

SECCIÓN 7

ANEJOS



ANEJO I

ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN DE PLAYAS

I.1. INTRODUCCIÓN

La presente Tesis se ubica en el contexto de los modelos de predicción de evolución de playas. Con el objetivo de una mayor claridad en la lectura del primer capítulo, el estudio detallado del estado del arte de estos modelos se lleva a cabo en este anejo.

En una primera fase se realizará un estudio de las diferentes clasificaciones y tipologías de modelos de evolución, diferenciándose entre los modelos de evolución en el corto-medio plazo y los modelos de evolución en el largo plazo.

Posteriormente se llevará a cabo un estudio en profundidad de los modelos de evolución en el largo plazo, los cuales habitualmente son denominados como modelos de una línea o de línea de costa (one-line o shoreline models), se analizarán las características esenciales de estos modelos, los modelos analíticos existentes, así como los modelos numéricos, con especial mención al modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989).

Finalmente se describirán las limitaciones principales de los modelos de evolución en el largo plazo actuales, así como los diferentes estudios llevados a cabo con la intención de eliminar dichas limitaciones. Dentro de estos estudios, se diferenciarán los principales modelos que tratan de extender el rango de aplicación de los modelos de largo plazo al medio plazo (modelos de una línea con transporte transversal de sedimento, modelos híbridos y modelos de N líneas), así como los diferentes modelos que pretenden resolver los problemas existentes cuando se aplican en zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes.

I.2. CLASIFICACIONES DE LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN DE PLAYAS

La evolución de la morfología costera involucra procesos físicos complejos que no pueden ser descritos exactamente en términos matemáticos. Las formulaciones utilizadas en el modelado son: o bien deterministas, basadas en leyes

físicas conocidas o bien empíricas, establecidas a partir de medidas en laboratorio y en campo.

Las dificultades principales que se encuentran en el estudio de las playas son: la gran variedad de escalas y la tridimensionalidad de los procesos involucrados. Consecuentemente, en la actualidad no existen modelos de predicción de evolución de playas que puedan ser aplicados en todo el rango de escalas y puedan ser utilizados para estudiar cualquier problema que se presente. Precisamente con la idea de solventar de alguna manera estas dificultades, se recurre a las clasificaciones, con las que se propone utilizar herramientas específicas para cada situación en particular.

Con respecto a las escalas, se suele diferenciar la escala temporal objetivo en horas-días, días-años o años-décadas, denotándose los modelos aplicables en cada una de estas escalas como modelos de corto, medio o largo plazo, respectivamente.

Con referencia a la tridimensionalidad, usualmente se establecen dos direcciones principales que corresponden al perfil y a la planta de la playa, las cuales se suponen independientes en el contexto de una determinada dinámica.

Así pues, se pueden encontrar diversas clasificaciones de los modelos de predicción de evolución de playas, mediante las cuales se diferencian los tipos de modelos principalmente por su naturaleza, exactitud, costes de computación de cada modelo, escalas de aplicación y dirección principal de los procesos involucrados. Asimismo, téngase presente que con el paso del tiempo suelen aparecer diferentes clasificaciones asociadas a la aparición de modelos particulares con la intención de resolver problemas concretos.

Con carácter ilustrativo se presentan a continuación algunas de las clasificaciones más comunes que han ido surgiendo paulatinamente con el paso del tiempo:

➤ Kraus (1983) clasificó los modelos de evolución de playas como se presenta en la figura I.1. El mencionado investigador diferenció cuatro clases de modelos: modelos de una línea (one-line models) en escalas de largo plazo, modelos multi-líneas (multi-line models) en escalas de medio-largo plazo, modelos en 3D (3-

D models) en escalas de corto-medio plazo y modelos de macro-escala (macro-process models) en escalas de muy largo plazo.

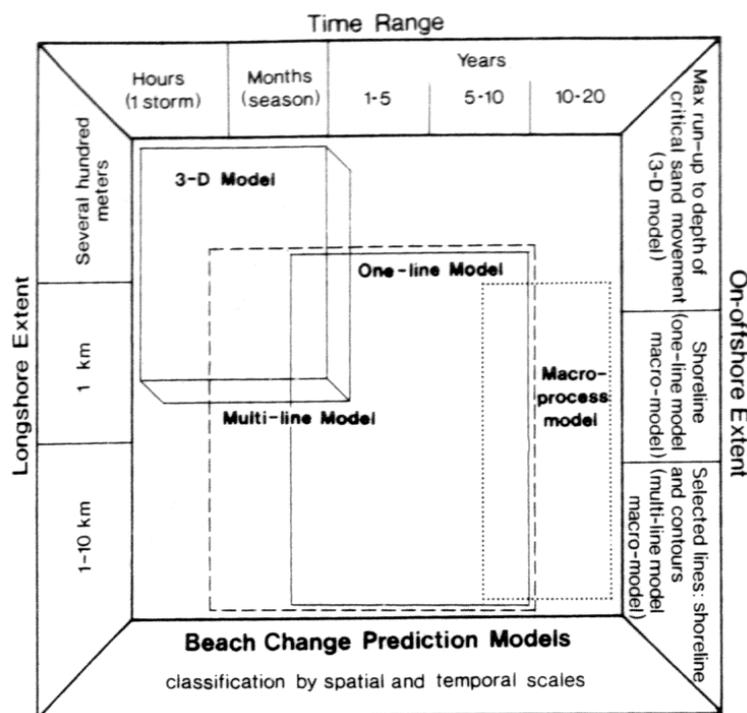


Figura I.1- Clasificación de los diferentes modelos de evolución de playas (tomada de Kraus, 1983)

Con la clasificación de Kraus (1983), el propósito de los modelos de una línea era simular las características esenciales de la planta de las playas, mediante la determinación de la línea de costa, en escalas de largo plazo (años-décadas).

Los modelos multi-líneas (también denominados como modelos de N líneas en la actualidad) eran una extensión de los modelos de una línea en los que, adicionalmente a la línea de costa, se estudiaba la evolución de otros contornos, intentando de esta forma ampliar la aplicabilidad de los modelos de una línea a escalas temporales de medio plazo.

Por otra parte se encontraban los modelos en 3D, los cuales al pretender simular las características locales de la batimetría de la zona de estudio, no podían

ser utilizados como herramienta ingenieril para escalas temporales superiores a unos meses.

Finalmente Kraus (1983) definió un modelo de macro-escala aplicable para la determinación de tendencias a gran escala del cambio de la forma en planta de la playa (decenas de años).

➤ Posteriormente, Shimizu et al. (1996) establecieron otra clasificación (véase figura I.2), la cual, aunque posee similitudes con la anterior, se diferencia principalmente en la aparición de un nuevo tipo de modelos perteneciente al grupo de los modelos de evolución en 3D y denominados como modelos de medio plazo. Estos modelos de medio plazo surgieron con la idea de extender el rango de aplicación de los modelos en 3D a escalas mayores. Con este objetivo se simplificó el problema en 3D, siguiendo un esquema en 2DH, el cual básicamente consistía en determinar las corrientes costeras promediadas en profundidad, calculando seguidamente el transporte de sedimento y los cambios batimétricos.

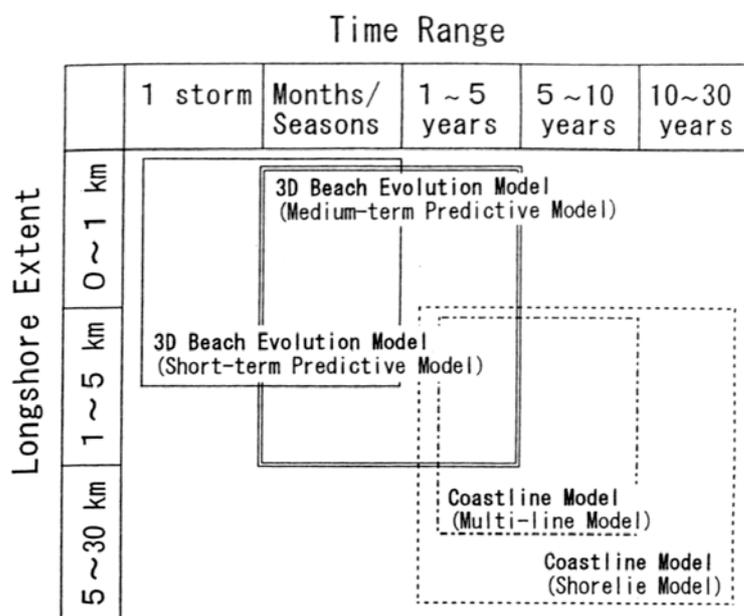


Figura I.2- Clasificación de los diferentes modelos de evolución de playas (tomada de Shimizu et al., 1996)

Asimismo, con la idea de fomentar la utilización de los modelos de medio plazo, Shimizu et al. (1996) recortaron la aplicación de los modelos multi-líneas, limitándose su uso según los anteriores autores a las escalas temporales de largo plazo.

➤ Otra de las clasificaciones más comunes es la establecida por Hanson (2000), la cual aparece representada en la figura I.3. Clasificación que consideró a su vez como referencia la propuesta por Hanson y Kraus (1989).

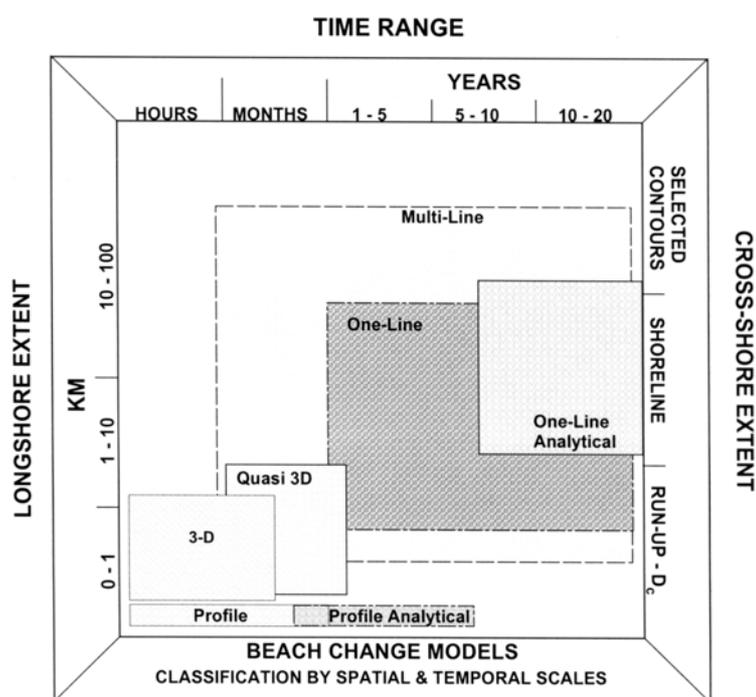


Figura I.3- Clasificación de los diferentes modelos de evolución de playas (tomada de Hanson, 2000)

En esencia, esta clasificación, además de recuperar la importancia de los modelos multi-líneas en escalas temporales de medio plazo (escalas de aplicación de estos modelos de medio-largo plazo), incorporó varios tipos de modelos nuevos:

- Los modelos de evolución de perfil en escalas de corto a medio plazo.

- Los modelos Quasi-3D, los cuales constituyen una simplificación de los modelos en 3D, con la idea de ampliar el rango de aplicación de estos últimos a escalas temporales de medio plazo. Estos modelos pueden ser aplicables en escalas espaciales hasta del orden de los kilómetros, abarcando, por lo tanto, escalas espaciales mayores que los modelos de perfil, pero sin alcanzar las escalas espaciales de los modelos en planta. En cuanto a la escala temporal, su rango se extiende, en el mejor de los casos, hasta el medio plazo.

➤ Finalmente, entre las clasificaciones más recientes se encuentra la propuesta por Hanson et al. (2003), la cual también se basó en la establecida por Hanson y Kraus (1989). Esta clasificación aparece representada en la figura I.4; es bastante parecida a la anterior. Básicamente aparecen diversas variantes de modelos, con los que se pretende ampliar el rango de aplicación de éstos.

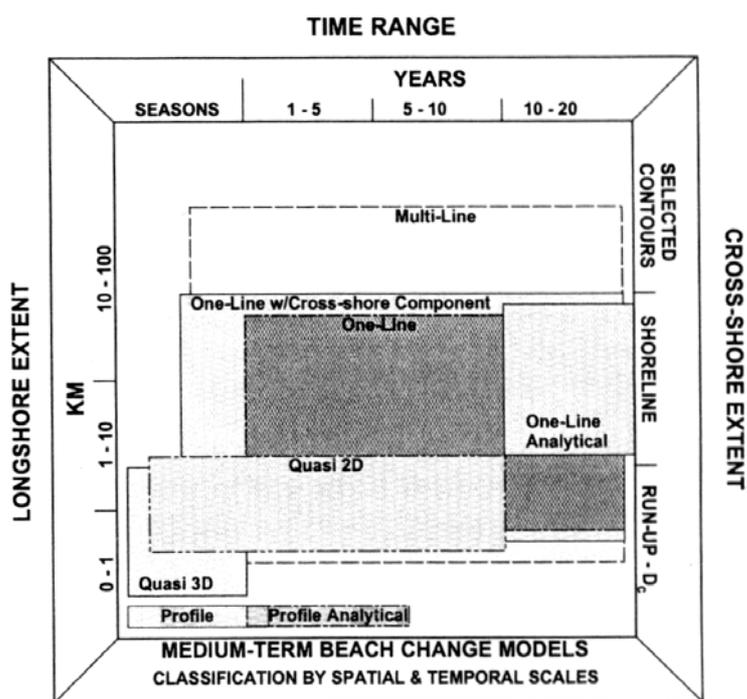


Figura I.4- Clasificación de los diferentes modelos de evolución de playas (tomada de Hanson et al., 2003)

I.3. TIPOS DE MODELOS DE EVOLUCIÓN DE PLAYAS

Como se ha demostrado en el anterior apartado, se pueden encontrar diversas clasificaciones, debido no sólo a una cierta subjetividad y arbitrariedad en el establecimiento de las mismas, sino también y especialmente asociado a la aparición de nuevos modelos con el paso del tiempo.

Además, las tipologías de los modelos de evolución de playas se pueden establecer con base a diferentes criterios, como se muestra a continuación:

- ✓ En función del método de resolución se tienen modelos numéricos o bien soluciones analíticas.
- ✓ En función de la dirección espacial principal de la playa se pueden diferenciar los modelos de perfil o bien los modelos de planta.
- ✓ En función de la escala temporal de aplicación del modelo se distinguen los modelos de corto (horas-días), medio (días-años) o largo plazo (años-décadas).
- ✓ En función del “*tipo de modelo*” se encuentran los modelos a los que se les impone una tendencia al equilibrio (modelos de bucle cerrado) o bien los modelos que tratan de modelar los procesos físicos de pequeña escala (modelos de bucle abierto).

Combinando todos estos criterios se pueden obtener diferentes tipologías. Sin embargo, en este anejo se van a estudiar los modelos de predicción de evolución de playas clasificados en función de la escala temporal de aplicación: en un primer punto se van a analizar los modelos en el corto-medio plazo, distinguiéndose entre los modelos de evolución de perfil y los modelos de evolución en 3D, y posteriormente se estudiarán los modelos en el largo plazo (modelos de una línea).

I.3.1. MODELOS DE EVOLUCIÓN EN EL CORTO-MEDIO PLAZO

Dentro de este tipo de modelos, se van a diferenciar los modelos de evolución de perfil y los modelos en 3D.

I.3.1.1. Modelos de evolución de perfil

Estos modelos se utilizan para predecir la evolución de un perfil de playa en escalas temporales pequeñas (tormentas, días). Sin embargo, en el estado de conocimiento actual no son apropiados para predicciones en escalas temporales mayores. En períodos superiores a algunos días este tipo de modelos se desestabiliza y genera soluciones físicamente imposibles.

Los modelos de evolución de perfil simulan la evolución del perfil de playa causada principalmente por transporte transversal de sedimento. Así pues, las variaciones en el transporte longitudinal de sedimento no se tienen en cuenta, pues solamente se analiza un perfil a lo largo de la costa para cada instante de tiempo.

Básicamente los modelos numéricos de evolución de perfil se pueden diferenciar en dos grandes familias: los modelos de bucle cerrado o basados en una formulación de equilibrio y los modelos de bucle abierto, que tratan de modelar los procesos físicos en pequeña escala.

I.3.1.1.1. MODELOS DE BUCLE CERRADO

Los modelos de bucle cerrado plantean la aproximación más simple posible, prescindiendo de la descripción del flujo y del transporte local para recurrir a un único parámetro agregado, el cual en principio rige el comportamiento general del perfil. Este parámetro agregado suele ser la disipación de energía del oleaje incidente por unidad de volumen, basándose la mayoría de los modelos de equilibrio existentes en la actualidad en la hipótesis de disipación de Dean (1977).

Dentro de este tipo de modelos se encuentran los siguientes:

- EDUNE (Kriebel, 1982; Kriebel y Dean, 1985).
- SBEACH (Larson y Kraus, 1989b).
- CROSS (Zheng y Dean, 1997).

- PEQUE (García, 2000).

Con estos modelos se puede determinar, por ejemplo, la erosión en la playa producida por una tormenta y su posterior recuperación en períodos de calma (Kriebel, 1982; Kriebel y Dean, 1985; Larson, 1988; Larson et al., 1988; Larson y Kraus, 1989b). Asimismo, se puede calcular la evolución del perfil tras un vertido de arena y sometido a la acción del oleaje (Kraus y Larson, 1988; Larson y Kraus, 1989a).

I.3.1.1.2. MODELOS DE BUCLE ABIERTO

Este tipo de modelos pretende llegar a la esencia de los fenómenos físicos, utilizándose modelos hidrodinámicos y formulaciones de transporte de sedimentos con la finalidad de determinar los cambios morfológicos del perfil de playa, pero sin incluir una tendencia al equilibrio.

Se han desarrollado varios modelos de predicción de la evolución de perfil, los cuales se basan en la rotura del oleaje como el proceso generador de las barras del perfil (Dally y Dean, 1984; Kriebel y Dean, 1984; Larson y Kraus, 1989b). En estos modelos, una vez obtenida la transformación del oleaje, se calculan las velocidades promediadas en el tiempo a través del perfil. El transporte transversal de sedimento se estima en función de estas velocidades horizontales y de las condiciones locales del fondo, haciendo uso de diferentes formulaciones (como por ejemplo la formulación de Bailard, 1981).

Dentro de este tipo de modelos se encuentran, entre otros, los siguientes:

- UNIBEST-TC (Stive y Battjes, 1984; Roelvink et al, 1995).
- LITCROSS (Brøker-Hedegaard et al., 1991).
- PETRA 2.0 (GIOC, 2001d).

Estos modelos, aunque funcionan bien en erosión, son menos capaces de acumular arena a lo largo de períodos de tiempo mayores. Además, debido al gran

número de parámetros que requieren, necesitan un cuidadoso calibrado de los mismos.

I.3.1.2. Modelos de evolución en 3D

Los modelos de evolución de playas completamente en 3D calculan la hidrodinámica y los cambios morfológicos en un dominio en 3D, sin realizar ningún tipo de hipótesis sobre la distribución vertical de velocidades o concentraciones, calculando el transporte por fondo y por suspensión, teniendo en cuenta procesos de arrastre, advección y difusión del sedimento. En la actualidad se utilizan para calcular cambios en la topografía local de una playa y en un corto intervalo de tiempo, pues su empleo en el largo plazo no sólo requiere grandes tiempos de computación, sino que actualmente es todavía cuestionable su validez (ya que se desestabilizan y generan soluciones físicamente imposibles).

En estos modelos, como se realiza el cálculo de oleaje, corrientes (asociadas al oleaje o a la marea), transporte de sedimentos y cambio de la topografía del fondo en todo el dominio de interés, su utilización, además de ordenadores potentes, requiere gran experiencia, pues con el fin de poder aplicarlos a la simulación de las características locales de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos, es imprescindible una extensa verificación y análisis de sensibilidad. Sólo se han realizado limitadas aplicaciones de estos modelos en determinados proyectos (Vemulakonda et al., 1988, Watanabe, 1988).

Una variante de estos modelos son los modelos Quasi-3D (Briand y Kamphuis,1990; Roelvink et al.,1994), en los que se acopla un modelo vertical de dos dimensiones (2DV) con un modelo horizontal de dos dimensiones (2DH o modelo de área costera). El primer modelo calcula los perfiles de velocidad y el segundo determina la circulación costera, el transporte de sedimentos y los correspondientes cambios de la batimetría. Este tipo de modelo no es válido para las predicciones de largo plazo, requiere considerable tiempo de computación y datos detallados para su verificación.

Los modelos 2DH son otra clase más convencional de los modelos de evolución de playas en 3D. Este tipo de modelos no resuelve ni el flujo, ni el transporte en cada punto de la columna de agua, sino que utiliza las ecuaciones promediadas en la coordenada vertical z y formulaciones de transporte de sedimento con variables agregadas (velocidad orbital en el fondo o la corriente promediada en un período). El esquema seguido por los modelos 2DH consiste en determinar las corrientes costeras promediadas en profundidad, calculando seguidamente el transporte de sedimento y los cambios batimétricos.

Ejemplos de modelos 2DH son:

- LITPACK (DHI, 2001).
- 3D-SHORE (Shimizu et al., 1996).
- TELEMAC (Péchon y Teisson, 1996).
- MOPLA 2.0 (GIOC, 2001c).

Los modelos 2DH pueden estar acoplados a modelos de una línea con la intención de determinar las variaciones experimentadas por la línea de costa, denotándose en este caso como modelos híbridos (LITPACK, 3D-SHORE).

De Vriend et al. (1993) se refirieron a esta clase de modelos como modelos de área costera de medio plazo 2DH.

Finalmente se puede concluir que todos estos modelos en 3D son completamente deterministas y se basan en leyes físicas conocidas. Como la intención de estos modelos es predecir parámetros de procesos locales (oleaje, corrientes y transporte de sedimentos), requieren una base de datos detallada para la calibración, verificación y análisis de sensibilidad. Además, requieren tiempos de computación relativamente grandes. A pesar de su alto grado de sofisticación y tiempo de cálculo extenso, la exactitud de este tipo de modelos es todavía cuestionable. Asimismo, involucran coeficientes empíricos, tales como los relacionados con la fricción en el fondo, con la mezcla turbulenta y con el transporte de sedimentos, que son pobremente conocidos. Integrando la distribución local

calculada de transporte de sedimento transversalmente y para largos períodos de tiempo conduce a resultados erróneos, pues pequeñas imprecisiones locales se amplifican en el largo plazo. En consecuencia, no deben ser utilizados para estas escalas temporales.

Una revisión de los modelos disponibles realizada por Roelvink y Brøker (1993) mostró que son necesarios más estudios y mejoras para determinados constituyentes, tales como el efecto de las ondas largas y más definición del campo de corrientes y oleaje. Por el contrario, modelos más simples y que utilizan fórmulas empíricas derivadas del laboratorio y de medidas de campo, proporcionan resultados similares o incluso más realistas. Asimismo, utilizan datos usualmente disponibles en la mayoría de las aplicaciones ingenieriles.

I.3.2. MODELOS DE EVOLUCIÓN EN EL LARGO PLAZO (MODELOS DE UNA LÍNEA)

En este apartado se van a estudiar los modelos de evolución de la planta de las playas (de unos pocos cientos de metros a unos cientos de kilómetros) en el largo plazo (años a décadas). Los modelos más comunes de este tipo son los modelos de una línea o de línea de costa (one-line o shoreline models). Este tipo de modelos se ha venido utilizando en los últimos años por ser una herramienta que permite simplificar el problema real, requiriendo poco tiempo de ordenador para conseguir resultados. Sin embargo, los modelos actuales no pueden ser utilizados en escalas temporales más pequeñas, en las que es necesario tener en cuenta la variabilidad experimentada por el perfil de playa. Así pues, son incapaces de predecir los cambios locales en la topografía del fondo.

En los modelos de una línea o de línea de costa, la evolución de la playa se representa por el cambio de la línea de costa. El cambio de la línea de costa se produce en este tipo de modelos por las variaciones del transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la costa y en el tiempo. Se supone que el perfil de playa no cambia de forma y sólo se traslada paralelamente a sí mismo hasta la profundidad límite o profundidad de cierre, tal y como se puede observar en la figura I.5.

Los efectos del transporte transversal de sedimento, tales como la erosión producida por tormentas o bien el movimiento cíclico de la posición de la línea de costa asociado con las variaciones estacionales del oleaje, no pueden ser representados con este tipo de modelos que asumen forma de perfil constante.

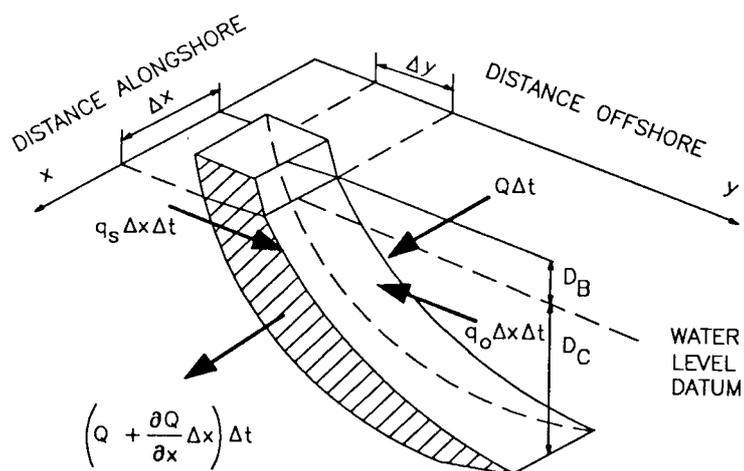


Figura I.5- Representación esquemática de una playa en el modelo de una línea GENESIS (tomada de Hanson y Kraus, 1989)

El primer modelo analítico de evolución de la línea de costa fue introducido por Pelnard-Considère (1956), siendo la teoría de una línea originaria de este autor.

Posteriormente con el avance en los ordenadores, se han ido desarrollando diferentes modelos numéricos de una línea, con los que se puede simular la evolución de la línea de costa para un amplio rango de playas, estructuras costeras, características de oleaje y condiciones de contorno.

Como ejemplos de estos modelos más generales se encuentran los siguientes:

- GENESIS (Hanson y Kraus, 1989).
- ONELINE (Kamphuis, 1993; Dabees y Kamphuis, 1997, 1998).

I.4. ESTUDIO DE LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN EN EL LARGO PLAZO O MODELOS DE UNA LÍNEA

En el anterior apartado se realizó un estudio sobre las características de los diferentes modelos de evolución de playas. En este apartado se va a realizar una descripción más detallada de los modelos de evolución de playas en el largo plazo o modelos de una línea. En primer lugar se analizarán las características e hipótesis esenciales de los modelos de una línea y posteriormente se describirán los diferentes estudios realizados sobre este tipo de modelos, tanto los que siguieron la vía analítica como los que utilizaron la vía numérica.

I.4.1. CARACTERÍSTICAS E HIPÓTESIS ESENCIALES

La ecuación de partida de los modelos de una línea corresponde a la ecuación de conservación de la masa de sedimento dentro del flujo turbulento (Abbott y Price, 1994). A partir de esta ecuación y realizando una serie de pasos que han sido descritos en el capítulo 2 de la Tesis, se determina la ecuación básica de los modelos de una línea, que aparece indicada en la ecuación (I.1).

$$\boxed{\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \pm q} \quad (\text{I.1})$$

con: A el área transversal del perfil de playa, Q el transporte longitudinal de sedimento (volumen total por unidad de tiempo) y q un posible aporte (+) o pérdida (-) de sedimento (volumen total por unidad de longitud y por unidad de tiempo).

Utilizando la hipótesis fundamental de los modelos de una línea, la cual consiste en asumir que el perfil de playa no cambia de forma (ni en el espacio, ni en el tiempo) y sólo se traslada paralelamente a sí mismo hasta la profundidad límite o profundidad de cierre (también invariable en el tiempo y en el espacio), se define la

variación del área transversal de la playa en función de la variación de la línea de costa, tal y como se presenta en la ecuación (I.2).

$$\boxed{\frac{\partial A}{\partial t} = D \frac{\partial y}{\partial t}} \quad (I.2)$$

donde: y indica la posición de la línea de costa y D representa una distancia en vertical en la cual se va a asumir que el perfil de playa se traslada, como queda indicado en la figura I.6.

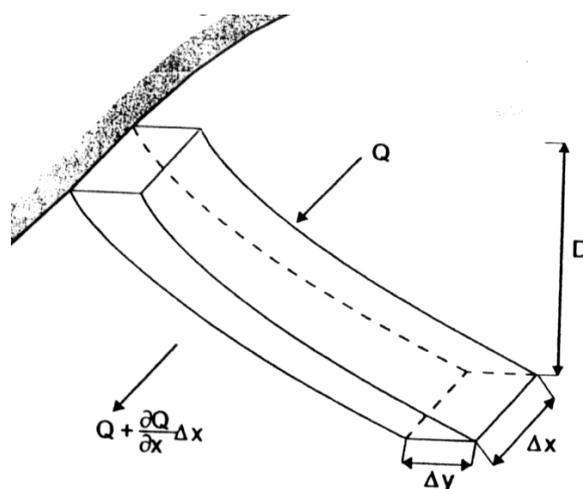


Figura I.6- Representación esquemática de una playa con un modelo de una línea (tomada de Larson et al., 1997)

Introduciendo la ecuación (I.2) en la ecuación (I.1), se obtiene la ecuación que utilizan los modelos de una línea actuales, la cual aparece indicada mediante la expresión (I.3).

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \pm \frac{q}{D} - \frac{1}{D} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (I.3)$$

Nótese que el único cambio de la línea de costa que se reproduce mediante la ecuación (I.3) es el asociado con las variaciones del transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la costa y con los aportes o pérdidas puntuales de sedimento.

Asimismo, por el hecho de haber asumido un perfil de playa constante en el tiempo, se prescinde de la información del transporte transversal de sedimento. Esta es la razón por la que los modelos de una línea actuales sólo proporcionan soluciones válidas en el largo plazo (años a décadas), no pudiéndose representar los efectos del transporte transversal de sedimento, tales como la erosión producida por tormentas o bien el movimiento cíclico de la posición de la línea de costa asociado con las variaciones estacionales del oleaje.

Así pues, el principal término causante de la evolución de la línea de costa en los modelos de una línea es el gradiente del transporte longitudinal de sedimento. Para la obtención de este transporte se destacan las siguientes expresiones:

- La expresión que es conocida como fórmula del CERC (Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers), (véase Komar e Inman, 1970; SPM, 1977 y SPM, 1984), así como su versión modificada (Ozasa y Brampton, 1980), la cual, adicionalmente al transporte de sedimento por incidencia oblicua del oleaje en rotura, permite tener en cuenta el transporte de sedimento asociado al gradiente longitudinal de altura de ola en rotura. Esta expresión aparece indicada en la ecuación (I.4).

$$Q = H_{sb}^2 C_{gb} \left(a_1 \sin 2\alpha_{bs} - a_2 \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H_{sb}}{\partial x} \right) \quad (I.4)$$

con:

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) 1.416^{\frac{5}{2}}} \quad (I.5)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) \tan \delta 1.416^{\frac{7}{2}}} \quad (\text{I.6})$$

siendo: H_{sb} , la altura de ola significativa en rotura; C_{gb} , la celeridad de grupo en rotura; α_{bs} , el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa; K_1 y K_2 , coeficientes empíricos que deben ser utilizados como parámetros de calibración; $\tan \delta$, la pendiente del perfil en el tramo de éste donde se produce el principal transporte longitudinal de sedimento; ρ , la densidad del agua (es usual utilizar un valor de 1025 kg/m³ para agua salada o de 1000 kg/m³ para agua dulce); ρ_s , la densidad del sedimento (se suele tomar un valor de 2650 kg/m³ para arenas) y p , la porosidad del sedimento (un valor típico de este parámetro es 0.4).

El coeficiente K_1 ha sido objeto de estudio de diferentes investigadores, los cuales han tratado de relacionarlo con algunas magnitudes. Así por ejemplo, con base en datos de laboratorio, Kamphuis y Readshaw (1978) determinaron que existía una relación entre el coeficiente analizado y el Número de Iribarren I_r (el Número de Iribarren definido en este caso como el cociente entre la pendiente de la playa y la raíz cuadrada del cociente altura de ola en rotura con respecto la longitud de onda en indefinidas). Los anteriores autores observaron que al incrementar el coeficiente K_1 aumentaba I_r .

Asimismo, diferentes investigadores (Dean, 1987a, Komar, 1988) estudiaron la dependencia del coeficiente K_1 con el tamaño de grano D_{50} , determinando una relación inversa entre ambos parámetros. Destaca especialmente la formulación propuesta por del Valle, Medina y Losada (1993), los cuales al tener en cuenta datos tomados en el delta del río Adra, ampliaron el rango estudiado de tamaños de grano y propusieron una relación de tipo exponencial entre el tamaño de grano y el parámetro analizado (véase CEM, 2002 y del Valle, Medina y Losada, 1993).

- Otra de las formulaciones más comunes para determinar el transporte longitudinal de sedimento es la planteada por Kamphuis (1991). Las expresiones propuestas por este investigador (véase ecuaciones I.7 y I.8) tienen también en

cuenta la influencia del período del oleaje (T_{op} es el período de pico en profundidades indefinidas), del tamaño de grano del sedimento D_{50} y de la pendiente del perfil en la zona de rotura m_b . En la ecuación (I.7) aparece el transporte expresado en $m^3/año$ y en la (I.8) en $m^3/hora$.

$$Q(m^3 / año) = 6.4 \cdot 10^4 H_{sb}^4 T_{op}^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6} 2\alpha_{bs} \quad (I.7)$$

$$Q(m^3 / hora) = 7.3 H_{sb}^4 T_{op}^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6} 2\alpha_{bs} \quad (I.8)$$

Finalmente se pueden destacar las siguientes hipótesis básicas que utilizan la mayoría de los modelos de una línea (Hanson y Kraus, 1989):

- El perfil de playa adopta una forma invariable en el tiempo y en el espacio. Al no tener en cuenta la variabilidad experimentada por el perfil de playa estos modelos no pueden ser aplicados en el medio plazo. Además, en zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los preponderantes, es de considerable relevancia el tener en cuenta la variabilidad espacial del perfil de playa.

- Los límites entre los que se supone que el perfil de playa se traslada son invariables en el tiempo y en el espacio (según Hanson y Kraus, 1989, el límite en la costa viene marcado por la elevación de la berma D_B y en el mar por la profundidad de cierre D_C). Esta hipótesis tiene exactamente las mismas consecuencias que la hipótesis anterior.

- El transporte longitudinal de sedimento sólo se produce por la rotura del oleaje.

- La estructura detallada de la circulación costera se ignora.

- Existe una tendencia de largo plazo de la línea de costa.

I.4.2. MODELOS ANALÍTICOS

La idea original de la teoría de una línea (Pelnard-Considère, 1956) fue acompañada de una serie de soluciones analíticas, las cuales fueron el antecedente de los diferentes modelos numéricos que se fueron desarrollando con el paso del tiempo. En este apartado se va a derivar la ecuación de difusión, que es la base de las diferentes soluciones analíticas y posteriormente se realizará una recopilación de los principales estudios analíticos llevados a cabo hasta la fecha.

Con el objetivo de obtener soluciones analíticas de la ecuación (I.3), se deben realizar una serie de simplificaciones que no se corresponden con la realidad. Esta es la razón por la que los modelos analíticos no pueden ser utilizados como herramienta ingenieril para predecir la evolución de la línea de costa. Sin embargo, su importancia radica en la posibilidad de determinar tendencias de una manera rápida y cómoda, así como realizar un estudio de sensibilidad de determinados parámetros (como por ejemplo, determinar la influencia del cambio de las condiciones de oleaje incidentes, del cambio de las condiciones de contorno o del cambio de las condiciones iniciales sobre la línea de costa).

I.4.2.1. Ecuación de difusión

Para resolver la ecuación (I.3) de conservación de la masa de sedimento se debe proponer una expresión para determinar el transporte longitudinal del mismo. Este transporte se va a calcular con una versión simplificada de la ecuación (I.4), despreciándose la parte del transporte asociada con las corrientes generadas por el gradiente longitudinal de altura de ola en rotura, tal y como se especifica mediante la ecuación (I.9).

$$Q = Q_0 \sin 2\alpha_{bs} \quad (I.9)$$

con: Q_0 amplitud del transporte longitudinal de sedimento o parte del transporte no asociada con el ángulo de incidencia del oleaje en rotura y α_{bs} el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa, como ya fue indicado previamente.

El ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa α_{bs} se puede calcular como la diferencia entre el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto al eje x de referencia α_b (este eje se suele ubicar siguiendo la tendencia de la línea de costa) y el ángulo de la línea de costa con respecto al eje x de referencia α_s , como se indica en la ecuación (I.10), (en esta ecuación $ArcTan$ es el arco tangente).

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \alpha_s = \alpha_b - ArcTan\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \quad (I.10)$$

Con respecto al valor de Q_0 , aunque existen diferentes expresiones para su obtención, se suele utilizar la expresión del CERC (SPM, 1984), la cual fue establecida previamente mediante la ecuación (I.4). Básicamente se puede decir que mediante esta expresión Q_0 sólo depende de la altura de ola significativa en rotura H_{sb} , tal y como se indica en la expresión (I.11).

$$Q_0 = f(H_{sb}) \quad (I.11)$$

Llegados a este punto, las hipótesis que se necesitan asumir para poder obtener soluciones analíticas y derivar la ecuación de difusión son:

1. El ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa se asume pequeño. En este caso se puede utilizar la relación indicada en la ecuación (I.12).

$$\sin 2\alpha_{bs} \approx 2\alpha_{bs} \quad (I.12)$$

2. El ángulo de la línea de costa con respecto al eje x de referencia se asume pequeño. En tal caso se puede utilizar la relación indicada en la expresión (I.13).

$$\text{ArcTan}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \approx \frac{\partial y}{\partial x} \quad (I.13)$$

La ecuación (I.9), una vez que se ha introducido la expresión (I.10) y se han utilizado las hipótesis (I.12) y (I.13), se calcula mediante la expresión (I.14).

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 \sin\left(2\alpha_b - 2 \text{ArcTan}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\right) \approx 2Q_0 \left(\alpha_b - \text{ArcTan}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\right) \\ &\approx 2Q_0 \left(\alpha_b - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\right) \end{aligned} \quad (I.14)$$

Finalmente se combina la ecuación de conservación de sedimento (ecuación I.3) con la ecuación de transporte del mismo linealizada (ecuación I.14). Además, se va a asumir que en la ecuación (I.3) el término de aportes o pérdidas es nulo ($q=0$). En función de una serie de hipótesis adicionales se pueden obtener las dos ecuaciones siguientes:

1. Si Q_0 y α_b son constantes en la coordenada longitudinal x . En este caso se obtiene la ecuación (I.15). Nótese que con la relación (I.11), el hecho de asumir Q_0 invariable en la coordenada longitudinal x es equivalente a asumir que la altura de ola significativa en rotura H_{sb} es invariable con esta coordenada.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (\text{I.15})$$

con,

$$\varepsilon = \frac{2Q_0}{D} \quad (\text{I.16})$$

Como D es constante (independiente del tiempo t y de la coordenada longitudinal x) y asumiendo que Q_0 es constante en el tiempo t , la ecuación (I.15) es una ecuación diferencial parcial lineal que es idéntica a la ecuación que describe la conducción del calor en un sólido en una dimensión o a la ecuación de difusión. Esta es la razón por la que se conoce con el nombre de ecuación de difusión. Una vez que se hayan establecido las condiciones iniciales y de contorno para cada caso particular, se pueden obtener diferentes soluciones analíticas de la ecuación de difusión. Carslaw y Jaeger (1959) proporcionaron un gran número de soluciones para la ecuación de conducción del calor y Crank (1975) propuso soluciones para la ecuación de difusión.

El coeficiente ε de las ecuaciones (I.15) y (I.16) se conoce con el nombre de coeficiente o constante de difusión, se expresa en unidades de área por unidad de tiempo y es un indicador de la escala de tiempo del cambio de la línea de costa ante una acción determinada.

2. Si Q_0 y α_b son variables en la coordenada longitudinal x . En este caso la ecuación diferencial de gobierno para determinar la posición de la línea de costa adopta una forma más general, como se observa en la expresión (I.17).

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_b \varepsilon)}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{I.17})$$

Mediante la ecuación (I.17) se puede tener en cuenta de una manera simplificada la difracción en zonas de espigones (altura de ola variable con la coordenada longitudinal x) Sin embargo, la expresión de Q_0 debe ser lo suficientemente simple como para permitir la derivación de una solución analítica.

I.4.2.2. Estudios analíticos realizados

Pelnard-Considère (1956) fue el primero que empleó el modelado matemático como un método para describir la evolución de la línea de costa. Asimismo, fue quien introdujo la teoría de una línea (línea de costa) y verificó su aplicabilidad mediante experimentación en laboratorio.

El anterior autor derivó soluciones analíticas para determinar la evolución de la línea de costa en el caso de tres condiciones de contorno: caso de un espigón (sin y con bypass de sedimento) y caso de una fuente plana instantánea de sedimento (arena) sobre la playa. El intercambio de transporte longitudinal de sedimento se asumió proporcional al ángulo de incidencia del oleaje. A pesar de estas hipótesis simples, los resultados calculados fueron muy similares a los obtenidos en los ensayos en laboratorio. En la figura I.7 se pueden comparar los resultados obtenidos a través de experimentación frente a los establecidos analíticamente por Pelnard-Considère (1956) para el caso de un espigón.

Pocos años después, Grijm (1960) estudió, utilizando el modelo de línea de costa, la formación de deltas generados por la descarga de sedimento (arena) procedente de ríos. El transporte longitudinal de arena se estableció en este estudio proporcional al doble del ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa. Asimismo, propuso dos soluciones analíticas: una en la que el ángulo del frente del oleaje en rotura y el ángulo de orientación de la línea de costa eran pequeños y otra en la que el ángulo del frente del oleaje era pequeño en comparación con la orientación de la línea de costa. Las ecuaciones de gobierno (ecuación de conservación de masa de sedimento y ecuación de transporte) fueron expresadas en coordenadas polares y resueltas numéricamente. Grijm (1964) desarrolló esta técnica y presentó varios casos de formaciones de deltas.

