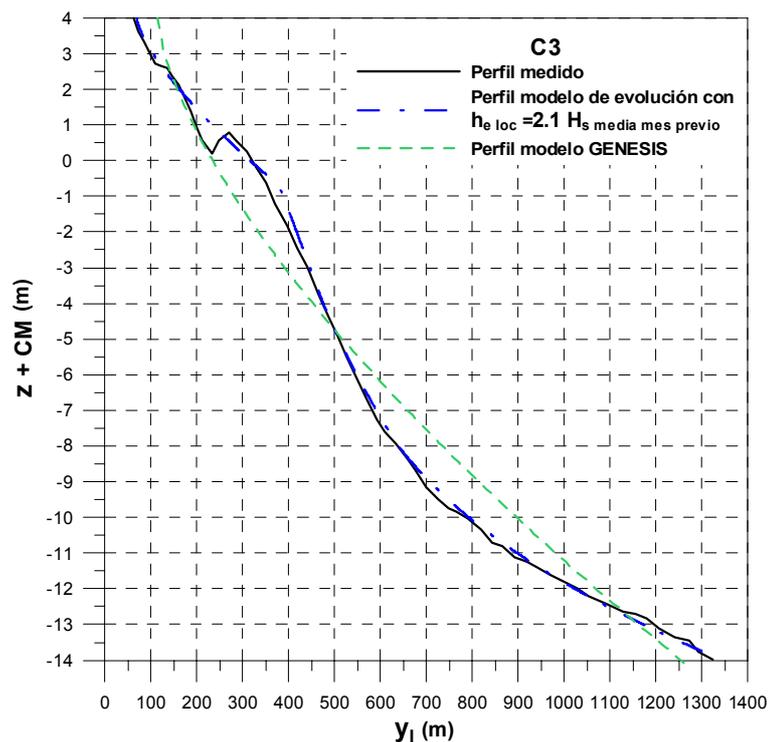


Figura 2.21- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS para la campaña C3

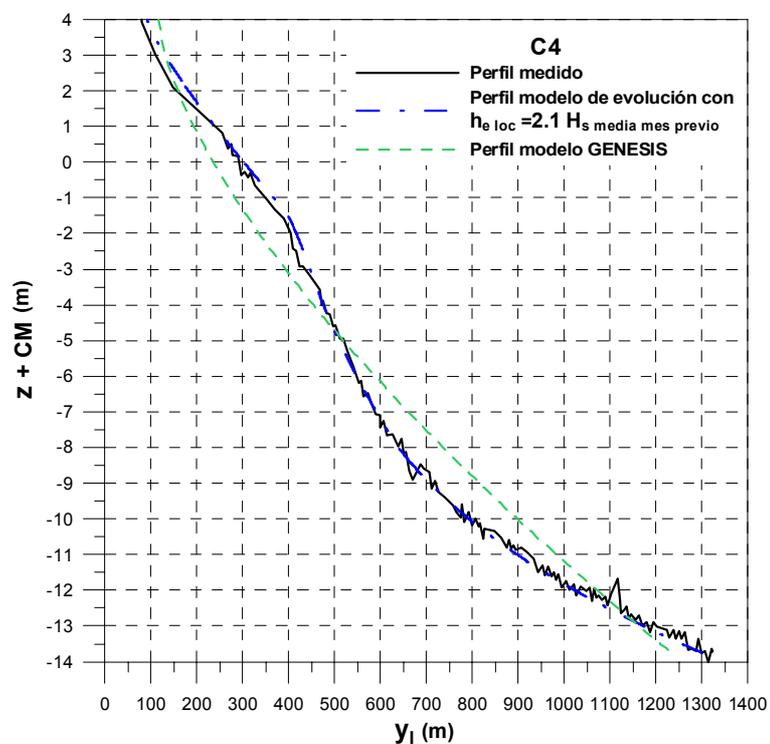


Figura 2.22- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS para la campaña C4

