

UNIVERSIDAD DE CADIZ

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

Departamento de Física Aplicada

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LA MORFOLOGÍA Y VARIABILIDAD
DE PLAYAS APOYADAS EN LAJAS ROCOSAS**

Presentada por: D. Juan José Muñoz Pérez

**Dirigida por: Prof. Dr. D. Luis Tejedor Martínez
Prof. Dr. D. Raúl Medina Santamaría**

CADIZ, SEPTIEMBRE 1996

INDICE

INDICE

Dedicatoria.

Agradecimientos.

Lista de figuras.

I INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Exposición de motivos.	1-1
Objetivos prácticos	1-2
Objetivos teóricos	1-3

II METODOLOGÍA

Análisis de escala.	2-1
Campañas de campo.	2-2
Análisis estadístico de los datos.	2-2

III PERFIL DE EQUILIBRIO

Definición del perfil de equilibrio.	3-1
Perfil de equilibrio sin laja o no apoyado.	3-2
- Estado del Arte.	3-2
- El Modelo de Dean.	3-4
Perfil de equilibrio apoyado sobre laja rocosa.	3-6
- Estado del Arte.	3-6
- Modelo teórico propuesto.	3-9
- Ajuste del modelo.	3-16
- Comprobación en la playa Victoria.	3-19
Resumen.	3-22

IV VARIABILIDAD A LARGO PLAZO DE LA PLANTA DE LA PLAYA.

Criterios teóricos.	4-1
Aplicación a la playa de La Victoria.	4-1
Resumen.	4-12

V VARIABILIDAD A LARGO PLAZO DEL PERFIL.

Criterios teóricos.	5-1
Aplicación a la playa de La Victoria.	5-2
Resumen.	5-6

VI VARIABILIDAD A MEDIO PLAZO.

Criterios teóricos.	6-1
Aplicación a la playa de La Victoria.	6-1
- Comparación entre perfiles.	6-1
- El transporte transversal.	6-3
- Tasas de erosión y acreción.	6-7
- Tendencias con buen tiempo.	6-13
Interpretación mediante reconstrucción de perfiles.	6-17
Resumen.	6-19

VII VARIABILIDAD A CORTO PLAZO: INFLUENCIA DEL CICLO DE MAREA.

Criterios teóricos.	7-1
- Estado del Arte.	7-1
- Modelo de perfil para mares con marea.	7-2
- Deducciones teóricas sobre el comportamiento del perfil.	7-4

Aplicación a la playa de La Victoria.	7-5
- Descripción de la campaña de toma de datos.	7-5
- Descripción morfológica de las diferencias entre perfiles.	7-5
- Comparación de perfiles reconstruidos.	7-7
- Estudios puntuales de variabilidad.	7-9
- Diferencias en el transporte transversal del sedimento.	7-10
Resumen.	7-11

VIII VARIABILIDAD A CORTO PLAZO: INFLUENCIA DE UN TEMPORAL.

Criterios teóricos.	8-1
- Justificación del estudio del efecto de un único temporal.	8-1
- Comportamiento distinto de los perfiles con y sin laja.	8-2
Aplicación a la playa de La Victoria.	8-3
- Descripción de la campaña de toma de datos	8-3
- Descripción morfológica de las diferencias entre perfiles.	8-4
- Características del oleaje incidente.	8-4
- Estudio de las variaciones respecto al perfil inicial.	8-5
- Diferencias en la erosión transversal.	8-9
- Comparación de perfiles originales.	8-14
Resumen.	8-16

IX CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO.

Conclusiones.	9-1
- Escala de tiempos observadas.	9-1
- Método de análisis estadístico utilizado.	9-1
- Perfil de equilibrio.	9-1
- Variabilidad a largo plazo de la planta de la playa.	9-2
- Variabilidad a largo plazo del perfil.	9-3
- Variabilidad a medio plazo.	9-4
- Variabilidad a corto plazo. Influencia del ciclo mareal quincenal.	9-5
- Variabilidad a corto plazo: Influencia de un temporal.	9-5
Futuras líneas de actuación.	9-6

X REFERENCIAS.

ANEJOS

A.1 CAMPAÑAS DE CAMPO

- Toma de datos en una batimetría.	I-2
- Posicionamiento horizontal.	I-2
- Posicionamiento vertical. Calibrado de la ecosonda.	I-3
- Medición de la marea.	I-3
- Cubicación del sedimento.	I-5
- Comparación mediante distinto software.	I-5
- Comparación cambiando la equidistancia entre perfiles.	I-8
- Analisis granulométricos.	I-8

- Fiabilidad de la granulometría.	I-10
- Conclusiones en cuanto a la fiabilidad de batimetrías y granulometrías.	I-15
A.2 LAS FUNCIONES ORTOGONALES EMPÍRICAS Y SU APLICACIÓN.	
- Fundamentos matemáticos.	II-1
- Propiedades.	II-10
A.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS	
- Programa Mediac	III-1
- Programa Reconst	III-4
- Programa Erosión.	III-8
- Programa Erotrans.	
A.4 CLIMA MARÍTIMO	
- Clima Marítimo.	IV-1
- Datos Instrumentales.	IV-8
- Propagación del oleaje.	IV-16
- Modelo REFDIF de propagación.	IV-16
- Explicación del programa Copla o modelo de rompientes.	IV-17

A mi padre, con quien me hubiera gustado
jugar esa última partida de ajedrez

AGRADECIMIENTOS

Quiero darle las gracias a los Dres. D. Luis Tejedor Martínez y D. Raúl Medina Santamaría no sólo por haber aceptado la dirección de esta tesis sino por el apoyo y amistad que siempre me han demostrado.

Deseo hacer extensivo este agradecimiento a todas aquellas personas que me han ofrecido su ayuda para la realización de esta investigación, y muy particularmente :

Al Dr. D. Francisco López Aguayo que me ofreció la oportunidad de impartir una serie de conferencias en la Facultad de Químicas que pueden considerarse como el principio de todo

A la Dirección General de Costas por no haber puesto impedimento alguno a la hora de trabajar con los datos recopilados en las campañas de seguimiento por mí dirigidas

A Dña. Ana Nistal, del Departamento de Clima Marítimo, por su paciencia y comprensión ante mi constante petición de datos de oleaje

A D. Javier Enríquez por su apoyo y acertados comentarios en los instantes precisos

A D. José Manuel Gutiérrez Mas que tanto me animó y orientó en todo momento con sus valiosas ideas

A D. José Miguel Álvarez, artífice del software, sin cuya maestría en el manejo de los procesadores de texto la presentación de la formulación matemática hubiera dejado mucho que desear

Y, en último lugar, a todos los compañeros del Departamento de Física Aplicada por su amistad y la ayuda prestada.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS.

Capítulo III.- Perfil de equilibrio.

- Fig. 3.1.- Esquema de la disipación de energía en aguas someras.
- Fig. 3.2.- Esquema de perfiles apoyados o no en laja.
- Fig. 3.3.- Ajuste de datos reales y representación teórica con las formulaciones de Dally et al. y de Andersen y Fredsoe.
- Fig. 3.4.- Ajuste de la fórmula empírica de Andersen y Fredsoe a los datos reales.
- Fig. 3.5.- Situación y emplazamiento de la playa Victoria.
- Fig. 3.6.- Situación de perfiles.
- Fig. 3.7.- Perspectiva del fondo de las playas de La Victoria y Santa María del Mar.
- Fig. 3.8.- Representación de los perfiles transversales tomados batimétricamente en el período 1991-1995.
- Fig. 3.9.- Componentes E.O.F. espaciales y temporales del perfil sin laja.
- Fig. 3.10.- Componentes E.O.F. espaciales y temporales del perfil con laja.
- Fig. 3.11.- Reconstrucción de los perfiles comparados de la playa Victoria.
- Fig. 3.12.- Ajuste del parámetro A de Dean para los perfiles de la playa Victoria con y sin laja.

Capítulo IV.- Variabilidad a largo plazo de la planta de la playa.

- Fig. 4.1.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel +4,00 (pleamar viva).
- Fig. 4.2.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel +2,00 (zona intermareal o media carrera de marea).

- Fig. 4.3.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel +0,00 (bajamar viva).
- Fig. 4.4.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel -2,00.
- Fig. 4.5.- Reconstrucción de la curva de nivel +4,00 (pleamar viva).
- Fig. 4.6.- Reconstrucción de la curva de nivel +2,00 (media carrera de marea).
- Fig. 4.7.- Reconstrucción de la curva de nivel +0,00 (bajamar viva).
- Fig. 4.8.- Reconstrucción de la curva de nivel -2,00.
- Fig. 4.9.- Giro experimentado por la línea de costa.

Capítulo V.- Variabilidad a largo plazo del perfil.

- Fig. 5.1.- Componentes transversal y temporal del perfil con laja. Variabilidad a largo plazo.
- Fig. 5.2.- Componentes transversal y temporal del perfil sin laja. Variabilidad a largo plazo.

Capítulo VI.- Variabilidad a medio plazo.

- Fig. 6.1.- Componentes transversal y temporal del perfil con laja.
- Fig. 6.2.- Componentes transversal y temporal del perfil sin laja.
- Fig. 6.3.- Componentes E.O.F. del transporte transversal en el perfil con laja.
- Fig. 6.4.- Componentes E.O.F. del transporte transversal en el perfil sin laja.
- Fig. 6.5.- Tasa de transporte de sedimento por día y acumulada.
- Fig. 6.6.- Parámetros medios del oleaje durante 1995. Ajustes polinómicos de 4° grado.

- Fig. 6.7.- Componentes E.O.F. del perfil apoyado en laja. Año 1995 excluido el invierno.
- Fig. 6.8.- Componentes E.O.F. del perfil libre o completo. Año 1995 excluido el invierno.
- Fig. 6.9.- Reconstrucción de los perfiles 15 de abril, 15 de junio y 15 de julio (P19 apoyado en laja).
- Fig. 6.10.- Reconstrucción de los perfiles 1 de junio, 1 de agosto y 1 de octubre (P45 libre o no apoyado).

Capítulo VII.- Variabilidad a corto plazo: Influencia del ciclo de marea.

- Fig. 7.1.- Representación de los perfiles tomados durante el ciclo de marea (con y sin laja).
- Fig. 7.2.- Componentes transversal y temporal E.O.F. de los perfiles con y sin laja en un ciclo de marea quincenal.
- Fig. 7.3.- Componentes E.O.F. transversal y temporal de los perfiles con y sin laja en un ciclo de marea quincenal una vez suprimida la media de los datos.
- Fig. 7.4.- Comparación entre las componentes transversales 1ª y 2ª de los perfiles con laja y sin laja.
- Fig. 7.5.- Comparación entre las componentes temporales 1ª y 2ª de los perfiles con laja y sin laja.
- Fig. 7.6 a y b Comparación entre los perfiles reconstruidos con 1 y 3 componentes Días 1º y 4º de la toma de datos.
- Fig. 7.6 c y d Comparación entre los perfiles reconstruidos con 1 y 3 componentes Días 7º y 11º de la toma de datos.
- Fig. 7.6 e Comparación entre los perfiles reconstruidos con 1 y 3 componentes Día 15º de la toma de datos.

Fig. 7.7.- Oscilaciones de cota observadas en los puntos de máxima variabilidad.

Fig. 7.8.- Componentes transversal y temporal del transporte en el perfil con laja.

Fig. 7.9.- Componentes transversal y temporal del transporte en el perfil sin laja.

Fig. 7.10.- Comparación del transporte transversal diario y acumulado en perfiles con y sin laja.

Tabla 7.1.- Ascensos y descensos en cm. experimentados por los perfiles con y sin laja a lo largo del ciclo mareal quincenal.

Capítulo VIII.- Variabilidad a corto plazo: Influencia de un temporal.

Fig. 8.1.- Representación de los perfiles topográficos de seguimiento de la erosión-acreción producida por el temporal de nov-95.

Fig. 8.2.- Componentes E.O.F. transversales y temporales de los perfiles con y sin laja en el seguimiento del temporal de noviembre 95.

Fig. 8.3.- Parámetros del oleaje durante el temporal de 11 de noviembre y días posteriores.

Fig. 8.4.- Componentes E.O.F. del perfil con laja, temporal nov-95 Datos referidos al perfil inicial (el del día 8).

Fig. 8.5.- Componentes E.O.F. del perfil sin laja, temporal nov-95 Datos referidos al perfil inicial (el del día 8).

Fig. 8.6.- Transporte transversal diario y acumulado durante el temporal del 11/11/95 y días posteriores. Comparación entre perfil con y sin laja.

Fig. 8.7.- Comparación entre los perfiles inicial, día del temporal y final.

ANEJO I.- CAMPAÑA DE SEGUIMIENTO BATIMETRICO Y SEDIMENTOLOGICO.

- Tabla A1.1.- Toma de datos de una batimetría, resumen valores errores.
- Tabla A1.2.- Alturas de mareas en Cádiz.
- Tabla A1.3.- Comparación cubicación con distintos softwares.
- Tabla A1.4.- Cubicación con distinto nº de perfiles.
- Tabla A1.5.- Distintos tamices.
- Gráfica A1.1.- Cubicación con distinto nº de perfiles.
- Gráfica A1.2.- Comparación D_{50} entre distintas empresas.
- Gráfica A1.3.- Distintos tamices.
- Gráfica A1.4.- Variaciones D_{50} (mm) con distintos tiempos.
- Gráfica A1.5.- Variaciones % finos con distintos tiempos.

ANEJO IV.- CLIMA MARITIMO.

- Fig. A4.1.- Hoja del Atlas de Clima Marítimo correspondiente a la vertiente atlántica del sur de la península.
- Fig. A4.2.- Perspectiva de la línea de 2 pértigas.
- Fig. A4.3.- Montaje de pértigas de cerca.
- Fig. A4.4.- Observaciones visuales de oleaje 1992. Cortadura.
- Fig. A4.5.- Dirección de incidencia del oleaje.
- Fig. A4.6.- Datos de altura de ola y períodos medios y máximos mensuales.

Fig. A4.7.- Altura de ola significativa media mensual (H_{zs}) y su máximos ($H_{zs,max}$)

Fig. A4.8.- Representación de la altura de la significativa (H_{zs}) y el período de cruce por cero ascendente (T_{zs}) a lo largo del ejercicio de 1995.

Fig. A4.9.- Representación de la altura de la significativa (H_{zs}) y el período de cruce por cero ascendente (T_{zs}) durante el mes de julio de 1995.

Fig. A4.10.- Correlación entre H_{media} y $H_{1/3}$

CAPITULO I

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

I INTRODUCCIÓN

I.1 EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

Uno de los sectores económicos de mayor importancia de nuestro país es el turismo, cimentado principalmente en la explotación del aspecto lúdico y de ocio de la franja costera y muy especialmente de las playas.

Las playas son extensiones de arena o grava de muy poca pendiente que ubicadas a la orilla del mar se ven sometidas a la acción de agentes externos como el viento, las mareas y el oleaje. Estas acciones inducen el movimiento de los granos de arena que la componen de manera que su configuración varía permanentemente. La rapidez con que se producen estos cambios dependerá de la intensidad de las fuerzas que la Naturaleza despliegue ante este tramo de costa. El conocer e incluso predecir la evolución de las playas resulta de gran importancia por su influencia y repercusión en las infraestructuras de todo tipo que se han construido adyacentes a las mismas. Además, existe una tendencia registrada de erosión y retroceso de la línea de costa a lo largo de todo nuestro litoral.

Para abordar el estudio de los cambios morfológicos experimentados por las playas se ha adoptado siempre una hipótesis simplificativa: la de considerar los fenómenos en planta y en perfil de manera independiente, lo que es asumible para tramos de costa lo suficientemente largos y homogéneos. En estos casos, las variaciones de los perfiles, o secciones transversales, se producen comparativamente con una mayor rapidez.

La Dirección General de Costas, hasta ahora integrada en el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente y en este momento dependiente del Ministerio de Medio Ambiente, planteó un Programa de Actuaciones en la Costa, uno de cuyos pilares fundamentales consistió en la realimentación o regeneración de playas mediante el vertido de arena procedente de yacimientos marinos. Para la redacción de los proyectos era imprescindible una estimación, lo más exacta posible, del volumen de arena preciso. Éste se obtiene por diferencia entre los perfiles existentes y los que supuestamente adoptará el nuevo material. A lo largo del tiempo, numerosos investigadores han elaborado sucesivos modelos de perfil. Los más utilizados en nuestro país, en estos momentos, son los de Vellinga y Dean.

Sin embargo, existen muchas playas con una morfología especial: las que tienen su pie apoyado en una laja rocosa; es decir, sobre un bajo de piedra constituido por un estrato de escaso buzamiento y que configura una meseta llana sumergida. Sin contar con el resto del estado, en la provincia de Cádiz disponemos de numerosas playas apoyadas sobre estratos horizontales. Se trata de areniscas y conglomerados calcáreos propios del Plioceno cuya cota superior, dependiendo de cada playa, oscila generalmente alrededor del nivel de la bajamar viva. Entre otras podríamos nombrar las de Regla en Chipiona, Fuentebravía en el Puerto de Sta. María, y la Victoria en la ciudad de Cádiz.

Como ya veremos, esa plataforma horizontal supone una limitación a la altura de ola que llega hasta la orilla. Esa disminución del nivel de energía permite un perfil con una inclinación superior y, por tanto, una disminución del volumen de sedimento preciso para conseguir una determinada superficie de playa seca.

I.2 OBJETIVOS PRÁCTICOS

Se conocen datos sobre la atenuación del oleaje sobre arrecifes, pero nada se ha estudiado hasta el momento sobre la forma de los perfiles de playas apoyadas sobre estratos rocosos. El cubrir el déficit de conocimientos existente en este área es el objetivo principal de esta tesis desde el punto de vista científico. El ahorro que sobre la inversión en regeneraciones puede suponer el desarrollo de un criterio de diseño de este tipo de perfiles, así como del conocimiento de su comportamiento y tendencias, sería un objetivo derivado del anterior y sumamente justificado en el campo económico y social.

Asimismo, averiguar cuáles son las tasas de erosión y acreción de los perfiles apoyados sobre laja, tanto en valor absoluto como relativo con respecto a los perfiles completos, es uno de los objetivos prioritarios por la gran influencia que puede llegar a tener sobre decisiones de realimentación en un momento determinado. Si, por ejemplo, conociéramos con que velocidad se recupera o se erosiona el perfil emergido de una playa sabríamos si es necesaria o no una realimentación antes de la temporada estival para garantizar un mínimo de superficie de playa seca. O cuál debería ser el ancho mínimo de la berma para asegurar que un temporal probabilísticamente determinado no deje al descubierto la cimentación de un edificio, de un paseo marítimo o de cualquier otro tipo de estructura de elevado coste y ubicada en la zona adyacente a la orilla.

I.3 OBJETIVOS TEÓRICOS

Para abordar el caso práctico de diseño del que hablábamos en el apartado anterior necesitamos de un conocimiento preciso de este tipo de perfiles. Debemos resolver diversos aspectos teóricos de su morfología y de su variabilidad.

Desarrollaremos un modelo teórico que describa la hidrodinámica y la morfología de las playas apoyadas en laja, basándonos en la utilización del perfil transversal como herramienta de diseño y comprobación.

CAPITULO II
METODOLOGIA

II METODOLOGÍA

2.1.- ANÁLISIS DE ESCALA.

Para poder atacar la problemática del diseño del perfil de playa con laja, deberemos analizar los cambios experimentados por el mismo en el transcurso del tiempo y frente a distintos tipos de acciones.

¿Cuál será el nivel de detalle al que debemos atender para conseguir nuestro fin propuesto? Procederemos a un análisis de escala con la intención de centrar nuestros objetivos eligiendo la más adecuada en cada momento y eliminando aquellos factores que no sean de relevancia para el estudio planteado.

En primer lugar consideraremos un perfil cuasi-estacionario, es decir, sin variación apreciable a lo largo del tiempo. Una especie de perfil medio al que podríamos referenciar los cambios acaecidos en las otras escalas temporales y al que la morfología de playas ha dado en llamar perfil de equilibrio.

En segundo lugar tendremos en cuenta las variaciones estacionales a largo plazo, entendiendo como tales los cambios de inclinación que sufre el perfil frente a los cambios de oleaje denominados de invierno-verano, sea-swell o temporal-bonanza. Esto nos permitirá además, una vez eliminadas esas variaciones estacionales, averiguar las tendencias de la playa con el transcurrir de los años.

La escala de tiempo de medio plazo consiste en el estudio de la evolución del perfil de modo progresivo a lo largo de todo un año. Servirá para encontrar las tasas de erosión y recuperación medias a lo largo de un ejercicio completo.

También tendremos en cuenta los cambios experimentados por el perfil a corto plazo, entendiendo como tal el día a día. Veremos qué influencia tiene un ciclo mareal completo y cuáles son las tasas de erosión y acreción diarias tras un temporal. El poder identificar estas alteraciones puntuales y el conocer su orden de magnitud nos permitirán de una parte acotar variaciones máximas y por otro lado eliminarlas de los datos en un momento determinado. De ese modo si lo que deseamos es trabajar con escalas de tiempo superiores, evitaremos que nos enmascaren otras tendencias.

Nuestros análisis se realizarán comparando datos teóricos y de campo entre un perfil completo y otro apoyado en laja rocosa.

2.2.- CAMPAÑAS DE CAMPO.

Se presentarán de una manera muy general los modelos existentes para perfiles completos y se hará un hincapié especial en el de Dean. A continuación se planteará un modelo teórico de comportamiento del perfil con laja.

Para la obtención de los datos de campo se han efectuado campañas cuyas series temporales cubren todo el abanico de largo, medio y corto plazo. Las características de las mismas son distintas en función de la escala temporal que intentan abarcar. Tendremos por una parte campañas batimétricas con una periodicidad semestral durante cinco años para el estudio a largo plazo, y tomas de datos topográficos en dos perfiles tipo, uno completo y otro apoyado en laja, con periodicidades quincenal y diaria para las escalas de medio y corto plazo respectivamente. En cada uno de los capítulos siguientes se comentará de una manera sucinta de que manera se ha abordado la toma de datos en cada caso particular.

Asimismo, se realizaron una serie de pruebas para calibrar el error cometido en cada uno de los pasos efectuados tanto en la toma de datos topobatemétricos como en la de muestras de sedimento. La conclusión principal (*Muñoz, J.J.; mayo 1995*), en contra de lo planteado por *Larson y Kraus (1994)*, fue la de que en playas como la de la Victoria, donde métodos como el trineo o el CRAB (*Birkemeier y Mason 1984*) no son utilizables por la existencia de fondos rocosos abruptos, una batimetría de precisión bien controlada proporciona resultados suficientemente fiables como para poder tomar decisiones de seguimiento, calibración de modelos, etc. Para una descripción completa de la campaña así como de las medidas tomadas para acotar y calibrar los errores inherentes a la metodología puede acudir al Anejo nº 1 .

2.3.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.

El análisis de los datos se efectuará mediante las Funciones Ortogonales Empíricas (F.O.E.) . Esta técnica fue utilizada por primera vez en el estudio de la geomorfología de playas y especialmente en la caracterización de perfiles por *Winant, Inman y Nordstrom (1975)* y *Aubrey (1978)* . *Dick y Dalrymple (1984)* utilizaron el método para analizar la variabilidad longitudinal de los perfiles. *Losada, Medina y Roldán (1990)* aplicaron el procedimiento a la variación de curvas de nivel predeterminadas tales como la pleamar o la bajamar

vivas, y *Losada, Medina y Dalrymple (1991)* al de transporte de arena en sentido transversal. *Pruszek (1993)* comenta las diferencias entre perfiles pero tomando como referencia no el perfil medio, sino el de Dean. Últimamente se han aplicado las F.O.E. al transporte de arena pero en el sentido longitudinal o paralelo a la orilla (*Muñoz, J.J.; diciembre 1995*).

En el Anejo n° 2 se presenta una introducción al desarrollo del aparato matemático de las F.O.E. Para contemplar un ejemplo de resolución del caso clásico de Funciones Ortogonales puede acudir a *Noble (1969)*. Baste aquí recordar que estas autofunciones (eigenfunctions en la literatura anglosajona) se encuentran a partir de la aplicación de la siguiente condición: que su contribución a la explicación de la varianza de los datos (definida como su valor cuadrático medio) sea máxima. Es decir, que la primera autofunción conserve la mayor parte de la varianza de los datos, la segunda autofunción el mayor valor de la varianza restante y así sucesivamente. De este modo es posible representar un elevado porcentaje de la variabilidad de los registros con un número muy reducido de funciones.

Para desarrollar el método partiremos de que tenemos una serie de datos $h_{ij} = h(x_i, t_j)$, donde, para fijar ideas y aclarar el proceso, h_{ij} es la cota del punto x_i durante la campaña batimétrica j . El factor x_i es la distancia a la cabecera desde el punto i dentro de un perfil transversal, con i variando entre 1 y n_x , y siendo n_x el n° de puntos de ese perfil. El parámetro t_j indica que se trata de los datos tomados en la campaña j , donde dicho índice varía entre 1 y n_t , con n_t igual al n° de batimetrías efectuadas.

Vamos a intentar esquematizar estos datos en el croquis adjunto.

Establecemos la hipótesis de que existen dos series de funciones $X_l(x)$, $l = 1 \dots N$ y $T_m(t)$, $m = 1 \dots N$ que cumplen

$$\sum_{i=1}^{n_x} X_u(x_i) \cdot X_v(x_i) = 0 \quad \text{para } u \neq v, \quad u, v = 1 \dots N$$

$$\sum_{j=1}^{n_t} T_u(t_j) \cdot T_v(t_j) = 0 \quad \text{para } u \neq v, \quad u, v = 1 \dots N$$

es decir, son ortogonales o, lo que es lo mismo, independientes entre sí.

Para N suficientemente grande, se puede demostrar:

$$h_{ij} = h(x_i, t_j) = \sum_{l=1}^N X_l(x_i) T_l(t_j)$$

Como puede apreciarse, se trata de un desarrollo parecido al de Fourier, pero sin obligar, a priori, a que dichas funciones sean senos y cosenos. Será el propio método el que nos indique la forma de obtener las mismas a partir de la variabilidad de los datos disponibles.

Si existe una estructura o tendencia en los registros recopilados (si no son completamente aleatorios), con pocas autofunciones tendremos una explicación mayoritaria de la variabilidad de los datos. Y por consiguiente, en la práctica nos bastará con un número N de autofunciones muy inferior al N teórico.

Ningún otro conjunto de funciones ortogonales puede describir los datos de un modo más eficiente, en el sentido de que son capaces de explicar para el mismo número de funciones mayor variabilidad o varianza de datos que cualquier otro método. Además, dado que los conjuntos de autofunciones temporales y espaciales son ortogonales entre sí, cada asociación $\{ X_l(x), T_l(t) \}$ ($l=1 \dots N$) representa un modo de variabilidad independiente de cualquiera de los otros $N-1$ restantes.

Estas autofunciones se pueden interpretar en la práctica en un sentido físico, aunque no exista ninguna razón a priori salvo que los datos varían de distinta manera en función de ciertas acciones físicas. Así, por ejemplo, en el caso de los perfiles de playa, la arena se mueve en respuesta al oleaje de una manera estadísticamente predecible. Se podría esperar, por tanto, que dado que la mayor parte de la variabilidad procede del oleaje, las autofunciones quizás debieran reflejar esta fuerza actuante.

CAPITULO III
PERFIL DE EQUILIBRIO

III PERFIL DE EQUILIBRIO

3.1 DEFINICIÓN DEL PERFIL DE EQUILIBRIO

Recordemos, en primer lugar y como ya indicamos en el capítulo anterior, que para poder estudiar el comportamiento de los perfiles transversales de playa, sin tener en cuenta lo que sucede a ambos lados del mismo, debemos adoptar la hipótesis de que los transportes de arena en los sentidos longitudinal y transversal son independientes. Dijimos también que ésto era razonablemente cierto para playas lo suficientemente largas y homogéneas.

Larson (1991) define el perfil de equilibrio refiriéndose a como "Una playa con un tamaño de grano concreto, expuesta a unas condiciones de oleaje constante, desarrollará un perfil que no evoluciona en el tiempo". Lamentablemente y como dicen *Kriebel et al (1991)* : "Un perfil de playa en completo equilibrio no existe nunca en la naturaleza porque los niveles del agua, el oleaje y las corrientes están en un cambio continuo". Sin embargo, coincidimos con *González, M. (1995)* en que puesto que las variaciones de esos parámetros están acotadas para unas determinadas condiciones de contorno propias de cada playa, también lo estará la variabilidad del perfil. Se podría admitir entonces la existencia de una situación modal o perfil de equilibrio que sufre una serie de cambios en función del clima marítimo de la zona. Incluso podremos considerar períodos de tiempo (verano, invierno, ...) para los que los parámetros oceanográficos permanecen casi constantes.

Todos los autores coinciden en que un conocimiento cuantitativo de las características de los perfiles de playa en equilibrio es esencial para el diseño racional de muchos proyectos de ingeniería de costas y para la comprensión de numerosos procesos costeros. *Dean (1991)* plantea que la mayor parte de dichas características son ya bien conocidas :

- 1.- Los perfiles de playa tienden a mostrar una concavidad hacia arriba.
- 2.- Tamaños de arena grande y pequeño están asociados respectivamente a pendientes más pronunciadas o más suaves.
- 3.- El frente de playa es aproximadamente lineal.
- 4.- Cuánto más peraltada sea la ola más suave será la pendiente resultante y tanto mayor la tendencia a la formación de barras.

Antes de abordar nuestro objetivo principal, el problema particular del perfil de equilibrio apoyado en laja rocosa, vamos a presentar una visión del estado del conocimiento actual sobre perfiles de equilibrio completos o no apoyados.

3.2 PERFIL DE EQUILIBRIO SIN LAJA O NO APOYADO.

3.2.1 Estado del arte.

El concepto de perfil de equilibrio ha sido considerado por numerosos investigadores. Nombraremos aquí a aquellos más conocidos, pudiéndose acudir a *Grassa (1987)* , *Negro (1989)* , *Otero (1990)* o *González(1995)* para una recopilación más exhaustiva.

Uno de los primeros en analizar un número suficiente de perfiles reales tomados en la naturaleza y postular un modelo de perfil de equilibrio fue *Bruun (1954)* . Sus hipótesis de partida fueron las siguientes:

- 1.- El oleaje produce una tensión cortante en el fondo que es la que induce la forma del perfil.
- 2.- Una vez alcanzado el equilibrio, la variación de esa tensión por unidad de superficie es nula.
- 3.- La disipación del flujo de energía es constante a lo largo del perfil. La pérdida de energía es debida a la fricción interna del fluido, a la fricción con el fondo y a la rotura del oleaje.

Tras analizar perfiles de la costa danesa del Mar del Norte y de California, encontró que la media de los mismos podía ser ajustada mediante la parábola

$$h = A x^{2/3}$$

donde h es la profundidad de un punto sumergido determinado y x la distancia a la orilla de dicho punto.

Dean (1977) ajustó, por mínimos cuadrados, 504 perfiles de la costa atlántica y del Golfo de los Estados Unidos tomados por *Hayden et al (1975)* . Usó la relación

$$h = A x^n$$

donde A y n son parámetros libres cuyos intervalos de variabilidad eran

$$\begin{aligned} 0.1 &< n < 1.4 \\ 0.0025 &< A < 6.31 \end{aligned}$$

Posteriormente, dejó el parámetro n fijo e igual al valor propuesto por Bruun de $2/3$. La dispersión de los valores de A se redujo considerablemente

$$0.0 < A < 0.3$$

Vellinga (1983) efectuó unos ensayos en un supertanque, el canal Delta, de 233 m. de longitud, 7 m. de profundidad y 5 m. de anchura. Su objetivo era el estudio del perfil de playa resultante tras la erosión producida por un temporal. Fijando el exponente $n = 0.5$ y definiendo H_s como la altura de ola significativa y w como la velocidad de sedimentación del grano de arena, obtuvo

$$\left(\frac{7.6}{H_s}\right) h = 0.47 \left(\left(\frac{7.6}{H_s}\right)^{1.28} \left(\frac{W}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18 \right)^{0.5} - 2.0$$

Más tarde, *Vellinga (1984)*, ajustó el parámetro n obteniendo un valor de 0.78 para una curva potencial del tipo

$$h = A x^n$$

Pilkey et al (1993), en una revisión crítica del concepto del perfil de equilibrio, opinan que la elección del valor de los parámetros A y n debe ser en función de los fenómenos físicos actuantes y de la base de datos recopilada en cada caso.

González (1995) ha introducido parámetros adicionales que incluyen la reflexión y la carrera de marea.

3.2.2 El modelo de Dean.

De entre todos los modelos elaborados, quizás sea el de *Dean (1977)* el más utilizado. Vamos, pues, a desarrollarlo con un mayor detenimiento, empezando por presentar las hipótesis simplificativas que en él subyacen.

- 1.- Si la playa está en equilibrio, el transporte longitudinal neto es constante para cada sección que consideremos e independiente del transporte transversal. De este modo, puede estudiarse el perfil de equilibrio como un fenómeno bidimensional, donde no existe transferencia lateral de energía.
- 2.- La disipación del flujo de energía por unidad de volumen permanece constante.

$$H = \gamma h$$

- 3.- Se considera una ley de evolución de la altura de ola en rompientes lineal con la profundidad y con valores de γ entre 0.7 y 1.0
- 4.- No hay en principio variaciones del nivel del mar. Más tarde, el propio *Dean (1991)* presentó una publicación donde tuvo en cuenta las alteraciones que suponía este fenómeno y otros más como la existencia de un muro reflejante, set-up,...

Consideremos un diferencial de perfil transversal y los flujos de energía $(E C_g)_1$ y $(E C_g)_2$ que atraviesan las caras anterior y posterior del mismo (ver fig 3.1) . Observaremos que debido a la fricción con el fondo, la rotura del oleaje, etc., existe una diferencia entre ambos. Designaremos como disipación ϵ a la variación del flujo de energía con respecto a la distancia transversal x

$$\epsilon = \frac{\delta(E c_g)}{\delta x}$$

Ahora, recordando la hipótesis de que la disipación por unidad de volumen resulta constante y aplicando la teoría de ondas lineal para aguas someras

$$D_* = \frac{\epsilon}{h} = \frac{1}{h} \frac{\delta(E c_g)}{\delta x} = cte.$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

$$c_g = c = \sqrt{gh}$$

$$H = \gamma h$$

Poco después, *Dean (1987)* encontró que el parámetro A era directamente proporcional a la velocidad de caída o de sedimentación del grano de arena

$$A = k w^{0.44}$$

donde supondremos $k = 0.51$ y que w , expresado en m/s, puede obtenerse de la conocida fórmula para arenas de grano silíceo ($\rho = 2.65 \text{ t/m}^3$)

$$w = 273 (D_{50})^{1.1}$$

u otra similar, acudiendo por ejemplo, al *Shore Protection Manual (1984)*

3.3 PERFIL DE EQUILIBRIO APOYADO SOBRE LAJA ROCOSA

Vamos, en primer lugar, a ofrecer una relación lo más exhaustiva posible sobre los estudios efectuados por diversos investigadores del fenómeno de atenuación del oleaje al propagarse sobre un fondo horizontal. Nos percataremos entonces de que nada hay en la bibliografía existente sobre la morfología comparada de perfiles apoyados en laja y mucho menos sobre la modelización de su forma.

3.3.1 Estado del arte.

Las playas apoyadas de nuestra provincia lo hacen sobre un estrato rocoso de edad pliocena constituido por materiales depositados en medios marinos litorales, con episodios continentales lacustres, predominando los limos arcillosos, arenas y areniscas con pectínidos, conglomerados (roca ostionera) así como arenas, gravas y calizas (*Gutiérrez et al, 1991*). El litoral atlántico tiene una orientación general NO-SE con intervalos E-O y ENE-OSO. Esta morfología es consecuencia de la existencia de fracturas que siguen las direcciones mencionadas y que sin duda están relacionadas con la tectónica general del Estrecho de Gibraltar y de la parte más occidental de la Cordillera Bética. Esta tectónica reciente que afectó al Plioceno, basculándolo, elevándolo en unas zonas y hundiéndolo en otras (*Gutiérrez et al, 1982*) es la causante de que en una misma unidad fisiográfica como la de la playa Victoria exista una zona septentrional con perfil apoyado sobre laja rocosa mientras que la mitad meridional tiene un perfil completo.

Podríamos considerar distintos tipos de playas apoyadas. Las de nuestro país se sustentan sobre estratos rocosos horizontales de distinta composición mineralógica según la unidad fisiográfica en la que se encuentren, como las del norte de la provincia de Cádiz que se apoyan, como ya hemos comentado en

areniscas calcáreas del Plioceno. Existen otro tipo de plataformas casi horizontales que, aunque con una morfogenética completamente diferente, tienen una influencia similar en el comportamiento de los perfiles arenosos. Se trata de los arrecifes coralinos, muy comunes en los océanos Pacífico e Índico. Estos arrecifes quedan expuestos en las bajamares vivas mientras que en pleamar están recubiertos por una lámina de agua de pocos metros de altura. A menudo rodean lagunas y atolones proporcionando protección del oleaje incidente mediante la disipación de energía en la zona de rompientes ubicada sobre la plataforma coralina.

La importancia de este tipo de estructuras puede apreciarse merced a un ejemplo espectacular: el Arrecife de la Gran Barrera de Australia se extiende en una longitud de 1600 km., cubriendo un área de 230.000 km². Se estima que el número total de arrecifes varía entre 2500 y 3000 con una superficie media de 6.9 km² y un área total de 20.255 km² (*Hopley et al., 1989*).

La utilización de estos arrecifes como lugar de colocación de instrumentación oceanográfica, estaciones meteorológicas e incluso de hoteles flotantes para atender a la creciente demanda de un turismo de élite interesado en la observación de los fondos submarinos y de su rica fauna y flora subacuática (*Hardy et al., 1990*), justifica los numerosos estudios que sobre la modificación de características del oleaje se han elaborado por parte de investigadores australianos, japoneses y norteamericanos principalmente.

Uno de los fenómenos más fáciles de observar es la atenuación de la altura de ola al propagarse por encima del arrecife. Ya *Horikawa y Kuo (1966)* presentaron una colección de ensayos de laboratorio, corroborando una formulación teórica, en la que se apreciaba una altura de ola residual en rompientes ($H_b = 0.4 h_b$) inferior a la que deduciríamos con el criterio de rotura de la onda solitaria. *Nelson (1985)* apunta que los valores máximos del coeficiente $\gamma = H_b/h_b$ no superan el 0.55 en datos de laboratorio para ondas regulares. Ese valor fue comprobado por el análisis de una serie de datos tomados en el John Brewer Reef (Queensland, Australia) por *Hardy et al (1990)*.

El mismo *Nelson (1994)* aprovecha estos datos de campo, los analiza junto con otros de laboratorio y presenta una fórmula que proporciona el valor máximo de γ no sólo para fondo plano, sino ligeramente inclinado

$$\gamma_{\text{máx}} = [H/h]_{b,\text{máx}} = 0.55 + \exp(-0.012 \cotg \beta)$$

Siendo β la inclinación del fondo respecto a la horizontal.

Gourlay (1994) introduce un parámetro no lineal (F_{co}), basado en uno presentado por *Swart y Loubser (1979)*, y unos valores límite del mismo que permiten conocer el tipo de rotura, ya sea en voluta o en descrestamiento (surging o spilling en la terminología anglosajona), que alcanzará el frente costero.

Los mismos datos de *Hardy et al (1990)* sirven para establecer una correlación entre la altura de ola media cuadrática en aguas profundas ($H_{rms,o}$) y el set-up y las corrientes transversales sobre la laja del arrecife.

Los investigadores japoneses también han abordado la cuestión de la transformación del oleaje sobre los arrecifes (*Kono y Tsukayama, 1980*) y sobre todo de las sobreelevaciones de baja frecuencia o surf-beat originadas por resonancia de ondas largas de grupo. Y esto desde un punto de vista más bien descriptivo (*Nakaza et al., 1990*), o bien de un modo mucho más teórico mediante modelización numérica de las ecuaciones de conservación de la masa y del momento no linealizadas (*Karunarathna y Tanimoto, 1995*). Por otra parte, *Yu e Isobe (1995)* también han considerado las variaciones experimentadas por ondas que atraviesan una franja de calado reducido y constante, pero que llegan después a una zona de mayor profundidad (como sería el lagoon de un arrecife de coral) y no al estrán de una playa como sería nuestro caso.

En el Caribe, con arenas casi completamente bioclásticas, también están familiarizados con los efectos sobre la propagación del oleaje que tiene lugar en los arrecifes, bastante estrechos en comparación con la superficie de gran calado o lagoon que se encuentra entre los corales y la tierra firme (*Roberts, 1980*). Anteriormente *Lee y Black (1979)* discutieron sobre los espectros de energía de las ondas rompientes, mientras que *Gerritsen (1981)* se preocupa más por la atenuación del oleaje y el set-up, proporcionando unas gráficas para el máximo de la sobreelevación en función de los parámetros adimensionales H/gT^2 y h/H ; gráficas que posiblemente tengan una aplicación limitada a otros lugares con un clima marítimo distinto al de Hawaii, dominado por una mar de fondo o swell de largo período.

Otras zonas del Pacífico dependientes de los Estados Unidos como la isla de Guam han sido analizadas mediante ensayos a escala en laboratorio. *Seelig (1983)* presentó los resultados agrupados en espectro, run-up y coeficientes de reflexión, pero, como siempre en todos estos casos, contemplando una laguna más o menos profunda entre el arrecife y la orilla.

3.3.2 Modelo teórico propuesto.

Como hemos podido apreciar, los temas que han sido estudiados hasta el momento sólo tienen en cuenta arrecifes separados de la costa por una laguna o zona de calado superior, no lajas rocosas continuas que llegan hasta la orilla. Y, que sepamos, no existe nada en la bibliografía acerca de la forma que adoptan los perfiles de las playas que se apoyan en dichas lajas. Consideramos pues una aportación novedosa y sumamente útil el conseguir un modelo que permita de una manera sencilla el diseño práctico de playas apoyadas.

La circunstancia que caracteriza a un perfil apoyado sobre un estrato rocoso es, precisamente, la existencia de dicha laja. Al extenderse hacia el mar una determinada longitud X (ver fig. 3.2) proporciona una rasa horizontal y un calado constante para cada nivel del mar que consideremos en función de la carrera de marea. En primera aproximación, supondremos que el tiempo que actúa la onda de marea durante la creciente y la vaciante es despreciable frente a la duración de las estoas. Para los casos particulares en que la cota de la laja coincida sensiblemente con la bajamar el oleaje incidente será nulo en esos momentos, por lo que la forma de nuestro perfil vendría definida por el nivel del mar durante las pleamares.

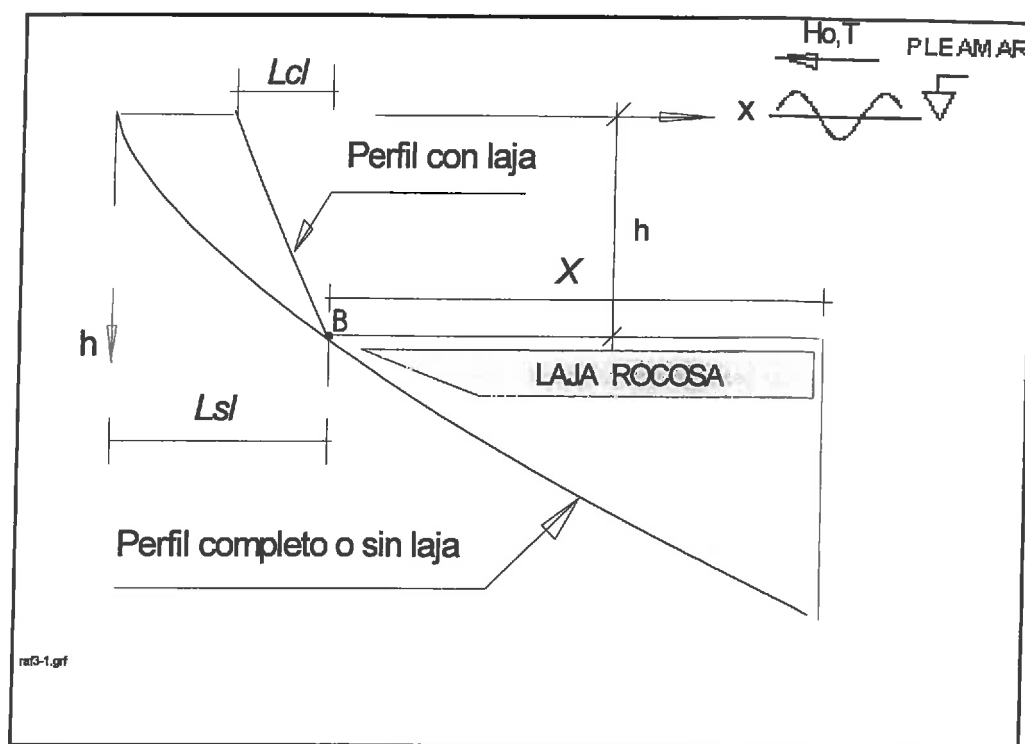


Fig. 3.2.- Esquema de perfiles apoyados o no en laja.

L_{cl} y L_{sl} son las distancias en horizontal desde el punto de encuentro de ambos perfiles al origen de coordenadas. La profundidad se designa con la letra h y la distancia en horizontal con x .

Al llegar el oleaje al comienzo de la laja, el tren de ondas se encuentra con un talud pronunciado y una variación brusca de la profundidad y rompe según el criterio de onda solitaria (McCowan, 1891) para alturas de ola

$$H = 0.78 h_1$$

donde h_1 es el calado sobre la laja en pleamar. A partir de ese momento la ola no desaparece, sólo ha perdido parte de su energía y emplea la restante en recomponer una nueva onda de inferior altura. Diversos autores han atacado el problema. *Juárez Bonis (1968) recoge que para fondos horizontales suficientemente extensos puede admitirse $H = 0.5 h_1$ etc.*

Dally et al (1985) suponen que la tasa de disipación del flujo de energía es proporcional a la diferencia entre el flujo de energía existente en cada punto y el flujo de energía estable final, es decir

$$\frac{\delta(EC_g)}{\delta x} = -\frac{K}{h'} [EC_g - EC_{g_s}]$$

donde C_g es la celeridad de grupo, K una constante y h' es la profundidad en cada punto. Utilizando la teoría lineal de ondas para profundidades someras o reducidas y para el caso en que $h' = cte. = h_1$, la ecuación diferencial anterior tiene solución analítica

$$\frac{H}{h} = \left\{ \left[\left[\frac{H}{h} \right]_b^2 - \Gamma^2 \right] \exp \left[-K \frac{x}{h} \right] + \Gamma^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Los mismos autores proporcionan unos valores, procedentes del ajuste de los datos de Horikawa y Kuo (1966)

$$\Gamma = 0.35$$

$$K = 0.20$$

Sustituyendo con $(H/h')_b = 0.78$

$$\frac{H}{h'} = \left\{ 0.517 \exp \left[-0.2 \frac{x}{h'} \right] + 0.123 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

que para $x = 0$ (sin laja) $H/h' = 0.78$
 y para $x = \infty$ (laja suficientemente larga) $H/h' = 0.35$

Para poder abordar el transporte de sedimentos en la zona de rompientes se necesita conocer la altura de la ola a lo largo de la misma. A tal fin, *Fredsoe y Deigaard (1992)*, utilizan una formulación desarrollada empíricamente por *Andersen y Fredsoe (1983)*

$$\frac{H}{h} = 0.5 + 0.3 \exp \left[-0.11 \frac{x}{h_l} \right]$$

Desarrollaremos nuestro modelo asumiendo que el perfil apoyado en laja cumple la hipótesis de Dean, ya mencionada, de que la disipación por unidad de volumen permanece constante.

$$\frac{1}{h} \frac{\delta[EC_g]}{\delta x} = D_*$$

Al tratarse de una ecuación diferencial de variables separadas podemos integrarla fácilmente

$$\int \delta EC_g = \int D_* h \delta x$$

Y si además el perfil apoyado tuviera una forma parabólica como la postulada por Dean, es decir, si $h = A \cdot x^{2/3}$

$$EC_g = \int D_* h \delta x = \int D_* Ax^{2/3} \delta x = \frac{3}{5} D_* Ax^{5/3} = K x^{5/3}$$

donde K es función únicamente del tamaño de grano

Fijémonos en el punto B de la fig. 3.2, punto donde el talud en laja se apoya en el estrato rocoso y donde, por nuestra conveniencia, lo hacemos coincidir con el perfil completo. Usaremos el subíndice "CL" para referirnos a los parámetros relativos al perfil con laja y, del mismo modo, "SL" para los del perfil sin laja. Veamos cual sería la relación entre los flujos de energía de ambos perfiles en ese punto si utilizamos la teoría lineal de ondas en profundidades reducidas.

$$\frac{F_{CL}}{F_{SL}} = \frac{(EC_g)_{CL}}{(EC_g)_{SL}} = \frac{\frac{1}{8} \rho g H_{CL}^2 \sqrt{gh}}{\frac{1}{8} \rho g H_{SL}^2 \sqrt{gh}} = \frac{3/5 (D_* A)_{CL} L_{CL}^{5/3}}{3/5 (D_* A)_{SL} L_{SL}^{5/3}}$$

Como habíamos visto $3/5 D_* A$ era una "constante" K que dependía únicamente del tamaño del grano.

$$K_{CL} = K_{SL}$$

y por tanto,

$$\left(\frac{H_{CL}}{H_{SL}} \right)^2 = \left(\frac{L_{CL}}{L_{SL}} \right)^{5/3}$$

Como en el punto B $h_{CL} = h_{SL} = h_B$

$$\left(\frac{H_{CL}/h_{CL}}{H_{SL}/h_{SL}} \right)^2 = \left(\frac{L_{CL}}{L_{SL}} \right)^{5/3}$$

Despejando la longitud del perfil con laja, obtenemos

$$L_{CL} = L_{SL} \left(\frac{H_{CL}/h_B}{H_{SL}/h_B} \right)^{6/5}$$

Puesto que H_{CL} es inferior a H_{SL} , L_{CL} también será inferior L_{SL} (la longitud del perfil sin laja) según la proporción que se deduce de la expresión anterior. Esto es, el perfil con laja tiene una mayor pendiente que el perfil completo.

Para definir las alturas de ola consideraremos el criterio de rotura por fondo de la onda solitaria para el perfil sin laja.

$$\frac{H_{SL}}{h_B} = \gamma \cong 0.80$$

y cualquiera de las dos antes mencionadas, *Dally et al (1985)*

$$\frac{H}{h'} = \left\{ 0.517 \exp \left[-0.2 \frac{x}{h'} \right] + 0.123 \right\}^{1/2}$$

o bien el de *Andersen y Fredsoe (1983)*

$$\frac{H}{h'} = 0.5 + 0.3 \exp \left(-0.11 \frac{x}{h_L} \right)$$

Las expresiones que nos quedarían para uno y otro caso, respectivamente serían:

$$L_{CL} = L_{SL} \left[\frac{\left[0.5 + 0.3 \exp \left[-0.11 \frac{x}{h} \right] \right]}{0.8} \right]^{6/5}$$

o bien

$$L_{CL} = L_{SL} \left[\frac{\left[0.517 \exp \left[-0.2 \frac{x}{h} \right] + 0.123 \right]^{1/2}}{0.8} \right]^{6/5}$$

En ambos casos para $x = 0$, es decir, no existencia de laja

$$L_{CL} = L_{SL}$$

y para $x = \infty$, o laja suficientemente grande

$$L_{CL} = 0,37 L_{SL} \quad (\text{en el caso de Dally et al})$$

$$L_{CL} = 0,57 L_{SL} \quad (\text{en el caso de Andersen y Fredsoe})$$

Para diseñar con el perfil de Dean ($h = A \cdot x^{2/3}$), necesitaremos el valor de A_{CL} .
Veamos como deducirlo:

$$h_B = A_{CL} L_{CL}^{2/3}$$

$$h_B = A_{SL} L_{SL}^{2/3}$$

Igualando términos

$$\frac{A_{CL}}{A_{SL}} = \left(\frac{L_{SL}}{L_{CL}} \right)^{2/3}$$

y sustituyendo para ambas expresiones posibles

$$\frac{A_{CL}}{A_{SL}} = \left[\frac{0.8}{\left[0.517 \exp \left[-0.2 \frac{x}{h} \right] + 0.123 \right]^{1/2}} \right]^{4/5}$$

o bien

$$\frac{A_{CL}}{A_{SL}} = \left[\frac{0.8}{0.5 + 0.3 \exp \left[-0.11 \frac{x}{h} \right]} \right]^{4/5}$$

En ambos casos, al igual que antes, para $x = 0$, es decir, no existencia de laja

$$A_{CL} = A_{SL}$$

En cambio, vuelven a existir diferencias para el caso en que $x = \infty$

$$A_{CL} = 1,93 A_{SL} \quad (\text{hipótesis de Dally et al})$$

o bien

$$A_{CL} = 1,46 A_{SL} \quad (\text{Formulación de Andersen y Fredsoe})$$

3.3.3 Ajuste del modelo.

Para comprobar nuestro modelo teórico dibujaremos las dos expresiones anteriores en un gráfico donde tengamos en abscisas una anchura de laja adimensional x/h y en ordenadas la relación entre los parámetros de Dean de ambos perfiles (A_{CL}/A_{SL}), con laja y completo.

Los puntos representados provienen de dos fuentes distintas: la base de datos recopilada por *Gómez Pina (1995)* (las playas de Ondarreta, Sta. M^a. Del Mar, Torregorda y La Victoria) y a mediciones nuestras efectuadas en esta provincia (Arroyo Hondo, Regla y Fuentebravía).

Como puede apreciarse en la fig 3.3 la formulación empírica de *Andersen* se ajusta mejor que la de *Dailly* y con una pequeña modificación de la de *Andersen* el ajuste es perfecto (ver fig. 3.4).

$$\frac{H}{h} = 0.49 + 0.3 \exp\left(-0.11 \frac{x}{h}\right)$$

Apreciése que la gráfica de la exponencial de *Andersen* y *Fredsoe* alcanza la asíntota o punto de inflexión a la casi nula variación para $x/h = 30$. Eso supone para carreras de marea como las de la provincia de Cádiz con una pleamar media máxima de 3.00 metros, que para anchuras de laja superiores a 90 metros la relación

$$\frac{A_{CL}}{A_{SL}} = 1,46 \cong cte$$

Lamentablemente no disponemos de datos de playas con anchura de laja inferior a 90 metros por lo que el tramo de la curva teórica para x/h entre 0 y 30 queda sin calibrar.

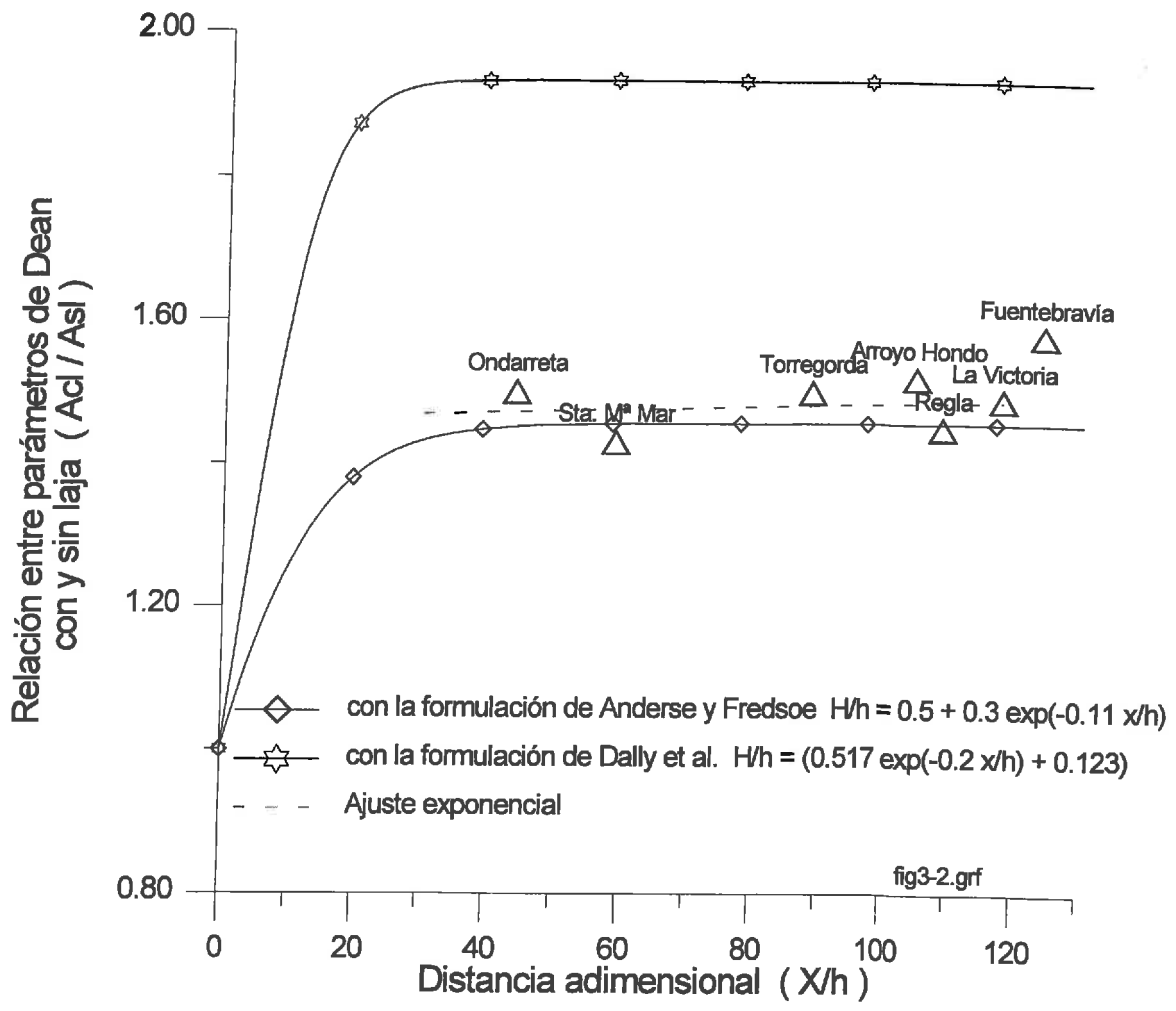


Fig. 3.3.- Ajuste de datos reales y representación teórica con las formulaciones de Dally et al. y de Andersen y Fredsoe.