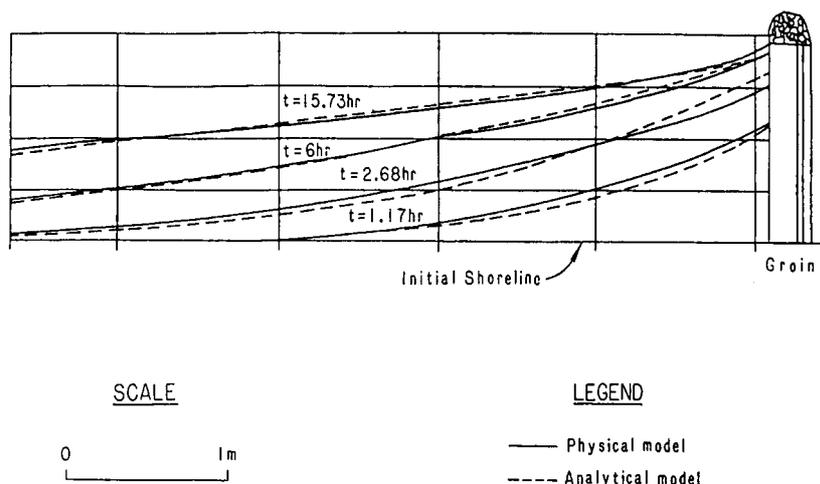


Figura I.7- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada experimentalmente y analíticamente por Pelnard-Considère (1956), (tomada de Larson et al., 1987)

Le Méhauté y Brebner (1961) analizaron las soluciones de la evolución de la línea de costa en espigones, sin y con bypass de arena, así como el efecto de un repentino vertido de material en un punto dado. La mayoría de las soluciones habían sido previamente obtenidas por Pelnard-Considère (1956), pero en el estudio de Le Méhauté y Brebner (1961) fueron minuciosamente analizadas, especialmente con respecto a los aspectos geométricos de la evolución de la línea de costa. También se analizó el amortiguamiento de una línea de costa ondulante, así como el establecimiento de la forma de equilibrio de la línea de costa entre dos promontorios.

Bakker y Edelman (1964) modificaron la ecuación de transporte longitudinal de arena para permitir el cálculo analítico sin necesidad de linealizar esta ecuación. El transporte longitudinal de arena Q_B fue dividido en dos casos diferentes, tal y como queda indicado en la ecuación (I.18).

$$\begin{aligned}
 Q_B &= Q_{0B} L_1 \tan \alpha_{bB} \rightarrow 0 \leq \tan \alpha_{bB} \leq 1.23 \\
 Q_B &= Q_{0B} \frac{L_2}{\tan \alpha_{bB}} \rightarrow 1.23 < \tan \alpha_{bB}
 \end{aligned}
 \tag{I.18}$$

En la ecuación (I.18), L_1 y L_2 son constantes, Q_{0B} es la parte del transporte que no depende del ángulo en rotura y α_{bB} es el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la costa. El crecimiento de los deltas en ríos se estudió a partir de la ecuación (I.18).

Bakker et al. (1970) plantearon expresiones para determinar el coeficiente de difusión en la teoría de una línea (recuérdese que el coeficiente de difusión es el coeficiente presente en la ecuación que resulta de combinar y linealizar la ecuación de conservación de masa de sedimento y la de transporte longitudinal del mismo).

Le Méhauté y Soldate (1977) presentaron una breve revisión de la literatura sobre el modelado matemático de la evolución de la línea de costa. Se analizaron diferentes soluciones analíticas de la ecuación de evolución de la línea de costa linealizada, como por ejemplo el caso de la diseminación de un relleno rectangular en una playa.

Walton y Chiu (1979) realizaron una de las más completas revisiones de las soluciones analíticas de la ecuación de transporte del sedimento. Presentaron dos derivaciones de la ecuación de evolución de la línea de costa linealizada, junto con una aproximación que resultó en un modelo no lineal. La diferencia entre las dos aproximaciones, que se basaban en la ecuación de difusión, consistía en la formulación para determinar el transporte longitudinal del sedimento asociado al oleaje. En un caso se utilizaba la expresión del Coastal Engineering Research Center (CERC), (véase SPM, 1984), y en el otro caso la formulación propuesta por Dean (1973), la cual estaba basada en la hipótesis de que el principal transporte de arena se producía por suspensión. Entre las soluciones analíticas derivadas por Walton y Chiu (1979), se encontraban: relleno triangular, extracción rectangular y relleno rectangular semi-infinito. También se presentaron algunos datos sobre la constante de difusión.

Dean (1984) presentó una breve revisión de algunas soluciones analíticas aplicables a los cálculos de regeneración de playas, haciendo especial énfasis en la forma de las cantidades características que describen las pérdidas de arena en porcentajes. Una de las soluciones describía la evolución de la línea de costa entre

espigones inicialmente rellenos de arena. Esta evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo se muestra en la figura I.8.

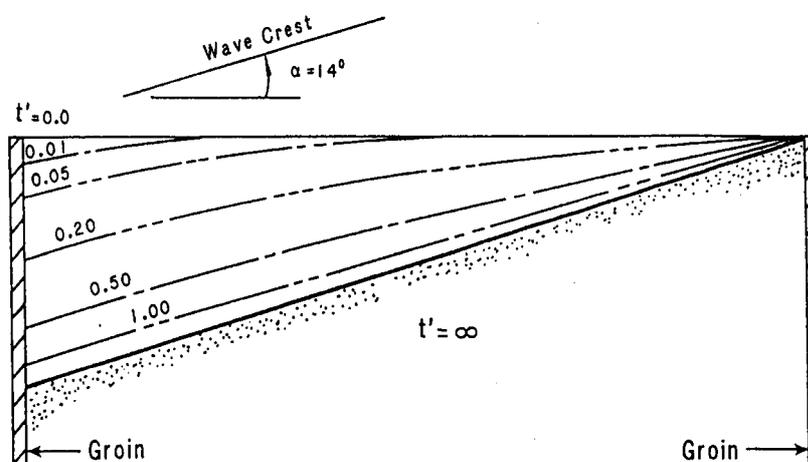


Figura I.8- Evolución de la línea de costa entre dos espigones inicialmente rellenos de arena según Dean (1984), (tomada de Larson et al., 1987)

Larson et al. (1987) presentaron un informe sobre diferentes soluciones analíticas (veinticinco) del modelo de una línea. Entre estas soluciones, se encontraban tanto soluciones previamente derivadas como novedosas. Estas últimas fueron obtenidas con base a la analogía existente con la ecuación de conducción del calor o a través de la técnica de la transformada de Laplace. Las soluciones fueron divididas en dos grupos, en función de las propiedades físicas de las condiciones iniciales y de contorno. El primer grupo describía las situaciones de evolución de línea de costa sin estructuras (tanto para playas naturales como artificiales). También se presentaron soluciones para describir el crecimiento de los deltas en ríos, teniendo en cuenta no sólo el caso de una fuente puntual de descarga de arena, sino también el de una boca de río de longitud finita de descarga. El otro grupo comprendía el conjunto de configuraciones que involucraban estructuras costeras, tales como espigones, diques exentos y muros. En estos casos las ecuaciones se complicaban bastante, siendo necesario idealizar de una manera físicamente razonable la influencia de las estructuras costeras sobre la línea de costa, manteniendo de esta forma las características esenciales de la situación. Además, se plantearon algunos modelos simples para tener en cuenta la difracción generada por los espigones.

Bodge y Kraus (1991) obtuvieron valores para el coeficiente de difusión en diferentes lugares costeros en Estados Unidos. La solución analítica para la acumulación de sedimento aguas arriba de un espigón fue ajustada por mínimos cuadrados frente a la evolución de la línea de costa medida, siendo el coeficiente de difusión el único parámetro libre. Se obtuvo que este coeficiente estaba relacionado con la altura de ola significativa media anual en la zona estudiada.

Walton (1994) presentó una solución analítica para el caso de un relleno rectangular con los bordes terminados en punta. La pérdida del material de relleno con el paso del tiempo se calculó para diferentes configuraciones de rellenos de playas. Estas soluciones se pueden comparar con las soluciones numéricas presentadas por Hanson y Kraus (1993) para el mismo caso de relleno rectangular con los bordes terminados en punta.

Posteriormente Larson et al. (1997) derivaron algunas soluciones analíticas para determinar la evolución de la línea de costa bajo la influencia de estructuras costeras, tales como diques exentos, muros que eran flanqueados, espigones con y sin difracción. En la figura I.9 se presenta un ejemplo de la evolución de la línea de costa sometida a la influencia de un espigón, en el que no se tiene en cuenta la difracción producida por este elemento. En esta figura también se puede observar la influencia del bypass de arena, que tiene como consecuencia una menor acumulación de sedimento.

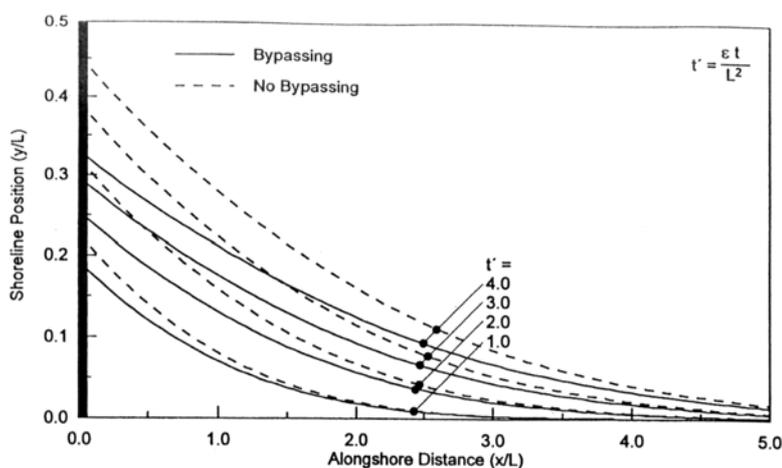


Figura I.9- Evolución de la línea de costa sometida a la influencia de un espigón (sin incluir difracción) con y sin bypass de arena (tomada de Larson et al., 1997)

I.4.3. MODELOS NUMÉRICOS

Aunque el estudio analítico constituyó una fase inicial en el análisis de la evolución de la línea de costa mediante la teoría de una línea, los modelos analíticos no pueden ser utilizados como herramienta ingenieril para predecir la evolución de la línea de costa en las situaciones reales, debido a las simplificaciones en las que se basan y que fueron previamente especificadas. De ahí la importancia de los modelos numéricos de una línea, los cuales surgieron principalmente con la intención de predecir la evolución de la línea de costa sometida a la influencia de estructuras costeras.

I.4.3.1. Primeros modelos

Este apartado se divide en dos partes: en la primera de ellas se va a analizar la aplicación de los modelos numéricos de una línea a zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes, y en la segunda se van a estudiar estos modelos pero aplicados a otro tipo de estructuras o casos de menor interés para la presente Tesis.

I.4.3.1.1. APLICACIÓN EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN

Uno de los primeros casos de aplicación de un modelo numérico de una línea en playas encajadas fue realizado por LeBlond (1972), el cual describió la formación en espiral de estas playas. Con tal fin, planteó la ecuación básica de conservación del sedimento de los modelos de una línea en coordenadas curvilíneas. Sin embargo, LeBlond (1972) no consideró la acción del oleaje en la zona de sombra, volviéndose el modelo que proponía inestable si se incluía la difracción.

Hashimoto (1974) fue el primero en aplicar un modelo numérico de una línea al caso de un dique exento. Comparó las predicciones del modelo con resultados obtenidos en modelo físico para el caso de la evolución de una playa sometida a la influencia de un dique exento.

Posteriormente Sasaki (1975) generalizó el modelo de Hashimoto (1974) para su utilización ingenieril y adoptó la solución simplificada de Putnam y Arthur (1948) para el cálculo de la difracción. Calibró su modelo con datos de laboratorio de Horikawa y Koizumi (1974).

Rea y Komar (1975) presentaron una técnica para estudiar la evolución de la línea de costa para playas encajadas, utilizando una discretización en dos dimensiones. Sin embargo, el esquema propuesto sólo se pudo resolver para el caso de transporte longitudinal generado por incidencia oblicua del oleaje, no siendo posible incluir el transporte longitudinal asociado con los gradientes de altura.

Sasaki y Sakuramoto (1978) verificaron el modelo numérico de una línea de costa de Sasaki (1975) mediante la utilización de datos de campo precisos en Kashiwazaki (Japón). Con el objetivo de poder comparar el modelo numérico con los datos de campo, se realizaron muchas modificaciones para poder representar configuraciones de diques exentos arbitrarias y direcciones de oleaje variables. En la figura I.10 aparece representada la línea de costa medida en Kashiwazaki al transcurrir dos años. También se muestra la misma magnitud determinada con el modelo de Sasaki (1975).

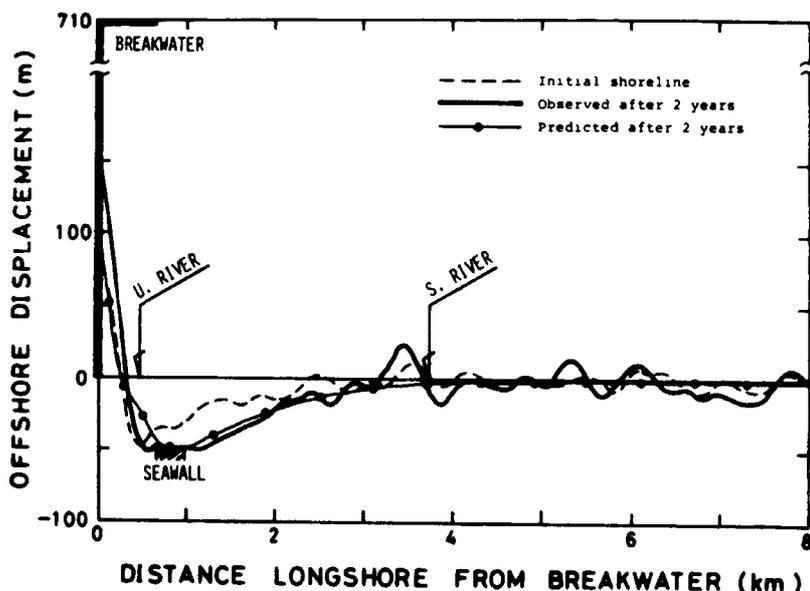


Figura I.10- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo de Sasaki (1975) frente a la magnitud medida en Kashiwazaki (Japón), una vez transcurridos dos años (tomada de Sasaki y Sakuramoto, 1978)

Aunque con el modelo de Sasaki (1975) no se tenía en cuenta, ni el transporte transversal de sedimento, ni las formas de circulación costeras, ni la marea, la limitación más importante de este modelo fue el hecho de no resolver el problema de la refracción-difracción conjuntamente. En la zona de sombra del dique exento no se tenía en cuenta la refracción. Como resultado, con este modelo es imposible determinar las características de meso-escala, tales como la topografía rítmica, los cusps gigantes y tampoco cambios de corto plazo. Por consiguiente, es imprescindible el desarrollo de modelos más elaborados que incluyan el problema de la refracción-difracción combinada.

Sasaki y Sakuramoto (1978) indicaron que el modelo propuesto también podría ser aplicable al caso de espigones, utilizándose las mismas rutinas de difracción.

La primera aplicación de un modelo numérico implícito para calcular la evolución de la línea de costa fue realizada por Perlin y Dean (1978) con base en Perlin (1977). Los anteriores autores presentaron dos modelos numéricos para representar la evolución de la línea de costa: un modelo explícito de una línea y un modelo implícito de una línea.

Perlin (1979) empleó precisamente el modelo numérico implícito de línea de costa especificado en el párrafo anterior para calcular la evolución de la línea de costa bajo la influencia de diques exentos y comparó los resultados obtenidos con los medidos en laboratorio por diferentes autores (Sawaragi, 1957; Shinohara y Tsubaki, 1966; Horikawa y Koizumi, 1974). Aunque lo ideal hubiese sido haber comparado el modelo con datos de prototipo, éstos no existían. Así pues, el grado de ajuste entre modelo físico y modelo numérico no fue bueno y bastantes parámetros necesarios en el modelo numérico tuvieron que ser estimados, ya que el modelo físico no los proporcionó.

En la figura I.11 se presenta una comparación de los resultados obtenidos con el modelo numérico de Perlin (1977) frente a los medidos en modelo físico por Sawaragi (1957) para un caso particular de dique exento. En la figura I.12 se muestra otra comparación de las mismas magnitudes, pero en este caso para otra

configuración de dique exento y con el modelo físico de Shinohara y Tsubaki (1966). Finalmente en la figura I.13 se observa la comparación de otra configuración de dique exento con el modelo físico de Horikawa y Koizumi (1974).

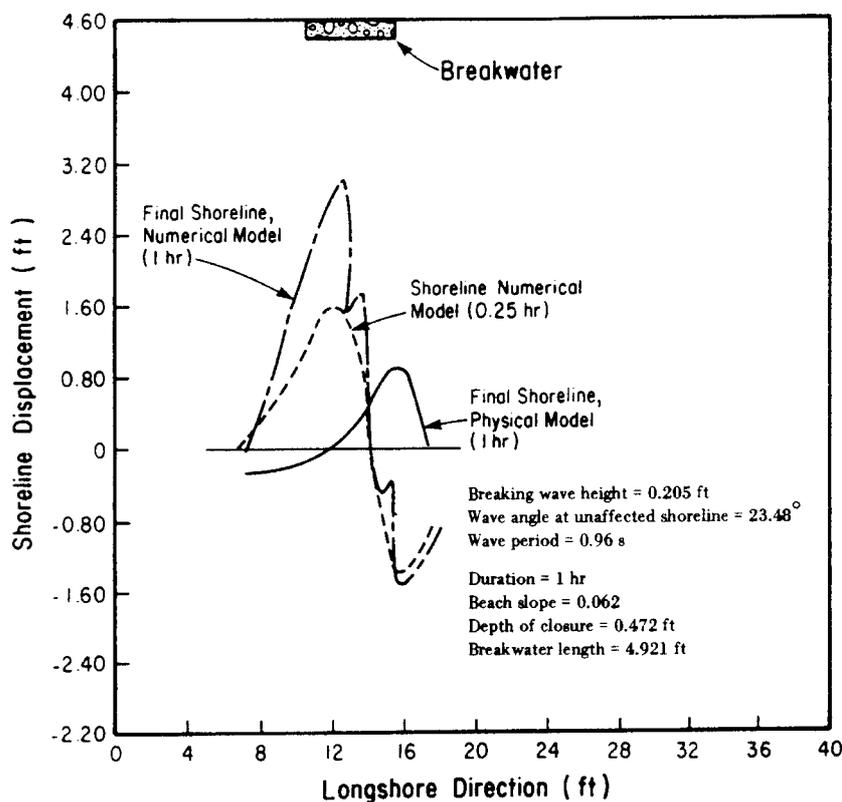


Figura I.11- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo numérico de Perlin (1977) frente a la magnitud medida en laboratorio por Sawaragi (1957), (tomada de Perlin, 1979)

Mimura et al. (1983) compararon sus simulaciones numéricas con datos de laboratorio de gran calidad. Calibraron el modelo numérico de una línea por comparación con los resultados de evolución de una playa en laboratorio sometida a la influencia de un dique exento (véase figura I.14); como resultado verificaron la importancia de la corriente inducida por el gradiente de altura de ola sobre el transporte longitudinal de sedimento en la zona de influencia del dique exento. Asimismo, comprobaron la relevancia de una predicción idónea del oleaje en la zona de interés para poder determinar correctamente la evolución de la línea de costa.

También compararon los volúmenes de arena determinados con el modelo numérico frente a los establecidos con el modelo físico, como se observa en la figura I.15. Estos investigadores atribuyeron las diferencias observadas en estos casos a las hipótesis del modelo de una línea (transporte transversal de sedimento nulo, profundidad de cierre constante, etc.). Después del estudio realizado, Mimura et al. (1983) fueron conscientes de las limitaciones del modelo numérico de una línea analizado y concluyeron que era imprescindible mejorar dicho modelo.

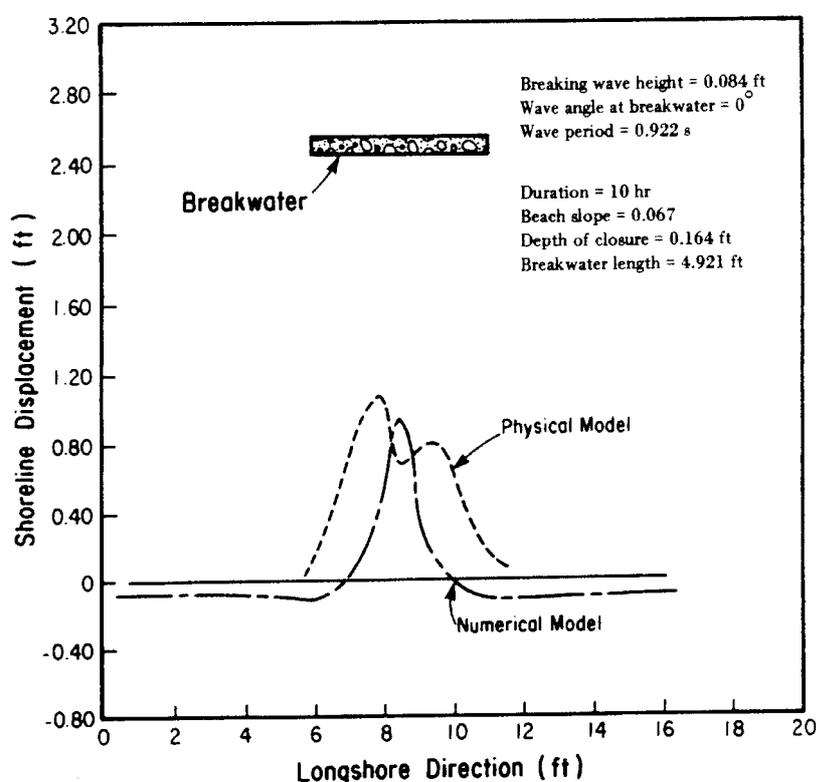


Figura I.12- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo numérico de Perlin (1977) frente a la magnitud medida en laboratorio por Shinohara y Tsubaki (1966), (tomada de Perlin, 1979)

Matsuoka y Ozawa (1983) aplicaron un modelo numérico de una línea y lo compararon con datos de laboratorio y de campo. Como particularidad de este modelo se utilizó un esquema de propagación del oleaje teniendo en cuenta la difracción a través de un coeficiente establecido por el método de Mitsui (Mitsui et

al., 1978), que básicamente provenía de utilizar el primer término de la expansión asintótica de la resolución de Sommerfeld (1896) de la ecuación de Helmholtz.

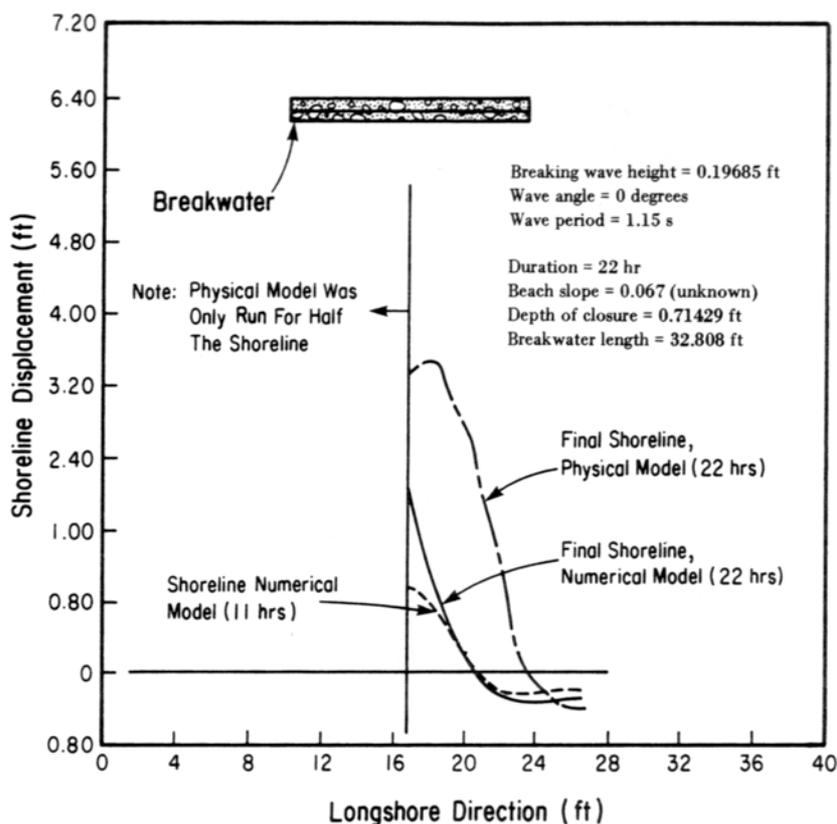


Figura I.13- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo numérico de Perlin (1977) frente a la magnitud medida en laboratorio por Horikawa y Koizumi (1974), (tomada de Perlin, 1979)

Los ensayos de laboratorio que se realizaron fueron los cinco siguientes: tres casos de playas sin estructuras pero con diferente configuración de playa inicial, un caso con dos espigones y un caso con un dique exento. Como ejemplo se presenta en la figura I.16 una comparación de los resultados medidos de la evolución de la línea de costa en este último caso, frente a los obtenidos con el modelo numérico. El dique exento tenía una longitud de dos metros y estaba localizado a una distancia de un metro de la línea de costa. Como se observa en la figura I.16, la similitud entre ambos resultados es simplemente desde un punto de vista cualitativo.

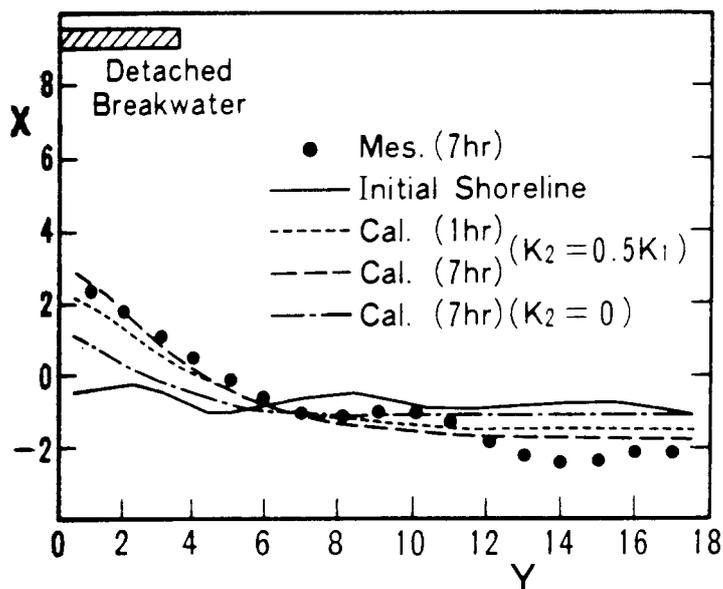


Figura I.14- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo numérico de una línea frente a la magnitud medida en laboratorio (tomada de Mimura et al., 1983)

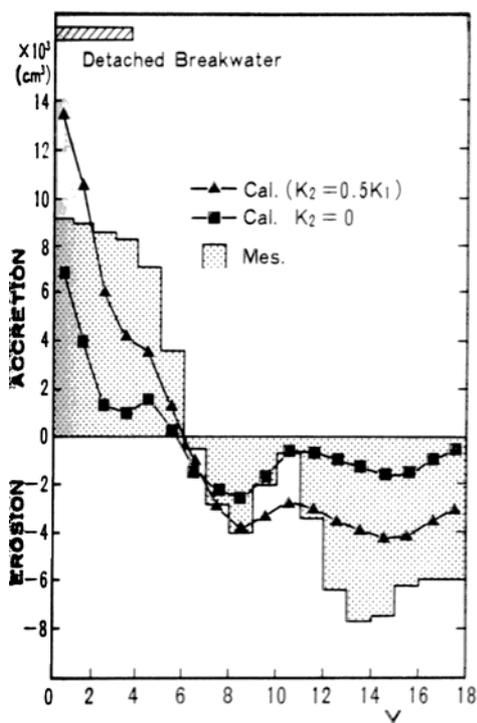


Figura I.15- Comparación de los volúmenes de arena determinados con el modelo numérico de una línea frente a los valores medidos en laboratorio (tomada de Mimura et al., 1983)

En cuanto a los datos de campo se presentaron dos casos: el caso de un dique exento construido en Kaike (Japón) a ciento diez metros de distancia del paseo marítimo y a una profundidad de cinco metros (véase figura I.17) y el caso de tres diques exentos en Nishiki (Japón), (véase figura I.18). En ambos casos las predicciones del modelo numérico fueron válidas en cuanto a tendencias. Sin embargo, desde un punto de vista cuantitativo, el ajuste fue pobre.

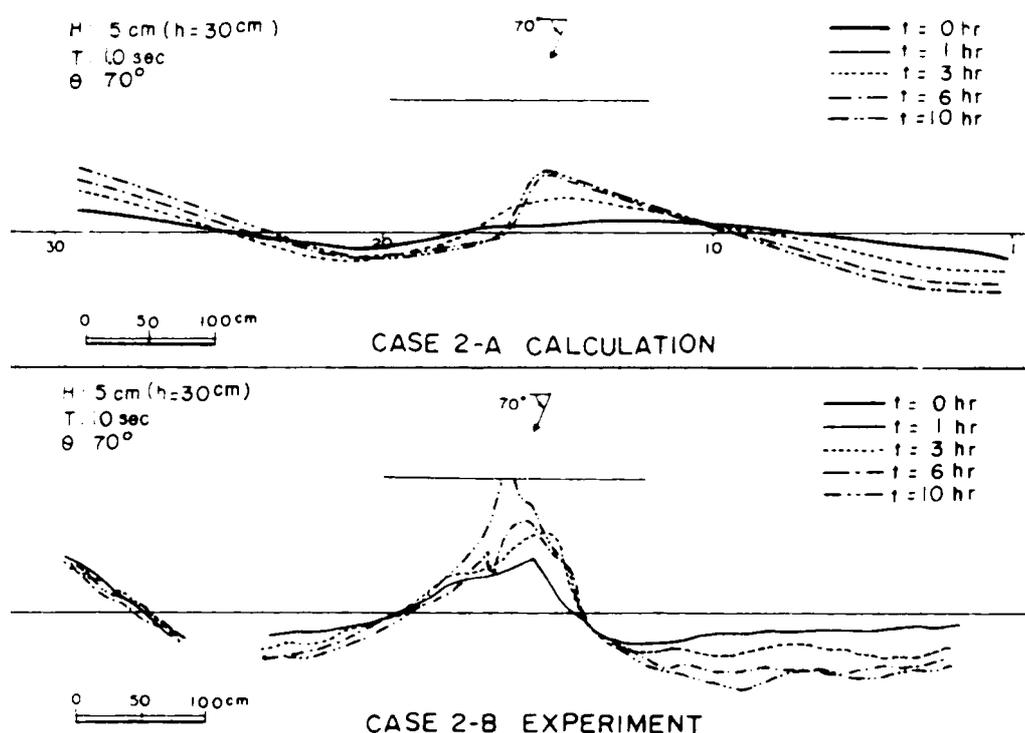


Figura I.16- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo numérico de una línea frente a la magnitud medida en laboratorio (tomada de Matsuoka y Ozawa, 1983)

Continuando con los métodos incorporados en los modelos numéricos de una línea con la intención de mejorar la predicción de la evolución de la línea de costa en zonas sometidas a la influencia de diques exentos, Suh y Hardaway (1994) desarrollaron un algoritmo para la simulación de tómbolos detrás de estas

estructuras. Este método utilizaba coordenadas curvilíneas para el establecimiento de la ecuación básica de conservación de sedimento y consistía en la aplicación inversa del método de Hanson y Kraus (1986a) para el cálculo de muros. El modelo propuesto fue aplicado al caso de Chippokes State Park (Virginia, Estados Unidos). Como se observa en la figura I.19, los tómbolos determinados con el modelo son menores que los medidos. Además, la erosión calculada es mayor que la medida. Sin embargo, los autores del modelo atribuyeron estas diferencias al hecho de considerar el transporte transversal de sedimento nulo en el mismo.

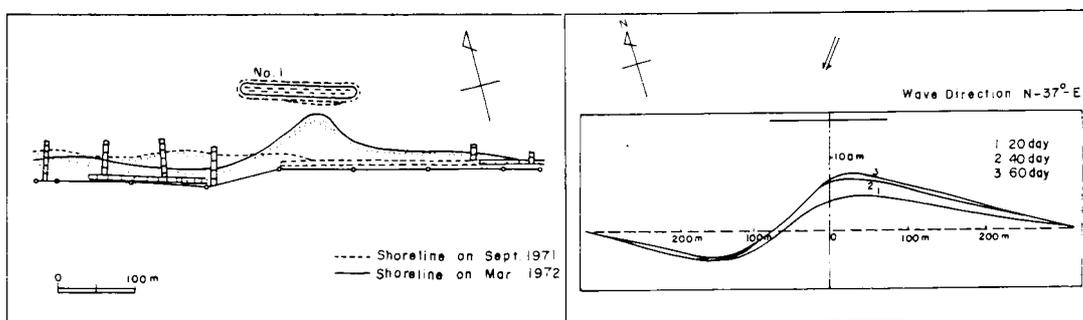
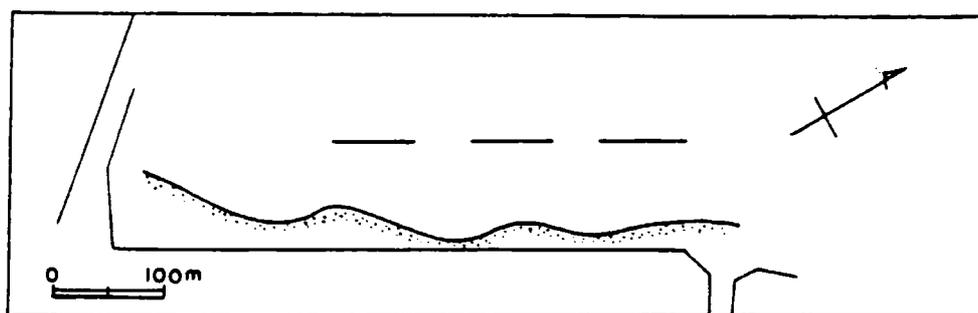
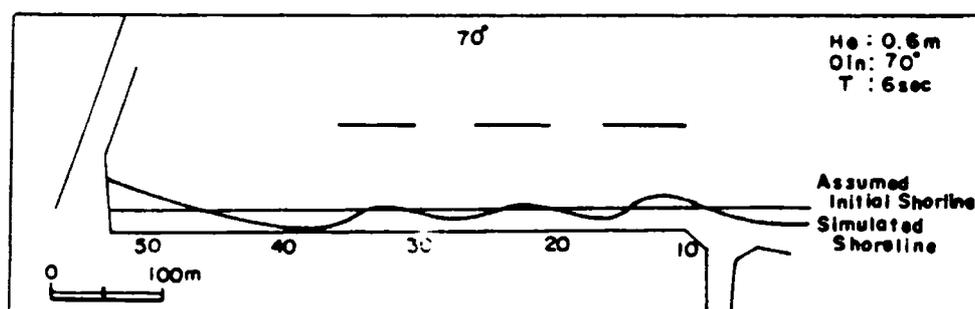


Figura I.17- Comparación de la evolución de la línea de costa medida en campo (izquierda) en Kaike (Japón) frente a la magnitud determinada con el modelo numérico de una línea (derecha), (tomada de Matsuoka y Ozawa, 1983)

Entre los modelos numéricos de una línea más recientes para calcular la evolución de la línea de costa en playas encajadas, se encuentra el propuesto por Weesakul y Rasmeemasuang (2002). Estos últimos propusieron un algoritmo en el cual se combinaba las coordenadas cartesianas con las coordenadas polares. Ahora bien, con este algoritmo no se pueden representar los tómbolos, siendo las coordenadas curvilíneas una mejor opción.



(A) Nishiki Coast (1973.3.17)



(B) Calculated Results

Figura I.18- Comparación de la evolución de la línea de costa medida en campo (parte superior) en Nishiki (Japón) frente a la magnitud determinada con el modelo numérico de una línea (parte inferior) al transcurrir un año (tomada de Matsuoka y Ozawa, 1983)

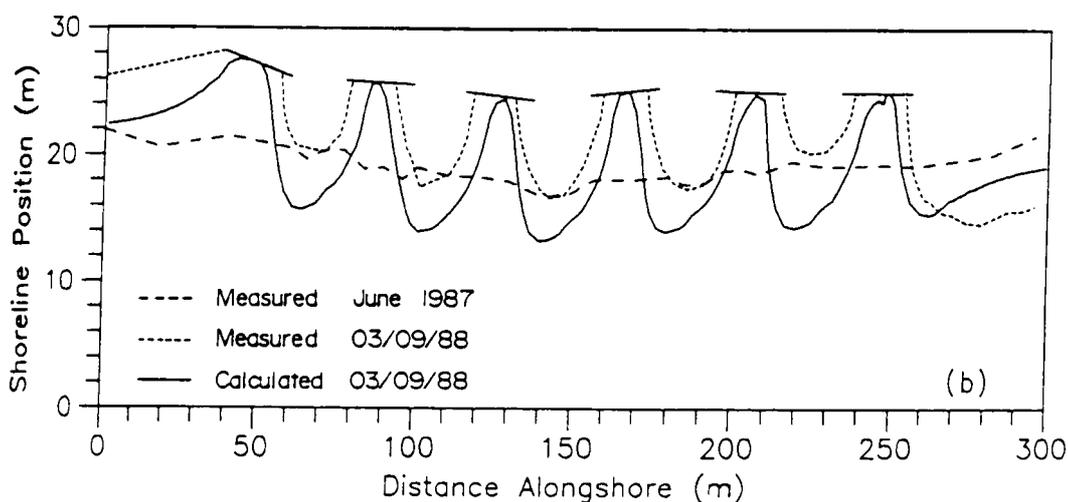


Figura I.19- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo numérico de una línea frente a la magnitud medida en Chippokes State Park (Virginia, Estados Unidos), (tomada de Suh y Hardaway, 1994)

I.4.3.1.2. OTRAS APLICACIONES

Los modelos numéricos de una línea han experimentado una serie de avances asociados con el intento de una mejor representación de la evolución de la línea de costa sometida a la influencia de estructuras en las que los procesos de refracción-difracción son predominantes. Sin embargo, existen otra serie de casos interesantes a los cuales se va a dedicar el presente apartado.

Aunque Bakker (1970) desarrolló una subrutina para calcular la difracción fenomenológicamente en el modelo de una línea y resolvió el problema numéricamente, se puede considerar que Lepetit (1972) y Price et al. (1972) fueron los primeros que implementaron numéricamente la teoría de una línea para simular la evolución de la línea de costa. Estos autores compararon las predicciones del modelo de línea de costa con los resultados obtenidos en modelo físico de laboratorio para un sistema de espigones. En la figura I.20 se presentan los resultados establecidos con el modelo numérico de línea de costa frente a los determinados en laboratorio por Price et al. (1972) en el caso de un espigón. El acuerdo entre ambos resultados es relativamente bueno en cuanto a tendencias.

Komar (1973) también fue uno de los primeros en desarrollar un modelo numérico para estimar la evolución de la línea de costa. Presentó soluciones obtenidas numéricamente para el crecimiento de deltas bajo condiciones altamente simplificadas. Con base en el modelo numérico, investigó las formas de los deltas, su evolución hacia una forma de equilibrio gobernada por el equilibrio entre la cantidad de sedimento derivada del río y la capacidad del oleaje de distribuir el sedimento a lo largo de la costa. Un ejemplo del crecimiento calculado de un delta durante trescientos sesenta y cinco días y a partir de una línea de costa inicialmente recta se muestra en la parte superior de la figura I.21. La forma del delta rápidamente alcanza una forma de equilibrio, adquiriendo la curvatura necesaria para que el oleaje incidiendo sobre la costa proporcione la energía precisa requerida para transportar la carga de sedimento del río. Para un aporte de sedimento determinado, la forma de equilibrio del delta depende del flujo de energía del oleaje, como se puede observar en la parte inferior de la figura I.21.

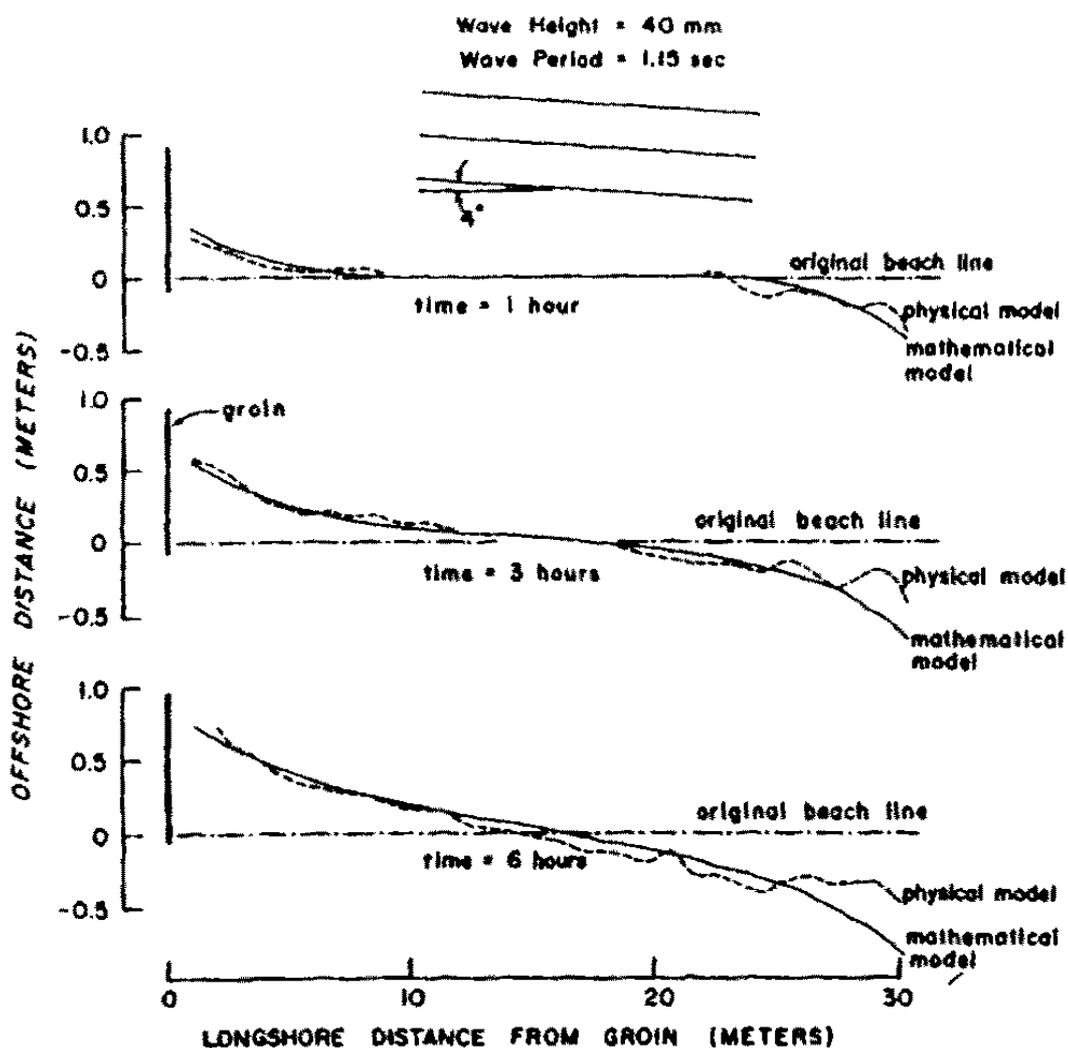


Figura I.20- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo numérico de Price et al. (1972) frente a la magnitud medida en laboratorio (tomada de Komar, 1998)

Motyka y Willis (1974) investigaron la influencia de un dragado exterior sobre la línea de costa haciendo uso de un modelo numérico de línea de costa, así como de ensayos en modelo físico. Como se observa en la parte superior de la figura I.22, el dragado produce la refracción del oleaje y la línea de costa responde al campo de oleaje modificado. El modelo numérico desarrollado por Motyka y Willis (1974) tuvo que tener en cuenta esta refracción.