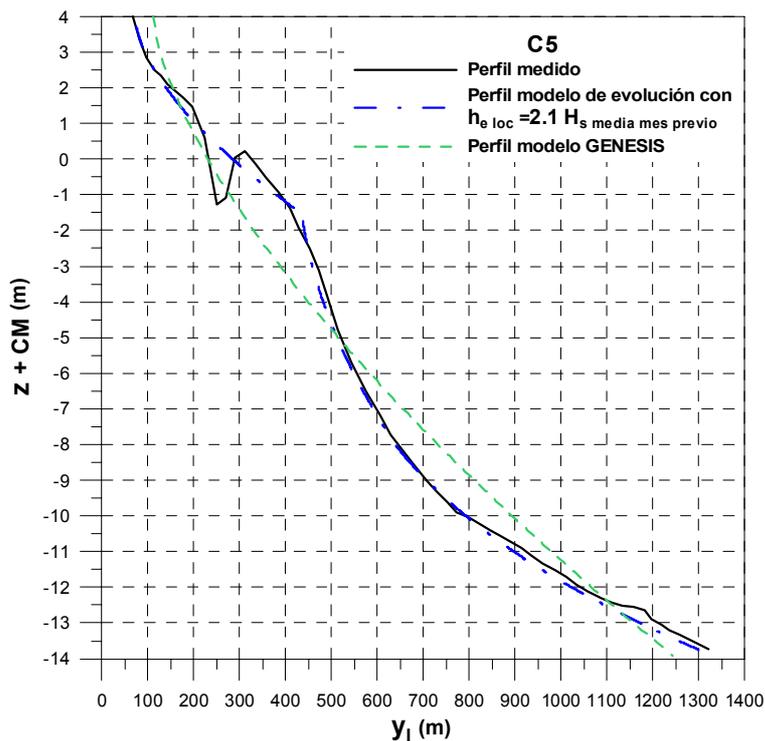


Figura 2.23- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS para la campaña C5

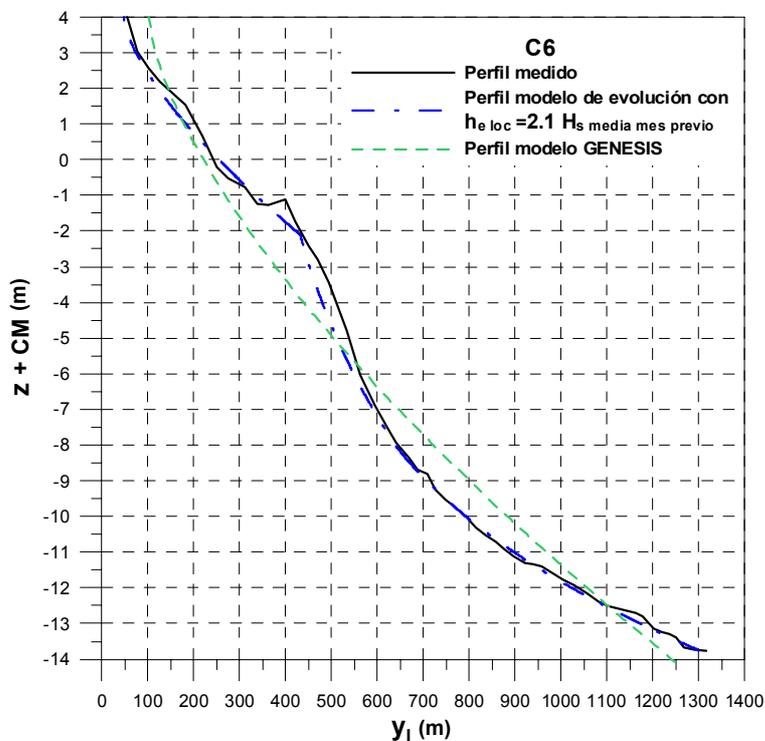


Figura 2.24- Comparación del perfil medido y los perfiles determinados con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS para la campaña C6

En estas cinco figuras de comparación de ambos modelos (figuras 2.20, 2.21, 2.22, 2.23 y 2.24), de nuevo téngase presente que aunque en el modelo GENESIS se ha extendido el perfil tipo Dean hasta una profundidad muy elevada (la cual es consecuente con la utilizada en el modelo de evolución propuesto), en un caso normal analizado con el modelo GENESIS el perfil se desarrolla hasta una profundidad más reducida.