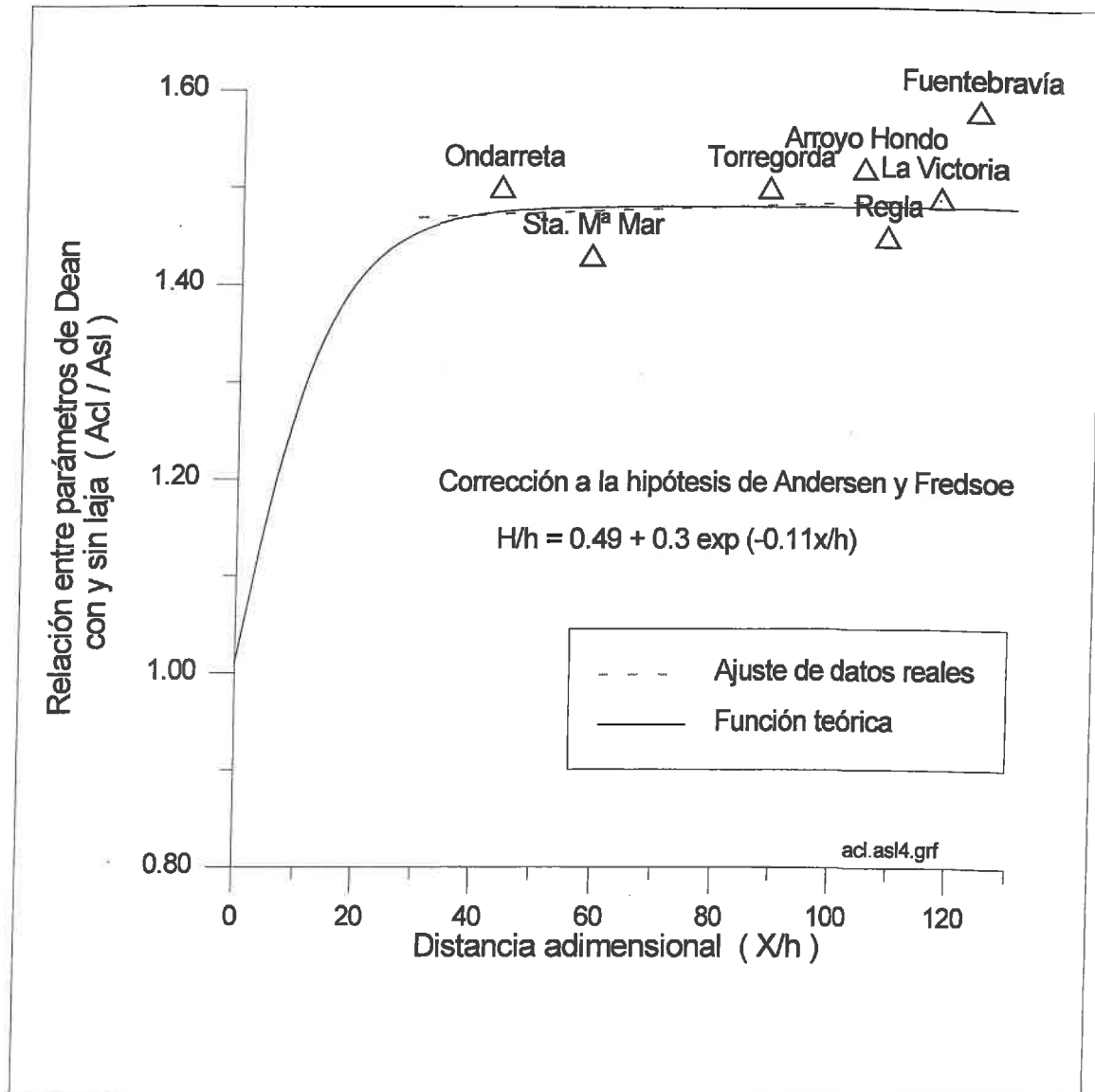


Fig. 3.4.- Ajuste de la fórmula empírica de Andersen y Fredsoe a los datos reales.

3.3.4. Comprobación en la playa Victoria.

La Victoria, la playa urbana por excelencia de la ciudad de Cádiz, se extiende a lo largo de 3 km bañada por el océano Atlántico en la vertiente occidental de la ciudad (fig 3.5).

La regeneración de la playa Victoria, con un vertido de más de dos millones de m³ de arena, se terminó en marzo de 1991. En diciembre de aquel mismo año se efectuó la primera batimetría de seguimiento con 30 perfiles topobatimétricos separados 100 metros entre sí. A partir de ese momento, y con periodicidad semestral, se han venido midiendo los mismos perfiles hasta la fecha de hoy. Hasta el momento la base de datos tiene 9 levantamientos:

Diciembre	1991
Junio	1992
Diciembre	1992
Junio	1993
Diciembre	1993
Junio	1994
Diciembre	1994
Junio	1995
Diciembre	1995

Vamos a estudiar en primer lugar las variaciones experimentadas a lo largo de estos años por los mismos perfiles que hemos venido comparando hasta ahora: un perfil apoyado sobre la laja en la cota de bajamar (el P19) y otro libre, no ubicado sobre fondo rocoso (el P45) (fig 3.6). En este punto atenderemos únicamente al perfil medio o de equilibrio, dejando el estudio de las variaciones a largo plazo para el capítulo siguiente.

La playa de La Victoria se caracteriza, entre otros factores, por la existencia de una laja que cubre únicamente la mitad de su extensión. Una perspectiva del fondo de la misma puede apreciarse en la fig. 3.7. Eso nos ha permitido el poder comparar los comportamientos de un perfil apoyado y otro completo frente al mismo tipo de agentes condicionantes externos (oleaje, marea, viento, corrientes, etc.).

Los perfiles obtenidos de los sucesivos levantamientos tienen una longitud superior a los 600 metros en la mayor parte de los casos, lo que supone alcanzar profundidades del orden de los 5 metros referidos al cero hidrográfico. En el caso del perfil libre, o no apoyado, hemos comprobado que no existen variaciones apreciables mas allá de la cota -4,00 y por ello preparamos una interpolación de 51 puntos separados 10 m. entre sí. En cambio, para el perfil apoyado sobre la laja rocosa limitaremos su longitud a 350 metros, es decir, 36 puntos con idéntica separación, llegando hasta la cota -1,00. Como se puede apreciar en la fig 3.8, a partir de ese punto comienzan las alteraciones producidas por la aparición de puntas y marmitas en el Plioceno.

En esta gráfica (fig 3.8) es donde se han dibujado los perfiles tomados en el periodo 1991-1995, apreciándose fuertes variaciones en ambos.

Apliquemos el método de las F.O.E. a los datos recopilados. La representación de las campañas del perfil sin laja están reflejadas en la fig. 3.9, mientras que las del perfil con laja aparecen en la fig. 3.10.

Tanto en uno como en otro caso la 1ª componente temporal aparece casi constante a lo largo de todas las componentes. Eso indica que la primera componente espacial representa al perfil de equilibrio que andábamos buscando, tal y como lo han apuntado otros autores con anterioridad, *Winant et al (1975)* o *Aubrey (1978)* entre los primeros.

El tanto por ciento de varianza explicada para esa primera componente es del 98,5 y de 99,4 % para los perfiles con y sin laja respectivamente, lo que abundan en la importancia de este perfil de equilibrio como constante media de referencia frente a los cambios climáticos del mar.

En la fig. 3.11 se comprueba como no existe casi variación alguna entre los 9 perfiles reconstruidos utilizando únicamente la 1ª componente.

Mediante el programa de ajuste de perfiles Dean, puesto a punto por la Fundación Leonardo Torres Quevedo, obtenemos los valores del parámetro A para los perfiles con y sin laja (ver fig 3.12).

Si para el perfil completo el valor de A era de 0,124, para el perfil con laja encontrábamos un A de 0,177 lo que supone una relación

$$\frac{A_{CL}}{A_{SL}} = \frac{0,174}{0,124} \cong 1,40$$

y la anchura adimensional de la laja es aproximadamente

$$\frac{x_L}{h_L} = \frac{500m}{3,50m} = 142$$

sustituyendo este valor en la formulación ajustada

$$\frac{A_{CL}}{A_{SL}} = \left[\frac{0,8}{0,49 + 0,3 \exp[-0,11 \cdot 142]} \right]^{4/5} = 1,47$$

Y, por lo tanto, el error cometido usando nuestro método sería de $0,07/1,47 = 0,048$ inferior al 5% con respecto al valor real del campo.

También podemos encontrar una relación entre las pendientes de ambos perfiles. Siguiendo la metodología de Dean, la pendiente de un perfil del tipo

$$y = A \cdot x^{2/3}$$

sera:

$$y' = 2/3 A \cdot x^{-1/3}$$

Con lo que, en teoría el cociente entre las pendientes del perfil con laja y sin ella resulta ser:

$$\frac{y'_{CL}}{y'_{SL}} = \frac{A_{CL}}{A_{SL}} \cong 1,50$$

En la práctica, y de la simple observación de fig. 3.8, podemos deducir que en la zona intermareal definida entre las cotas absolutas +4.00 y 0.00 la relación entre pendientes es:

$$\frac{y'_{CL}}{y'_{SL}} = \frac{4/100}{4/160} = \frac{0.04}{0.025} = 1,60.$$

El error cometido sería, en este caso, del orden de un 9 %.

3.4.- RESUMEN.

Se ha elaborado un modelo teórico de diseño para perfiles apoyados en laja rocosa. Parte de las mismas hipótesis que el perfil de Dean pero teniendo en cuenta la disminución del flujo de energía incidente debida al rozamiento con el fondo casi horizontal del arrecife.

La formulación encontrada permite obtener una relación entre los parámetros A con y sin apoyo sobre laja en función del ancho adimensional del arrecife. El valor obtenido crece desde 1, para $x=0$ o no existencia de laja, hasta un valor asintótico que varía en función de la hipótesis de disipación del flujo de energía utilizada. En el caso de *Dally et al (1985)* alcanza hasta 1.93, mientras que para *Andersen y Fredsoe (1983)* se queda en $A_{cl}=1.46 A_{sl}$.

Se tomaron 7 playas, del Cantábrico y de la provincia de Cádiz principalmente, para calibrar el modelo. El resultado fue excelente en el tramo asintótico de la curva preparada con la hipótesis de *Andersen y Fredsoe*. Dicho tramo comienza para un valor de distancia adimensional $x/h=30$, lo que para una carrera de marea media de unos 3 metros supone un ancho de laja de únicamente 90 metros. No ha sido posible el encontrar playas del litoral español apoyadas en arrecifes de un ancho menor para contrastar el tramo lineal inicial de la gráfica 3.3.

La playa Victoria goza de una particularidad que la hace especialmente apta para nuestra investigación. Está dividida por una falla transversal en dos zonas. La situada más al norte tiene una laja rocosa a la cota de la bajamar escorada, mientras que la más meridional carece de esa plataforma rocosa. Esto permite elegir dos perfiles situados en ambas zonas respectivamente y estudiar los

cambios experimentados suponiendo que las variaciones se deben únicamente a la diferente condición de contorno en el fondo.

Aplicando las F.O.E. a la serie temporal de datos tomados en los cinco últimos años en la playa Victoria, la primera autofunción temporal tiene un valor constante en el tiempo e igual a 1. Eso supone que la primera autofunción transversal asociada es un perfil medio o de equilibrio a muy largo plazo. Los parámetros de Dean ajustados a los perfiles con y sin laja son respectivamente de 0.177 y 0.124. Eso supone una relación real $A_{cl}/A_{sl} = 1.40$. La diferencia con el valor encontrado mediante el modelo desarrollado en la presente tesis es sólo de un 5%. Por otra parte, la pendiente media del perfil con laja resulta ser del orden de vez y media de la del perfil no apoyado y que ronda el 2.5% .

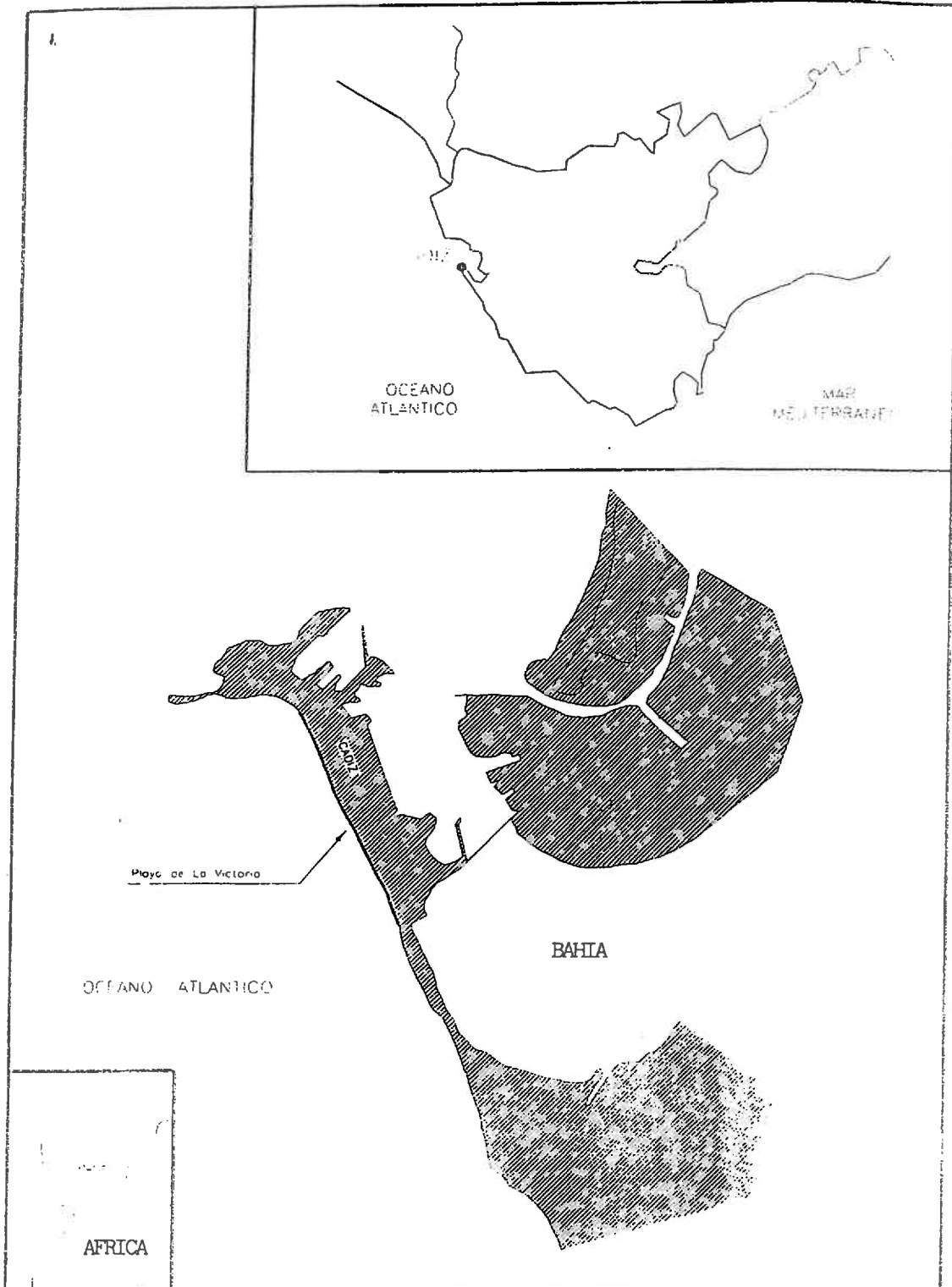


Fig 3.5 Situación y emplazamiento de la playa Victoria.

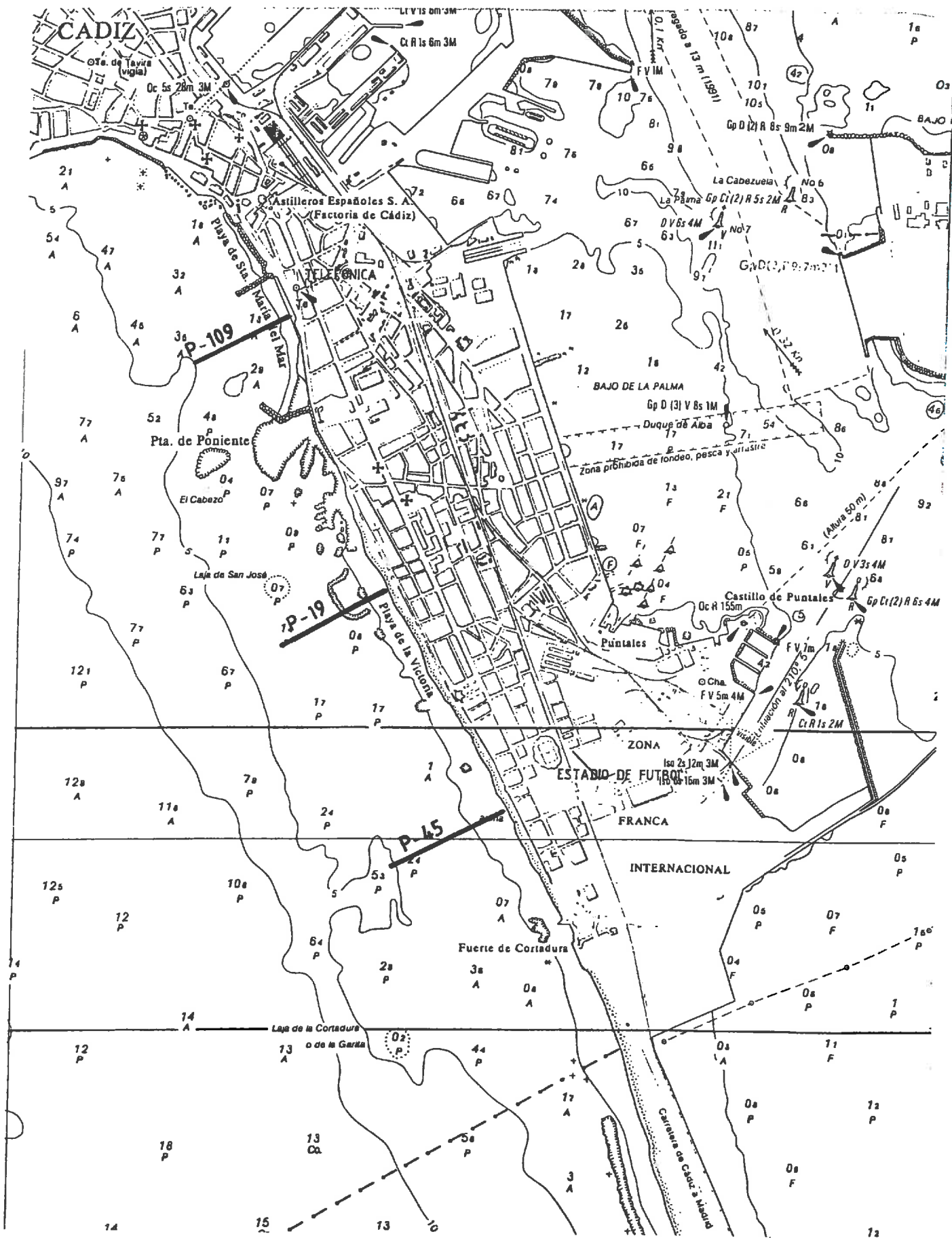


Fig 3.6.- Situación de perfiles.

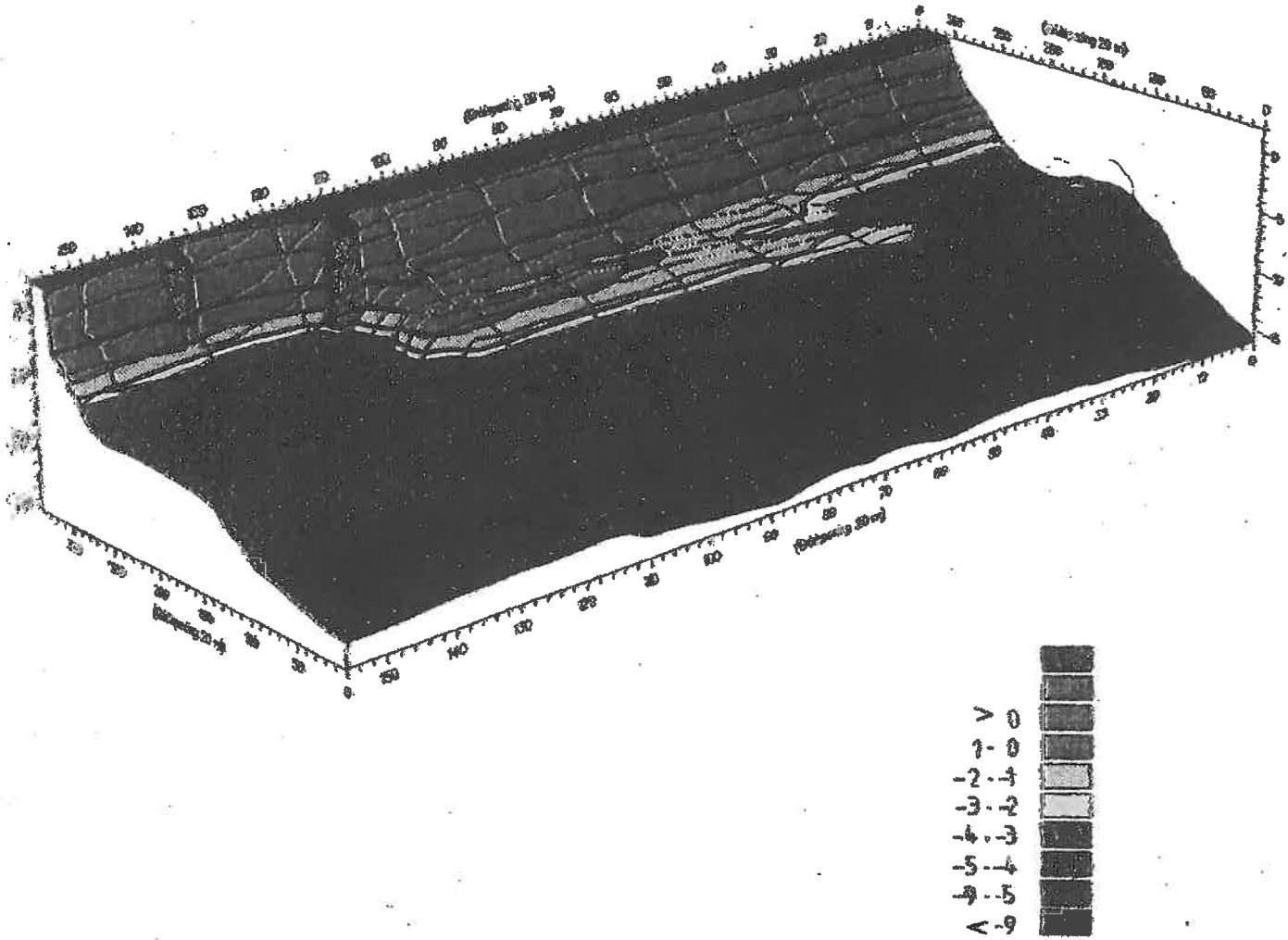


Fig 3.7.- Perspectiva del fondo de las playas de La Victoria y Santa María del Mar.

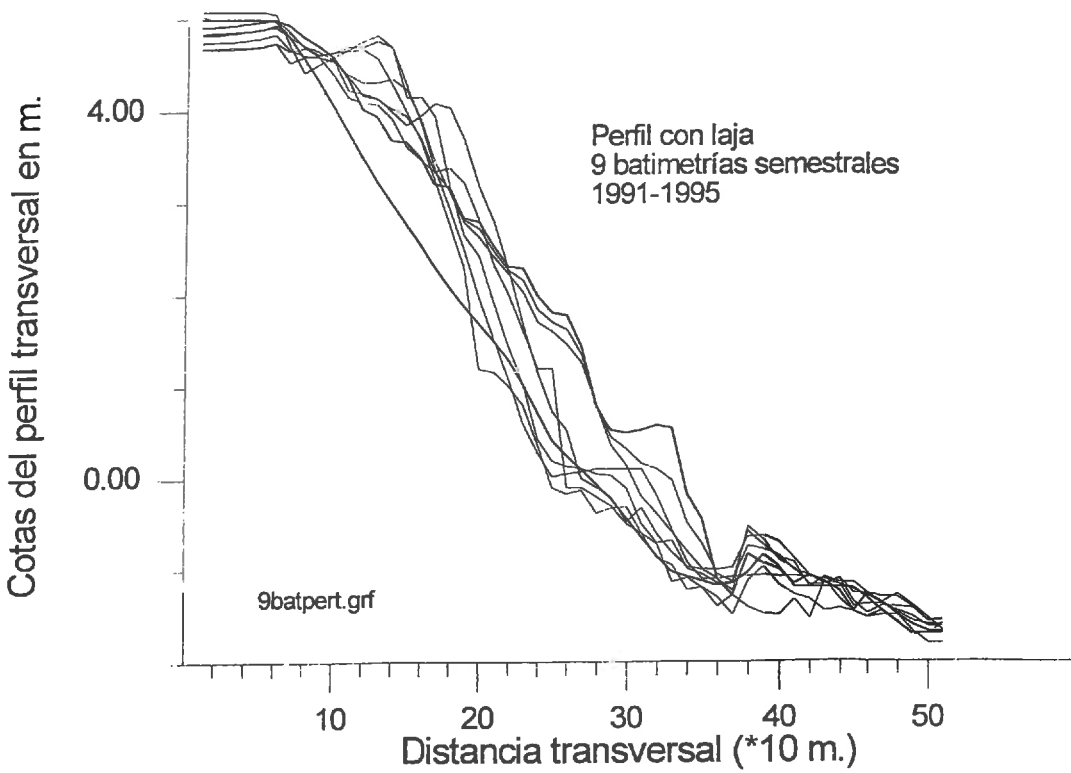
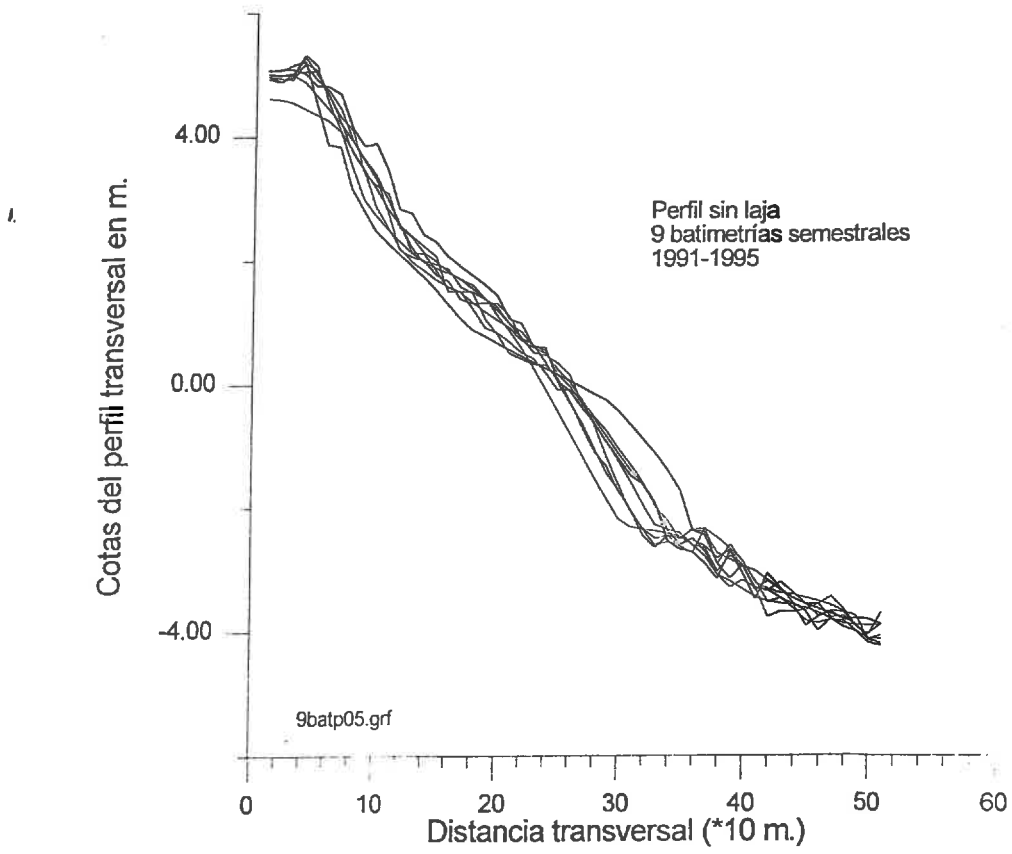


Fig 3.8.- Representación de los perfiles transversales tomados batimétricamente en el periodo 1991 - 1995.

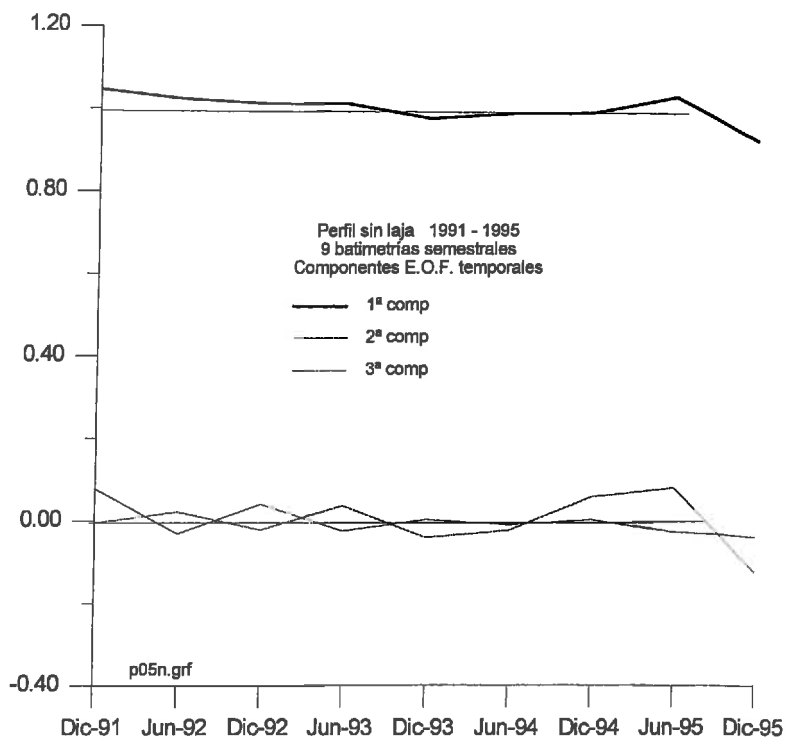
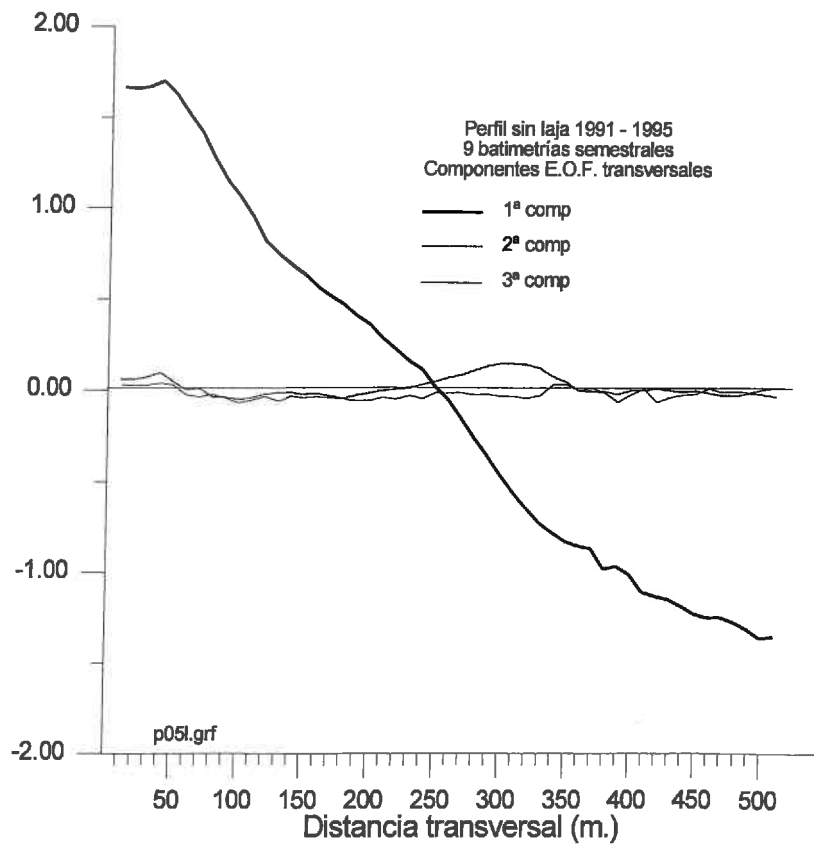


Fig 3.9.- Componentes E.O.F. espaciales y temporales del perfil sin laja.

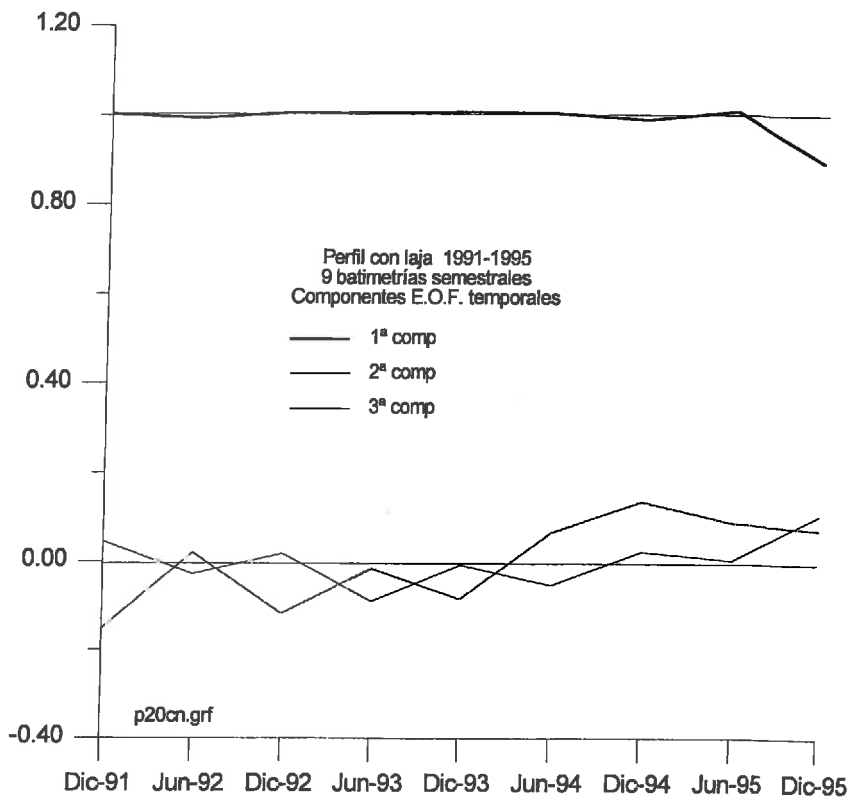
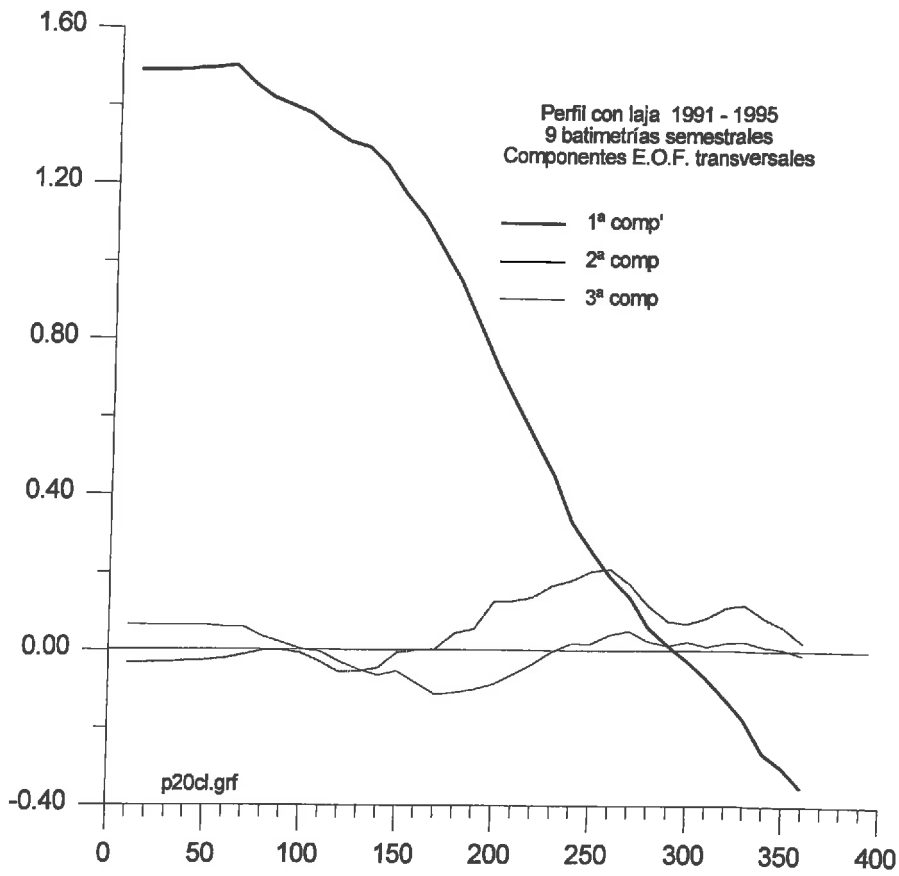


Fig 3.10.- Componentes E.O.F. espaciales y temporales del perfil con laja.

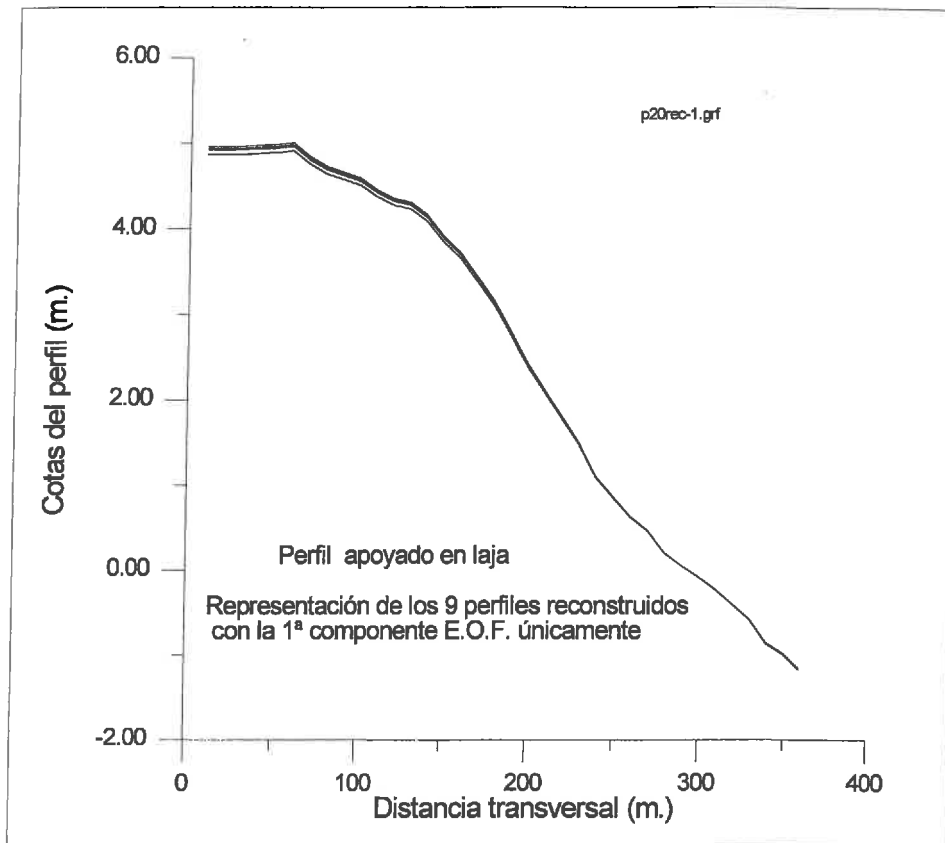
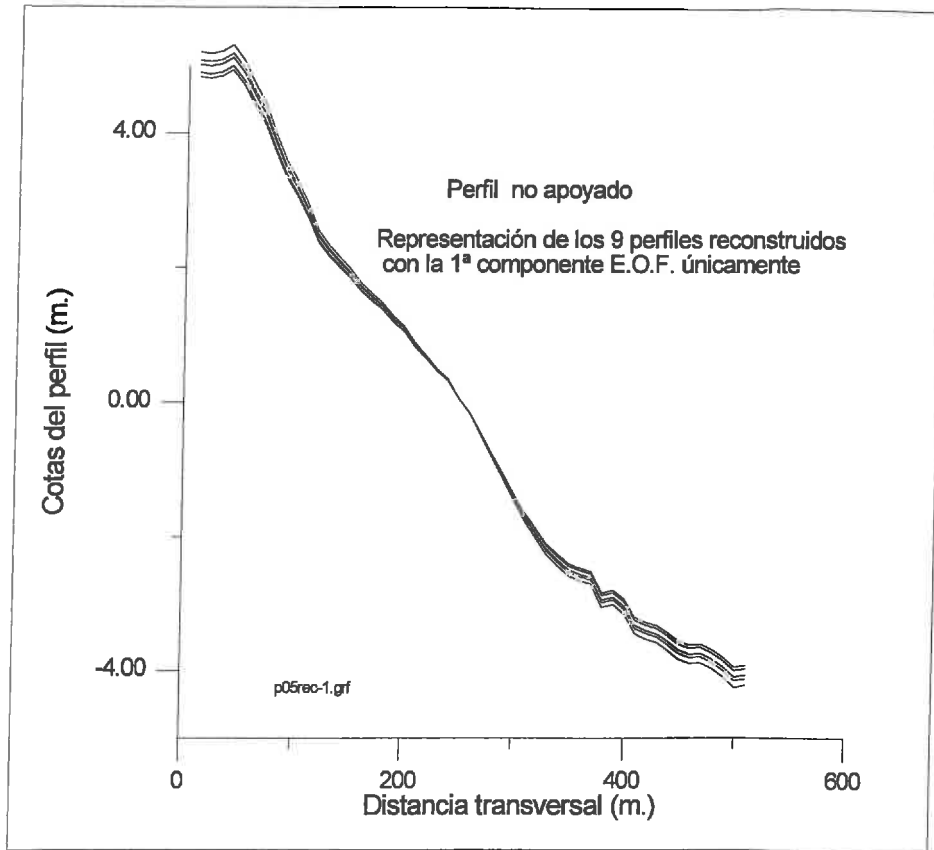


Fig 3.11 Reconstrucción de los perfiles comparados de la playa Victoria.

PERFIL SIN LAJA

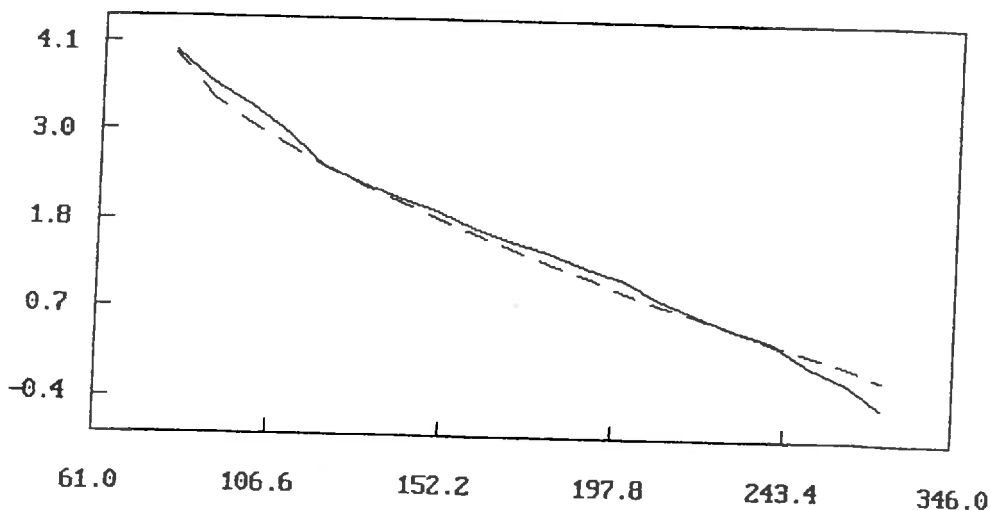
FICHERO DE DATOS : p05r-1.dat
MODELO DE AJUSTE : $h = A X^{2/3}$
COEFS. DE AJUSTE :
A = 0.124

CURSO DE ING. LITORAL (F.L.T.Q)

ERROR CUADRAT. MEDIO = 0.021

PROFUNDIDAD LIMITE = 0.5 m

NIVEL MAXIMO MAR = 4.0 m



PERFIL CON LAJA

FICHERO DE DATOS : p20r-1.dat
MODELO DE AJUSTE : $h = h_0 + A(X - X_0)^{2/3}$
COEFS. DE AJUSTE :

CURSO DE ING. LITORAL (F.L.T.Q)

A = 0.705
h₀ = 0.174
X₀ = 4.900
ERROR CUADRAT. MEDIO = 0.008

PROFUNDIDAD LIMITE = 0.0 m

NIVEL MAXIMO MAR = 4.0 m

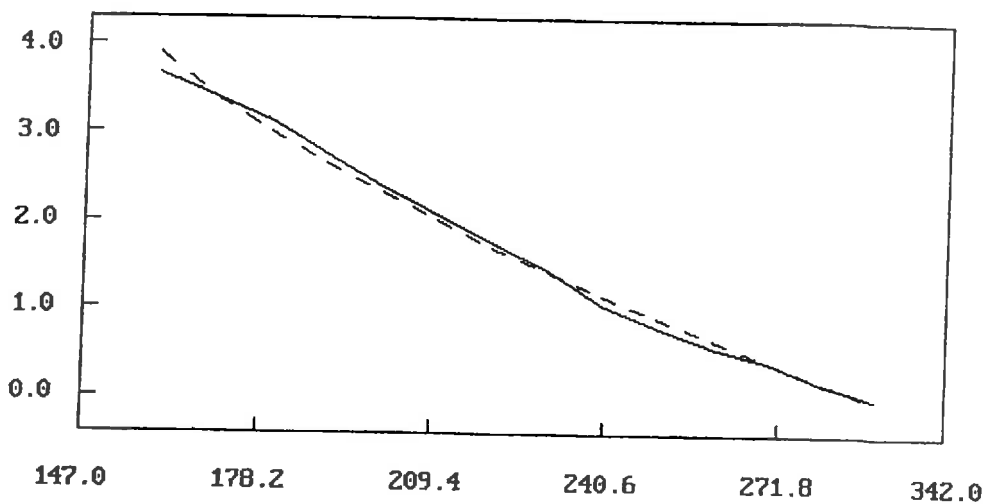


Fig. 3.12.- Ajuste del parámetro A de Dean para los perfiles de la playa Victoria con y sin laja.

CAPITULO IV

VARIABILIDAD A LARGO PLAZO DE LA PLANTA DE LA PLAYA

IV.- VARIABILIDAD A LARGO PLAZO DE LA PLANTA DE LA PLAYA.

4.1.- CRITERIOS TEORICOS.

La playa con laja debe ser más lenta en cuanto a cambiar y evolucionar su forma en planta. La existencia de un estrato rocoso hemos visto que limitaba la altura de ola incidente y por tanto el flujo de energía que llegaba al talud intermareal. Pero no solo eso, también se produce una refracción más rápida por tratarse de un fondo levantado con respecto al perfil completo o playa sin laja. Además, mientras que en una playa con fondo arenoso la interacción oleaje - fondo es mutua, en el caso de estrato rocoso éste permanece inalterable forzando a los frentes de onda a un giro mayor. Así pues, el ángulo de incidencia de dichos frentes será menor y, por consiguiente, también lo serán las corrientes longitudinales por ellos motivadas. La velocidad del transporte de sedimento disminuirá en consecuencia por esta razón. La otra causa generadora de corrientes en la zona de rompientes es el gradiente de altura de ola; al tratarse de un bajo, uniforme en cuanto a cota, las diferencias entre alturas de ola en distintos puntos son mínimas. Por tanto, también serán menores las corrientes por esta razón en las playas apoyadas en laja que en las que no la tengan.

4.2.- APLICACION A LA PLAYA VICTORIA.

A pesar de que podemos diferenciar dos zonas distintas en la playa Victoria, una apoyada en laja rocosa al norte y otra sin estrato rocoso por delante al sur, ambas partes conforman una misma unidad fisiográfica. Debe haber, por tanto, una continuidad en planta entre los tramos con y sin laja. Esto conlleva a la existencia de una zona de transición, no delimitada a priori, que nos impide el apreciar diferencias tanto en transporte como en formas en planta de la playa entre las zonas con y sin laja. Como futura línea de trabajo se propone el que para poder abordar este estudio precisaremos de una toma de datos en esa zona intermedia con unas escalas espaciales, espaciales y temporales pequeñas. Esto es, los perfiles deberán estar poco separados, y las mediciones deberán efectuarse con una periodicidad mensual a lo sumo.

Dentro de esta aproximación a la comprensión de las variaciones existentes en la playa a largo plazo, veremos inmediatamente la evolución de distintas curvas de nivel en el transcurso de los años.

Disponiendo de 9 series temporales (semestrales) de 30 perfiles cada una a lo largo de los 3 km. de largo de la playa Victoria, hemos sido capaces de

establecer una superficie ficticia a la que podemos interseccionar con planos horizontales a las cotas de pleamar viva, "nivel medio del mar", bajamar viva, etc. Obtendremos así unos ficheros $x(y,t)$ con las distancias desde las distintas cabezas de base hasta los puntos con cotas +4.00, +2.00, 0.00 y -2.00 respectivamente. A estas nuevas series de datos podremos aplicarles el método de las Componentes Principales y analizar los resultados obtenidos, como ya hicieron *Losada et al (1991)* al estudiar la evolución histórica y morfológica del Puntal en Santander.

Se adjuntan a continuación (ver figs. 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4) las representaciones gráficas de las dos primeras componentes de cada una de las curvas de nivel antes mencionadas. La 1ª componente longitudinal corresponde a una representación de una línea media espacial de planta de equilibrio. La componente temporal asociada tiene en todos los casos una tendencia monótona decreciente (se trata pues de un retroceso generalizado de la línea de costa) salvo en la cota -2.00, que permanece constante y que abunda en nuestra interpretación de dicha profundidad como límite práctico del movimiento de sedimento. En cuanto a las 2ª componentes pasamos a comentar el significado físico de las mismas.

- La isocota de pleamar viva +4.00 muestra 3 zonas: una casi-constante en la zona de Cortadura ($y=0...800m.$) y otras dos de comportamiento radicalmente opuesto, una que avanza hacia el mar ($y=800...1900$) y otra que retrocede ($y=1900...3000$).

- La línea de media carrera de marea (la +2.00) muestra dos zonas de iguales dimensiones: la más cercana a Cortadura ($y=0...1500$) retrocediendo tanto más cuanto más lejos nos encontramos de un punto pivote ubicado en mitad de la playa y que permanece fijo; en la más cercana a Sta. Mª del Mar ($y=1500...3000$) sucede todo lo contrario, la línea de orilla avanza hacia el mar en el transcurso de estos años de modo proporcional a la distancia a dicho punto pivote. Se trata pues de un basculamiento en planta que retomaremos más adelante.

- La isocota de bajamar viva +0.00 tiene una forma similar a la de pleamar pero con el signo cambiado : la parte de playa que antes avanzaba hacia el mar ahora retrocede y viceversa.

- La isobata -2.00 tiene unas 2ª componentes tanto longitudinal como temporal casi idénticamente nulas.

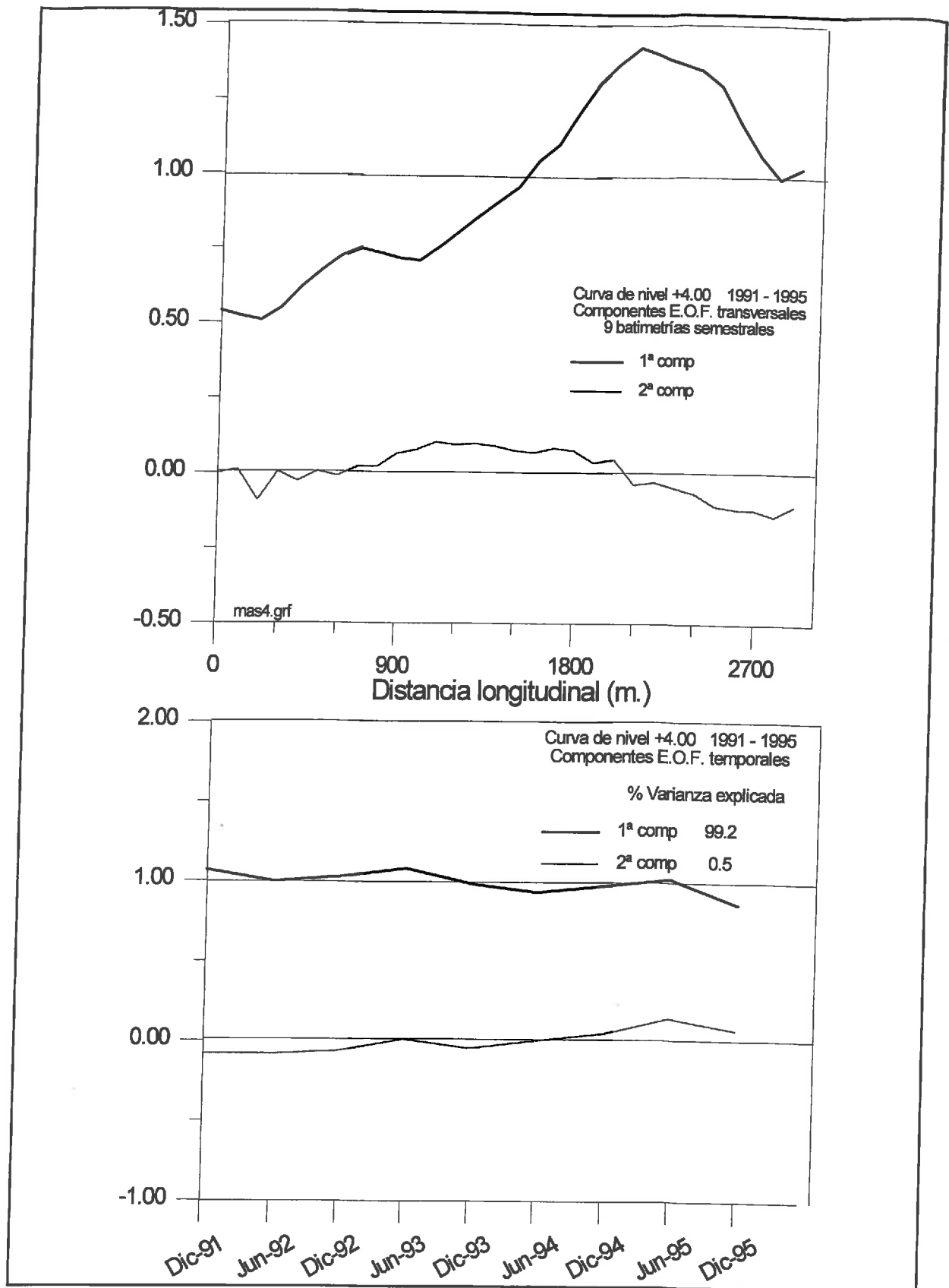


Fig. 4.1.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel +4,00 (pleamar viva).