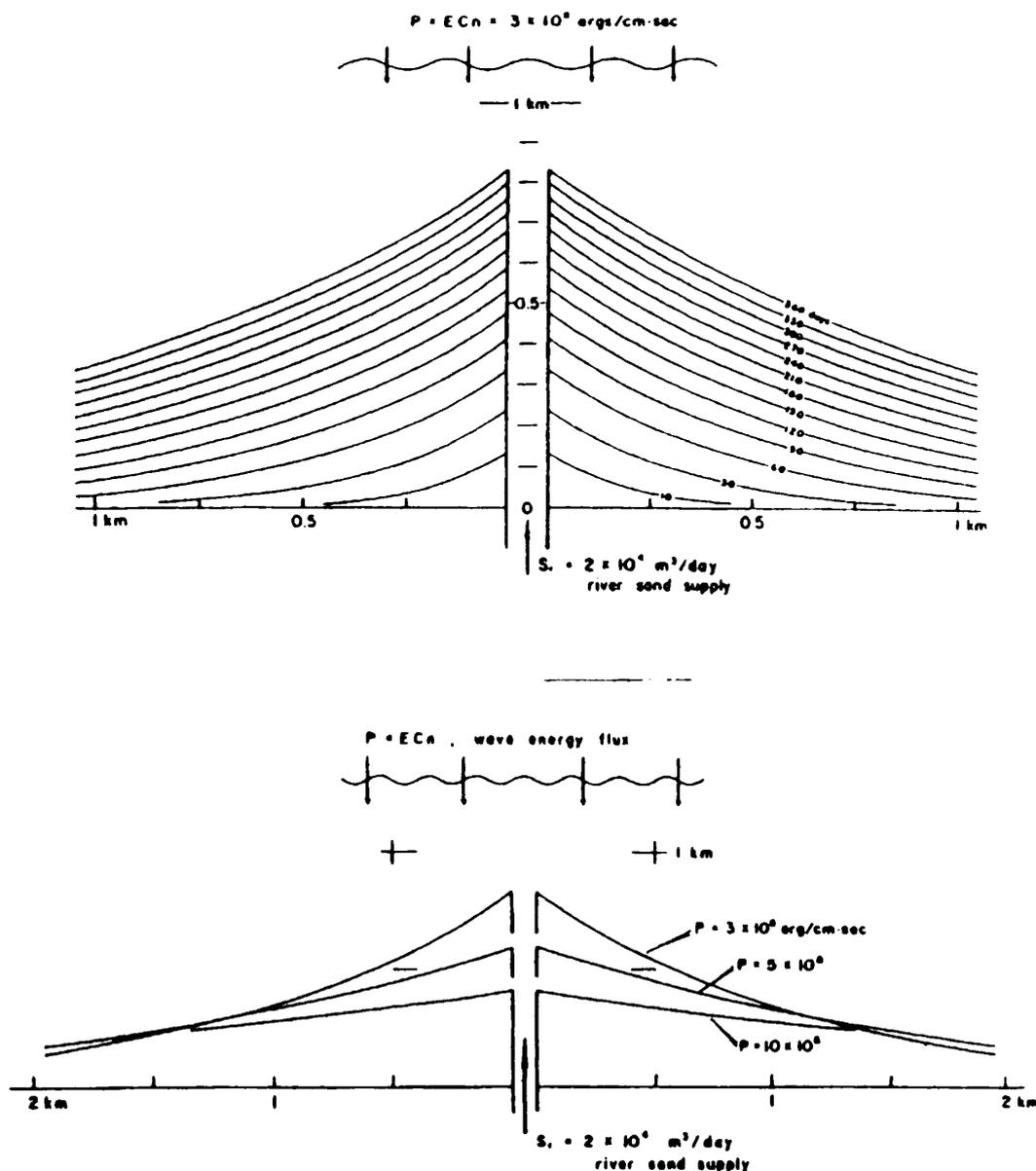


Figura I.21- Crecimiento calculado de un delta a lo largo de un año (parte superior). Formas de equilibrio de un delta para diferentes flujos de energía del oleaje (parte inferior) según Komar (1973), (tomada de Komar, 1998)

En la parte inferior de la figura I.22 se presentan los resultados obtenidos para un caso específico, observándose erosión en la zona justo detrás del dragado y acreción en cada uno de los lados (la asimetría existente se debe al transporte longitudinal neto de sedimento causado por la incidencia oblicua del oleaje).

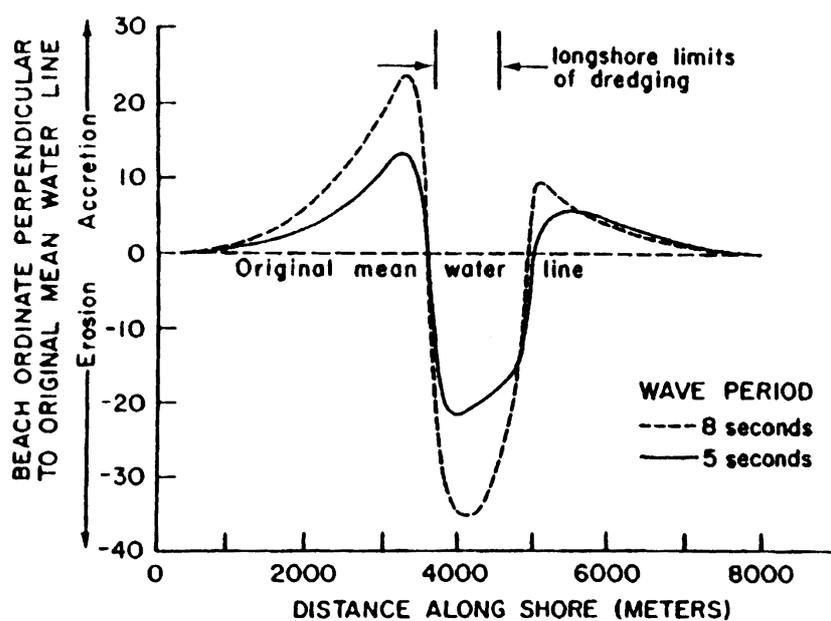
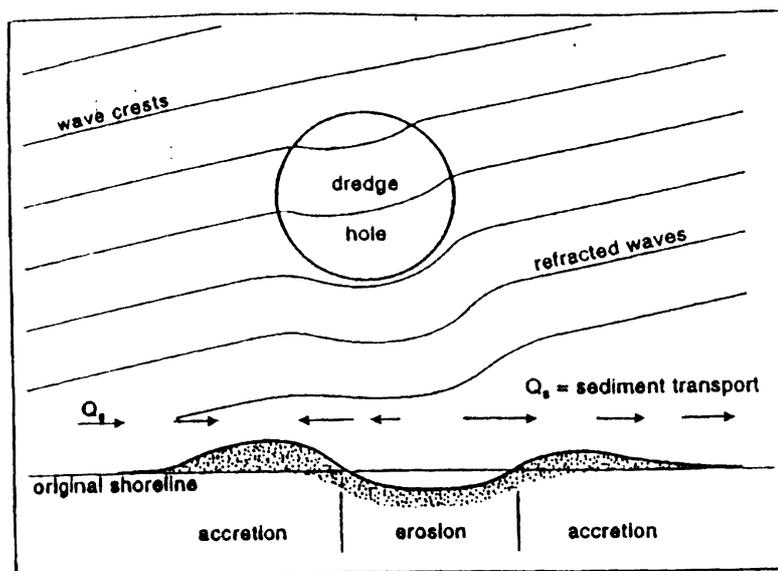


Figura I.22- Efectos de un dragado sobre la línea de costa (parte superior). Línea de costa asociada a un dragado (parte inferior) determinada con el modelo numérico de Motyka y Willis (1974), (tomada de Komar, 1998)

Entre las aplicaciones del modelo de línea de costa en el caso de espigones se encuentran las efectuadas por Hashimoto (1976) y por Komar et al. (1976). El primero estudió la evolución de la línea de costa en Fuji (Japón) y el segundo en Oregón (Estados Unidos). En la figura I.23 se presenta una comparación de un caso

real, la construcción de espigones en la desembocadura del río Siuslaw en Oregón (Estados Unidos). El grado de similitud entre las predicciones del modelo numérico y la evolución de la línea de costa medida es relativamente bueno en los veinte años de comparación.

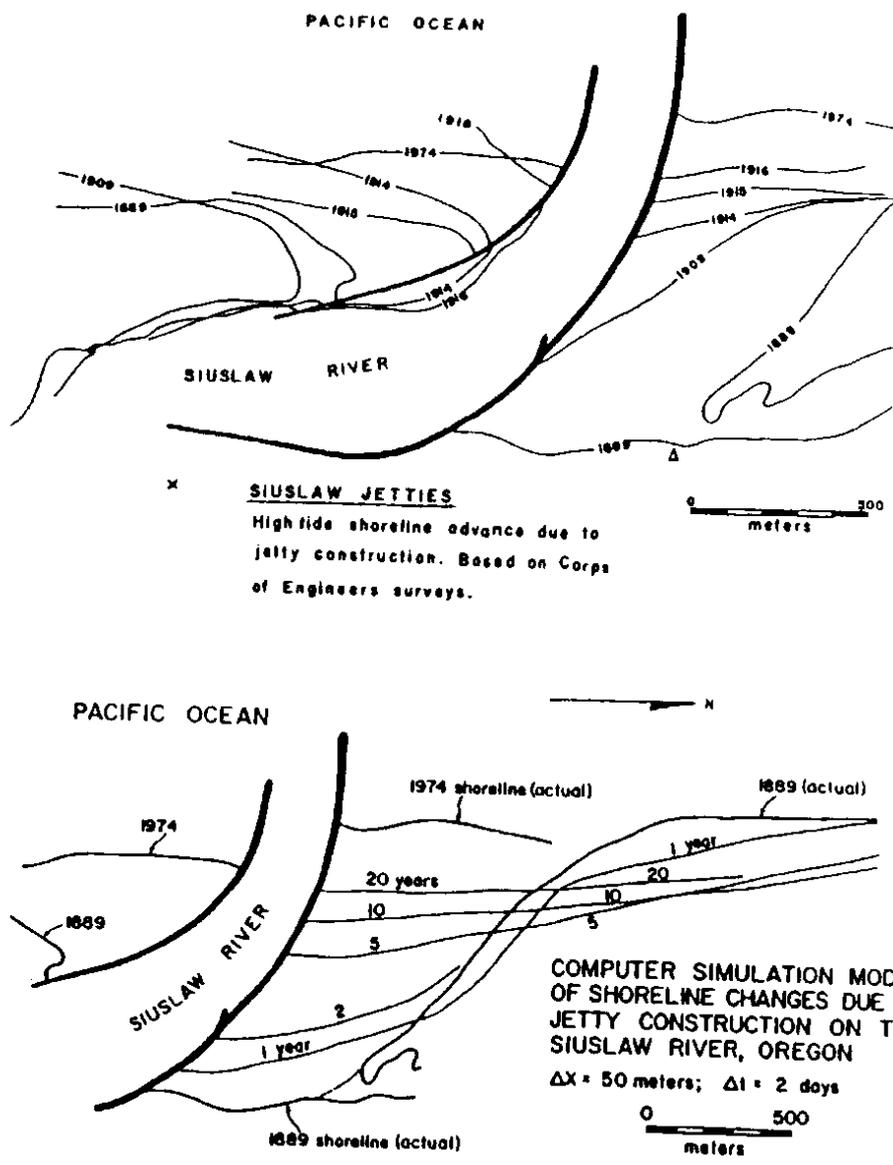


Figura I.23- Evolución de la línea de costa (parte superior) medida en la desembocadura de Siuslaw (Oregón, Estados Unidos). Evolución de la línea de costa (parte inferior) determinada con el modelo numérico de una línea (tomada de Komar et al., 1976)

Komar (1977) siguió analizando las formas de los deltas, pero en esta ocasión se preocupó por formas de deltas más complejos.

Horikawa et al. (1977) discutieron el efecto de dragados sobre la evolución de la línea de costa.

Willis (1977) aplicó el modelo de una línea a condiciones de prototipo, comparando la fórmula del CERC (SPM, 1984) para calcular el transporte longitudinal de sedimento con una expresión nueva. La refracción del oleaje sobre un fondo irregular fue incluida.

Le Méhauté y Soldate (1978) desarrollaron un modelo numérico en el que trataron de incluir: la variación en el nivel del mar, la refracción y difracción del oleaje, la circulación en la zona de rotura (rip) y los efectos de estructuras costeras sobre la evolución de la línea de costa en el largo plazo. Sin embargo, el modelo resultante no fue muy adecuado.

Le Méhauté y Soldate (1980) presentaron un modelo numérico implícito de evolución de línea de costa y lo analizaron con datos de campo.

La evolución de la línea de costa asociada a la construcción de muros fue estimada por Ozasa y Brampton (1980) utilizando el modelo de una línea. Asimismo, estos últimos propusieron una ecuación para determinar el efecto de las corrientes longitudinales generadas por una variación longitudinal de la altura de ola sobre el transporte longitudinal de sedimento.

I.4.3.2. El modelo GENESIS

Aunque se habían realizado diferentes estudios con modelos de una línea para examinar la evolución de la línea de costa en modelos físicos (laboratorio) y en condiciones de prototipo, sólo Kraus et al. (1984), Kraus y Larson (1988) y Hanson y Kraus (1986b) intentaron utilizar el modelo como una herramienta ingenieril para realizar predicciones de evolución de la línea de costa en una playa real.

Una de las primeras aplicaciones del modelo de una línea las realizaron Matsuoka y Ochi (1979) en Oarai (Japón). Con base en los datos disponibles de evolución de la línea de costa y de oleaje en Oarai, se desarrolló un modelo sofisticado de evolución de la línea de costa dentro del Programa Nearshore Environment Research Center (NERC), (Kraus y Harikai, 1983; Kraus et al., 1984; Hanson y Kraus, 1986b). Tanaka y Nadaoka (1982) desarrollaron un manual para poder aplicar el modelo a una costa arbitraria.

El modelo presentado por Kraus y Harikai (1983), Kraus et al. (1984) y Hanson y Kraus (1986a, 1986b), desarrollado específicamente para simular las condiciones en Oarai (Japón), fue reformulado de una manera generalizada (véase Hanson y Kraus, 1989), dando lugar al modelo numérico generalizado de una línea GENESIS (GENeralized model for SIMulating Shoreline change), consiguiendo que el modelo fuera aplicable a una playa abierta arbitraria. El modelo GENESIS fue realizado para el Centro de Investigación de Ingeniería Costera de la Armada Americana (CERC) y ha sido, hasta la actualidad, el modelo más utilizado entre los modelos de una línea por su generalidad (Hanson y Kraus, 1989; Gravens et al., 1991).

Posteriormente Hanson y Kraus (1986a) introdujeron al modelo de una línea GENESIS la condición de contorno de un muro.

Hanson y Larson (1987) presentaron comparaciones entre la solución numérica determinada con el modelo GENESIS y la solución analítica de la ecuación básica simplificada de los modelos de una línea descrita en el apartado I.4.2.1. Como resultado de estas comparaciones, se concluyó que la incapacidad de la solución analítica para incluir la refracción era más restrictiva para su aplicabilidad que la aproximación de pequeños ángulos.

Existen diferentes casos de aplicación del modelo numérico GENESIS. Así pues, Hanson et al. (1988) aplicaron dicho modelo en varias situaciones, incluyendo una simulación de la evolución de la línea de costa en Homer Spit (Alaska, Estados Unidos), el caso de la erosión generada por un muro en Sandy Hook (New Jersey, Estados Unidos) y el caso de tres diques exentos en Lakeview Park, Lorain, en el

Lago Erie (Ohio, Estados Unidos). En la figura I.24 se presentan los resultados determinados con el modelo GENESIS una vez calibrado, así como los medidos, para el caso de Homer Spit (Alaska, Estados Unidos).

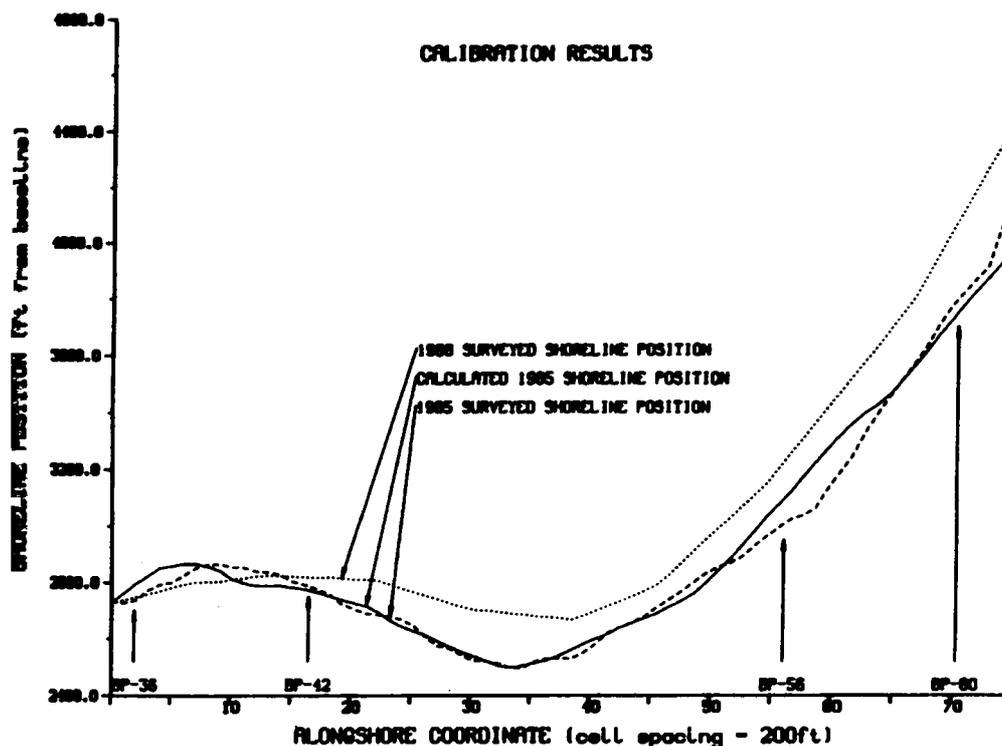


Figura I.24- Calibración del modelo GENESIS en el caso de Homer Spit (Alaska, Estados Unidos), (tomada de Hanson et al., 1988)

Otro de los casos comparativos entre la evolución de la línea de costa medida en Lakeview Park, Lorain, en el Lago Erie (Ohio, Estados Unidos) y la misma magnitud determinada con el modelo numérico GENESIS se presenta en la figura I.25 (véase Hanson et al., 1988 y Hanson y Kraus, 1991a). En este caso se construyeron tres diques exentos, dos espigones y se vertió arena. Aunque la similitud entre ambos resultados es aceptable en cuanto a tendencias de largo plazo, nótese que el modelo GENESIS dispone de una serie de parámetros de entrada de libre elección, los cuales han sido calibrados para conseguir estos resultados.

Otro ejemplo de aplicación del modelo GENESIS fue llevado a cabo por Hanson et al. (1989), los cuales estudiaron la transmisión a través de diques exentos y lo aplicaron en Holly (Louisiana, Estados Unidos). En la figura I.26 se muestra este caso, pero de nuevo merece la pena resaltar que los resultados presentados en esta figura han sido obtenidos una vez que el modelo GENESIS ha sido previamente cuidadosamente calibrado. Con el objetivo de conseguir este fin, en el modelo GENESIS se fueron variando las transmisiones en cada uno de los diques, además del resto de los parámetros de libre elección del modelo.

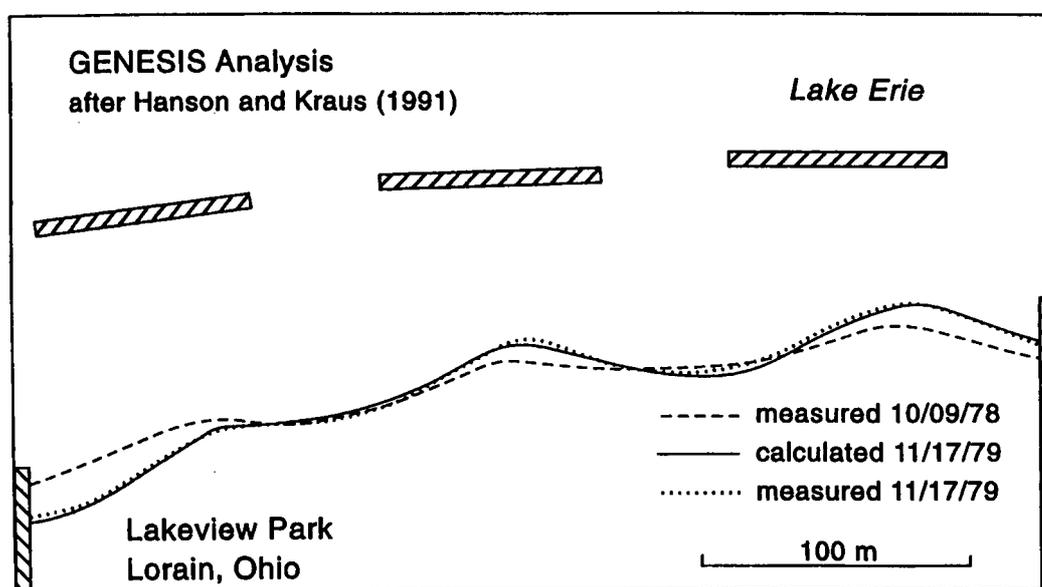


Figura I.25- Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo GENESIS frente a la magnitud medida en Lakeview Park, Lorain (Ohio, Estados Unidos), (tomada de Komar, 1998)

Como resultado de todos estos estudios de aplicación del modelo GENESIS, en los que se compararon las predicciones de dicho modelo numérico con las correspondientes medidas determinadas en modelo físico, tanto para casos de diques exentos, como para casos de espigones (véase Hanson y Kraus, 1991b), se puede concluir que el grado de similitud entre los diferentes resultados fue bastante bueno,

una vez que los diferentes parámetros del modelo numérico GENESIS habían sido calibrados con tal fin. Ahora bien, si se quiere utilizar el modelo GENESIS como herramienta ingenieril es imprescindible realizar previamente un proceso de calibrado del modelo para el lugar de aplicación.

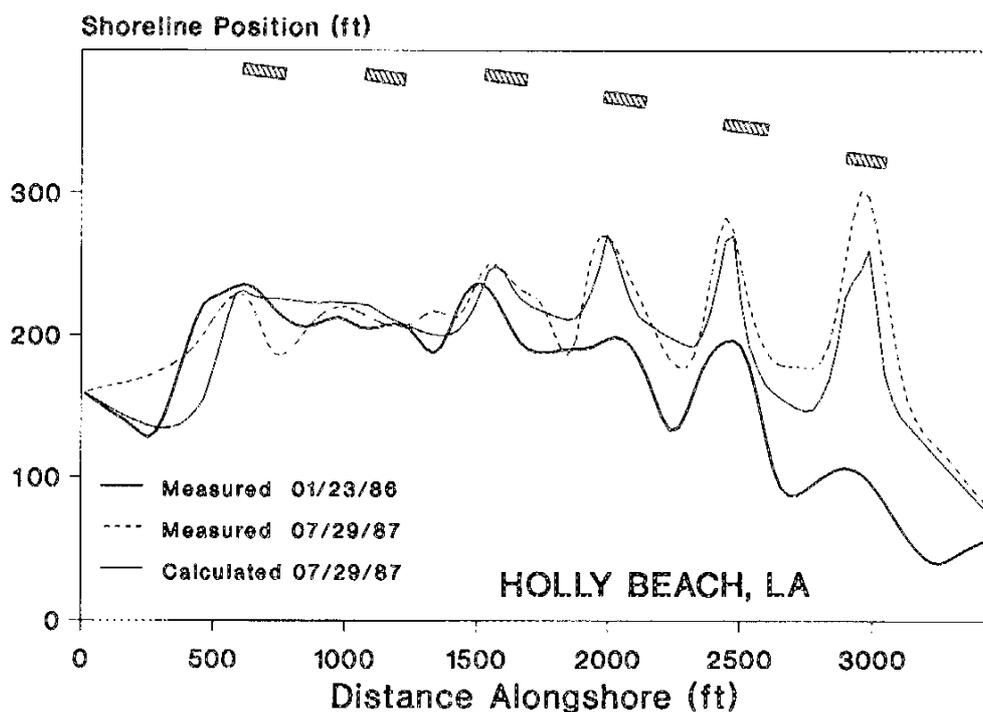


Figura I.26- Calibración del modelo GENESIS en Holly (Louisiana, Estados Unidos),
(tomada de Hanson et al., 1989)

Sin embargo, es relevante tener en cuenta que aunque el modelo GENESIS sea calibrado, existen una serie de procesos que el modelo está representando de una manera demasiado simple y que se traduce en una predicción de la línea de costa no del todo acertada. Así por ejemplo, el oleaje en las zonas donde los procesos de refracción-difracción conjuntamente son importantes (diques exentos, salientes, cabos) se representa de una manera simplificada en el modelo GENESIS, lo cual tiene una serie de implicaciones en la determinación de la evolución de la línea de

costa (como por ejemplo que la zona de refracción-difracción en la planta de equilibrio de la playa no dependa del período del oleaje).

Tampoco se debe olvidar que el modelo GENESIS no proporciona información de la variabilidad experimentada por el perfil de playa, pudiendo ser solamente aplicado en el largo plazo (años a décadas). Esta es la razón por la que los tres casos presentados de calibración del modelo (figuras I.24, I.25 y I.26) se extendían a escalas temporales grandes (anuales).

I.5. LIMITACIONES PRINCIPALES DE LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN EN EL LARGO PLAZO O MODELOS DE UNA LÍNEA

Después del estudio realizado de los modelos de una línea (evolución en el largo plazo), se puede destacar una serie de limitaciones principales clasificadas en dos grupos:

❖ *Aplicación en el medio plazo.*

La base de los modelos de una línea de asumir perfil de playa de forma y extensión constante es una limitación de considerable relevancia. Los modelos de una línea, ya de partida, al no incluir la variabilidad del perfil de playa no pueden ser una herramienta en el medio plazo, siendo incapaces de reproducir, entre otros fenómenos, las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano. Así pues, la aplicabilidad de estos modelos se limita al largo plazo (escalas temporales de años a décadas).

❖ *Aplicación en zonas de refracción-difracción.*

Entre las diferentes limitaciones y problemas encontrados en los modelos de una línea actuales, se puede destacar el caso de la aplicación de este tipo de modelos en zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes. Por una parte, la forma simplificada que utilizan los modelos de una línea para determinar el oleaje en estas zonas no es adecuada. Por otra parte, el hecho de asumir perfil de

playa de forma y extensión constante tiene sus implicaciones al estudiar las zonas analizadas, pues en éstas es necesario tener en cuenta la variabilidad espacial del perfil de playa para poder describirlas adecuadamente (necesidad de una formulación de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción).

I.6. ESTUDIOS QUE TRATAN DE ELIMINAR LAS LIMITACIONES PRINCIPALES DE LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN EN EL LARGO PLAZO O MODELOS DE UNA LÍNEA

Los diferentes estudios realizados que intentan extender el rango de aplicación de los modelos de evolución de largo plazo al medio plazo, así como los que se refieren a la aplicación de los modelos de evolución en las zonas de refracción-difracción, se presentan en este apartado.

I.6.1. APLICACIÓN EN EL MEDIO PLAZO: MODELOS DE EVOLUCIÓN QUE INTENTAN SER APLICABLES EN EL MEDIO-LARGO PLAZO

Con la idea de ampliar el rango de aplicación de los modelos de una línea, se han desarrollado diferentes modelos que tratan de incorporar la variabilidad del perfil de playa. Estos modelos se han clasificado en los tres grupos siguientes:

- Modelos de una línea con término de transporte transversal de sedimento.
- Modelos híbridos.
- Modelos de N líneas.

I.6.1.1. Modelos de una línea con término de transporte transversal de sedimento

Kamphuis (1993) desarrolló en la Universidad de Queen (Canadá) un modelo de una línea denominado ONELINE. Este modelo fue iniciado en 1988 parcialmente debido al hecho de que el código de uno de los modelos de evolución de una línea más utilizado en la práctica (modelo GENESIS) no era disponible. Posteriormente Dabees y Kamphuis (1997, 1998) refinaron el modelo, consiguiendo una versión más general.

En el modelo ONELINE se trató de introducir el transporte transversal de sedimento. Con esta idea, en la ecuación de partida de los modelos de una línea (véase ecuación I.1), el término que representa un aporte o pérdida de sedimento constante por unidad de longitud (denotado como q) fue modificado, pasando a representar la suma del anterior término con un término de transporte transversal de sedimento. Este transporte fue dividido en transporte por fondo y transporte por suspensión y se calculó con la formulación de Bailard (1981).

Siguiendo la misma línea, Hanson et al. (1997) y Hanson y Larson (1998) trataron de incorporar al modelo de una línea las variaciones estacionales de la línea de costa. En esta ocasión, el término q de la ecuación básica de los modelos de una línea (véase ecuación I.1) representó el transporte transversal de sedimento. Este transporte se calculó con una expresión similar a la propuesta por Horikawa (1988). Asimismo, se incluyó un criterio para decidir si el término en cuestión era un aporte o una pérdida de sedimento (condiciones acumulativas o erosivas). Sin embargo, al igual que en el modelo ONELINE, en este caso no se tenía en cuenta los cambios en la forma del perfil de playa. Otro de los inconvenientes del modelo desarrollado por los mencionados investigadores fue la incapacidad de representar el impacto de tormentas individuales sobre la línea de costa.

Como resultado del estudio realizado se concluye que este tipo de modelos, al incluir el término de transporte transversal de sedimento como condición de contorno, tratan de resolver el problema de una manera artificial, pero no tienen en

cuenta los cambios experimentados en el perfil de playa por la redistribución del sedimento dentro del mismo.

I.6.1.2. Modelos híbridos

El fundamento de los métodos híbridos consiste en acoplar un modelo de una línea con un modelo de evolución del perfil de playa.

Uno de los primeros métodos híbridos para determinar la evolución de las playas fue propuesto por Hashimoto y Uda (1980). Estos investigadores aplicaron las autofunciones empíricas para predecir la evolución del perfil de playa. Así pues, en el modelo de autofunciones la continuidad del material del fondo se estableció con el modelo de línea de costa y el perfil se describió con las autofunciones.

Posteriormente, Larson et al. (1990) presentaron un modelo híbrido, denominado 3DBEACH, que consistía en el acoplamiento del modelo de evolución de una línea GENESIS, con el modelo de evolución del perfil SBEACH (Larson y Kraus, 1989b). En este modelo híbrido el transporte longitudinal y el transporte transversal de sedimento son tratados independientemente, lo cual reduce significativamente el tiempo de ejecución del modelo. Sin embargo, la validez local de la línea transversal como el elemento de cálculo básico, restringe la aplicabilidad del modelo a situaciones con pendientes longitudinales del fondo suaves. El modelo 3DBEACH está orientado para ser aplicado en costas abiertas, no puede ser utilizado en el caso de bahías parcialmente cerradas en las que la línea de costa intercepta la línea transversal más que una vez. Con este modelo tampoco se puede representar la circulación en la zona de rotura (rip), ni los canales de retorno.

Shimizu et al. (1996) presentaron un modelo híbrido, el modelo 3D-SHORE, en el que se utilizaba un modelo de una línea para determinar la evolución de la línea de costa acoplado a un modelo de evolución de playa en 3D para determinar la batimetría y la evolución de la morfología de la playa (nótese que el modelo 3D-SHORE fue clasificado en el apartado I.3.1.2. como modelo 2DH).

En la figura I.27 se muestran las medidas de laboratorio obtenidas por Mimura et al. (1983) de la línea de costa, así como de otros contornos de la playa (profundidad de 2 y 4 centímetros). Asimismo, se presentan las mismas magnitudes estimadas con el modelo 3D-SHORE y con el modelo de una línea. Como se puede determinar a partir de la figura I.27, la evolución de la línea de costa se reproduce mejor con el modelo de una línea que con el modelo 3D-SHORE. Según Shimizu et al. (1996) este hecho está asociado a que el modelo de una línea utiliza pasos de tiempo más pequeños en la ejecución del modelo numérico, siendo más fácil calibrar los parámetros para que los valores medidos y estimados de la línea de costa sean similares.

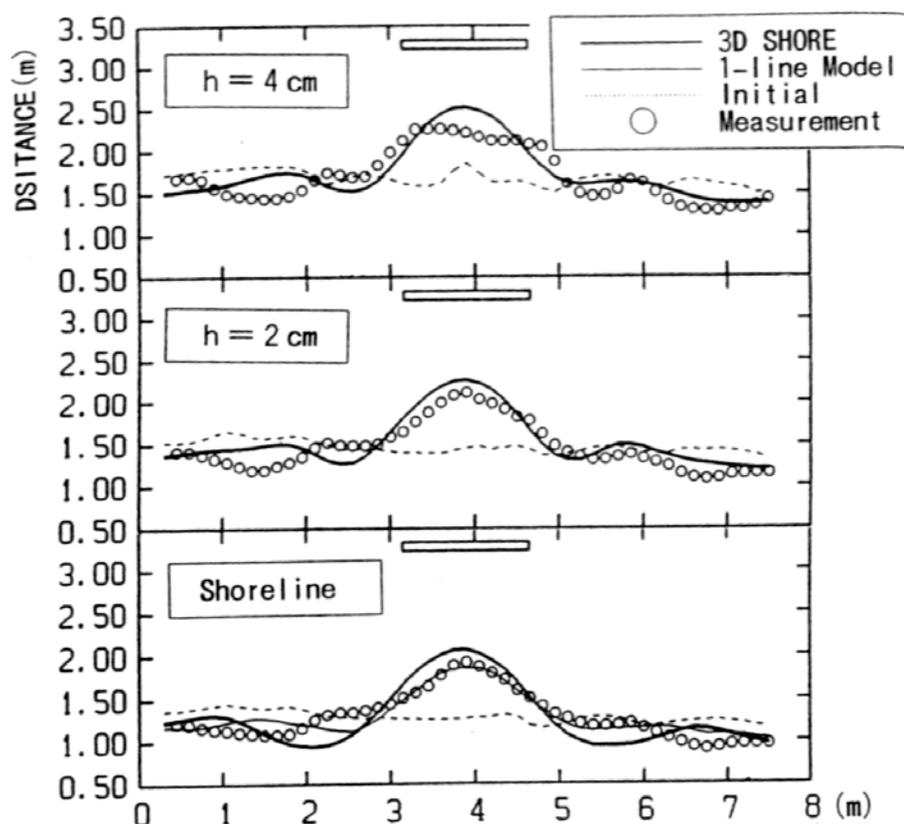


Figura I.27- Comparación entre las medidas de laboratorio realizadas por Mimura et al. (1983) y los resultados determinados numéricamente por Shimizu et al. (1996) de la línea de costa y de los contornos de profundidad de 2 y 4 centímetros (tomada de Shimizu et al. 1996)

Shimizu et al. (1996) también compararon el modelo 3D-SHORE con datos de campo tomados en Kunnui (Hokkaido, Japón). En la figura I.28 se presenta esta comparación al transcurrir un año. Es relevante tener en consideración que a pesar de los resultados aceptables que proporciona el modelo 3D-SHORE en escalas temporales anuales, no se presentaron resultados de este modelo en escalas más pequeñas (meses).

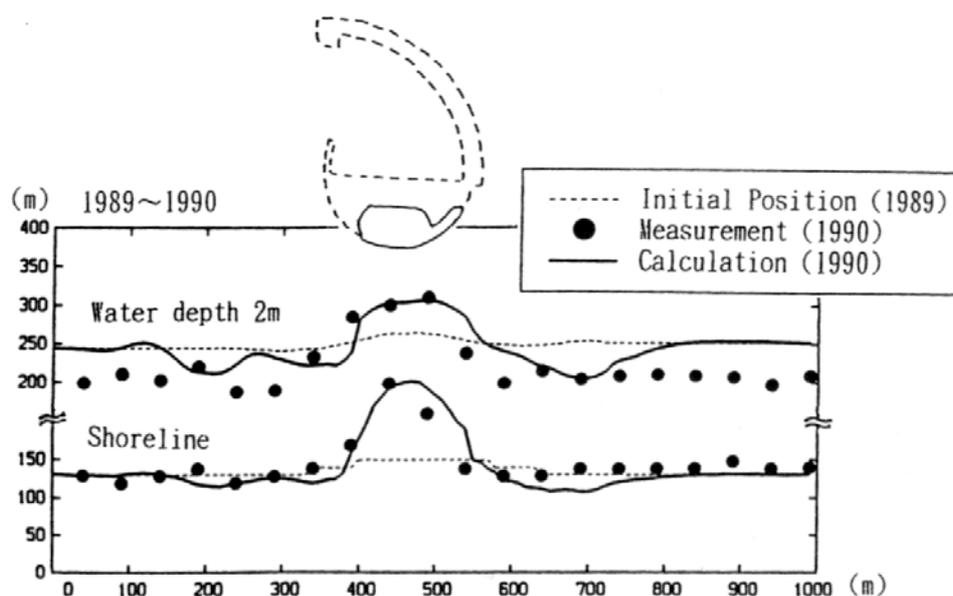


Figura I.28- Comparación entre los datos de campo tomados en Kunnui (Japón) y los resultados determinados numéricamente con el modelo 3D-SHORE de la línea de costa y el contorno de profundidad de 2 metros (tomada de Shimizu et al. 1996)

Entre los modelos híbridos más recientes, se encuentra el incluido en el paquete LITPACK del Danish Hydraulic Institute (véase DHI, 2001). Este paquete combina diferentes módulos para determinar la posición de la línea de costa: con una serie de módulos se determina la hidrodinámica y el transporte de sedimento mediante un esquema en 2DH (véase apartado I.3.1.2.) y, finalmente, el módulo LITLINE calcula la posición de la línea de costa. Este último módulo resuelve la ecuación de conservación de sedimento para determinar la posición de la línea de costa, tomando como dato de partida el transporte de sedimento proporcionado por otros módulos del paquete LITPACK.

Como conclusión del estudio de los modelos híbridos anteriores, se deriva que el acoplamiento de dos modelos puede ser una herramienta idónea con el fin de disponer de un modelo de evolución en el medio-largo plazo. Sin embargo, los modelos existentes presentan problemas que limitan su uso. Así por ejemplo, es cuestionable la utilización de los modelos 2DH de bucle abierto para determinar la evolución de las playas en el largo plazo (como los empleados en el modelo 3D-SHORE o el incluido en el paquete LITPACK), pues es conocido que este tipo de modelos puede llegar a desestabilizarse y generar soluciones físicamente imposibles. Por otro lado, la interacción planta perfil de alguna de las propuestas de este apartado, como es el caso del modelo 3DBEACH, es demasiado débil y no refleja la realidad de la evolución de las playas. Así pues, a pesar de las limitaciones detectadas en este último modelo, sí que se considera más adecuada la vía seguida por éste, al utilizar un modelo de evolución de perfil de bucle cerrado.

I.6.1.3. Modelos de N líneas

En este apartado se va a realizar un estudio de los modelos de N líneas. En primer lugar se van a describir las características principales de estos modelos. Posteriormente se describirán los diferentes modelos que han ido apareciendo a lo largo del tiempo, distinguiéndose entre los modelos analíticos y los numéricos.

I.6.1.3.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Los modelos de N líneas surgen precisamente con la idea de incorporar la variabilidad del perfil de playa en los modelos de una línea, intentando extender el rango de aplicación de estos últimos al medio plazo. Así pues, pretenden introducir a los modelos de evolución en planta o modelos de una línea la información del perfil de playa.

En los modelos de N líneas se realiza un seguimiento no sólo de la línea de costa, sino también de N contornos, entre los que se establece una conexión a través

de un intercambio de transporte transversal de sedimento (véase la figura I.29 en la que aparece una representación esquemática de una playa con un modelo de N líneas). Consecuentemente, estos modelos se pueden describir como un conjunto de modelos de una línea conectados por el intercambio de transporte transversal de sedimento. En este tipo de modelos, a excepción de algún modelo (como por ejemplo el modelo NLINE de Dabees y Kamphuis, 2000), el transporte transversal de sedimento se calcula con base en la diferencia entre el perfil existente y el perfil de equilibrio.

Los modelos de N líneas, partiendo de la teoría de una línea, tratan de aproximarse a una descripción en 3D de la evolución de la playa. Describen cambios en la topografía del fondo en ambas direcciones, tanto la longitudinal como la transversal, bajo hipótesis simplificadoras que restringen la forma del perfil. Similarmente a lo especificado en el apartado I.3.1.1., en el que se clasificaban los modelos de evolución de perfil, se puede discernir entre los modelos de N líneas (a excepción del modelo NLINE de Dabees y Kamphuis, 2000), que tratan de aproximarse a una descripción en 3D de las playas, pero imponiendo una tendencia al equilibrio (modelos de bucle cerrado) y los modelos de evolución en 3D propiamente dichos, en los que se trata de modelar los procesos físicos involucrados, sin incluir la tendencia al equilibrio (modelos de bucle abierto).

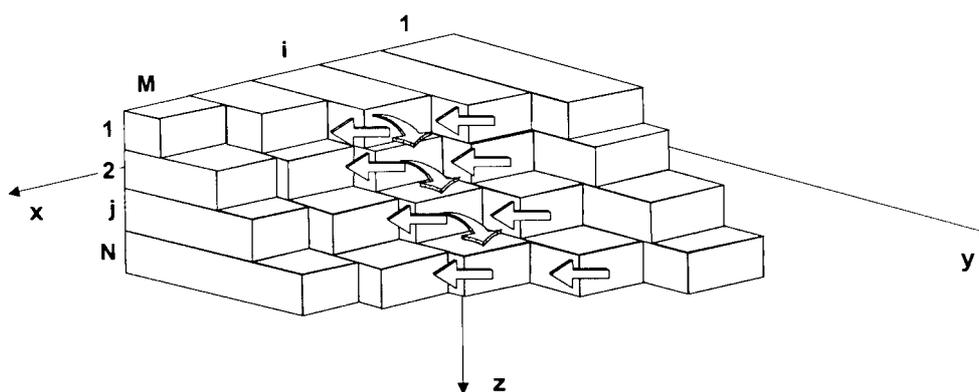


Figura I.29- Representación esquemática de una playa con un modelo de N líneas (tomada de Hanson y Larson, 2000)

El primer modelo de este tipo fue un modelo de dos líneas (Bakker, 1968). Posteriormente Perlin y Dean (1978,1983) desarrollaron un modelo de N líneas relativamente sofisticado para determinar el cambio de los contornos de la playa. Hasta la fecha se ha seguido investigando sobre los modelos de N líneas, encontrándose entre estos modelos recientes los siguientes:

- NLINE propuesto por Dabees y Kamphuis (1999,2000).
- INLINE desarrollado por Hanson y Larson (2000).