Además, de la observación de estas figuras se puede notar que el modelo propuesto no sólo es más adecuado para la predicción de la línea de costa, sino también y especialmente para la representación del perfil completo de playa.

5.4. EJEMPLOS DE COMPARACIÓN DEL MODELO DE EVOLUCIÓN PROPUESTO FRENTE A LOS MODELOS TRADICIONALES DE UNA LÍNEA

En este apartado se van a presentar dos ejemplos de comparación de la evolución de una playa determinada con el modelo de evolución de medio-largo plazo propuesto y con un modelo tradicional de una línea (tipo GENESIS). El primero de estos casos corresponde a una situación en la que las variaciones temporales del área transversal son nulas, no existiendo gradiente de transporte longitudinal de sedimento. El segundo de los ejemplos consiste en una situación con variaciones temporales del área transversal generadas por gradiente de transporte longitudinal de sedimento.

5.4.1. CASO DE VARIACIONES TEMPORALES DEL ÁREA TRANSVERSAL NULAS

Este caso consiste en una costa rectilínea de 1200 metros de longitud. Las condiciones en los contornos de la misma corresponden a transporte longitudinal de sedimento nulo en ambos límites. El oleaje alcanza la costa con incidencia normal a ésta, siendo la secuencia temporal de alturas de ola significantes de 4, 3.5, 6, 5, 5.5 y 6.5 metros para cada estado de mar.

Este ejemplo es un caso típico de las variaciones experimentadas por la línea de costa asociadas con condiciones variables de la altura de ola (por consiguiente, se puede asimilar a los cambios estacionales de invierno-verano que experimenta la línea de costa).

En el modelo de evolución propuesto, para definir los diferentes tramos del perfil, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- En el tramo de rotura se ha utilizado un perfil potencial con exponente $2/3$ (perfil tipo Dean), con parámetro de forma constante determinado con la formulación de Dean (1987b) para un tamaño de grano de 0.2 milímetros ($A_R=0.0975 m^{1/3}$).
- En cuanto al tramo de asomeramiento o de transición, se ha empleado una expresión de tipo potencial y para la definición de la profundidad $h_{e\ loc}$ se ha trabajado con la expresión (2.127) propuesta.
- El tramo exterior se ha delimitado teniendo en cuenta que el límite exterior se encuentra asociado con una profundidad h_e de 14 metros, alcanzándose la misma a una distancia de 1300 metros. Asimismo, para definir el tramo exterior inicial, se ha considerado en el punto anterior una pendiente m_e de 0.006 y se ha definido el tramo de asomeramiento o de transición inicial hasta una distancia de 650 metros (este límite se encuentra asociado a la profundidad $h_{e\ loc}$ inicial). Otro dato necesario es la carrera de marea CM , que se ha establecido en 2 metros.

Por otra parte, en el modelo GENESIS el perfil de playa se define con un solo tramo, definiéndose con un perfil potencial con exponente $2/3$ (perfil tipo Dean). El parámetro de forma de este perfil de Dean se ha determinado con el objetivo de conservar la cantidad de sedimento del perfil inicial ($A_d=0.133 m^{1/3}$), (el modelo GENESIS utiliza una formulación para definir este parámetro de forma en función del tamaño de grano del sedimento). Asimismo, se ha considerado que la suma de la elevación de la berma D_B y de la profundidad de cierre D_C es de 16 metros. Se han elegido estos valores para ser consecuentes con los utilizados en el modelo de evolución propuesto para definir la suma de la profundidad h_e (14 metros) y de la carrera de marea CM (2 metros).