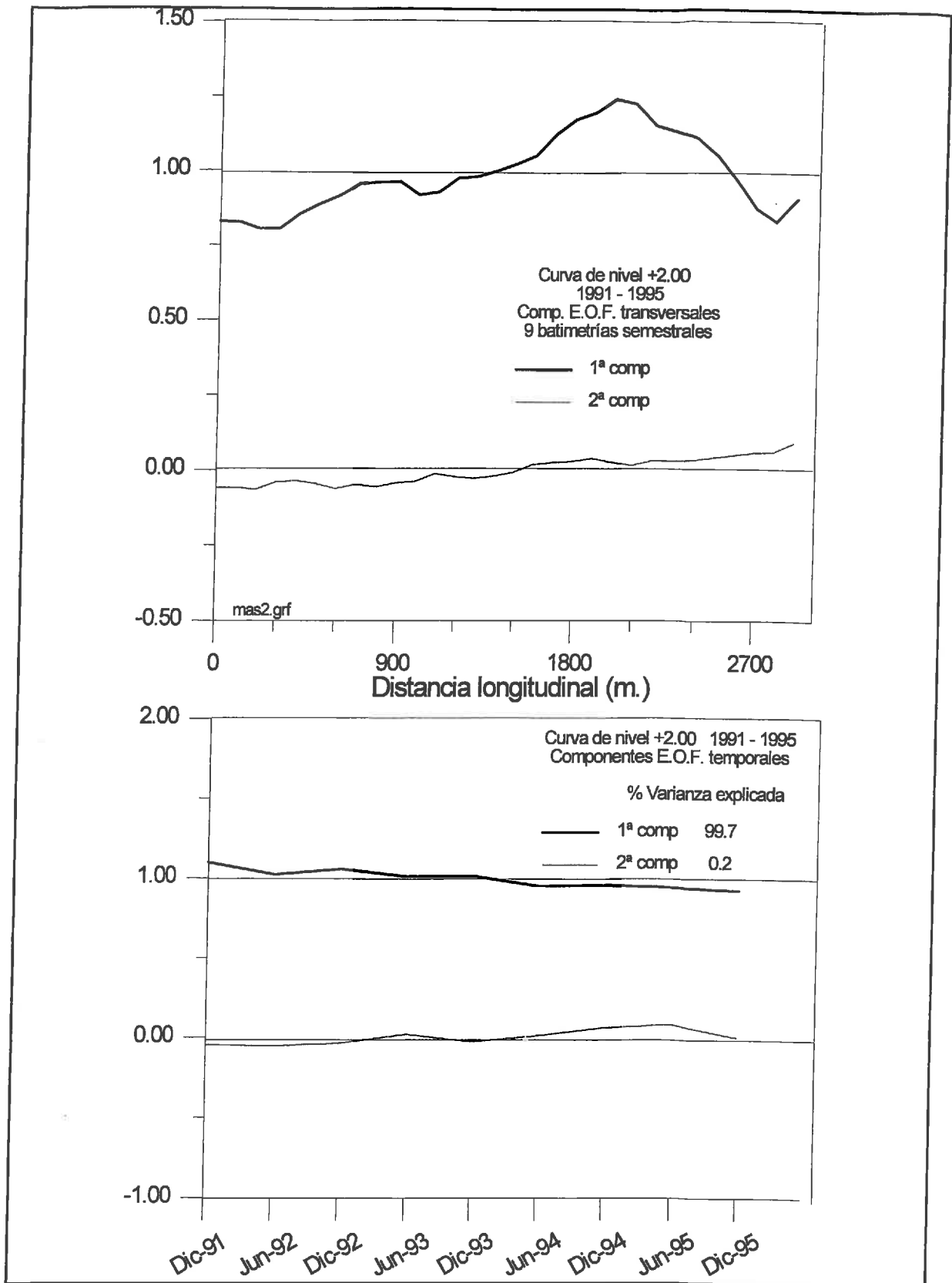


Fig. 4.2.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel +2,00 (zona intermareal o media carrera de marea).

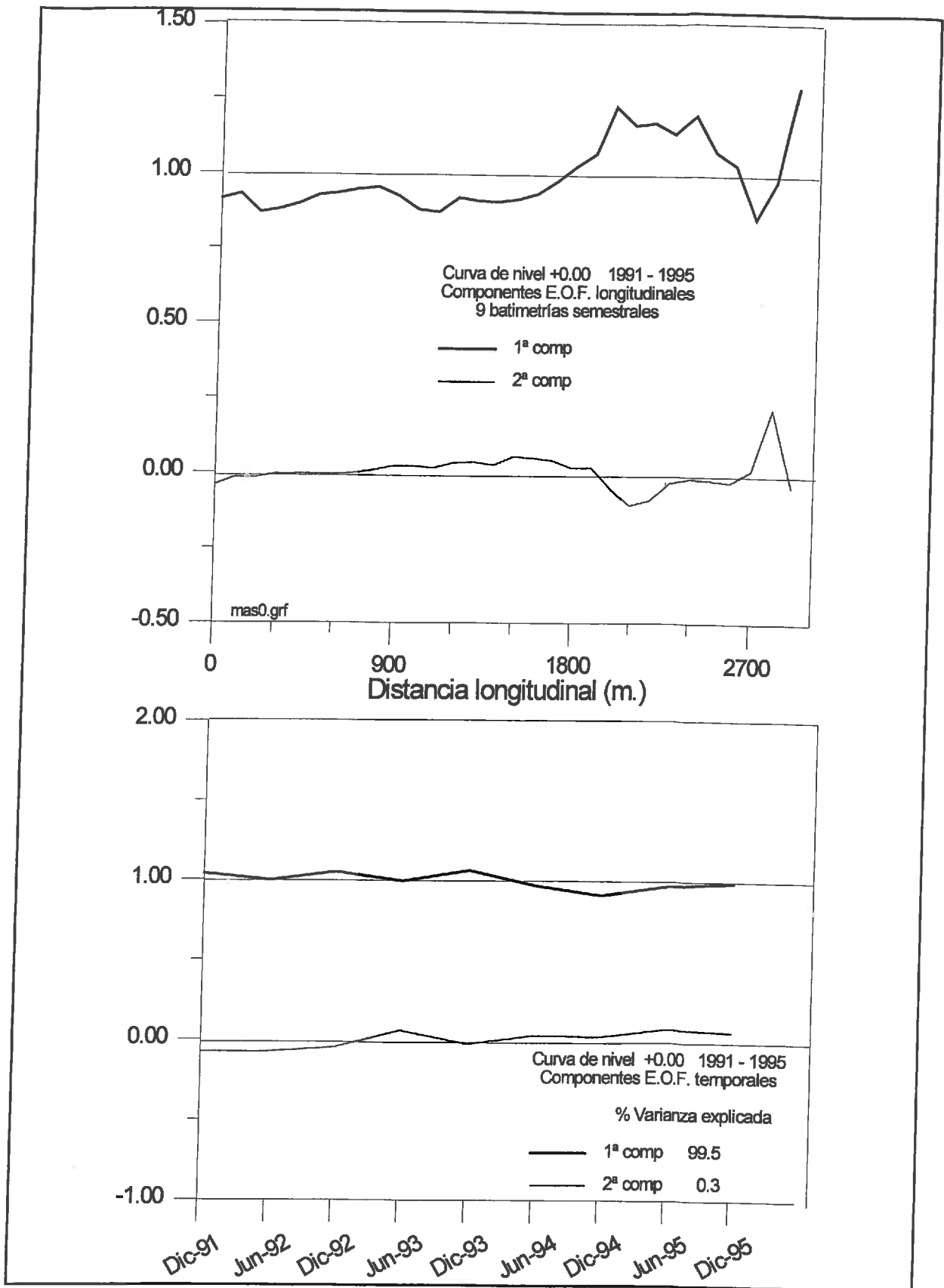


Fig. 4.3.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel +0,00 (bajamar viva).

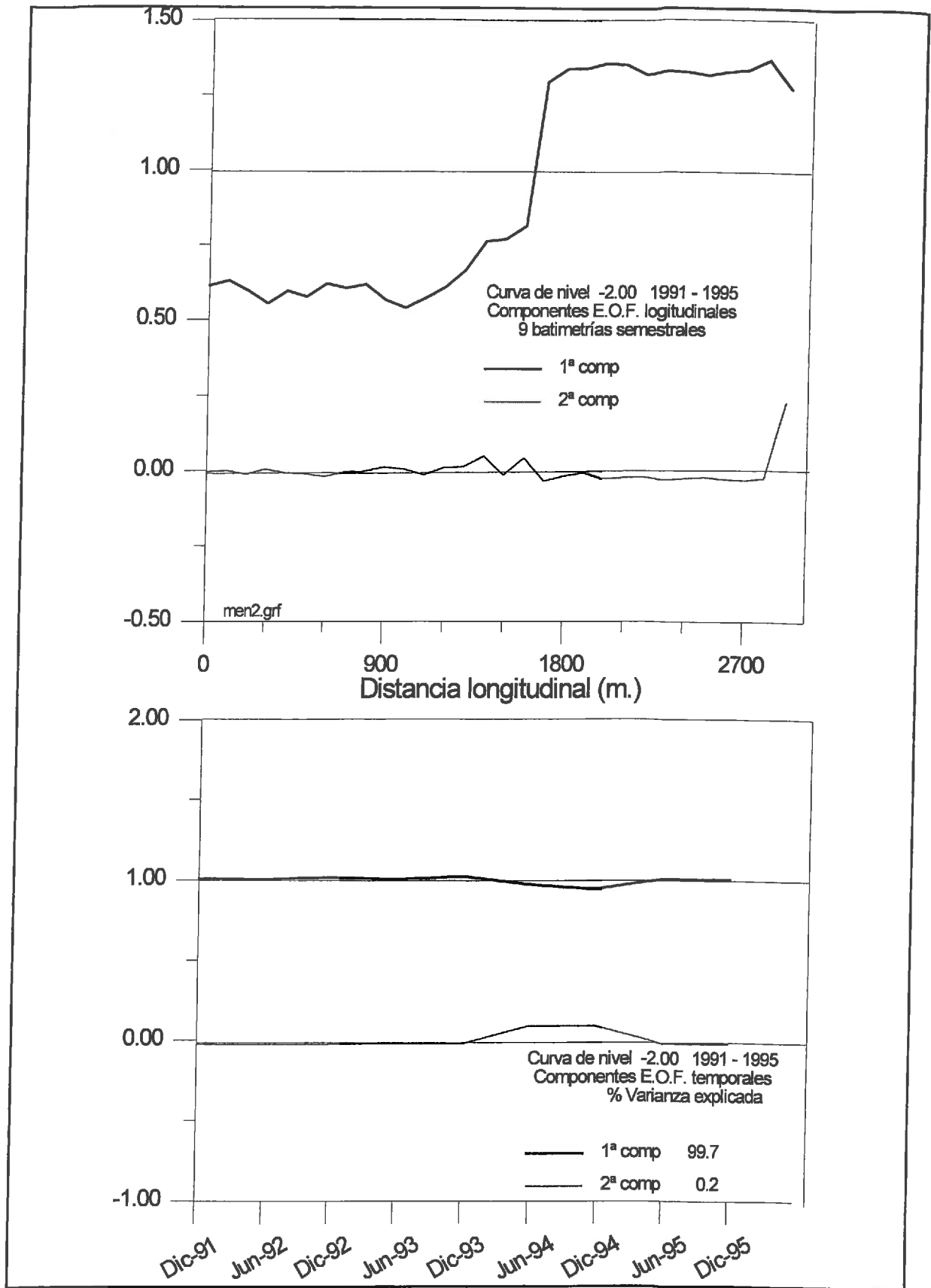


Fig. 4.4.- Componentes E.O.F. espacial y temporal de la curva de nivel -2,00.

Para demostrar la bondad de nuestras interpretaciones procederemos a reconstruir las curvas de nivel para cuatro épocas distintas. Elegimos las dos primeras y las dos últimas de toda la serie para observar los cambios habidos tanto con el paso de los cinco años como las diferencias entre invierno y verano, es decir: diciembre -91, junio-92, junio-95 y diciembre-95. Se dibuja la línea de orilla media reconstruida con la 1ª componente y la diferencia debida a la 2ª componente.

- Curva de nivel +4.00

La reconstrucción con la 1ª componente (fig. 4.5), que nos indicaba la planta de equilibrio, muestra un fuerte retroceso de la orilla desde dic 91 a dic 95; del orden de 18 m. a la altura del perfil sin laja y de 35 m. a la del perfil con laja. En cuanto a la contribución de la 2ª componente se trata de un basculamiento en planta; dic-91 y jun-92 son coincidentes, pero la orilla experimenta un giro, mezclado con un cierto basculamiento transversal, en el sentido de las agujas del reloj hasta jun-95 y en sentido contrario tras los temporales del invierno 95-96.

La posición del punto pivote no parece depender en teoría y a priori de la existencia o no de laja sino de la ubicación del espigón sur de contención de arenas en la playa de Sta. Mª del Mar, justo al norte de la Victoria.

- Curva de nivel +2.00

En la figura 4.6 se aprecia como las 4 isocotas son paralelas entre sí en este caso particular. Recordemos que la cota de media carrera de marea suponía el punto pivote de basculamiento en el perfil transversal. Se trata, pues de un punto que permanece invariable frente a las oscilaciones verano-invierno y que sólo sufre adelantos o retrocesos relacionados con la erosión-acreción generalizada a largo plazo. Es a esta altura, por tanto, donde debemos medir dichas erosiones (ver tabla adjunta)

	<i>Erosión sufrida por la playa Victoria (cota +2.00)</i>			
	<i>dic 91- jun 92</i>	<i>jun 92 -jun95</i>	<i>jun 95- dic95</i>	<i>total</i>
<i>Zona sin laja</i>	13	16	2	31
<i>Zona con laja</i>	18	18	2	38

En cuanto a la 2ª componente, y al no haber movimientos debidos al basculamiento transversal, debemos considerar que se trata de un giro puro que podremos medir teniendo en cuenta los avances y retrocesos en los extremos de la playa (ver gráfico adjunto) :

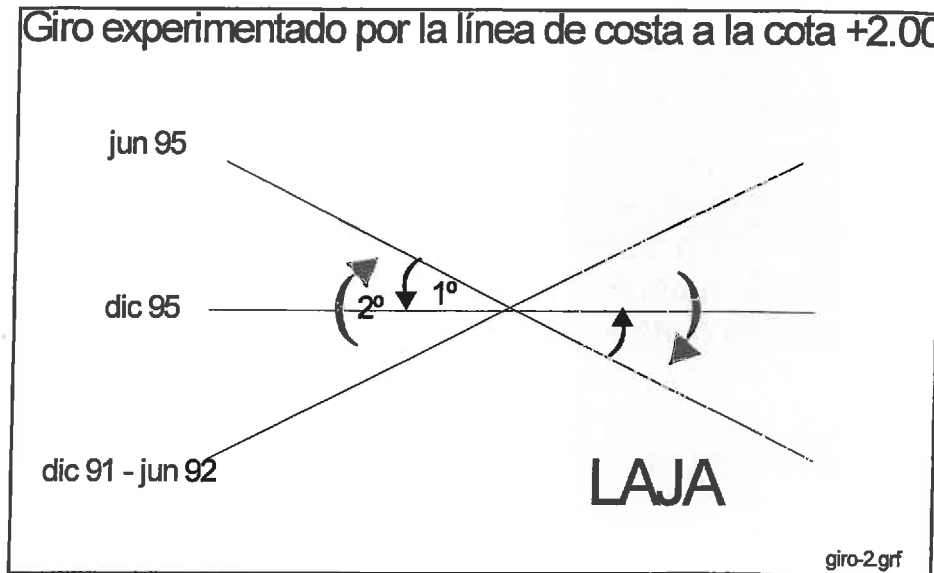
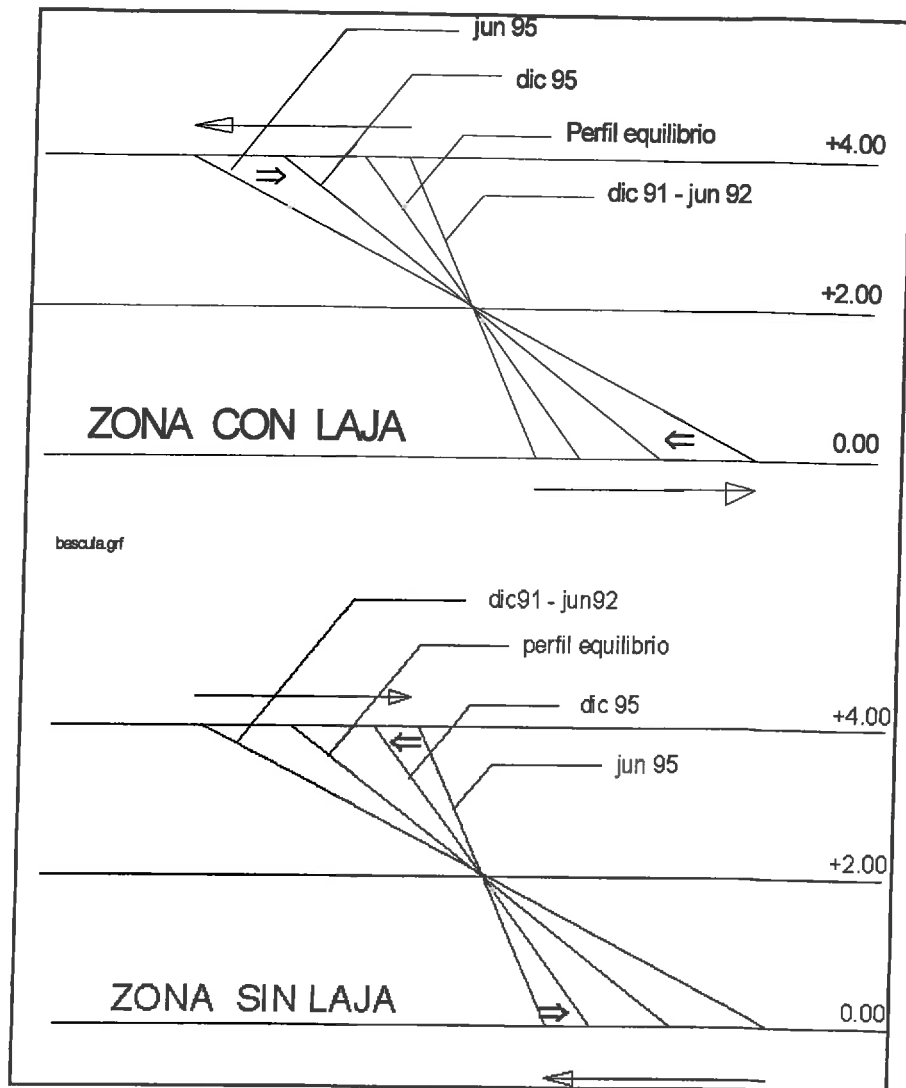


Fig. 4.9 Giro experimentado por la línea de costa.

Se trata de un giro de 2°, en el sentido de las agujas del reloj, de junio 92 a junio del 95 y 1° en sentido contrario por la acción de los temporales de invierno del 95

Curva de nivel +0.00

El comportamiento es inverso al de la cota +4.00, justificando así la existencia de un basculamiento a largo plazo distinto al de verano-invierno (fig. 4.7).



Curva de nivel -2.00

Se mantiene casi constante a lo largo de los cinco años transcurridos desde el final de la regeneración (fig 4.8). Se podría decir que estamos ante un umbral de facto del movimiento de arenas recuperables.

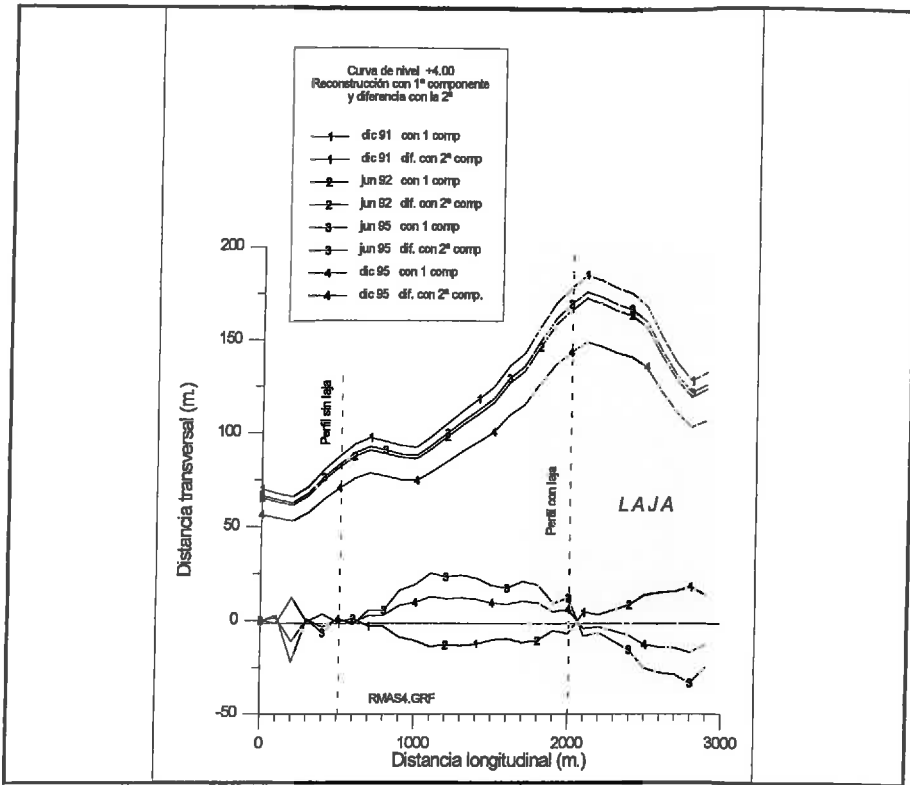


Fig. 4.5.- Reconstrucción de la curva de nivel +4,00 (pleamar viva)

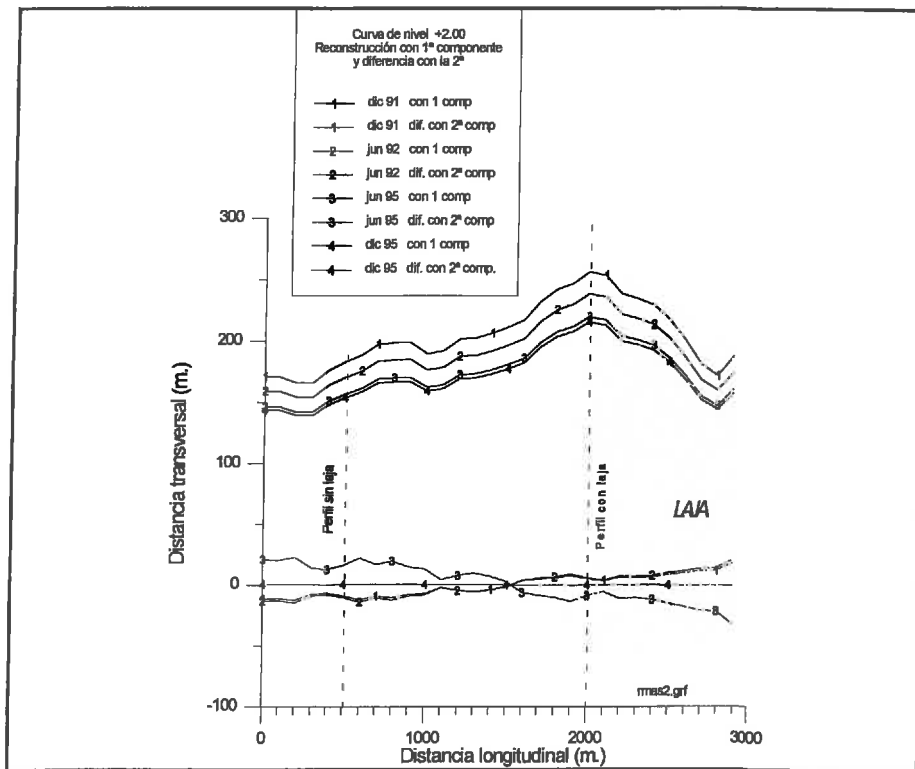


Fig 4.6.- Reconstrucción de la curva de nivel +2,00 (media carrera de marea).

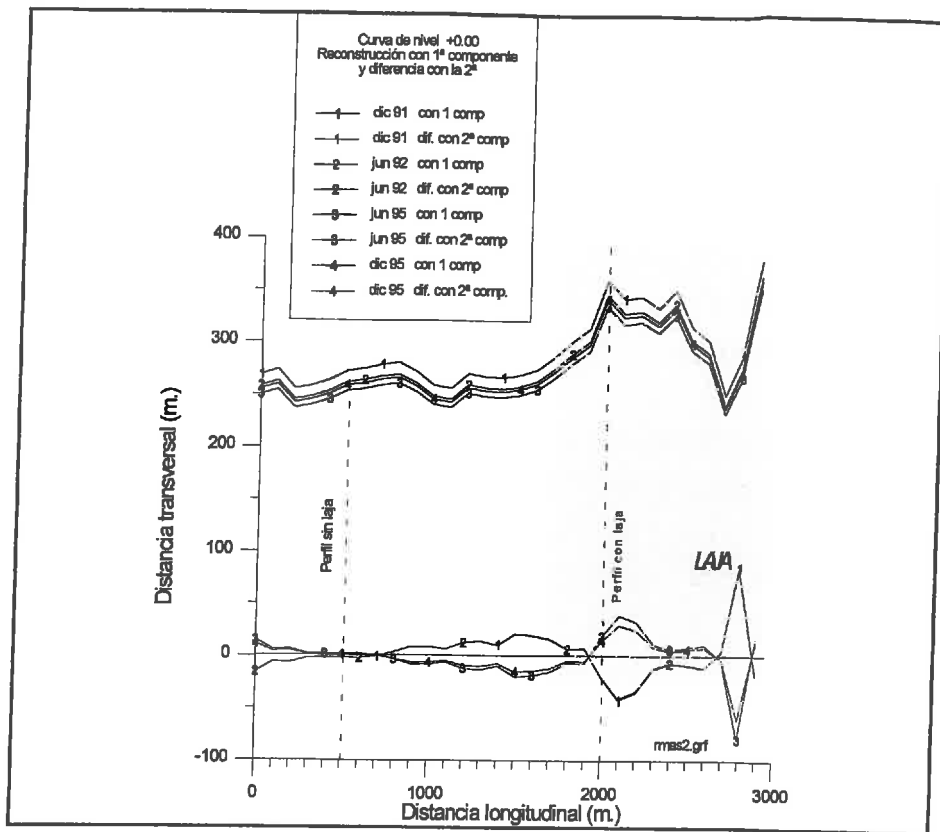


Fig. 4.7.- Reconstrucción de la curva de nivel +0,00 (bajamar viva).

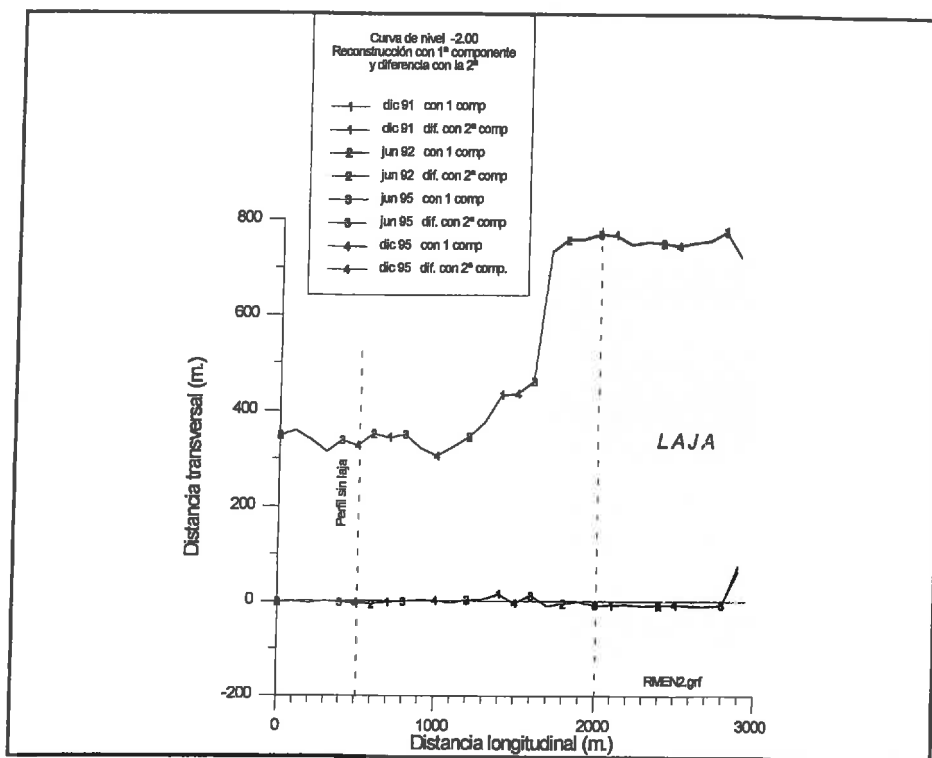


Fig. 4.8.- Reconstrucción de la curva de nivel -2,00

4.3.- RESUMEN.

Según nuestro modelo teórico, la playa con laja debe ser más lenta en cuanto a su evolución por varias razones:

1. La existencia de un estrato rocoso limita la altura de ola incidente y por tanto el flujo de marea que llega a la zona intermareal.
2. También se produce una refracción más rápida por tratarse de un fondo de menor calado que el del perfil completo.
3. En una playa de fondo arenoso la interacción oleaje-fondo es mutua, mientras que si el fondo es rocoso entonces permanece inalterable, forzando a los frentes de onda a un giro mayor.
4. Al tratarse de un bajo, uniforme en cuanto a cota, las diferencias entre alturas de ola en distintos puntos son mínimas y , por consiguiente, también lo serán las corrientes originadas por el gradiente de altura de ola.

Al estudiar los datos reales de campo nos damos cuenta de que pese a la presencia de dos partes diferenciadas, una apoyada en laja y otra que no, ambas partes conforman una misma unidad fisiográfica. Esto conlleva a la existencia de una zona de transición, no delimitada a priori, que enmascara parcialmente nuestro estudio comparado.

En cuanto a la observación de las autofunciones referentes a las curvas de nivel, podemos afirmar que:

- La primera componente corresponde a un movimiento generalizado de erosión a la altura de la pleamar viva y de acreción en la bajamar escorada. Se trata, pues, de un basculamiento, o suavizamiento del perfil a largo plazo, independiente de las variaciones semestrales.
- La segunda componente consiste en un giro en planta de la línea de costa de 2° en el sentido de las agujas del reloj desde el momento de la regeneración hasta junio del 95 (5 años de buen tiempo) . Tras los temporales de diciembre del 95 el giro se produce en sentido contrario con valor de 1°.

- Las isocotas +2.00 permanecen paralelas entre sí a lo largo del tiempo. tenemos entonces una curva de nivel que no se ve afectada por los cambios estacionales y que nos permitirá la medición de las erosiones reales a largo plazo.

- La curva de nivel -2.00 permanece casi constante a lo largo de los cinco años transcurridos desde el final de la realimentación. Estamos ante un umbral de facto del movimiento de arenas recuperables.

- El retroceso sufrido por la playa en este quinquenio ha sido de 31 m. en la zona sin laja y de 38 m. en la zona con laja. Debe tenerse en cuenta que las condiciones de contorno son distintas. La dirección neta del transporte longitudinal de sedimento es de NW hacia SE y que la parte más septentrional de la playa está limitada por un espigón, careciendo de fuentes de aporte de material que compensen el ya movilizado.

CAPITULO V

VARIABILIDAD A LARGO PLAZO DEL PERFIL

V.- VARIABILIDAD A LARGO PLAZO DEL PERFIL

5.1.- CRITERIOS TEÓRICOS.

En los perfiles completos o no apoyados se ha observado de modo generalizado un cambio estacional en la pendiente de la playa. Se trata de un basculamiento invierno-verano causado por el incremento de la altura y del peralte de las olas con los temporales. De este modo se produce un retroceso de la línea de costa con un transporte transversal de material desde la berma hacia la zona sumergida, dónde se había generado un déficit de sedimento. Esta arena conforma una serie de barras que disminuyen la energía incidente sobre el estrán al provocar una mayor rotura del oleaje. Este proceso conduce a una mayor suavidad de la pendiente, fenómeno que contribuye también a la estabilización del grano de arena. La isobata hasta la que se ve arrastrado el sedimento dependerá entre otros factores de la altura de ola, lo que indica que para fuertes temporales se pueden alcanzar profundidades tales que la mar de fondo no sea luego capaz de devolverlo a la orilla. Esto produciría una erosión general de todo el perfil con pérdida irreversible de material.

En cambio, en el perfil apoyado en laja ya habíamos apreciado como la existencia de un estrato rocoso acotaba superiormente el valor de la ola máxima incidente. La energía residual del oleaje que llega hasta la orilla dependerá no sólo de la altura de ola sino de la amplitud de marea en cada momento y en cada lugar determinado. Cuando lleguen olas lo suficientemente grandes y peraltadas como para movilizar a los granos de arena en dirección hacia el mar éstos viajarán sobre la laja hasta alcanzar su borde y caer por el talud de la misma. Al tratarse de una pendiente mucho más pronunciada le será imposible el retorno, perdiéndose así este material para la unidad fisiográfica. (Salvo que por corrientes longitudinales sea arrastrado hasta una zona donde todo el perfil sea arenoso y, por consiguiente, la pendiente hacia la orilla sea muy inferior) . Nótese que la altura de esta ola causante de la pérdida del grano de arena es inferior a la que se necesitaba para un proceso similar en el caso de la no existencia de estrato rocoso; esto es, tiene una mayor probabilidad de ocurrencia. Por tanto, supondremos , en primera aproximación, que el perfil con laja sufre una erosión irreversible superior a la del perfil completo, siendo el basculamiento un fenómeno secundario de menor importancia con respecto a aquella.

5.2.- APLICACIÓN A LA PLAYA VICTORIA

Como ya se comentó en el apartado 3.3.4. tras la regeneración de la playa Victoria se abordó una campaña de toma de datos a largo plazo consistente en batimetrías de periodicidad semestral. Hasta el momento se dispone de 9 levantamientos, desde diciembre de 1991 hasta diciembre de 1995. En la fig.3.6 se mostraba la ubicación de los perfiles elegidos para el estudio: el P-19 apoyado en laja al norte de la playa y el P-45 más meridional y completo. De igual modo, una representación de todos los perfiles tomados se ofrecía en la fig.3.8. Se procedió a la aplicación de las F.O.E. a los datos originales, presentándose las componentes de los perfiles completos y con laja en las fig.3.9 y 3.10 respectivamente . En aquel punto nos limitamos a analizar la 1ª componente transversal, asimilable al perfil medio o de no variabilidad, al haber constatado que la componente temporal asociada era constante con el transcurrir del tiempo.

Para considerar la variabilidad a largo plazo nos vemos precisados a investigar las componentes 2ª y siguientes. No obstante, el porcentaje de varianza explicado es muy poco significativo para éstas (ver tabla adjunta), por lo que procederemos a la resta de la media de los datos o, lo que es lo mismo, a la supresión del perfil medio.

	% de Varianza explicada	
	<i>Perfil con laja</i>	<i>Perfil sin laja</i>
<i>1ª comp</i>	98.5	99.38
<i>2ª comp</i>	0.89	0.33
<i>3ª comp</i>	0.29	0.13

En la gráfica asignada al perfil con laja (fig.5.1) se aprecia como la 1ª componente transversal corresponde a un proceso de erosión-acreción generalizado a todo lo ancho del perfil con un máximo al pie del talud. La componente temporal, con alternancias de sentido semestrales, tiene una tendencia erosiva desde el principio. La 2ª componente transversal representa un basculamiento con pivote en torno a la bajamar viva ($\approx +0.50$), y no alrededor de la media carrera de marea ($\approx +2.00$) como veremos que sucede a corto y medio plazo. Su componente temporal asociada, aunque también con alternancias semestrales, mantuvo el signo y por tanto una pendiente relativamente fuerte o de verano hasta este último invierno.

El orden de importancia de los dos factores antes mencionados cambia al estudiar el perfil sin laja (fig.5.2) . En este caso la 1ª componente viene a significar un basculamiento alrededor de la bajamar viva, con acumulación de arena (formación-desaparición de barra) a la profundidad -2.00. En la zona intermareal aparecen dos picos en las cotas +1.00 y +3.00 coincidiendo con las pleamares y bajamares medias y que supondrían una disminución de la pendiente en esas partes del estrán en las que durante más tiempo actúa el oleaje por corresponderse con las estoas de la marea. La componente temporal es similar a la del perfil con laja: variaciones semestrales perfil verano-invierno. Con menos importancia en cuanto a la explicación de la varianza de los datos (ver tabla adjunta) tenemos aquí la erosión-acreción generalizada (2ª componente) que cubre desde la playa seca hasta la cota -2.00 y que vendría a marcar un pie de perfil activo en lo referente a volumen de sedimento removido.

Veamos en la tabla adjunta, en que se representan los valores del % de varianza explicada por las distintas componentes E.O.F. una vez restada la media de los datos, cual sería la importancia relativa de los distintos fenómenos físicos asociados a las mismas y para los dos perfiles tipo en cuestión, con y sin laja.

DATOS SIN LA MEDIA	% de Varianza explicada	
	<i>Perfil con laja</i>	<i>Perfil sin laja</i>
<i>1ª comp</i>	56.10 erosión generalizada	54.00 basculamiento
<i>2ª comp</i>	22.30 basculamiento	20.90 erosión generalizada

Comprobamos así que los resultados prácticos de la playa Victoria corroboran las hipótesis teóricas que habíamos planteado.

No finalizemos sin resaltar una observación acerca de la comparación entre los dos perfiles tipo frente a la erosión generalizada. Fijémonos en como la componente transversal en el perfil sin laja es casi constante a todo lo largo del mismo, desde la berma seca hasta la isobata -2.00 ; esto equivale a considerar una traslación del perfil hacia tierra de modo paralelo a sí mismo. Por contra, en el perfil con laja se trata de un aporte-retirada de arena más concentrado en su pie.

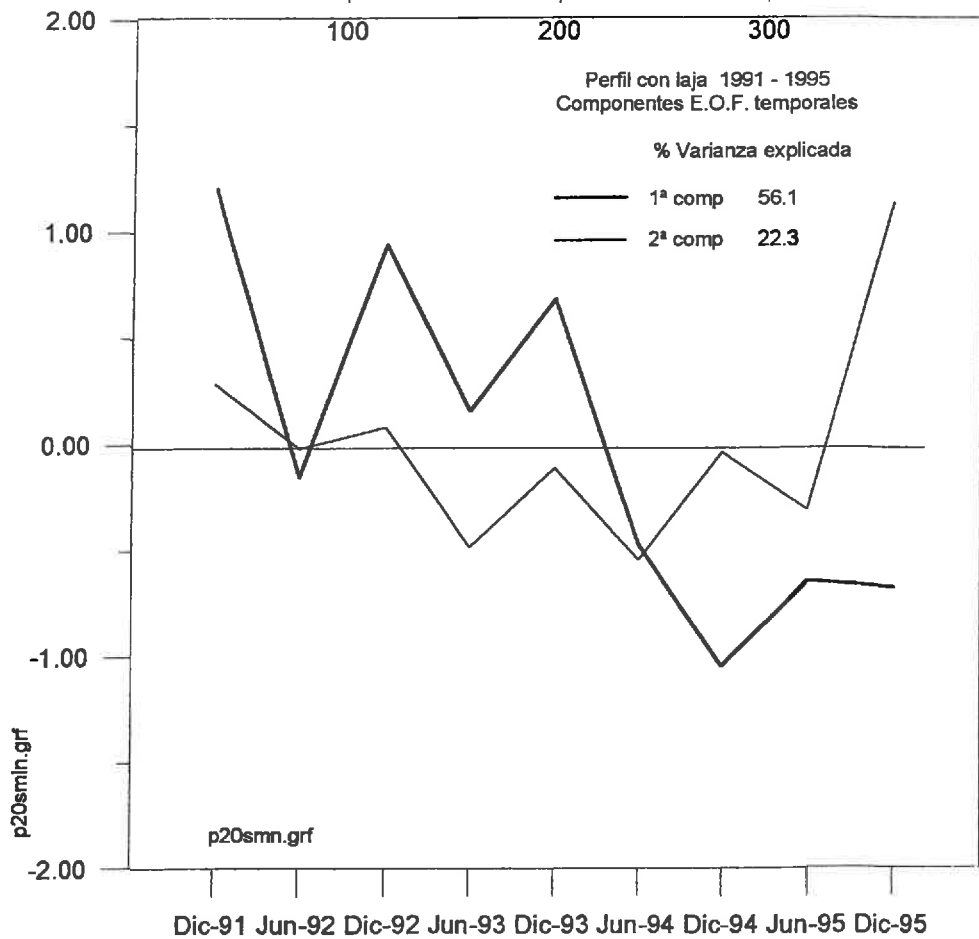
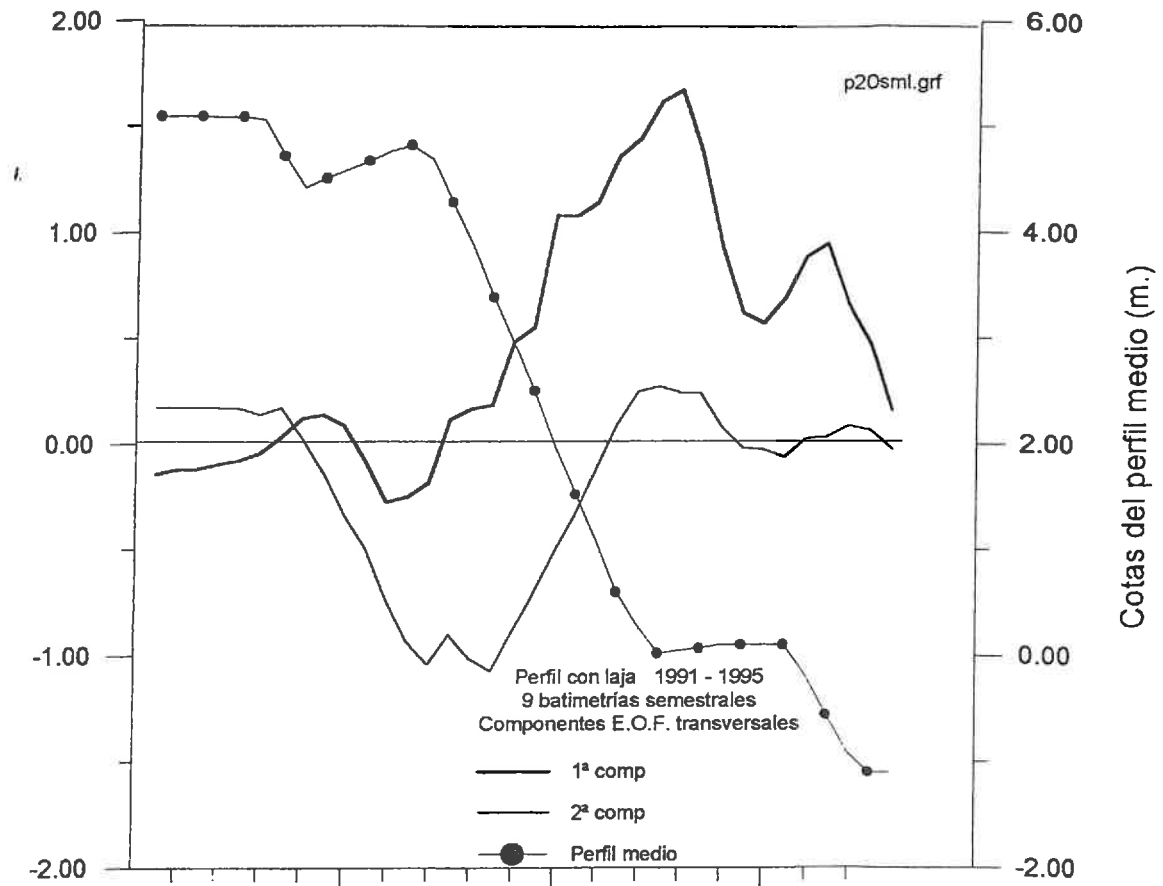


fig.5.1 Componentes transversal y temporal del perfil con laja
Variabilidad a largo plazo

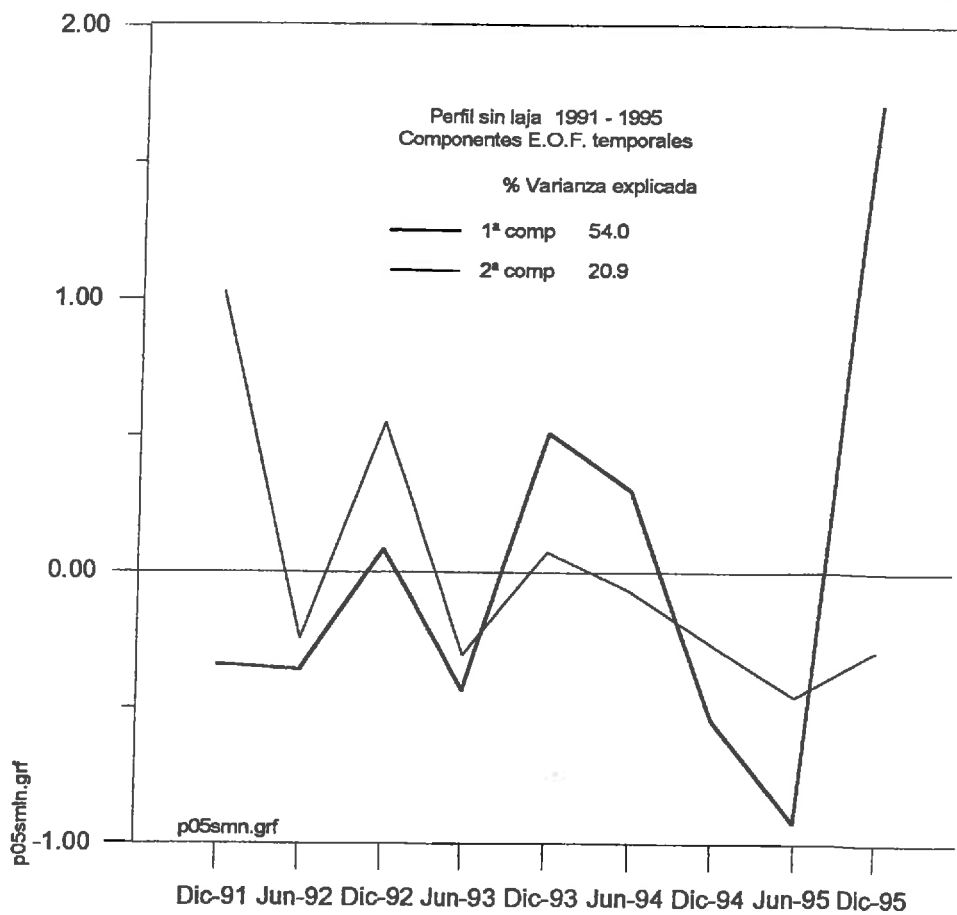
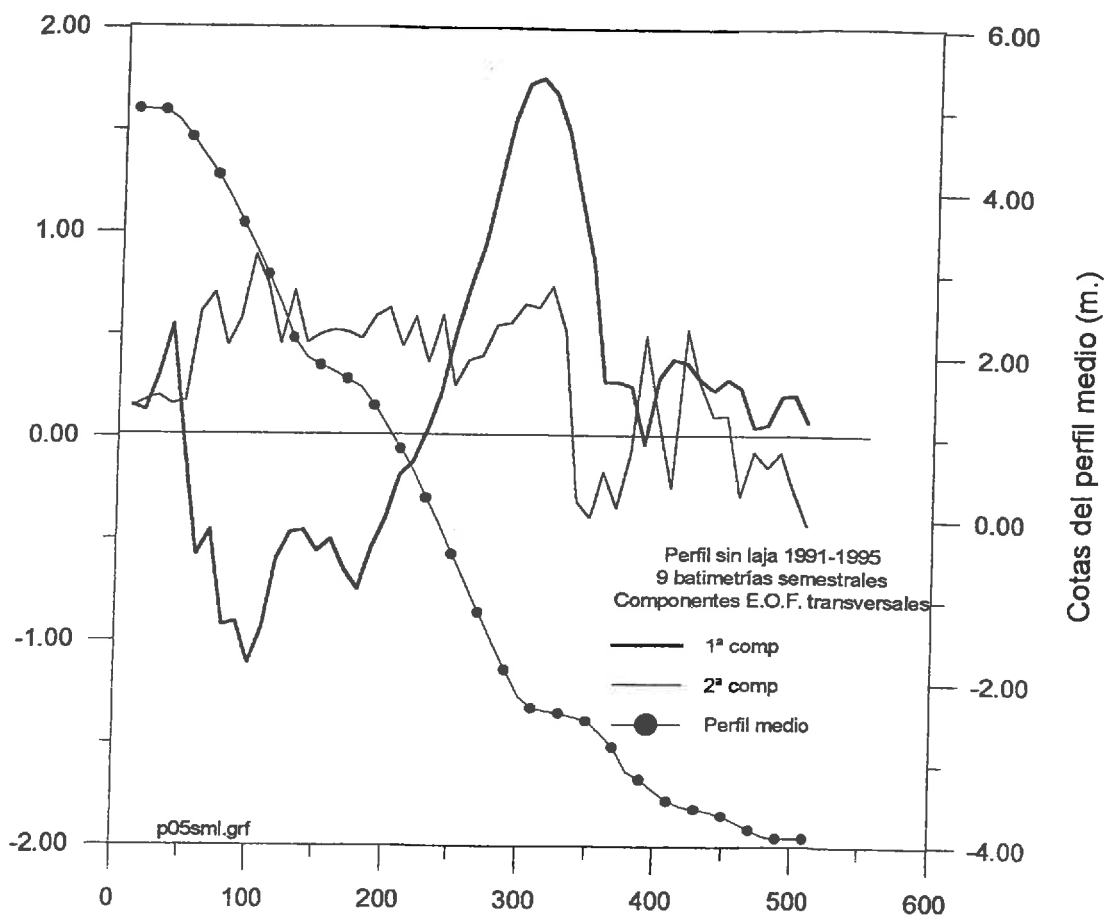


fig.5.2 Componentes transversal y temporal del perfil sin laja
Variabilidad a largo plazo

5.3.- RESUMEN.

El perfil con laja sufre una erosión irreversible, al viajar el grano de arena por sobre el estrato rocoso y caer por su talud, muy superior a la del perfil no apoyado. Este último con una pendiente arenosa sumergida mucho más suave permite la recuperación de dicho material con las ondas de largo período.

La aplicación de las F.O.E. nos permite afirmar que el fenómeno que más explica la variabilidad de los datos recogidos en el perfil apoyado es la erosión generalizada, siendo el basculamiento alrededor de la cota +2.00 un fenómeno secundario frente a aquella. En cambio, para el perfil no apoyado es el basculamiento con punto pivote alrededor de la cota 0.00 (aproximadamente la bajamar viva) el fenómeno más importante.

CAPITULO VI
VARIABILIDAD A MEDIO PLAZO

VI.- VARIABILIDAD A MEDIO PLAZO

6.1.- CRITERIOS TEÓRICOS.

Consideraremos como medio plazo la escala de tiempo abarcada por una temporada completa. Intentaremos averiguar cuáles han de ser las variaciones experimentadas por un perfil (ya sea apoyado o no sobre una laja) a lo largo de un año. No sólo los cambios acaecidos por la sucesión estados de bonanza- temporales, sino la velocidad con que se producen dichos cambios, tanto de erosión como de recuperación del sedimento.

En cuanto conozcamos ese dato podremos responder a la cuestión de si es necesaria alguna actuación para garantizar un mínimo de playa seca. También sabremos cuándo hay que efectuarla y si es más conveniente una recarga con material de fuera de nuestra unidad fisiográfica, ó bien basta con una redistribución de la arena dentro del propio perfil aéreo. Esta solución, mucho más económica, se ejecutaría aprovechando las bajamares vivas para trasladar el sedimento desde la parte inferior del estrán a la superior y acelerando, así, el proceso de recuperación.

No se deducen muchas nuevas diferencias entre los perfiles apoyados o completos por el hecho de estudiar las variaciones a medio plazo o anuales frente a las de largo plazo o interanuales. Recordemos, eso sí, lo ya mencionado anteriormente: el perfil apoyado, al disponer de una laja rocosa que limita la energía incidente del oleaje, es mucho más rígido en cuanto a la forma y más lento en cuanto a la velocidad de cambio que el perfil libre o completo.

6.2.- APLICACIÓN A LA PLAYA VICTORIA

6.2.1.- Comparación entre perfiles.

Al intentar analizar las diferencias morfodinámicas entre ambos tipos de perfiles pero en la escala de medio plazo, deberemos modificar nuestra estrategia de toma de datos. Puesto que uno de los objetivos fijados es la determinación de tasas de erosión y recuperación de la playa con el fin de conocer las posibles necesidades de material con vistas a la temporada estival, se decide que la periodicidad entre levantamientos sea quincenal. Se tratará únicamente de topografía mediante

distanciómetro efectuada en horas de bajamar e introduciéndose el peón portaprisma lo máximo posible. Sólo dispondremos de datos hasta la -1.00, pero debemos recordar que ésa es precisamente la profundidad a la que se encuentra la laja; por otro lado gozaremos de una mayor precisión, rapidez, independencia del estado de la mar y economía.

Los perfiles P19 (con laja) y P45 (sin laja) ya fueron ubicados en otro capítulo anterior (ver fig. 3.6) . La campaña dio comienzo el 1 de abril de 1995 y concluyó el 1 de marzo de 1996. Se trata pues de un conjunto de 23 series temporales, compuestas en el caso del perfil con laja de sucesiones de 22 puntos separados entre sí 10 metros y para el perfil libre (P45) de grupos de 25 puntos con idéntica separación.

Aplicando el programa TUCKALS3, un 3PCA (Three Way Principal Component Analysis) , puesto a punto en la Universidad de Leiden por el profesor *Kroonenberg (1983)* se obtuvieron unas componentes cuya representación gráfica se presenta en las hojas siguientes. En la fig. 6.1 se muestran las referentes al perfil apoyado en laja, mientras que en la fig. 6.2 tenemos las del perfil libre o completo.

Puede apreciarse como el % de varianza explicada supera, en ambos casos el 99% para la 1ª componente, la que definiría el perfil medio. La componente temporal asociada tiene un valor casi constante e igual a la unidad a lo largo de todo el ejercicio hasta finales de diciembre en que comienza a decrecer hasta un cierto valor a partir del cual vuelve a permanecer constante. Se trataría por consiguiente, tanto en el P19 como en el P45, de un retroceso generalizado de todo el perfil, paralelamente a sí mismo. Por tanto, sería esta autofunción la que nos capacitaría para conocer cuál ha sido el retroceso real de la línea de playa, independientemente del cambio de inclinación que haya experimentado debido a la variación del clima marítimo de verano a invierno. En cambio, la 2ª componente podríamos relacionarla con el antes mencionado basculamiento o cambio de pendiente, pues la componente transversal nos señala, en el perfil con laja, 3 zonas claramente diferenciadas : la berma de coronación, y las partes superior e inferior del estrán. El cruce por 0 de esa función se produce alrededor de la cota +2.00, que será el punto pivote con una casi nula variabilidad en altura y alrededor del cual oscila el frente de playa. La parte temporal asociada cambia de signo a mediados de diciembre, lo que supone un cambio de la pendiente de verano (más inclinada) a la de invierno (mucho más tendida). En el perfil no apoyado no aparece ese

basculamiento, pues el punto pivote estaría precisamente en la cota límite de topografía (alrededor de -1.00), como ya pudimos apreciar en el capítulo anterior dedicado a la variación a largo plazo (ver fig. 5.2) .

Morfológicamente seguimos apreciando una gran diferencia entre ambos perfiles medios a lo largo del año. No sólo el perfil con laja tiene una pendiente de alrededor del 4.5% muy superior a la del perfil libre, que es del orden del 2.5%, sino que también tiene mucho más marcada la berma de la pleamar.

6.2.2.- El transporte transversal.

Para obtener las tasas de erosión-acreción precisamos conocer previamente el transporte de arena existente en la playa. Supondremos que nuestros perfiles están ubicados en zonas anchas lo suficientemente homogéneas y que los datos a analizar cubren un período de tiempo suficientemente pequeño como para poder considerar que el transporte transversal va a ser el único responsable de los cambios acaecidos.

De forma similar a la operada por *Medina et al (1991)* , dividiremos al perfil en celdillas de igual anchura y cuyos límites serán los puntos interpolados. En cada una de ellas se resolverá la ecuación de continuidad

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = 0$$

cuyo significado físico se resume en afirmar que la variación transversal del transporte de arena se invierte en modificar la altura de la celdilla con el transcurrir del tiempo. La resolución de la ecuación diferencial se efectúa mediante diferencias finitas con el programa EROTRANS. Para un mayor detalle acudir al Anejo 3 sobre Fundamentos teóricos de los programas utilizados.