Los modelos actuales de N líneas, en principio podrían llegar a ser aplicados en situaciones con escalas temporales de meses a décadas y con escalas espaciales de unos pocos cientos de metros a unos cientos de kilómetros. Sin embargo, este tipo de modelos necesita mucho más tiempo de ordenador comparado con el que requieren los modelos de una línea. Asimismo, debido a la pérdida del fenómeno físico involucrado al intervenir el intercambio de transporte transversal de sedimento para el que no se han establecido expresiones fiables cuantitativamente, los modelos de N líneas no se han utilizado mucho en aplicaciones ingenieriles.

I.6.1.3.2. MODELOS ANALÍTICOS

El primer estudio en el que se analizó la posibilidad de desarrollar un modelo de más de una línea fue realizado por Bakker (1968). Este último extendió la teoría de una línea a dos líneas con la intención de describir el cambio de la forma en planta de las playas. El perfil de playa, como se observa en la figura I.30, fue dividido en dos líneas: una de ellas hacía referencia al movimiento del contorno dentro de la zona de rompientes (línea de costa) y la otra al movimiento del contorno exterior del perfil. El intercambio del transporte transversal de sedimento, según Bakker (1968), estaba relacionado con la pendiente del perfil y se calculó en función de la diferencia de la distancia entre las dos líneas anteriores. De tal forma que el sedimento se movería hacia aguas profundas si el perfil de playa tenía mucha pendiente o bien hacia la costa si el perfil de playa era suave.

La teoría de dos líneas proporcionó una mejor descripción del movimiento de sedimento en tramos de costa al abrigo de espigones de considerable longitud, pues permitió tener en cuenta los cambios representativos que se producían en los contornos exteriores al morro del espigón. En la proximidad de estructuras, tales como espigones, los contornos exteriores deberían tener una forma diferente a la de la línea de costa.

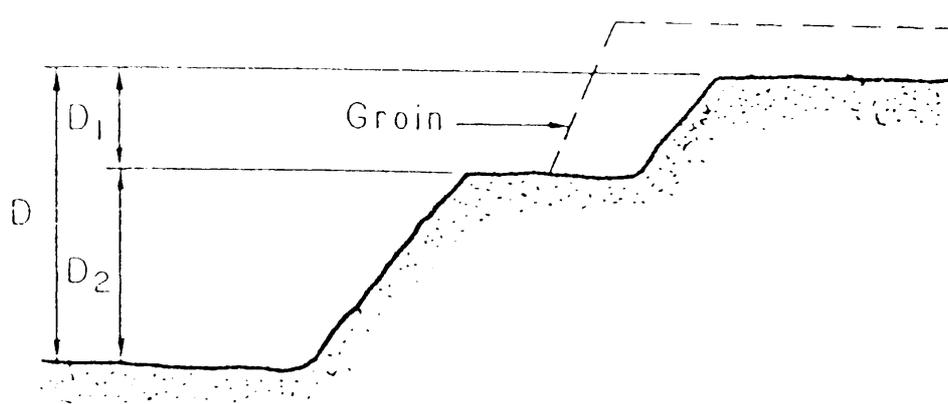


Figura I.30- Definición esquemática de la teoría de dos líneas de Bakker (1968), (tomada de Larson et al., 1987)

Así pues, Bakker (1968) aplicó el modelo de dos líneas para obtener soluciones analíticas para muchos casos ideales. Las dos líneas en el modelo fueron representadas por un sistema de dos ecuaciones diferenciales, las cuales fueron acopladas a través de un término que describía el transporte transversal de sedimento. Se asumieron dos hipótesis: una para el transporte longitudinal de sedimento y otra para el transporte transversal del mismo. En la dirección longitudinal se asumió que el intercambio de transporte era una función lineal del ángulo del oleaje incidente. En cuanto al transporte transversal de sedimento, se asumió que dependía de la pendiente del perfil.

Un ejemplo de la solución de la teoría de dos líneas para un sistema de espigones se muestra en la figura I.31. Esta solución describe la forma estacionaria

de la línea de costa para diferentes separaciones entre espigones expresadas en múltiplos de la longitud de éstos. Los resultados obtenidos de esta forma fueron cualitativamente realistas pero no se realizó ninguna comparación cuantitativa con condiciones de prototipo.

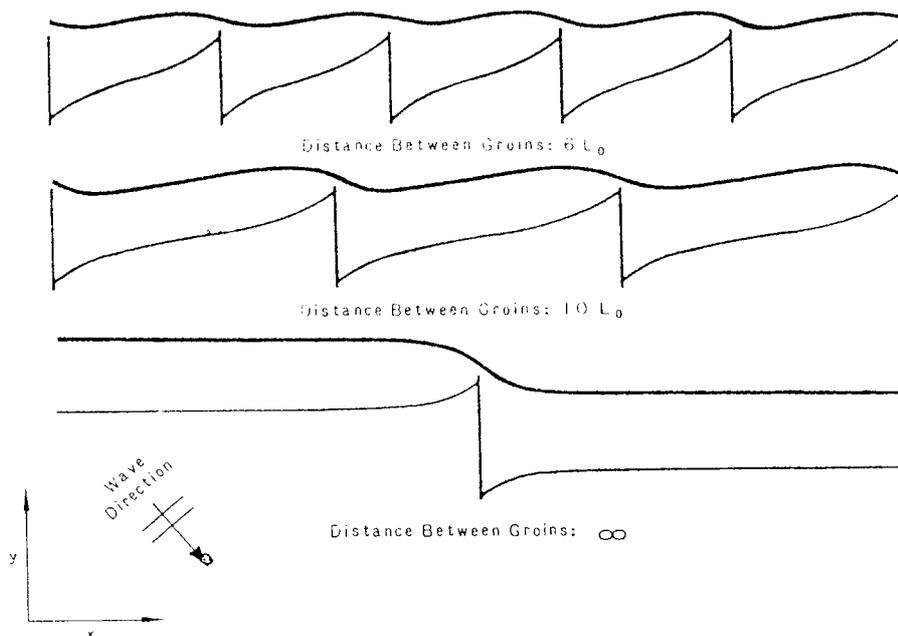


Figura I.31- Aplicación de la teoría de dos líneas de Bakker (1968) en el caso de un sistema de espigones (tomada de Larson et al., 1987)

Posteriormente Bakker et al. (1970) plantearon expresiones para determinar el coeficiente de difusión en la teoría de dos líneas (recuérdese que, como ya fue especificado en el apartado I.4.2.1., el coeficiente de difusión es el coeficiente presente en la ecuación que resulta de combinar y linealizar la ecuación de conservación de masa del sedimento y la de transporte longitudinal del mismo).

Bakker (1970) propuso una expresión para el intercambio de transporte transversal de sedimento, la cual era función de la distancia entre las dos líneas del modelo de dos líneas y la misma distancia cuando el perfil de playa se encontraba en equilibrio.

Hulsbergen et al. (1976) continuaron estudiando la evolución de la línea de costa bajo la influencia de un sistema de espigones. Con tal fin, utilizaron un método analítico de la teoría de dos líneas basado en las ecuaciones de gobierno linealizadas y lo compararon con datos de laboratorio.

I.6.1.3.3. MODELOS NUMÉRICOS

Los primeros intentos de desarrollar modelos numéricos de N líneas comenzaron con Bakker et al. (1970). Estos investigadores siguieron trabajando en la teoría de dos líneas propuesta por Bakker (1968), extendiendo el estudio previo para tener en cuenta la difracción generada por el espigón. En este caso fue necesario resolver numéricamente las ecuaciones de gobierno. También se investigó la influencia de condiciones de oleaje variables. Este trabajo, al igual que el de Bakker (1968), fue estrictamente teórico y no se estudió ninguna aplicación de prototipo.

Siguiendo la idea de Bakker (1968), Perlin (1977) desarrolló un modelo numérico de dos líneas y lo analizó, obteniendo resultados satisfactorios de la comparación de este modelo con datos de laboratorio.

Posteriormente Perlin y Dean (1978), con base en Perlin (1977), desarrollaron un modelo numérico explícito de dos líneas. Estos autores realizaron una extensión del modelo de dos líneas de Bakker et al. (1970) al caso de N líneas.

Horikawa et al. (1979) también utilizaron un modelo numérico de dos líneas (al igual que Bakker, 1968 y Bakker et al., 1970) para simular la evolución de una playa en laboratorio (Universidad de Tokio). Aunque los autores indicaron que el modelo propuesto simulaba aproximadamente los cambios en planta de la playa, en términos cuantitativos las predicciones no fueron muy precisas (véase como ejemplo la figura I.32).

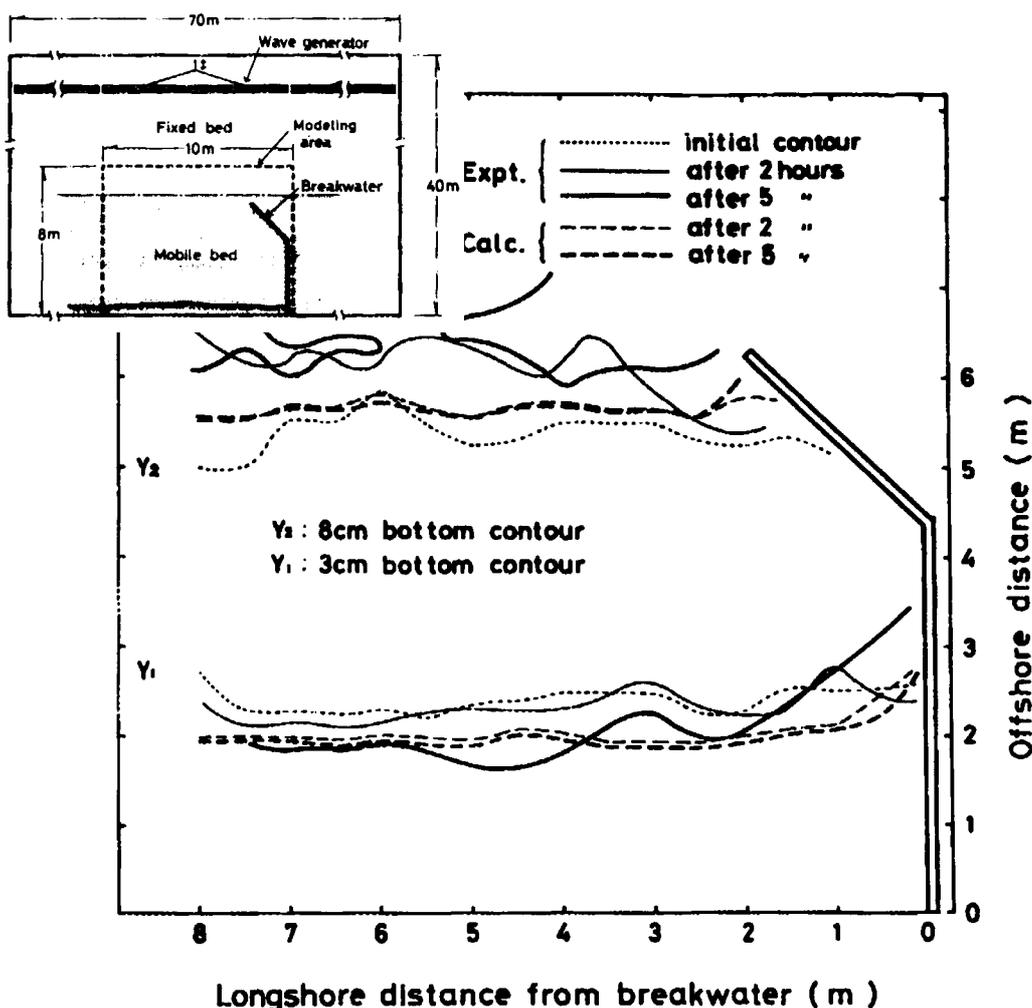


Figura I.32- Comparación del movimiento de los contornos determinado con el modelo numérico de dos líneas frente a lo medido en laboratorio (tomada de Horikawa et al., 1979)

Con base en el modelo de dos líneas de Bakker (1968), Perlin y Dean (1983) desarrollaron un modelo de N líneas relativamente sofisticado para determinar el cambio de los contornos de las playas. Los anteriores investigadores presentaron un informe muy extenso, el cual incluía el desarrollo del modelo de N líneas, incluido su código en lenguaje fortran. A partir de datos de laboratorio se desarrolló una expresión adimensional para la distribución transversal del transporte longitudinal de sedimento. El intercambio de transporte longitudinal total de sedimento fue calculado con la expresión clásica del CERC (Hanson, 1989). La expresión de Bakker (1968)

fue utilizada para el transporte transversal de sedimento. Los cálculos fueron comparados con datos de prototipo, existiendo discrepancia entre ellos; el ajuste obtenido no fue muy bondadoso. Los resultados calculados parecían una versión suavizada de la condición de la línea de costa inicial, con mucha erosión y no suficiente acreción. Por lo que, tal y como ya comentaron los autores, muchos de los parámetros del modelo eran incorrectos y la aproximación completa fue considerada insatisfactoria.

Scheffner y Rosati (1987) mejoraron el modelo de Perlin y Dean (1983) y lo generalizaron. Sin embargo, la validez del modelo fue cuestionable. De hecho, la evolución de la playa calculada en Lakeview Park, Lorain, en el Lago Erie (Ohio, Estados Unidos) mostró limitadas similitudes con los cambios obtenidos en el prototipo.

Bakker et al. (1988) continuaron el trabajo de Bakker et al. (1970). Se siguieron dos vías para determinar las constantes costeras necesarias en el modelo: una fue a partir del comportamiento costero previo y la otra fue a partir del oleaje. El hecho de que las constantes que controlaban la interacción entre las diferentes capas del modelo de N líneas tuvieran que ser establecidas a priori, puso en tela de juicio la validez de los modelos de N líneas.

Johnson y Kamphuis (1988) propusieron un modelo de N líneas adaptado especialmente al caso de una isla inicialmente cónica. El modelo utilizaba las expresiones de Bakker (1968) para determinar el transporte transversal de sedimento. Las predicciones del modelo fueron comparadas con resultados en modelo hidráulico. Sin embargo, el grado de similitud entre ambos fue, todo lo más, cualitativo.

Uda et al. (1996) desarrollaron un modelo de evolución de líneas (modelo CLC, cambio de la línea de contorno) para costas con perfiles de pendientes grandes, sin senos y sin barras en la topografía. Este modelo todavía conserva la hipótesis de pequeños ángulos de incidencia del oleaje. Se utilizó para simular la evolución de playas bajo la influencia de diques exentos y para estudiar el desarrollo de deltas en ríos (Uda et al., 1998).

Steetzel et al. (1998a) realizaron un informe, compuesto de cuatro volúmenes separados, que marcó una nueva era en el modelado de N líneas. Aunque el concepto básico del modelo de N líneas era el mismo que en los modelos previos, las constantes costeras del modelo necesarias a priori fueron sustituidas por formulaciones para medir el intercambio de transporte longitudinal y transversal de sedimento, las cuales dependían directamente del oleaje, condición mareal, batimetría y características de los sedimentos.

El intercambio de transporte longitudinal de sedimento inducido por el oleaje dentro de cada capa se calculó como un intercambio de transporte total integrado transversalmente multiplicado por una fracción asociada con la capa en particular. Adicionalmente, se calculó un intercambio de transporte longitudinal de sedimento asociado con las corrientes mareales. En la dirección transversal, el intercambio de transporte de sedimento dentro de cada elemento se calculó como un producto de un intercambio de transporte potencial, por una función de distribución y por una relación entre la pendiente del fondo local real y la pendiente del fondo local en equilibrio. Aunque el sistema parecía bastante robusto, la función de distribución para el intercambio de transporte longitudinal, así como la expresión para el intercambio de transporte transversal, parecían muy simplificadas.

Steetzel et al. (1998a) plantearon el modelo PonTos, el cual fue desarrollado para aplicaciones de largo plazo y grandes escalas, tales como la evolución de la costa danesa al completo durante centurias o milenios originada por el ascenso del nivel del mar. Como un modelo basado en procesos no es adecuado para resolver estas escalas, el modelo PonTos es un modelo con tendencia al equilibrio, también denominado como modelo de comportamiento orientado (behaviour-oriented). En principio, el modelo podía ser aplicado para otras aplicaciones ingenieriles con una escala de longitud de decenas de kilómetros y una escala en el tiempo de décadas. Ahora bien, con este modelo no se puede describir la influencia de estructuras costeras sobre la evolución de la línea de costa. Otros efectos que no fueron incluidos en el modelo son: la refracción, la interacción entre la marea y las corrientes inducidas por el oleaje y la difracción generada por estructuras.

Posteriormente Steetzel et al. (1998b) presentaron una versión condensada del informe de Steetzel et al. (1998a).

Van de Graaf et al. (1998) analizaron brevemente una aplicación ingenieril del modelo PonTos descrito en Steetzel et al. (1998a). No se mostró ninguna comparación entre resultados del modelo y medidas de prototipo. En cuanto a las comparaciones con medidas de laboratorio no fueron muy alentadoras. Otro de los inconvenientes del modelo era la representación de estructuras costeras, punto que era imprescindible mejorar.

Hanson y Larson (1999) analizaron la extensión del modelo de una línea GENESIS a N líneas. En este trabajo estudiaron solamente un perfil. Por consiguiente, sólo se consideró transporte transversal de sedimento. La expresión para calcular el intercambio de transporte fue similar a la propuesta por Steetzel et al. (1998a). Así pues, dentro de cada elemento el transporte transversal de sedimento se calculó como un producto de un intercambio de transporte potencial, por una función de distribución y por una relación entre la pendiente del fondo local real y la pendiente del fondo local en equilibrio. De estos términos, sólo el término de pendiente se tomó de Steetzel et al. (1998a), los otros términos eran novedosos. Se realizó una comparación con un caso de prototipo y se pudo observar un buen comportamiento en escalas anuales, pero las tormentas individuales no fueron representadas. Sin embargo, la comparación llevada a cabo se restringió a las fluctuaciones de la línea de costa, mientras que el comportamiento de los otros contornos estaba aún por verificar.

Steetzel y de Vroeg (1999) realizaron un estudio casi idéntico al realizado por Steetzel et al. (1998b).

Dabees y Kamphuis (1999, 2000) desarrollaron un modelo de evolución de líneas (NLINE) para diferentes configuraciones de playa y estructuras. Este modelo tuvo su base en el modelo ONELINE desarrollado por los mismos autores. En el modelo NLINE el intercambio de transporte longitudinal de sedimento se determinó con la expresión propuesta por Kamphuis (1991) y modificada para tener en consideración el transporte de sedimento asociado con los gradientes longitudinales

de altura de ola, tal y como propusieron Ozasa y Brampton (1980). La distribución transversal del transporte longitudinal de sedimento se calculó con la expresión teórica propuesta por Komar (1977). Con respecto al transporte transversal de sedimento, se obtuvo tanto el transporte por fondo, como el de suspensión, utilizándose con tal fin las expresiones propuestas por Bailard (1981).

El principal inconveniente del modelo NLINE consiste en que es un modelo de procesos o de bucle abierto. Por lo tanto, al no incluir una tendencia al equilibrio, en períodos de tiempo elevados este tipo de modelos puede desestabilizarse y generar soluciones físicamente imposibles. Téngase además en cuenta que la credibilidad de un modelo de tales características depende totalmente de las expresiones utilizadas para el cálculo del transporte de sedimento, expresiones que dependen de una serie de parámetros que deben ser calibrados con base en medidas.

Steetzel et al. (2000) extendieron el trabajo de Steetzel et al. (1998a, 1998b) y Steetzel y de Vroeg (1999) para poder simular con el modelo propuesto por estos autores el efecto de estructuras. Así pues, incluyeron el efecto de la refracción, asomeramiento y difracción del oleaje.

Hanson y Larson (2000) extendieron el trabajo de Hanson y Larson (1999) a un modelo tipo N líneas con M perfiles a lo largo de la costa, el cual se denominó modelo de N líneas INLINE. De esta forma, el intercambio de transporte longitudinal de sedimento fue también incluido. Además del caso de prototipo presentado en Hanson y Larson (1999), se mostró un caso de espigón. Aunque cualitativamente el modelo predijo resultados similares a los medidos, es imprescindible realizar un análisis más profundo con el objetivo de verificar el modelo desde un punto de vista cuantitativo. Al igual que Hanson y Larson (1999), el modelo propuesto por Hanson y Larson (2000) es incapaz de representar el impacto de las tormentas individuales sobre la línea de costa.

Es relevante destacar que el modelo INLINE es un modelo, en principio, con tendencia al equilibrio o de bucle cerrado (utiliza las expresiones propuestas por Larson y Wise, 1998 para determinar el perfil de equilibrio).

I.6.2. APLICACIÓN EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN

Los estudios que han tratado de eliminar las limitaciones encontradas en el caso particular de la aplicación de los modelos de una línea actuales en zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes, se van a estudiar clasificados en función de los dos aspectos considerados siguientes:

✓ *Determinación del oleaje.*

La determinación de las características del oleaje en rotura en las zonas de influencia de estructuras costeras (diques exentos, cabos, salientes) en las que los procesos de refracción-difracción son los preponderantes, se ha venido calculando en los modelos de una línea mediante métodos simplificados. Un ejemplo de estos métodos simplificados es el que utiliza el modelo GENESIS o bien el que emplea el modelo LITLINE, perteneciente al paquete LITPACK del Danish Hydraulic Institute (véase DHI, 2001). Sin embargo, estos métodos simplificados no son adecuados, siendo necesario realizar una serie de mejoras. Con este idea, Dabees y Kamphuis (2000) propusieron un método nuevo y totalmente diferente a los anteriores para calcular las características del oleaje en las zonas objeto de interés dentro del modelo de una línea ONELINE. Aunque el método utilizado por este último modelo posee algunas ventajas con respecto a los anteriores, tampoco fue del todo acertado.

✓ *Perfil de equilibrio.*

En la actualidad no existe una formulación de perfil de equilibrio adecuada para zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes. Aunque González et al. (1997) propusieron una expresión para la determinación del perfil de equilibrio con refracción, esta formulación no es acertada para estudiar las zonas de refracción-difracción.

I.7. CONCLUSIONES

Después del estudio realizado del estado del arte de los modelos de evolución de playas, se derivan las siguientes conclusiones:

❖ Se verifica que no existen en la actualidad modelos de predicción de evolución de playas que puedan ser aplicados en todo el rango de escalas y puedan ser utilizados para estudiar cualquier problema que se presente.

❖ Aunque en el corto-medio plazo y en el largo plazo se dispone de herramientas específicas para estudiar la evolución de las playas, existe un vacío en cuanto a modelos de evolución aplicables en el medio-largo plazo.

❖ La mayoría de los modelos de evolución existentes que intentan ser aplicables en escalas de medio-largo plazo se basan en modelos de una línea.

❖ Resolver el medio plazo requiere de la incorporación de la variabilidad del perfil de playa a los modelos de evolución de la planta de las playas en el largo plazo o modelos de una línea.

❖ De las tres opciones diferenciadas en la literatura (modelos de una línea con término de transporte transversal de sedimento, modelos híbridos, modelos de N líneas) con las que se ha intentado desarrollar una herramienta para el medio-largo plazo, se considera más adecuada la opción de utilizar un modelo híbrido que incorpore un modelo de evolución de perfil de bucle cerrado o basado en una formulación de equilibrio.

❖ Los problemas detectados en la aplicación de los modelos de evolución de largo plazo en zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes deben ser resueltos mediante la incorporación de una nueva metodología para determinar las características del oleaje en rotura en estas zonas, así como con la propuesta de una formulación de perfil de equilibrio en las zonas analizadas.

ANEJO II

CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL MODELO NUMÉRICO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE MSP

II.1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se van a describir las características esenciales del modelo numérico de propagación de oleaje MSP referenciado en los capítulos 6 y 7 de la sección 3 de la Tesis. Se debe tener en consideración que este modelo no sólo ha servido para detectar algunas de las deficiencias de los diferentes métodos para la determinación de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción que utilizan los principales modelos de evolución de largo plazo antecesores, sino también y especialmente ha contribuido en el desarrollo de la metodología propuesta en el capítulo 7 para la obtención de las mencionadas características.

El modelo numérico denotado como MSP resuelve la aproximación parabólica de la *ecuación de la pendiente suave* (“*mild slope equation*”) extendida en ángulos de propagación de acuerdo a Kirby (1986b).

En el desarrollo de la sección 3 de la Tesis se ha trabajado con las dos versiones del modelo numérico MSP de las que dispone el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, la versión para oleaje monocromático, denominada como Oluca-MC (GIOC, 2001a), y la versión para oleaje espectral u Oluca-SP (GIOC, 2001b). Para una descripción detallada de estos modelos, véase GIOC (2001a) y GIOC (2001b).

II.2. FUNDAMENTOS

El problema de la propagación de ondas sobre batimetría irregular es tridimensional e involucra complicadas condiciones de contorno no lineales. Esto tiene como consecuencia que existen muy pocas soluciones al problema tridimensional y todas ellas lo son para fondo plano horizontal. En dos dimensiones, los sofisticados modelos de Chu y Mei (1970) y Djordjevic y Redekopp (1978) predicen el comportamiento de ondas de Stokes sobre batimetría con variación suave. Para la simplificación del problema tridimensional, Berkhoff (1972) entre

otros, hizo notar que la mayor parte de las propiedades de las ondas progresivas lineales pueden ser obtenidas mediante un modelo ponderado integrado verticalmente. Dentro de este contexto, Berkhoff (1972) obtuvo la expresión que se conoce con el nombre de *ecuación de la pendiente suave* o “*mild slope equation*”.

Así pues, el estudio del fenómeno de la refracción-difracción conjuntamente tiene su base en Berkhoff (1972), el cual puso fin a las teorías simplificadoras previas que separaban los procesos de refracción y difracción, asumiendo que la difracción era el fenómeno predominante en la proximidad del obstáculo y la refracción lo era a una distancia “*suficientemente alejada*” de éste (varias longitudes de onda o al menos seis veces la anchura del obstáculo en el sentido perpendicular a la dirección de avance del oleaje).

Berkhoff (1972), considerando teoría lineal de ondas y teniendo en consideración la hipótesis de que el fondo variaba muy suavemente en una longitud de onda, obtuvo una ecuación capaz de tener en cuenta la refracción y la difracción conjuntamente, la *ecuación de la pendiente suave* (“*mild slope equation*”). La *ecuación de la pendiente suave* se obtuvo integrando la ecuación de Laplace en tres dimensiones y aparece indicada en la ecuación (II.1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(CC_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(CC_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (\text{II.1})$$

Los términos de la expresión (II.1) quedan definidos de la siguiente forma: C es la celeridad de la onda, C_g es la celeridad de grupo, ϕ es el potencial del flujo y k es el número de onda, definido como $k=2\pi/L$ (L es la longitud de onda).

Radder (1979) desarrolló una aproximación para la *ecuación de la pendiente suave*, la aproximación parabólica, la cual tiene ventajas sobre la forma elíptica planteada por Berkhoff (1972). Con esta aproximación, ya no son necesarias las condiciones de contorno en el extremo inferior del recinto de integración y además se dispone de técnicas de resolución eficientes en diferencias finitas. La aproximación

de Radder (1979) para las derivadas transversales en la dirección normal a la de propagación impone una restricción a su modelo parabólico, pues las ondas deben propagarse dentro de los ± 45 grados alrededor de la dirección principal de propagación.

Booij (1981) desarrolló un método para la partición de la matriz de la ecuación elíptica, pero su procedimiento incluye más términos en la aproximación de las derivadas transversales, y por lo tanto, su método permite al modelo parabólico trabajar con ondas dentro del rango de los $\pm 50-60$ grados alrededor de la dirección principal de propagación. Esta aproximación es la que se utiliza en los modelos numéricos utilizados en esta Tesis (Oluca-MC y Oluca-SP). Los predecesores de estos modelos utilizados en la Tesis fueron desarrollados por Kirby (1983) y por Kirby y Dalrymple (1983). Para más detalles sobre las ecuaciones que utiliza el modelo Oluca-MC, véase Kirby y Dalrymple (1985) y Kirby (1986a). En el modelo Oluca-SP se ha implementado la aproximación de Padde (véase Kirby y Özkan, 1994).

Merece la pena resaltar que los modelos numéricos de propagación utilizados en la Tesis (Oluca-MC y Oluca-SP) tienen en cuenta los fenómenos del oleaje siguientes: asomeramiento, refracción por fondo, difracción, presencia de corrientes, disipación de energía, rotura (el término de disipación por rotura dentro del modelo Oluca-SP se calcula con tres métodos: Battjes y Janssen, 1978; Thornton y Guza, 1983 y Winyu y Tomoya, 1998), y dispersión por amplitud.

Asimismo, es necesario comentar que el modelo Oluca-SP permite dos maneras de definir el espectro frecuencial: una de ellas es mediante la lectura de un archivo externo y la otra a partir de un espectro TMA (Texel Marsen Arsloe). El espectro TMA se aplica en zonas cercanas a la costa donde las profundidades son relativamente poco profundas y el oleaje se encuentra afectado por el fondo. Se define a partir de un espectro JONSWAP, el cual es modificado por una función adimensional de la profundidad (véase Hughes, 1984). En cuanto a la función de dispersión direccional, en el modelo Oluca-SP se utiliza la expresión propuesta por Borgman (1984).

II.3. HIPÓTESIS

Es importante que se tengan en cuenta las hipótesis en las que se basan los modelos numéricos de propagación del oleaje (Oluca-MC y Oluca-SP) que se están utilizando, las cuales se enumeran a continuación:

□ *Fluido*

- 1) No viscoso.
- 2) Incompresible.
- 3) Densidad constante.

□ *Flujo*

- 1) Irrotacional.
- 2) Estacionario.

□ *Dinámicas*

- 1) Presión constante en la superficie libre.
- 2) No se considera la acción del viento.
- 3) No se considera la acción de Coriolis.

□ *Contornos*

1) Fondo de pendiente suave. Es precisamente en esta hipótesis en la que se basó el desarrollo matemático de las ecuaciones del modelo. Las variaciones del fondo con las coordenadas horizontales deben ser pequeñas en comparación con la longitud de onda. Booij (1983), para el modelo lineal, realizó una comparación entre un modelo numérico exacto y el de la *ecuación de la pendiente suave* para ondas propagándose por una playa. Encontró que hasta pendientes del fondo de 1:3 el modelo de la pendiente suave era exacto, y que para pendientes mayores predecía adecuadamente las tendencias.

□ *Propagación*

1) No linealidad débil. Existe una dependencia débil de la ecuación de dispersión con la amplitud de la onda en el modelo Oluca-MC o bien con la altura de ola significativa en el modelo Oluca-SP (modelo no lineal Stokes-Hedges, véase GIOC, 2001a y GIOC, 2001b).

2) Aproximación parabólica. Las ondas (Oluca-MC) o bien las componentes (Oluca-SP) se propagan principalmente en una dirección (x). Por consiguiente, las variaciones segundas con respecto a esta dirección de cualquier magnitud se desprecian, como se indica en la ecuación (II.2). La solución será más aproximada cuanto menor variación exista en esta dirección principal (x).

$$\frac{\partial(\quad)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{II.2})$$

La aproximación parabólica lleva asociada una serie de ventajas y desventajas que se enumeran a continuación.

• *En cuanto a las ventajas:*

a) Se ha mostrado como una ecuación de gobierno correcta para la propagación de ondas lineales (Oluca-MC) o bien de componentes lineales (Oluca-SP) sobre fondos de pendientes suaves en presencia de corrientes.

b) Al ser una ecuación de tipo parabólico, no necesita condiciones en todo el contorno, sino que basta con una condición inicial en el contorno desde el que se va a propagar y condiciones en los contornos laterales.

c) Es una herramienta útil para reducir el esfuerzo y el tiempo de computación, pues se pueden utilizar esquemas implícitos de seis puntos como el de Crank-Nicholson y, así, se obtienen soluciones rápidas y estables.

- *Con respecto a las desventajas:*

a) Existe una limitación para el ángulo de propagación del oleaje a ± 60 grados con respecto al eje principal (x) en el caso del Oluca-MC o bien de ± 55 grados en el caso del Oluca-SP.

b) Se desprecia el efecto de las ondas reflejadas. Este inconveniente no es demasiado importante pues en la propagación del oleaje hacia la costa interesan especialmente los efectos de la refracción y la difracción.

c) Las soluciones serán más aproximadas cuanto menor variación exista respecto a la dirección principal (x).

□ *Modelo de disipación por rotura (Este apartado sólo es válido para el modelo Oluca-SP)*

1) La distribución de alturas de ola dentro de la zona de rompientes es del tipo Rayleigh.

2) El balance del flujo de energía se realiza en la dirección principal de la propagación, eje x .

3) No existe una interacción onda-onda dado el carácter lineal del modelo; consecuentemente, la disipación se asume igual para todas las componentes frecuenciales.

4) El modelo está orientado a propagaciones de oleaje de espectros no muy anchos direccionalmente (± 55 grados), es decir, a oleajes tipo “*swell*”. Esto es debido a las limitaciones de ángulo y también a que los modelos de disipación no presentan correcciones direccionales en los balances del flujo de energía.

II.4. VALIDACIÓN

La credibilidad de los modelos numéricos de propagación, tanto del Oluca-MC (oleaje monocromático) como del Oluca-SP (oleaje espectral), no es puesta en

duda en absoluto, debido no sólo a los diez años de utilización de estos modelos en innumerables proyectos a lo largo del litoral español, sino también a los siguientes casos de validación, los cuales se pueden analizar con más detalle en GIOC (2001a) y GIOC (2001b).

✓ *OLUCA-MC*

1) Caso con solución analítica de batimetría recta y paralela, en el que se comprueba el asomeramiento, refracción por fondo y rotura.

2) Caso con solución analítica de difracción en un fondo plano con presencia de un obstáculo.

3) Caso de ensayo físico en laboratorio (Berkhoff, 1982) con refracción-difracción conjunta.

4) Caso de un ensayo idealizado (Arthur, 1950) con interacción ola-corriente. También se comparan los resultados con otros modelos numéricos.

✓ *OLUCA-SP*

1) Caso de ensayos en laboratorio (Mase y Kirby, 1992) con oleaje unidireccional sobre una playa de pendiente constante.

2) Caso de ensayos en laboratorio (Chawla, 1995). Se llevó a cabo la propagación de diferentes espectros bidimensionales (anchos y estrechos) sobre un fondo horizontal con un bajo circular.

3) Caso de ensayos en laboratorio (Vincent y Briggs, 1989) con oleaje direccional sobre una batimetría de fondo plano y un bajo elíptico.

4) Caso de medidas en campo (experimento en campo denominado DELILAH) llevadas a cabo en el Coastal Engineering Research Center field Research Facility en Duck, NC, en Octubre de 1991, (para más detalles de los ensayos, véase Birkemeier, 1991).

ANEJO III

BATIMETRÍA, TAMAÑOS DE GRANO Y LOCALIZACIÓN DE LOS PERFILES DE PLAYA

III.1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se presenta, para cada una de las playas que constituyen la base de datos con la que se ha contado para el desarrollo de la sección 4 de la Tesis, las siguientes características: batimetría, tamaños de grano, foto aérea y localización de los perfiles analizados en cada una de las playas y para las dos opciones de determinación del ángulo β de delimitación de la zona de refracción-difracción que se utilizan en función de si la playa existe o si se pretende diseñar una playa (carácter predictivo).

III.2. LOCALIZACIÓN DE LAS PLAYAS

La localización de las playas de la base de datos utilizada se indica en la figura III.1.



Figura III.1- Localización de las playas

La numeración de las playas de la figura III.1 se corresponde con la notación establecida en la tabla III.1.

NÚMERO	NOMBRE	LOCALIZACIÓN
1	Cubelles	Barcelona
2	Altafulla	Tarragona
3	Salou	Tarragona
4	Almazora 1	Castellón
5	Almazora 2	Castellón
6	Garrucha	Almería
7	Benalmádena	Málaga
8	Nueva Andalucía 1	Málaga
9	Nueva Andalucía 2	Málaga
10	Nueva Andalucía 3	Málaga

Tabla III.1- Descripción de las playas de la base de datos

III.3. UBICACIÓN DE LOS PERFILES

Con el objetivo de analizar la variabilidad espacial de los perfiles de playa, en cada una de las playas de la base de datos se estudiaron varios perfiles, así como el perfil de comparación, ubicándose éste en una zona en la que el efecto de la refracción-difracción conjuntamente se puede considerar despreciable, definiéndose con el ángulo β o bien con el ángulo α_{min} ($\beta=90-\alpha_{min}$). Existen dos posibilidades para determinar este ángulo de influencia:

1. La primera opción se puede utilizar si se dispone de la playa y consiste en, siguiendo la propuesta de Hsu y Evans (1989) o la de Tan y Chiew (1994), el ángulo β se establece como el ángulo de mejor ajuste a la forma en planta de equilibrio de la playa.

2. La segunda opción es la que se debe emplear para el diseño de una playa (carácter predictivo) y consiste en obtener el ángulo β a partir de la formulación del ángulo α_{min} propuesta por González y Medina (2001).

Se recalca que, de las dos opciones de determinación del ángulo β de delimitación de la zona de refracción-difracción, la primera opción sólo es válida para playas existentes, mientras que la segunda tiene un carácter predictivo. En este anejo se presenta la localización de los perfiles de playa utilizados para ambas opciones, pues los parámetros de la expresión propuesta en la presente Tesis para la determinación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción han sido calibrados en ambas circunstancias.

III.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS PLAYAS

Siguiendo el orden especificado en la figura III.1, se presenta para cada playa cuatro figuras: en la primera se muestra la batimetría, en la segunda se puede visualizar la foto aérea de la correspondiente playa, la tercera y la cuarta corresponden a la ubicación de los perfiles analizados para las dos opciones especificadas: playas existentes y diseño de playas (carácter predictivo). Tanto en la tercera figura, como en la cuarta, aparecen representadas las plantas de equilibrio de la playa. Asimismo, como en este último caso algunas playas se encuentran bajo la influencia de varios puntos difractantes, también aparece representada la planta de equilibrio asociada al otro punto difractante. Adicionalmente, tanto en la tercera figura, como en la cuarta, se presentan los valores del tamaño de grano del sedimento (caracterizado con el D_{50}) en la zona sumergida más próxima a la línea de costa.

Nótese que entre las playas estudiadas se distinguen casos de tamaños de grano más o menos uniformes longitudinalmente (Salou, Almazora1, Almazora 2, Garrucha y Benalmádena), y otros en los que la variabilidad longitudinal del sedimento es un parámetro importante a tener en cuenta (Cubelles, Altafulla, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3).