Analizando el caso presente se puede comprobar que, al ser la incidencia normal del oleaje y no existir gradientes longitudinales de la altura de ola, no se generan gradientes de transporte longitudinal de sedimento, siendo las variaciones temporales del área transversal nulas. El modelo GENESIS, así como el resto de los modelos tradicionales de una línea, sólo tienen en cuenta las variaciones de la línea de costa asociadas con este último transporte. Así pues, si se utiliza un modelo de este tipo, la línea de costa permanece invariable aunque la altura de ola sea variable. En la figura 2.25 aparece representada la línea de costa en este caso.

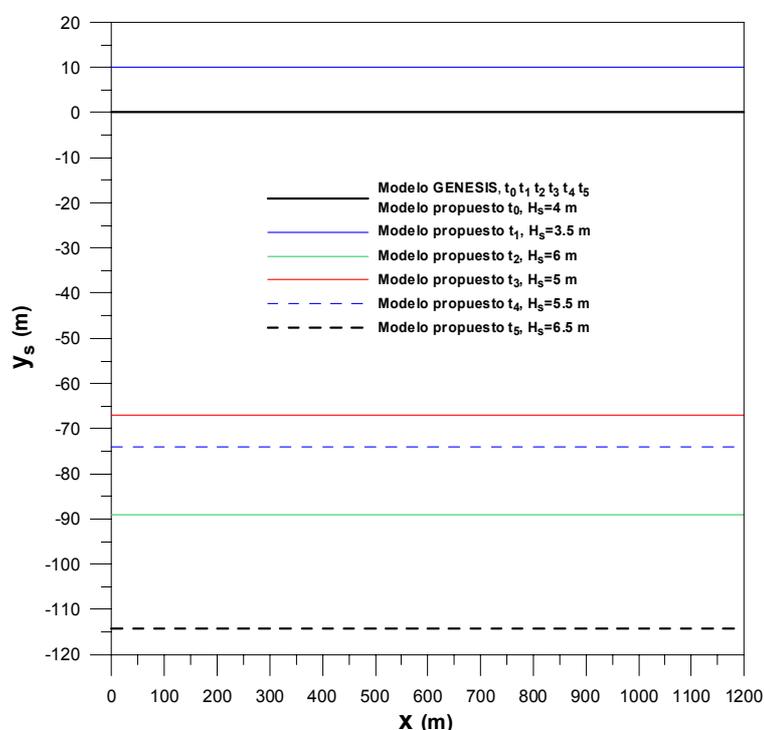


Figura 2.25- Comparación de la evolución de la línea de costa en una costa rectilínea de 1200 metros de longitud, con incidencia normal del oleaje y sin gradientes longitudinales de la altura de ola, determinada con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS

La importancia del modelo de evolución de medio-largo plazo propuesto radica precisamente en la determinación de la variación de la línea de costa asociada con variaciones temporales del área transversal (lo que hace el modelo GENESIS), así como las que no están relacionadas con estas variaciones, sino con una

redistribución del sedimento en el perfil por transporte transversal, como es el caso de este ejemplo. Adicionalmente a la línea de costa establecida con el modelo GENESIS, en la figura 2.25 se presenta la evolución de la línea de costa determinada con el modelo propuesto (con modelo de evolución de perfil).

En la figura 2.26 se presenta la evolución del perfil de playa determinada con el modelo de evolución propuesto. En el caso de utilizar el modelo GENESIS, ni varía la posición de la línea de costa, ni varía la forma del perfil de playa. Así pues, en este último caso a partir de la posición de la línea de costa inicial se desarrolla el perfil de Dean (véase figura 2.26).