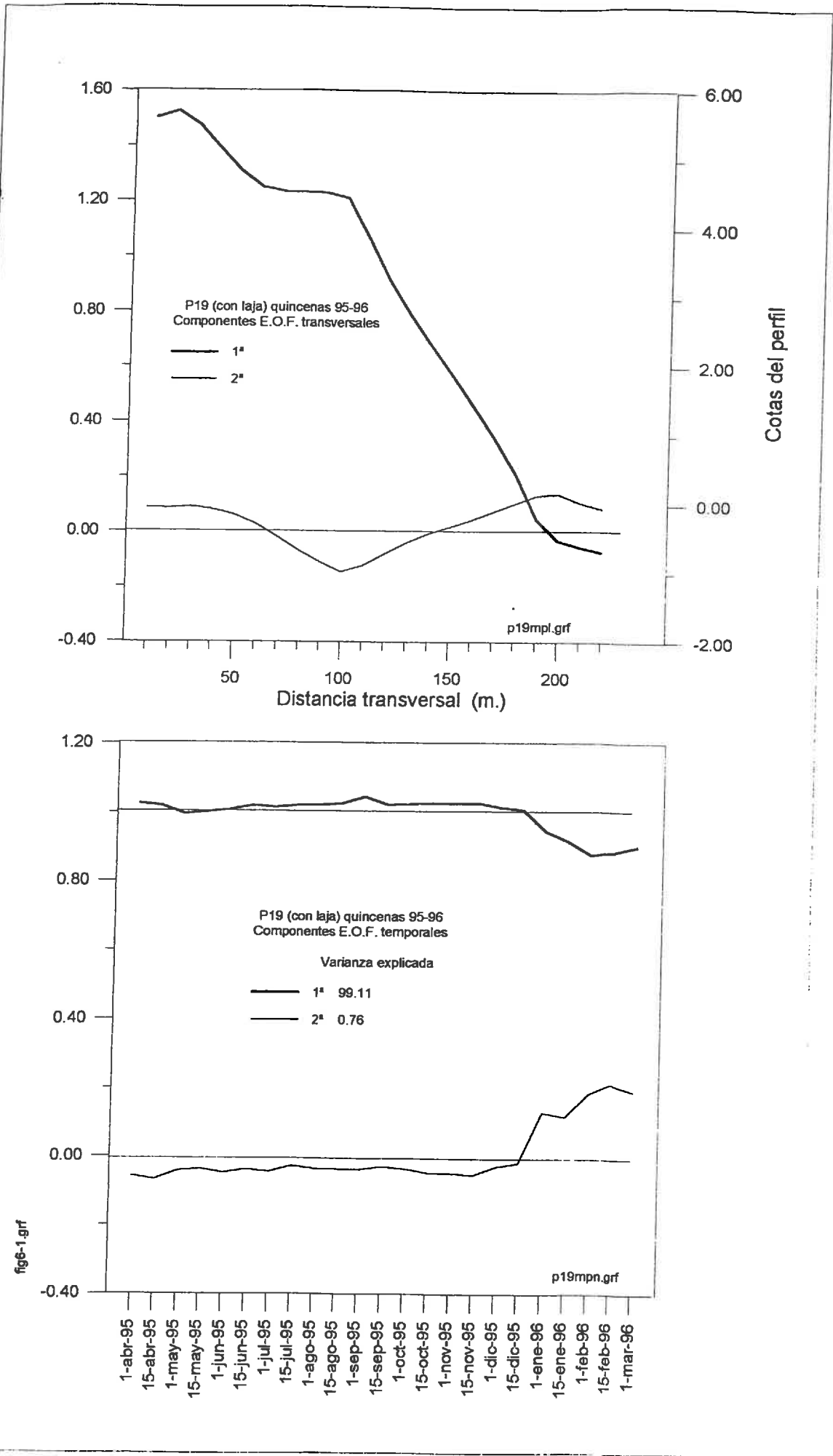


fig. 6.1 Componentes transversal y temporal del perfil con laja

1.

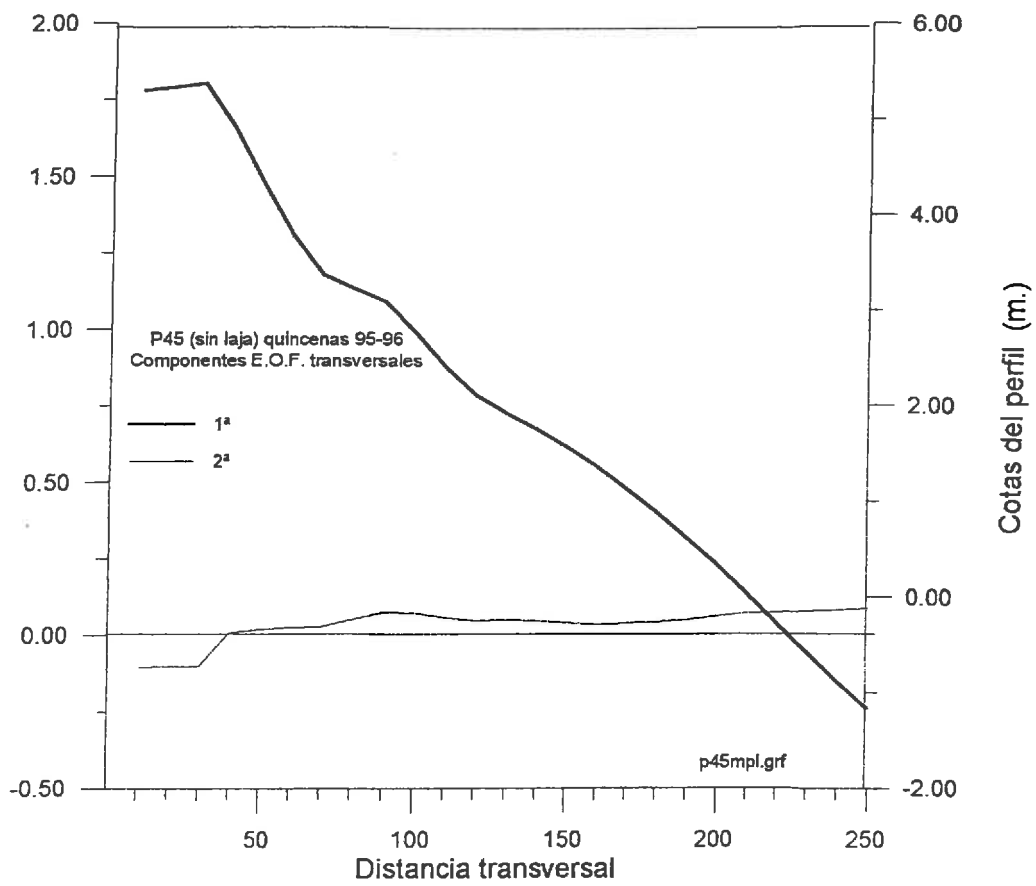


fig6-2.grf

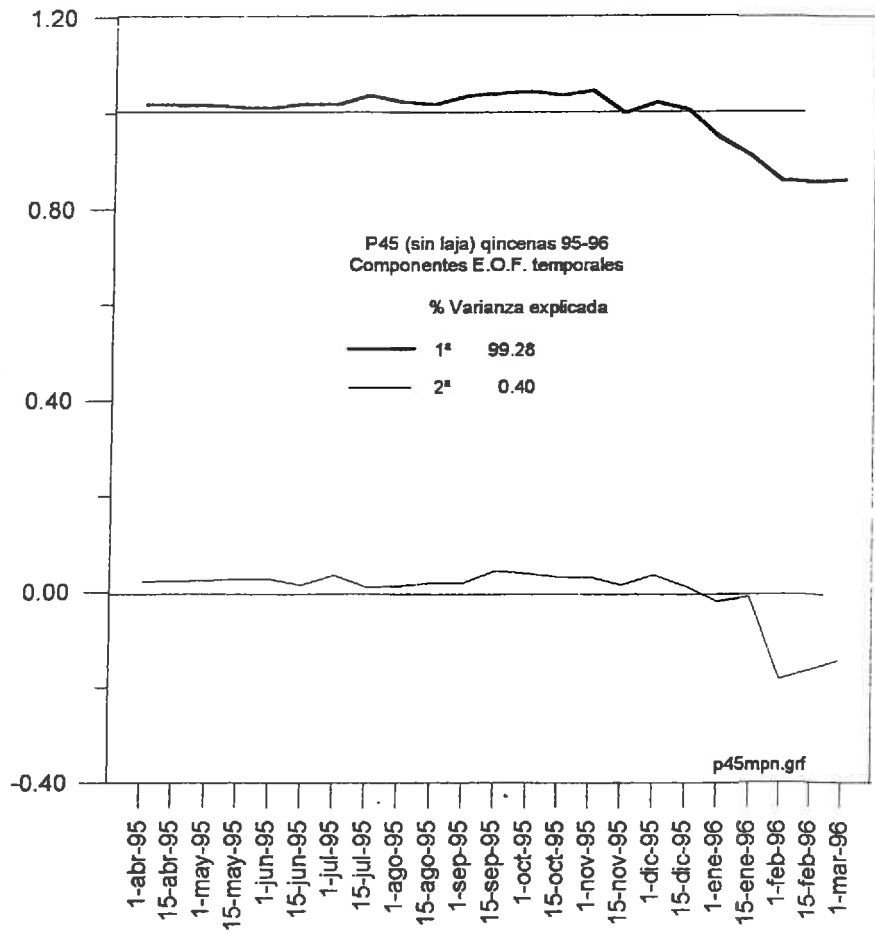


fig. 6.2 Componentes transversal y temporal del perfil sin laja

Obtendremos 22 series temporales de 21 y 24 puntos para los perfiles P19 y P45 respectivamente, a las que aplicaremos el método de las F.O.E. y cuya representación gráfica aparece en las figs. 6.3 y 6.4.

En el perfil apoyado, la primera componente transversal muestra una zonificación en dos partes separadas por la cota +2.00. Se trata de un movimiento de sedimento de la parte superior del estrán a la inferior y viceversa. Encontramos de nuevo cómo el punto central, con transporte transversal nulo, sería el pivote sobre el que bascularía la pendiente del perfil. Las celdillas de mayor transporte serían las ubicadas alrededor de la pleamar y de la bajamar. La componente temporal tiene pequeñas oscilaciones alrededor del valor cero, asociadas a alternancias entre períodos de calma y ocasionales marejadillas. Es con los temporales que sufre la costa a partir de enero del 96 cuando se aprecian dos picos y se hace fuertemente positiva, lo que presupone una erosión en cabeza del talud con depósito al pie y, por consiguiente, una suavización de la inclinación de todo el perfil.

La 2ª componente temporal, en trazo más suave, muestra las mismas alternancias pero un sólo pico. La función espacial asociada tiene unos puntos pivote en la pleamar y en la bajamar. Se trata de una suavización suplementaria en aquellas zonas del estrán donde, debido a la curva de marea, más tiempo actúa el temporal.

El perfil P45 (sin laja) da, a diferencia del P19, una mayor importancia a esta última táctica defensiva, la de los dos puntos pivote, a las cotas +2.80 y +1.20 que marcan tres zonas en el perfil; se forman dos taludes suaves a las alturas de las pleamares y bajamares a costa de un regruesamiento en la parte central del talud, donde, a causa de la sinusoide de la marea, es dónde menos tiempo actúa el temporal. Con menos importancia, la 2ª componente muestra un comportamiento de basculamiento playa emergida-sumergida pero con el punto de giro esta vez sobre la cota 0.00.

Ahora aparece como obvia la lógica del distinto comportamiento de ambos perfiles. El perfil con laja dispone de menos arena que movilizar, y es por ello por lo que frente al temporal bascula, en primer lugar, todo su perfil activo, que es únicamente el estrán, alrededor de su punto medio que es la cota +2.00. Posteriormente, cuando llegan nuevos y más importantes y duraderos temporales,

pone en juego esa taluzación suplementaria en los puntos de pleamar y bajamar, en las zonas donde durante más tiempo interacciona el oleaje.

Por contra, el perfil completo tiene un perfil activo mucho mayor, lo que conlleva una reserva de arena muy superior. Primero actúa frente al temporal con la suavización del talud en los puntos de pleamar y bajamar, ya que esta solución es mucho más rápida que la de trasladar la arena desde la berma superior hasta el pie del talud para la formación de las barras y bajos correspondientes.

En el cuadro adjunto se expone la importancia de cada uno de estos fenómenos para los distintos tipos de perfil:

	% de Varianza explicada	
	<i>Perfil con laja</i>	<i>Perfil sin laja</i>
<i>Basculamiento de todo el perfil activo</i>	49.9	19.7
<i>Suavizar las zonas de pleamar-bajamar</i>	19.5	61.7

6.2.3.- Tasas de erosión y acrección.

Mediante la suma de los transportes individuales de cada celdilla obtendremos el transporte neto en el perfil para cada una de las campañas en m³/ml y día. Calcularemos, asimismo, el transporte neto acumulado a lo largo de todo el ejercicio. Ambas funciones, representadas en la fig. 6.5, resultan muy ilustrativas.

En el P19 (con laja) comienza la recuperación a partir del 1 de mayo. El ritmo es constante durante todo el verano hasta el 1 de septiembre. En esa época no se produce una gran variación en la altura de ola pero sí que se experimenta una tendencia alcista en el período. Esto repercute levemente en el parámetro adimensional Ω de velocidad de caída del grano (Dean, 1973), que según Wright

et al (1985) determina el estado modal de una playa. Véase la fig. 6.6 adjunta de ajustes estadísticos del oleaje. Puesto que el período permanece constante a lo largo de toda la playa, y para una ola determinada en alta mar la altura en la orilla queda disminuida en la zona con laja con respecto a la que no tiene ese fondo rocoso horizontal, entonces H/T es menor en el P19 que en el P45. Es otra manera de apreciar el porqué la playa con laja es más reflejante y el perfil libre es más disipativo. Además, el transporte se anula desde ese momento hasta mediados de noviembre y principios de diciembre. Con los temporales de enero se producen fuertes erosiones y rápidas recuperaciones.

Se detectan, pues, dos tipos de acrección:

- una de verano en que la arena sube desde el pie del talud hasta su parte superior, lenta (del orden de $0.4 \text{ m}^3/\text{ml}$ y día), que en el año 95 dura 4 meses (mayo-agosto), y que tuvo una aportación total de $40 \text{ m}^3/\text{ml}$ con una media relativamente constante de $10 \text{ m}^3/\text{ml}$ y mes, y
- una de invierno, que tras un fuerte temporal puede alcanzar los $20 \text{ m}^3/\text{ml}$ y mes (el doble que en el estío). Si pudiéramos asignar una personalidad a la playa diríamos que es como si ésta detectara que todavía nos encontramos en invierno y que pueden venir más temporales. Así, no se fiaría de esa bonanza de circunstancias y aportaría arena, pero únicamente al pie del talud, formando una reserva y manteniendo la pendiente suave.

El perfil P45, no apoyado en estrato rocoso horizontal superficial, no está completo en estas series de datos topográficos. Del estudio de las batimetrías efectuadas en la zona dedujimos que su actividad alcanzaba algo más allá de la cota -3.00. Debemos, por tanto, ser prudentes a la hora de extraer conclusiones que afecten al perfil en su tramo sumergido.

Una cosa sí podemos asegurar: que los movimientos de arena son mucho más importantes en valor absoluto. Se trata de un equilibrio más dinámico, como se puede deducir de la observación de los valores de la tabla presentada a continuación. Igualmente puede remarcarse que el perfil de verano emergido ya se había conseguido en abril, que es donde comienza a ser nulo el transporte neto acumulado.

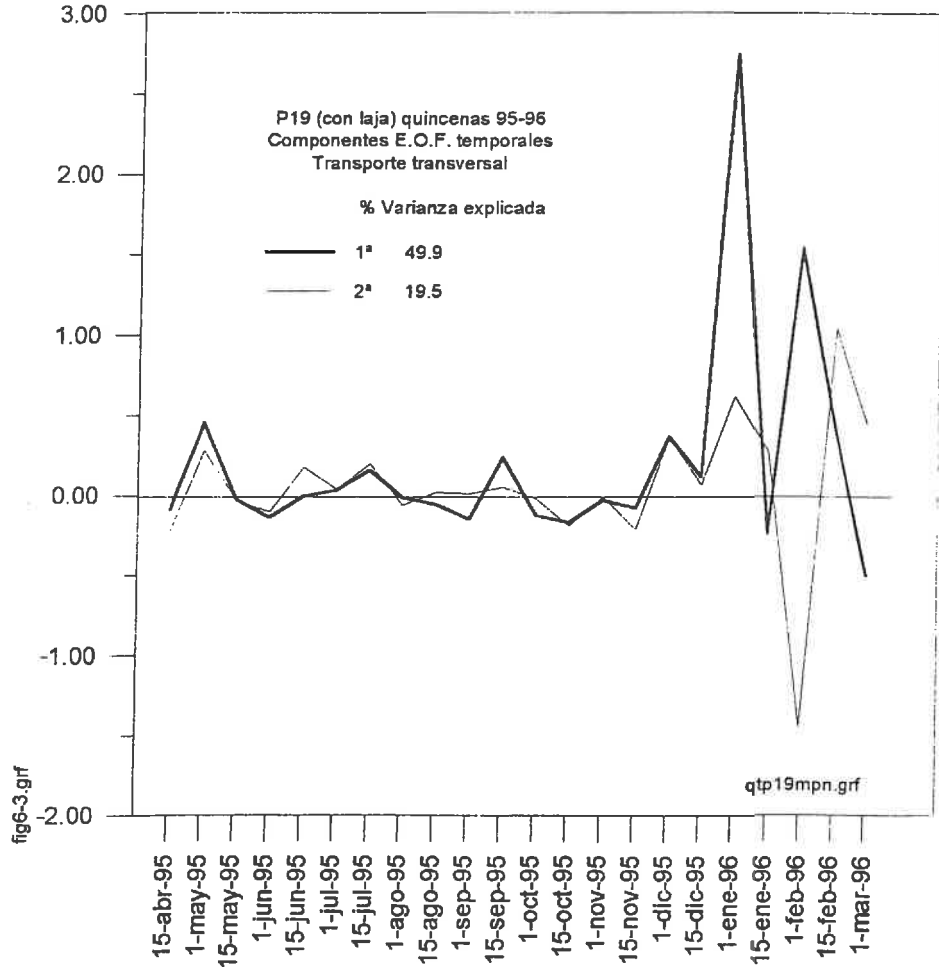
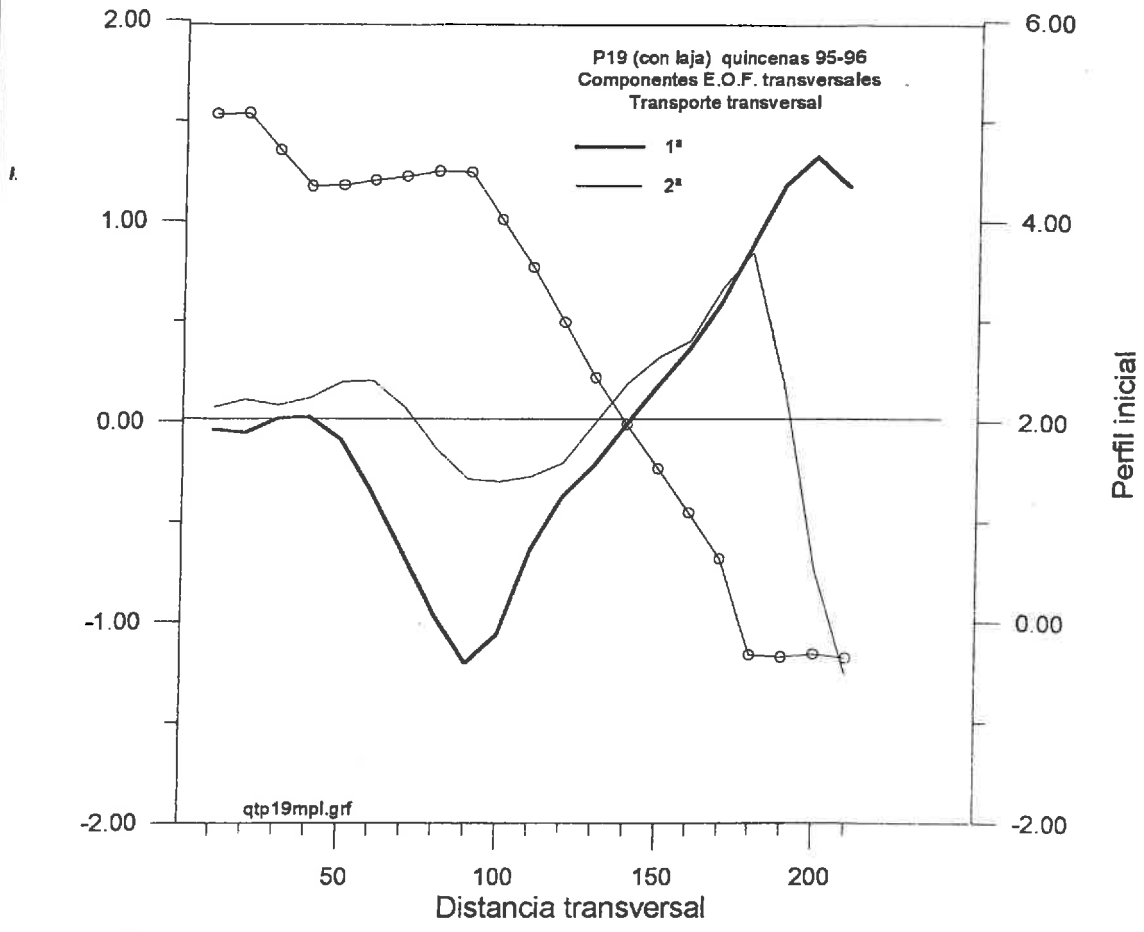


fig. 6.3 Componentes E.O.F. del transporte transversal en el perfil con laja

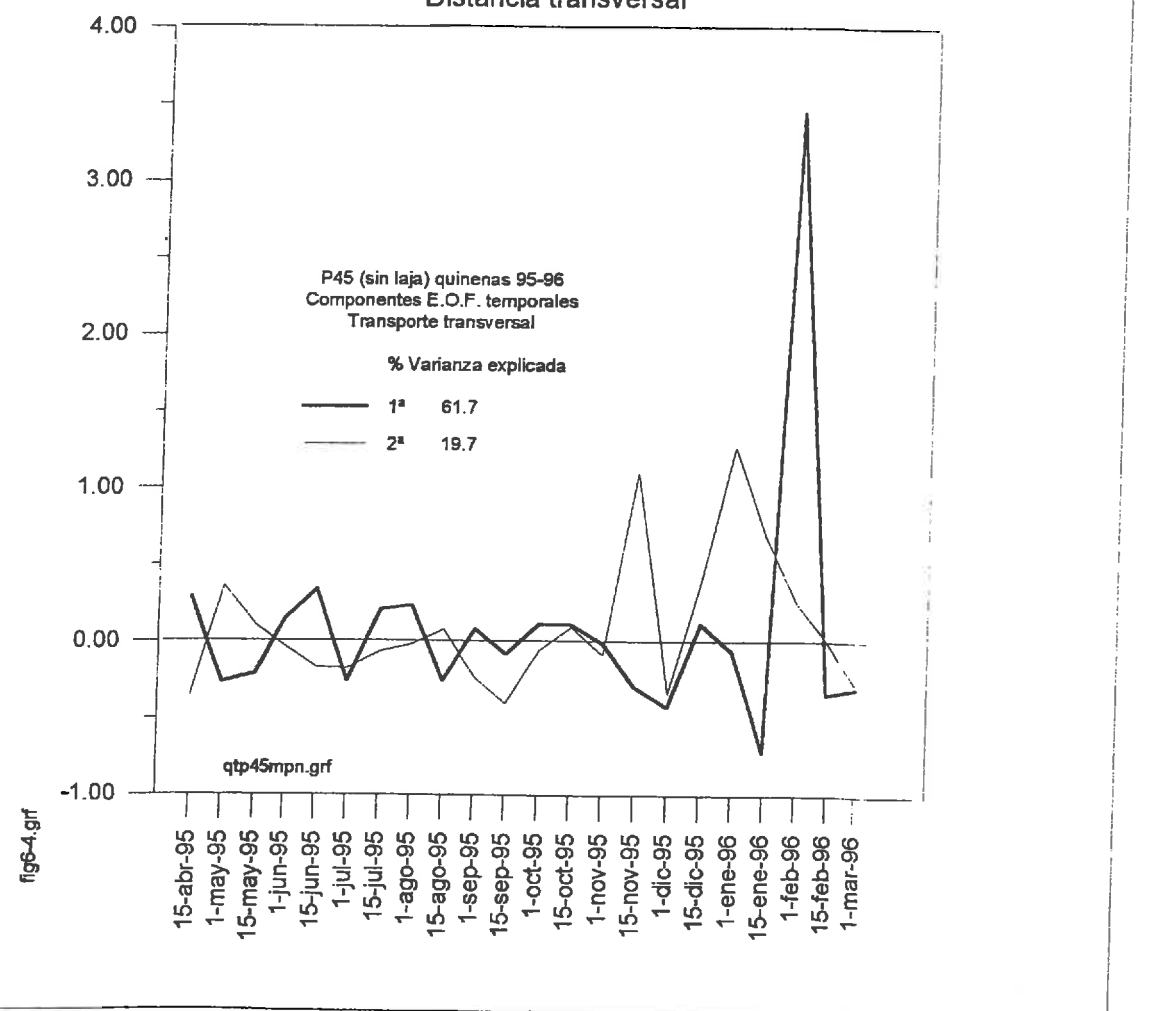
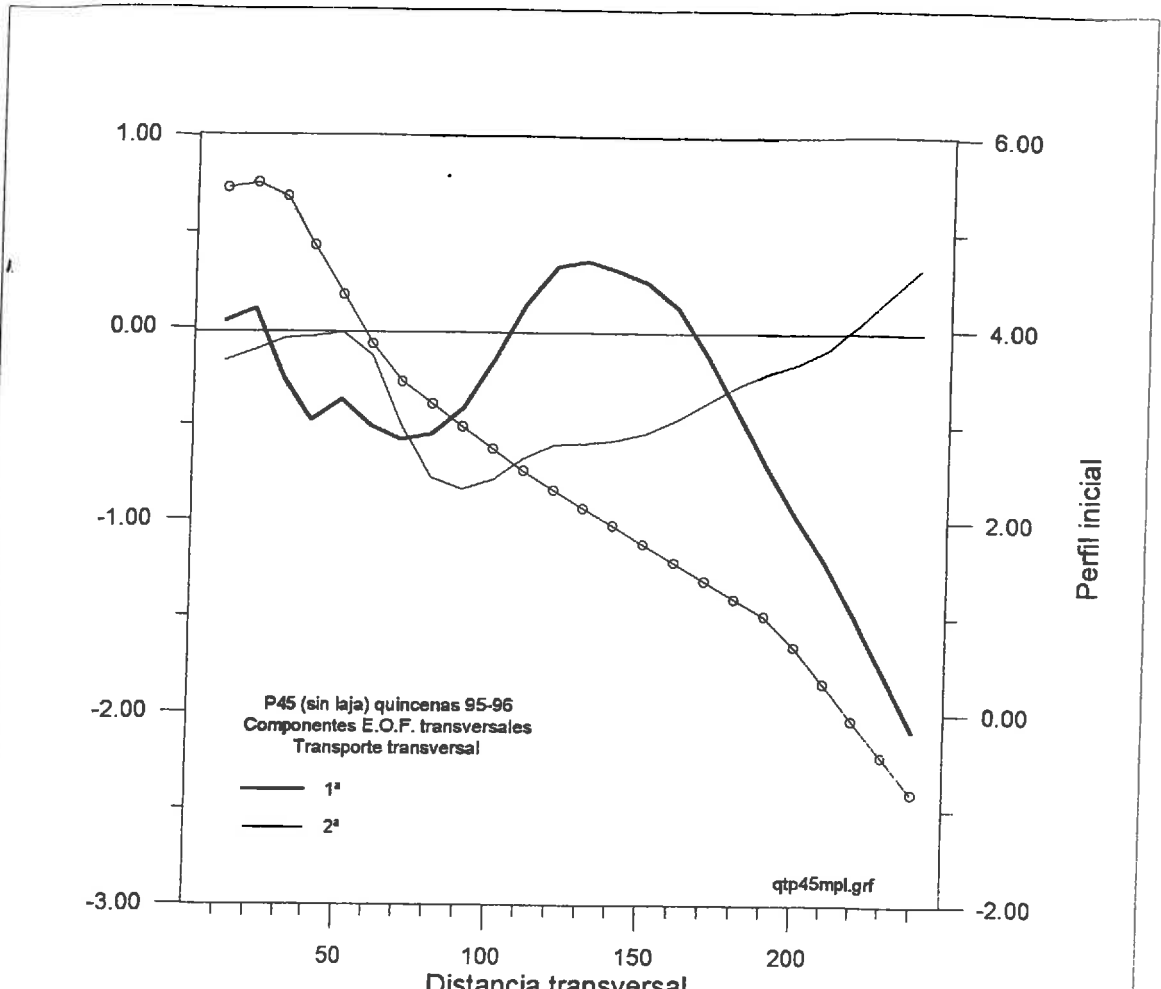


fig. 6.4 Componentes E.O.F. del transporte transversal en el perfil sin laja

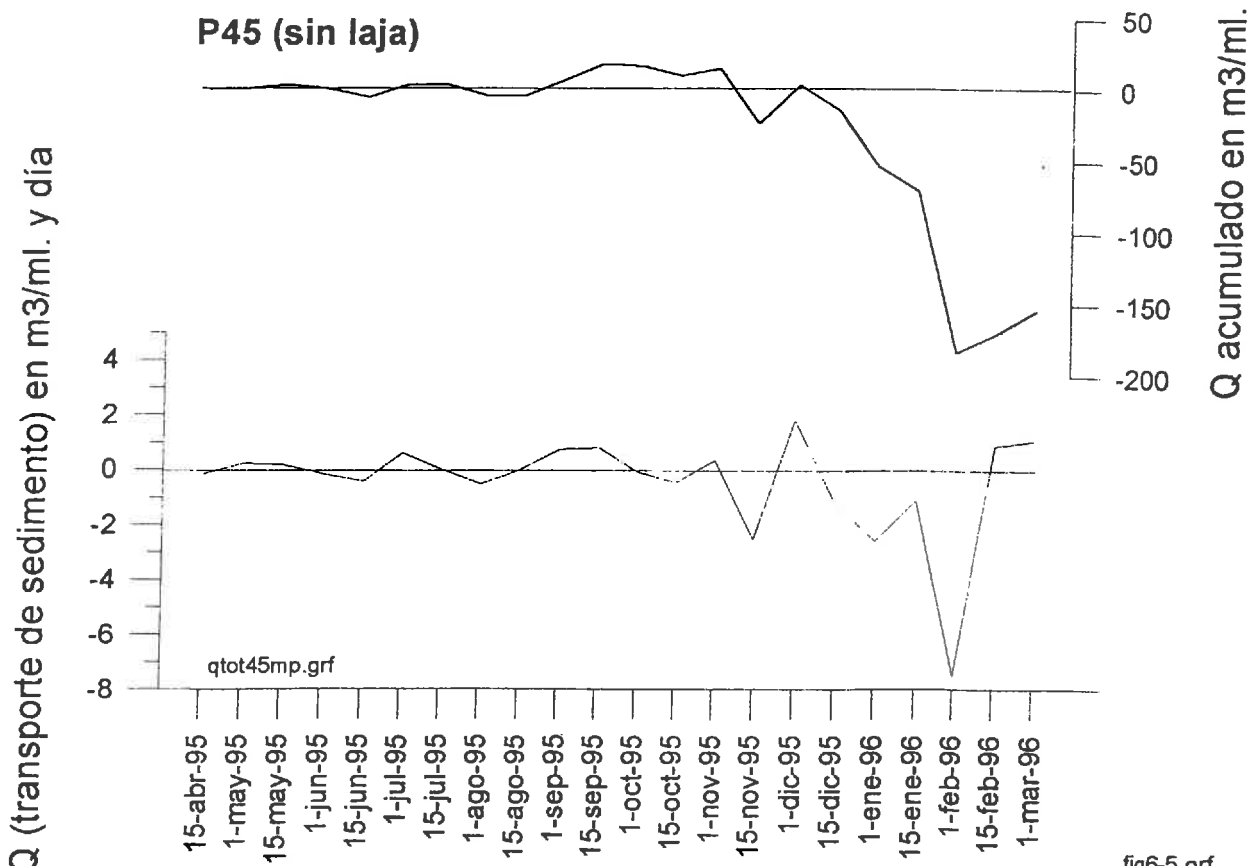
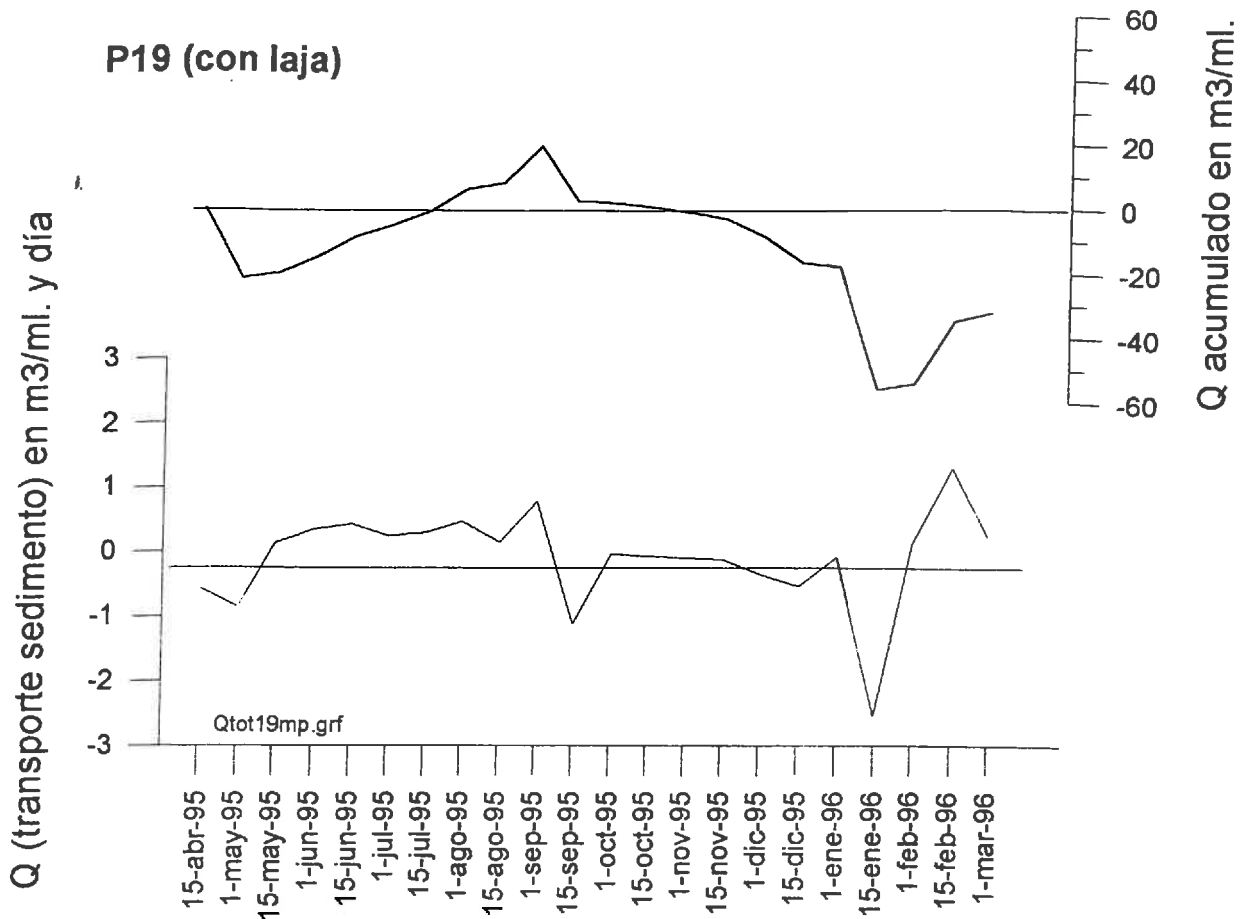


fig6-5.grf

fig. 6.5 Tasa de transporte de sedimento por día y acumulada

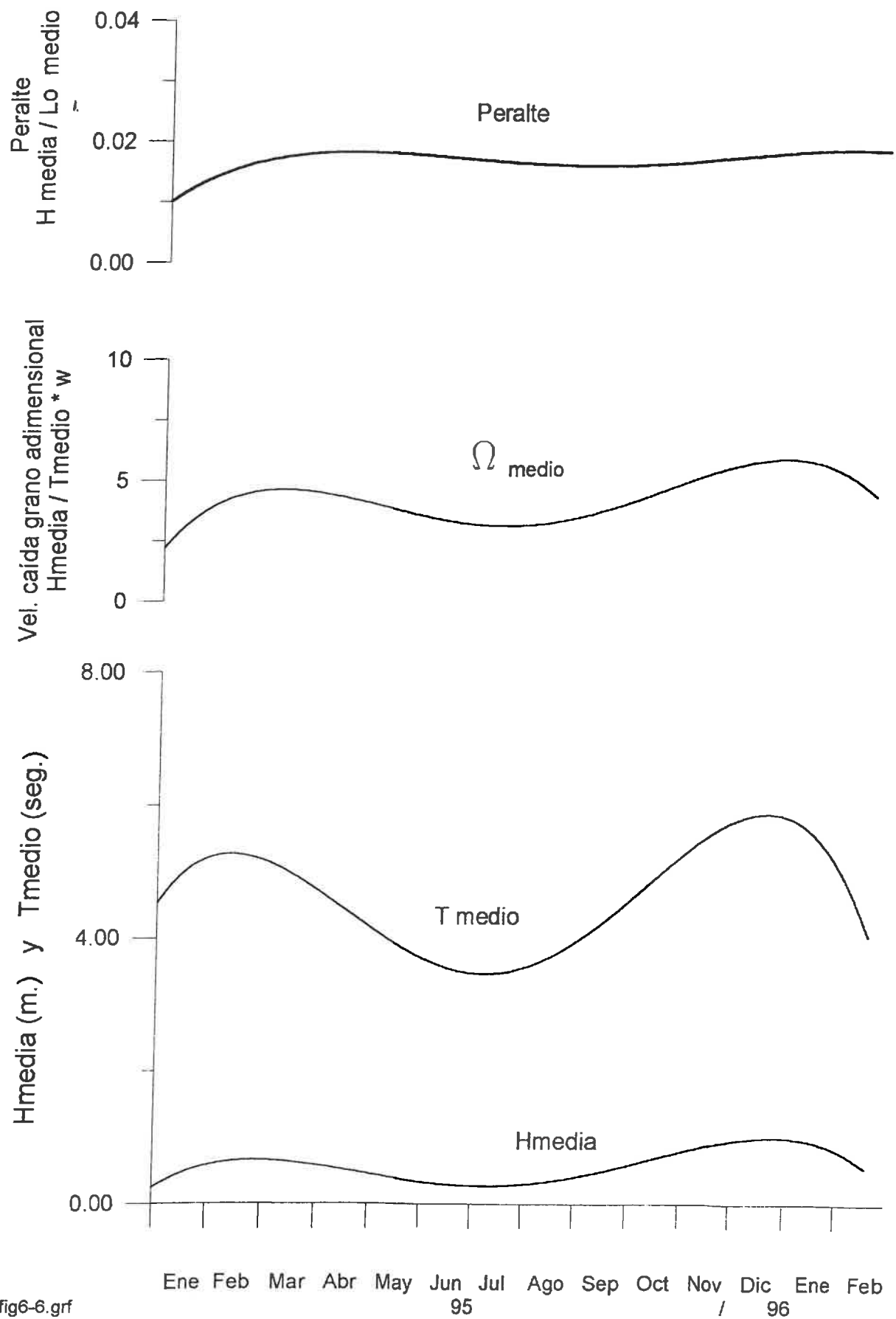


fig6-6.grf

Fig 6.6 Parámetros medios del oleaje durante 1995
Ajustes polinómicos de 4° grado

Si se hubiera transportado arena desde el pie del talud activo hacia la parte superior del estrán no hubiéramos podido detectar pérdidas en la playa sumergida pero sí acreciones en su parte visible. También seremos capaces de deducir valores de cambio o tasas de transporte en playa seca (aunque antes fueran netos para el P19 y ahora sólo puedan aplicarse a la playa emergida) .

Del análisis de las gráficas se han extraído unas tasas de erosión y acreción con las que se ha elaborado el siguiente cuadro resumen:

	Verano	Invierno	Verano	Invierno
	<i>Q en m³/ml.día</i>	<i>Q en m³/ml.día</i>	<i>Q m³/ml.mes</i>	<i>Q m³/ml.mes</i>
P19 (con laja)				
<i>Acreción</i>	0.4	0.8	10	20
<i>Erosión</i>		2.0		30
P45 (sin laja)				
<i>Acreción</i>	0.5	1.6	8	30
<i>Erosión</i>		7.1		120

6.2.4.- Tendencias con buen tiempo

Como se pudo apreciar y comprobar en el apartado anterior, los cambios experimentados por nuestro tramo de costa eran mucho más rápidos e importantes en valor absoluto durante los temporales de invierno que durante el verano. Así pues, vamos a borrar de nuestras series temporales los datos referentes a dichos temporales con la esperanza de que eso nos permita resaltar las tendencias existentes durante la época de bonanza.

Eliminaremos las últimas 8 tomas de datos, desde el 15 de noviembre del 95 hasta el 1 de marzo de 1996 ambas fechas inclusive. Al haber suprimido las variaciones invernales y al aplicar las F.O.E nos resultan unos porcentajes de explicación de la varianza aplicables a la 1ª componente (el perfil medio) superiores incluso a los de antes.

	P19 (con laja)		P45(sin laja)	
	todo el año	sin invierno	todo el año	sin invierno
1ª comp.	99.11	99.92	99.28	99.85
2ª comp.	0.76	0.04	0.40	0.10
3ª comp	0.04	0.02	0.22	0.02

Aparece como imprescindible el restarle la media a los datos para incrementar la importancia de los cambios frente a la estabilidad del perfil de equilibrio medio. Las nuevas componentes encontradas referidas a los perfiles apoyado en laja y libre se exponen en las figuras 6.7 y 6.8 respectivamente.

Surgen importantes diferencias en el comportamiento entre ambos perfiles:

- En el P19 (con laja) aparecen dos componentes de importancia similar. La 1ª componente transversal tiene cruces por cero en las cotas +4.00, +2.00 y 0.00, y se trata del ya conocido basculamiento en torno al punto medio de la carrera de marea. Su componente temporal asociada tiene un mínimo a mediados de abril, indicando cuando se consigue el perfil más pendiente o de verano, y se anula con periodicidad bimensual a mediados de junio, agosto y octubre, siempre con pendientes más tendidas que las del perfil medio, lo que puede suponer un retroceso de la línea de costa en verano. La 2ª componente transversal indica una erosión o acreción generalizada a todo lo ancho del perfil con máximos en las cotas +3.00 y +1.00. Al multiplicar dichos valores por los correspondientes de su componente temporal obtenemos una etapa de regresión de mediados de abril hasta mediados de julio y otra de acreción hasta finales de septiembre. Como curiosidad apuntar que los máximos de erosión y acreción se producen cuando según la 1ª componente no hay basculamiento alguno respecto al perfil medio.

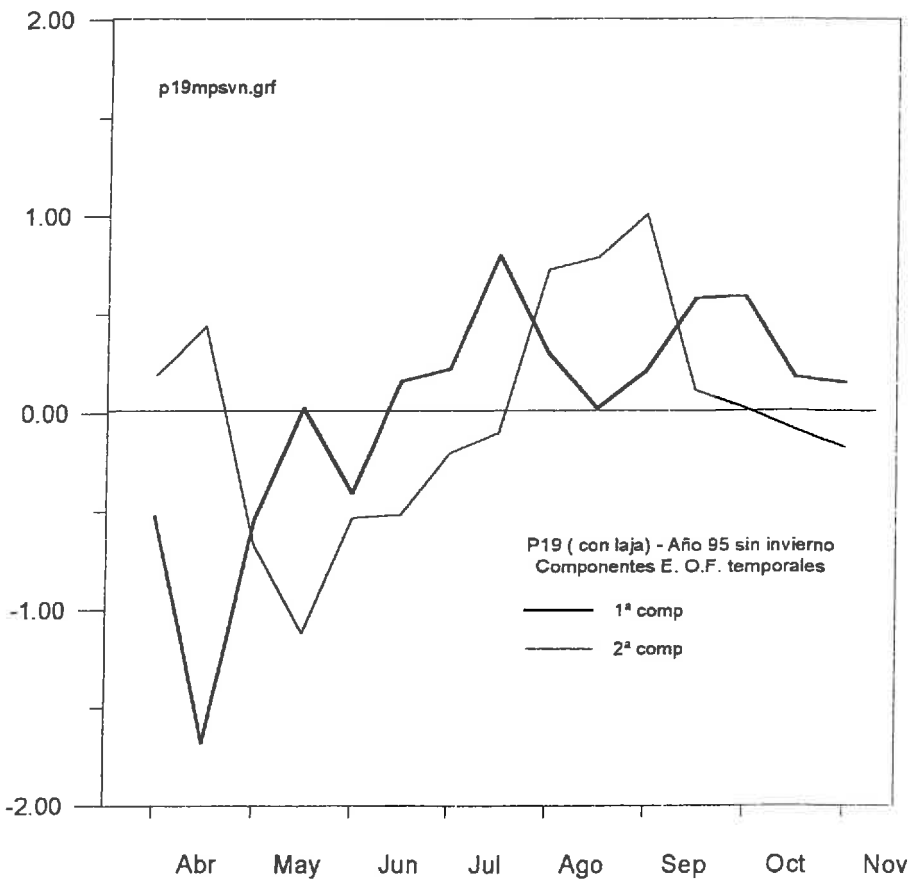
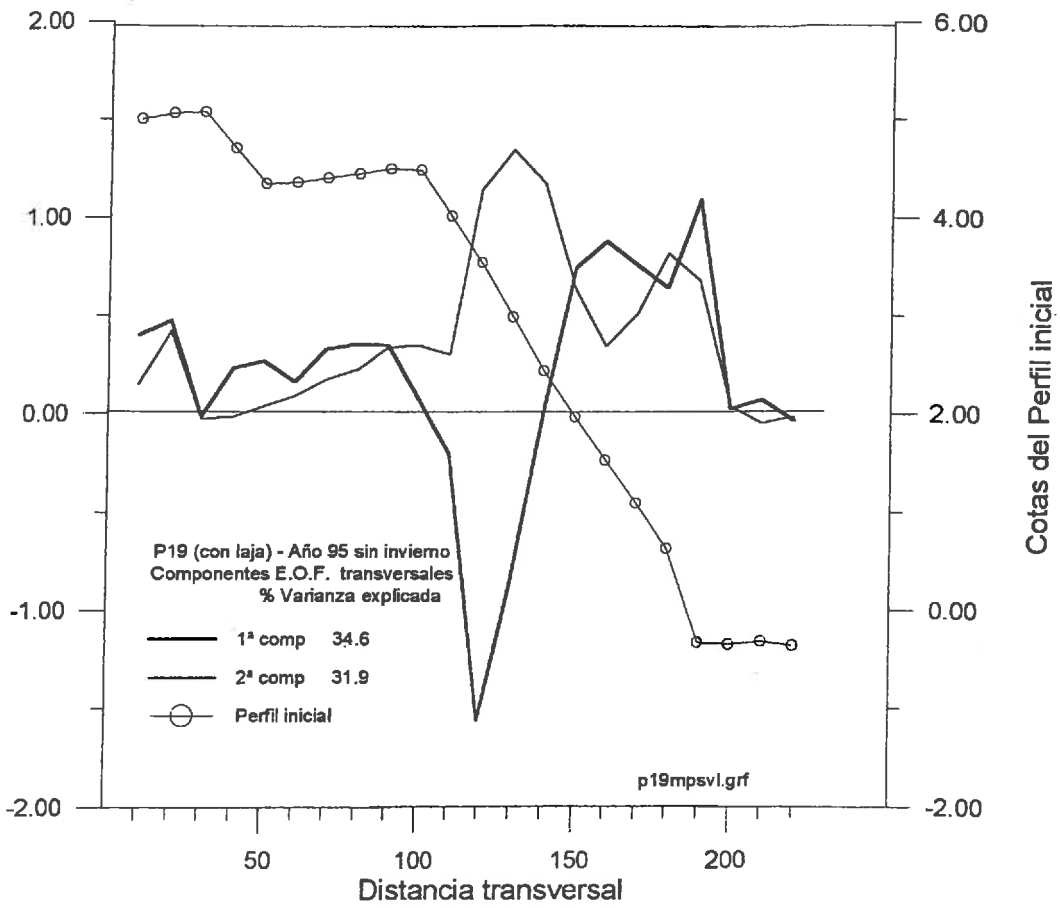


fig. 6.7 Componentes E.O.F. del perfil apoyado en laja
Año 1995 excluido el invierno

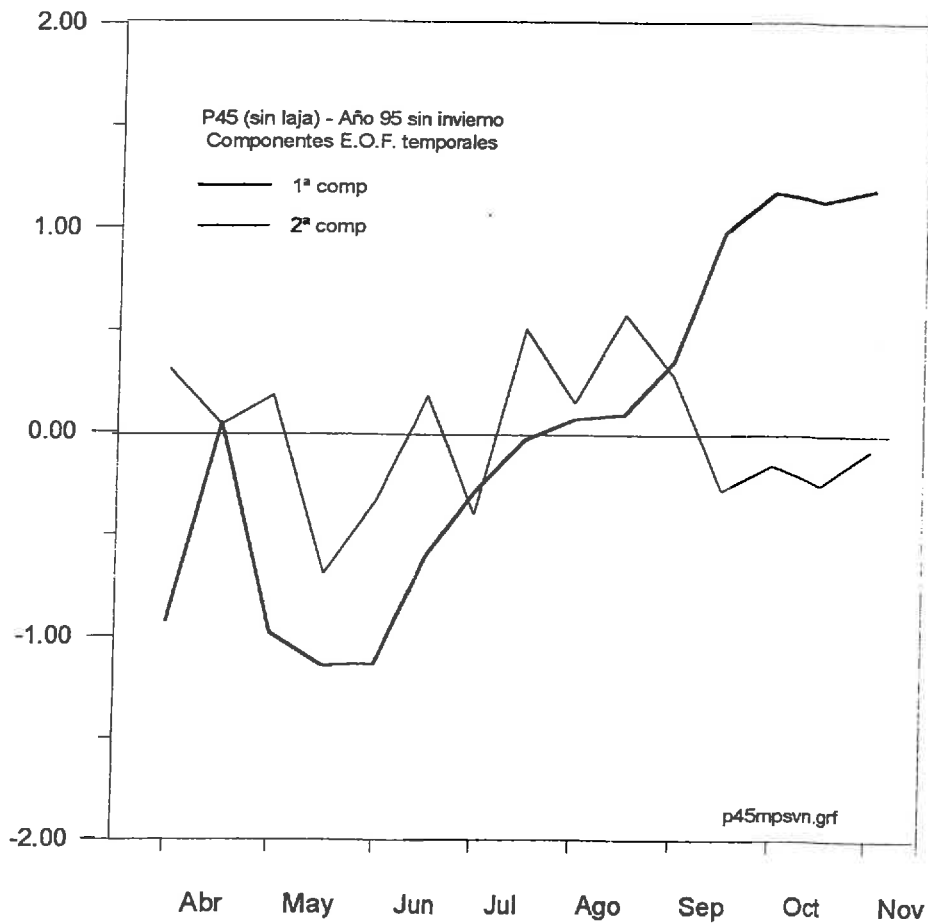
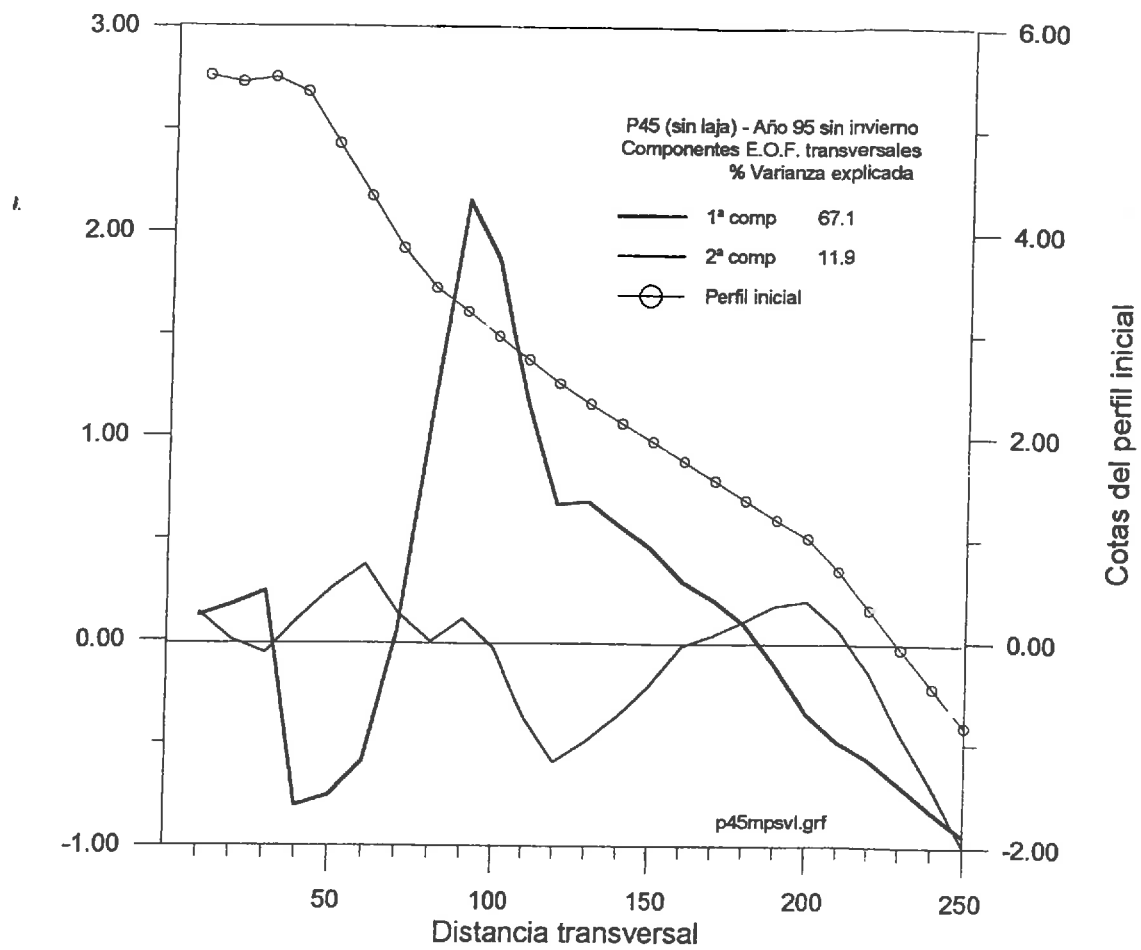


fig6-8.grf

fig. 6.8 Componentes E.O.F. del perfil libre o completo
Año 1995 excluido el invierno

- En el P45 (sin laja) la 1ª componente tiene una mayor importancia que la 2ª: un 67.1% frente a un 11.9%. El comportamiento del perfil ha variado con respecto a los meses de invierno. Mientras que con temporales se produce un basculamiento alrededor del punto de bajamar escorado (≈ 0.00), en la época estival el perfil gira alrededor de la cota +1.50. La componente temporal asociada tiene un mínimo amplio que cubre todo el mes de mayo y que señala el mes en que más tendido se encuentra el talud. Durante el mes de junio el perfil recupera parte de su inclinación hasta alcanzar la del perfil medio. Permanece constante sin variación alguna desde primeros de julio hasta mediados de agosto en que aumenta progresivamente su pendiente hasta primeros de octubre. Es en ese momento cuando se consigue la máxima pendiente (o lo que es lo mismo, la máxima superficie de playa seca), que se mantiene constante hasta la llegada de los temporales.

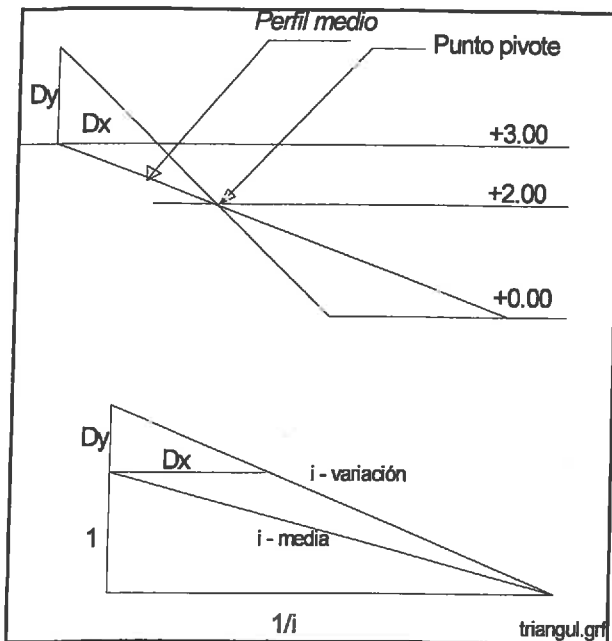
6.2.4.1.- Interpretación mediante reconstrucción de perfiles

Puesto que las dos componentes del P19 tenían importancia similar, vamos a reconstruir tres perfiles de los más significativos, a partir de sus componentes E.O.F., para comprobar nuestra interpretación.