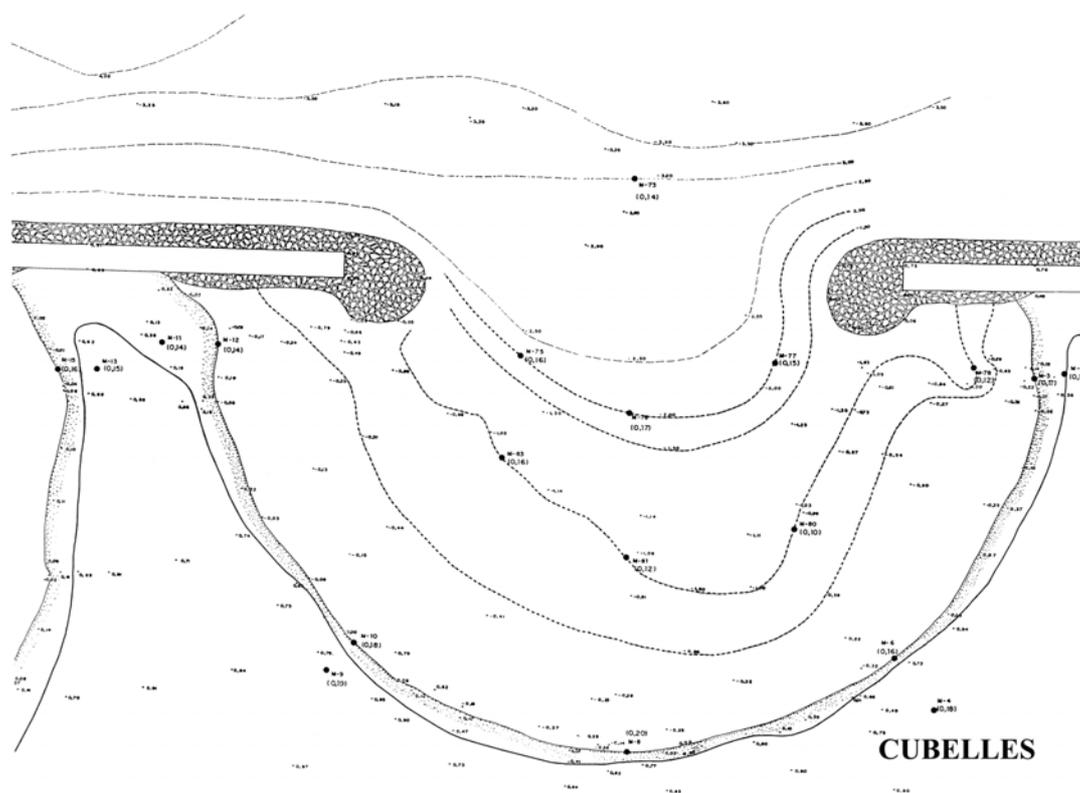


Figura III.2- Batimetría de la playa de Cubelles

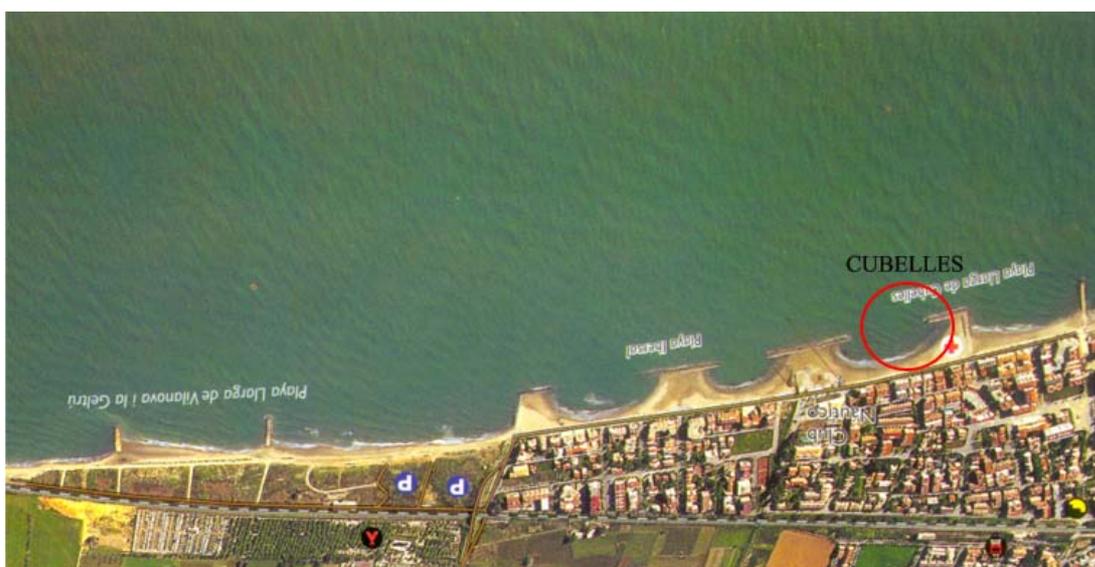


Figura III.3- Foto aérea de la playa de Cubelles

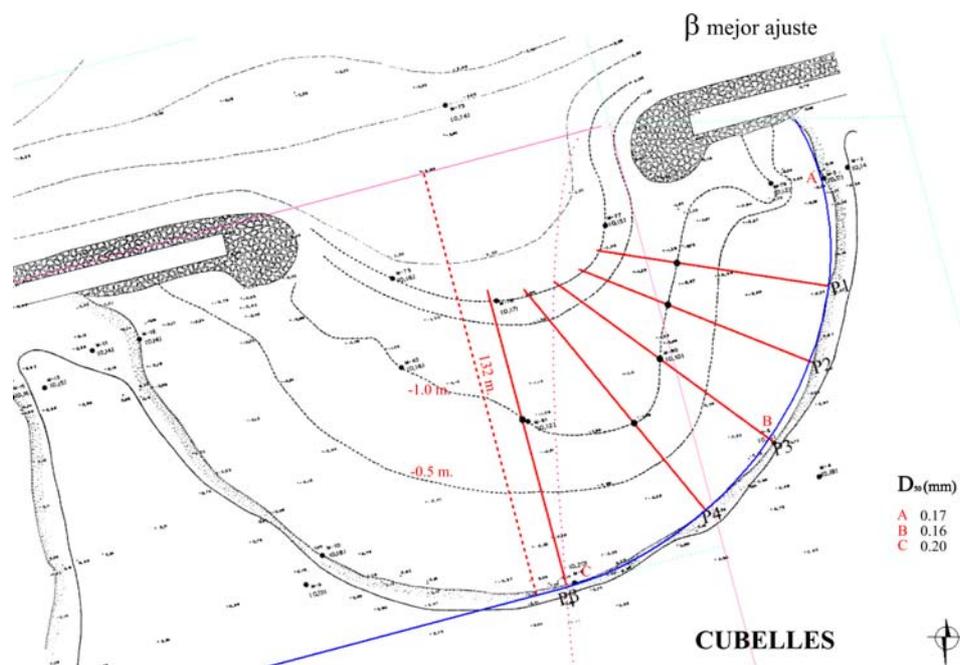


Figura III.4- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Cubelles

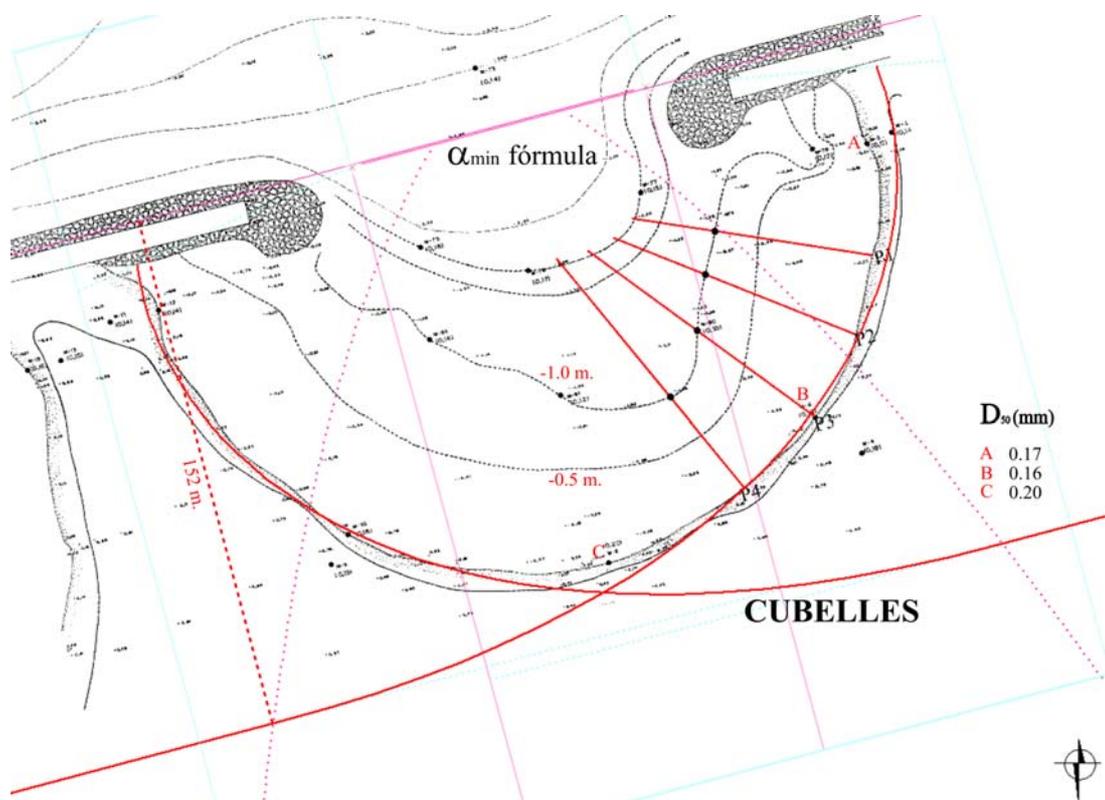


Figura III.5- Localización de los perfiles con α_{min} fórmula en la playa de Cubelles

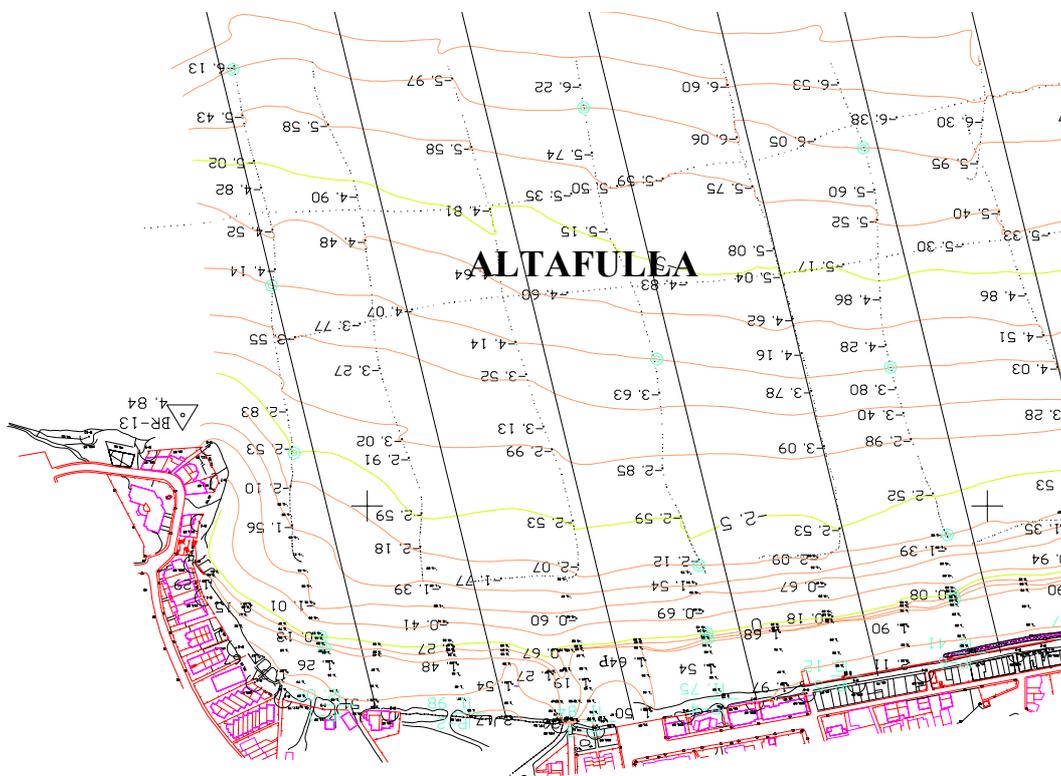


Figura III.6- Batimetría de la playa de Altafulla

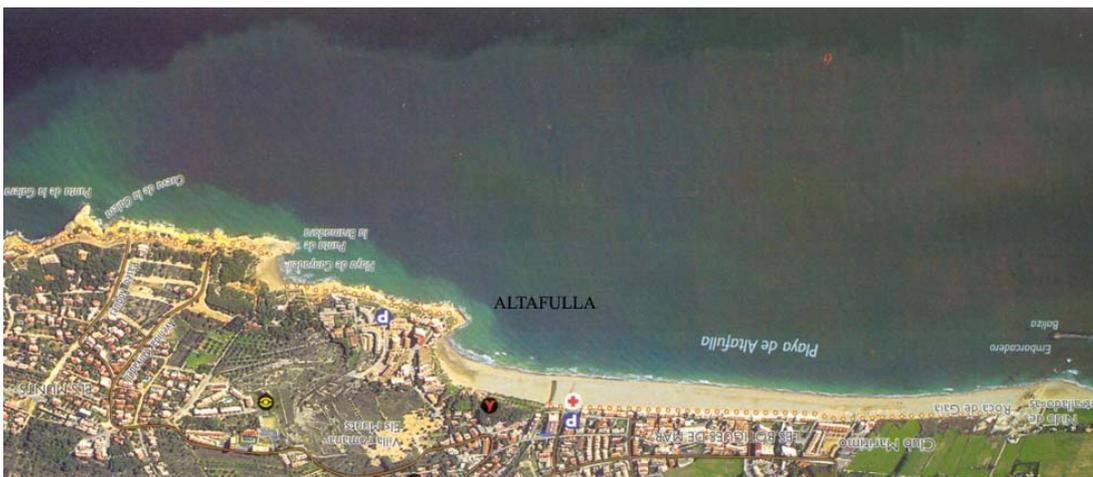


Figura III.7- Foto aérea de la playa de Altafulla

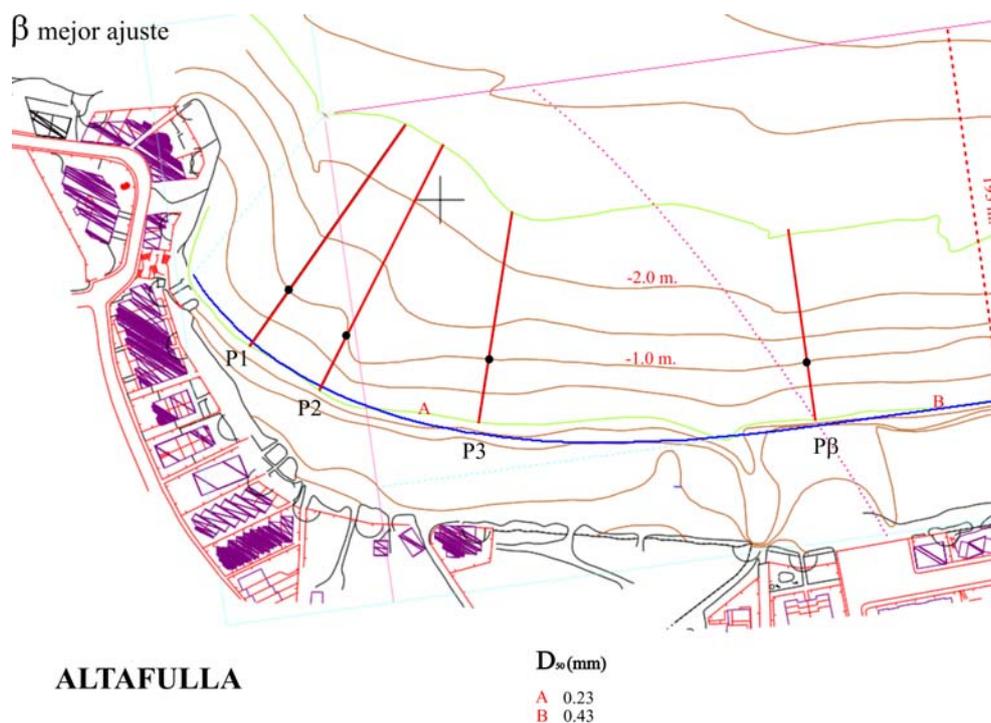


Figura III.8- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Altafulla

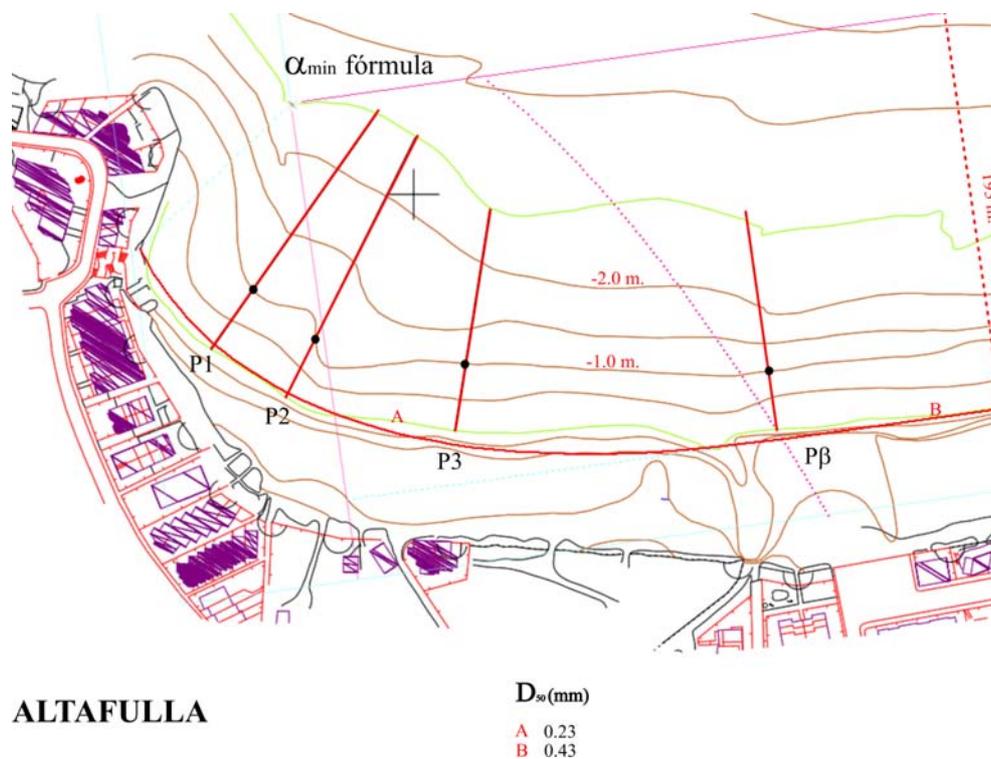


Figura III.9- Localización de los perfiles con α_{min} fórmula en la playa de Altafulla

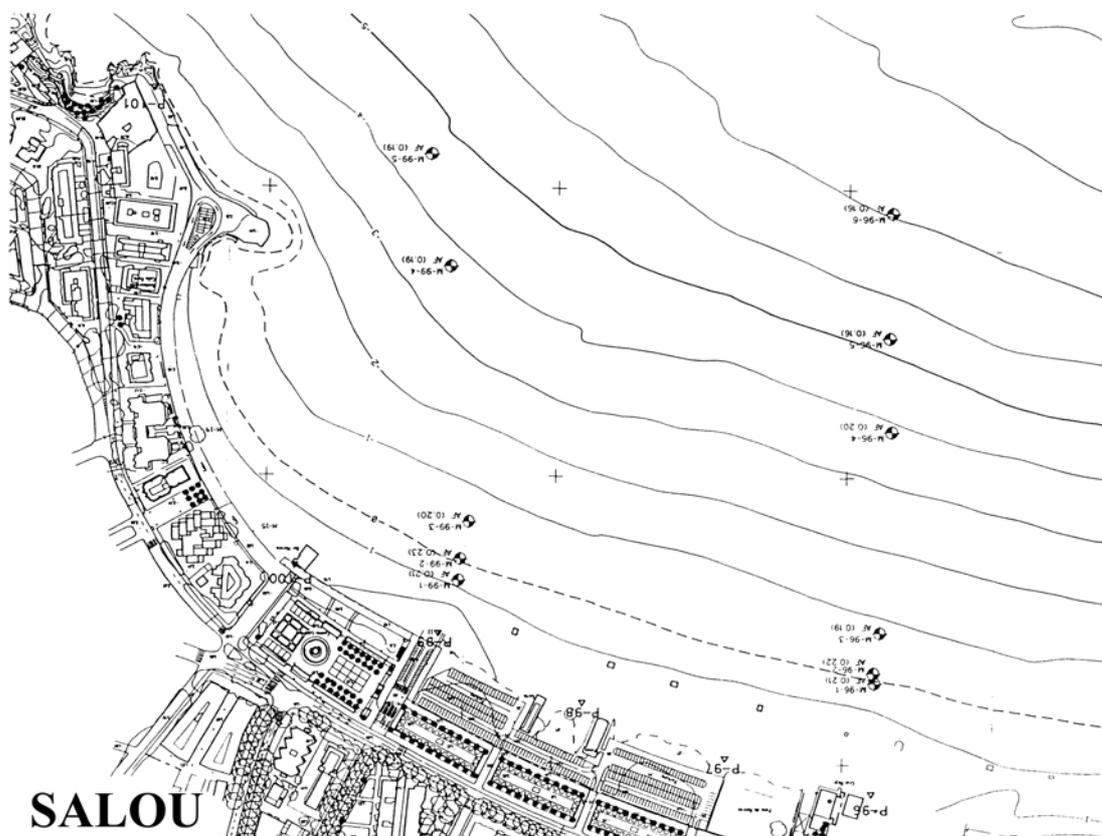


Figura III.10- Batimetría de la playa de Salou



Figura III.11- Foto aérea de la playa de Salou

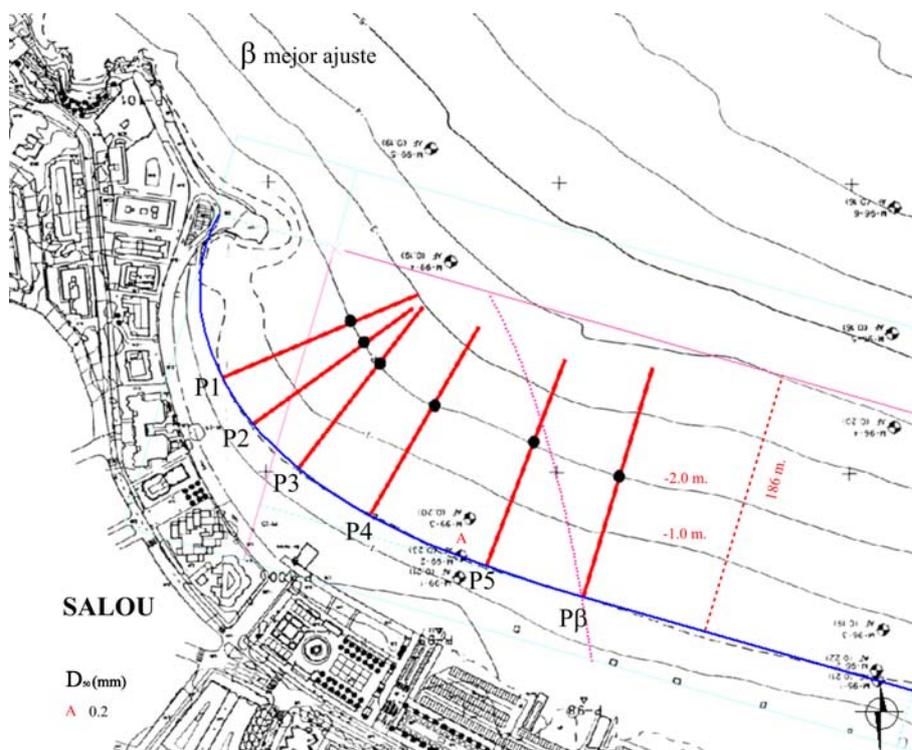


Figura III.12- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Salou

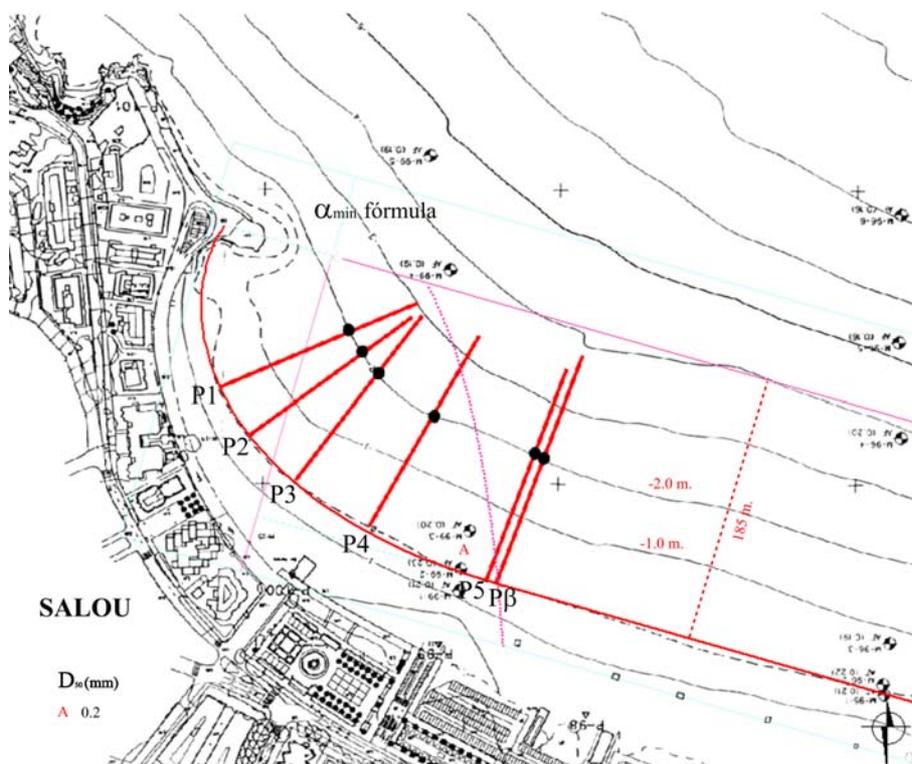


Figura III.13- Localización de los perfiles con α_{min} fórmula en la playa de Salou

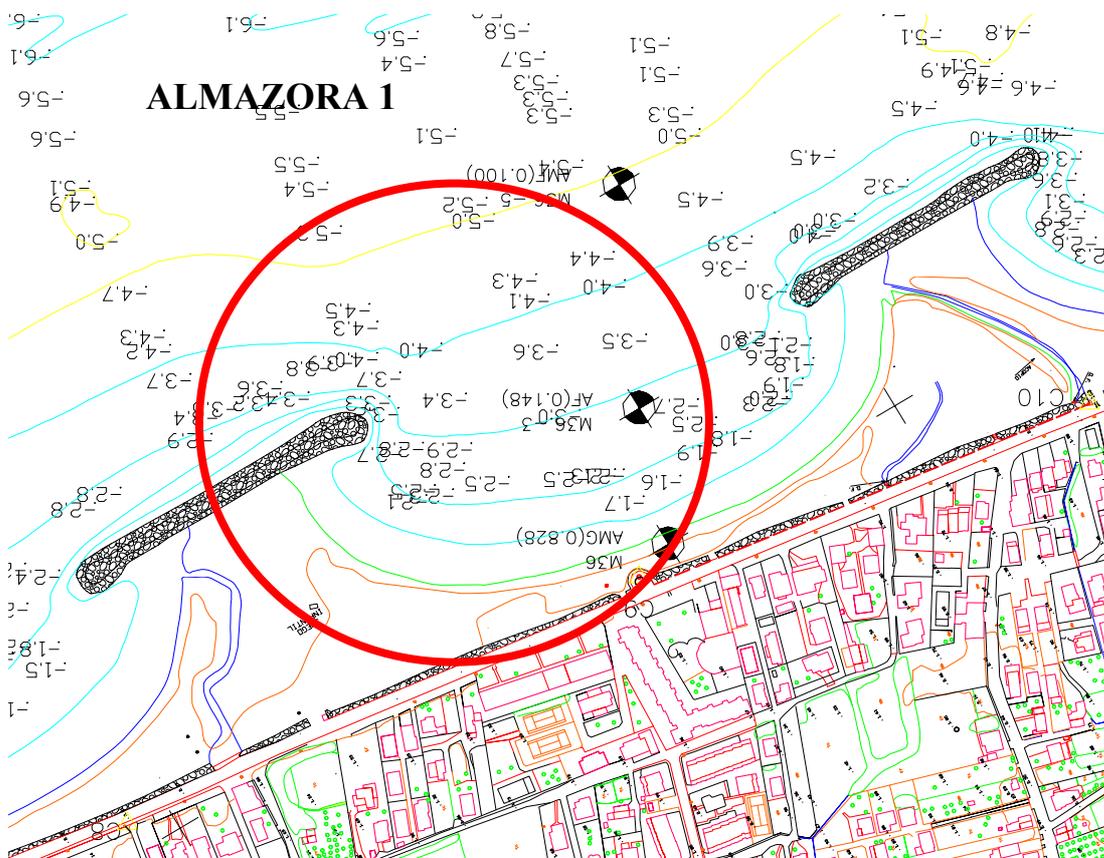


Figura III.14- Batimetría de la playa de Almazora 1



Figura III.15- Foto aérea de la playa de Almazora 1

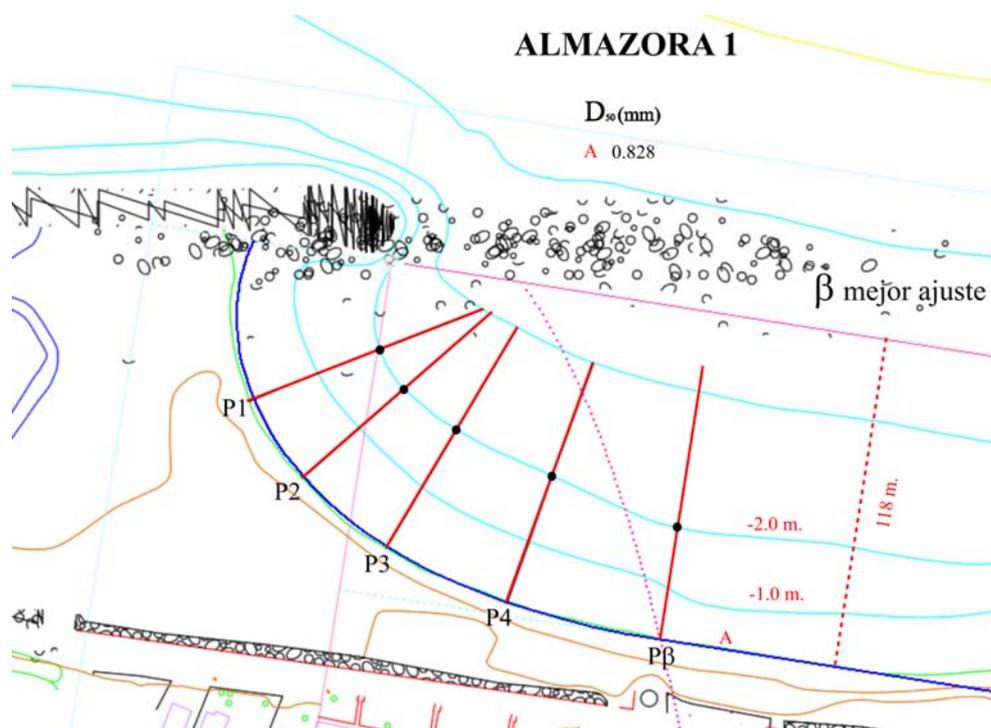


Figura III.16- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Almazora 1

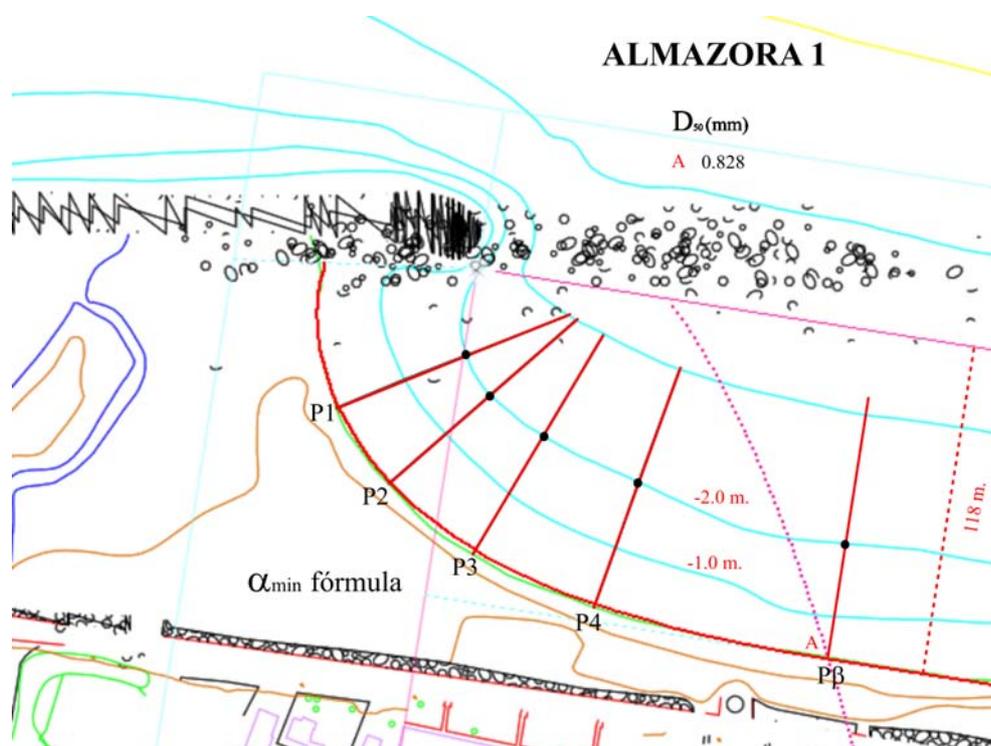


Figura III.17- Localización de los perfiles con α_{\min} fórmula en la playa de Almazora 1

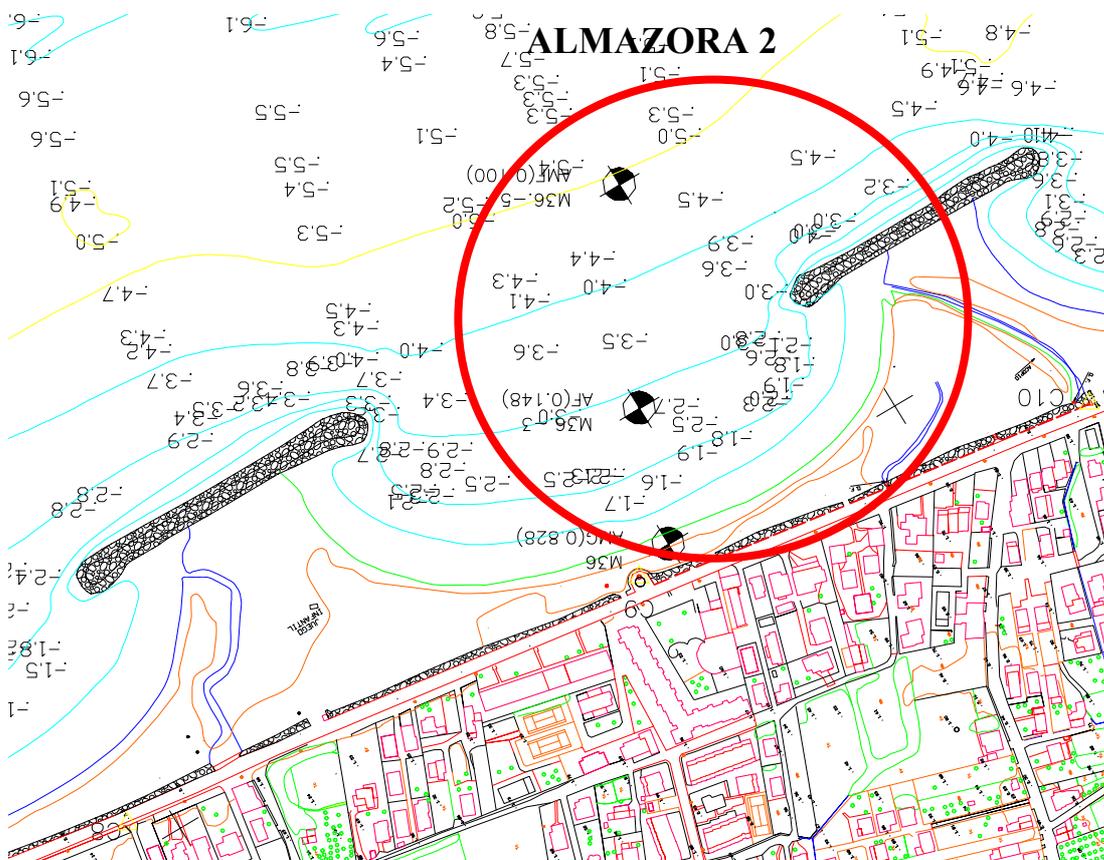


Figura III.18- Batimetría de la playa de Almazora 2



Figura III.19- Foto aérea de la playa de Almazora 2

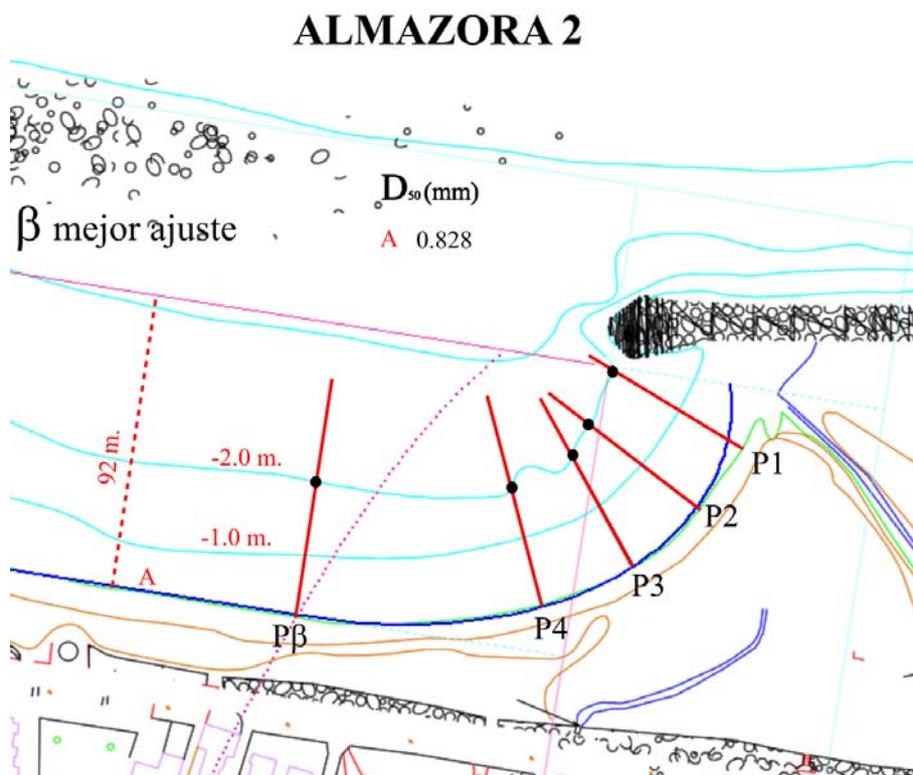


Figura III.20- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Almazora 2

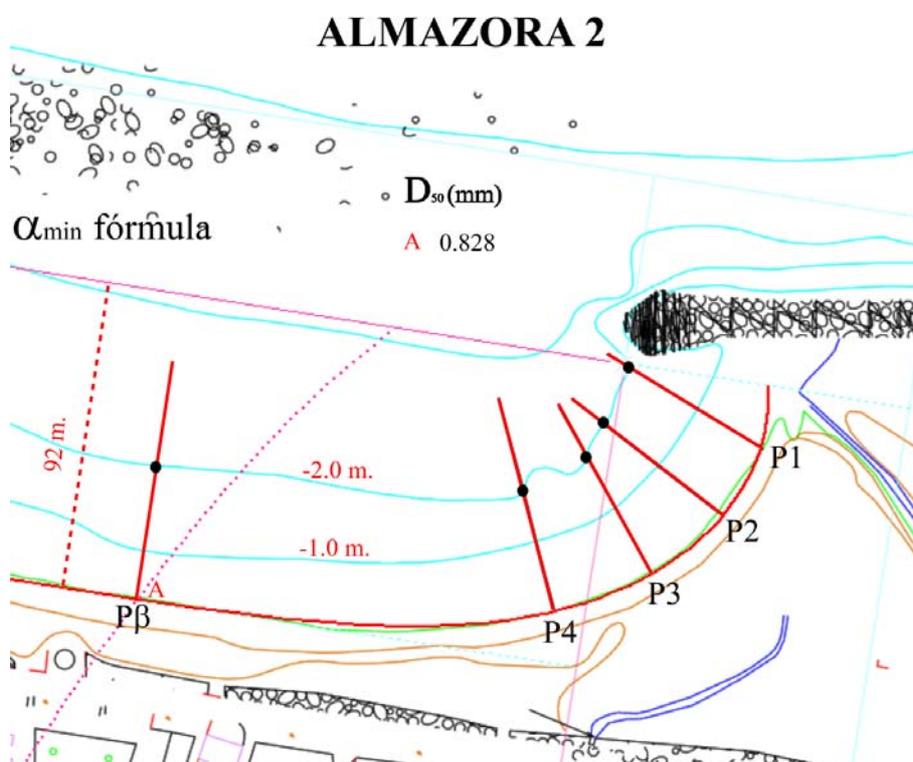


Figura III.21- Localización de los perfiles con α_{\min} fórmula en la playa de Almazora 2

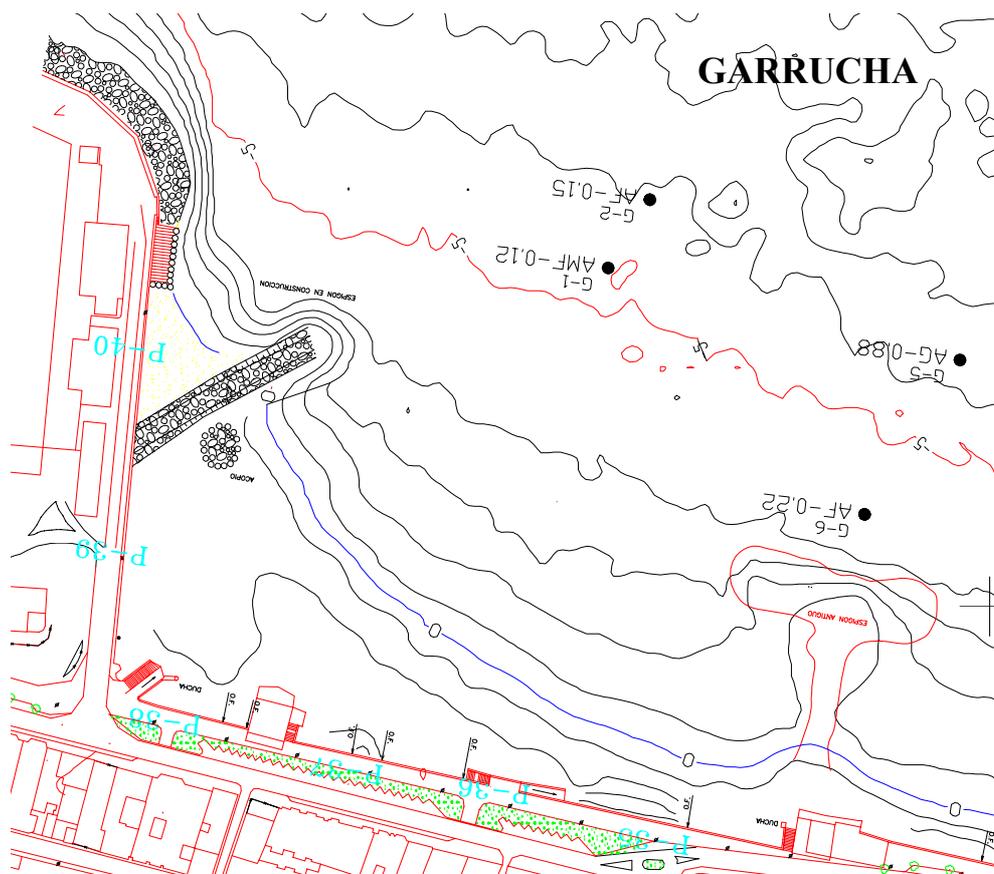


Figura III.22- Batimetría de la playa de Garrucha



Figura III.23- Foto aérea de la playa de Garrucha

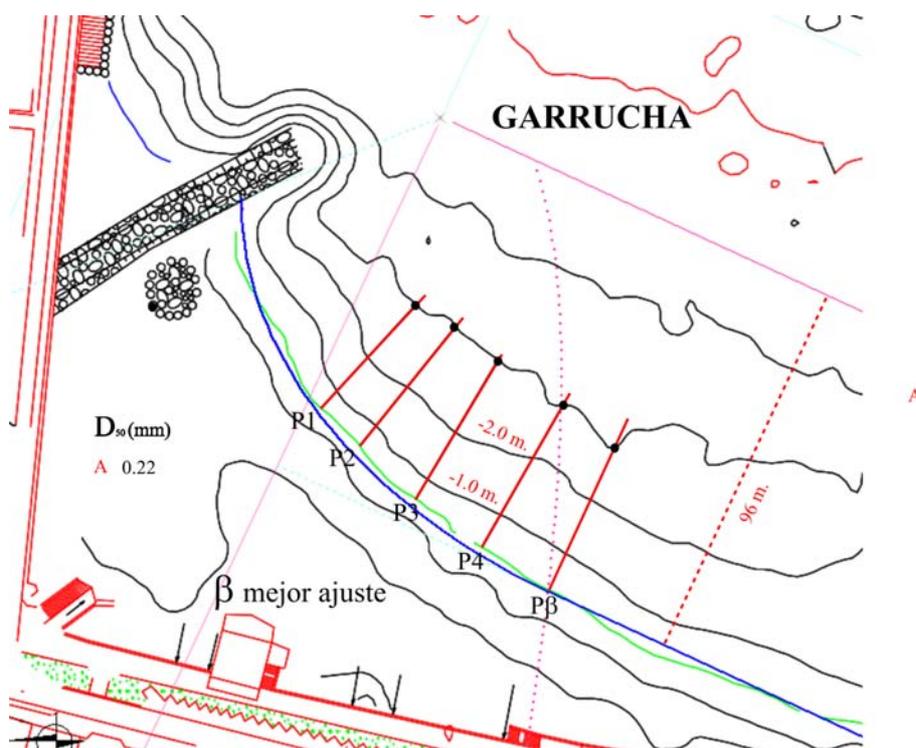


Figura III.24- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Garrucha

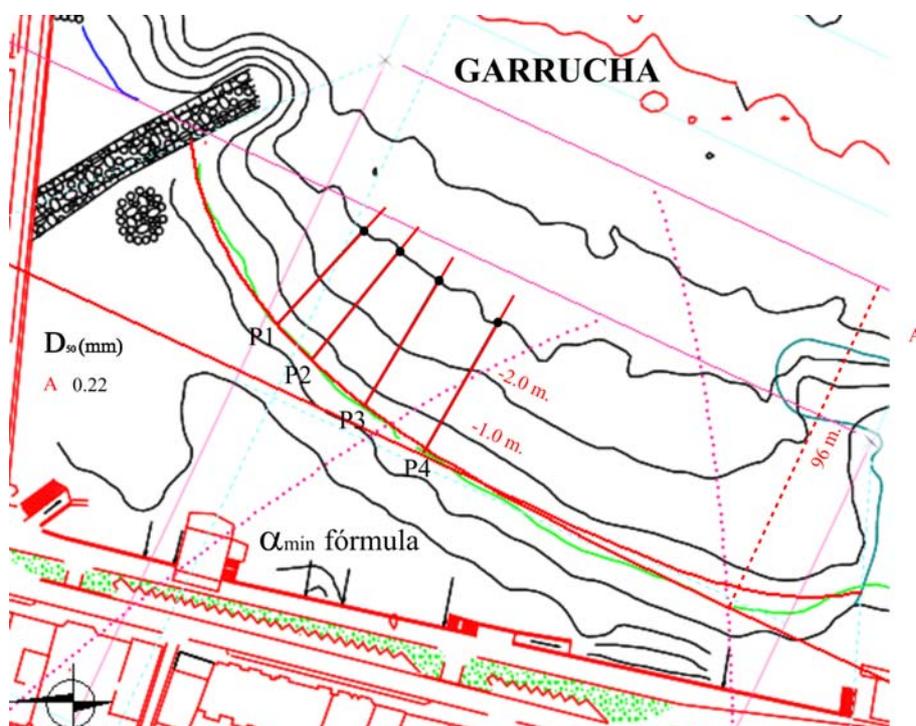


Figura III.25- Localización de los perfiles con α_{\min} fórmula en la playa de Garrucha