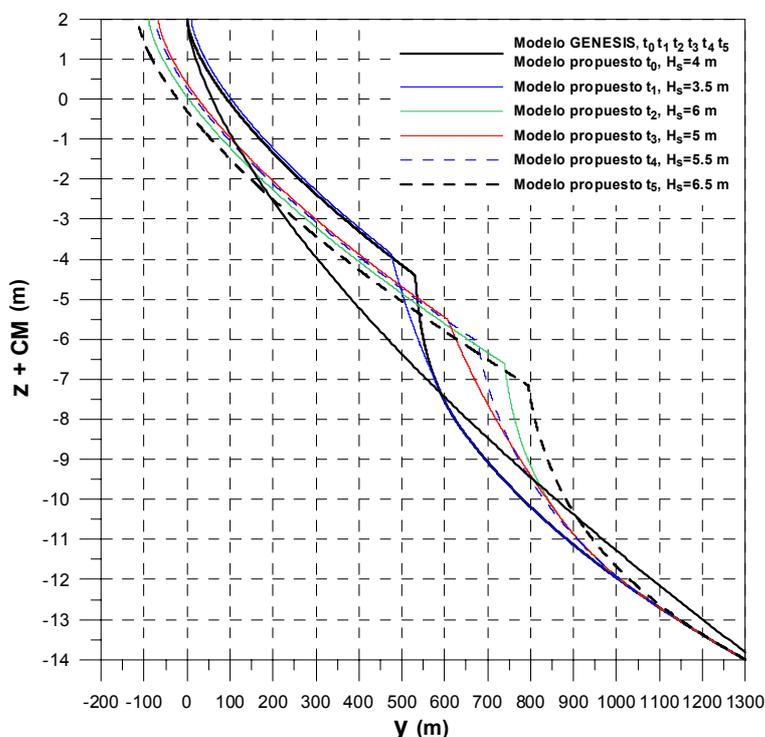


Figura 2.26- Comparación de la evolución de la línea de costa y del perfil de playa en una costa rectilínea de 1200 metros de longitud, con incidencia normal del oleaje y sin gradientes longitudinales de la altura de ola, determinada con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS

De la observación de las figuras 2.25 y 2.26, es relevante destacar que existen diferencias en la posición de la línea de costa de 115 metros, las cuales con el modelo

de evolución de medio-largo plazo propuesto se pueden describir, y sin embargo, con el modelo GENESIS se está considerando que la línea de costa no ha cambiado de posición. En estas circunstancias el modelo GENESIS no puede ser utilizado. Tampoco se debe olvidar que este modelo, además de ser inadecuado para la predicción de la evolución de la línea de costa en estas situaciones, tampoco puede ser utilizado para la predicción de la evolución del perfil. Esta es la razón por la que este último modelo no puede ser aplicado en escalas de medio plazo, siendo sólo aplicable en el largo plazo.

5.4.2. CASO DE VARIACIONES TEMPORALES DEL ÁREA TRANSVERSAL NO NULAS

En este ejemplo se presenta una costa rectilínea de 1200 metros de longitud, con dos espigones infinitamente largos en cada uno de los contornos (o equivalentemente con condición de transporte longitudinal de sedimento nulo en cada uno de los contornos). En este caso las condiciones del oleaje son constantes. En concreto, las características del mismo en profundidades indefinidas son: altura de ola significativa de 3 metros, período de pico de 10 segundos y ángulo de incidencia de 10 grados.

Este ejemplo es radicalmente opuesto al anterior ya que las variaciones de la línea de costa se encuentran asociadas con el transporte longitudinal de sedimento generado por la incidencia oblicua del oleaje. Este transporte ocasiona variaciones temporales del área transversal, que se traducen en variaciones de la línea de costa.

❖ Ambos modelos, tanto el modelo GENESIS, como el modelo de evolución de medio-largo plazo propuesto, se han ejecutado utilizando los siguientes parámetros comunes:

- 25 celdas para definir la línea de costa.
- 50 metros de anchura de cada celda.
- 12 horas de intervalo de tiempo de ejecución de los modelos.