El proceso reconstructivo tiene varias ventajas con respecto a la comparación simple de los perfiles de campo sin transformación matemática alguna. Se eliminan los ruidos producidos por posibles errores de todo tipo no sistemáticos y se estudian los cambios asociados a fenómenos físicos independientes por orden de importancia. Se utilizará el programa RECONST, cuyo listado de instrucciones así como la formulación matemática en la que se basa pueden consultarse en el Anejo nº 3.

Para el perfil apoyado (P19), los perfiles elegidos serán los del 15 de abril, 15 de junio y 15 de julio que coincidirán con los de máxima, media y mínima pendiente. Se pueden observar y comparar en la fig. 6.9. Para el perfil libre, sin apoyo sobre laja superficial, el P45, escogeremos los correspondientes a los días 1 de junio, 1 de agosto y 1 de octubre, con pendientes mínima, media y máxima respectivamente. La comparación se presenta en la fig. 6.10.

Veamos ahora una aplicación de la geometría punto pivote a la hora de abordar la medición de avances o retrocesos de la línea de costa. Consideraremos como línea de pleamar de referencia la +3.00 y por consiguiente:



$$\frac{Dx}{1/i} = \frac{Dy}{1+Dy} \Rightarrow Dx = \frac{Dy}{1+Dy \cdot i}$$

Además :

$$i_{\text{variación}} = (1+Dy) \cdot i_{\text{media}}$$

Nótese que para valores negativos de Dy resulta un Dx, de retroceso, mayor en valor absoluto que el obtenido para el mismo Dy pero de acreción o positivo.

En resumen, los resultados obtenidos para nuestro caso particular, se muestran recogidos en la tabla siguiente, donde valores positivos de Dx indican incrementos de la superficie de playa seca en metros mientras que los valores negativos señalan retrocesos de la línea de costa.

P19 ($i_{\text{media}} = 5\%$)	<i>Fecha</i>	15/abril	15/junio	15/julio
	$Dy_{\text{cota } +3.00}$	0.55	-0.15	-0.25
	i (%)	7.8	4.3	3.8
	$Dx_{\text{cota } +3.00}$	7.10	-3.53	-6.67
P45 ($i_{\text{media}} = 2\%$)	<i>Fecha</i>	1/junio	1/agosto	1/octubre
	$Dy_{\text{cota } +3.00}$	-0.40	0.02	0.40
	i (%)	1.2	2.0	2.8
	$Dx_{\text{cota } +3.00}$	-33.30	1.00	14.30

Tal y como se adelantaba en el apartado de interpretación teórica, puede apreciarse como el perfil con laja es mucho más rígido a todo tipo de cambios. La diferencia entre los perfiles extremos de verano e invierno (en época de bonanza) no sobrepasa los 14 metros, con una media de unos 5m./mes. Por contra, el perfil libre o no apoyado sufre a la cota +3.00 variaciones cercanas a los 50 metros, con una media de recuperación de 12 m./mes.

6.3.- RESUMEN.

A lo largo del año ambos perfiles pasan de una pendiente suave o propia de invierno a una más rígida característica del verano basculando alrededor del punto medio de su perfil activo. La diferencia estriba en que en el perfil apoyado en laja sólo puede moverse la arena desde la cota +4.00 hasta la +0.00 ,el basculamiento se produce por tanto alrededor de la +2.00, mientras que en el perfil completo el grano puede desplazarse desde la berma (+4.00) hasta el pie ubicado en la -4.00 (el basculamiento se produce alrededor de la cota de bajamar viva) .

El análisis de las respectivas autofunciones permite afirmar que frente a los temporales hay dos fenómenos de defensa:

- Un basculamiento de todo el perfil activo

- Dos suavizamientos parciales en las zonas del estrán correspondientes a la pleamar y a la bajamar; es decir, aquellos puntos donde debido a la forma de la curva de marea más tiempo actúa el temporal.

El perfil apoyado, al disponer de un volumen de arena inferior, utiliza prioritariamente el basculamiento total. El suavizar posteriormente las estoas del estrán explica un porcentaje muy inferior de la varianza. En el caso del perfil completo el comportamiento es el inverso.

Se advierten dos modos distintos de recuperación del perfil o de aumento de su pendiente. Uno de invierno, en que la arena se mueve en el tramo sumergido desde una cierta profundidad hasta la cota +0.00 , y otro de verano, en que los granos se desplazan desde el pie del estrán hasta su parte superior.En invierno la

velocidad es superior a la de verano, del orden del doble en el perfil apoyado y del triple en el completo.

Los caudales de transporte de sedimento son similares en los perfiles con y sin laja, 10 y 8 m³/ml. y mes respectivamente. En cambio, en invierno, las tasas de erosión son mucho menos importantes en los perfiles apoyados que en los completos, 30 y 120 m³/ml. y mes.

En el perfil no apoyado la mínima pendiente la tenemos en mayo; a partir de ese momento se recupera arena y aumenta el talud, con un estancamiento en julio y agosto, hasta el mes de octubre en que alcanza su máximo la pendiente y , por consiguiente, también la superficie de playa seca. En el perfil con laja hay un desfase; no es hasta mediados de julio en que comienza a incrementarse el talud, acción que continúa hasta finales de septiembre.

El perfil con laja es mucho más rígido a todo tipo de cambios. La diferencia en playa seca entre verano e invierno no sobrepasa los 14 m. , con una media de 5m./mes. Por contra, el perfil no apoyado experimenta, a la cota +3.00, variaciones cercanas a los 50 m., con una media de recuperación de 12 m./mes.

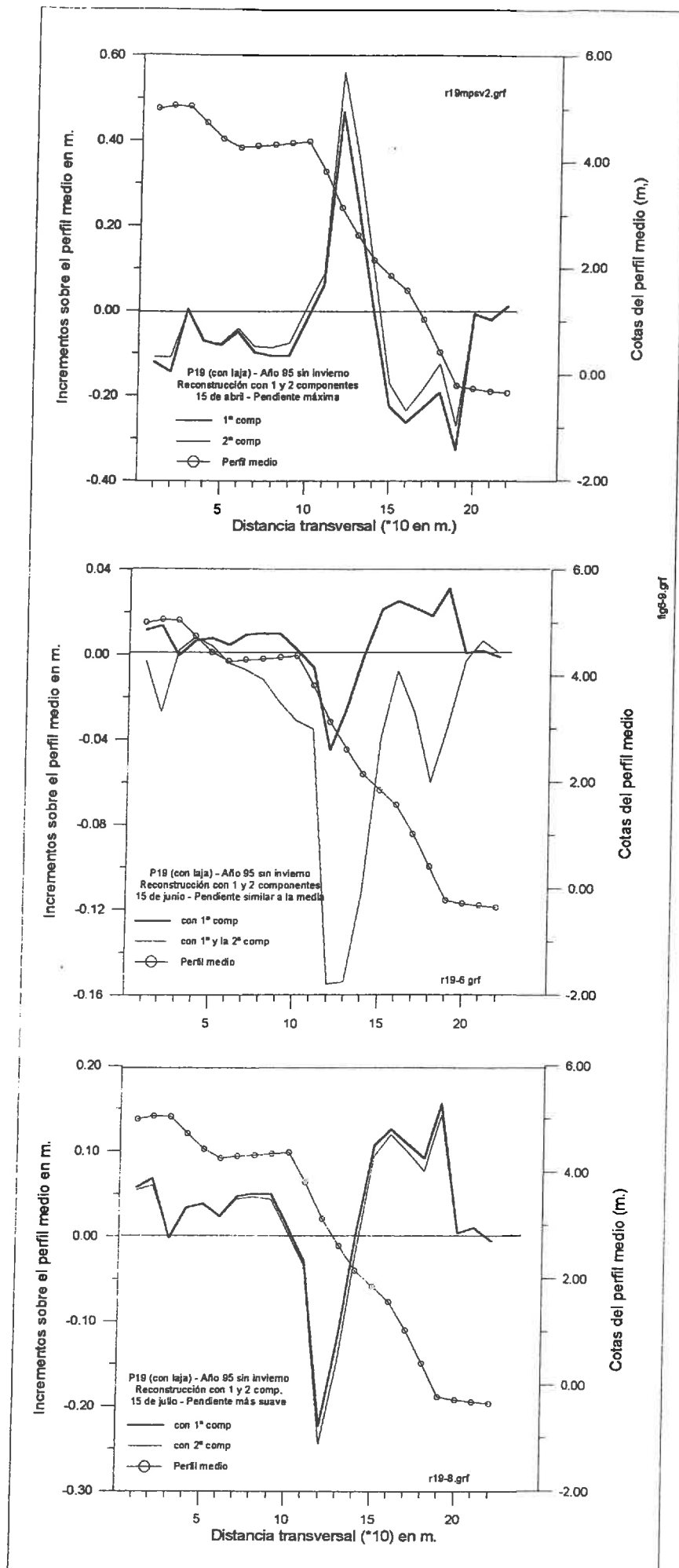


fig. 6.9 Reconstrucción de los perfiles 15 de abril, 15 de junio y 15 de julio (P19 apoyado en laja)

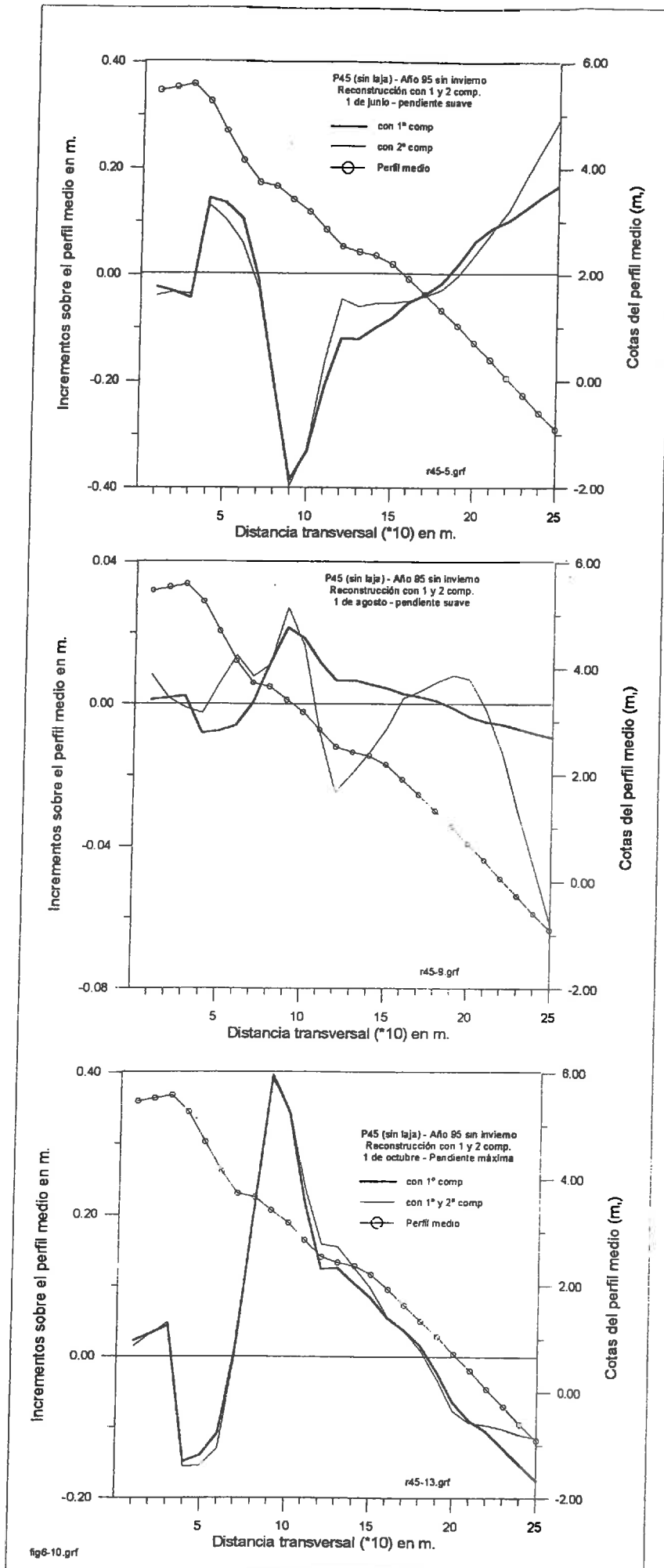


fig. 6.10 Reconstrucción de los perfiles 1 de junio, 1 de agosto y 1 de octubre (P45 libre o no apoyado)

CAPITULO VII

VARIABILIDAD A CORTO PLAZO: INFLUENCIA DEL CICLO DE MAREA

VII.- VARIABILIDAD A CORTO PLAZO : INFLUENCIA DEL CICLO MAREAL QUINCENAL

7.1.- CRITERIOS TEÓRICOS.

Hasta hace muy poco tiempo, el estudio de los perfiles de equilibrio en las playas se realizaba partiendo de la hipótesis de que el nivel del mar no variaba en el tiempo. Eso no resulta ser cierto en modo alguno pues existen suficientes fenómenos físicos capaces de alterar dicho nivel como para tenerlos en cuenta. De entre las causas meteorológicas podríamos citar, sin ánimo de ser exhaustivos, la presión atmosférica, el viento, la rotura del oleaje, etc. Por otra parte y mucho más previsible por su periodicidad, cabría destacar la marea astronómica por su gran importancia en valor absoluto en muchos lugares.

La morfodinámica de las playas se ve modificada sustancialmente por este tipo de cambios que se suceden de forma cíclica día tras día. Diversos autores han estudiado esta influencia de la alternancia diaria de distintos niveles del mar sobre la forma del perfil.

7.1.1.- Estado del Arte

Duncan (1964) ,comprobó que durante la creciente el nivel del mar era superior al nivel freático de la arena. Se producía entonces un flujo intersticial de agua hacia el interior del talud que provocaba la deposición de los granos de arena subidos desde el pie del perfil. Por el contrario, durante la vaciante el nivel freático del terreno está mas elevado que el nivel del mar y el drenaje de aquél contribuye a erosionar y transportar los granos de nuevo hacia la parte inferior del talud.

También, en cuanto al ciclo diario, *Harrison (1969)* dedujo que los parámetros que controlaban la cantidad de arena removida eran el peralte de la ola, el gradiente hidráulico nivel freático-nivel del mar y el ángulo de incidencia del oleaje en rompientes.

En cuanto al efecto que las mareas vivas o muertas, condicionadas por los ciclos quincenales, tienen sobre los cambios en el perfil, debemos hacer mención a los comentarios que sobre la eclosión del *Leuresthes Tenui* hizo en su día *Thompson & Thomson (1919)* . Por su, a nuestro entender, gran interés, transcribimos aquí la cita tal y como es recogida por *Komar (1976)* ,

"Grunion take advantage of this cycle by laying their eggs just after spring

tide. The eggs are then buried by sand during the neap tide period when deposition occurs. At the next spring tide the sand is again removed and the eggs are ready to hatch. This spawning takes place during march to august, when the wave conditions are steadiest, so that the tide induced changes are most effective. At other times of the year, profile changes due to varying conditions are much grater than this tidal effect, so that the tidal cycle is masked"

Aparte de *Lafond (1939)*, no encontramos nada en la bibliografía sobre este tema hasta *Wright et al (1982)*. Hacen mención a que las variaciones debidas a un ciclo lunar son despreciables; sin embargo, su referencia es accidental, pues las mediciones que efectuaron durante 22 días seguidos en la playa macromareal de Broome en Australia, estaban orientadas principalmente al estudio de la disipación del flujo de energía en la zona intermareal.

Masselink and Short (1993) presentaron un modelo conceptual de playa para mares con marea en función del parámetro de Dean (Ω) y del rango de marea relativo (Relative Tide Range = Tide Range / H_b). Se trata de una generalización de la clasificación morfológica de playas que efectuaron con anterioridad *Wright et al (1985)*.

Otros investigadores como *Bruun (1962)* o *Kriebel et al. (1993)* han estudiado relaciones entre el retroceso de la línea de costa y elevaciones del nivel del mar, pero hasta *González (1995)* no se había planteado un modelo de perfil de equilibrio en mares con marea que permitiera describir su forma.

7.1.2.- Modelo de perfil para mares con marea

Es este último autor quien consigue desarrollar un modelo sencillo para predecir los cambios que causan las variaciones que, en el nivel del mar, produce la onda de marea. Las hipótesis en que descansa este modelo son:

- h-1 La curva de marea se simplifica a una función escalonada donde la mitad del tiempo el nivel está en pleamar y la otra mitad en bajamar.
- h-2 El nivel permanece constante en estos dos estadios el tiempo preciso para permitir que se desarrolle un perfil de equilibrio que supondremos que es el de Dean (1977).
- h-3 Los movimientos de sedimento se producen únicamente en sentido transversal, no existiendo pérdidas de arena en la dirección paralela a la orilla.

Vamos a plantear, sucinta y simplificada, parte de la formulación contemplada por el modelo. Si en bajamar tenemos un perfil de equilibrio parabólico en que la profundidad h cumple, en función de la distancia horizontal x y el parámetro A

$$h = A x^{2/3}$$

y si denominamos h_* a la profundidad de cierre del perfil y W a la distancia asociada

$$h_* = A W^{2/3}$$

entonces, para una subida del nivel del mar S se genera una demanda de arena

$$V_{\text{necesario}} = S W$$

mientras que el volumen disponible al retroceder la línea de costa una distancia R consiste en

$$V_{\text{disponible}} = R h_*$$

Al no considerarse pérdidas de sedimento, ambos volúmenes deben ser iguales, lo que nos permite calcular el retroceso experimentado por la línea de costa a causa de una elevación del mar como

$$S W = R h_*$$

que para el caso de una carrera de marea M , resulta

$$R = \frac{M \cdot W}{h_*}$$

y puesto que W estaba en el perfil de equilibrio, debía cumplir que

$$W = (h_* / A)^{3/2}$$

por lo que sustituyendo, obtenemos la expresión final

$$R = \frac{M \cdot h_*^{1/2}}{A^{3/2}}$$

donde podemos observar como la distancia R entre los puntos de inicio del perfil. Por tanto, el retroceso entre la pleamar y la bajamar es directamente proporcional a la carrera de marea M , a la profundidad de cierre h_* , e inversamente proporcional al parámetro A y, por ende, al tamaño de grano.

7.1.3.- Deducciones teóricas sobre el comportamiento del perfil

Hemos visto como se ha desarrollado ya un modelo sencillo para predecir los cambios experimentados en un perfil debido a la carrera de marea. Lo que no se ha efectuado hasta la fecha es la medición en campo de esas variaciones durante un ciclo quincenal completo. Compararemos los datos obtenidos del terreno con la estimación procedente de la formulación anterior. A la vista de los resultados criticaremos la validez del modelo teórico.

En general, tanto a largo como a medio plazo, habíamos comprobado como el perfil apoyado en laja tenía una mayor rigidez al cambio que el perfil completo. Ello era debido a su vez a la menor variabilidad que experimentaba la altura de ola por la presencia de la laja rocosa. En cambio, la marea, como agente modificador de la altura de la lámina de agua sobre la rasa, induce cambios tanto más importantes en el perfil sin laja cuanto que no están enmascarados por cambios en las condiciones del oleaje incidente.

Por otra parte, con la onda de marea podría suceder de manera semejante a como con las ondas de oleaje de período mucho más corto; es decir, que de alguna manera se perdiera energía en su paso por la laja. Eso podría suponer una disminución de su "swash" o zona de estrán bañada por la carrera de marea y, por lo tanto, los efectos causados sobre los granos de arena se verían magnificados. A pesar de que la idea de relacionar inversamente el reparto de la energía de la onda de marea entre una mayor o menor superficie con la intensidad de su efecto es lógica, no queda claro, a priori, el hecho de suponer que una longitud de estrato rocoso de no más de 600 m. suponga graves pérdidas de rozamiento para una onda de 12 horas de periodo. En todo caso, la altura de ola que viaja sobre el nivel del mar propiciado, en cada momento, por la onda de marea sí es menor en el caso del perfil apoyado que en el completo.

En cuanto a la velocidad de los procesos de erosión y acreción, partiremos del dato fehaciente de que la pendiente en el perfil apoyado en laja es doble que la del perfil normal completo. Esto supondrá para el grano de arena un esfuerzo superior al subir y, por tanto, la recuperación será más lenta. Por contra, le costará menos bajar y la erosión se producirá más rápidamente.

7.2.- APLICACIÓN A LA PLAYA VICTORIA

7.2.1.- Descripción de la campaña de toma de datos

Durante una quincena, los días 11 al 25 de julio de 1995, se tomaron diariamente dos perfiles en la playa Victoria. Los puntos se cogieron mediante topografía, aprovechando la hora de la bajamar y adentrándose con el portaprisma lo más posible en el mar.

Al igual que en medio plazo, uno de los perfiles, el P19, está situado en la parte norte de la playa Victoria, apoyándose en una laja o estrato rocoso casi horizontal que tiene una cota muy cercana a la del cero hidrográfico. El otro perfil, el P45, está ubicado más hacia el sur, donde la laja se encuentra a una profundidad mucho mayor; se trata, por tanto, de un perfil completo.

A lo largo de cada transversal se levantaron todos los puntos donde se apreciaba un cambio de pendiente. A continuación (fig 7.1) se presenta un gráfico donde se han dibujado cada uno de los dos conjuntos de datos. Nótese que existen en algún punto diferencias superiores al medio metro de espesor de sedimento.

7.2.2.- Descripción morfológica de las diferencias entre perfiles

Como medio para la interpretación de los datos utilizaremos, al igual que en los capítulos anteriores, el de las Funciones Ortogonales Empíricas (Empirical Orthogonal Functions) . En la fig. 7.2 puede apreciarse como la primera componente se asimila, en ambos casos, a la representación del perfil medio. Puesto que cada uno de los modos obtenidos son independientes entre sí, es lógico afirmar que corresponderán a procesos físicos también independientes entre sí. Y dado que los datos se tomaron en un período de tiempo en el que la altura del oleaje así como su peralte se mantuvieron relativamente constantes no es aventurado el suponer que las siguientes componentes E.O.F., en cuanto a la explicación de la varianza restante de los datos, deben estar relacionadas con la influencia que el ciclo de marea ejerce sobre el movimiento de los granos de arena en el perfil.

La poca importancia relativa de las componentes 2^a y 3^a se debe al gran porcentaje de varianza explicada por la 1^a : un 99,91%. Así pues, para poder examinar las tendencias de esas otras componentes, nos vemos obligados a suprimir la media de los datos. Al igual que en otros capítulos usaremos del programa MEDIAC para este menester. Posteriormente, aplicaremos el programa 3PCA (Three Way Principal Component Analysis) a la nueva matriz y obtendremos unas gráficas (fig. 7.3) con una mayor diferenciación de

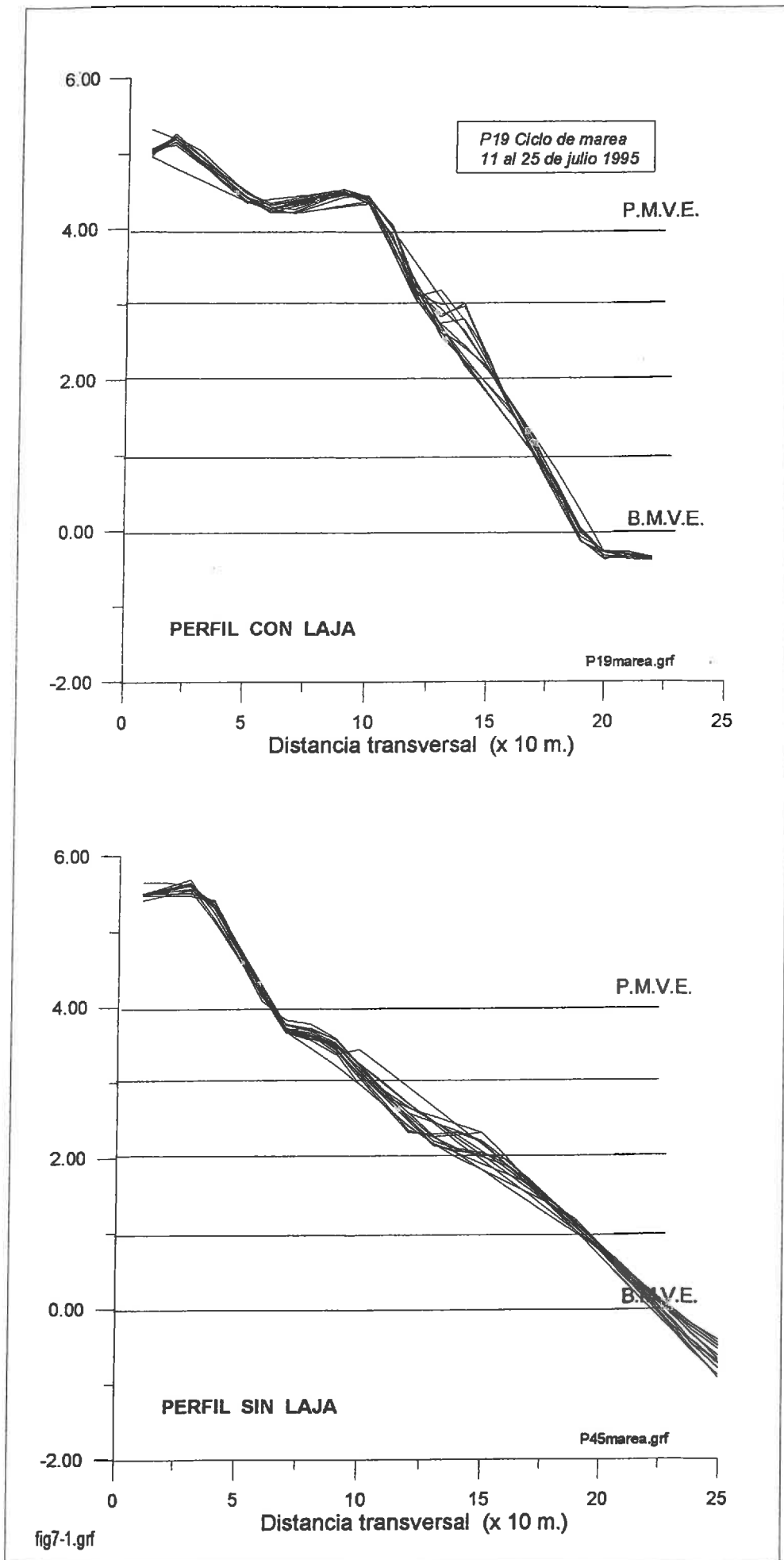


fig 7.1 Representación de los perfiles tomados durante el ciclo de marea (con y sin laja)

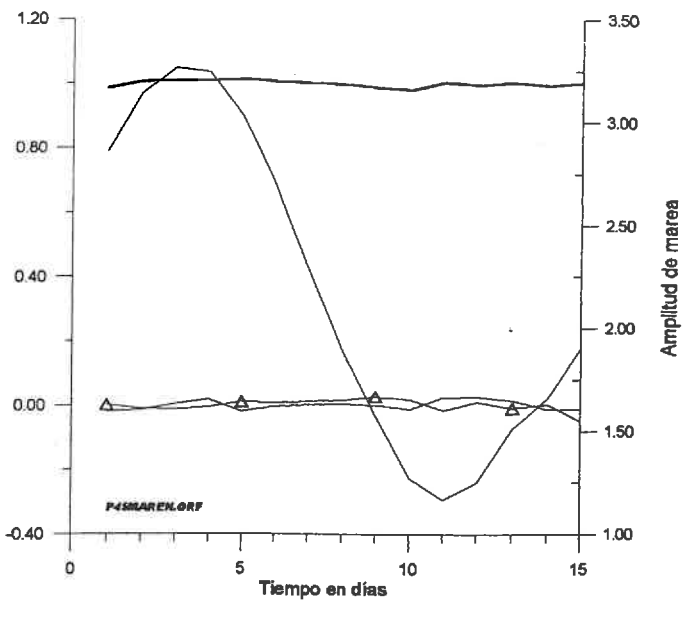
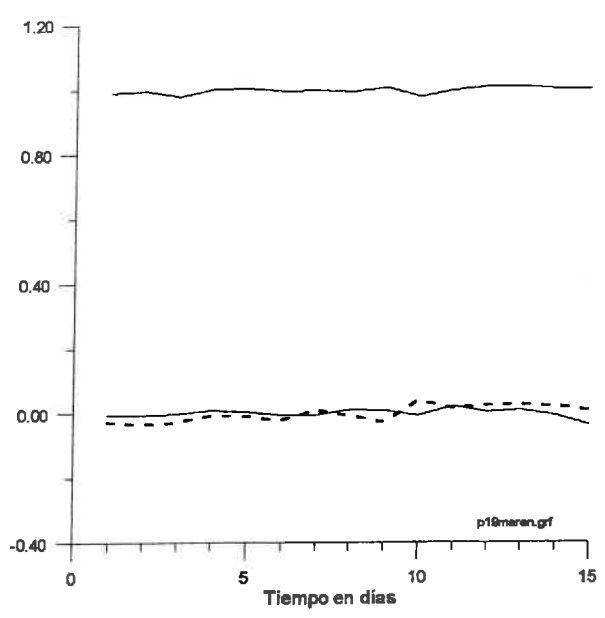
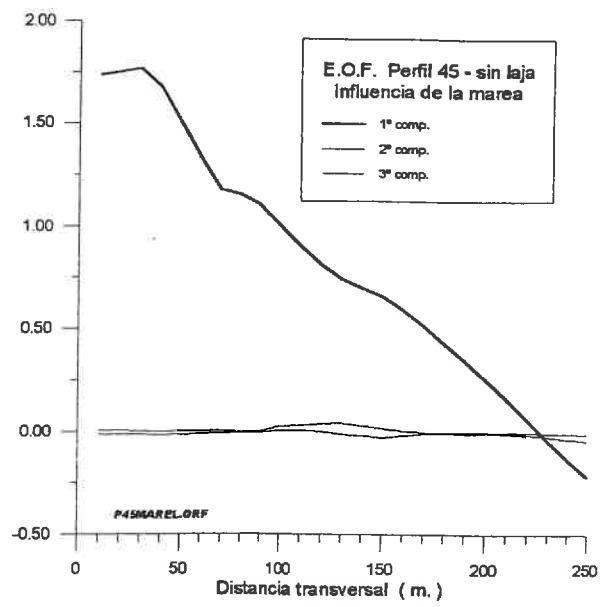
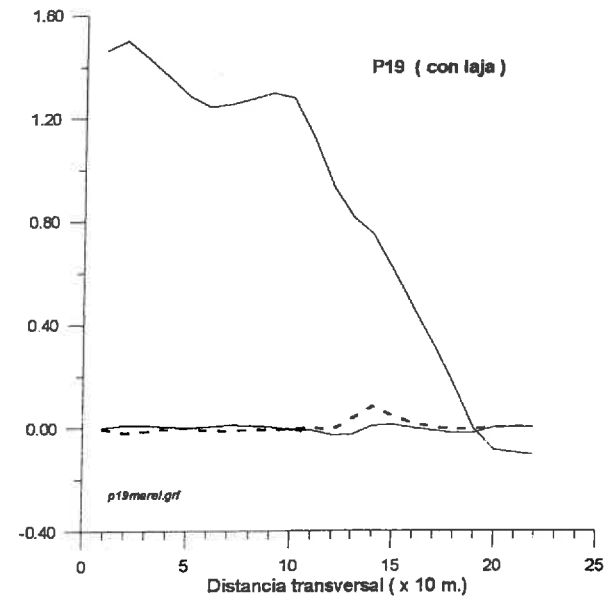


fig. 7.2 Componentes transversal y temporal E.O.F. de los perfiles con y sin laja en un ciclo de marea quincenal

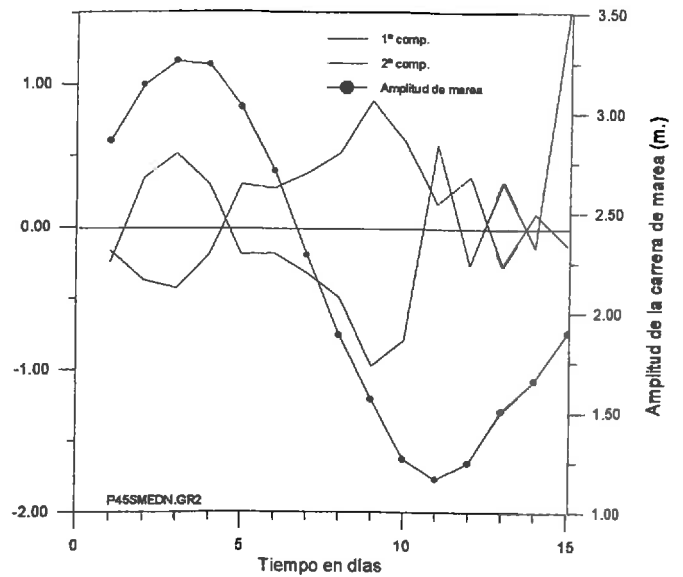
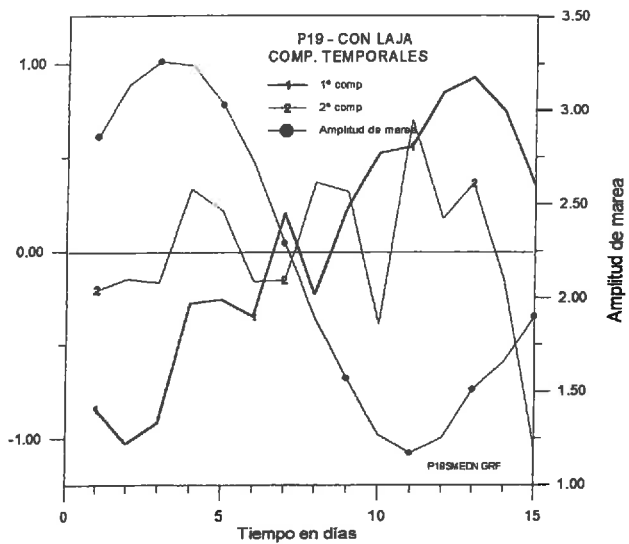
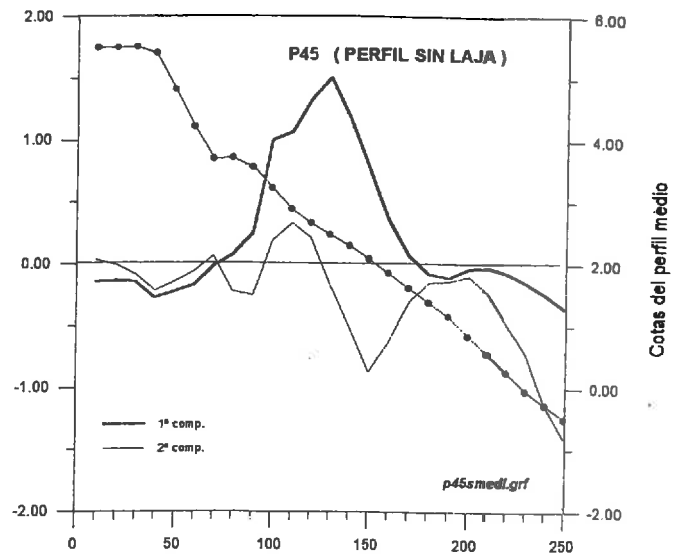
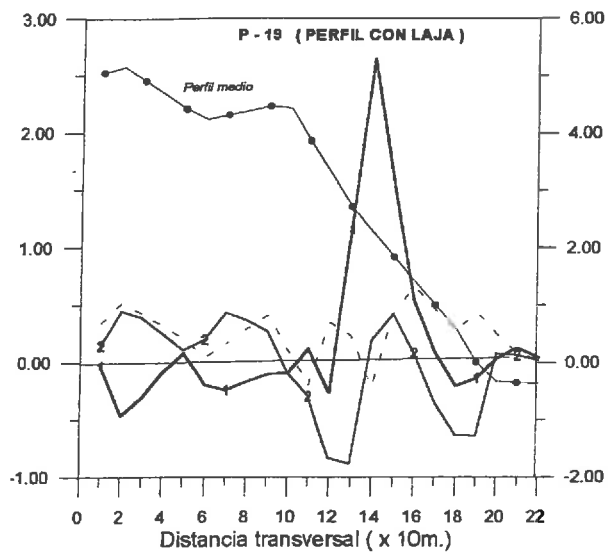


fig 7.3 Componentes E.O.F. transversal y temporal de los perfiles con y sin laja en un ciclo de marea quincenal una vez suprimida la media de los datos

la información residual.

Para mejor apreciar las semejanzas y diferencias entre ambos perfiles vamos a representarlas conjuntamente en el mismo gráfico, las transversales en la fig. 7.4 y las temporales en la fig. 7.5.

De la comparación descriptiva de las 1ª componentes transversales o perfiles medios se deducen los siguientes aspectos morfológicos :

- El P19 (con laja) tiene una berma con contrapendiente a la cota +4.25 aproximadamente y de unos 50 m. de anchura.
- La cabecera del P19, el perfil apoyado, está a una cota de unos +5.00 m., inferior a la que tiene el P45, o perfil libre y sin laja que comienza algo más arriba, a los +5.50.
- La pendiente del P19 tiene una inclinación superior a la del P45; la causa puede ser la menor energía incidente del oleaje, o, mejor dicho, la acotación superior de esa energía inducida por la rotura de las olas que sobrepasan 0.8 veces la profundidad determinada por la laja, estrato rocoso de arenisca casi horizontal que se prolonga durante unos 700 metros a partir de la línea de bajamar.
- $i_{19} = (4.20 - (-0.20)) / (200 - 110) = 4.40 / 90 = 4.9\%$
- La pendiente del perfil completo P45 es similar a la del P19 en la zona de playa seca, entre las cotas +5.50 y +3.80. Sin embargo, en la parte superior del estrán, coincidiendo con una línea ideal de la pleamar viva equinoccial, experimenta un cambio; se hace más suave y toma una inclinación inferior y casi constante hasta el punto final de la toma de datos.
- $i_{45} = (3.80 - (-0.70)) / (250 - 70) = 4.50 / 1.80 = 2.5\%$
- $i_{45} = i_{19} / 2$
- En realidad el estrán parece descomponerse en dos tramos, más tendido el superior y más empinado el inferior, con una curvatura negativa, distinta a la diseñada por Dean. Podríamos admitir que en los alrededores de la cota +2.00 en el P45 y +2.50 en el P19, aproximadamente en la mitad del estrán, es donde estaría esta charnela o punto de inflexión. Las distancias en el eje transversal serían de unos 130 m. en el primer caso y de unos 140 m. en el segundo, siempre contando desde el origen o borde del muro del paseo marítimo.

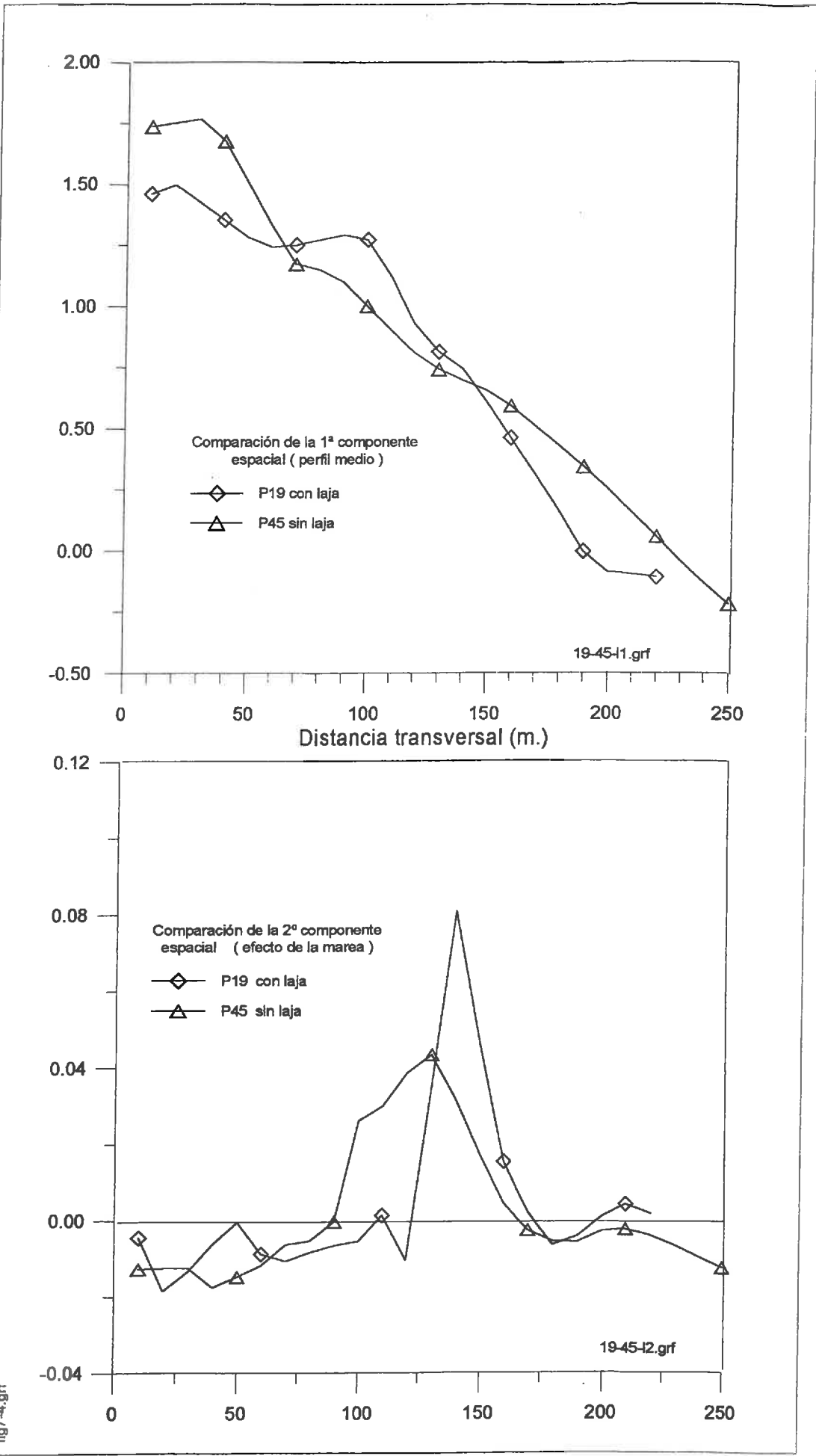


fig. 7-4 Comparación entre las componentes transversales 1ª y 2ª de los perfiles con laja y sin laja

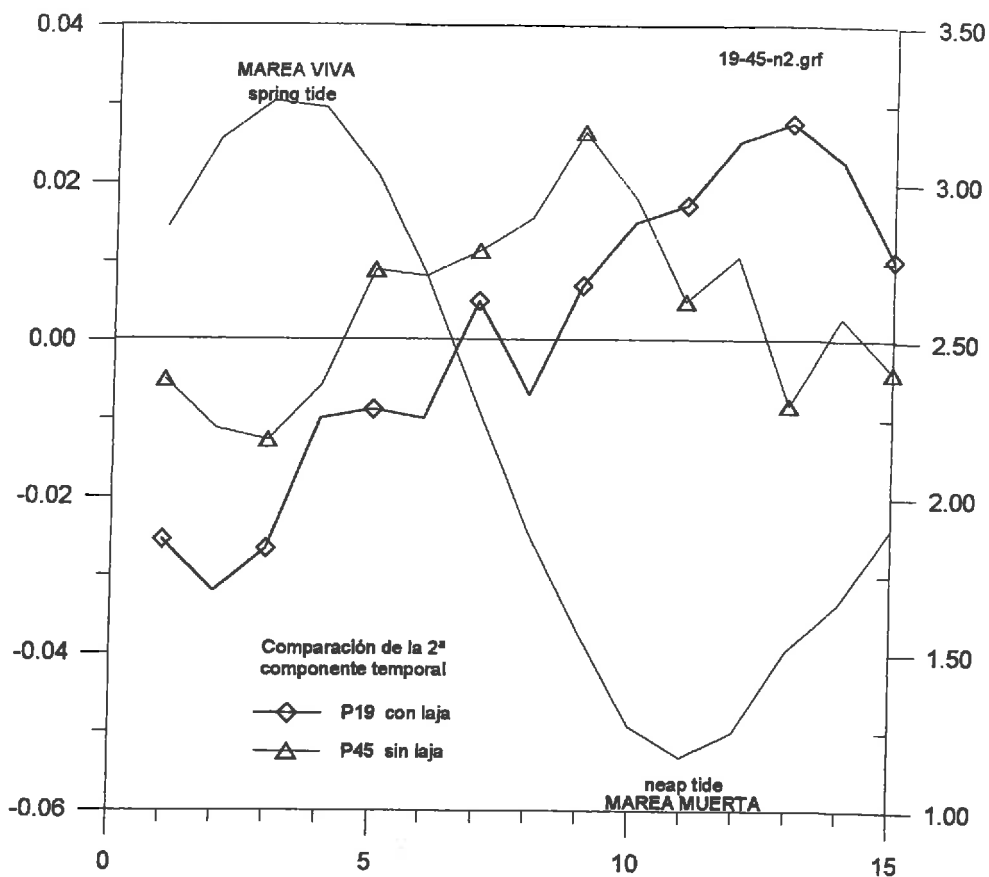
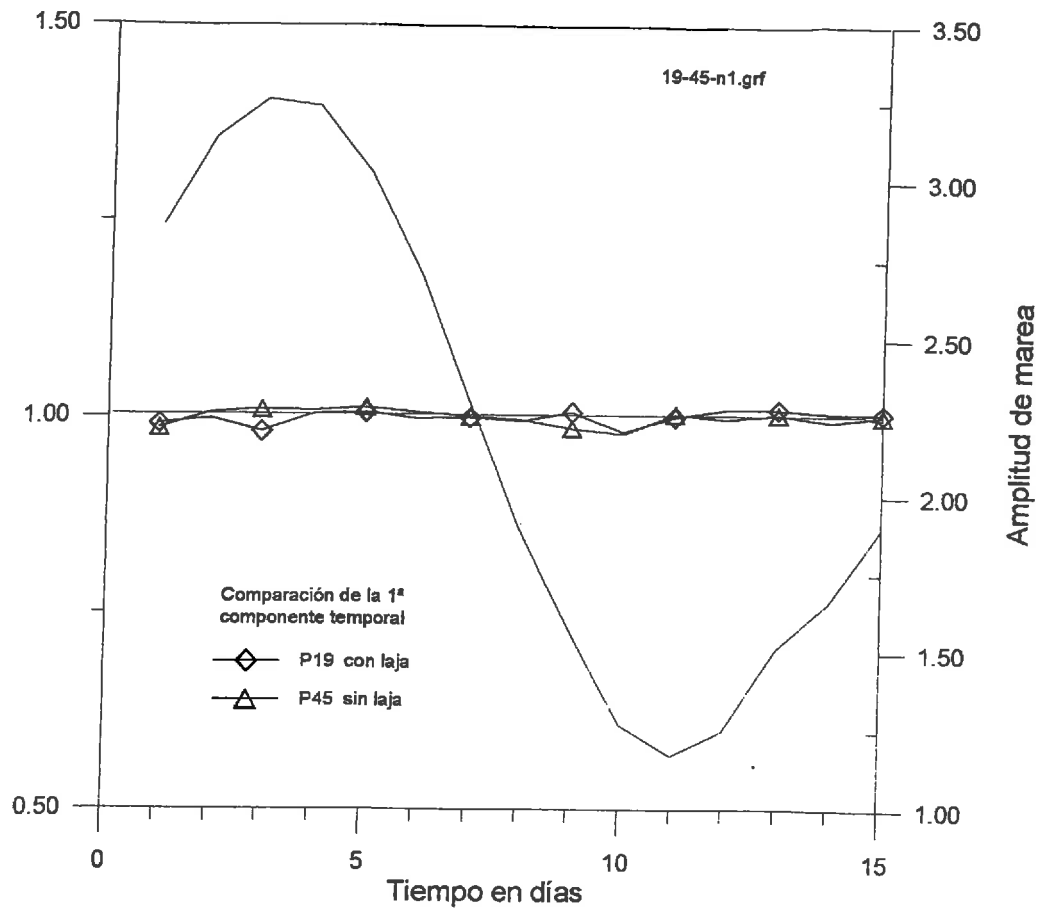


fig. 7-5 Comparación entre las componentes temporales 1ª y 2ª de los perfiles con laja y sin laja

- El punto que surge en el párrafo anterior sería también el de máxima variabilidad en cuanto a espesor de sedimento. Y ello puede observarse en las 2ª componentes espaciales.

- En estas 2ª componentes se aprecia que el efecto de la marea está mucho más concentrado en el perfil P19 (con laja) . La zona de más pronunciada actuación tiene un ancho de unos 50 m., está entre $x=125$ y $x=175$ m., y un máximo en $x=140$ m., valor que concuerda con el del punto de inflexión antes comentado.

- En el P45 (sin laja) el efecto está mucho más repartido a lo largo de una franja de 80 m., entre $x=80$ y $x=160$ m., con un máximo inferior al del P19 (con laja) y más cercano al borde superior del estrán (en $x=130$ m.)

Veamos ahora la comparación entre las componentes temporales de nuestros perfiles tipo elegidos.

- Obsérvese que no existe casi diferencia alguna entre las 1ª componentes temporales de ambos perfiles. Ambas son casi idénticamente iguales a la unidad, lo que es conforme con la hipótesis de nula variabilidad en el tiempo de la 1ª componente espacial o "perfil medio".

- En cuanto a las 2ª componentes podríamos decir que, excepto las pequeñas alternancias diarias, las tendencias generales son muy parecidas salvo un desfase de unos tres o cuatro días. Es decir, que mientras el perfil con laja, el P19, tiene máximos y mínimos coincidentes casi exactamente con las mareas muertas y vivas respectivamente, en el perfil completo, el P45, la máxima erosión también se produce con la marea viva, pero la máxima deposición de sedimento tiene lugar tres días antes. Esto coincide con lo apuntado en el apartado previo de criterios teóricos. En el perfil apoyado, al tener una pendiente muy superior, la erosión se produce más rápidamente que en el perfil libre, de pendiente mucho menor.

7.2.3.- Comparación de perfiles reconstruidos

Para comprobar y validar la información extraída de la interpretación de las componentes E.O.F. vamos a proceder a la reconstrucción de estos perfiles con el concurso de dichas componentes. Utilizaremos la 1ª en solitario como referencia y el conjunto de las tres primeras para obtener por diferencia cuál es el contenido físico de las mismas. Y todo esto lo haremos para una serie representativa de cinco de los quince días tomados. Con intervalos semejantes entre sí han sido elegidos los días 1º (perfil de partida) , 4º (la marea viva o spring tide) , 7º (transición) , 11º (marea muerta o neap tide) y, por fin, el 15º (perfil final o del último día de la toma de datos), (figuras 7.6 a, b, c, d y e).