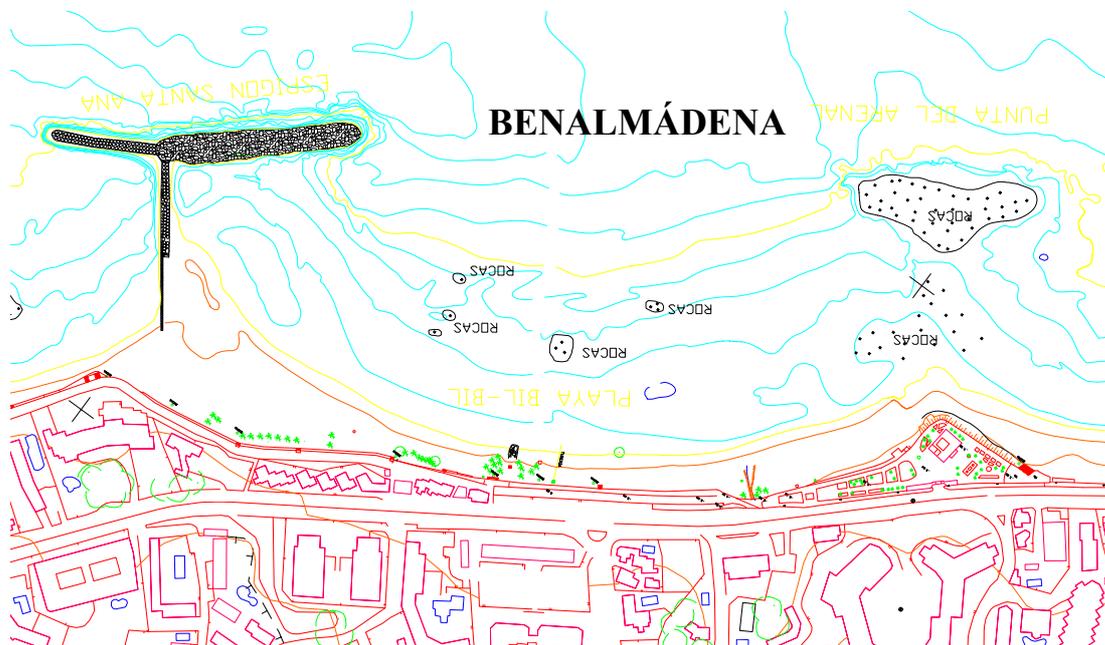


Figura III.26- Batimetría de la playa de Benalmádena



Figura III.27- Foto aérea de la playa de Benalmádena

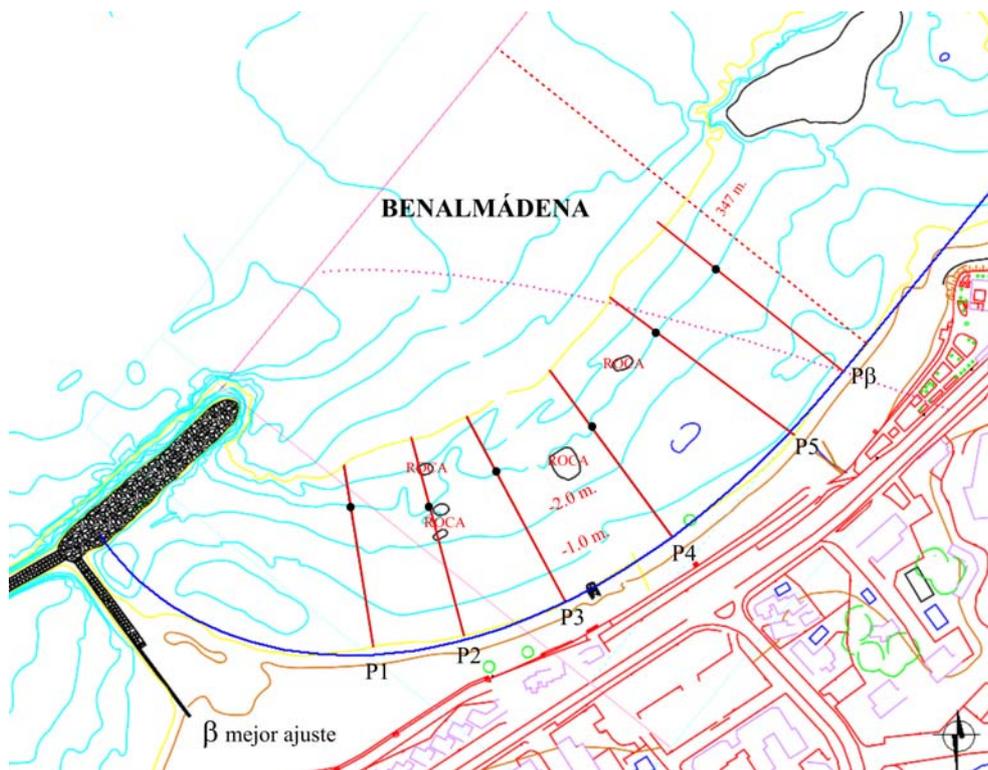


Figura III.28- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Benalmádena

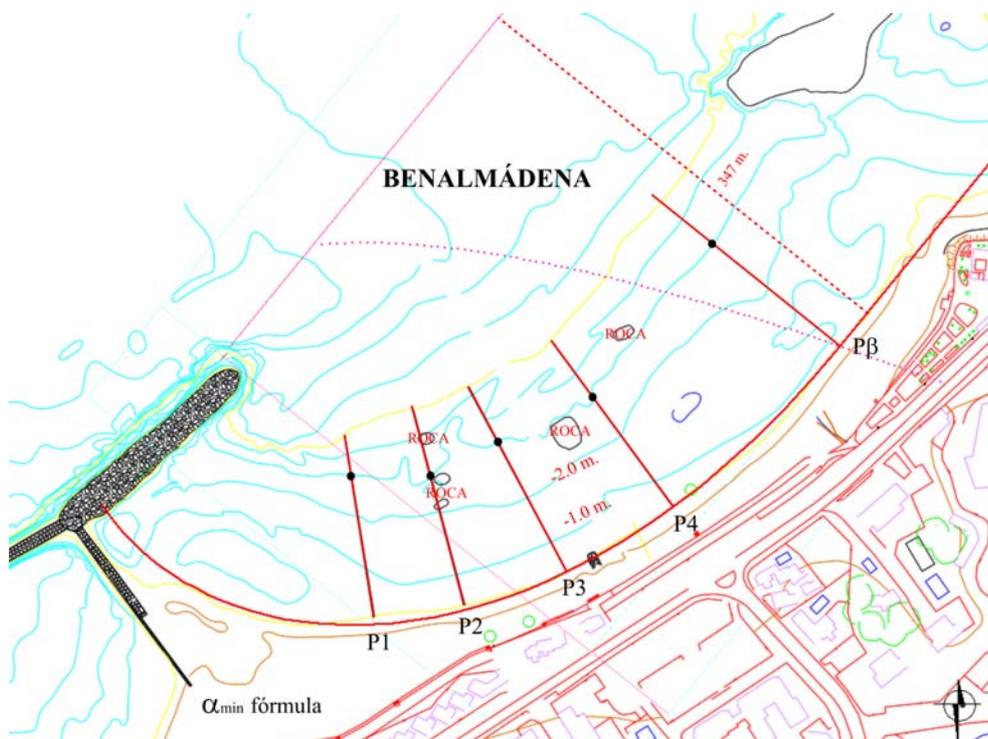


Figura III.29- Localización de los perfiles con α_{min} fórmula en la playa de Benalmádena

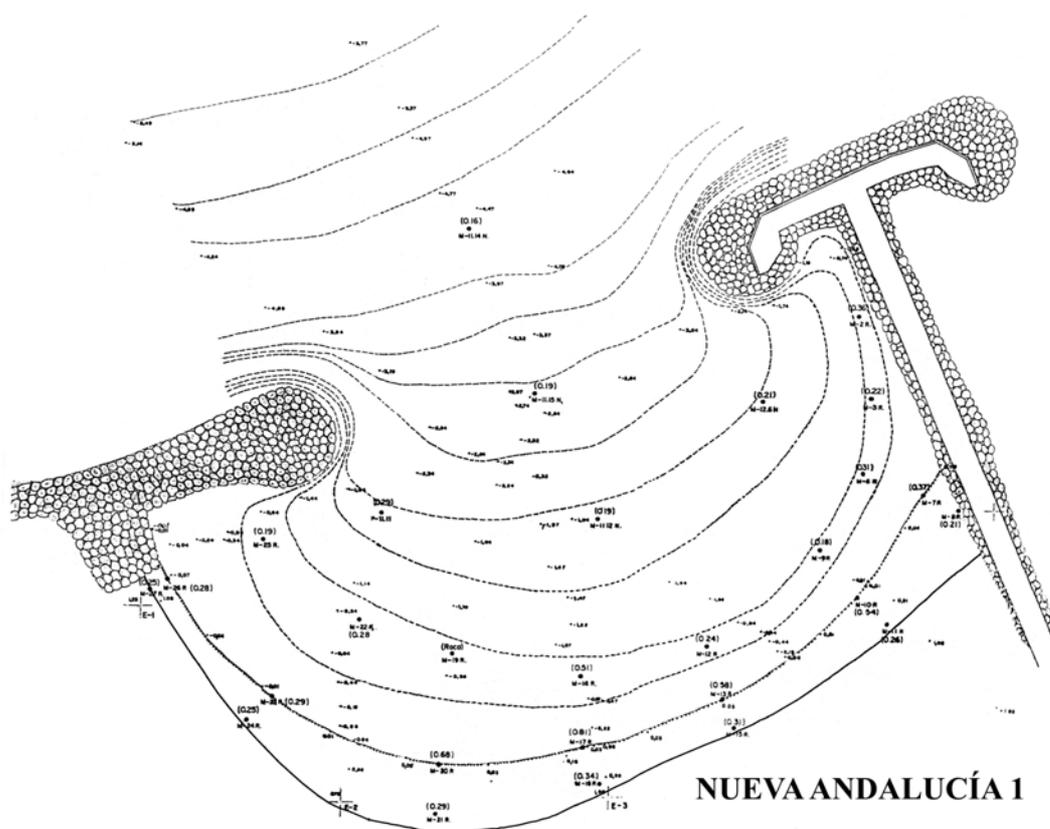


Figura III.30- Batimetría de la playa de Nueva Andalucía 1



Figura III-31- Foto aérea de la playa de Nueva Andalucía 1

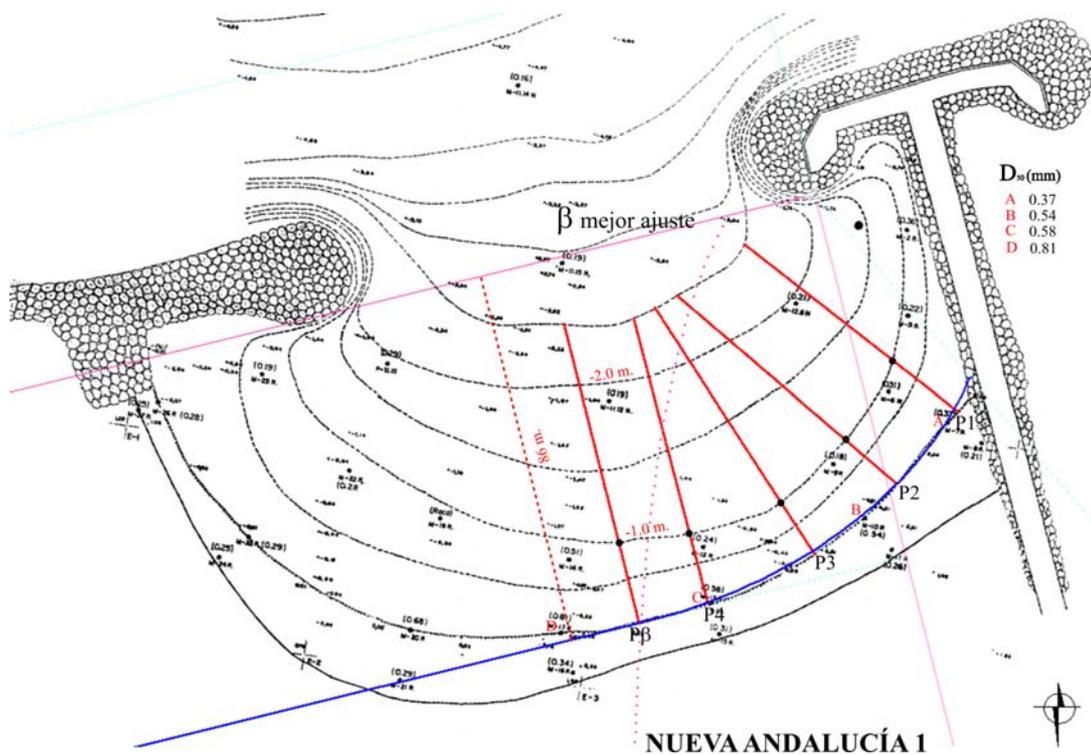


Figura III.32- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Nueva Andalucía 1

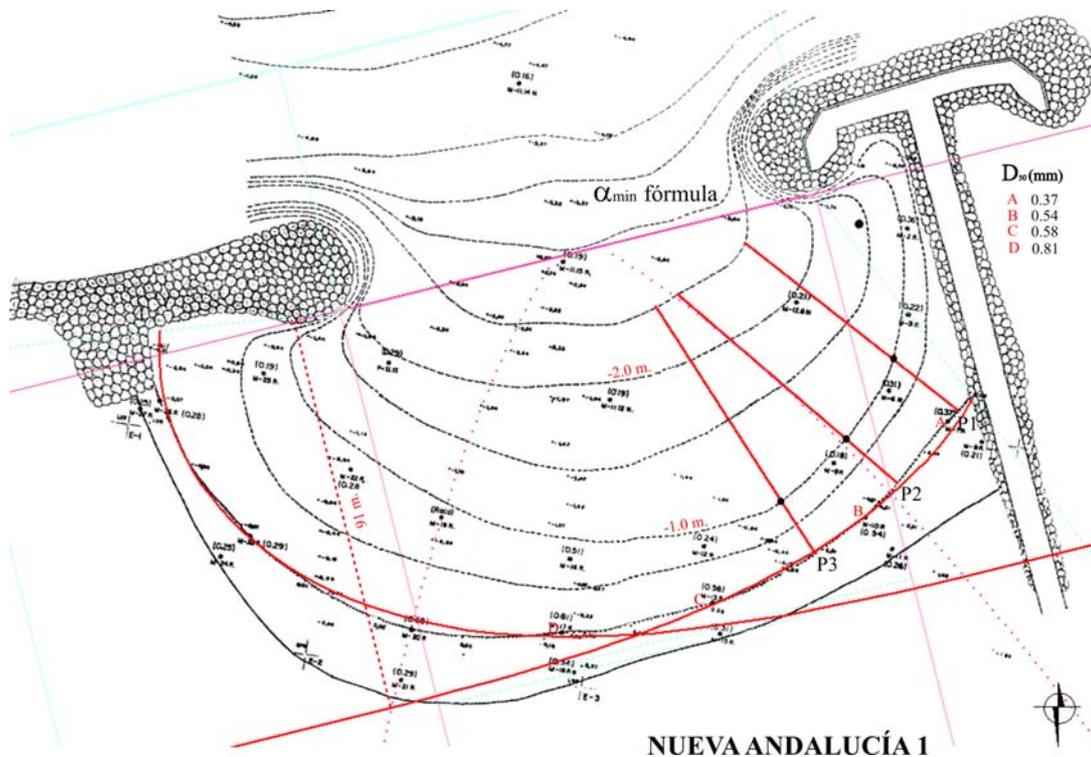


Figura III.33- Localización de los perfiles con α_{min} fórmula en la playa de Nueva Andalucía 1

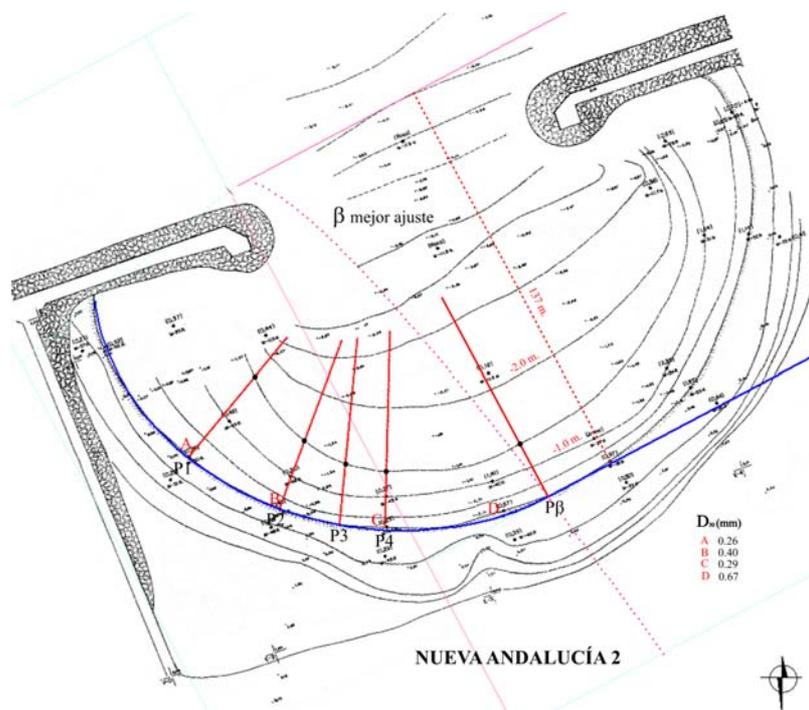


Figura III.36- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Nueva Andalucía 2

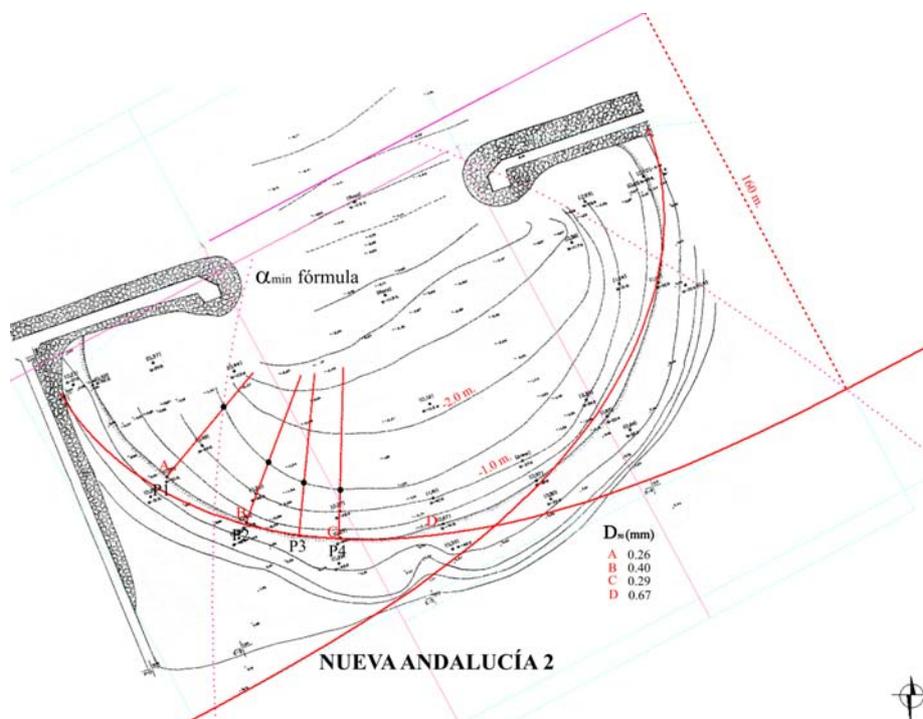
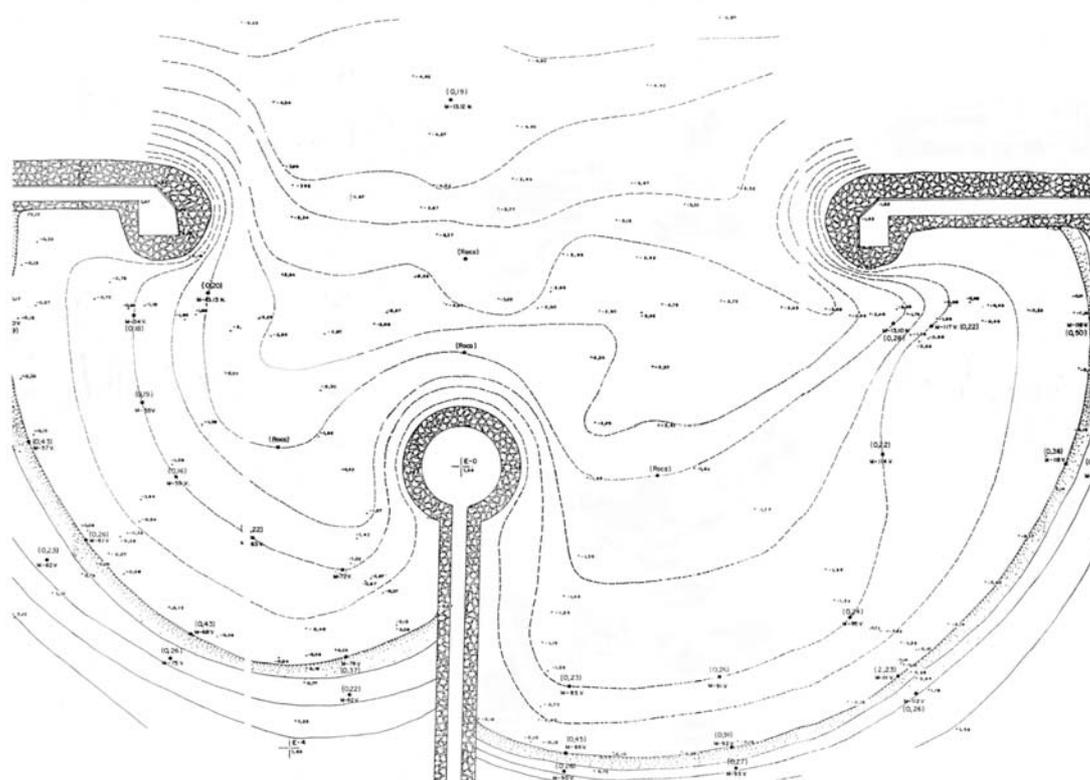


Figura III.37- Localización de los perfiles con α_{min} fórmula en la playa de Nueva Andalucía



NUEVA ANDALUCÍA 3

Figura III.38- Batimetría de la playa de Nueva Andalucía 3



Figura III.39- Foto aérea de la playa de Nueva Andalucía 3

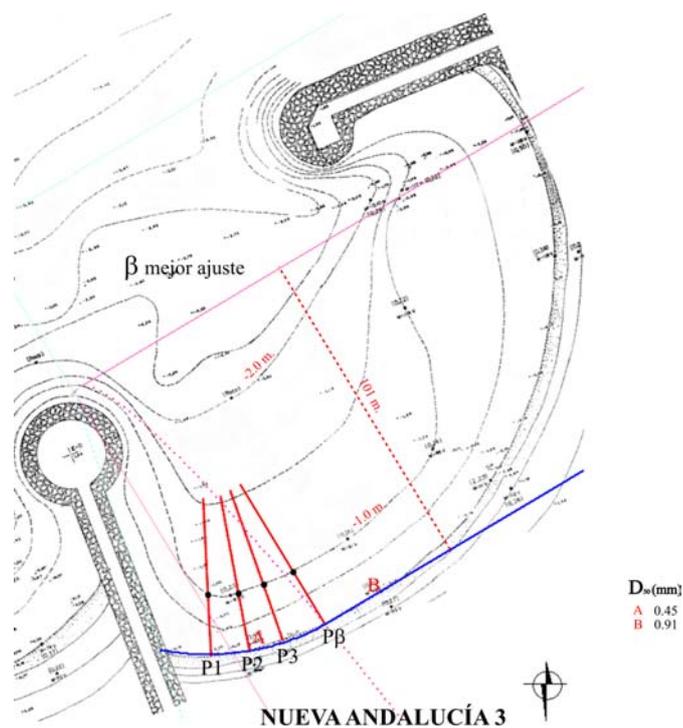


Figura III.40- Localización de los perfiles con β mejor ajuste en la playa de Nueva Andalucía 3

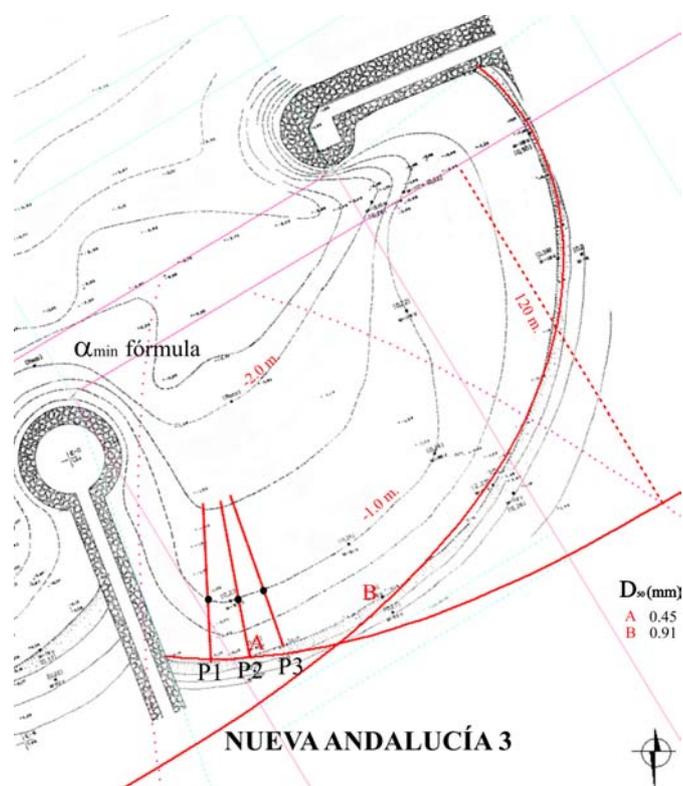


Figura III.41- Localización de los perfiles con α_{min} fórmula en la playa de Nueva Andalucía

ANEJO IV

COMPARACIÓN A_r MEDIDO FRENTE AL DE LA FORMULACIÓN DE GONZÁLEZ ET AL. (1997)

IV.1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se presenta la comparación efectuada, para todas las playas de la base de datos utilizada, entre los parámetros de forma de refracción de los perfiles medidos, con respecto a los correspondientes parámetros determinados con la formulación propuesta por González et al. (1997). Por consiguiente, en una primera fase se van a indicar las expresiones determinadas por los anteriores investigadores. Posteriormente se indicará el proceso seguido para la obtención de los parámetros de refracción de los datos de campo. Finalmente se mostrarán las comparaciones entre los parámetros de refracción calculados y los estimados con los datos de campo.

IV.2. A_r DETERMINADO CON LA FORMULACIÓN DE GONZÁLEZ ET AL. (1997)

En este apartado se va a indicar la formulación utilizada para la obtención del parámetro de forma de refracción A_r , que fue propuesta por González et al. (1997). Téngase presente que sólo se va a presentar la expresión utilizada, pues el proceso de derivación de dicha expresión quedó detallado en el capítulo 8 de la sección 4 de la Tesis.

González et al. (1997) obtuvieron la expresión (IV.1) para la determinación del perfil de equilibrio con refracción. El perfil de equilibrio obtenido es similar al propuesto por Dean (1977), pero en este caso el parámetro de forma total A_T se descompone en un parámetro de forma de Dean A_d (el cual se suele asociar con el tamaño de grano) y un parámetro de forma asociado a la refracción A_r . Este último parámetro es el que se va a analizar en este anejo. Es importante tener en cuenta que aunque A_r es función de la coordenada x , esta variabilidad no es muy relevante.

$$h = A_T x^{\frac{2}{3}} = A_r(x) A_d x^{\frac{2}{3}} \quad (\text{IV.1})$$

Las expresiones establecidas por González et al. (1997) para determinar A_r adoptan diferentes valores, dependiendo de la expresión utilizada para la estimación de la anchura b entre rayos del oleaje. Si la anchura b se asume lineal, tal y como se indica en la figura IV.1, A_r se calcula con la expresión (IV.2) propuesta por los anteriores investigadores. Esta expresión es la que se ha utilizado en la Tesis.

$$A_r(x) = \left(\frac{5}{8} \left(\frac{1}{\chi} \left(1 - (1 + \chi)^{-\frac{3}{5}} \right) + 1 \right) \right)^{\frac{2}{3}} \tag{IV.2}$$

con:

$$\chi = \frac{(K_{r0}^2 - 1)x}{W} \tag{IV.3}$$

$$K_{r0}^2 = \frac{b(x=W)}{b(x=0)} \tag{IV.4}$$

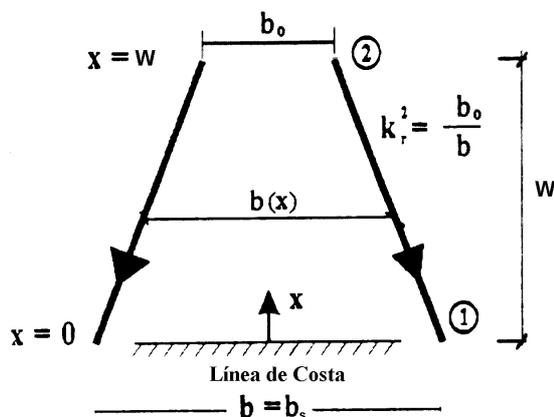


Figura IV.1- Esquema de variación lineal de la distancia entre rayos del oleaje y definición del coeficiente de refracción (modificada de González et al., 1997)

En las ecuaciones (IV.3) y (IV.4) el parámetro W representa la anchura de la zona de rompientes (véase figura IV.1) y el parámetro K_{r0} tiene en cuenta la refracción que se ha producido en esta zona (desde la rotura a la costa).

IV.3. A_r ESTIMADO CON LOS DATOS DE CAMPO

Siguiendo las consideraciones indicadas en el punto anterior, el proceso seguido para estimar el parámetro de forma de refracción a partir de los datos de campo ha sido el siguiente:

1. En primer lugar en cada una de las playas se ajustó el parámetro de forma total A_T de cada perfil (véase ecuación IV.1).

2. Posteriormente se calculó el parámetro de forma no asociado con la refracción A_d (véase ecuación IV.1). Aunque existen diferentes expresiones para estimar este último parámetro, en la presente Tesis se ha utilizado la formulación de Dean (1987b), con la que se relaciona el parámetro de forma asociado al tamaño de grano con la velocidad de caída del grano w_s mediante la ecuación (IV.5). En esta ecuación la velocidad de caída del grano debe ser expresada en metros por segundo.

$$A_d = 0.5 I w_s^{0.44} \quad (IV.5)$$

La velocidad de caída del grano se calcula con la formulación de van Rijn (1993), que para el caso de arenas con densidad de 2.65 toneladas por metro cúbico ($\rho_s=2.65$) se indica en las ecuaciones (IV.6), (IV.7) y (IV.8). En estas ecuaciones D_{50} debe ser expresado en metros y w_s en metros por segundo.

$$w_s = 1.1 \cdot 10^6 D_{50}^2 \Rightarrow D_{50} \leq 0.1 \text{ mm} \quad (IV.6)$$

$$w_s = 273D_{50}^{1.1} \Rightarrow 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm} \quad (\text{IV.7})$$

$$w_s = 4.36D_{50}^{0.5} \Rightarrow D_{50} > 1 \text{ mm} \quad (\text{IV.8})$$

3. Finalmente el parámetro de forma de refracción buscado A_r , se obtuvo dividiendo el parámetro de forma total A_T entre el parámetro de forma asociado al tamaño de grano A_d (véase ecuación IV.1). Es importante recalcar que aunque A_r es variable con la coordenada x , esta variabilidad no es muy relevante; por consiguiente, como este estudio tiene un carácter comparativo, y a efectos de simplificar, se ha ajustado un parámetro de forma de refracción A_r medio en cada perfil medido.

IV.4. COMPARACIÓN DE A_r MEDIDO FRENTE AL DETERMINADO CON LA FORMULACIÓN DE GONZÁLEZ ET AL. (1997)

Los parámetros de forma de refracción estimados a partir de los perfiles de campo (apartado IV.3) han sido comparados con los correspondientes parámetros calculados con la formulación propuesta por González et al. (1997), (apartado IV.2). El coeficiente de refracción presente en esta última formulación se determinó gráficamente de los datos medidos (cociente entre la anchura de los rayos).

El estudio descrito se llevó a cabo en las playas que constituyen la base de datos con la que se ha contado para la elaboración de la Tesis y que aparecen localizadas en la figura IV.2. La numeración de las playas de esta figura se corresponde con la notación establecida en la tabla IV.1.

Siguiendo el mismo orden que el especificado en la tabla IV.1, se va a presentar la comparación efectuada entre A_r estimado con los datos de campo o medido frente al calculado con la formulación de González et al. (1997) para las diez playas indicadas en la tabla IV.1.

Para el entendimiento de las figuras siguientes, se debe tener presente el esquema de ubicación de los perfiles en cada playa que aparece representado en la figura IV.3. Asimismo, se debe considerar que para la determinación del ángulo β , siguiendo Hsu y Evans (1989) o Tan y Chiew (1994), se ha calculado del mejor ajuste de la forma en planta de equilibrio de la playa. Consecuentemente, con estas consideraciones se definen los ejes de referencia de las figuras IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, IV.12 y IV.13, en las que se indican las comparaciones efectuadas para las diez playas. En concreto, en el eje de abscisas se representa la localización de cada perfil mediante el cociente del ángulo θ del perfil analizado con respecto al ángulo β del perfil de comparación o de referencia localizado en la zona exterior.

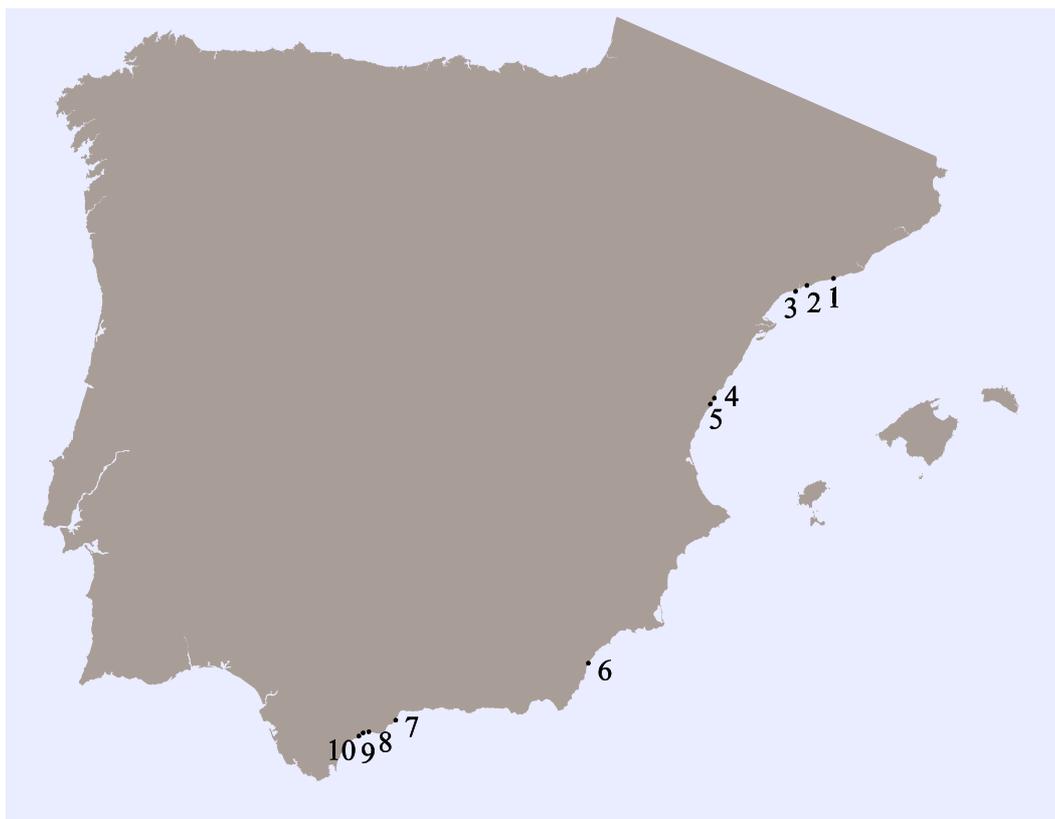


Figura IV.2- Localización de las playas

<i>NÚMERO</i>	<i>NOMBRE</i>	<i>LOCALIZACIÓN</i>
1	Cubelles	Barcelona
2	Altafulla	Tarragona
3	Salou	Tarragona
4	Almazora 1	Castellón
5	Almazora 2	Castellón
6	Garrucha	Almería
7	Benalmádena	Málaga
8	Nueva Andalucía 1	Málaga
9	Nueva Andalucía 2	Málaga
10	Nueva Andalucía 3	Málaga