- Para la obtención del transporte longitudinal de sedimento se ha utilizado la formulación de Ozasa y Brampton (1980) indicada en el anejo I con coeficiente de oblicuidad de 0.7 y con coeficiente de gradiente de altura de ola de 0.5. Téngase presente que este último término es irrelevante en este ejemplo, ya que no existen gradientes longitudinales de altura de ola.

- ❖ En cuanto a los parámetros específicos de cada modelo:

En el modelo de evolución propuesto, para definir los diferentes tramos del perfil, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- En el tramo de rotura se ha utilizado un perfil potencial con exponente $2/3$ (perfil tipo Dean), con parámetro de forma constante obtenido con la formulación de Dean (1987b) para un tamaño de grano de 0.3 milímetros ($A_R=0.119 m^{1/3}$).

- En cuanto al tramo de asomeramiento o de transición, se ha empleado una expresión de tipo potencial y para la definición de la profundidad $h_{e\ loc}$ se ha trabajado con la expresión (2.127) propuesta.

- El tramo exterior se ha delimitado teniendo en cuenta que el límite exterior se encuentra asociado con una profundidad h_e de 13.75 metros, alcanzándose la misma a una distancia de 1300 metros. Asimismo, para definir el tramo exterior inicial, se ha considerado en el punto anterior una pendiente m_e de 0.00555 y se ha definido el tramo de asomeramiento o de transición inicial hasta una distancia de 650 metros (este límite se encuentra asociado a la profundidad $h_{e\ loc}$ inicial). Otro dato necesario es la carrera de marea CM , que se ha establecido en 4 metros.

Por otra parte, en el modelo GENESIS el perfil de playa se define con un solo tramo, definiéndose con un perfil potencial con exponente $2/3$ (perfil tipo Dean). El parámetro de forma constante de este perfil se ha obtenido con la formulación de Dean (1987b) para un tamaño de grano de 0.3 milímetros ($A_d=0.119 m^{1/3}$).

Asimismo, se ha considerado que la suma de la elevación de la berma D_B y de la profundidad de cierre D_C es de 17.75 metros. De nuevo, merece la pena recalcar que se han elegido estos valores para ser consecuentes con los utilizados en el modelo de evolución propuesto para definir la suma de la profundidad h_e (13.75

metros) y de la carrera de marea CM (4 metros). Ahora bien, una variación de estos parámetros en el modelo GENESIS cambiaría las escalas temporales de la evolución de la línea de costa. Además, téngase presente que en un caso normal analizado con el modelo GENESIS, se suele extender el perfil de playa hasta una profundidad más reducida.

En la figura 2.27 se presentan los resultados obtenidos de la evolución de la línea de costa para el caso analizado al utilizar ambos modelos (modelo propuesto y modelo GENESIS). En esta figura se puede observar que por el hecho de utilizar un modelo u otro se están modificando las escalas temporales de la evolución de la línea de costa. Sin embargo, la posición de equilibrio de la línea de costa es exactamente la misma.

En el equilibrio, la línea de costa se gira con respecto a la inicial hasta que alcanza 7.7 grados con respecto a esta última. En este momento, el oleaje en rotura incide normal a la línea de costa, siendo nulo el transporte longitudinal de sedimento, alcanzándose de esta forma la posición de equilibrio. En este caso particular, al utilizar el modelo propuesto se necesitan 42 días para alcanzar la posición de equilibrio de la línea de costa. En el caso de emplear el modelo GENESIS se necesitan 105 días.

Nótese que con ambos modelos se obtiene la misma posición de equilibrio, pero las escalas temporales de la evolución son distintas. De este caso particular, no se debe extraer la conclusión de que el modelo de evolución es más rápido que el modelo GENESIS, ya que la rapidez de este último modelo está directamente vinculada con la elección de los parámetros de elevación de berma y profundidad de cierre. Es precisamente el hecho de haber elegido una suma de elevación de berma y profundidad de cierre tan elevada la que ocasiona que el modelo GENESIS sea más lento que el modelo propuesto.