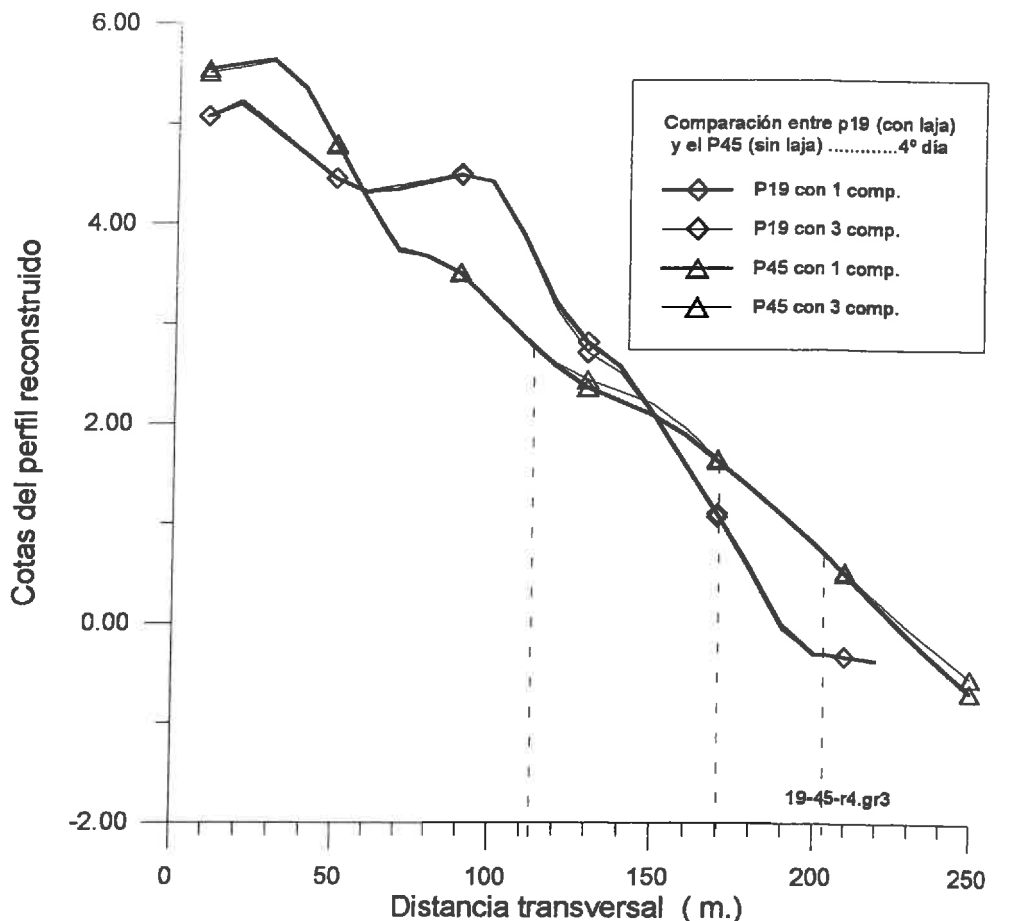
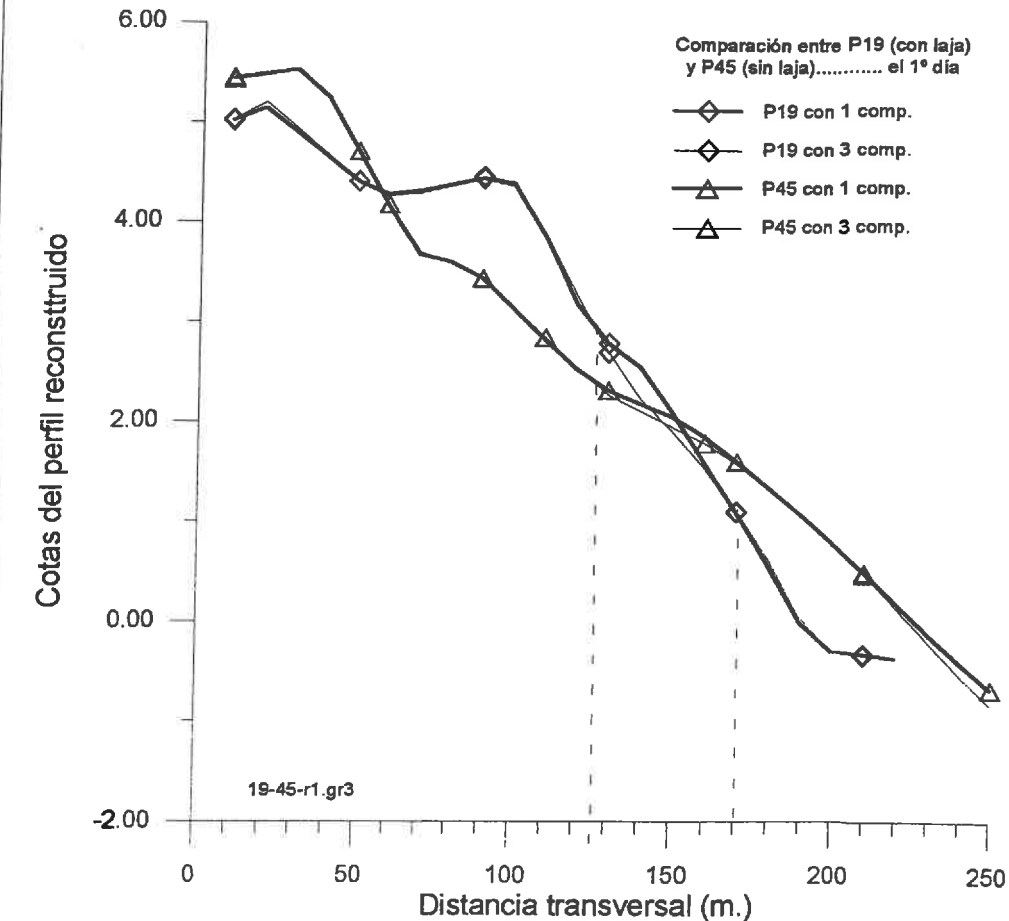


fig. 7.6 a y b Comparación entre los perfiles reconstruidos con 1 y 3 componentes
Días 1º y 4º de la toma de datos

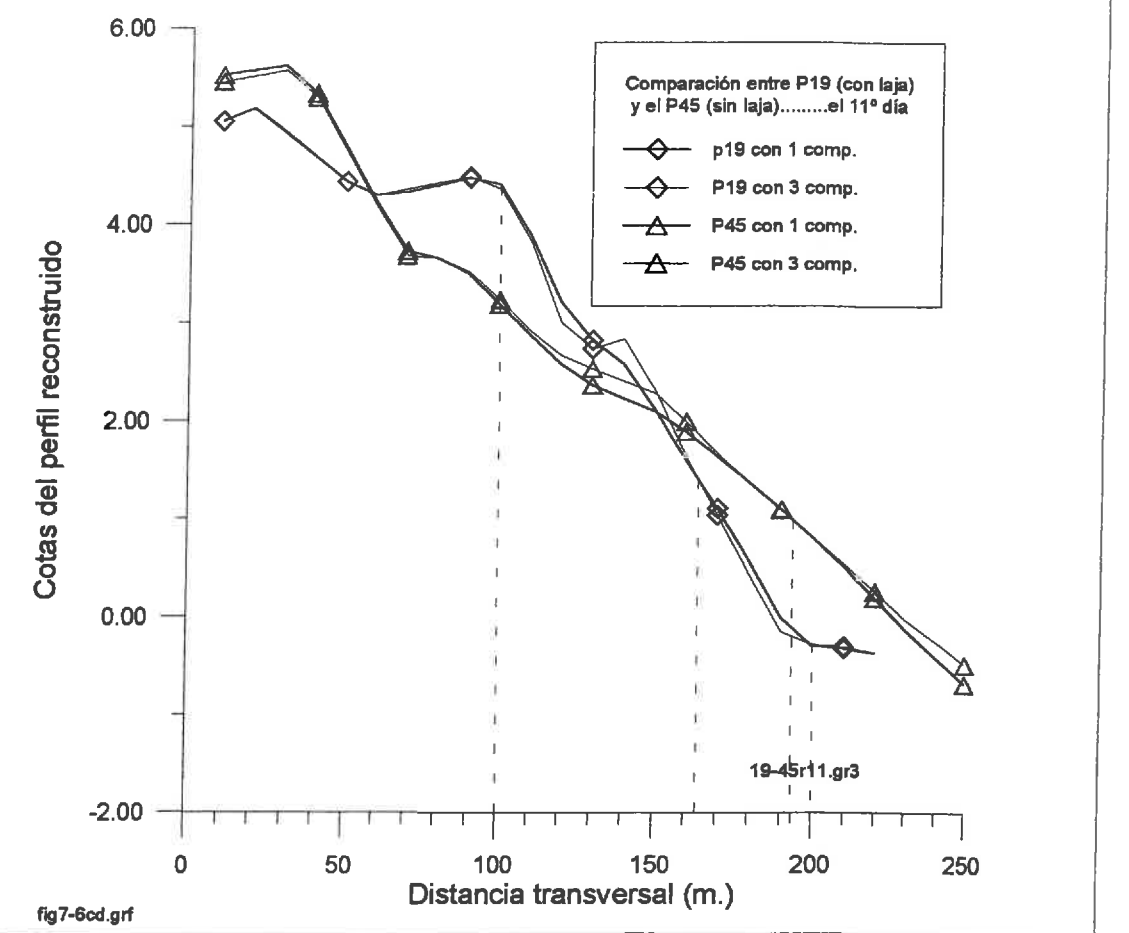
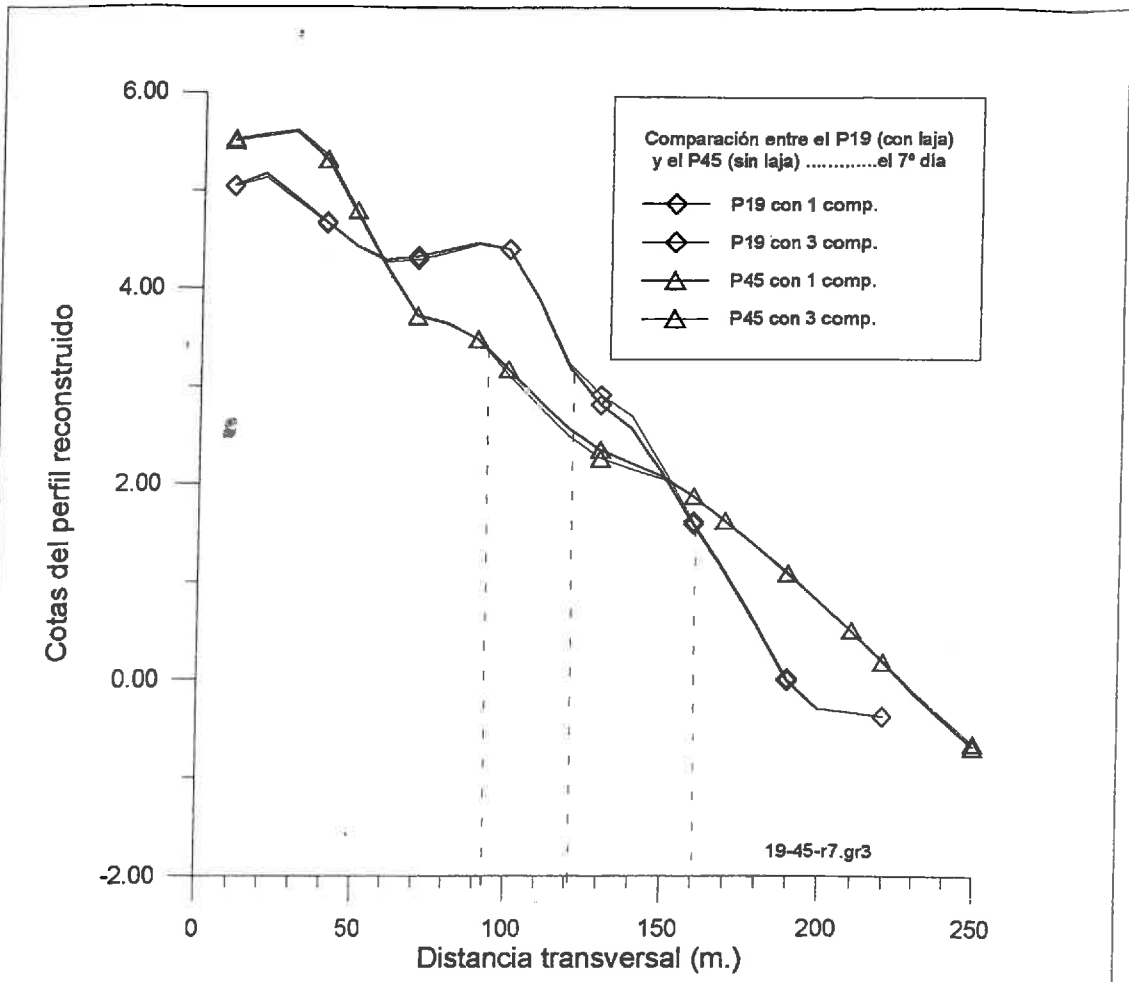


fig7-6cd.grf

fig. 7.6 c y d Comparación entre los perfiles reconstruidos con 1 y 3 comp. Días 7º y 11º de la toma de datos

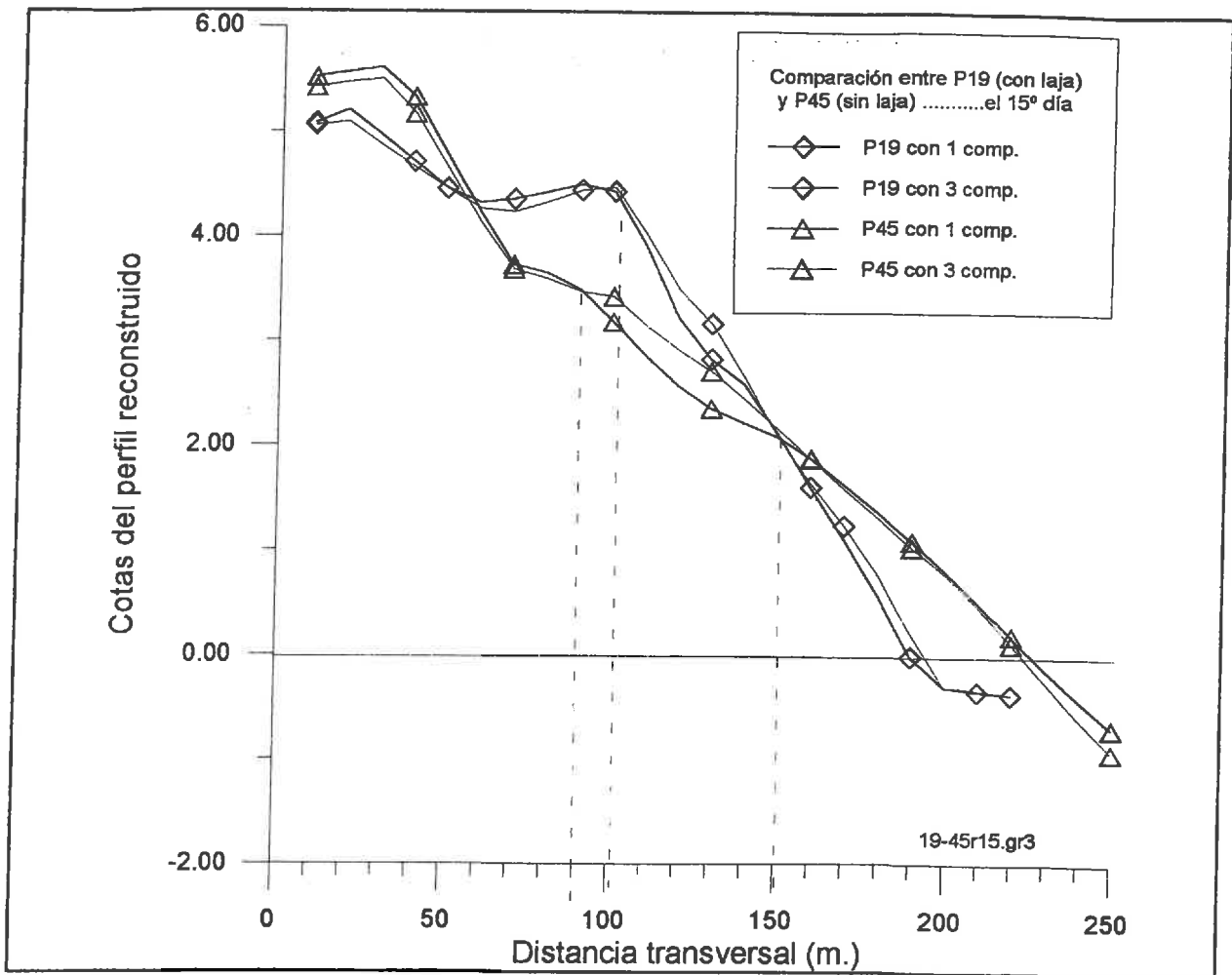


fig. 7.6 e Comparación entre los perfiles reconstruidos con 1 y 3 comp el día 15º

Compruébese que las zonas delimitadas en los perfiles como de cambio son precisamente las que ya se habían identificado en el estudio de las componentes.

Aparece, sin embargo una zona de importante variación, en el perfil no apoyado, no planteada hasta ahora; es la existente entre la cota de bajamar, o +0.50, y el fin de nuestro perfil topográfico.

En la tabla siguiente resumimos las máximas diferencias encontradas cada día. Valores positivos indican acreción sobre el perfil medio, mientras que los negativos serán los de la erosión. La medición se ha efectuado para los cinco días antes mencionados y tanto para el perfil apoyado en laja (el P19) como para el perfil libre o completo (el P45) . Los valores están expresados en centímetros.

Día de la toma de datos	Perfil apoyado en laja		Perfil no apoyado	
	Ascenso	Descenso	Ascenso	Descenso
1°	8	-32	3	-16
4°spring tide	4	-10	15	-4
7°	12	-4	7	-9
11°neap tide	25	-21	20	-7
15°	34	-12	35	-23

Tabla 7.1 Ascensos y descensos en cm. experimentados por los perfiles con y sin laja a lo largo del ciclo mareal quincenal

7.2.4.- Estudios puntuales de variabilidad

Los valores de la tabla anterior eran los extremales experimentados a lo largo de todo el perfil durante el ciclo mareal. No obstante, sería más interesante, desde el punto de vista de la extracción de conclusiones, el fijar nuestra observación en lo ocurrido en un solo punto para cada perfil. Estos puntos serían los de máxima variabilidad. Para encontrarlo nos basta el ubicar el vértice que aparece en la 2ª componente E.O.F. de la fig. 7.4. Para situarlos e identificarlos haremos uso de la distancia transversal hasta la cabecera del perfil: el $x=130$ m. para el P45 (sin laja) y el $x=140$ m. para el P19 (con laja).

Las variaciones de cota totales observadas, definidas como la suma en valor absoluto de los máximos ascensos y descensos, son de 55 cms en el p19 y de 60 cms en el p45. Se aprecia igualmente el desfase existente entre las "ondas" de variación de ambos perfiles tanto en los períodos de erosión como en los de acreción. En la fig. 7.7 se muestran las oscilaciones de cota observadas en los puntos de máxima variabilidad. Para justificar, de otro modo, nuestra hipótesis identificativa de trabajo, que es relacionar linealmente las componentes E.O.F. temporales con el ciclo de marea, se ha utilizado la fórmula siguiente, conocida como del producto-momento (*Spiegel, 1970*),

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \cdot \sum(y - \bar{y})^2}}$$

resultando un coeficiente de correlación de 0.89 .

7.2.5.- Diferencias en el transporte transversal de sedimento

Para acabar el análisis de estos datos y mediante el programa EROTRANS (ver detalles en el anejo A-3) , que resuelve la ecuación de continuidad o de conservación de la masa ,

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = 0$$

obtendremos el transporte transversal en cada una de las celdillas en que se descompone el perfil y el transporte neto, suma de los sucesivos valores obtenidos en cada celdilla, de cada día a lo largo de esa quincena.

La fig. 7.8 muestra las componentes transversales y temporales del transporte en el perfil apoyado en laja. En la 1ª componente transversal del P19 se aprecia la existencia de un punto pivote, corte de esa autofunción con el cero, que induce a pensar en un movimiento de basculamiento del perfil respecto a ese centro de giro; las arenas pasarían del pie del estrán a la cabecera y viceversa en función del signo de la componente temporal.

En cambio, la 2ª componente espacial está más de acuerdo con lo que hasta ahora habíamos considerado como efecto de la variación de la carrera de marea : acreciones o erosiones en la zona central del estrán acompañadas de menores transportes a ambos lados.

En el P45 no aparece ese punto pivote de basculamiento. Tal y como apreciamos en la fig. 7.9 , pasamos directamente a una zona de gran entrada de sedimento cuyo máximo, muy acusado, coincide, por supuesto, con el punto que ya habíamos descubierto en las otras aproximaciones hasta ahora realizadas.

La suma de los transportes transversales de cada celdilla nos proporcionaría una nueva variable: el transporte neto diario a lo largo del perfil. Representémoslo en la fig. 7.10 junto con el acumulado de toda la quincena.

La suma de esos transportes netos a lo largo de todo el ciclo quincenal nos da en el caso del P19 (con laja)

$$Q_{\text{total19}} = 22,3 \text{ m}^3/\text{ml}$$

y para el P45 (sin laja)

$$Q_{\text{total45}} = 20,0 \text{ m}^3/\text{ml}$$

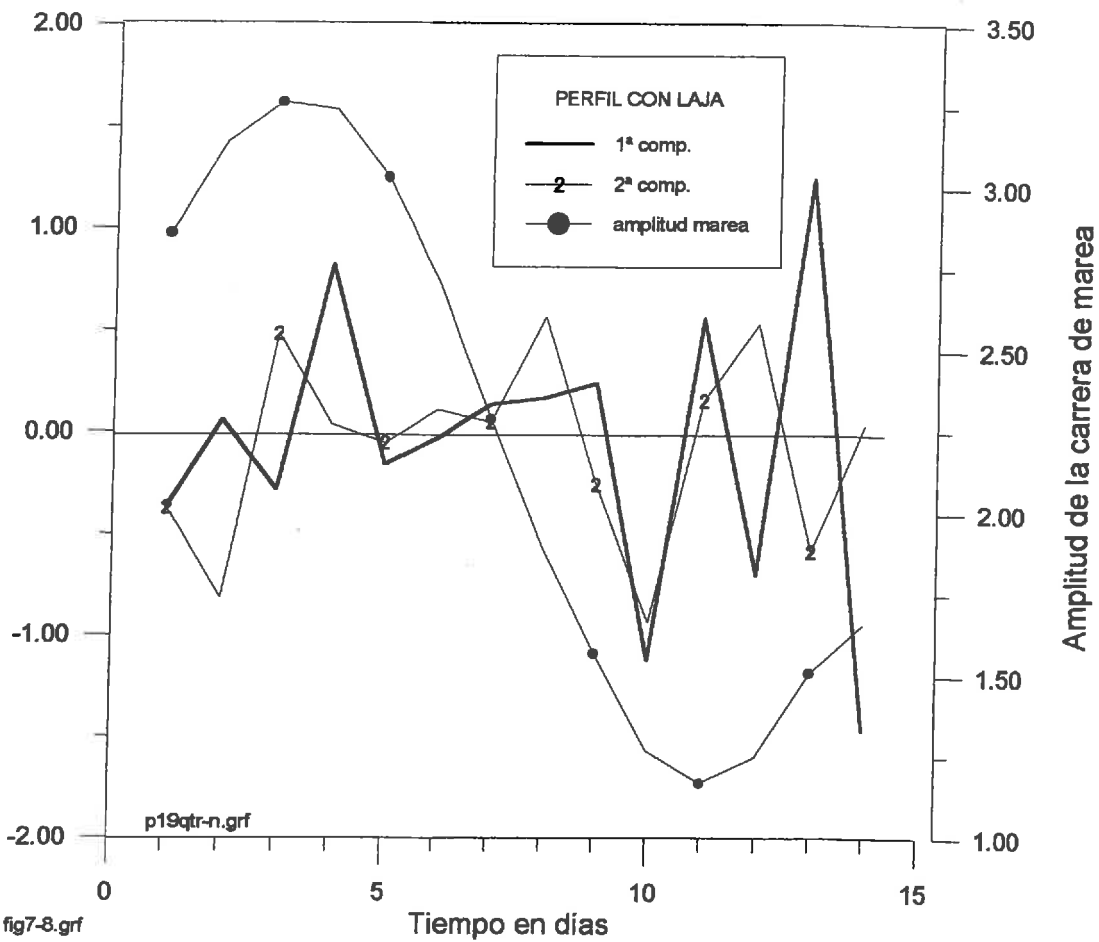
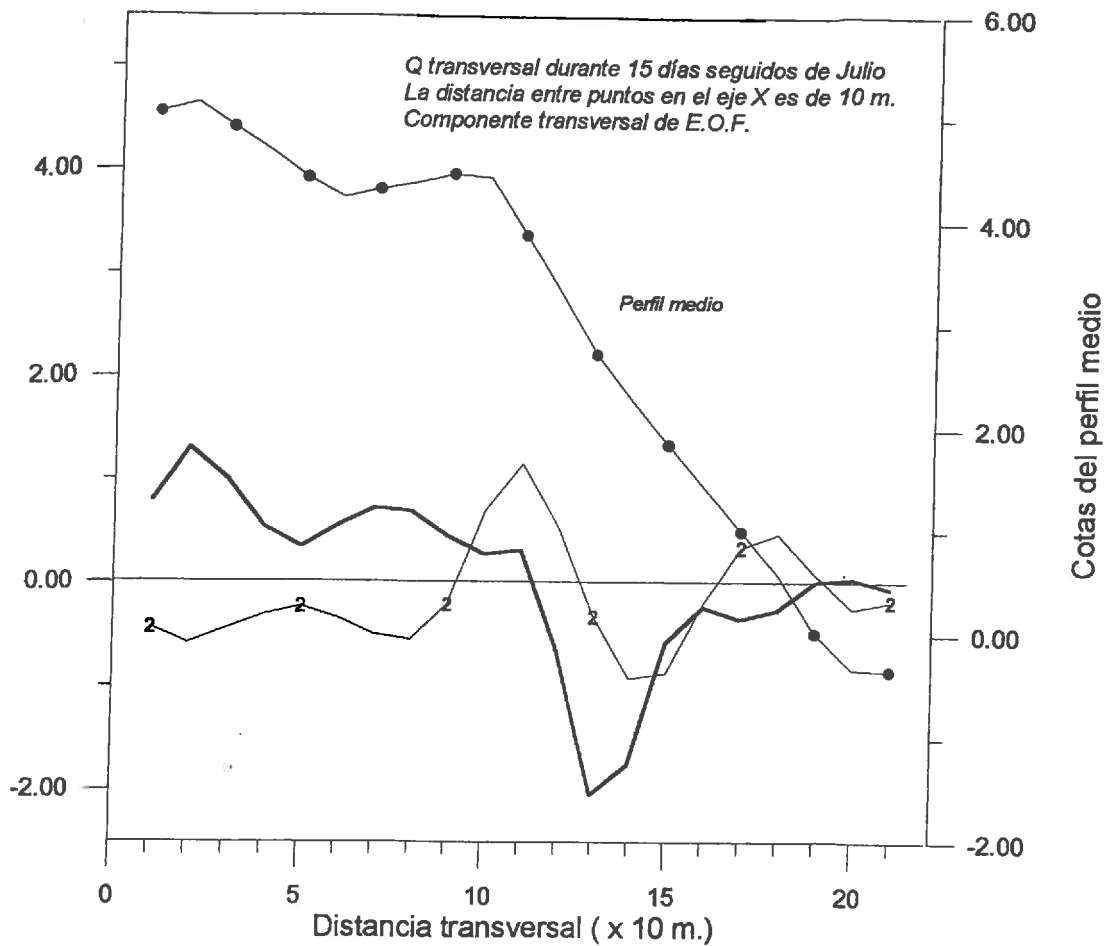


fig. 7.8 Componentes transversal y temporal del transporte en el perfil con laja

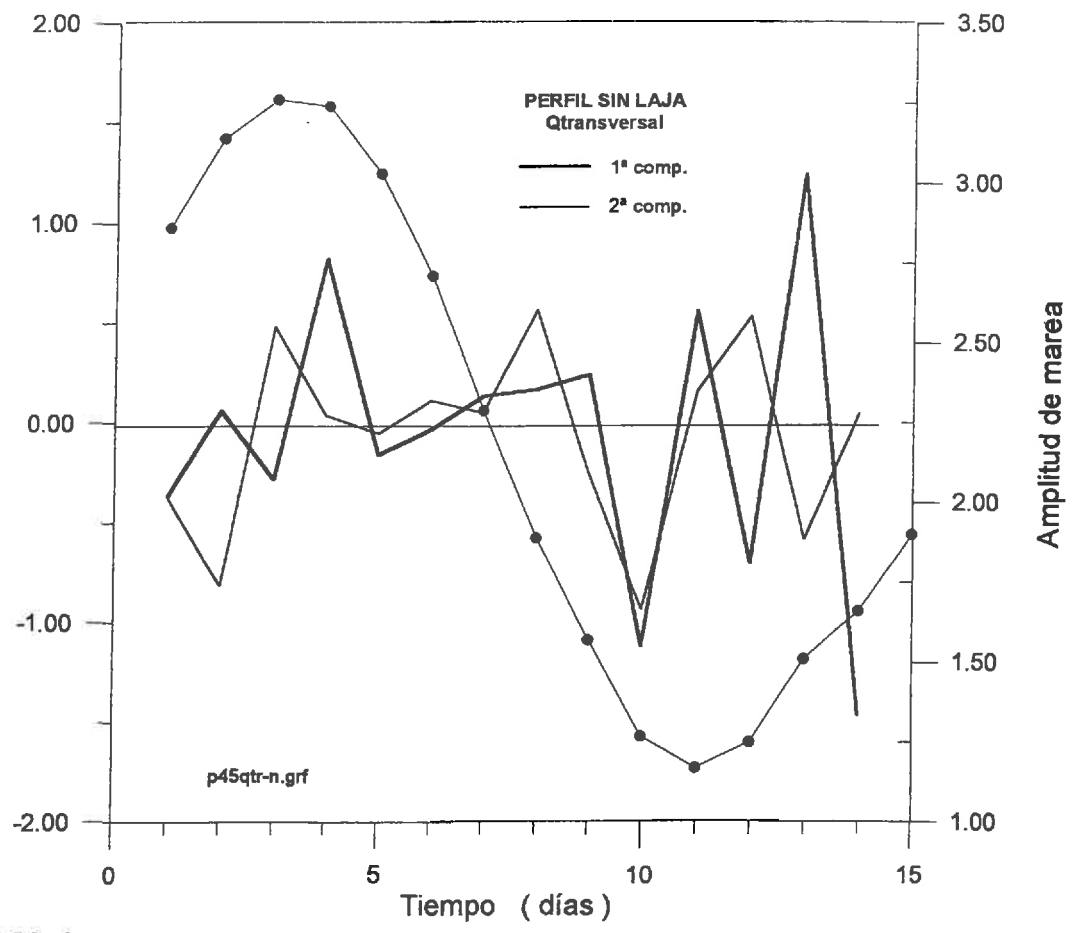
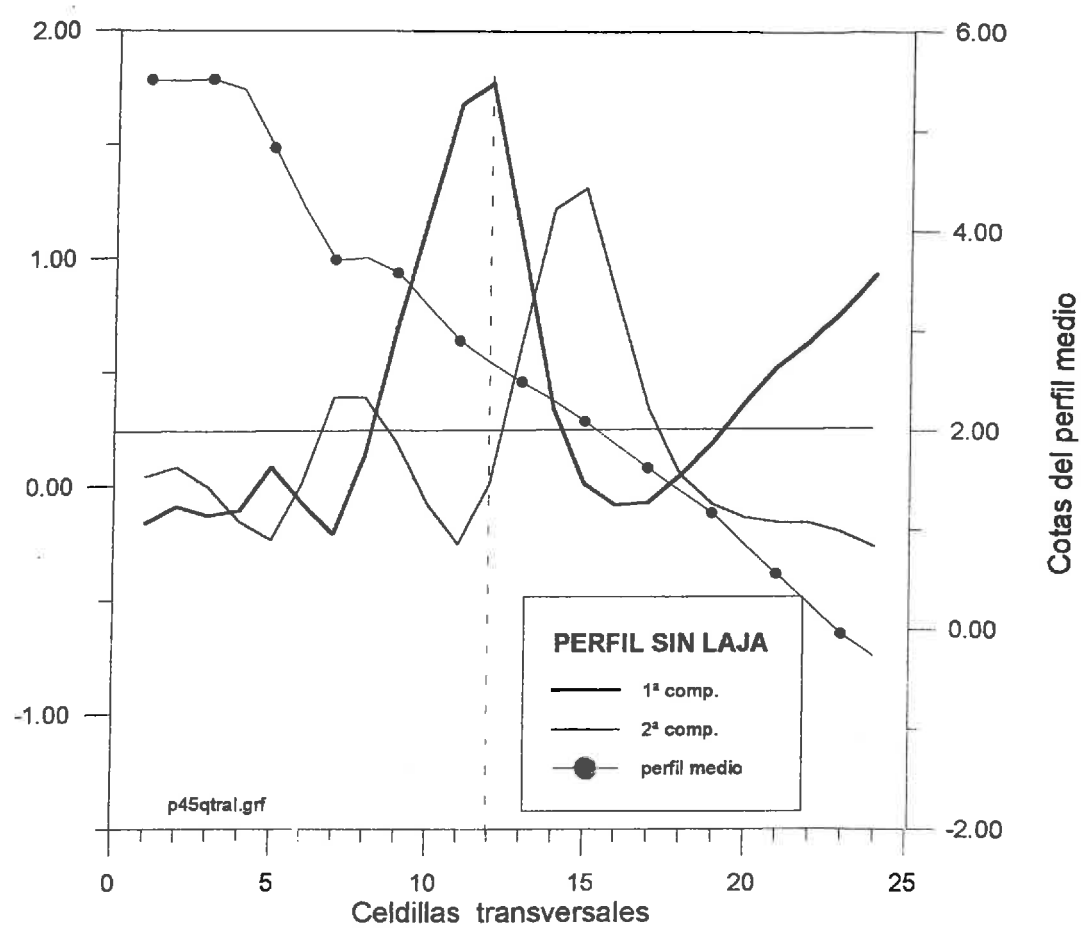


fig7-9.grf

fig. 7.9 Componentes transversal y temporal del transporte en el perfil sin laja

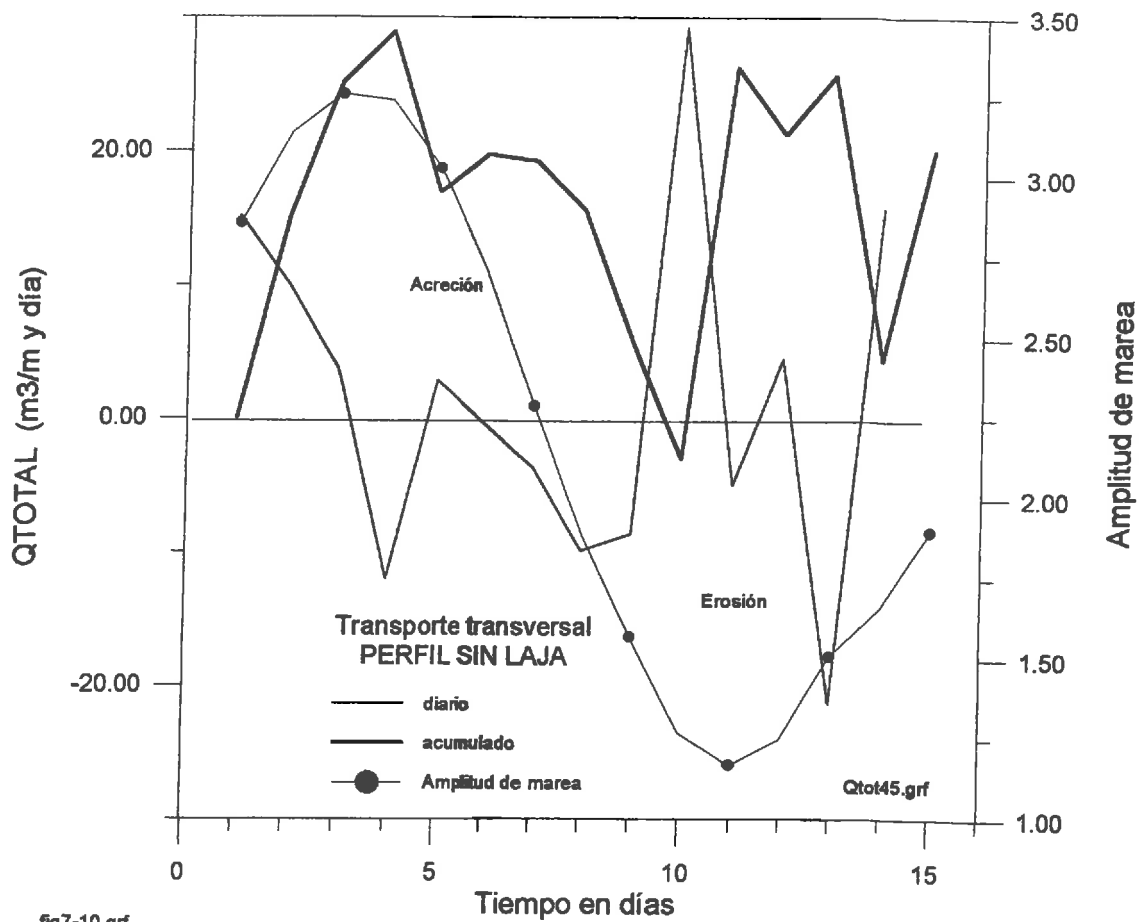
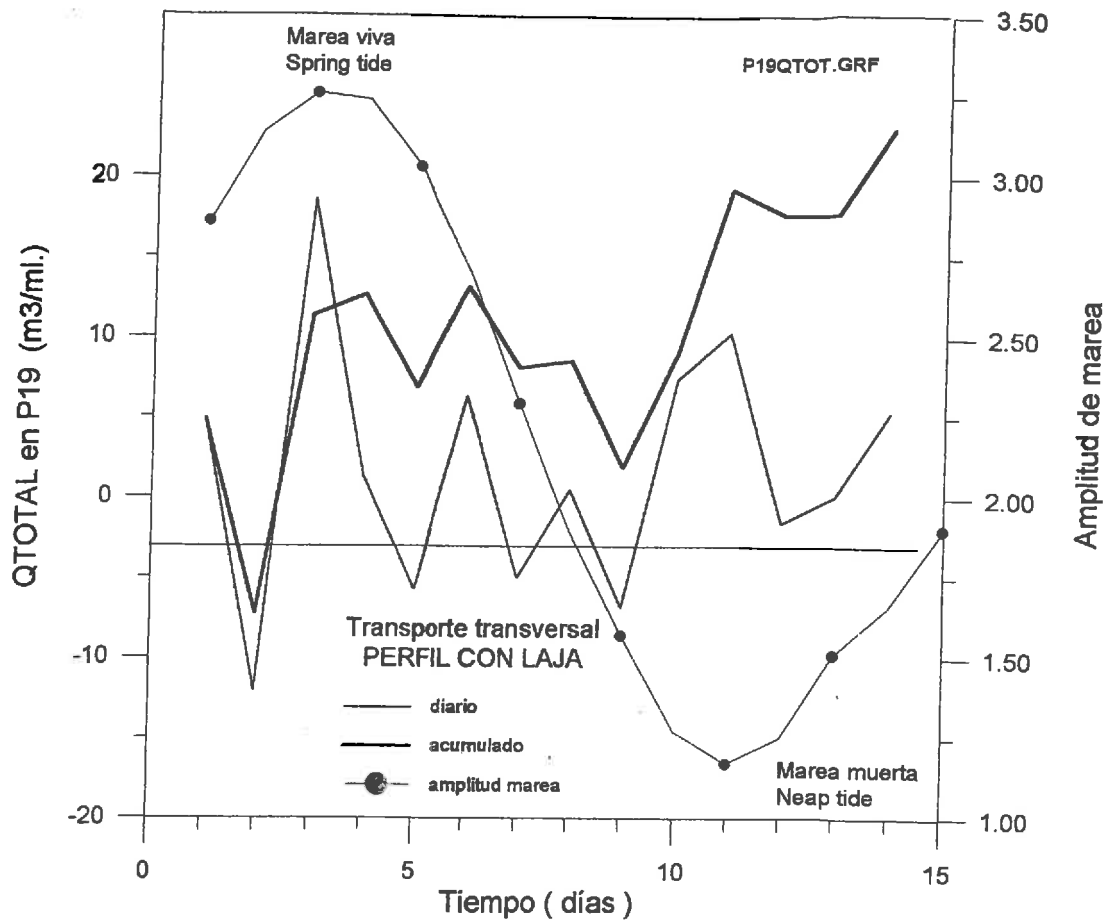


fig7-10.grf

fig. 7.10 Comparación del transporte transversal diario y acumulado en perfiles con y sin laja

El hecho de que estos valores no se anulen al cabo de un ciclo mareal inclina a pensar en la intervención de un transporte transversal inducido por un oleaje de fondo tipo swell o de verano; la fuente de sedimento sería la parte sumergida del perfil, fuera de la zona de medición y estudio de nuestra campaña. Un parámetro atractivo y de utilidad podría ser el de *aportación media de sedimento* para un oleaje de esas características en época de *recuperación del perfil*

$$Q_{\text{recuperación}} = 22,3 / 15 = 1.5 \text{ m}^3/\text{día y ml de playa}$$

7.3.- RESUMEN.

Tanto a largo como a medio plazo, hemos comprobado como el perfil apoyado en laja tenía una mayor rigidez al cambio que el perfil completo. Ello era debido a su vez a la menor variabilidad que experimentaba la altura de ola por la presencia de la laja rocosa. En cambio, la marea, como agente modificador de la altura de la lámina de agua sobre la rasa, induce variaciones tanto más importantes en el perfil sin laja cuanto que no están enmascaradas por cambios en las condiciones del oleaje incidente.

Del análisis comparativo de las F.O.E. se deduce :

- que el efecto de la marea está mucho más concentrado en el perfil P19 (con laja) . La zona de más pronunciada actuación tiene un ancho de unos 50 m. En el P45 (sin laja) el efecto está mucho más repartido a lo largo de una franja de 80 m. Los puntos de máxima variabilidad están en el punto medio del estrán.
- que, excepto las pequeñas alternancias diarias, las tendencias generales son muy parecidas en ambos perfiles, salvo un desfase de unos tres o cuatro días. Mientras el perfil con laja tiene máximos y mínimos coincidentes casi exactamente con las mareas muertas y vivas respectivamente, en el perfil completo, el P45, la máxima erosión también se produce con la marea viva, pero la máxima deposición de sedimento tiene lugar tres días antes. En el perfil apoyado, al tener una pendiente muy superior, la erosión se produce más rápidamente que en el perfil libre, de pendiente mucho menor.

Las variaciones de cota totales observadas, definidas como la suma en valor absoluto de los máximos ascensos y descensos, son muy similares en ambos tipos de perfil: de 55 cms en el apoyado y de 60 cms en el completo.

CAPITULO VIII

VARIABILIDAD A CORTO PLAZO: INFLUENCIA DE UN TEMPORAL.

VIII.- VARIABILIDAD A CORTO PLAZO : INFLUENCIA DE UN TEMPORAL

8.1.- CRITERIOS TEÓRICOS .

8.1.1.- Justificación del estudio del efecto de un único temporal

Como ya hemos comentado con anterioridad, una serie temporal es un conjunto de observaciones hechas en momentos determinados, normalmente a intervalos iguales. La experiencia basada en numerosos estudios anteriores ha revelado ciertas variaciones características cuya importancia varía de un caso a otro. El análisis de estos cambios cíclicos puede permitirnos la previsión de variaciones futuras, con la enorme ventaja que esto supondría.

Hasta el momento hemos considerado un perfil medio o tendencia a muy largo plazo, así como las variaciones interanuales, a largo plazo, y las variaciones cíclicas tanto estacionales o semestrales, a medio plazo, como las debidas a los ciclos de marea quincenales, a corto plazo.

También dentro del corto plazo nos surgen unos fenómenos esporádicos, de aparición ocasional, pero cuyos efectos pueden ser muy importantes pese al pequeño intervalo de tiempo en que actúan. Estudiaremos los cambios experimentados por el frente de playa frente a un temporal puntual, no frente a toda una temporada invernal de marejada.

Parece, a priori, necesaria una justificación pues podríamos cuestionarnos si no estaremos repitiendo el proceso ya analizado en el capítulo dedicado a la variabilidad a largo plazo del perfil; no es así. Mientras que en este último caso considerábamos el "comportamiento medio" del perfil tras una serie de temporales con sus respectivas calmas intercaladas, se trata ahora de averiguar cuán importantes pueden ser los cambios sufridos por el perfil tras una sola tormenta. En suma, queremos saber, entre otros parámetros, el orden de magnitud del retroceso de la línea de costa inmediatamente después del temporal, ya que existen daños puntuales instantáneos no reversibles que pueden quedar enmascarados con la observación de una media de más largo plazo; tal pudiera ser el caso de que el oleaje alcanzara una cimentación, ya sea de un paseo marítimo o de unas viviendas, no diseñada para esa eventualidad. Igualmente nos parece interesante el conocer cuáles son las tasas de recuperación en los días

posteriores en orden a, juntamente con un modelo de previsión del oleaje, establecer una estrategia de defensa local .

8.1.2.- Comportamiento distinto de los perfiles con y sin laja

Como ya hemos comentado anteriormente, la existencia de una laja rocosa suficientemente larga y a una profundidad reducida establece una limitación superior de la altura de ola que llega hasta el estrán. Esa altura de ola máxima, calculada, verbigracia, mediante la fórmula empírica de *Andersen y Fredsoe (1983)* ,

$$H_{\text{máx}} = h_{\text{laja}} (0.5 + 0.3 \exp (-0.11 x/h_{\text{laja}}))$$

nos permite considerar dos casos diferentes: cuando la altura de ola del temporal es superior a esa altura límite, y cuando no lo es.

$$- H_{\text{temporal}} > H_{\text{máx}}$$

En primera aproximación diremos que en el perfil apoyado sobre la rasa rocosa no existen diferencias en su comportamiento por mucho que aumente el valor de esa altura de ola del temporal antes de rompiertes pues por rozamiento con el fondo dicho valor disminuirá hasta alcanzar la acotación $H_{\text{máx}}$. Por contra, el perfil no apoyado o completo no dispone de esa defensa natural y seguirá tendiéndose más y más a medida que le lleguen olas más grandes. En una segunda aproximación tendríamos en cuenta la elevación del nivel del mar debida al set-up, que es tanto mayor cuanto más grande es la altura de ola en grandes profundidades. Más set-up implica una mayor profundidad de la lámina de agua, un mayor altura de ola y un incremento en el retroceso experimentado por el perfil. La demostración teórica para una playa plana puede encontrarse en *Longuet-Higgings y Stewart (1964)*; un modelo con solución analítica en *Symonds et al. (1995)* , y la resonancia de ondas largas de grupo o surf-beat sobre arrecifes en *Seelig (1983)* , que mostró la contribución de este fenómeno al run-up de la ola aunque no clarificó ninguna de sus características y, ya últimamente, por *Nakaza et al (1990)* . Este investigador ofrece la idea, observada en la Naturaleza y contrastada con datos de laboratorio y un modelo no lineal, de la existencia de modos de oscilación de la superficie del mar en las "dársenas de arrecifes". Estima el período natural de estos especiales contornos mediante la ecuación

$$T_o = \frac{4 l}{(2n+1) \sqrt{gh}}$$

donde l es la anchura de la llanura arrecifal y h la profundidad del mar en reposo sobre la laja.

$$- H_{\text{temporal}} < H_{\text{máx}}$$

La altura de ola que llega a ambos perfiles es, en este caso, similar. Sin embargo, el estrato rocoso delimita la zona que puede sufrir modificaciones en el perfil activo con laja al tramo comprendido entre la berma de playa bañada por el mar y dicha roca, mientras que en el perfil no apoyado o completo, al ser totalmente arenoso, el pie del perfil activo viene marcado por el propio oleaje incidente. Eso supondrá, en primer lugar, que el punto pivote de basculamiento del frente de playa estará más elevado en el perfil apoyado, aproximadamente en el punto medio de la carrera de marea. En segundo lugar, y por condicionantes meramente de contorno, el volumen de sedimento movilizado en el perfil con laja será inferior al del perfil completo.

8.2.- APLICACIÓN A LA PLAYA VICTORIA

8.2.1.- Descripción de la campaña de toma de datos

Teniendo conocimiento, merced a la previsión del Instituto Meteorológico, de la llegada del primer temporal del invierno a principios de noviembre de 1995, se decidió el hacer un seguimiento diario del comportamiento que frente a este fenómeno tenían dos perfiles de la Playa Victoria: el P19 (apoyado sobre el estrato rocoso horizontal) y el P45, ubicado más hacia el sur y fuera por tanto de la laja del Plioceno.

Los datos topográficos se tomaron mediante un distanciómetro situado en cada cabeza de perfil, aprovechando las horas de bajamar y siendo llevado el prisma reflector por un operario con traje de neopreno hasta más allá de la cota - 0.50 . La fiabilidad de estos datos es de 1 cm. a efectos prácticos. Esto permite que en el caso del perfil apoyado dispongamos de todo el perfil activo, unos 220 m. desde el origen (que coincide con el muro del paseo marítimo), mientras que en el P45 la longitud estudiada alcanza los 250 m., debido a su menor pendiente

y a que, no obstante, queda limitada por el nivel del mar, el oleaje y la altura del portaprisma.

La primera jornada de campo fue el 8 de noviembre de 1995, el temporal ocurrió el día 11 y se decidió terminar con la campaña el 28 de ese mismo mes. Fueron 21 días en total.

8.2.2.- Descripción morfológica de las diferencias entre perfiles

A continuación se expone un gráfico (fig. 8.1) donde se representa el conjunto de los datos de una manera conjunta, sin tratamiento estadístico previo. Se aprecia ya como, tal y como predecíamos en el cuestionamiento teórico, el basculamiento se produce hacia la mitad del estrán en el perfil apoyado y en la cota aproximada de la bajamar en el perfil completo.

Para apreciar tendencias y extraer conclusiones sobre el comportamiento de estos dos perfiles y las posibles diferencias existentes entre ellos precisaremos de una herramienta matemática que nos proporcione una garantía de imparcialidad frente al tratamiento de los datos. Ya hemos demostrado con anterioridad las virtudes de las Funciones Ortogonales Empíricas (E.O.F.) que serán el método que utilizaremos.

Al igual que habíamos obtenido para el ciclo mareal de quince días, la primera componente espacial tiene la forma del perfil medio y su componente temporal asociada es, por consiguiente, de valor casi unitario. Las 2ª y 3ª componente apenas se diferencian dado el enorme peso que tiene la 1ª en cuanto a explicación de la varianza de los datos (superior al 99,9%) .Presentamos en la fig 8.2 , de modo enfrentado, dichas componentes para ambos perfiles tipo.

8.2.2.1.- Características del oleaje incidente

En la gráfica 8.3 hemos dispuesto los valores medios diarios del oleaje en esos días. Además de las comúnmente representadas altura de ola media y significativa, se ha añadido el cuadrado de la ola media que estará directamente relacionado con la energía media que llegue a nuestra playa. Del mismo modo, debajo del período medio vemos la gráfica del peralte medio diario, cuyo valor máximo en aguas profundas, $(H/L_o)_{\text{máx}}=0.142$ ya fue encontrado por *Michell (1893)* . Este parámetro es el que, mediante el número de *Iribarren (1951)* , nos

indica el tipo de rotura del oleaje esperada. *Patrick y Wiegel (1955)* también proporcionan unos gráficos que relacionan el tipo de rotura con el peralte y con la pendiente de la playa. Puede apreciarse como, tras el temporal, oscilan los valores entre 0.007 y 0.03 , lo que para pendientes del 5% supone que el nº de Iribarren fluctúe entre 0.30 y 0.60; es decir, las olas pasen de rotura en descrestamiento a rotura en voluta alternativa y sucesivamente en el lapso de pocos días.

Si aplicamos a la playa Victoria la fórmula antes mencionada de *Nakaza et al (1990)* , para una anchura del arrecife de unos 500 metros y para $n=1$ obtenemos períodos de 72 segundos fácilmente alcanzables por grupos de 8 a 10 ondas de temporal. Aunque la constatación de este fenómeno del "*bore like surf beat*" no puede efectuarse con la base de datos disponible, parece interesante el plantear como futura línea de actuación la investigación de esta manifestación física. La comprensión de este fenómeno nos permitiría un mejor diseño de las estructuras de defensa de la costa frente a inesperadas inundaciones a causa de elevaciones del nivel del mar.

8.2.2.2. Estudio de las variaciones respecto al perfil inicial

En el caso anterior , el referido a las alteraciones producidas por el ciclo mareal, eliminábamos la media de los datos para dar mayor preponderancia a la diferencia de la varianza restante. En este caso particular, lo que deseamos ahora es ver los cambios debidos al temporal con respecto al perfil inicial o de bonanza. Será éste, por consiguiente, el que restemos a, todos los demás para que nos sirva de punto de referencia. Los gráficos con las componentes transversales y temporales son, para los perfiles con laja y el no apoyado, las figuras 8.4 y 8.5 respectivamente.

Si comparamos los resultados en ambos perfiles podemos destacar que:

- En el P19 (con laja) la erosión se produce en la parte superior del estrán (véase la 1ª componente transversal), entre las cotas 2,50 y 4,50 , siendo más significativa entre la 3,00 y la 4,00. Parte de ese material se reparte en una zona mucho más amplia inmediatamente inferior, entre la +2,50 y la -0,20. La componente temporal asociada es siempre positiva, experimenta un fuerte salto con el temporal para fluctuar después suavemente alrededor del valor unidad; ello indica que el cambio sufrido no ha sido reversible en su mayor parte. La 2ª componente parece estar relacionada con el ciclo de marea pues tiene una forma sinusoidal con máximo el día 13 y mínimo el 24 que coinciden relativamente con

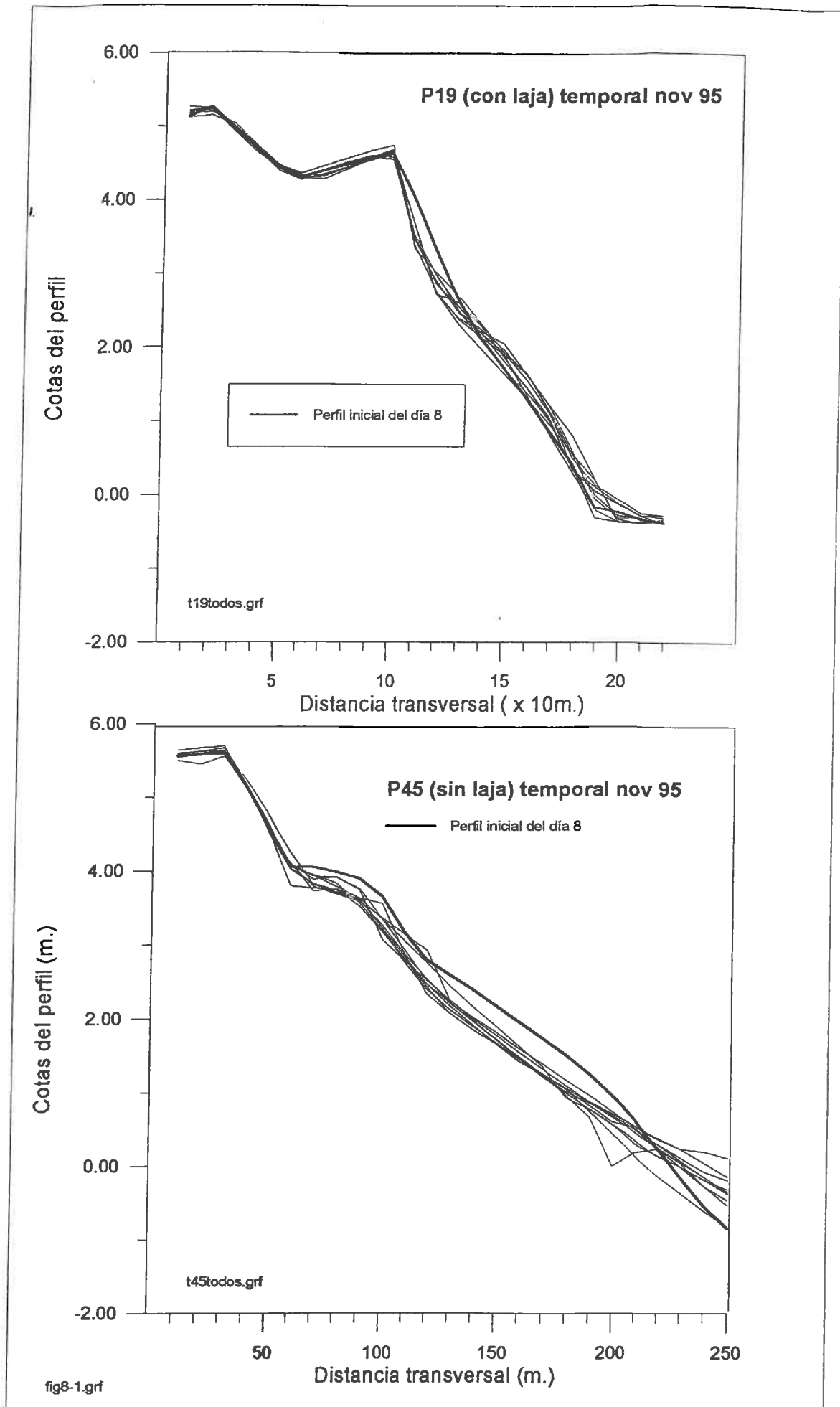


fig. 8.1 Representación de los perfiles topográficos de seguimiento de la erosión-acreción producida por el temporal de nov-95

1.

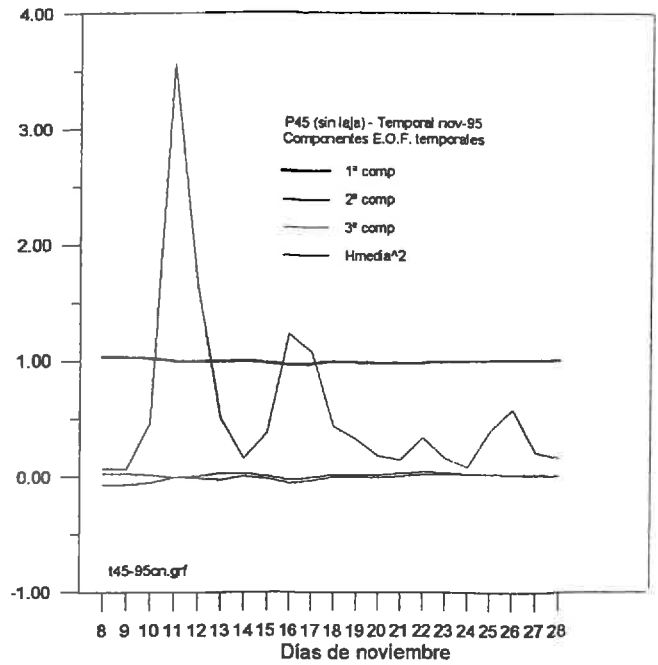
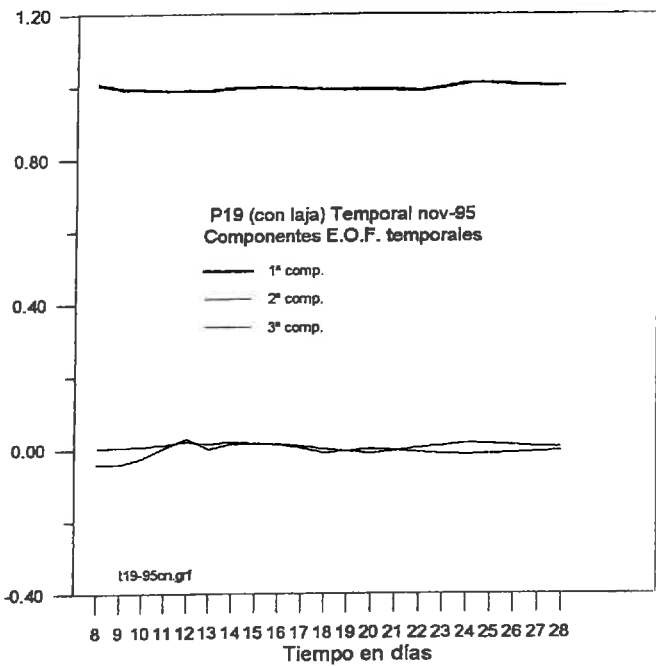
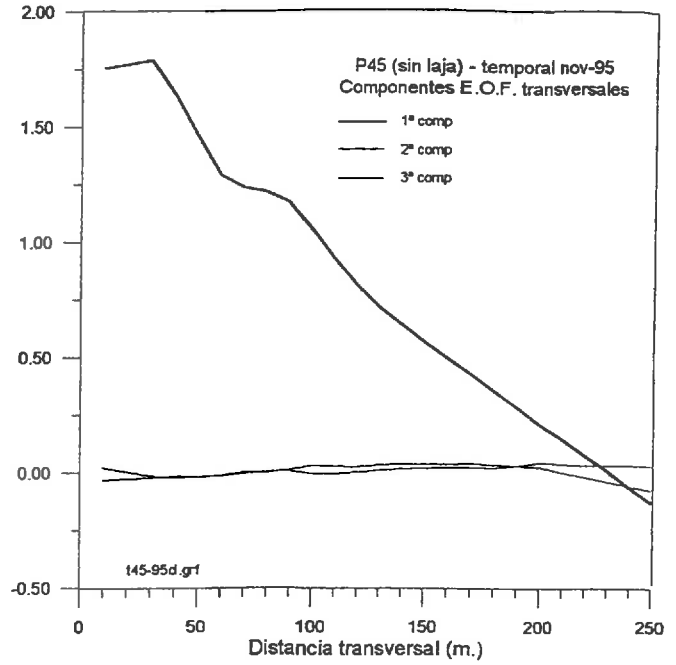
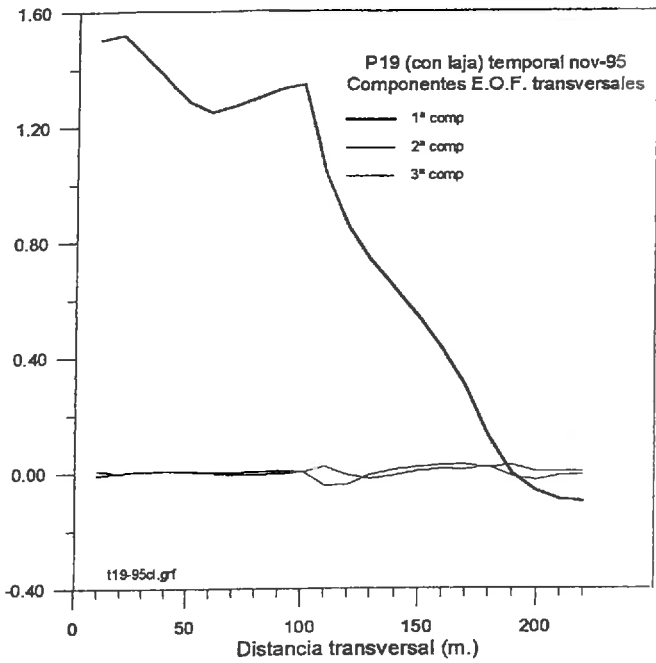


fig. 8.2 Componentes E.O.F. transversales y temporales de los perfiles con y sin laja en el seguimiento del temporal de noviembre 95

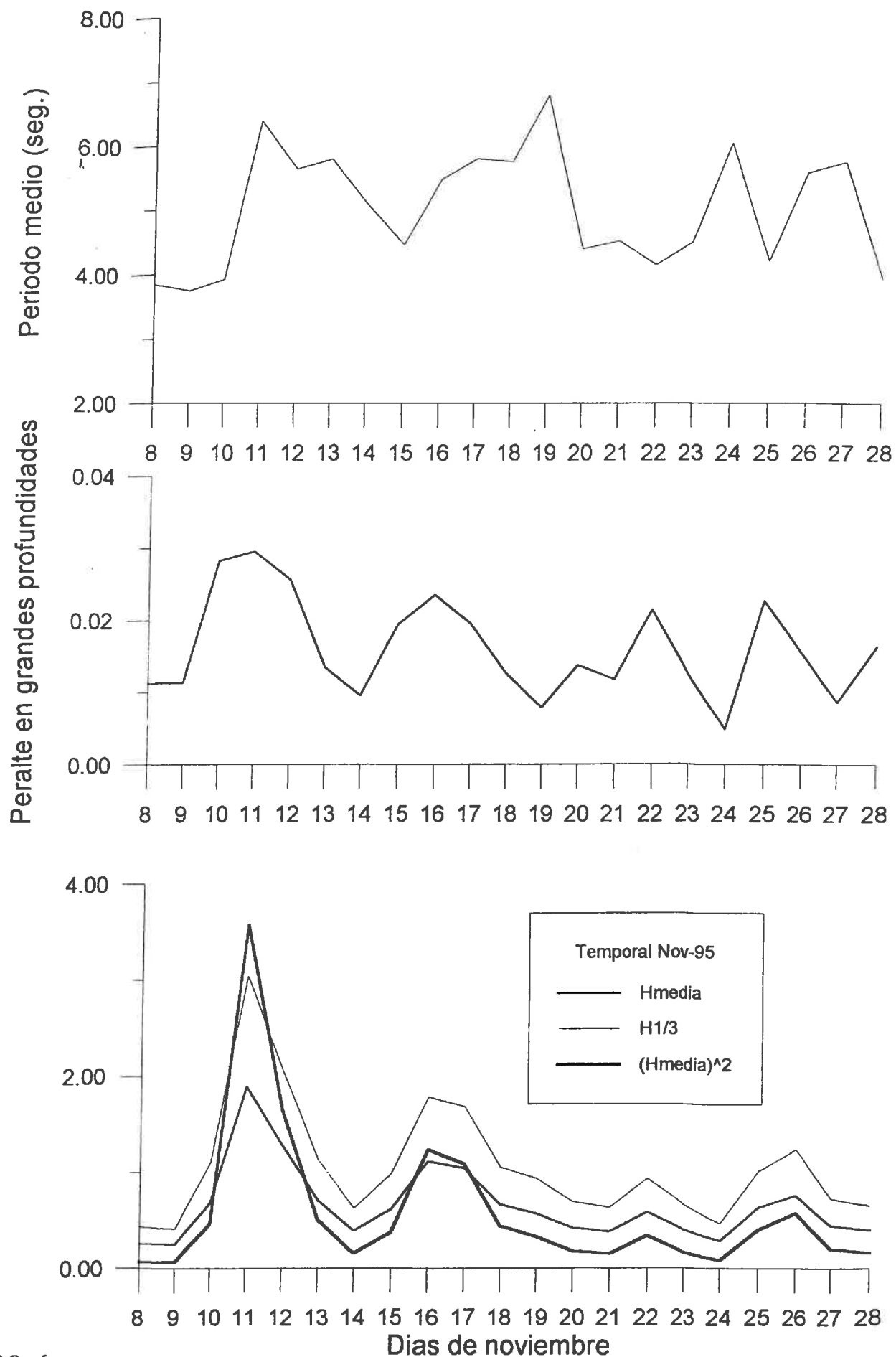


fig8-3.grf

fig. 8.3 Parámetros del oleaje durante el temporal de 11 de noviembre y días posteriores

la carrera de marea muerta y viva respectivamente.