Tabla IV.1- Descripción de las playas de la base de datos

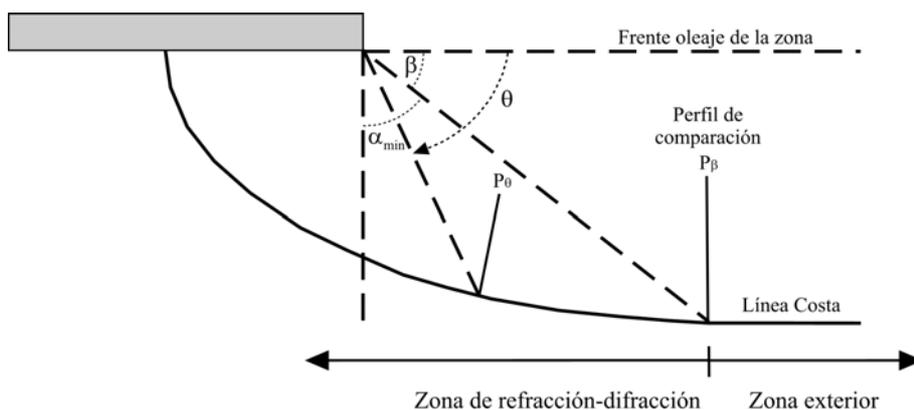


Figura IV.3- Parámetros de ubicación de los perfiles de playa

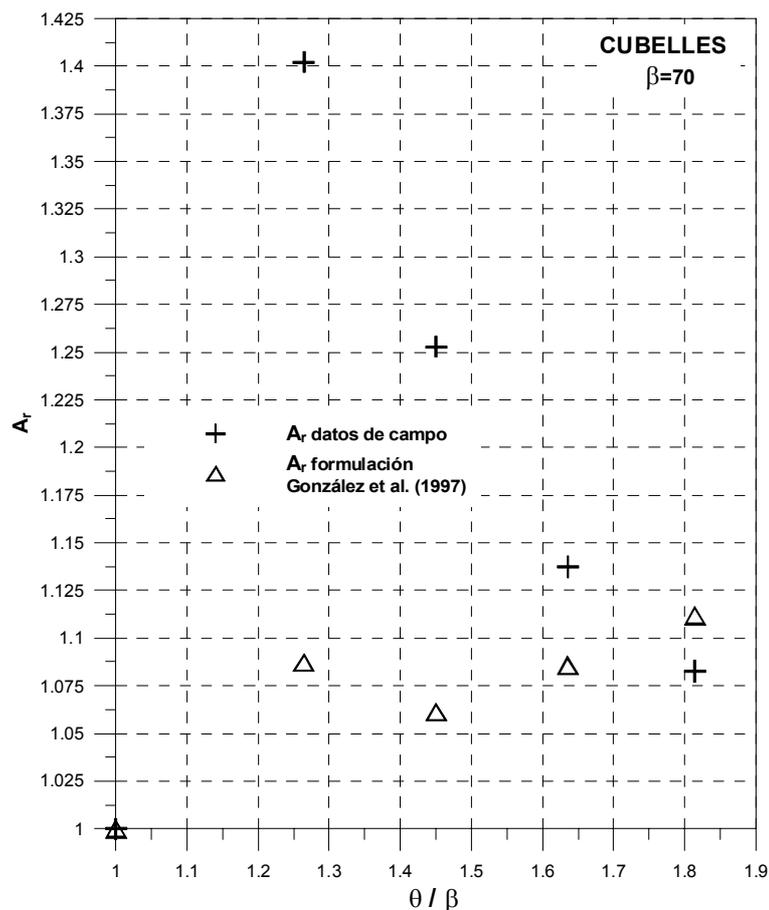


Figura IV.4- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Cubelles

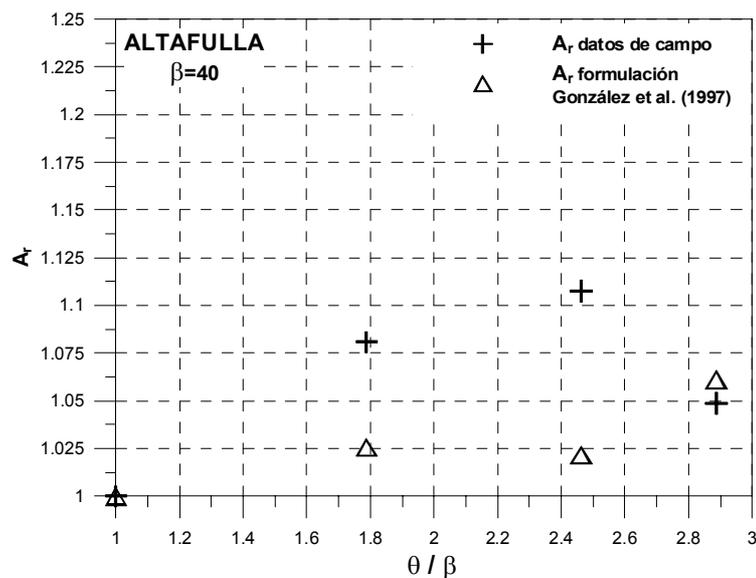


Figura IV.5- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Altafulla

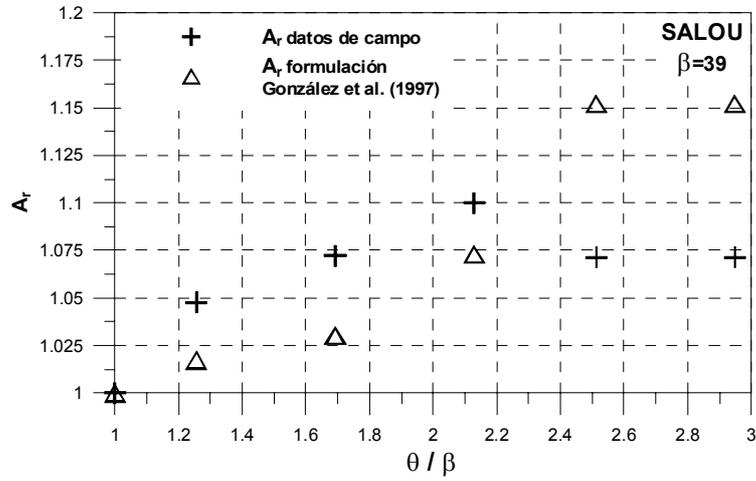


Figura IV.6- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Salou

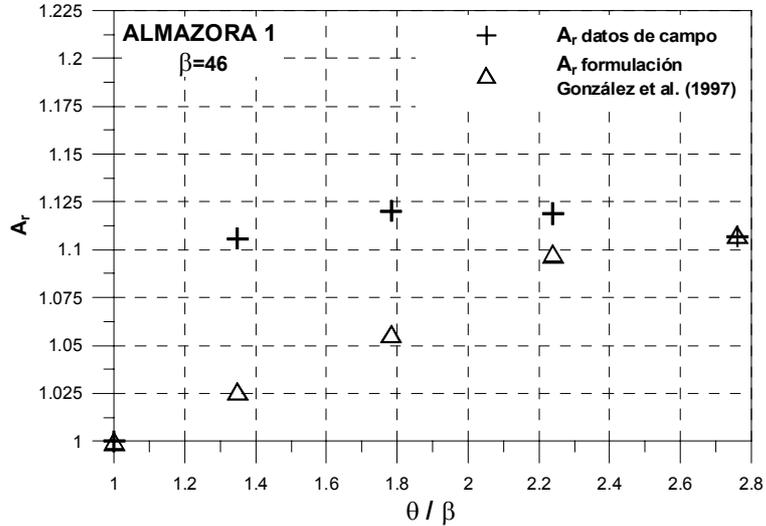


Figura IV.7- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Almazora 1

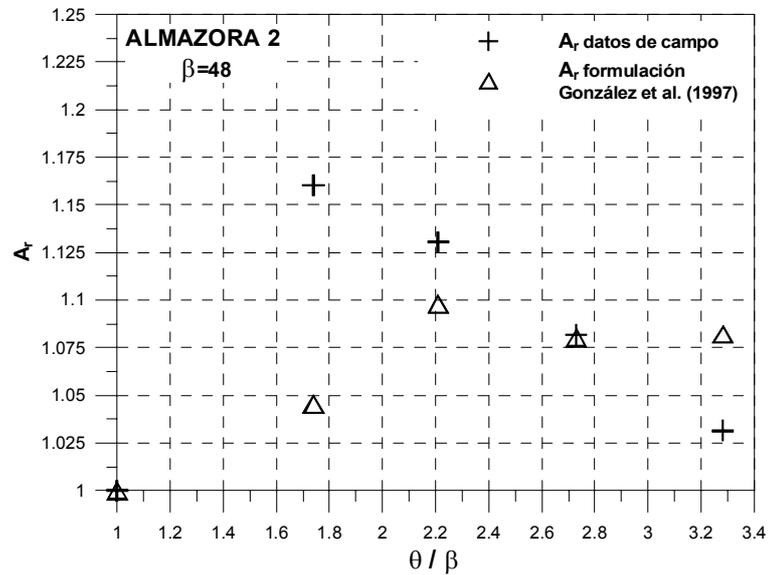


Figura IV.8- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Almazora 2

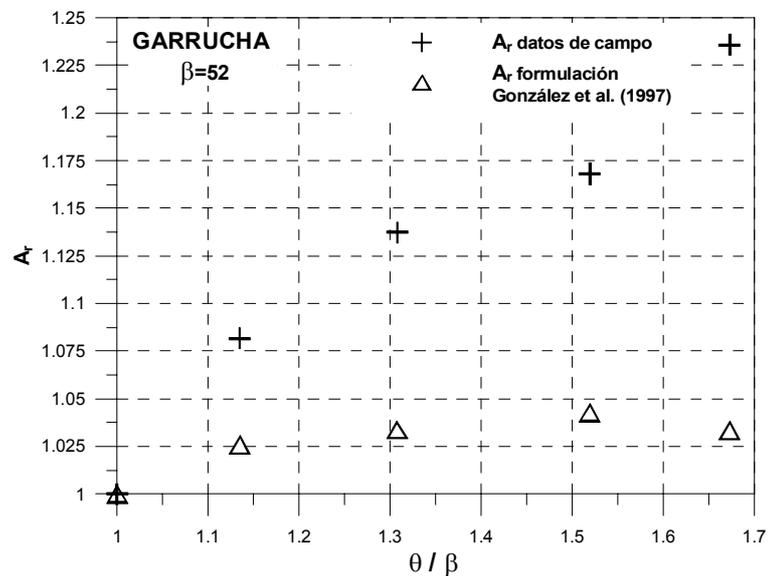


Figura IV.9- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Garrucha

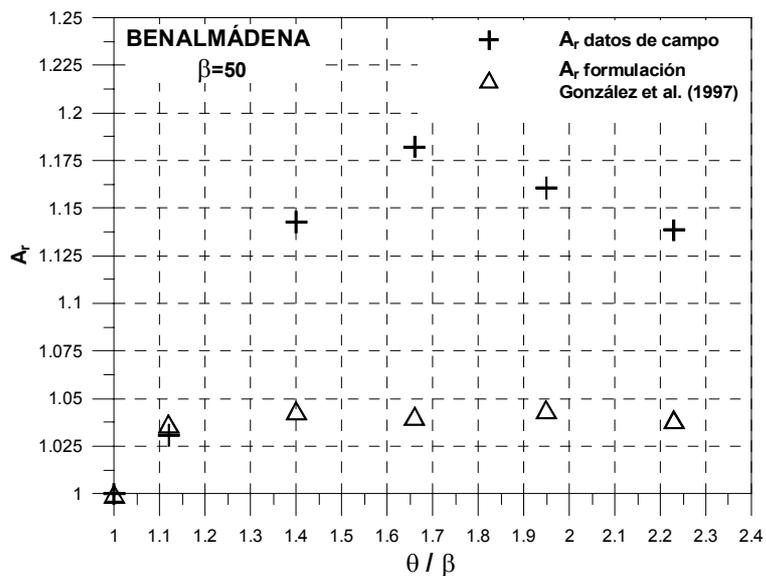


Figura IV.10- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Benalmádena

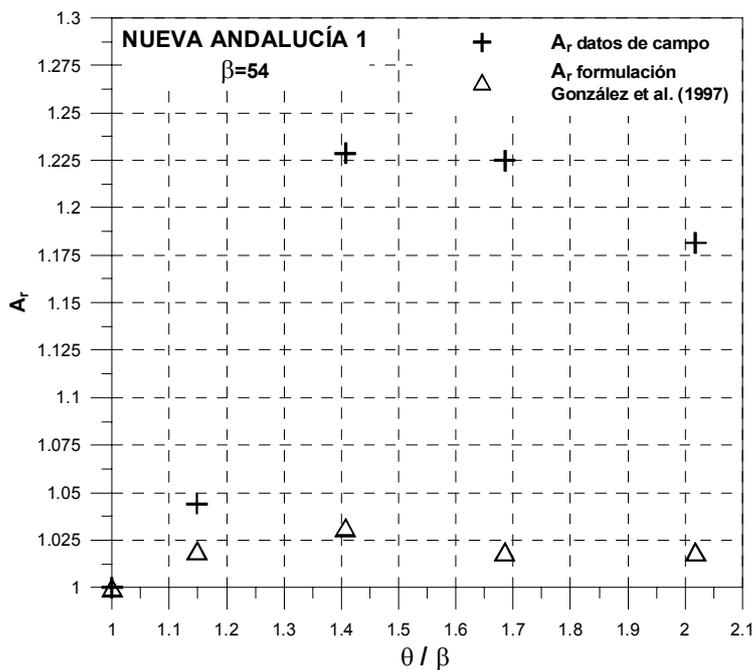


Figura IV.11- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Nueva Andalucía 1

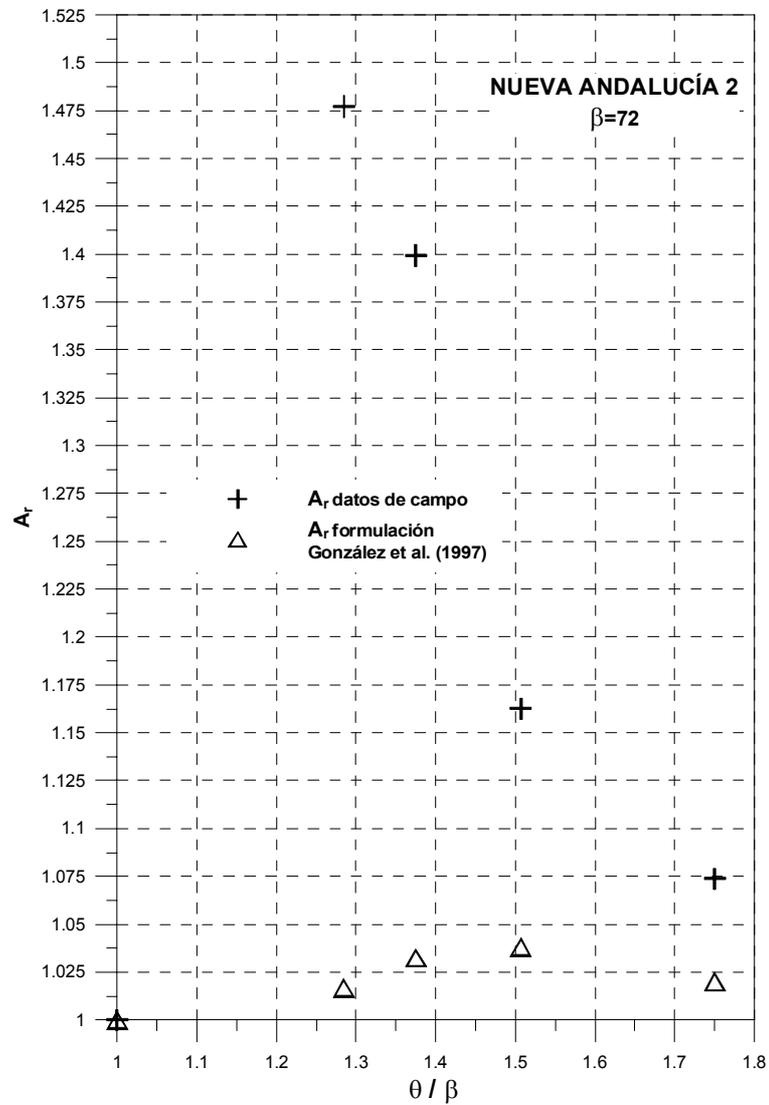


Figura IV.12- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Nueva Andalucía 2

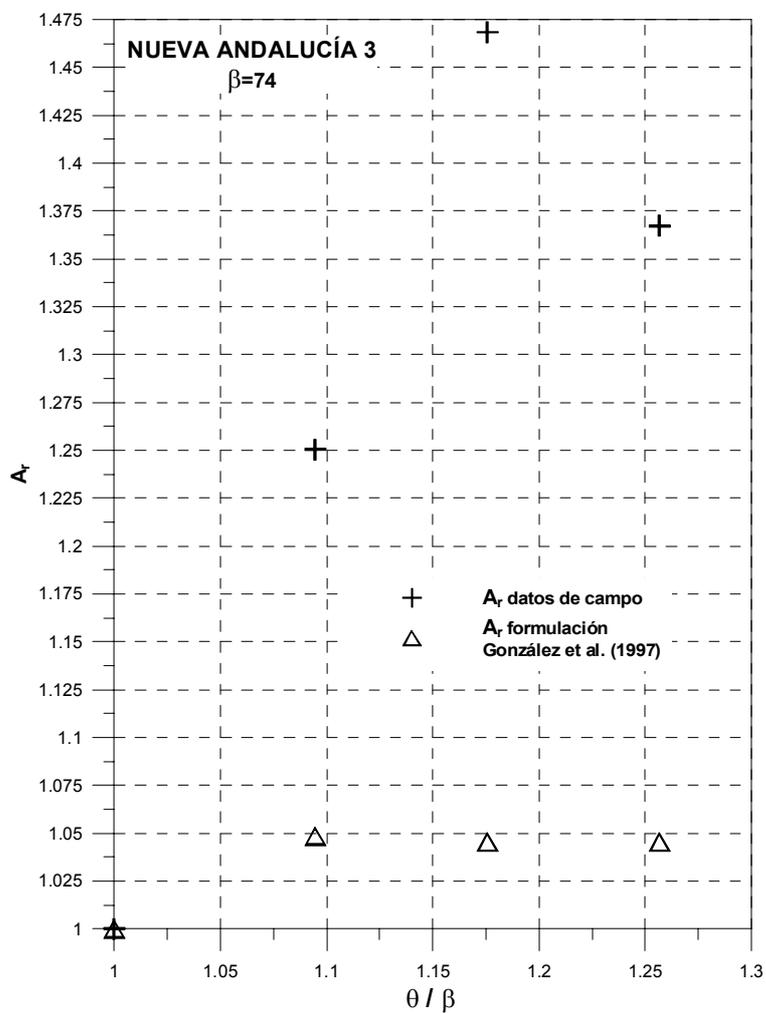


Figura IV.13- Comparación de A_r estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Nueva Andalucía 3

ANEJO V

COMPARACIÓN $A_{ref-dif}$ MEDIDO FRENTE AL DE LA FORMULACIÓN PROPUESTA

V.1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se presenta la comparación efectuada, para todas las playas de la base de datos utilizada, entre los parámetros de forma asociados a la zona de refracción-difracción ($A_{ref-dif}$) estimados a partir de los datos de campo, con respecto a los correspondientes parámetros determinados con la formulación propuesta en la presente Tesis para las dos opciones analizadas: playas existentes y diseño de playas (carácter predictivo). Así pues, en el primer caso el ángulo β de delimitación de la zona de refracción-difracción se determina como el de mejor ajuste a la planta de equilibrio de la playa, y en el segundo caso se calcula a partir de la expresión propuesta por González y Medina (2001) para la obtención del ángulo α_{min} ($\beta=90-\alpha_{min}$).

En una primera fase se va a especificar la formulación propuesta para la determinación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción y se indicarán los parámetros necesarios para el entendimiento de dicha formulación.

Posteriormente se describirá el proceso seguido para la estimación de los parámetros de forma asociados a la zona de refracción-difracción a partir de los datos de campo.

A continuación se indicarán los datos de campo que se han utilizado.

Finalmente se mostrarán las comparaciones entre estos parámetros de forma estimados con los datos de campo y los determinados con la formulación propuesta para los dos casos analizados: playas existentes y diseño de playas (carácter predictivo). Asimismo, se presentarán en tablas los parámetros de calibración de la formulación propuesta determinados para cada playa y para ambas opciones. Téngase en cuenta que en este anejo, además de presentar resultados del parámetro $A_{ref-dif}$, también se realizará un análisis comparativo del cociente F entre el parámetro de forma total de cada perfil localizado en la zona de refracción-difracción con respecto al del perfil de referencia en la zona exterior.

V.2. $A_{ref-dif}$ DETERMINADO CON LA FORMULACIÓN PROPUESTA

En el capítulo 9 de la sección 4 de la presente Tesis se describió la derivación analítica efectuada para la obtención de la formulación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción. En este anejo simplemente se va a expresar la formulación obtenida. Así pues, teniendo en cuenta estas consideraciones, el perfil de equilibrio en las zonas objeto de estudio queda definido siguiendo la expresión (V.1).

$$h = A_T x^{\frac{2}{3}} = A_{ref-dif} A_d x^{\frac{2}{3}} \quad (V.1)$$

En la ecuación (V.1) el parámetro de forma total A_T del perfil se descompone en un parámetro de forma relacionado con el tamaño de grano (A_d) y un parámetro de forma asociado a la zona de refracción-difracción ($A_{ref-dif}$).

El parámetro de forma asociado a la zona de refracción-difracción $A_{ref-dif}$ se calcula con la expresión (V.2), la cual fue derivada en el capítulo 9.

$$A_{ref-dif} = \frac{I}{\left(\frac{1 + P_a \frac{\sinh\left(P_b \left(\frac{\theta}{\beta} - 1\right)\right)}{\cosh^3\left(P_b \left(\frac{\theta}{\beta} - 1\right)\right)}}{\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (V.2)$$

La expresión (V.2) depende del ángulo β de delimitación de la zona de refracción-difracción, del ángulo θ de localización del perfil analizado y de dos parámetros de calibración (P_a y P_b), los cuales se establecen con base en los datos de campo. En la figura V.1 se indica este esquema de ubicación de los perfiles de playa.

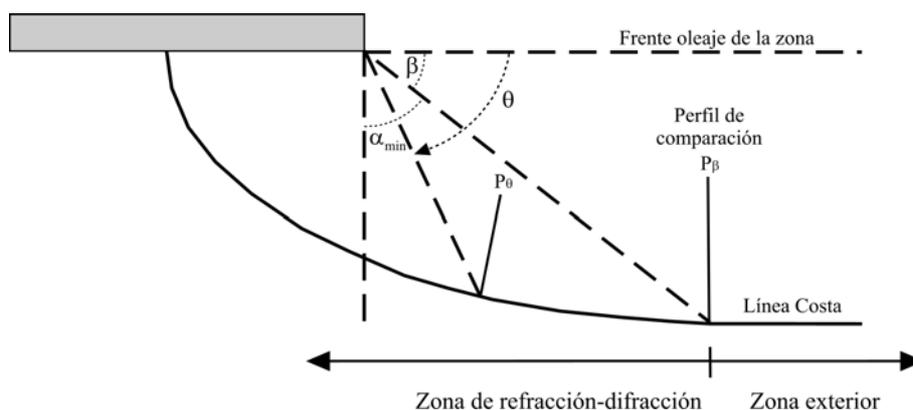


Figura V.1- Parámetros de ubicación de los perfiles de playa

Basándose en el esquema de representación indicado, el parámetro de forma de cada uno de los perfiles denotado como $A_{T\theta}$ se va a estudiar por comparación con el parámetro de forma del perfil localizado en el ángulo β y denotado como $A_{T\beta}$. El cociente F entre ambos parámetros aparece indicado en la ecuación (V.3).

$$F = \frac{A_{T\theta}}{A_{T\beta}} = \frac{A_{ref-dif\theta} A_{d\theta}}{A_{ref-dif\beta} A_{d\beta}} \quad (V.3)$$

Asimismo, se debe tener en consideración la ecuación (V.4) y el cambio de notación representado mediante la expresión (V.5).

$$A_{ref-dif\beta} = I \quad (V.4)$$

$$A_{ref-dif\theta} \Rightarrow A_{ref-dif} \quad (V.5)$$

Después de tener en cuenta las expresiones (V.4) y (V.5), la ecuación (V.3) queda especificada mediante la expresión (V.6).

$$F = \frac{A_{T\theta}}{A_{T\beta}} = \frac{A_{ref-dif\theta} A_{d\theta}}{A_{ref-dif\beta} A_{d\beta}} = \frac{A_{ref-dif} A_{d\theta}}{A_{d\beta}} \quad (V.6)$$

V.3. $A_{ref-dif}$ ESTIMADO CON LOS DATOS DE CAMPO

En este apartado se va a describir el proceso seguido para la estimación del parámetro de forma $A_{ref-dif}$ a partir de los perfiles medidos en cada playa. El proceso mencionado se puede descomponer en los siguientes puntos:

1. Para cada playa, se determina el punto de difracción, se define la dirección de referencia a partir de la cual se van a medir los ángulos de ubicación de los perfiles de playa (esta dirección coincide con la parte recta de la playa en playas desarrolladas y se suele asociar a la dirección del flujo medio de energía) y, adicionalmente, se debe establecer el ángulo β de influencia de la estructura (este ángulo se determina como el de mejor ajuste a la forma en planta de equilibrio para playas existentes, o bien a partir del ángulo α_{min} , $\beta=90-\alpha_{min}$, propuesto por González y Medina (2001) para diseño de playas).

2. Con los tres elementos definidos en el punto anterior (punto difractante, dirección de referencia y zona de refracción-difracción definida con el ángulo β) queda establecido el sistema de referencia con el que se van a definir cada uno de los perfiles (ángulo θ indicado en la figura V.1), así como el perfil de playa de referencia (perfil denotado como exterior o de comparación) ubicado en el ángulo θ igual a β .

3. En cada uno de estos perfiles se determina el parámetro de forma $A_{T\theta}$, así como el parámetro de forma asociado al tamaño de grano $A_{d\theta}$. Aunque existen diferentes expresiones para estimar este último parámetro, en la presente Tesis se ha utilizado la formulación de Dean (1987b), con la que se relaciona el parámetro de

forma asociado al tamaño de grano con la velocidad de caída del grano w_s mediante la ecuación (V.7). En esta ecuación la velocidad de caída del grano debe ser expresada en metros por segundo.

$$A_d = 0.51w_s^{0.44} \quad (V.7)$$

La velocidad de caída del grano se calcula con la formulación de van Rijn (1993), que para el caso de arenas con densidad de 2.65 toneladas por metro cúbico ($\rho_s=2.65$) se indica en las ecuaciones (V.8), (V.9) y (V.10). En estas ecuaciones D_{50} debe ser expresado en metros y w_s en metros por segundo.

$$w_s = 1.1 \cdot 10^6 D_{50}^2 \Rightarrow D_{50} \leq 0.1 \text{ mm} \quad (V.8)$$

$$w_s = 273 D_{50}^{1.1} \Rightarrow 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm} \quad (V.9)$$

$$w_s = 4.36 D_{50}^{0.5} \Rightarrow D_{50} > 1 \text{ mm} \quad (V.10)$$

4. Al igual que se hizo en el punto anterior para el resto de perfiles, se calcula para el perfil de playa de referencia o de comparación el parámetro de forma $A_{T\beta}$ (el cual en este caso coincide con el parámetro de forma asociado al tamaño de grano A_d β).

5. Finalmente, haciendo uso de la ecuación (V.6), se obtiene para cada perfil el parámetro de forma $A_{ref-dif}$ mediante la expresión (V.11).

$$A_{ref-dif} = \frac{A_{T\theta}}{A_{T\beta}} \frac{A_{d\beta}}{A_{d\theta}} = F \frac{A_{d\beta}}{A_{d\theta}} \quad (V.11)$$

V.4. DATOS DE CAMPO

Los parámetros de forma $A_{ref-dif}$ estimados a partir de los perfiles de campo (apartado V.3) han sido comparados con los correspondientes parámetros determinados con la formulación propuesta en la presente Tesis (ecuación V.2 del apartado V.2). El estudio descrito se llevó a cabo en las playas que aparecen localizadas en la figura V.2. La numeración de las playas de esta figura se corresponde con la notación establecida en la tabla V.1.

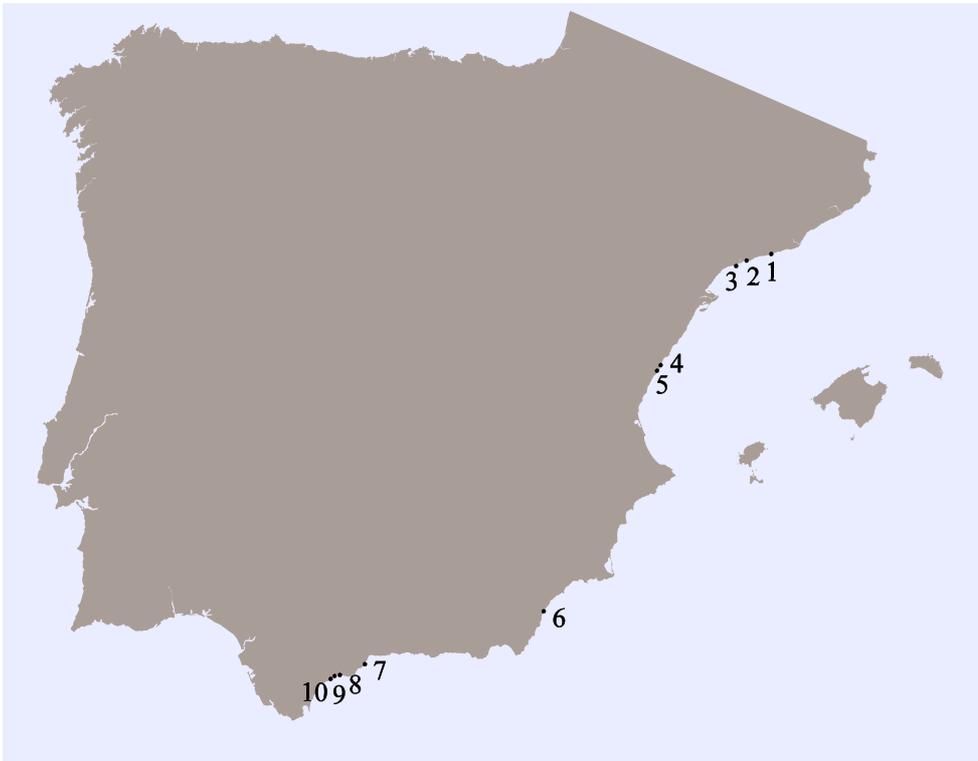


Figura V.2- Localización de las playas

NÚMERO	NOMBRE	LOCALIZACIÓN
1	Cubelles	Barcelona
2	Altafulla	Tarragona
3	Salou	Tarragona
4	Almazora 1	Castellón
5	Almazora 2	Castellón
6	Garrucha	Almería
7	Benalmádena	Málaga
8	Nueva Andalucía 1	Málaga
9	Nueva Andalucía 2	Málaga
10	Nueva Andalucía 3	Málaga

Tabla V.1- Descripción de las playas de la base de datos

V.5. COMPARACIÓN DE $A_{ref-dif}$ MEDIDO FRENTE AL DETERMINADO CON LA FORMULACIÓN PROPUESTA PARA PLAYAS EXISTENTES

Siguiendo el mismo orden que el especificado en la figura V.2, se va a presentar la comparación efectuada para las diez playas indicadas en la mencionada figura entre el parámetro de forma $A_{ref-dif}$ estimado con los datos de campo frente al calculado con la formulación propuesta para playas existentes. Adicionalmente, también se va a mostrar el análisis comparativo del cociente F entre el parámetro de forma total de cada perfil localizado en la zona de refracción-difracción con respecto al del perfil de la zona exterior. Las figuras V.3, V.4, V.5, V.6, V.7, V.8, V.9, V.10, V.11 y V.12 indican las comparaciones efectuadas para las diez playas. Dichas figuras se han representado en unos ejes de referencia que tienen en consideración la ubicación indicada en la figura V.1. En concreto, en el eje de abscisas se representa la localización de cada perfil mediante el cociente del ángulo θ del perfil analizado con respecto al ángulo β del perfil de comparación localizado en la zona exterior.

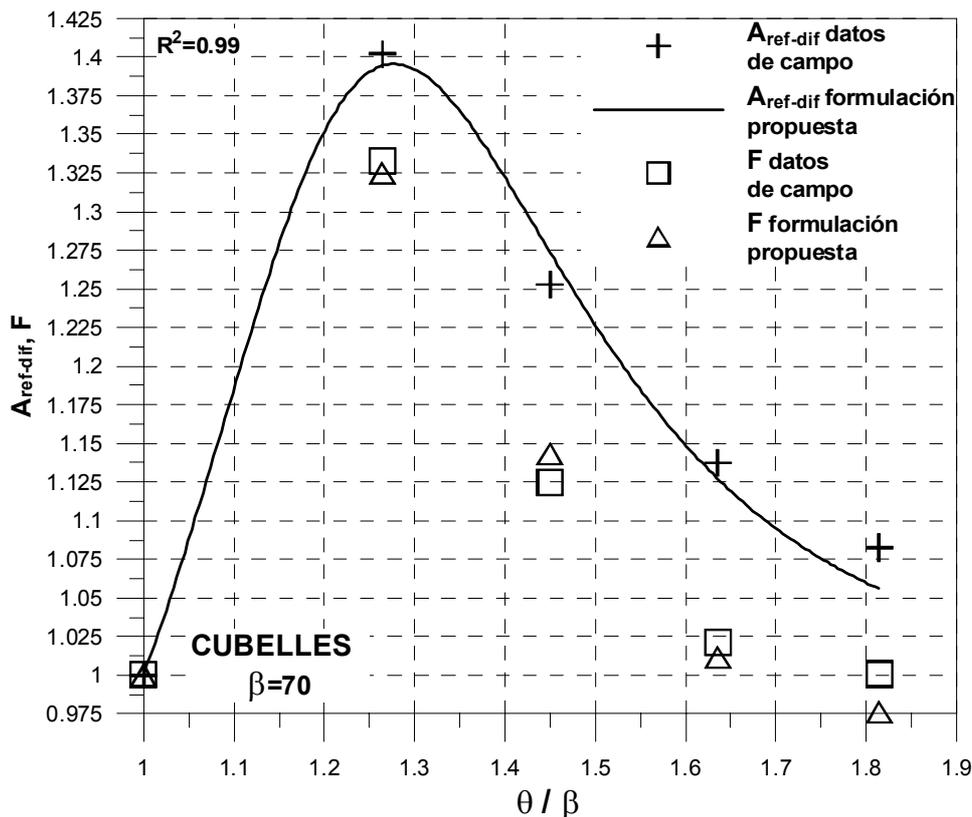


Figura V.3- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Cubelles

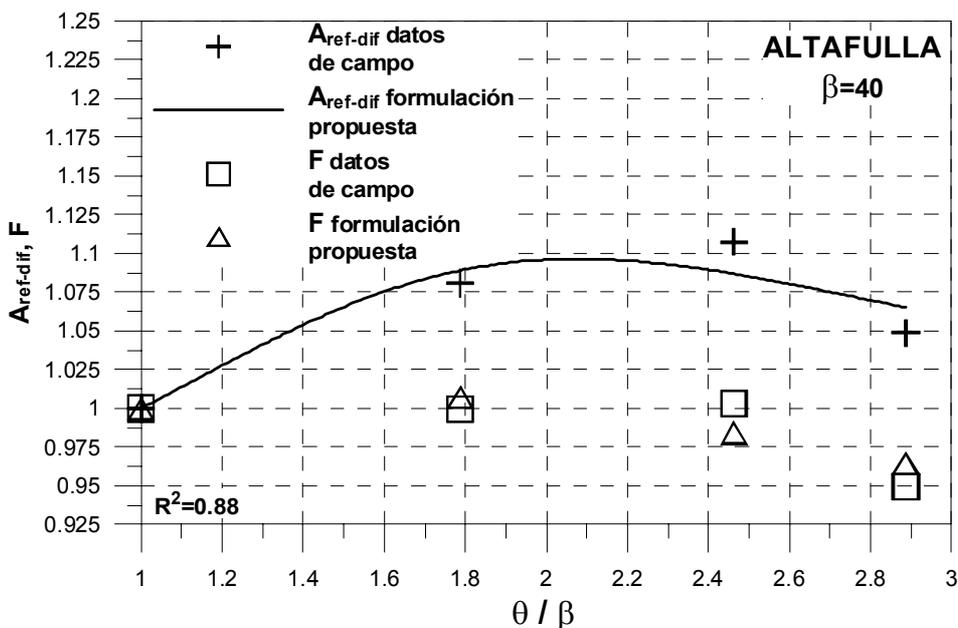


Figura V.4- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Altafulla

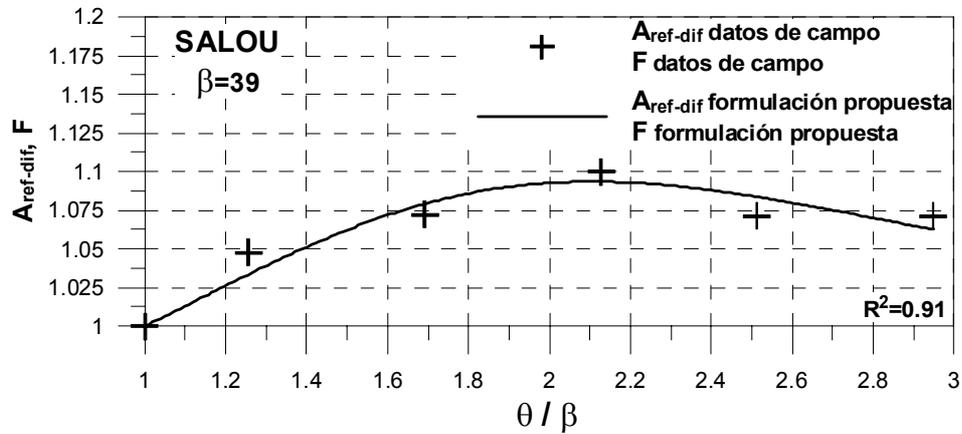


Figura V.5- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Salou

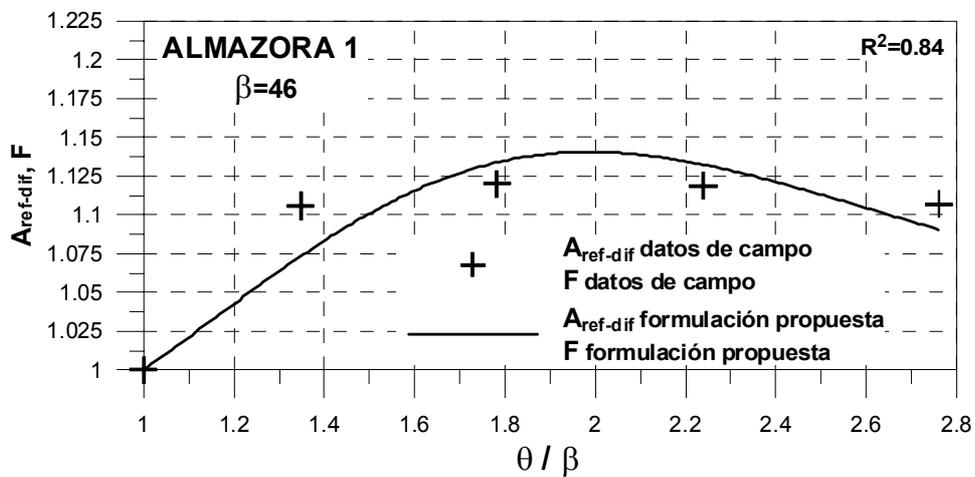


Figura V.6- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Almazora 1

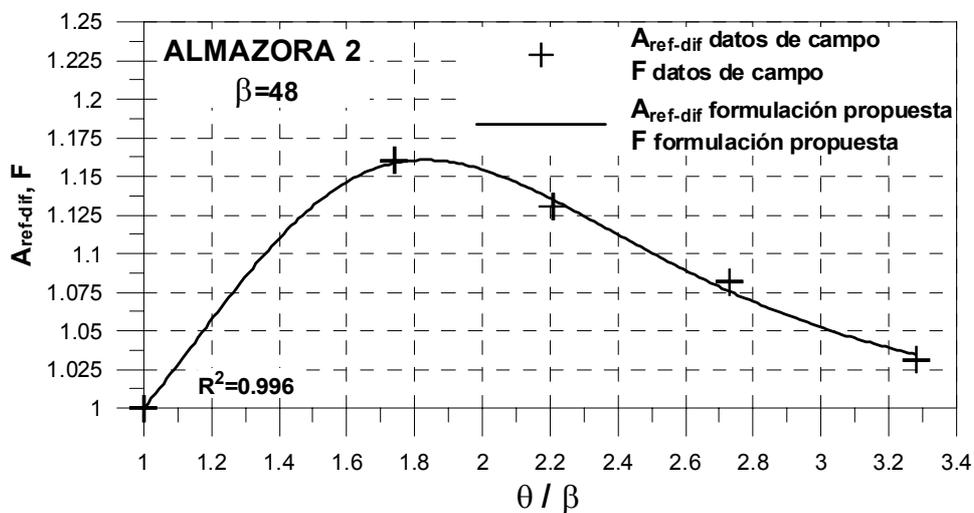


Figura V.7- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Almazora 2

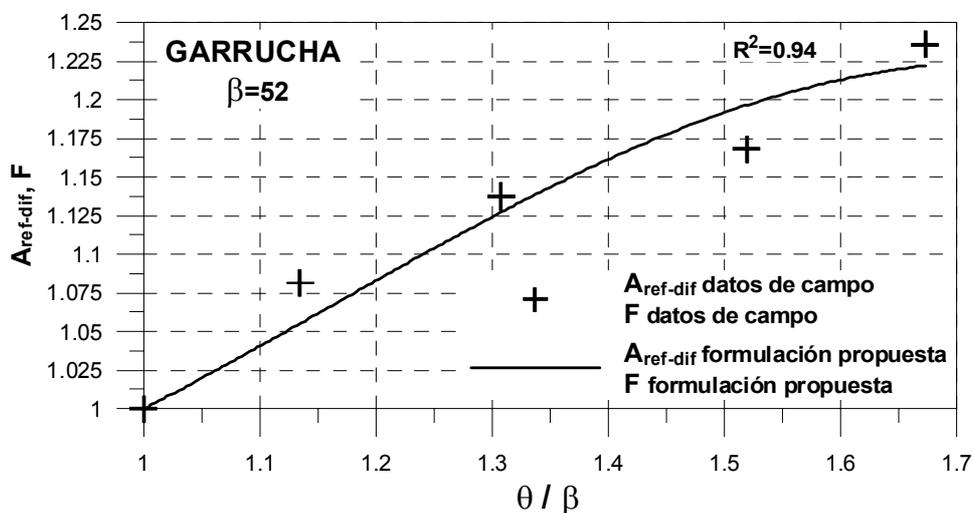


Figura V.8- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Garrucha

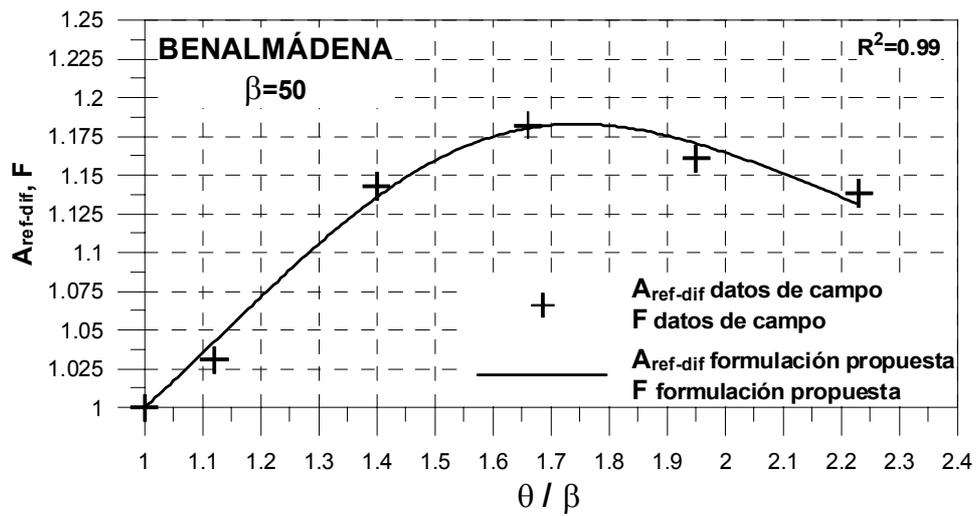


Figura V.9- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Benalmádena

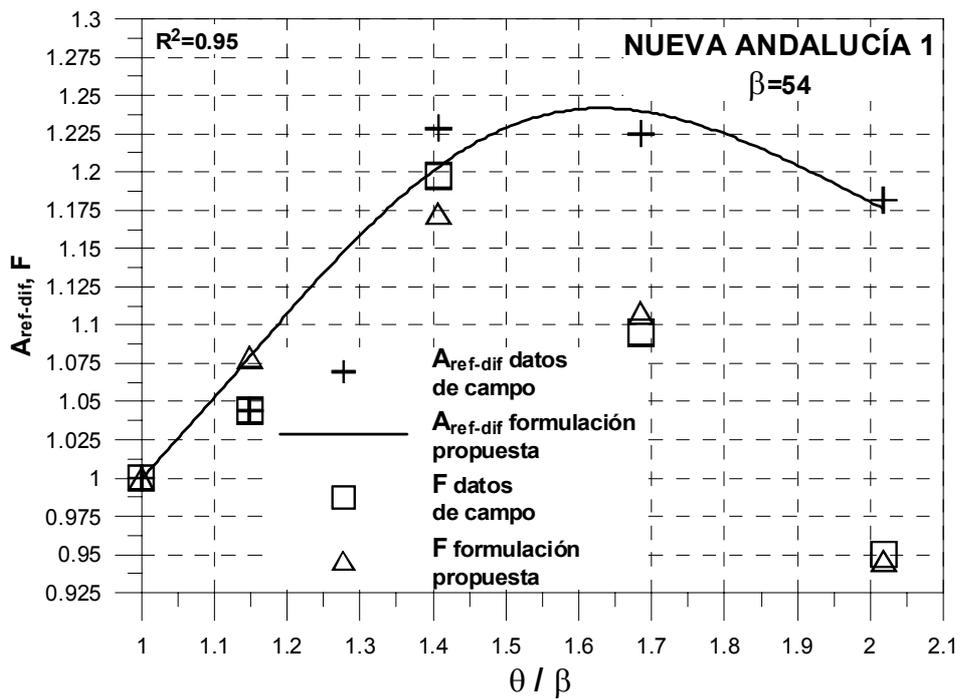


Figura V.10- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Nueva Andalucía 1