Como resultado del estudio de este ejemplo, se puede concluir que aunque se analice un caso de evolución de la línea generada por variaciones temporales del área transversal (lo cual es para lo que en principio los modelos tradicionales de una línea parecían idóneos), el hecho de emplear un modelo tradicional de una línea, en lugar

de un modelo de evolución de medio-largo plazo (como el modelo propuesto), tiene como consecuencia una inadecuada predicción de la evolución de la línea de costa (diferente escala temporal). Ahora bien, en el equilibrio la línea de costa determinada es idónea.

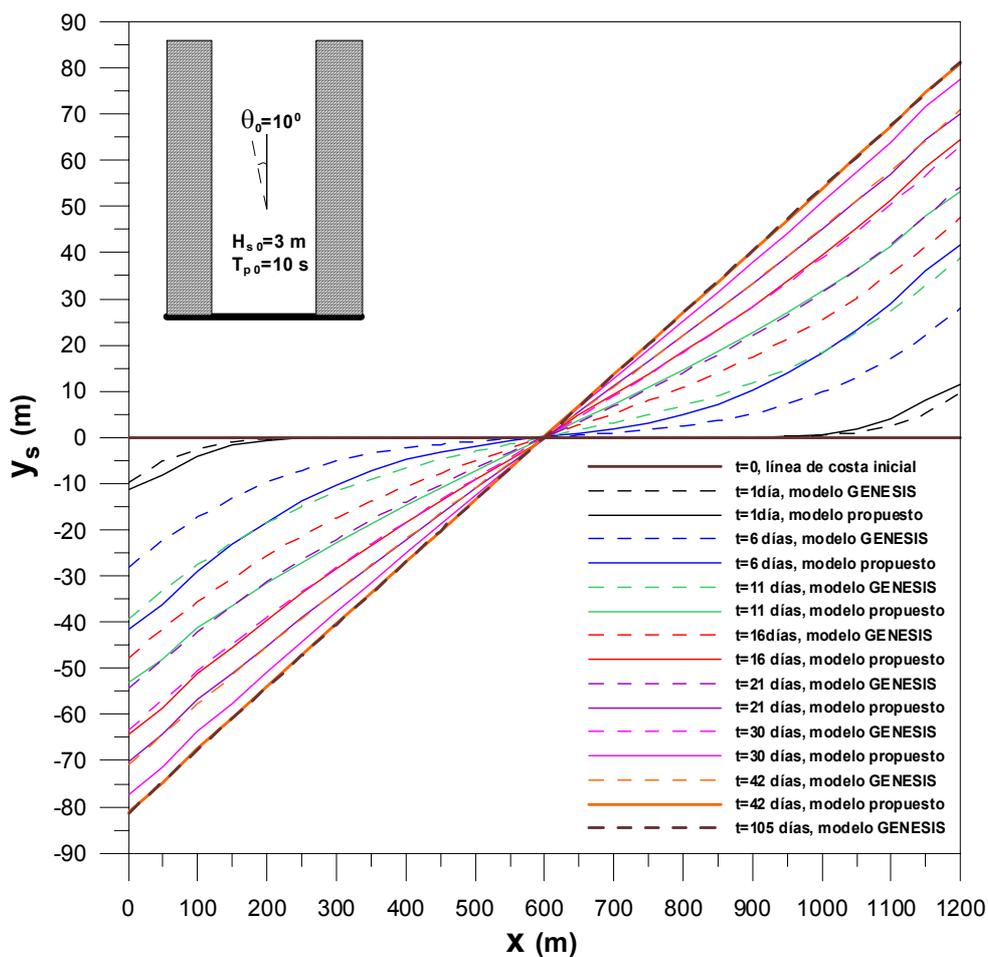


Figura 2.27- Comparación de la evolución de la línea de costa en una costa rectilínea de 1200 metros de longitud con dos diques infinitamente largos en los contornos determinada con el modelo propuesto y con el modelo GENESIS