- En el P45 (sin laja) la erosión cubre una zona mayor que en el perfil con laja, desde la +4,00 hasta la +0,00 (todo el perfil visible de la playa), produciéndose los cambios más importantes entre +3,00 y la +0,50. Esa arena va a parar a la parte sumergida pero no podemos cuantificar su posición por tratarse únicamente de datos topográficos. La 1ª componente temporal es en todo similar a la del P19, siempre positiva, salto brusco con el oleaje de tormenta y suaves fluctuaciones posteriores alrededor del valor unidad. En cuanto a la 2ª componente temporal aparece también una dependencia con respecto a la carrera de marea. Incluso existe un desfase de 2 a tres días en la aparición del mínimo con respecto al perfil apoyado sobre laja, tal y como nos sucedía en el estudio de la influencia del ciclo de marea quincenal.

8.2.3.- Diferencias en la erosión transversal

Mediante el programa EROTRANS (ver anejo nº 3) establecíamos unas celdillas en el perfil transversal en las que resolvíamos la ecuación de continuidad y eso nos permitía encontrar los valores del caudal Q de sedimento que pasaba de una a otra célula con el paso de cada día. Sumando dichos valores con su signo obteníamos un transporte transversal neto diario; debido al orden de los factores en la discretización un valor positivo significa acreción y negativo, por contra, erosión. En la fig. 8.6 se han representado también los valores acumulados de este parámetro. Tanto en un perfil como en otro supondremos que su ubicación está en tramos lo suficientemente largos, homogéneos y alejados de los contornos como para que el transporte longitudinal neto pueda despreciarse.

En el P19 (con laja) , y a partir de la erosión puntual del temporal, hay unas fluctuaciones con plazos de 5 a 6 días entre máximos y mínimos. No obstante, el mínimo es inferior en valor absoluto a los dos máximos que resultan ser además del mismo orden. Eso se aprecia mejor en la función de distribución acumulada del transporte; hay fluctuaciones alrededor del cero y de la misma magnitud (unos 10 m³/ml.día). lo que significa que el temporal ha tenido como consecuencia sólo un cambio morfológico en las pendientes debido a la nueva disposición del sedimento. No se ha perdido arena en la unidad fisiográfica transversal si incluimos en ella la laja rocosa. Debemos tener en cuenta que un espesor de arena de sólo 5 cms. sobre la roca supone un volumen de 25 m³ de sedimento a lo largo de los 500 m. del arrecife horizontal existente frente a la playa.

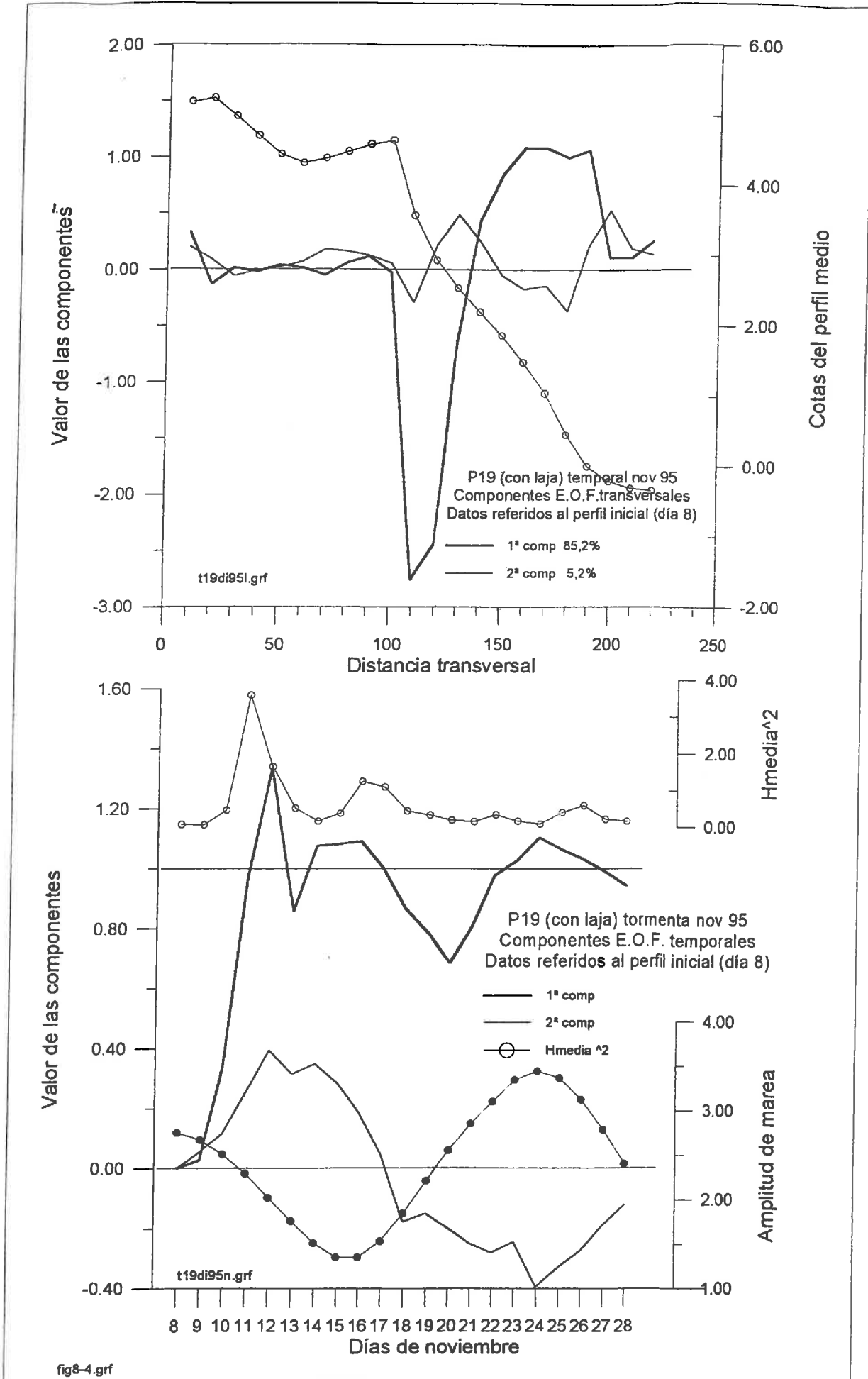


fig. 8.4 Componentes E.O.F. del perfil con laja , temporal nov-95
 Datos referidos al perfil inicial (el del día 8)

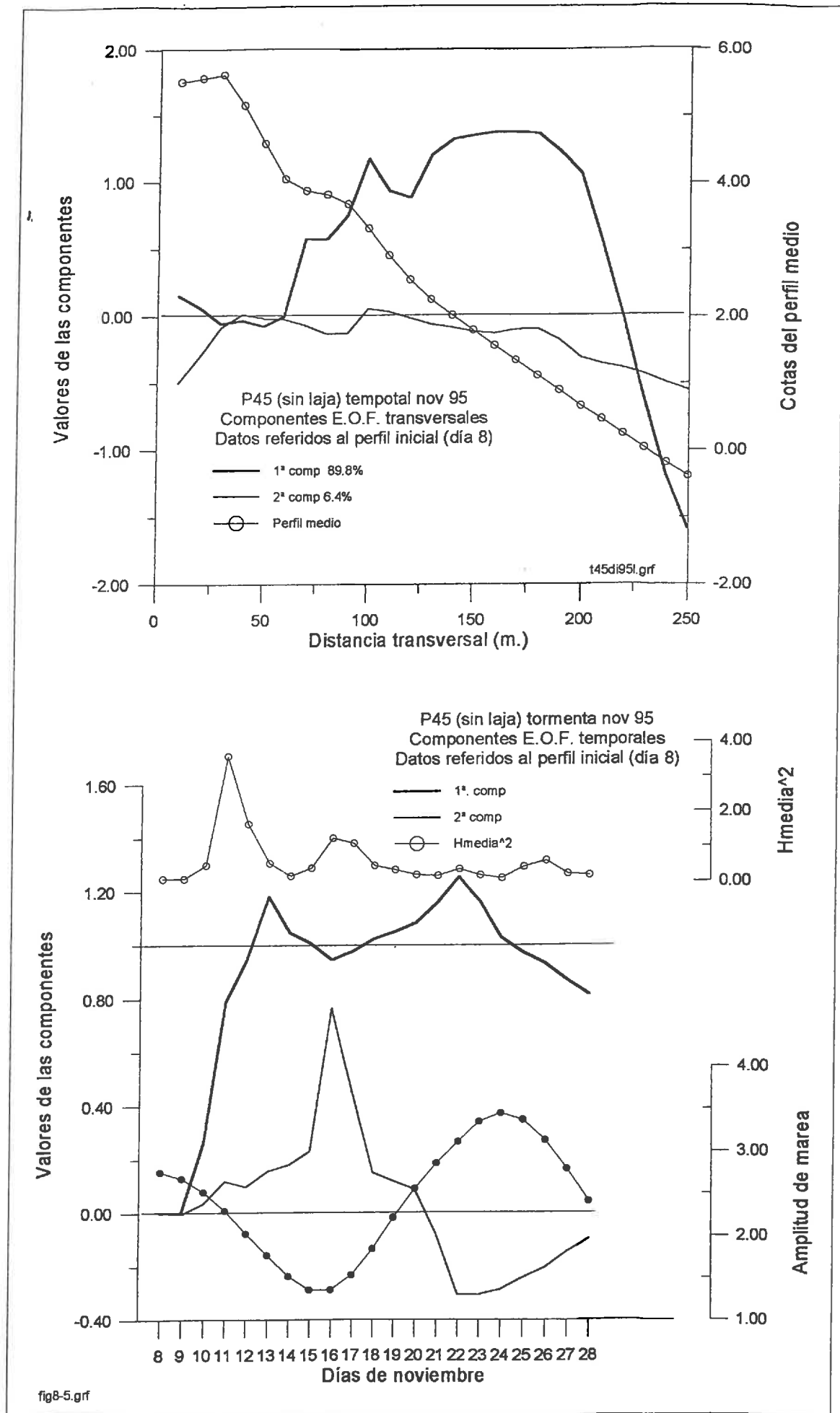


fig. 8.5 Componentes E.O.F. del perfil sin laja, temporal nov-95
 Datos referidos al perfil inicial (el del día 8)

En el P45 el volumen de transporte transversal tiene alternancias en signo con una periodicidad de 2 a 3 días, inferior a la del perfil con laja. Estas fluctuaciones se amortiguan además con el paso del tiempo, hasta anularse al cabo de 12 días después de producirse el temporal. Se puede afirmar, asimismo, que los efectos del oleaje supusieron erosiones primeras de hasta 78 m³/ml, con una media de 55 para estabilizarse posteriormente en un déficit de 29 m³/ml.; se trata por tanto de un perfil con lo que vamos a llamar menos "inercia" al cambio que el perfil apoyado. Hay que aclarar que esta arena ha ido a parar por debajo de la cota que estamos estudiando. Desconocemos si está cerca de la orilla, con lo que tarde o temprano se integrará en el perfil visible, o bien ha ido a parar más allá de la profundidad de movimiento del sedimento que para Cádiz, y aplicando la formulación puesta a punto por *Hallermeier (1981)* y *Birkemeier (1985)*, resulta ser de unos 6.00 m. En todo caso, sí ha ido a parar a una profundidad tal que el oleaje residual de esos días no ha sido capaz de acercarla a nuestra zona de estudio.

Varias son las conclusiones que podemos extraer del estudio comparado del comportamiento de ambos perfiles frente a un temporal de un solo día.

- La primera es que el movimiento de sedimento es mucho mayor en el perfil completo que en el perfil apoyado. Tanto en volumen diario como acumulado, las tasas de erosión son muy superiores:

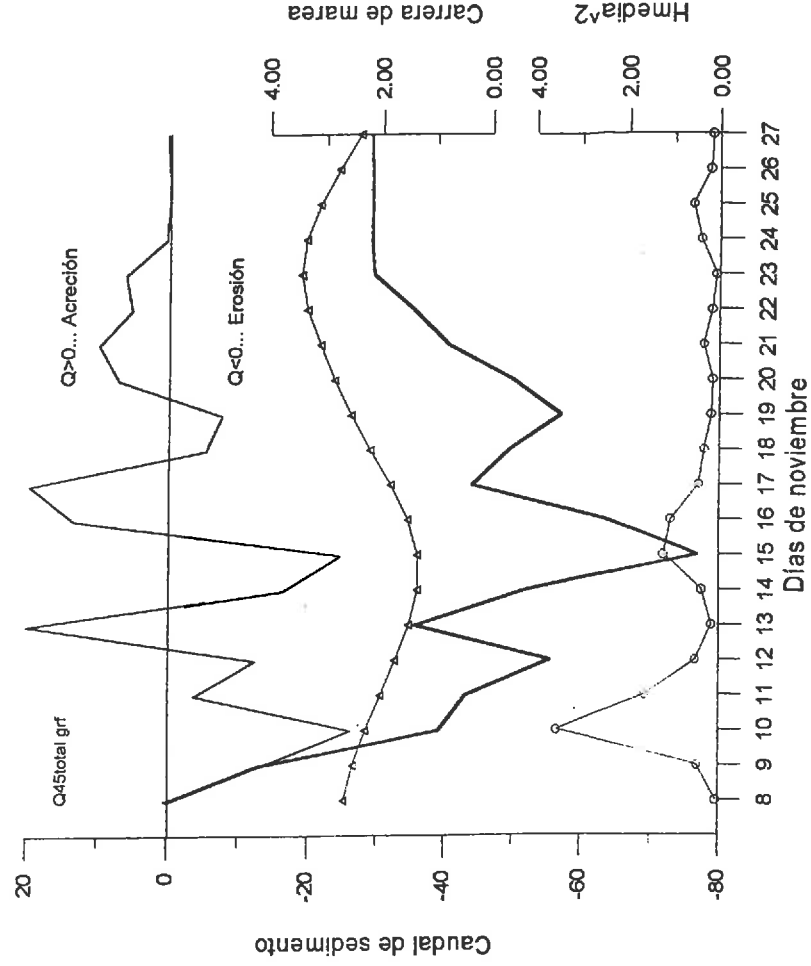
	<i>Perfil con laja</i>	<i>Perfil sin laja</i>
<i>Volumen diario (m³/ml. y día)</i>	-9	-26
<i>Volumen acumulado (m³/ml.)</i>	-12	-78

- La segunda es que el punto de basculamiento del perfil con laja está alrededor de la zona intermareal (+2.00) en el perfil apoyado en laja, mientras que está ubicado cerca de la bajamar en el perfil no apoyado o completo.

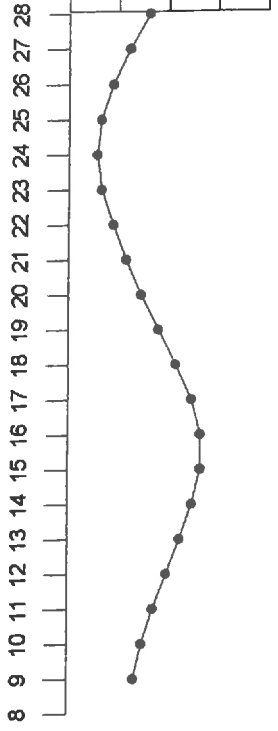
- Una tercera conclusión sería la de advertir que, para este temporal en particular, el período de amortiguación de las fluctuaciones post-tormenta ha sido de aproximadamente 25 días en ambos casos. También es cierto

PERFIL SIN LAJA (P45)
 - temporal nov 95
 Q transversal (m3/ml y día)

- Qtotal diario
- Qtotal acumulado
- Hmedia^2
- △ Carrera de marea



Amplitud de marea



PERFIL CON LAJA (P19)
 Caudal de sedimento diario y acumulado

- Qtotal diario
- Qtotal acumulado

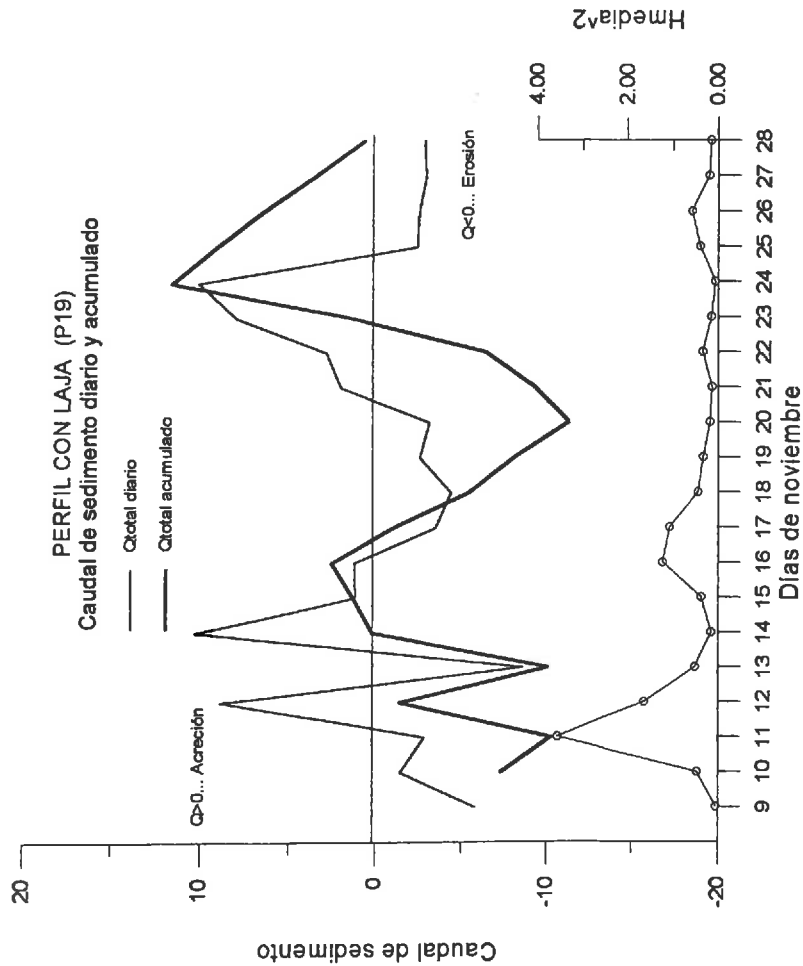


fig. 8.6 Transporte transversal diario y acumulado durante el temporal del 11/1/95 y días posteriores. Comparación entre perfil con laja y sin laja

que sería conveniente, en un futuro, el repetir la experiencia pero alargando el plazo de toma de datos topográficos en ambos sentidos, antes y después del temporal, para comprobar la universalidad del análisis efectuado .

8.2.4.- Comparación de perfiles originales

Para comprobar la bondad y validez de las interpretaciones realizadas en base a las componentes E.O.F. preparamos unas gráficas en las que se mostraban tres perfiles diarios consecutivos originales en cada una de ellas. El del último día representado era el primero del siguiente y así sucesivamente. Se prepararon y estudiaron los cinco grupos siguientes : los de los días 8-11-12, 12-13-14, 14-16-18, 18-20-22 y 22-24-28.

Para resumir, baste decir que los análisis efectuados coincidían con los resultados antes obtenidos, comentando aquí únicamente la agrupación 8-11-28, que indicaría el perfil inicial, el correspondiente al día del temporal y el del final del seguimiento (fig. 8.7) .

En el perfil P19 se aprecia como, efectivamente, hay una zona superior del estrán que no se recupera. La explicación física podría deberse a una cuestión de prioridades: el mar habría de rellenar primero el pie del talud para suavizar la pendiente lo suficiente como para permitir que la energía incidente suba el grano de arena de nuevo a su posición original.

En el P45 el límite entre las zonas de acreción y erosión no está en la cota +2.50 como en el P19 sino en los alrededores de la bajamar escorada, la +0.00. Todo el perfil a la vista queda erosionado. En el lapso de tiempo entre los días 11 y 28 hay una cierta recuperación de arena (no tan importante como la pérdida original) pero que apunta a una búsqueda de las pendientes iniciales en la zona del estrán. En la playa sumergida permanece una reserva de arena. Podría interpretarse figurativamente como si la playa no se fiara del mar tras el temporal, como si hubiera pasado poco tiempo todavía, recupera la forma del perfil original pero sólo en la parte visible y retranqueado unos 15 m.; con la arena sobrante ha subido el nivel del fondo de manera que el posible oleaje incidente vea mermada por rozamiento y rotura su capacidad erosiva. Es como si la recuperación del perfil se efectuase en dos fases y nosotros nos hubiéramos quedado únicamente con la primera .

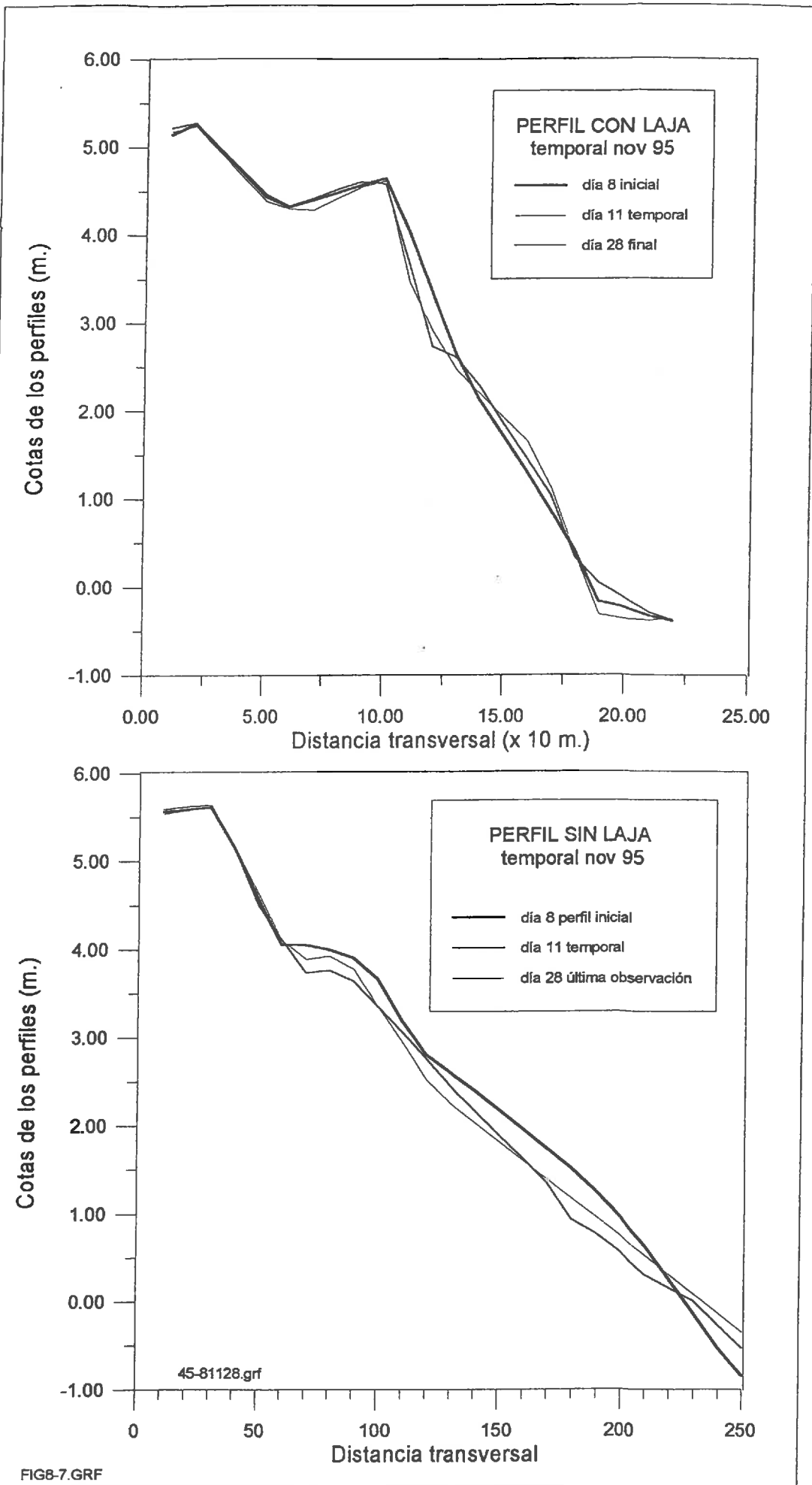


fig. 8.7 Comparación entre los perfiles inicial, día del temporal y final

8.3.- RESUMEN.

Como deducción de nuestro modelo teórico ya hemos comentado que la existencia de una laja rocosa suficientemente larga y a una profundidad reducida establece una limitación superior de la altura de ola, a la que denominaremos ola máxima, que llega hasta el estrán.

Para alturas de ola superiores a la máxima :

En primera aproximación diremos que en el perfil apoyado sobre la rasa rocosa no existen diferencias en su comportamiento por mucho que aumente el valor de esa altura de ola del temporal antes de rompientes pues por rozamiento con el fondo dicho valor disminuirá hasta alcanzar la acotación $H_{m\acute{a}x}$. Por contra, el perfil no apoyado o completo no dispone de esa defensa natural y seguirá tendiéndose más y más a medida que le lleguen olas más grandes.

En una segunda aproximación tendríamos en cuenta la elevación del nivel del mar debida al set-up, que es tanto mayor cuanto más grande es la altura de ola en grandes profundidades. Más set-up implica una mayor profundidad de la lámina de agua, una mayor altura de ola y un incremento en el retroceso experimentado por el perfil.

Para alturas de ola inferiores a la máxima :

La altura de ola que llega a ambos perfiles es, en este caso, similar. Sin embargo, el estrato rocoso delimita la zona que puede sufrir modificaciones en el perfil activo con laja al tramo comprendido entre la berma de playa bañada por el mar y dicha roca, mientras que en el perfil no apoyado o completo, al ser totalmente arenoso, el pie del perfil activo viene marcado por el propio oleaje incidente. Eso supondrá , en primer lugar, que el punto pivote de basculamiento del frente de playa estará más elevado en el perfil apoyado, aproximadamente en el punto medio de la carrera de marea. En segundo lugar, y por condicionantes meramente de contorno, el volumen de sedimento movilizado en el perfil con laja será inferior al del perfil completo.

Varias son las conclusiones que podemos extraer del estudio comparado del comportamiento de ambos perfiles frente a un temporal de un solo día.

- La primera es que el movimiento de sedimento es mucho mayor en el perfil completo que en el perfil apoyado. Tanto en volumen diario como

acumulado, las tasas de erosión son muy superiores. Ciertamente es que en el perfil no apoyado no disponemos de la parte sumergida del mismo. Pero en la parte aérea de ambos sí podemos especificar cuál ha sido la tasa de erosión: 9 m³/ml y día para el perfil apoyado y 26 m³/ml y día para el no apoyado.

- La segunda es que el punto de basculamiento del perfil con laja está alrededor de la zona intermareal (+2.00) en el perfil apoyado en laja, mientras que está ubicado cerca de la bajamar en el perfil no apoyado o completo.

- Una tercera conclusión sería la de advertir que, para este temporal en particular, el período de amortiguación de las fluctuaciones post-tormenta ha sido de aproximadamente 20 días en ambos casos. Además la erosión ha sido irreversible a corto plazo; la recuperación ha consistido únicamente en la modificación de las pendientes del tramo emergido, procurando la similitud a las existentes antes del temporal.

CAPITULO IX

CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO.

IX.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACIÓN

9.1.- CONCLUSIONES

Escalas de tiempo observadas

Las variaciones experimentadas por los perfiles de playa suceden a escalas de tiempo muy diferentes, en función del fenómeno físico que los genera. En este estudio hemos distinguido:

- un perfil medio de equilibrio o tendencia a muy largo plazo,
- las variaciones interanuales o a largo plazo,
- los cambios experimentados a lo largo de un año o a medio plazo,
- los cambios debidos a los ciclos quincenales de marea o a corto plazo,
- los cambios frente a un temporal puntual o de muy corto plazo.

Método de análisis estadístico utilizado

Los E.O.F. (Empirical Orthogonal Functions) o funciones ortogonales empíricas, conjuntos de autofunciones independientes por tanto entre sí, han demostrado ser una herramienta matemática muy útil a la hora de analizar las series temporales de datos de que disponíamos. Permiten diferenciar y distinguir, con una metodología sencilla, los diferentes fenómenos físicos de alteraciones tanto del perfil como de la planta de la playa.

Perfil de equilibrio

Se ha elaborado un modelo teórico de diseño para perfiles apoyados en laja rocosa teniendo en cuenta la disminución del flujo de energía incidente debida al rozamiento con el fondo casi horizontal del arrecife.

La formulación encontrada permite obtener una relación entre los parámetros A con y sin apoyo sobre laja en función del ancho adimensional del arrecife. El valor obtenido crece desde 1 , para $x=0$ o no existencia de laja, hasta un valor asintótico que varía en función de la hipótesis de disipación del flujo de energía utilizada. En el caso de *Dally et al (1985)* alcanza hasta 1.93 , mientras que para *Andersen y Fredsoe (1983)* se queda en $A_{cl}=1.46 A_{sl}$.

La calibración del modelo, efectuada para 7 playas del Cantábrico y de la provincia de Cádiz, dio un resultado excelente en el tramo asintótico de la curva preparada con la hipótesis de *Andersen y Fresoe* .

Aplicando las F.O.E. a la serie temporal de datos tomados en los cinco últimos años en la playa Victoria, obtenemos que la primera autofunción transversal es un perfil medio o de equilibrio a muy largo plazo. Los parámetros de Dean ajustados a los perfiles con y sin laja son respectivamente de 0.177 y 0.124. Eso supone una relación real $A_{cl}/A_{sl}=1.40$. La diferencia con el valor encontrado mediante nuestra gráfica es sólo de un 5%.

Las pendientes medias de los perfiles con y sin laja resultan ser de un 4% y un 2.5% respectivamente. El cociente entre ambas es de 1.6 ,lo que coincide sensiblemente con el valor teórico esperado .

Variabilidad a largo plazo de la planta de la playa

Según nuestro modelo teórico, la playa con laja debe ser más lenta en cuanto a su evolución por varias razones:

1. La existencia de un estrato rocoso limita la altura de ola incidente y por tanto el flujo de marea que llega a la zona intermareal.
2. También se produce una refracción más rápida por tratarse de un fondo de menor calado que el del perfil completo.
3. En una playa de fondo arenoso la interacción oleaje-fondo es mutua, mientras que si el fondo es rocoso entonces permanece inalterable, forzando a los frentes de onda a un giro mayor.
4. Al tratarse de un bajo, uniforme en cuanto a cota, las diferencias entre alturas de ola en distintos puntos son mínimas y , por consiguiente, también lo serán las corrientes originadas por el gradiente de altura de ola.

Al estudiar los datos reales de campo nos damos cuenta de que pese a la presencia de dos partes diferenciadas, una apoyada en laja y otra que no, ambas partes conforman una misma unidad fisiográfica. Esto conlleva a la existencia de una zona de transición, no delimitada a priori.

Del estudio comparado de las respectivas autofunciones podemos deducir que:

- Existe un movimiento generalizado de erosión a la altura de la pleamar viva y de acreción en la bajamar escorada. Se trata de un o suavizamiento del perfil a largo plazo, independiente de las variaciones estacionales.
- Se produce un giro en planta de la línea de costa de 2° en el sentido de las agujas del reloj desde el momento de la regeneración hasta junio del 95 (5 años de buen tiempo) . Tras los temporales de diciembre del 95 el giro se produce en sentido contrario con valor de 1°.
- Las isocotas +2.00 permanecen paralelas entre sí a lo largo del tiempo. tenemos entonces una curva de nivel que no se ve afectada por los cambios estacionales y que nos permitirá la medición de las erosiones reales a largo plazo.
- La curva de nivel -2.00 permanece casi constante a lo largo de los cinco años transcurridos desde el final de la realimentación. Estamos ante un umbral de facto del movimiento de arenas recuperables.
- El retroceso sufrido por la playa en este quinquenio ha sido de 31 m. en la zona sin laja y de 38 m. en la zona con laja. Debe tenerse en cuenta que las condiciones de contorno son distintas. La dirección neta del transporte longitudinal de sedimento es de NW hacia SE y la parte más septentrional de la playa está limitada por un espigón, careciendo de fuentes de aporte de material que compensen el ya movilizado.

Variabilidad a largo plazo del perfil

El perfil con laja sufre una erosión irreversible, al viajar el grano de arena por sobre el estrato rocoso y caer por su talud, muy superior a la del perfil no apoyado. Este último con una pendiente arenosa sumergida mucho más suave permite la recuperación de dicho material durante las épocas de buen tiempo.

La aplicación de las F.O.E. nos permite afirmar que el fenómeno que más explica la variabilidad de los datos recogidos es la erosión generalizada en el perfil apoyado, mientras que para el perfil no apoyado es el basculamiento con punto pivote alrededor de la cota 0.00 (aproximadamente la bajamar viva) .

Variabilidad a medio plazo

A lo largo del año ambos perfiles pasan de una pendiente suave o propia de invierno a una más empinada característica del verano basculando alrededor del punto medio de su perfil activo. El perfil apoyado en laja girará alrededor del punto medio del estrán (la +2.00), mientras que en el perfil completo el basculamiento se produce alrededor de la cota de bajamar viva (la +0.00).

El análisis de las respectivas autofunciones permite afirmar que el perfil dispone de dos métodos de defensa frente a los temporales:

- Un basculamiento de todo el perfil activo
- Dos suavizamientos parciales en las zonas del estrán correspondientes a la pleamar y a la bajamar; es decir, aquellos puntos donde debido a la forma de la curva de marea más tiempo actúa el temporal.

El perfil apoyado, al disponer de un volumen de arena inferior, utiliza prioritariamente el basculamiento total. En el caso del perfil completo tiene mayor importancia el doble suavizamiento.

Se advierten dos modos distintos de recuperación del perfil o de aumento de su pendiente. Uno de invierno, en que la arena se mueve en el tramo sumergido desde una cierta profundidad hasta la cota +0.00, y otro de verano, en que los granos se desplazan desde el pie del estrán hasta su parte superior. En invierno la velocidad es superior a la de verano, del orden del doble en el perfil apoyado y del triple en el completo.

Los caudales de transporte de sedimento son similares en los perfiles con y sin laja, 10 y 8 m³/ml. y mes respectivamente. En cambio, en invierno, las tasas de erosión son mucho menos importantes en los perfiles apoyados que en los completos, 30 y 120 m³/ml. y mes.

El perfil con laja es mucho más rígido a todo tipo de cambios. La diferencia en playa seca entre verano e invierno no sobrepasa los 14 m., con una media de 5m./mes. Por contra, el perfil no apoyado experimenta, a la cota +3.00, variaciones cercanas a los 50 m., con una media de recuperación de 12 m./mes.

Variabilidad a corto plazo: Influencia del ciclo mareal quincenal

La marea, como agente modificador de la altura de la lámina de agua sobre la rasa, induce variaciones tanto más importantes en el perfil con laja cuanto que no están enmascaradas por cambios en las condiciones del oleaje incidente. Entre las conclusiones detectadas cabe destacar:

- que el efecto de la marea está mucho más concentrado en el perfil con laja. En el perfil sin laja el efecto está mucho más repartido. Los puntos de máxima variabilidad están en el punto medio del estrán.
- que las tendencias generales son muy parecidas en ambos perfiles, salvo un desfase temporal. Mientras el perfil con laja tiene máximos y mínimos coincidentes casi exactamente con las mareas muertas y vivas respectivamente, en el perfil completo la máxima deposición de sedimento tiene lugar tres días antes.
- que las variaciones de cota totales observadas son muy similares en ambos tipos de perfil: de 55 cms en el apoyado y de 60 cms en el completo.

Variabilidad a corto plazo: Influencia de un temporal

- El movimiento de sedimento es mucho mayor en el perfil completo que en el perfil apoyado. Tanto en volumen diario como acumulado, las tasas de erosión son muy superiores, 9 m³/ml y día para el perfil apoyado y 26 m³/ml y día para el no apoyado.. Ciertamente es que en el perfil no apoyado no disponemos de la parte sumergida del mismo.

- El punto de basculamiento del perfil con laja está alrededor de la zona central del estrán (+2.00) , mientras que está ubicado cerca de la bajamar viva (+0.00) en el perfil no apoyado o completo.

- Para este temporal en particular, el período de amortiguación de las fluctuaciones post-tormenta ha sido de aproximadamente 20 días en ambos casos. Además la erosión ha sido irreversible a corto plazo; la recuperación ha consistido únicamente en la modificación de las pendientes del tramo emergido, procurando la similitud a las existentes antes del temporal.

9.2 FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACIÓN

Esta tesis abre nuevas líneas de estudio o investigación en algunas de las cuales ya estamos trabajando. Cabría destacar entre las principales:

1. El análisis de playas colgadas como un caso particular de las playas apoyadas en laja rocosa con distancia adimensional reducida.
2. ¿Existe una pérdida de energía de la onda de marea al pasar por sobre estratos rocosos de escasa profundidad cuando la anchura de los mismos no supera el kilómetro?
3. Diferencias entre el set-up experimentado en un perfil con laja y otro libre o completo. Verificación, en su caso, de las circunstancias en las que se produzca el fenómeno de surf-beat.
4. Calibración de las diferencias en el transporte longitudinal para tramos de playa conteniendo rasas y otros que no.
5. Variaciones observadas entre los husos granulométricos de playas apoyadas y aquellas con perfil libre o completo.
6. Comprobación de la generalidad de las conclusiones emitidas para las variaciones debidas a un temporal mediante la continuación del exámen de los efectos causados por otras tormentas y la prolongación del tiempo de toma de datos.

CAPITULO X

REFERENCIAS

X.- REFERENCIAS

- Aleksandrov, A.D., Kolmogorov, A.N. y Laurentiev, M.A., 1973. "La Matemática: Su Contenido, Métodos y Significado". Alianza Universidad, Vol. 3, N° 70, Alianza Editorial, Madrid, pp 104 - 109.
- Andersen, O.M. y Fredsoe, J., 1983. "Transport of Suspended Sediment Along the Coast". Progress Report n° 59, Inst. of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, ISVA, Tchu. Univ. Denmark, pp. 33 - 46.
- Aubrey, D.G., 1978. "Statistical and Dynamical Prediction of Changes in Natural Sand Beaches". University of Southern California, Los Angeles.
- Birkemeier, W.A. y Mason, C., 1984. "The Crab: A Unique Nearshore Surveying Vehicle". Vol. 110, N° 1, pp. 1 - 7.
- Birkemeier, W.A., 1985. "Filled Data on Seaward Limit of Profile Change". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 111, N° 3.
- Bruun, P., 1954. "Coastal Erosion and Development of Beach Profiles Mississippi". U.S. Army Beach Erosion Board Technical Memorandum, N° 44. U.S. Army Corps. of Eng.
- Bruun, P., 1962. "Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering ASCE. Vol. 82, N° 1, 17.
- Dally, W.R., Dean, R.G. y Dalrymple, R.A., 1985. "Wave Height Variation Across Beaches of Arbitrary Profile". Journal of Geophysical Research.
- Dean, R.G., 1973. "Heuristic Models of Sand Transport in the Surf Zone". Proc. Conf. Engineering Dynamics in the Surf Zone, Sydney N.S.W., pp. 208 - 214.
- Dean, R.G., 1977. "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts". Ocean Engineering Rept. N° 12, Univ. of Delaware, Newark.
- Dean, R.G., 1991. "Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications". Journal of Coastal Research. N° 7, pp. 53 - 84.

- Dick, J.E. y Dalrymple, R.A., 1984. "Coastal Changes at Bethany Beach, Delaware". Coastal Engineering, pp. 1650 - 1667.
- Duncan, J.R., 1964. "The Effects of Water Table and Tidal Cycle on Swashbackwash Sediment Distribution and Beach Profile Development". Marine Geology, Nº 2, pp. 186 - 197.
- Fredsoe, J. y Deigaard, R., 1992. "Mechanics of Coastal Sediment Transport". World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.
- Gerritsen, F., 1981. "Wave Attenuation and Setup on a Coastal Reef". Look Lab. Tech Report Nº 48, Univ. of Hawaii, pp. 416.
- Gomez Pina, G. 1995. "Análisis de Perfiles de Playa en las Fachadas Cantábrica y Atlántica de la Costa Española y su Aplicación a Proyectos de Regeneración". Universidad de Cantabria ETSICCP.
- González, M. 1995. "Morfología de playas en Equilibrio. Planta y Perfil". Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- Gourlay, M.R., 1994. "Wave Transformation on a Coral Reef". Coastal Engineering 23.
- Grassa, J.M^a., 1987. "Evolución del Perfil de Playa con el Clima Marítimo". CEPYC., pp. 98 y 105.
- Grosskorp, W.G. y Kraus, N.C. "Recomendaciones para Estudios de Mediciones de Rellenos de Playa".
- Gutiérrez Mas, J.M., Martín Algarra, A. y Navarrete Salvador, A., 1982. "Itinerarios Geológicos por la Provincia de Cádiz". Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz.
- Gutiérrez Mas, J.M., Martín Algarra, A., Domínguez Bella, S. y Moral cardona, J.P., 1991. "Introducción a la Geología de la Provincia de Cádiz". Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, pp. 149 y 233.
- Hallermeier, R. J., 1981. "A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate". Coastal Engineering, 4, pp. 253 - 277.

Hardy, Young, Nelson y Gourlay., 1990. "Wave Attenuation on an Offshore Coral Reef". Coastal Engineering.

Harrison, W., 1969. "Empirical Equations for Foreshore Changes Over a Tidal Cycle". Mar. Geol., 7, pp. 529 - 551.

Hobley, D., Parnell, K.E. y Isdale, P.J., 1989. "The Great Barrier Reef Marine Park: Dimensions and Regional Patterns". Aust. Feogr. Stud., pp. 27, 47-66.

Horikawa, K.A. y Kuo, C.T., 1966. "A Study of Wave Transformation Inside Surf Zone". Proceeding of 10Th Int. Conf. on a Coastal Engineering, Vol. I, pp. 217 - 233.

Iribarren, R., 1951. "Obras Marítimas". Editorial Dossat.

Karunaraltina, H. y Tamimoto, K., 1995. "Numerical Experiments on Low Frequency Fluctuations on a Submerged Coastal Reef". Coastal Engineering 26, pp. 271 - 289.

King, Cuchlaine, A.M., 1959. "Beach and Coasts". Eduard Arnold Ltd., pp. 160 - 161.

Komar, 1976. "Beach Processes and Sedimentation". Prentice-Hall, New Jersey, pp. 295.

Konq, T. y Tsukayama, S., 1980. "Wave Transformation on Reef and Some Consideration on its Aplications to Field". Coastal Engineering in Japan, Vol. 23., pp. 45 - 57.

Kriebel, D.L. y Dean, R.D., 1993. "Convolution Method for Time Dependent Beach Profile Response". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, N° 2, pp. 204 - 226.

Kroonenberg, Pieter M., 1983. "Three Mode Principal Component Analysis", DSWO Press, Leiden, The Netherlands.

Lafond, E.C., 1939. "Sand Movement Near the Beach in Relation to Tides and Waves". Proc. 6 th Pac. Sci. Cong., pp. 795 - 99.

- Larson, M. and Kraus, N.C., 1994. "Temporal and Spatial Scales of Beach Profile Change, Duck, North Carolina". *Marine Geology*.
- Longuet-Higgings, M.S. y Stewart, R.W., 1964. "Radiation Stresses in Water Waves; a Physical Discussion with Applications. *Deep-Sea Res.*", Vol. 11, pp. 529 - 562.
- Larson, M., 1991. "Equilibrium Profile of a Beach with Varying Grain Size". *Proc. Coastal Sediments'91 ASCE*. pp. 905 - 919.
- Lee, T.T. y Black, K. 1979. "The Energy Spectra of Surf Waves on a Coral Reef". *Proc. 16 th. International Conf. Coastal Eng. ASCE*. Vol. 1, pp. 588 - 608.
- Losada, M.A., 1988. "Estabilidad de playas: Morfodinámica de los procesos litorales". Univ. de Cantabria.
- Losada, M.A., Medina, R. Vidal, C. y Roldán A., 1991. "Historical Evolution and Morphological Analysis of "El Puntal" Spit, Santander (Spain)". *Journal of Coastal Research*, Nº 7, pp. 711-722.
- Masselink, G. y Short A.D., 1993. "The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model". *Journal of Coastal Research*, Vol. 3, pp. 785 - 800.
- Mc. Cowan, 1981. "On the Solitary Wave". *Philosophical Magazine* 5th series, Vol. 32, Nº 194, pp. 45 - 58.
- Medina, R., Losada, I., Losada, M.A. y Vidal, C., 1995. "Variabilidad de los Perfiles de Playa: Forma y Distribución Granulométrica". *Ingeniería del Agua*, Vol. 2. pp. 133 - 142.
- Medina, R., Losada, M.A., Dalrymple, R.A. y Roldán, A., 1991. "Cross-shore Sediment Transport Determined by EOF Method". *Coastal Sediments Proceedings*, pp. 2160 - 2174.
- Medina, R., Losada, M.A., Losada, I.J. y Vidal, C., 1994. "Temporal and Spatial Relationship between Sediment Grain Size and Beach Profile". *Marine Geology* Vol. 118.

Michell, J.H., 1893. "On the Highest Waves in Water". Philosophical Magazine Vol. 36. 5ª serie.

Muñoz Pérez, J.J. "Fiabilidad de las Batimetrías y Granulometrías, su Aplicación a la Cubicación de la playa Victoria (Cádiz)". III Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Univ. de Valencia, Vol. 3, pp. 639 - 651.

Muñoz Pérez, J.J., 1995. "Aplicación de las Funciones Ortogonales Empíricas a la Interpretación de los Cambios Morfológicos y Sedimentológicos de la Playa Victoria (Cádiz)". Universidad de Cantabria. Dpto. de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente.

Nakaza, E., Bukayama, S. and Hino, M., 1990. "Bore-like Surf Beat Reef Coasts". *Proced. of a Coastal Engineering*.

Negro Valdecantos, V., 1989. "Isolneas de Realimentación y Rellenado en Playas sin Marea. Método de las Envolventes para Equilibrio Morfodinámico en Perfil Transversal". Tesis doctoral. Univ. Politecn. de Madrid.

Nelson, R.C., 1985. "Wave Heights in Depth Limited Conditions". *Trans. Inst. Engrs. Aust., Civil. Eng. Vol. CE 27*, pp. 210 - 215.

Nelson, R.C., 1994. "Depth Limited Design Wave Heights in Very Flat Regions". *Coastal Engineering. Vol. 23*, pp. 43 - 59.

Noble, B. "Applied Linear Algebra". Prentice - Hall, New Jersey, pp. 523.

Otero Barreiro, M.A., 1990. "Estudio Sistemático de Perfiles de Playa". CEPYC.

Patrick, D.A. y Wiegel, R.L., 1955. "Amphibian Tractors in the Surf". *Proceedings First Conference on Ships and Waves the Engineering Foundation Council on Wave Research and the American Society of Naval Architects and Marine Engineers*.

Pilkey, O.M., Young, S.R., Riggs, A.W. and Smith, H., 1993. "The Concept of Shore Face Profile of Equilibrium: A Critical Review". *Journal of Coastal Research, Vol. 9 N° 1*.

- Pruszek, Z., 1993. "The Analysis of Beach Profile Changes Using Dean's Method and Empirical Orthogonal Functions". Coastal Engineering, 19. pp. 245 - 261.
- Roberts, M.H., 1980. "Physical Processes & Sediment Flux Through Reef-Lagoon Systems". Proc. 17 th Int. Conf. Coastal. Eng., ASCE Vol. 1 pp. 946 - 962.
- Seelig, W.N., 1983. "Laboratory Study of Reef Lagoon System Hydraulics". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engin., Vol. 109, N° 4.
- Silvester, R., 1974. "Elsevier Scientific Pub. Company. New York. Coastal Engineering, Tomo I". pp. 318 - 331.
- Spiegel and Murray, R., 1979. "Estadística". Mc Graw Hill Compendios Shaum, Mexico, pp. 241 - 251.
- Suárez Bores, P., 1967. "Introducción a la Estructura del Oleaje". Laboratorio de Puertos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas n° 4-B.
- Suárez Bores, P., 1968. "Ola de Cálculo". Laboratorio de Puertos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas n° 5-B.
- Swart, D.M. and Lobser, C.C., 1979. "Vocoidal Water Wave Theory. Vol. 2: verification". CSIR South Africa. Nat. Research, Inst. Rep. 360.
- Symonds, G., Black, K. and Young, I.R., 1955. "Wave Driven Flow Over Shallow Reefs". Journal of Geophysical Research, Vol. 100, pp. 2369 - 2648.
- Thompson, W.F. and Thompson, J.B., 1919. "The Spawning of the Grunion". Calif. State Fish and Game Comm. Fisch Bull. N° 3.
- Vellinga, P., 1983. "Predictive Computational Model for Beach and Dune Erosion during Storm Surgs". Proc. of the Speciality Conf. on Coast. Structures ' 83 ASCE, pp. 886 - 819.
- Vellinga, P., 1984. "A Tentative Description of a Universal Erosion Profile for Sandy Beaches and Rock Beaches". Coastal Eng. Vol 8. N° 2.

Vidal, C., Losada, M.A., Medina, R. and Losada, I., 1995. "Modelos de Morfodinámica de Playas". Ingeniería del Agua, Vol 2, pp. 55 - 74.

Wijnberg, Kathelijne, M., 1995. "Morphologic Behaviour of a Barred Coast Over a Period of Decades". Univ. Utrech.

Winant, C.D., Inman, D.L. and Nordstron, C.E., 1975. "Description of Seasonal Beach Changes Using Empirical Eigenfunctions". Journal of Geophysical Research. Vol 80, Nº 15, pp. 1979 - 1986.

Wright, L.D., Nielsen, P., Short, A.D., and Gree, M.O., 1982. "Morphodynamics of a Macrotidal Beach: Broome, Western Australia". Coastal Studies Unit Technical Report Nº 8211.

Wright, L.D., Short, A.D. and Green, M.O., 1985. "Short-Term Changes in the Morphodynamic States of Beach and Surf Zones: An Empirical Predictive Model". Marine Geology, 62, pp. 339 - 364.

Yu, X., Isobe, M. and Watanabe, A. 1995. "Wave Breaking over Submerged Horizontal Plate. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Vol 121", Nº 2.

ANEJOS

ANEJO 1

CAMPAÑAS DE CAMPO

ANEJO 1.- CAMPAÑA DE SEGUIMIENTO BATIMETRICO Y SEDIMENTOLOGICO.

En el año 1991 se procedió al dragado de la Canal de entrada al Puerto de Cádiz desde la cota -10 a la -13.

Se aprovechó esta circunstancia para extender, a lo largo de más de 3 Kms. de la playa de la Victoria, más de dos millones de m³ de arena en vez de verterlos en alta mar.

Nos pareció adecuado entonces el proceder a tomas de datos (batimetrías y granulometrías principalmente) que nos permitieran averiguar la tasa real de erosión que, en estudios previos, se había estimado en unos 200.000 m³/año. Se decidió proceder a levantamientos topo-batimétricos de periodicidad semestral complementados con campañas topográficas intercaladas en el tiempo. La distancia entre perfiles sería cada 100 metros y se tomarían desde el paseo marítimo hasta la cota -8,00 m. La zona de trabajo se extiende a todo lo largo de las playas Victoria y Sta. María del Mar, incluyendo además 5 perfiles de control al sur de Cortadura y 2 al norte del espigón más septentrional.

Los perfiles de la playa seca se obtienen mediante nivelación, partiendo de las cabeceras de perfil que se encuentran materializadas en el paseo. Deben realizarse durante la bajamar con objeto de que se solapen dichos perfiles con los obtenidos mediante la sonda en pleamar.

Al mismo tiempo, sentíamos cierta preocupación por si el nivel de error cometido al levantar el fondo del mar podía, en una tan grande extensión de

playa, el conducir a un error mucho mayor todavía en la cubicación de los movimientos de sedimento. Es por ello que decidimos realizar una serie de tests con los que calibrar dicha variabilidad.

A continuación se exponen el tipo de pruebas efectuadas, cómo se ejecutaron, sus resultados y una valoración de los mismos.

1.1.- TOMA DE DATOS EN UNA BATIMETRIA.

1.1.1.- Posicionamiento horizontal.

El método de posicionamiento de la embarcación empleado es el GPS diferencial. Se ubicó una esfera con prismas para situarla, simultáneamente, mediante estación total de infrarrojos. Se tomaron dos series de 10 lecturas, una de ellas con el bote fondeado y otra en movimiento. En la tabla A1.1 se muestran los errores medio y cuadrático medio de estas observaciones. Es de notar que los valores de error obtenidos para el posicionamiento en movimiento son inferiores a los de la embarcación "parada". esto podría atribuirse a retardos en la simultaneidad de ambas medidas, al movimiento por borneo, etc. En todo caso se trata de un valor absoluto inferior a los 2 metros y de ninguna manera sistemático, sino completamente aleatorio. En pendientes del orden del 2% en sentido transversal podría conllevar errores en la apreciación de la profundidad en el punto "real" del orden de 4 cms. como mucho. No obstante, su misma condición de proceso aleatorio debería garantizar la compensación al tomar muchos datos. Hay que apuntar que la embarcación a una velocidad de 4 nudos (2 m/s) toma 2 puntos/seg.. Esto lleva a un dato por cada metro de perfil.

1.1.2.- Posicionamiento vertical. Calibrado de la ecosonda.