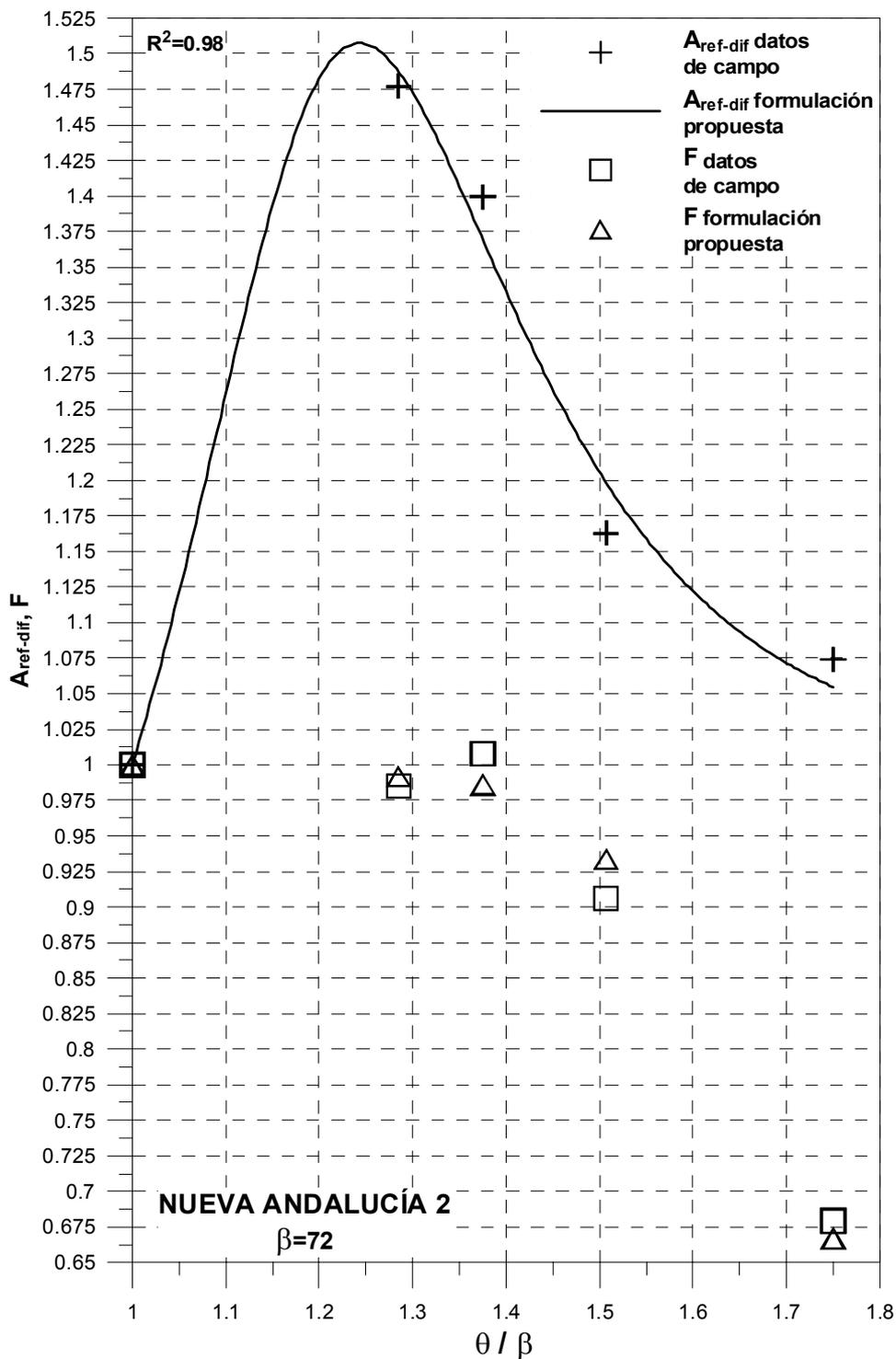


Figura V.11- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Nueva Andalucía 2

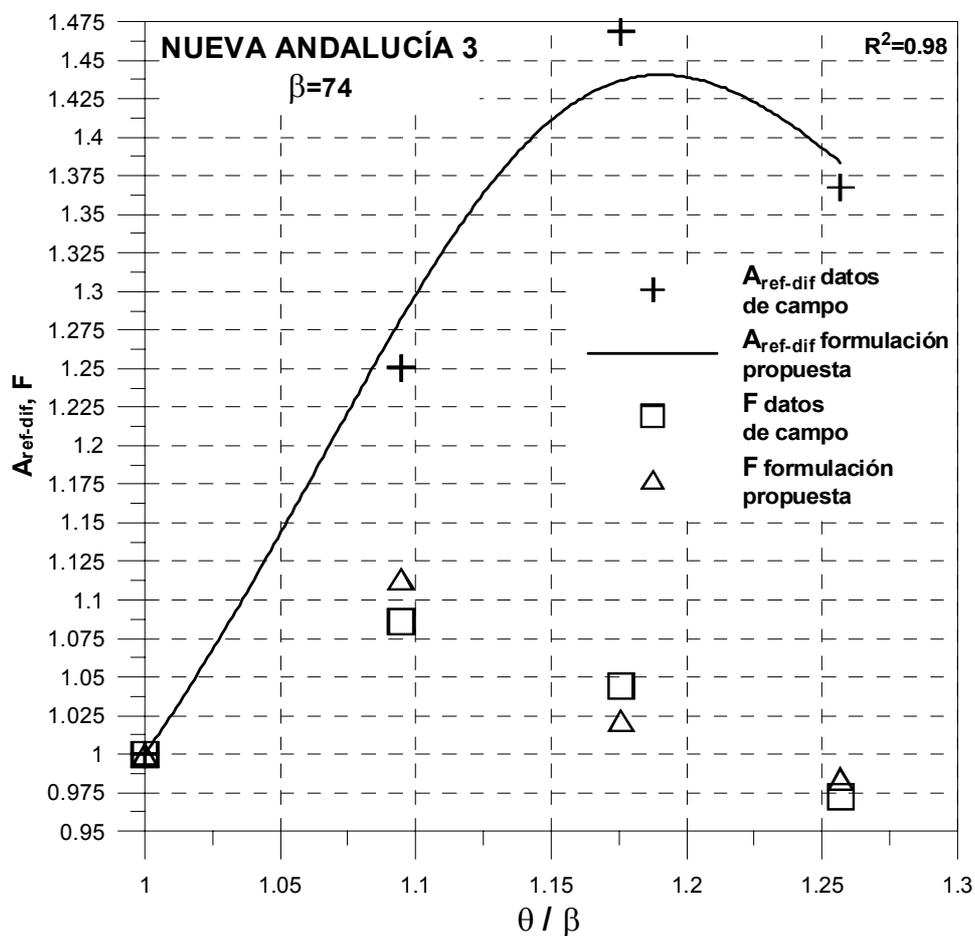


Figura V.12- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Nueva Andalucía 3

En cada una de las figuras presentadas (figuras V.3, V.4, V.5, V.6, V.7, V.8, V.9, V.10, V.11 y V.12) se obtuvieron los parámetros P_a y P_b de calibración de la expresión (V.2) para la determinación del parámetro de forma $A_{ref-dif}$ en cada una de las playas. En la tabla V.2 se indican estos valores.

<i>NÚMERO</i>	<i>NOMBRE</i>	<i>P_a</i>	<i>P_b</i>
<i>1</i>	Cubelles	-1.022	2.377
<i>2</i>	Altafulla	-0.335	0.612
<i>3</i>	Salou	-0.326	0.597
<i>4</i>	Almazora 1	-0.465	0.668
<i>5</i>	Almazora 2	-0.520	0.794
<i>6</i>	Garrucha	-0.685	0.854
<i>7</i>	Benalmádena	-0.579	0.884
<i>8</i>	Nueva Andalucía 1	-0.720	1.044
<i>9</i>	Nueva Andalucía 2	-1.194	2.710
<i>10</i>	Nueva Andalucía 3	-1.095	3.456

Tabla V.2- Parámetros de calibración de la expresión para la determinación del parámetro de forma $A_{ref-dif}$ para cada una de las playas

V.6. COMPARACIÓN DE $A_{ref-dif}$ MEDIDO FRENTE AL DETERMINADO CON LA FORMULACIÓN PROPUESTA PARA DISEÑO DE PLAYAS

A continuación se va a presentar la comparación efectuada para las diez playas indicadas en la figura V.2 entre el parámetro de forma $A_{ref-dif}$ estimado con los datos de campo frente al calculado con la formulación propuesta para diseño de playas. Adicionalmente, también se va a mostrar el análisis comparativo del cociente F entre el parámetro de forma total de cada perfil localizado en la zona de refracción-difracción con respecto al del perfil de la zona exterior. Sin embargo, teniendo en cuenta los comentarios realizados en el capítulo 10 de la sección 4 de la Tesis, las expresiones planteadas en el mencionado capítulo para la determinación de los parámetros de la formulación propuesta en este caso, se basaron sólo en las playas desarrolladas. Así pues, primero se presentarán las comparaciones para las playas desarrolladas (Altafulla en la figura V.13, Salou en la figura V.14, Almazora 1 en la figura V.15, Almazora 2 en la figura V.16 y Benalmádena en la figura V.17), y

finalmente para las playas no desarrolladas (Cubelles en la figura V.18, Garrucha en la figura V.19, Nueva Andalucía 1 en la figura V.20, Nueva Andalucía 3 en la figura V.21 y Nueva Andalucía 2 en la figura V.22), en las que incluso existe influencia de puntos difractantes. Téngase presente que las anteriores figuras se han representado en unos ejes de referencia que tienen en consideración la ubicación indicada en la figura V.1. En concreto, en el eje de abscisas se representa la localización de cada perfil mediante el cociente del ángulo θ del perfil analizado con respecto al ángulo β ($\beta=90-\alpha_{min}$) del perfil de comparación localizado en la zona exterior.

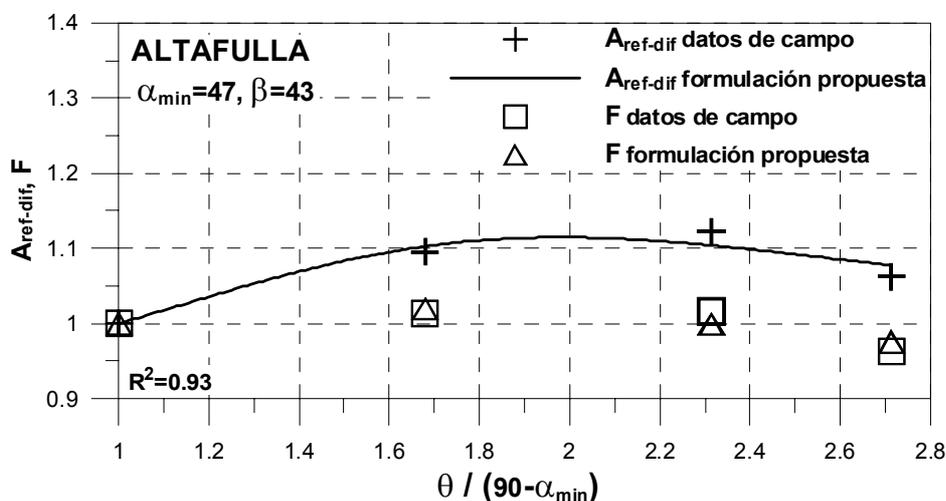


Figura V.13- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Altafulla

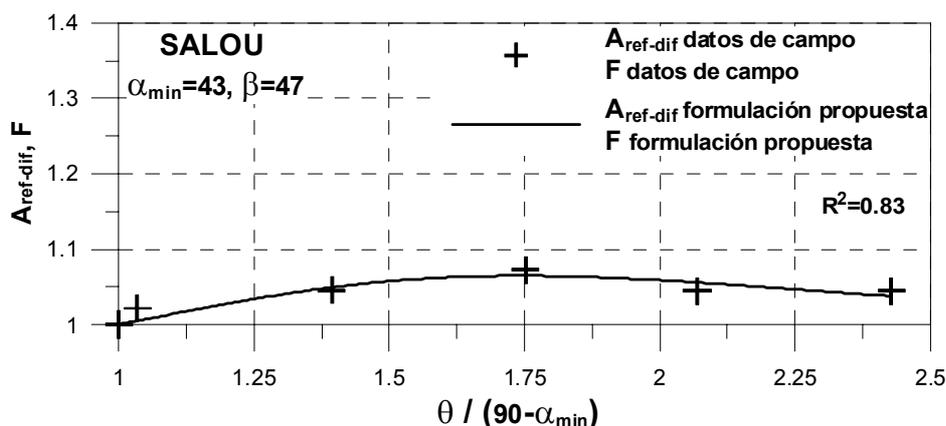


Figura V.14- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Salou

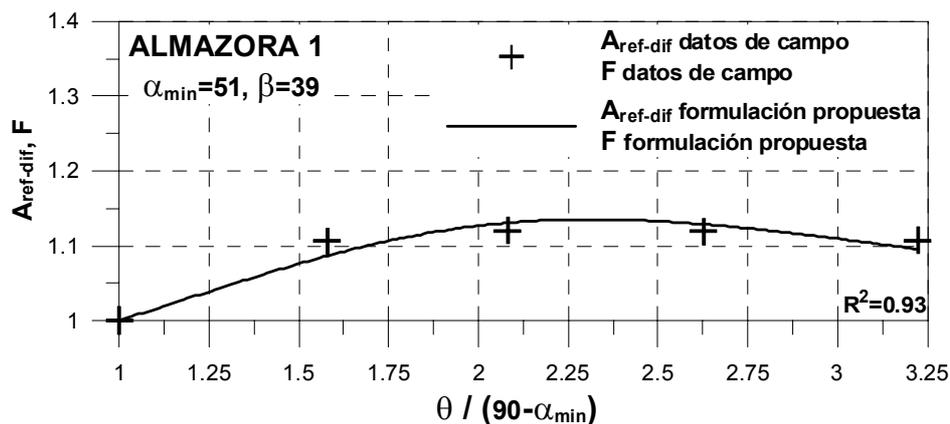


Figura V.15- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Almazora 1

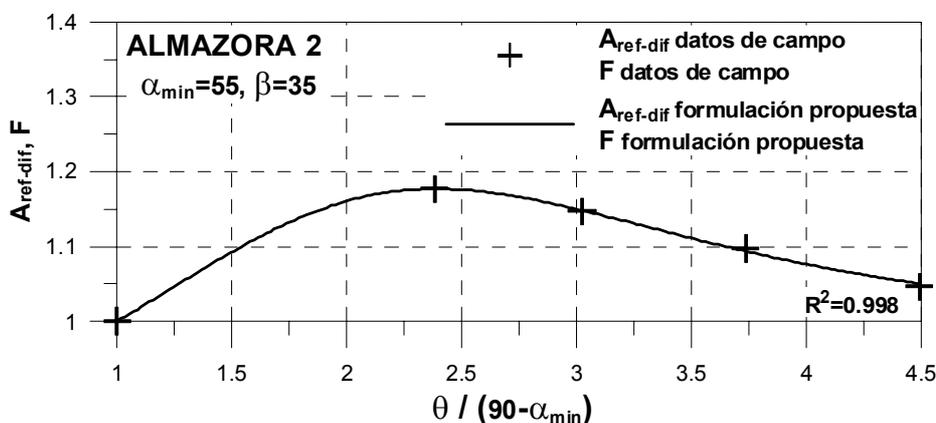


Figura V.16- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Almazora 2

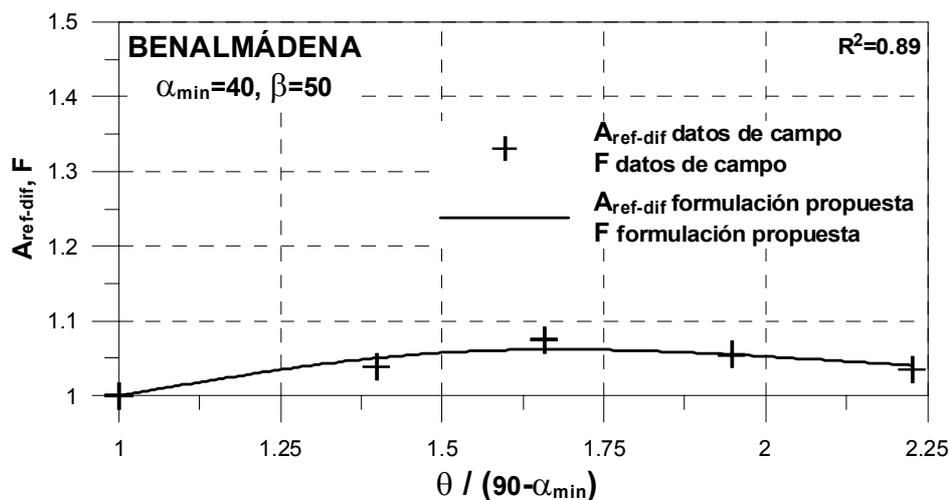


Figura V.17- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Benalmádena

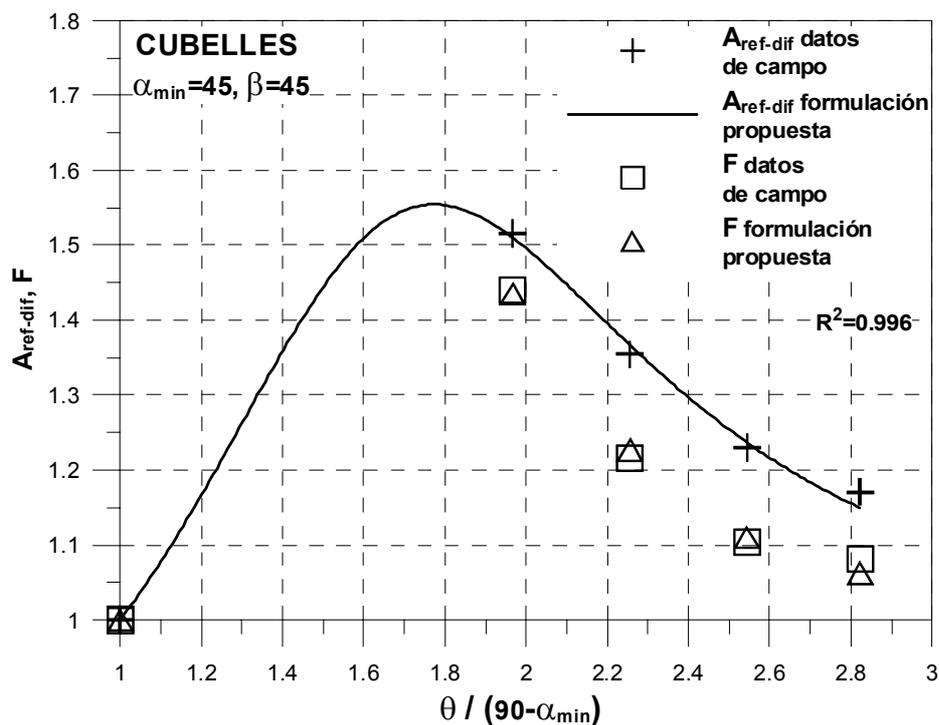


Figura V.18- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Cubelles

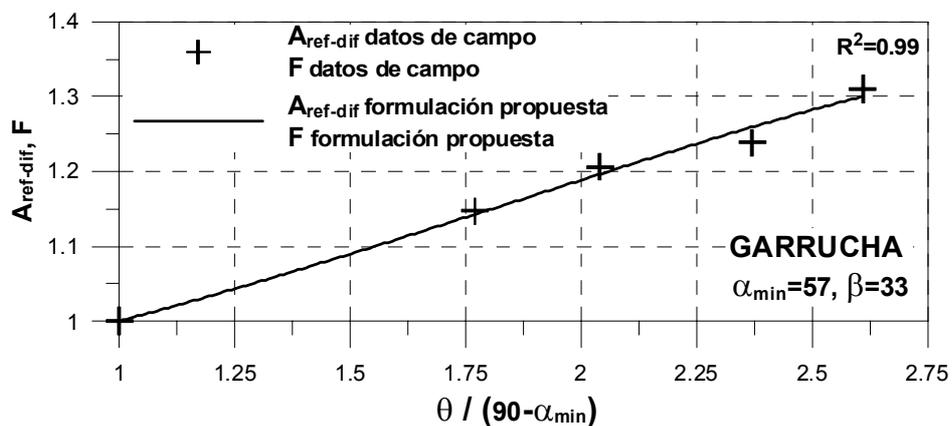


Figura V.19- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Garrucha

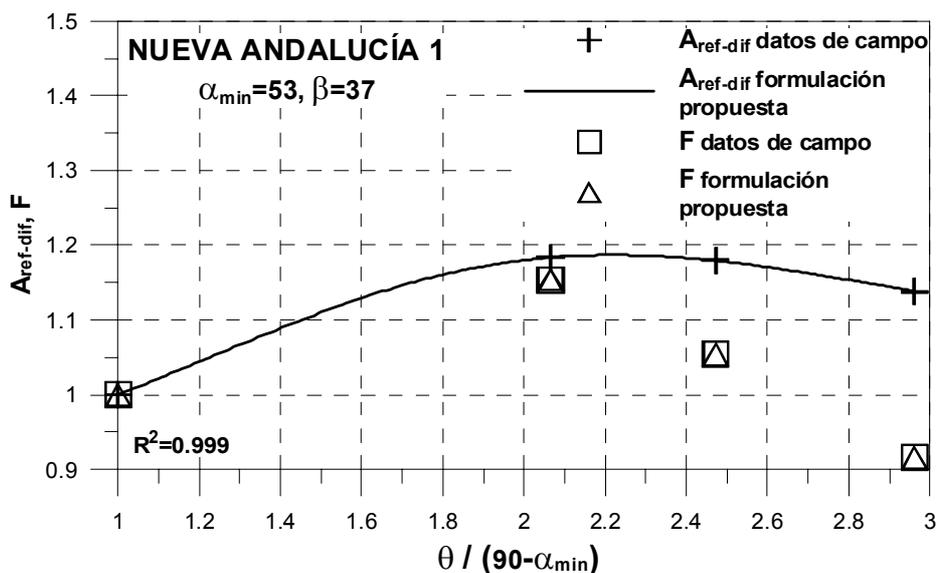


Figura V.20- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Nueva Andalucía 1

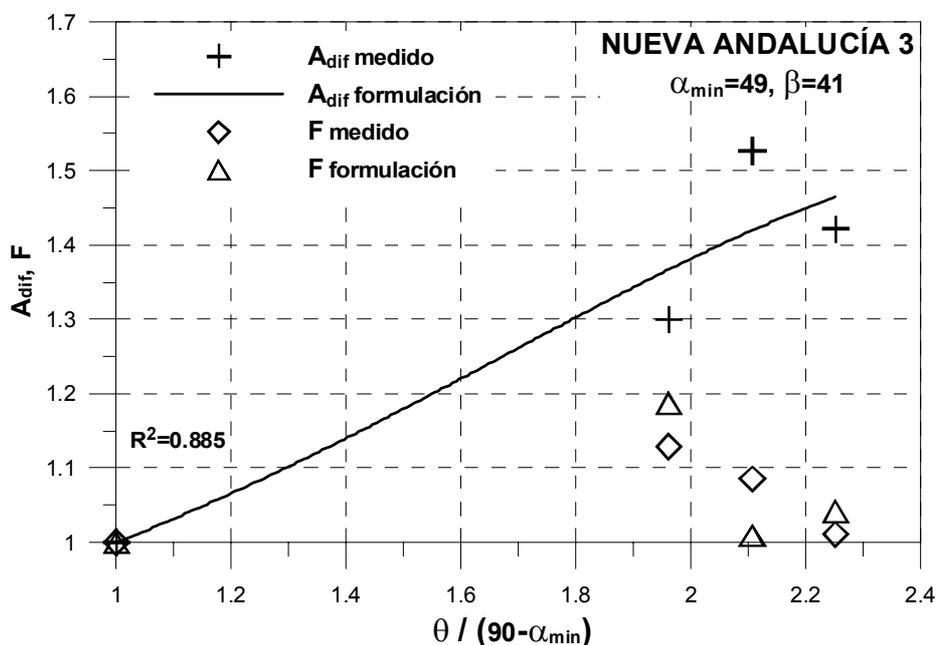


Figura V.21- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Nueva Andalucía 3

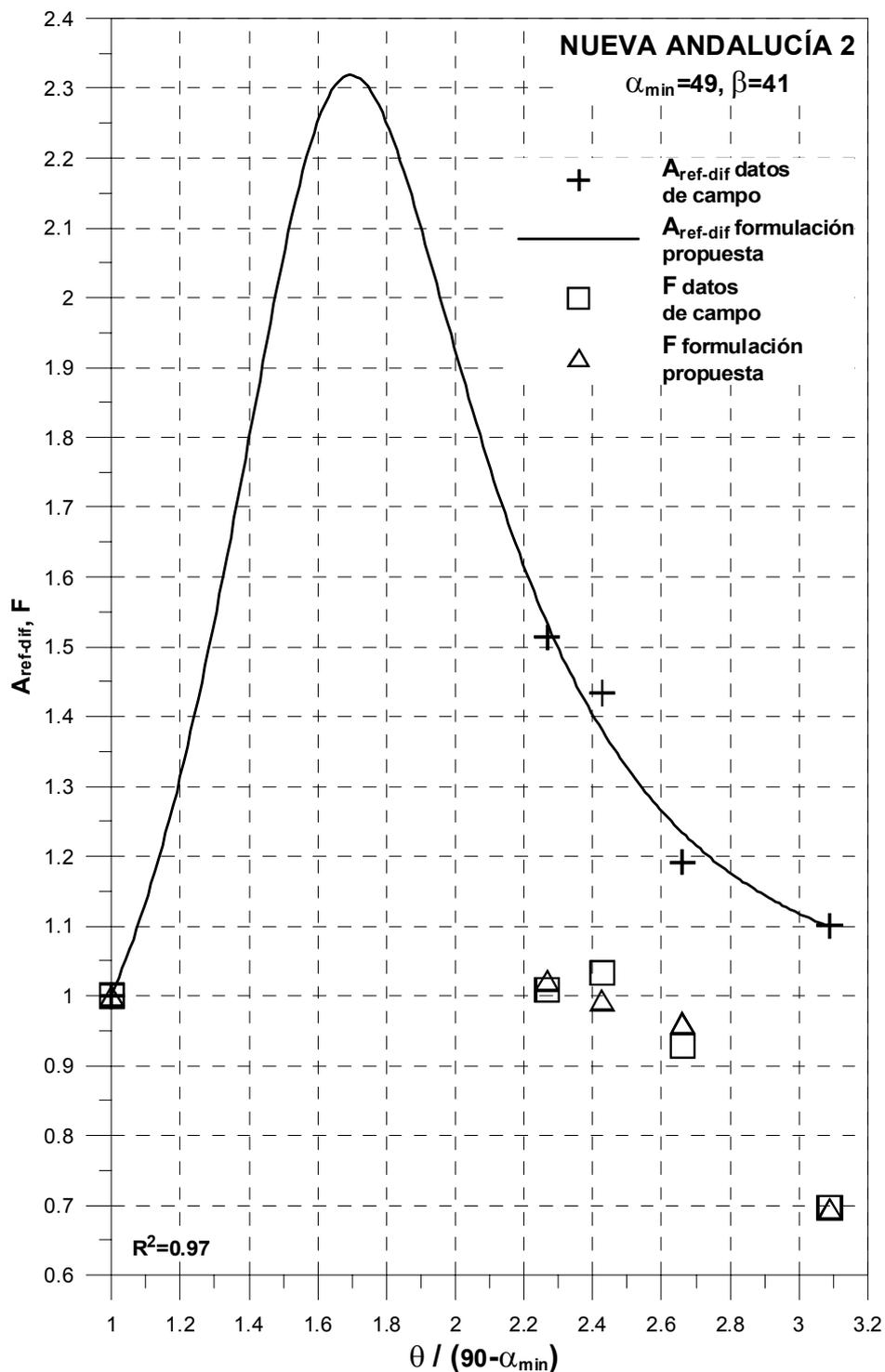


Figura V.22- Comparación de $A_{ref-dif}$ y el cociente F estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Nueva Andalucía 2

En cada una de las figuras presentadas (figuras V.13, V.14, V.15, V.16, V.17, V.18, V.19, V.20, V.21 y V.22) se obtuvieron los parámetros P_a y P_b de calibración de la expresión (V.2) para la determinación del parámetro de forma $A_{ref-dif}$ en cada una de las playas. En la tabla V.3 se presentan estos valores para cada una de las playas desarrolladas y en la tabla V.4 se indican los correspondientes valores para cada una de las playas no desarrolladas.

NÚMERO	NOMBRE	P_a	P_b
2	Altafulla	-0.391	0.672
3	Salou	-0.234	0.889
4	Almazora 1	-0.451	0.500
5	Almazora 2	-0.564	0.474
7	Benalmádena	-0.224	0.969

Tabla V.3- Parámetros de calibración de la expresión para la determinación del parámetro de forma $A_{ref-dif}$ para cada una de las playas desarrolladas

NÚMERO	NOMBRE	P_a	P_b
1	Cubelles	-1.258	0.852
6	Garrucha	-1.018	0.242
8	Nueva Andalucía 1	-0.589	0.541
9	Nueva Andalucía 2	-1.862	0.947
10	Nueva Andalucía 3	-1.238	0.371

Tabla V.4- Parámetros de calibración de la expresión para la determinación del parámetro de forma $A_{ref-dif}$ para cada una de las playas no desarrolladas

ANEJO VI

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LAS PLAYAS NO DESARROLLADAS

VI.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 10 de la sección 4 de la Tesis se demostró que la calibración efectuada de los parámetros de la formulación de $A_{ref-dif}$ propuesta para diseño de playas (carácter predictivo) no es válida para playas no desarrolladas. En este anejo se especifica la metodología a seguir para la utilización de la formulación propuesta de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción en el caso de playas no desarrolladas, aplicándose a las playas de este tipo existentes en la Tesis (Cubelles, Garrucha, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3).

VI.2. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta para playas no desarrolladas consta de los siguientes puntos:

1. Se determina la planta de equilibrio de la playa para cada uno de los puntos difractantes, utilizando para la definición del ángulo β de influencia de cada morro difractante la formulación del ángulo α_{min} propuesta por González y Medina (2001). En las figuras VI.1, VI.2, VI.3, VI.4 y VI.5 se representan las dos plantas de equilibrio en línea fina para cada una de las playas no desarrolladas (Cubelles, Garrucha, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3). También aparecen delimitadas las zonas de influencia de cada morro, pudiéndose observar que existe influencia de ambos y que la playa no está desarrollada.

2. Se determina el punto de intersección de ambas plantas de equilibrio.

3. A partir de este punto de intersección se busca el mejor ajuste para la forma en planta de equilibrio, cuya zona de influencia (ángulo β) venga marcada precisamente por este punto de intersección y no por la formulación de González y Medina (2001). Estas plantas se indican en línea gruesa en las figuras VI.1, VI.2, VI.3, VI.4 y VI.5.

4. A partir de este momento se aplica la formulación desarrollada en el apartado 10.2. del capítulo 10 de la sección 4 de la Tesis para playas existentes.

VI.3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La aplicación de la metodología propuesta en el anterior apartado al caso de las cinco playas no desarrolladas existentes (Cubelles, Garrucha, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3) se presenta en las figuras VI.1, VI.2, VI.3, VI.4 y VI.5.

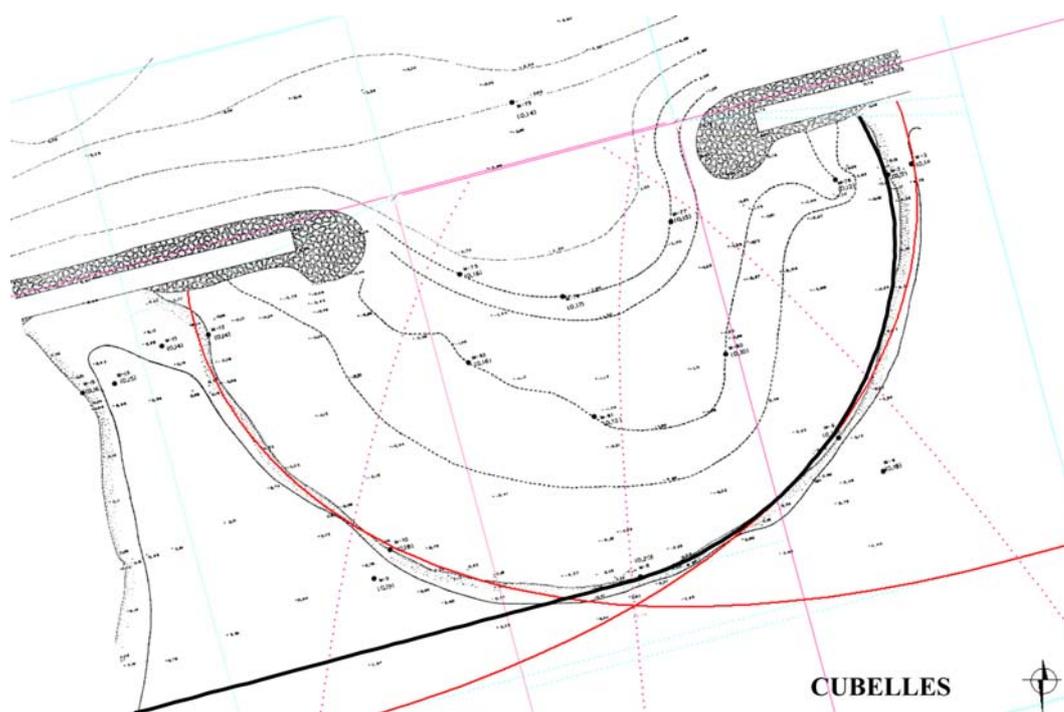


Figura VI.1- Aplicación de la metodología propuesta a la playa de Cubelles

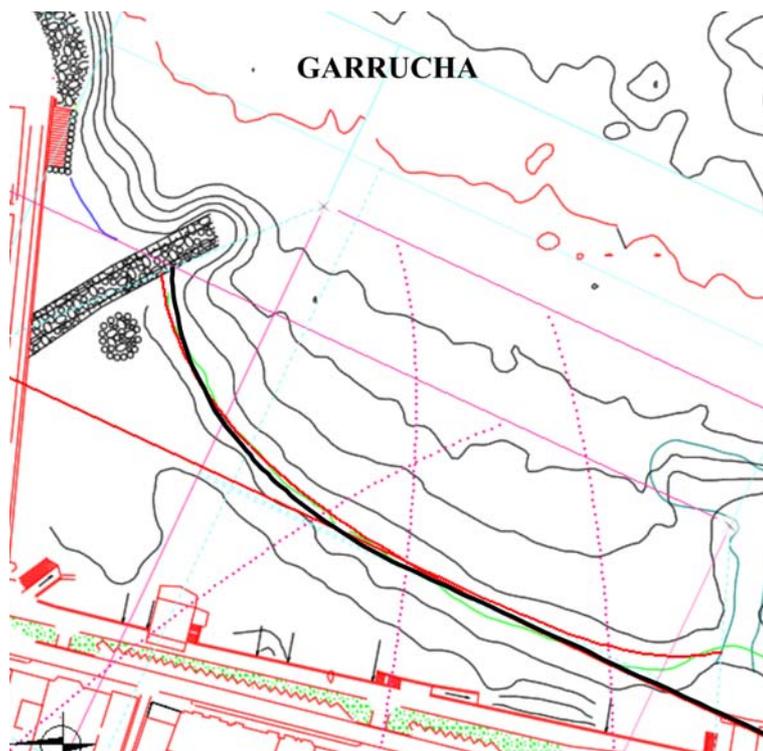


Figura VI.2- Aplicación de la metodología propuesta a la playa de Garrucha

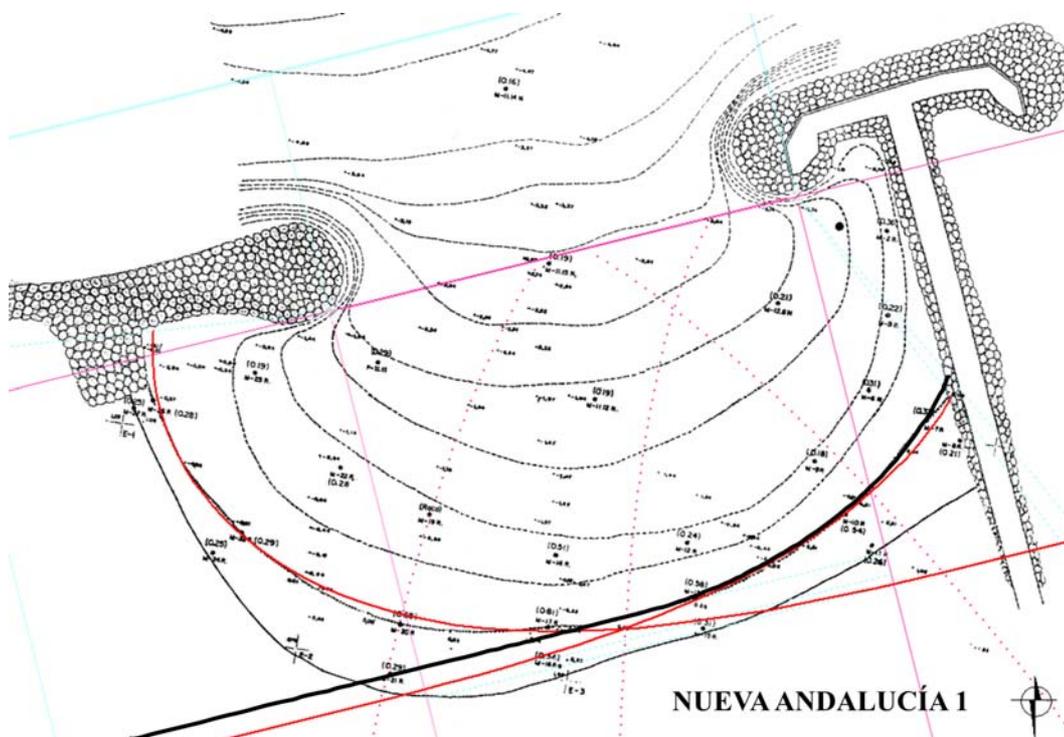


Figura VI.3- Aplicación de la metodología propuesta a la playa de Nueva Andalucía 1

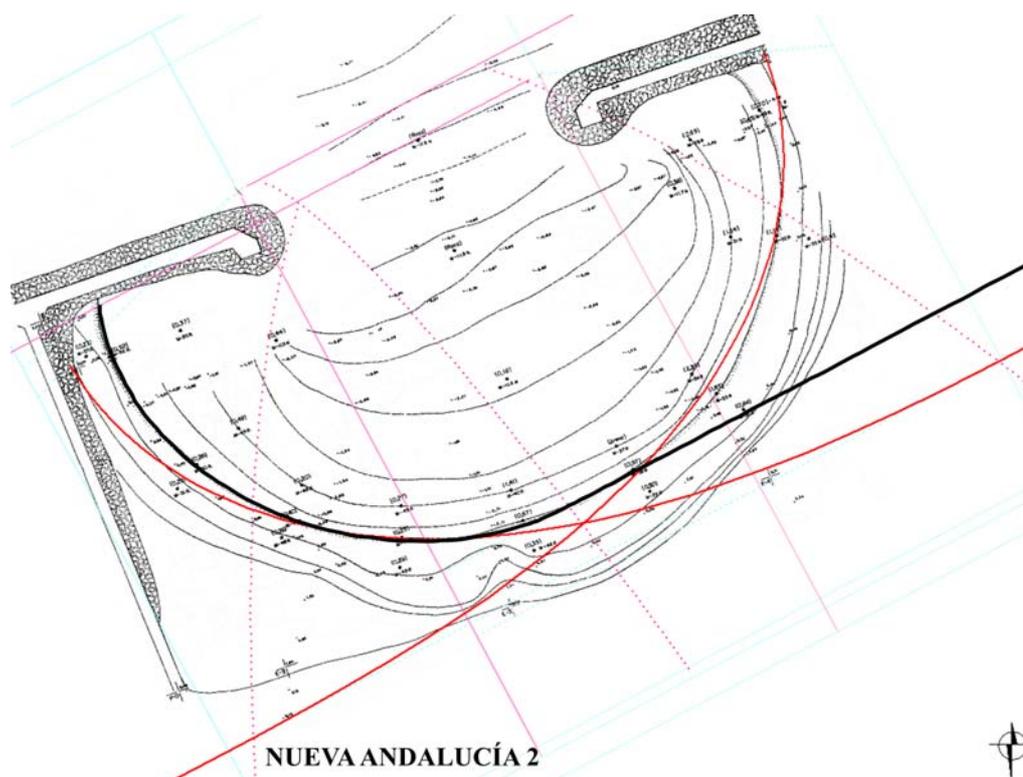


Figura VI.4- Aplicación de la metodología propuesta a la playa de Nueva Andalucía 2

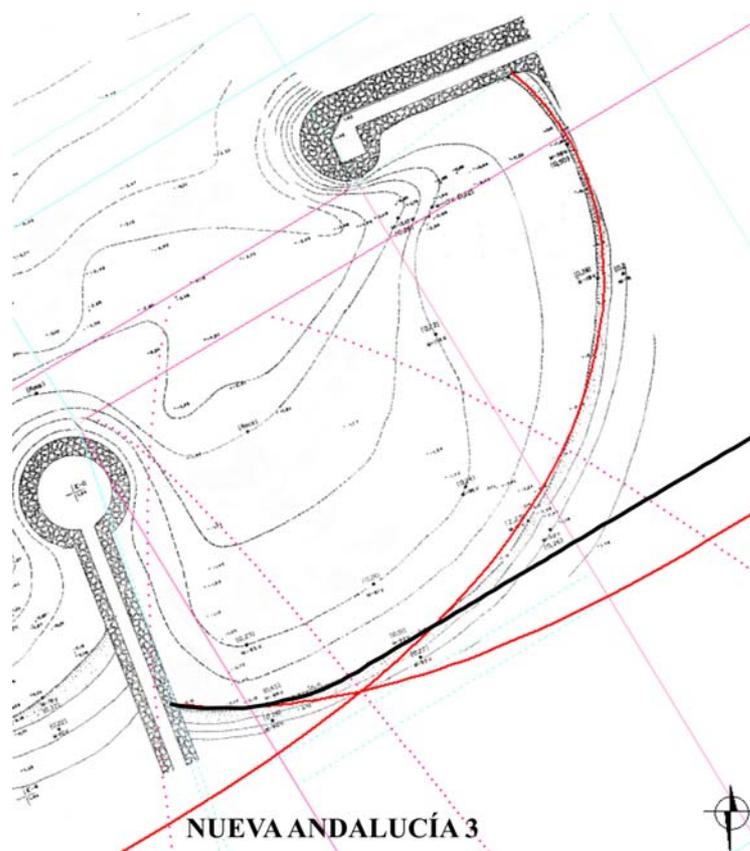


Figura VI.5- Aplicación de la metodología propuesta a la playa de Nueva Andalucía 3