5.5. CONCLUSIONES

Los principales aportes de este capítulo son los siguientes:

❖ Se ha desarrollado un modelo de evolución de playas de medio-largo plazo. Con este fin, se ha propuesto un modelo de evolución de perfil que incorpora la definición del perfil completo de playa, diferenciándose en el mismo la zona de rotura, la zona de asomeramiento o de transición, la zona exterior y la zona geológica.

El modelo de evolución propuesto asume que el tramo de rotura se encuentra en equilibrio con el estado de mar incidente y que el tramo de asomeramiento o de transición se encuentra en evolución. Un aspecto de considerable relevancia dentro de este modelo es la relación entre el tramo de asomeramiento o de transición y el tramo exterior.

Además, el modelo de evolución propuesto posee como condicionante externo las variaciones temporales del área transversal que le vienen impuestas con las ecuaciones generales de conservación del sedimento derivadas en el capítulo 2.

❖ El modelo de evolución desarrollado ha sido validado con datos de campo. Se ha podido verificar dicho modelo, tanto para reproducir acertadamente la posición de la línea de costa, como el perfil completo de playa. Merece la pena destacar que el éxito del modelo de evolución propuesto radica especialmente en considerar el perfil completo, con todos sus tramos, lo cual permite equilibrar la cantidad de sedimento y reproducir adecuadamente la posición de la línea de costa.

❖ A partir de los anteriores datos de campo, se han propuesto dos expresiones (ecuaciones 2.127 y 2.128) para definir la profundidad $h_{e\ loc}$ que separa el tramo de asomeramiento o de transición del tramo exterior del perfil de playa. Con ambas expresiones se ha establecido la relación entre la profundidad indicada y la altura de ola significativa media del mes previo a la medida del perfil.

Aunque se ha podido comprobar la similitud existente entre la ecuación (2.128) y la expresión obtenida por Capobianco et al. (1997) para la determinación de la profundidad de cierre para escalas de corto a medio plazo (véase capítulo 4), se

resalta, no obstante, la necesidad de disponer de más datos de campo para poder precisar las expresiones (2.127) y (2.128) propuestas para la determinación de la profundidad $h_{e\ loc}$, así como elegir la más adecuada.

❖ Se ha propuesto una expresión (ecuación 2.130) para definir el límite exterior o geológico con profundidad asociada h_e . Este límite es un punto de considerable relevancia dentro del modelo de evolución propuesto, ya que la batimetría completa se está definiendo hasta el mencionado punto. Dicho límite viene marcado por la geología propia de cada lugar, debiendo ser determinado del conocimiento de cada zona en particular. La expresión propuesta se ha establecido con base en los datos de campo para la definición de movimiento incipiente de Hallermeier (1981), obteniéndose una relación entre la profundidad indicada y la altura de ola significativa con período de retorno de un año. Sin embargo, merece la pena destacar que la expresión indicada se debe utilizar con reservas y en situaciones donde sea imposible la obtención de la profundidad analizada a partir del conocimiento de la zona.

❖ Se ha comprobado las ventajas de utilizar un modelo de evolución de medio-largo plazo frente a los modelos tradicionales de una línea mediante unos casos de aplicación de ambos modelos. En el caso de que la variación de la línea de costa esté asociada a una redistribución del sedimento en el perfil y las variaciones temporales del área transversal sean nulas, los modelos tradicionales de una línea son totalmente ineficientes. Por otra parte, en el caso de que la evolución de la línea de costa esté asociada a variaciones temporales del área transversal, los modelos tradicionales de una línea son adecuados para determinar la forma de equilibrio de la línea de costa, pero son inadecuados para predecir las escalas temporales de la evolución de la misma.