Las mediciones del sondador están condicionadas por la composición del medio acuoso en que se propagan las ondas acústicas emitidas y recibidas por el transductor del sensor, pues al variar la velocidad de la onda varían los tiempos medidos y como consecuencia la magnitud de las profundidades. Todo sondador posee un sistema de calibración más o menos sofisticado para adaptar la velocidad de propagación del eco a la salinidad (fundamentalmente) del medio.

Esta calibración se hace a distintas profundidades, midiendo sondas a una plancha metálica que se va calando mediante una cadena indeformable con longitudes numeradas. Se efectúa antes y después de cada jornada de trabajo y aún durante la misma si se prevén cambios en los parámetros físicos del mar. Se realizaron tres series con el sondador utilizado, desde 2 hasta 9 metros de profundidad. El error máximo fue de 4 cms., mientras que el cuadrático medio era de 2 cms. (tabla nº A1.1).

1.1.3.- Medición de la marea.

En Cádiz tenemos una carrera de marea que no supera los 4 metros. La amplitud de la misma debe medirse en la zona de trabajos y simultáneamente a su ejecución para tener en cuenta sus causas modificativas (presión atmosférica, corrientes, retardos por anomalías en la transmisión de la onda, etc).

En esta ocasión hemos procedido a comparar tres métodos de medición.

TOMA DE DATOS EN UNA BATIMETRIA

Resumen Valores Errores

	ε medio	ε medio cuadrático
Posicionamiento horizontal		
ESTATICO	1,20	1,82
DINÁMICO	1,02	1,58
Posicionamiento vertical		
- Calibrado Ecosonda		0,02
- Amplitud de la marea MAREOGRAFO		0,07
MAREOMETRO		0,10

Tabla A1.1.

- a) Valor teórico del Anuario de Mareas del Instituto Hidrográfico con corrección por presión atmosférica.
- b) Mareógrafo tipo flotador instalado en la Punta de San Felipe.
- c) Cinta métrica desde un punto cuya cota se conoce sobre la de referencia.

En la tabla nº 1.2 se exponen los datos tomados cada diez minutos durante cuatro horas. Se aprecian diferencias entre los tres métodos de hasta 16 cms. Considerando como más fiables los valores tomados con cinta métrica, se apunta la imposibilidad de usar los valores de este tipo de mareógrafos para trabajos de precisión por estar expuestos a retardos, rozamientos con la camisa, crecimiento de algas, etc.

1.2.- CUBICACION DEL SEDIMENTO.

1.2.1.- Comparación mediante el uso de distinto software.

Se cubicaron las diferencias de sedimento habidas entre 2 batimetrías, las de noviembre de 1991 y la de junio de 1992.

Se utilizaron tres programas distintos comercializados en el mercado y a los que denominaremos A, B y C.

A y B cubican mediante sección perfil y prismatoide; en cambio, C usa los datos de los perfiles para crear una superficie mallada con valores interpolados en los nodos de la misma. De este último se probaron dos mallas distintas, de 5 y 25 metros de lado respectivamente. En la tabla A1.3 se aprecian las diferencias, insignificantes en todos los casos.

ALTURAS DE MAREAS EN CADIZ

HORA	ANUARIO PATRON	MAREO- GRAFO	c	c2	CINTA	c	c2
09:00	1.67	1.68	-0.01	0.0001	1.56	0.11	0.0121
09:10	1.77	1.77	0.00	0.0	1.64	0.13	0.0169
09:20	1.86	1.86	0.00	0.0	1.74	0.12	0.0144
09:30	1.96	1.93	0.03	0.0009	1.86	0.10	0.0100
09:40	2.05	2.03	0.02	0.0004	1.94	0.11	0.0121
09:50	2.14	2.12	0.02	0.0004	2.00	0.14	0.0196
10:00	2.23	2.18	0.05	0.0025	2.10	0.13	0.0169
10:10	2.32	2.28	0.04	0.0016	2.18	0.14	0.0196
10:20	2.40	2.40	0.00	0.0	2.27	0.13	0.0169
10:30	2.48	2.49	-0.01	0.0001	2.40	0.08	0.0064
10:40	2.55	2.60	-0.05	0.0025	2.50	0.05	0.0025
10:50	2.62	2.67	-0.05	0.0025	2.59	0.03	0.0009
11:00	2.68	2.74	-0.06	0.0036	2.68	0.00	0.0
11:10	2.74	2.81	-0.07	0.0049	2.75	-0.01	0.001
11:20	2.79	2.86	-0.07	0.0049	2.82	-0.03	0.009
11:30	2.84	2.92	-0.04	0.0016	2.89	-0.05	0.0025
11:40	2.87	2.95	-0.08	0.0064	2.93	-0.06	0.0036
11:50	2.90	2.98	-0.08	0.0064	2.98	-0.08	0.0064
12:00	2.92	3.01	-0.09	0.0081	3.00	-0.08	0.0064
12:10	2.94	3.03	-0.09	0.0081	3.04	-0.10	0.010
12:20	2.94	3.08	-0.14	0.0196	3.07	-0.13	0.0256
12:30	2.94	3.13	-0.19	0.0361	3.10	-0.16	0.0256
12:40	2.93	3.03	-0.10	0.0100	3.09	-0.16	0.0256
12:50	2.91	2.98	-0.07	0.0049	3.07	-0.16	0.0256
13:00	2.89	2.93	-0.04	0.0016	3.05	-0.16	0.0256

Tabla A1.2

COMPARACION CUBICACION CON DISTINTOS SOFTWARES

Se tomaron 2 Batimetrías: $\left\{ \begin{array}{l} \text{NOVIEMBRE} - 91 \\ \text{JUNIO} - 92 \end{array} \right.$

Se cubica con 3 programas distintos las erosiones existentes entre 4 perfiles separados 100 m.

- PROGRAMA "A" \Rightarrow Sección perfil y prismatoide.
- PROGRAMA "B" \Rightarrow Sección perfil y prismatoide.
- PROGRAMA "C" \Rightarrow Diferencia entre 2 superficies con malla de 5x5 m..
- PROGRAMA "D" \Rightarrow Diferencia entre 2 superficies con malla de 25x25 m.

	A	B	C	D
VOLUMEN	216.203	216.585	221.952	216.023
EROSION	-----	0,2	2,7	0,1

Tabla A1.3

1.2.2.- Comparación cambiando la equidistancia entre perfiles.

Evidentemente, la precisión en las cubicaciones debe aumentar con la densidad del muestreo o, lo que es lo mismo, cuanta menor sea la distancia entre perfiles.

No obstante, el coste de la batimetría es directamente proporcional al nº de perfiles levantados. La prueba trata de establecer cifras comparativas de cubicaciones efectuadas en un tramo de playa variando la separación de los perfiles a superficiar.

Se seleccionó una zona genérica de la Playa de la Victoria en Cádiz (zona cercana a Sta. María del Mar, perfiles (1 al 11), abarcando 500 mts. de frente de costa. Se hicieron distintas cubicaciones variando los perfiles a tomar (pares, impares) y cambiando la distancia entre ellos. El gradiente de los perfiles topohidrográficos oscila entre un 1% y un 2%, siendo su longitud de unos 1.200 mts y presentando su zona central una placa pedregosa de longitud variable entre 180 y 800 mts.

Los resultados, expuestos en la tabla A1.4, permiten entender como para playas de orografía tortuosa, como la de La Victoria, la distancia entre perfiles no debe superar los 100 metros, ya que un intervalo superior puede cartografiar un fondo poco afín con el real. (Ver gráfica nº A1.1).

1.3.- ANALISIS GRANULOMETRICOS.

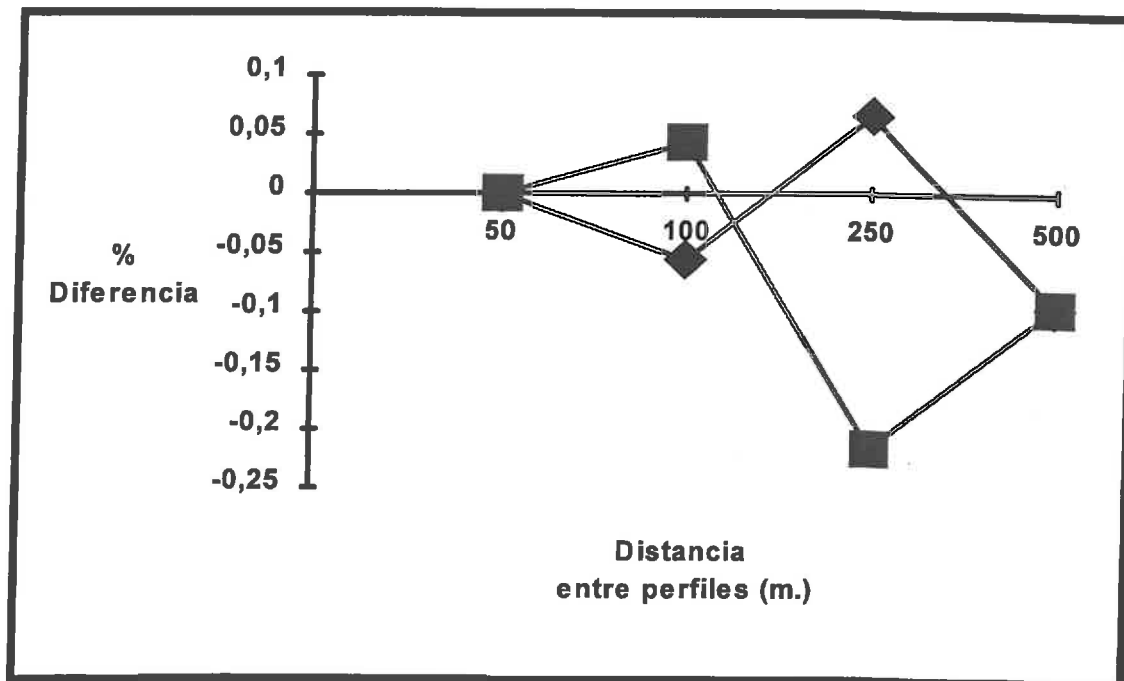
Coincidiendo con cada una de las batimetrías completas (cada 6 meses), se realizaron dos tomas de muestras anuales de sedimentos en perfiles espaciados

CUBICACION CON DISTINTO N° DE PERFILES

Comparación entre 2 Batimetrías: $\left\{ \begin{array}{l} \text{NOVIEMBRE} - 91 \\ \text{JUNIO} - 92 \end{array} \right.$

DISTANCIA (m)	VOLUMEN (M ³) EROSIONADO	DIFERENCIA VOLUMEN	%
50	114.775	-----	-----
100	119.695	4.920	4,3 %
250	89.938	-24.837	-21,6 %
500	103.825	-10.950	-9,5%
100 bis	108.395	-6.380	-5,6%
250 bis	122.293	7.518	6,6 %

Tabla A1.4



Gráfica A1.1

espaciados entre sí 300 metros. Las muestras se tomaron en los siguientes puntos de cada perfil:

- PMVE Cota aprox +4,00.
- Media carrera de marea +2,00.
- BMVE +0,00.
- En la playa sumergida a las cotas -1,00, -2,00 y -3,00.

Para coger la muestra se separan los dos primeros centímetros con la última capa de arena y conchuelas depositadas. Después se extrae un cubo de 20 cms. de lado, se homogeneiza y se guardan 500 gr. en una bolsa de plástico transparente. La identificación se efectúa mediante rotulador indeleble.

1.3.1.- Fiabilidad de la granulometría.

La definición de las características granulométricas de la arena suelen resumirse en el parámetro D_{50} , y muchas de las herramientas ingenieriles usadas en el diseño de playas, como el perfil de Dean, se basan en dicho parámetro.

¿Qué dispersión puede sufrir dicho valor en función del modo y manera de efectuar el tamizado del material? A continuación se ofrecen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

De un mismo punto de la playa y, una vez apartada la capa de conchuela superficial, se extrajo una cantidad suficiente de arena que se homogeneizó y repartió en bolsas.

Sin embargo, a las distintas empresas a las que se enviaron dichas muestras, se les dijo que pertenecían a cuatro perfiles diferentes (23, 25, 27B, y 29).

En primer lugar, a los tres laboratorios homologados (A, B, y C) se les indicó una serie base de tamices que aparecen en la tabla nº A1.5. El error del método en cada empresa es del orden de 0,01 mm (recordemos que la arena de las cuatro muestras es la misma) y coincide sensiblemente con las diferencias existentes entre los distintos laboratorios; un intervalo de 0,18 a 0,20 mm que supone una diferencia de un 10%. (ver gráfica nº A1.2).

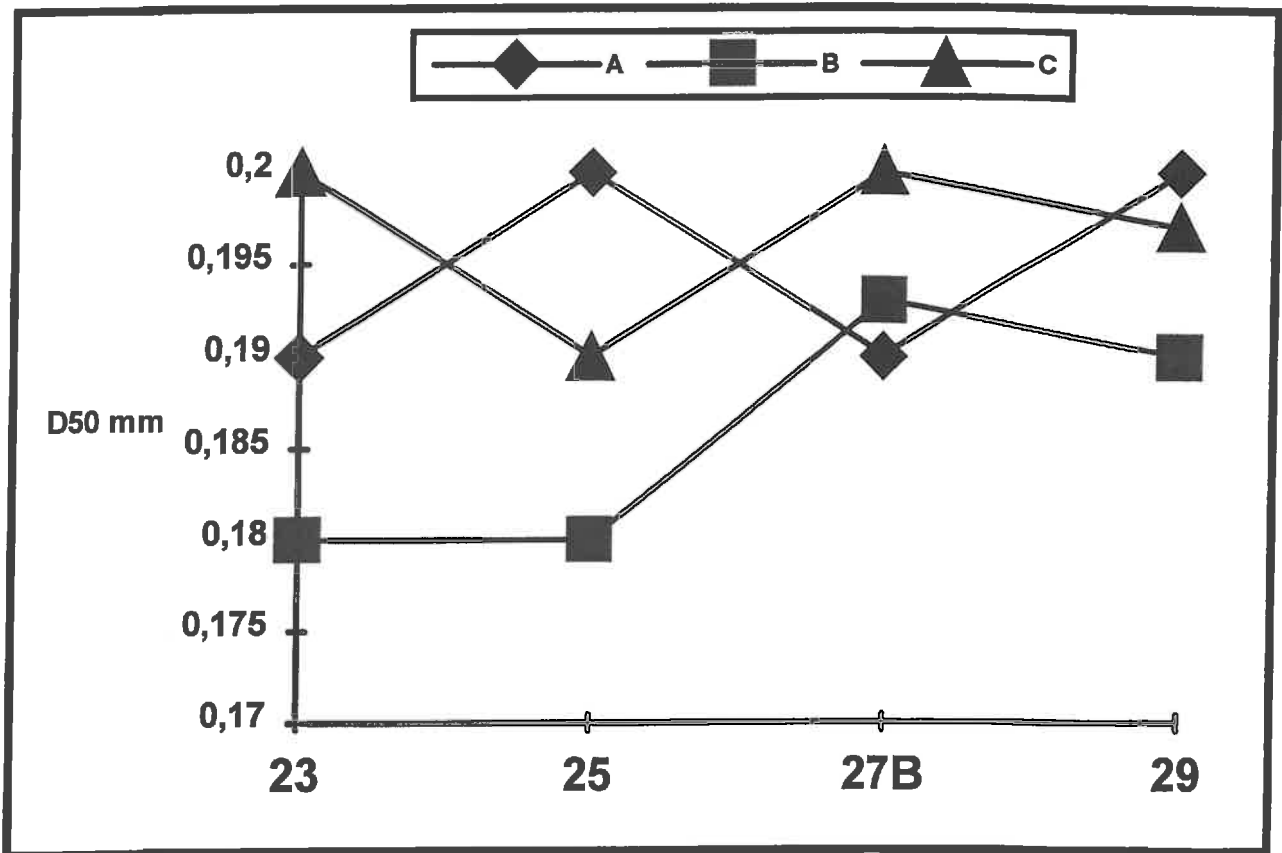
Posteriormente, a uno de los laboratorios en particular se le indicó que pasara la misma muestra por distintas columnas, añadiendo el tamiz 0,30 mm ó suprimiendo los tamices 0,35 mm y 0,20 mm.

Del estudio de la gráfica nº A1.3 parece deducirse que para la arena de la playa de la Victoria, muy clasificada, no parece influir ninguno de los cambios que habíamos planteado.

Otra prueba a efectuar fue la de cambiar el tiempo de tamizado, desde 5 hasta 20 minutos. ¿qué influencia tendría en la determinación del D_{50} ? En la gráfica nº 1.4 aparecen los puntos resultantes de los ensayos. El que la gráfica fuera monótonamente decreciente sería lo lógico. No obstante, la determinación a los 20' da un valor del parámetro superior al de 15'. A nuestro entender parece indicar que el error inherente a la metodología (pesada, cálculos, etc.) es del mismo orden que el que pudiéramos cometer al cambiar el tiempo de tamizado.

En cuanto al % de finos (gráfica n° A1.5), al tratarse de una arena de playa en zona de dinámica del oleaje carece por completo de ellos. Tanto da, a nuestro parecer, un 0,05% como un 0,08%.

DISTINTAS EMPRESAS



Gráfica A1.2

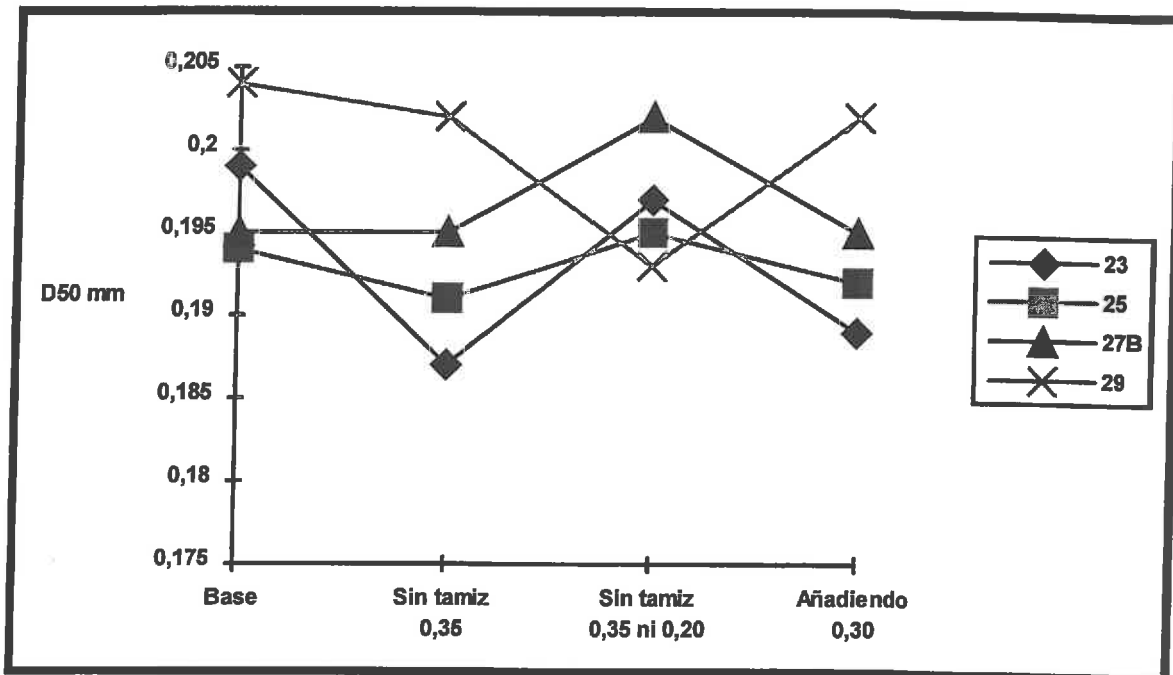
DISTINTOS TAMICES

• **SERIE BASE**

Tamaño (mm)	ASTM
4,00	5
2,00	10
1,00	18
0,50	25
0,42	40
0,35	45
0,25	60
0,21 ó 0,20	70
0,125	120
0,074	200

NOTA:
Ningún laboratorio sabía que, en realidad, 23, 25, 27B y 29 eran la misma muestra.

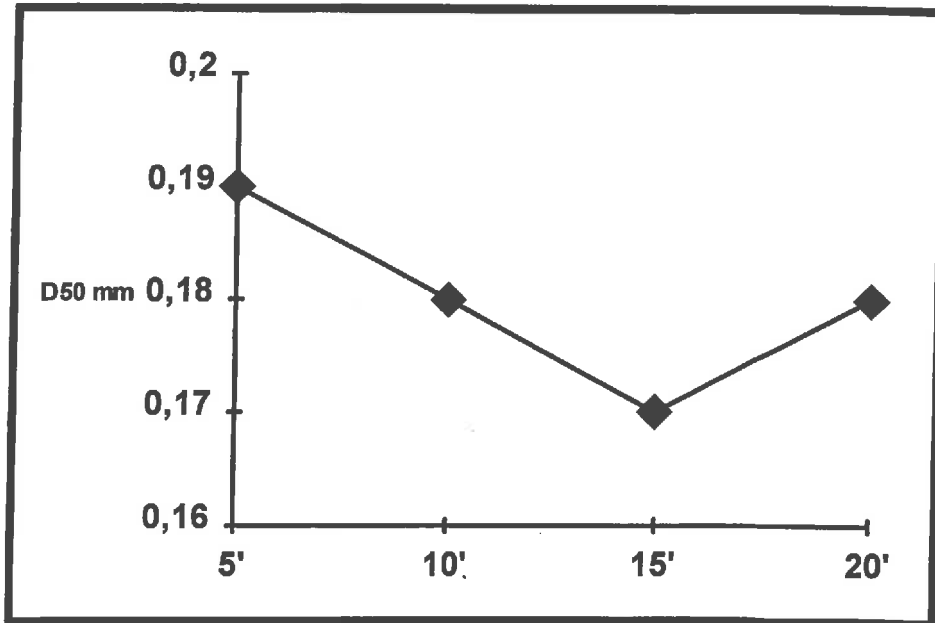
Tabla A1.5



Gráfica A1.3

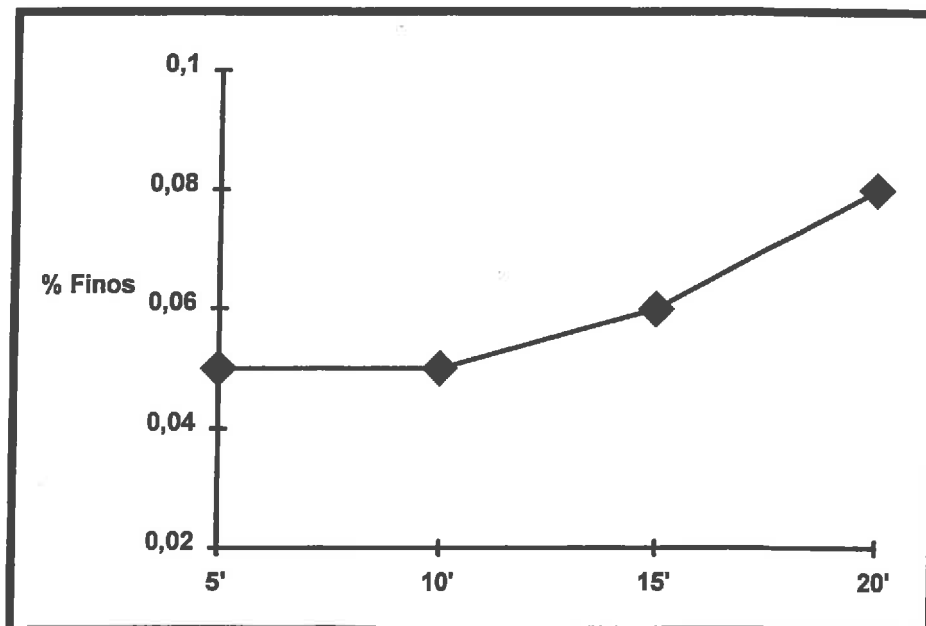
DISTINTOS TIEMPOS

VARIACIONES D_{50} (mm)



Gráfica A1.4

VARIACIONES % FINOS



Gráfica A1.5

1.4.- CONCLUSIONES EN CUANTO A LA FIABILIDAD DE BATIMETRÍAS Y GRANULOMETRÍAS.

Los errores en el posicionamiento horizontal de la embarcación son de hasta 2 mts. como máximo con el GPS-D que se utiliza en este estudio. Con las pendientes usuales en la playa podría suponer variaciones en altimetría de hasta 4 cms. Al tratarse de un error completamente aleatorio es de suponer que se vaya compensando a lo largo del perfil.

La ecosonda, de gran precisión, sí comete un error sistemático (de valor absoluto inferior a los 4 cms y cuadrático medio de unos 2 cms) y debe, por tanto, corregirse y calibrarse dos veces al día como mínimo.

El único sistema de precisión fiable para conocer la altura de la marea en cada momento es el de la lectura con cinta métrica. Los datos de mareógrafos de flotación o de anuario con correcciones teóricas tienen utilidad desde el punto de vista de comprobación general y programación de trabajo.

No existen diferencias significativas entre los distintos softwares estudiados a la hora de calcular las diferencias de sedimento entre distintas campañas.

La equidistancia entre perfiles influye en el caso de la Playa Victoria, hasta en un 22%. Se observa asimismo que no existen diferencias importantes entre 50 y 100 metros de separación (hasta un 6%) por lo que se decide adoptar en las siguientes batimetrías distancias de 100 m. entre perfiles con el ahorro consecuente.

En cuanto a la fiabilidad del parámetro D_{50} la diferencia entre los distintos laboratorios homologados fue como máximo de un 10%.

Es de notar que para ensayos distintos de la misma muestra los valores obtenidos dentro de un mismo laboratorio también oscilaban entre un 5% y un 10%.

No por aumentar considerablemente el tiempo de cribado disminuye mucho el D_{50} (máximo de 0,19 a 0,17 mm).

Y por último, establecer que para una arena como la de la Playa Victoria no influye en la granulometría el añadir o quitar un par de tamices. Pese a que consideramos que la batimetría no puede todavía competir en igualdad de condiciones con la topografía terrestre, hemos llegado a la conclusión de que en playas como la de La Victoria, donde métodos como el trineo o el CRAB no son utilizables, en principio, por la existencia de fondos rocosos abruptos, una batimetría de precisión bien controlada proporciona resultados suficientemente fiables como para poder tomar decisiones de seguimiento y calibración de modelos.

ANEJO 2

**LAS FUNCIONES ORTOGONALES
EMPIRICAS Y SU APLICACION**

ANEJO II.-

LAS FUNCIONES ORTOGONALES EMPIRICAS Y SU APLICACION.

2.1.- FUNDAMENTOS MATEMATICOS.

El problema clásico de las funciones ortogonales, también conocidas como autofunciones o "eigenfunctions", surge al intentar resolver un sistema de ecuaciones diferenciales lineales sujetas a unas determinadas condiciones de contorno. La solución existe solo para determinados valores (autovalores) de un parámetro λ que satisfacen una determinada ecuación:

$$A \cdot x = \lambda \cdot x \quad [2.1]$$

$$\text{O bien } a_{ij} \cdot x_j = \lambda \cdot x_i \quad [2.2]$$

donde A es una matriz con los coeficientes de los operadores lineales del sistema de ecuaciones diferenciales a resolver. A los distintos λ que satisfacen [2.1 u 2.2] ya hemos dicho que se les llama autovalores del sistema, y a los x, asociados a cada uno de esos λ autovectores. Ver por ejemplo *Aleksandrov, Kolmogorov y Laurentiev (1973)*.

La ecuación anterior también se puede expresar como:

$$[A - \lambda I] \cdot x = 0 \quad [2.3]$$

donde I es la matriz identidad.

Como ya se verá más adelante, la matriz A se obtiene a partir del producto de otra matriz por su traspuesta. Se puede demostrar que eso conduce a que la matriz A sea real y simétrica, y en este caso particular los autovalores gozan de unas propiedades específicas que, sin demostrarlas, se enuncian a continuación:

- t-1 Los autovalores de una matriz real simétrica son todos reales.
- t-2 Dos autovectores asociados a dos autovalores distintos son ortogonales.
- t-3 Una matriz real simétrica de dimensiones $n \times n$ tiene n autovectores independientes.
- t-4 Si la matriz además de simétrica y real es definida positiva, entonces sus autovalores son todos positivos.

Si, para aclarar las ideas, se desea un ejemplo del caso clásico antes expuesto se puede acudir a *Noble (1969)* o *Aubrey (1978)*.

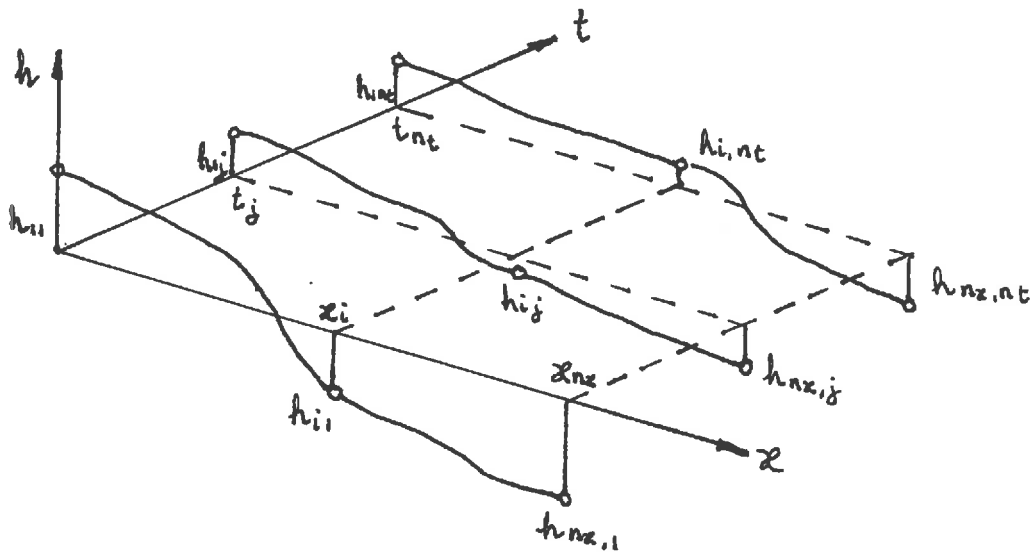
El problema de las autofunciones empíricas debe satisfacer la misma ecuación [2.3]. La diferencia radica en el hecho de que, para el problema clásico, es la física la que nos indica la forma de la matriz A . En el caso empírico, los coeficientes de la matriz A se extraen de los datos y lo que se intenta es explicar la variabilidad de los mismos con unas pocas funciones, los autovectores. A partir de ahora los designaremos indistintamente como autofunciones.

Estas autofunciones, como veremos a continuación, se encuentran a partir de la aplicación de la siguiente condición: que su contribución a la varianza de los datos (definida como valor cuadrático medio) sea máxima. Esto es, la primera función conserva la mayor parte de la varianza de los datos, la segunda función el mayor valor de la varianza restante y así sucesivamente. De este modo, es posible

representar un elevado porcentaje de la varianza de los datos con un número muy reducido de funciones.

Para desarrollar el método partimos de que tenemos una serie de datos $h_{ij} = h(x_i, t_j)$, donde para fijar ideas y aclarar el proceso h_{ij} es la cota del punto x_i durante la campaña batimétrica j . El factor x_i es la distancia a la cabecera desde el punto i dentro de un perfil transversal, con i variando entre 1 y n_x , y siendo n_x el n° de puntos del perfil. El parámetro t_j indica que se trata de los datos tomados en la campaña j , donde dicho índice varía entre 1 y n_t , con n_t igual al n° de batimetrías efectuadas.

Vamos a intentar esquematizar estos datos en el croquis adjunto.



Establecemos la hipótesis de que existen dos series de funciones
 $X_l(x) \quad l = 1 \dots N$ y $T_m(t) \quad m = 1 \dots N$ que cumplen

$$\sum_{i=1}^{nx} X_u(x_i) \cdot X_v(x_i) = 0 \quad \text{para } u \neq v, \quad u, v = 1 \dots N$$

$$\sum_{j=1}^{nt} T_u(t_j) \cdot T_v(t_j) = 0 \quad \text{para } u \neq v, \quad u, v = 1 \dots N$$

es decir, son ortogonales o, lo que es lo mismo, independientes entre sí.
 Para N suficientemente grande, se puede conseguir:

$$h_{ij} = h(x_i, t_j) = \sum_{l=1}^N X_l(x_i) T_l(t_j) \quad [2.4]$$

Como puede apreciarse, se trata de un desarrollo parecido al de Fourier, pero sin obligar, a priori, a que dichas funciones sean senos y cosenos. Será el propio método el que nos indique la forma de las mismas a partir de la variabilidad de los datos disponibles.

Si existe una estructura o tendencia en los datos (si no son completamente aleatorios), con pocas funciones (autofunciones, autovectores) tendremos una explicación mayoritaria de la variabilidad de los datos. Y, por consiguiente, en la práctica nos bastará con un número \hat{N} de autofunciones muy inferior al N teórico. Eso conllevaría a la aparición de un error residual, al despreciarse términos de la serie, que podremos expresar como:

$$\epsilon_{ij} = h_{ij} (\text{real}) - h_{ij} (\text{estimada}).$$

$$\epsilon_{ij} = h_{ij} - \sum_{l=1}^{\hat{N}} X_l(x_i) \cdot T_l(t_j) \quad [2.5]$$

Vamos a suponer que $X(x)$ es la base generadora y que $T(t)$ son sus coeficientes. Para obtener el valor de dichos coeficientes minimizaremos el error cuadrático medio existente entre los datos y el ajuste.

$$\sum_{i=1}^{nx} \epsilon_{ij}^2 = \sum_{i=1}^{nx} \left[h_{ij} - \sum_{l=1}^{\hat{N}} X_l(x_i) \cdot T_l(t_j) \right]^2 \quad j = 1, \dots, n_t \quad [2.6]$$

$$\sum_{i=1}^{nx} \epsilon_{ij}^2 = \sum_{i=1}^{nx} (h_{ij} - X_1 T_1 - X_2 T_2 - \dots - X_l T_l - \dots - X_{\hat{N}} T_{\hat{N}})^2$$

Diferenciando con respecto a T_l e igualando a 0:

$$2 \sum_{i=1}^{nx} [h_{ij} - \sum_{m=1}^{\hat{N}} X_m(x_i) \cdot T_m(t_j) \cdot (-X_l(x_i))] = 0 \quad , \quad l = 1, \dots, \hat{N}$$

Puesto que ya no existe posibilidad de confusión, sustituiremos \hat{N} por N para mayor comodidad.

Si además de ortogonales, exigimos de las autofunciones $X_l(x)$ que sean ortonormales (unitarias), entonces

$$X_l(x) X_m(x) = \delta_{lm}$$

y por tanto:

$$\sum_{i=1}^{nx} [h_{ij} X_l(x_i) - T_l(t_j)] = 0 \quad , \quad l = 1, \dots, N$$

y despejando:

$$T_l(t_j) = \sum_{i=1}^{nx} h_{ij} \cdot X_i(x_i) \quad l = 1 \dots N \quad [2.7]$$

De modo similar podíamos haber actuado tomando como base generadora las funciones temporales y como coeficientes las espaciales. De ese modo:

$$X_l(x_i) = \sum_{j=1}^{nt} h_{ij} \cdot T_l(t_j) \quad l = 1 \dots N \quad [2.8]$$

De donde se deduce que hallada una de las dos series de funciones podemos calcular la otra a partir del producto de aquella con la matriz de datos. Para encontrar esas primeras autofunciones vamos a definir primero, y después analizar, una variabilidad de los datos consistente en el producto cruzado de los mismos. En el caso que se hubieran restado a los datos su media, coincidiría con la covarianza. Entendiéndolo así, usaremos el símbolo σ^2 para designarla.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n_x n_t} \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{nt} h^2(x_i, t_j) \quad [2.9]$$

Sustituyendo h por \hat{h} y utilizando la ortogonalidad de las autofunciones

$$\sigma^2 = \frac{1}{n_x n_t} \sum_{j=1}^{nt} \sum_{l=1}^N T_l^2(t_j) \quad [2.10]$$

Para obtener las funciones $X_l(x)$ vamos a maximizar su contribución en la varianza de los datos. Al objeto de evitar que los coeficientes sean arbitrariamente grandes, vamos a restringir el tamaño de dichas funciones a la unidad.

Puesto que queremos condicionar el problema de maximización, usaremos los multiplicadores de Lagrange.¹

Debemos maximizar la expresión:

$$\sum_{j=1}^{nl} T_l^2(t_j) - \lambda_l \left[\sum_{i=1}^{nx} X_l^2(x_i) - 1 \right], \quad l = 1, \dots, N \quad [2.11]$$

Sustituyendo T_l por su expresión [2.7]

$$\sum_{j=1}^{nl} \left[\sum_{i=1}^{nx} h_{ij} \cdot X_l(x_i) \right]^2 - \lambda_l \left[\sum_{i=1}^{nx} X_l^2(x_i) - 1 \right], \quad l = 1, \dots, N$$

Diferenciando con respecto a X_l e igualando a 0.

¹) Si queremos encontrar los máximos o mínimos de una función $f(x,y)$ para unos valores de "x" e "y" y que, al mismo tiempo, satisfagan una cierta relación del tipo $\varphi(x,y) = 0$, podríamos despejar "y" de $\varphi(x,y) = 0$, sustituir en $f(x,y)$ y buscar el máximo de una función de una sola variable. Este método es generalmente complicado y, a veces, imposible de practicar.

La idea del método de los multiplicadores de Lagrange es sencilla. Consideremos la función $F(x,y) = f(x,y) + \lambda \varphi(x,y)$ y siendo λ un n° arbitrario. Evidentemente para (x,y) tales que $\varphi(x,y) = 0$ los valores de $F(x,y)$ coincidirían con los de $f(x,y)$, y buscaremos los máximos de $F(x,y)$ considerando las variables "x" e "y" como independientes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} = 0 &\rightarrow \frac{\partial f}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial y} = 0 &\rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \\ \varphi(x,y) &= 0 \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Sistema 3 ec's con 3 incógnitas} \\ x, y, \lambda. \end{array}$$

$$\sum_{j=1}^{nt} \left[\sum_{i=1}^{nx} h_{ij} X_i(x_j) \right] \left[\sum_{i=1}^{nx} h_{ij} \right] - \lambda_l \sum_{i=1}^{nx} X_i(x_j) = 0$$

$$\sum_{j=1}^{nt} \left[\sum_{i=1}^{nx} X_i(x_j) \cdot \sum_{s=1}^{nx} h_{ij} \cdot h_{sj} \right] = \lambda_l \sum_{i=1}^{nx} X_i(x_j)$$

$$\sum_{i=1}^{nx} X_i(x_j) \sum_{j=1}^{nt} \sum_{s=1}^{nx} (h_{sj} \cdot h_{sj}) = \lambda_l \sum_{j=1}^{nt} X_i(x_j) \quad [2.12]$$

que puede escribirse en forma matricial como

$$X_l(x) \cdot A = X_l(x) \cdot \lambda_l \quad [2.13]$$

La expresión [2.13] puede disponerse como:

$$[A - \lambda I] X_l = 0 \quad [2.14]$$

donde por su similitud por [2.3] apreciamos que λ son los autovalores y X_l los autovectores de A.

Además, $H = \{h_{ij}\}$ es una matriz de n_x filas y n_t columnas.

$$\begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,nt} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ h_{nx,1} & & h_{nx,nt} \end{bmatrix}$$

$H^T = \{h_{ji}\}$ tendrá n_t filas y n_x columnas y por tanto

$$A = H \cdot H^T \quad [2.15]$$

es una matriz cuadrada de $n_x \times n_x$ donde

$$a_{ij} = h_{i1} \cdot h_{j1} + h_{i2} \cdot h_{j2} + \dots + h_{int} \cdot h_{jnt}$$

$$a_{ji} = h_{j1} \cdot h_{i1} + h_{j2} \cdot h_{i2} + \dots + h_{jnt} \cdot h_{int}$$

$a_{ij} = a_{ji}$ y por tanto A es simétrica, y sus autovalores y autovectores cumplirán los teoremas t-1, t-2, t-3 y t-4.

De igual modo se podría hacer diferenciando con respecto a las autofunciones temporales $T_1(t)$.

$$T_1(t) \cdot B = T_1(t) \cdot \lambda_1 \quad [2.16]$$

donde $B = H^T \cdot H$ es una matriz cuadrada simétrica de $n_t \cdot n_t$.

Si deseamos que las dos series de autofunciones X_1 y T_1 sean ortonormales aparece un factor de normalización.

$$a_1 = (n_x \cdot n_t \cdot \lambda_1)^{1/2} \quad [2.17]$$

de modo que:

$$h_{ij} = h(x_i, t_j) = \sum_{l=1}^N X_l(x_i) T_l(t_j) \cdot O_l \quad [2.18]$$

2.2.- PROPIEDADES.

Ahora, podemos ya considerar algunas propiedades de estas funciones:

- 1.- Las autofunciones empíricas ortogonales, (Empirical Orthogonal Functions o E.O.F.), proporcionan el método más eficiente de compresión de los datos. Ningún otro conjunto de funciones ortogonales puede describir los datos de un modo más eficiente, en el sentido de explicar en los N primeros términos mayor variabilidad de los datos que cualquier otro método.
- 2.- Dado que los conjuntos de autofunciones temporales y espaciales son ortogonales, cada asociación $\{X_l(x), T_l(t)\}$ representa un modo de variabilidad independiente de cualquier otro de los N-1 restantes.
- 3.- La representación de autofunciones es el mejor método en el sentido de ajuste de los datos por mínimos cuadrados. Permite reducir el número de variables y proporciona un método de eliminar el ruido o parte menos predecible de los datos.
- 4.- Al tratarse de un conjunto ortogonal de funciones, recuerdan en ciertos aspectos al más familiar Análisis de Fourier. Pero, mientras que en este

último uno asume una variación sinusoidal del conjunto de los datos, este método no asume "a priori" forma alguna de las autofunciones. Es la propia estructura de los datos la que determina dicha forma.

Los autovalores son los que proporcionan los pesos de las autofunciones. Nos dan la cantidad de valor cuadrático medio de los datos (varianza si se ha quitado la media) asociada a cada autofunción.

Los resultados de las EOF's se pueden a menudo interpretar en un sentido físico. En realidad, no existe ninguna razón para asumir de antemano que las autofunciones representen un proceso físico, salvo que los datos varían de distinta manera en función de ciertas acciones físicas. Por ejemplo, en el caso de los perfiles de playa la arena se mueve en respuesta al oleaje de una manera estadísticamente predecible. Se podría esperar, por tanto, que dado que la mayor parte de la variabilidad procede del oleaje, las autofunciones quizás deberían reflejar esta fuerza actuante.

ANEJO 3

FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS

ANEJO N° 3.- FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS.

3.1.- PROGRAMA MEDIAC.

Como ya vimos en el anejo n° 2, dedicado a las Funciones Ortogonales Empíricas, la primera de las autofunciones tiene tal preponderancia que oscurece y disminuye la importancia de las restantes. Es por ello que, una práctica habitual, se pensó en suprimir de los datos la media de los mismos. Con ello se consigue además que su valor medio cuadrático sea la covarianza.

Se preparó un sencillo programa en lenguaje Fortran cuyo listado se adjunta a continuación:

```
C
C  PROGRAMA PARA LEER DATOS DE PERFILES, PLANTAS,... SACAR LA  C
C  MEDIA RESTARLA Y ESCRIBIR EN UN FICHERO A ELEGIR LA COLUMNA C
C  QUE SE DESEE
C
C  PROGRAM MEDIAC
C
C  REAL MATRIDAT(10,50,50),VECMEDIO(50,50),DATOS(10,50,50)
C
C      Matridat tiene dimensiones de (nt,NX,NY) mientras que
C      Vecmedio (NX,NY)
C
C  CHARACTER*80 fichin,fmt,fichout
C
C      FMT es el formato, y BORRA lee las entradas del fichero, sin
C      guardarlas, para poder usar sin modificaciones los ficheros
C      *.INP de entrada al 3PCA
C
C  LECTURA DE DATOS
C
WRITE(*,*) 'nombre del fichero de entrada ?'
read (*,*) fichin
open (1,file=fichin)
REWIND(1)
read (1,'(a)')borra
read (1,*) nx,ja,nt,jx,jy,jt
print*,'NX=',nx
print*,'NT=',nt
```

```

    read (1,'(a)') borra
    read (1,'(a)') borra
    read (1,'(a)') borra
    read (1,'(a)') borra
    read (1,'(a)') borra
    read (1,'(a)') fnt
    write(*,*)' Cuantos perfiles trasversales tenemos ?'
    read(*,*)ny
    do 10 it=1,NT
        do 20 ix=1,NX
            read(1,*) (MATRIDAT (IT,IX,IY),iy=1,ny)
20        continue
10    continue
    do 11 it=1,NT
        do 22 ix=1,NX
            DO 33 IY=1,NY
                DATOS(IT,IX,IY)=MATRIDAT (IT,IX,IY)
33        CONTINUE
22    continue
11    continue
C

```

```

    write(*,*)'He leído la matriz de datos'
    DO 30 IX=1,Nx
        DO 35 IY=1,NY
            VECMEDIO(IX,IY)=0.0
35        CONTINUE
30    CONTINUE
C
C        Calcula la suma total en el tiempo
C

```

```

    DO 40 IY=1,NY
        DO 50 IX=1,NX
            DO 55 IT=1,NT
                VECMEDIO(IX,IY)=MATRIDAT(it,ix,iy) + VECMEDIO(IX,IY)
55        CONTINUE
            VECMEDIO(IX,IY)=VECMEDIO(IX,IY)/FLOAT(NT)
50        CONTINUE
40    CONTINUE
C
C        Restamos la media
C

```

```

do 60 it=1,nt
    DO 70 IX=1,Nx
        DO 80 IY=1,NY
            MATRIDAT(IT,IX,IY)=MATRIDAT(IT,IX,IY)-VECMEDIO(IX,IY)

```

```

80    continue
70    CONTINUE
60    CONTINUE
C
C      Graba la columna que deseas
C
      write(*,*) ' Qué columna deseas grabar ?'
      read (*,*) ICOL
      write(*,*) ' En qué fichero ?'
      read (*,*) FICHOUT
      OPEN (2, FILE=FICHOUT)
      REWIND(2)
      WRITE (2,*) 'LA VICTORIA '
      WRITE (2,*) ' 30 17 7 3 3 3'
      WRITE (2,*) ' 0 0 0 0 0 0 0 0'
      WRITE (2,*) ' 5 0 0'
      WRITE (2,*) ' 0 100 0 0 0 0 0 0'
      WRITE (2,*) ' 0 0'
      WRITE (2,*) ' DEPTH  LONG-SHORE TIME'
      WRITE (2,'(a)') FMT
      do 85 iT=1,nt
      DO 90 IX=1,NX
      WRITE (2,fmt) MATRIDAT(IT,IX,ICOL)
90    continue
85    CONTINUE
      open (3,file='DATME.dat')
      REWIND(3)
      do 101 ix=1,nx
      write(3,122)IX,(matridat(it,ix,icol),it=1,nt),vecmedio(ix,icol)
101   continue
122   format(I5,8(f7.3))
      open (4,file='DATOR.dat')
      REWIND(4)
      do 102 ix=1,nx
      write(4,122)IX,(DATOS(it,ix,icol),it=1,nt),vecmedio(ix,icol)
102   continue
C
      CLOSE(1)
      CLOSE(2)
      CLOSE(3)
      CLOSE(4)
      STOP
C
      END

```

Para ilustrar su funcionamiento se expone la entrada de un caso particular.

Ejecutar el programa MEDIAC

- Nombre del Fichero de entrada? 'VIC00.INP'

Nótese que el formato del fichero de entrada es el mismo que el que usa el programa 3CPA.EXE con lo que podemos usar los mismos archivos sin necesidad de cambio alguno. El nombre debe de ir entrecomillado.

NX = 21

NT = 7

Imprime en pantalla el nº de puntos del perfil y el nº de campañas batimétricas efectuadas.

Cuantos perfiles transversales tenemos?

7

En MATRIDAT se almacenan todos los datos y en VECMEDIO se calcula su media temporal. Se la restamos a cada una de las columnas. Después el programa pregunta:

Qué columna deseas grabar?

1

Se grabará el perfil correspondiente a la 1ª columna, esto corresponde al P00.

En qué fichero? '00SMED.INP'

La extensión y formato de ese archivo está de forma tal que sirve para entrar directamente en el programa 3PCA (three way Principal Component Analysis).

Salen además dos ficheros más DATOR.DAT (donde se guardan los datos originales y el vector medio) y DATME.DAT (con la matriz completa de los datos ya sin la media).

3.2.- PROGRAM RECONST

Una de las formas de interpretar físicamente las distintas componentes es mediante la reconstrucción de los datos con una componente, dos o tres y

comparar las diferencias apreciables entre unos y otros. Para eso, el programa RECONST, cuyo listado de instrucciones se adjunta, lo que hace es resolver la ecuación

$$h(x_i, y_j, t_k) = \sum_n \sum_m \sum_l X_{il} Y_{jm} T_{km} c_{lmn}$$

```

C
C      PROGRAMA PARA "RECONSTRUIR" LOS PERFILES A      C
C PARTIR DE LAS COMPONENTES
C
C      PROGRAM RECONST
C
C      Se dimensiona para NX=50 (nº de puntos por perfil),
C                      NY=50 (nº de perfiles),
C                      NT=10 (nº de batimetrías)
C
C      REAL COMPL(50,3),COMPM(50,3),COMPN(10,3),HRECONS(50,50,10)
C      &,COV(3,3,3),H(3,3,3)
C      REAL IIX,IY,IIT
C
C      CHARACTER*80 FICHL,FICHM,FICHN,FICHOUT,FICHCOV
C
C      Lectura de datos
C
C      WRITE(*,*) 'Nº DE PUNTOS EN X (NX)?'
C      READ (*,*) NX
C      WRITE(*,*) 'Nº DE PUNTOS EN Y (NY)?'
C      READ (*,*) NY
C      WRITE(*,*) 'Nº DE PUNTOS EN T (NT)?'
C      READ (*,*) NT
C
C      WRITE(*,*) 'Nº DE COMPONENTES EN X (NL)?'
C      READ (*,*) NL
C      WRITE(*,*) 'Nº DE COMPONENTES EN Y (NM)?'
C      READ (*,*) NM
C      WRITE(*,*) 'Nº DE COMPONENTES EN T (NN)?'
C      READ (*,*) NN
C
C      WRITE(*,*) 'Nombre del fichero (componente L) de entrada ?'

```

```

READ (*,*) FICHL
WRITE(*,*) 'Nombre del fichero (componente M) de entrada ?'
READ (*,*) FICHM
WRITE(*,*) 'Nombre del fichero (componente N) de entrada ?'
READ (*,*) FICHN
WRITE(*,*) 'Nombre del fichero (MATRIZ COVARIANZA) de entrada ?'
READ (*,*) FICHCOV

C
WRITE(*,*) 'Nombre del fichero de salida ?'
READ (*,*) FICHOUT

C
C      Lee las componentes del 1º modo
C
C
C
OPEN (1,FILE=FICHL)
REWIND (1)
DO 10 IX=1,NX
  READ (1,*) IIX,(COMPL(IX,IL),IL=1,NL)
10  CONTINUE
C
OPEN (2,FILE=FICHM)
REWIND (2)
DO 20 IY=1,NY
  READ (2,*) IY,(COMPM(IY,IM),IM=1,NM)
20  CONTINUE
C
OPEN (3,FILE=FICHN)
REWIND (3)
DO 30 IT=1,NT
  READ (3,*) IIT,(COMPN(IT,IN),IN=1,NN)
30  CONTINUE
C
OPEN (4,FILE=FICHCOV)
REWIND (4)
DO 40 IN=1,NN
  DO 45 IL=1,NL
    READ (4,*)( COV(IL,IM,IN),IM=1,NM)
45  CONTINUE
40  CONTINUE
C
C      "Reconstrucción" de la matriz de datos a partir de las componentes
C
DO 50 IT=1,NT
DO 51 IY=1,NY
DO 52 IX=1,NX
  DO 53 IL=1,NL

```

```

        DO 54 IM=1,NM
        DO 55 IN=1,NN
        H(IL,IM,IN)=COMPL(IX,IL)*COMPM(IY,IM)*COMPNT(IT,IN)
& *COV(IL,IM,IN)
        HRECONS(IX,IY,IT)=HRECONS(IX,IY,IT)+H(IL,IM,IN)
55         CONTINUE
54         CONTINUE
53         CONTINUE
52        CONTINUE
51        CONTINUE
50        CONTINUE
C
C   Guarda la matriz reconstruida de datos en el fichero FICHOUT
C
        OPEN (5,FILE=FICHOUT)
        REWIND (5)
        DO 60 IT=1,NT
            DO 61 IX=1,NX
                WRITE (5,*) (HRECONS(IX,IY,IT),IY=1,NY)
61         CONTINUE
60        CONTINUE
C
        CLOSE(1)
        CLOSE(2)
        CLOSE(3)
        CLOSE(4)
        CLOSE(5)
        STOP
        END

```

Para ilustrar su funcionamiento indicamos cómo podría ser la entrada de parámetros "input" en forma interactiva tras correr RECONST.EXE

```

D:\PLAYA\BOF\VICPERFI>reconst
Nº DE PUNTOS EN X (NX)?
21
Nº DE PUNTOS EN Y (NY)?
1
Nº DE PUNTOS EN T (NT)?
7
Nº DE COMPONENTES EN X (NL)?
2
Nº DE COMPONENTES EN Y (NH)?
1
Nº DE COMPONENTES EN T (NN)?
2
Nombre del fichero (componente L) de entrada ?
'compl002.dat'
Nombre del fichero (componente H) de entrada ?
'compn00.dat'
Nombre del fichero (componente N) de entrada ?
'compn002.dat'
Nombre del fichero (MATRIZ COVARIANZA) de entrada ?
'cov002.dat'
Nombre del fichero de salida ?
'rec00_2.dat'

```

Al estudiar los datos en 2D, anulamos el sentido longitudinal respondiendo con un 1 a las preguntas sobre el n° de puntos y de componentes en Y . Los ficheros de entrada con las componentes son los de salida de 3PCA.EXE una vez renombrados para su identificación. El fichero con la matriz de covarianza contiene los valores incluidos en la columna BARTUSSEK SCALED del archivo *.out correspondiente. A los valores obtenidos en el fichero de salida hay que dividirlos por la SCALING CONSTANT que también aparece en dicho archivo.

3.3.- PROGRAM EROSION

Mediante la resta de los distintos perfiles $h(x,y,t)$ con un plano de comparación obtenemos unas superficies $S(y,t)$ para cada perfil y campaña. Si para cada perfil ($y = \text{cte.}$) hallamos los valores diferencia entre las distintas campañas y dividimos por el tiempo de separación entre ellas calculamos unos caudales de sedimento en $\text{m}^3/\text{seg.}$ y por metro lineal de playa. Eso es precisamente lo que hace el programa EROSION cuyo listado se muestra a continuación.

```

C
C      Programa para pasar de h(x,y,t) a S(y,t) y
C      posteriormente a Q(y,t)
C
PROGRAM EROSION
C
REAL HDATO(10,50,50),QSEDIM(10,50),SPARCIAL(50)
DIMENSION SUP(50,50)
REAL INCREX
C
C      HDATO tiene dimensiones de (nt,NX,NY) mientras que
C      SUPERF y QSEDIM (NT,NY)
C
CHARACTER*80 fichin,fmt,fichout
C
C      FMT es el formato, y BORRA lee las entradas del fichero, sin
C      guardarlas, para poder usar sin modificaciones los ficheros
C      *.INP de entrada al 3PCA

```

```

C
C      LECTURA DE DATOS
C
WRITE(*,*) 'nombre del fichero de entrada ?'
read (*,*) fichin
open (1,file=fichin)
REWIND(1)
read (1,'(a)')borra
read (1,*) nx,NY,nt,jx,jy,jt
print*,'NX=',nx
PRINT*,'NY=',NY
print*,'NT=',nt
read (1,'(a)') borra
read (1,'(a)') borra
read (1,'(a)') borra
read (1,'(a)') borra
read (1,'(a)') borra
read (1,'(a)') fnt
do 10 it=1,NT
  do 20 ix=1,NX
    read(1,*) (HDATO (IT,IX,IY),iy=1,ny)
20  continue
10  continue
C
write(*,*)'He leído la matriz de datos'
C
C      Calcula las superficies de cada perfil con respecto
C      a un punto de referencia
C
HREFER=-5.
INCREX=25.
C
C      Nos dara el resultado en m3/mes
C
INCRET=6.
C
DO 30 IY=1,NY
  DO 40 IT=1,NT
C  WRITE(*,*)'IT=',IT
    DO 50 IX=2,NX
      SPARCIAL(IX)=((HDATO(IT,IX-1,IY)-HREFER)+
&      (HDATO(IT,IX,IY)-HREFER))/2*INCREX
      SUP(IT,IY)=SUP(IT,IY)+SPARCIAL(IX)
C  write(*,*)'IX=',IX,'SPARCIAL(IX)=' ,SPARCIAL(IX),SUP(IT,IY)
    SPARCIAL(IX)=0.

```

```

50          CONTINUE
40          CONTINUE
30          CONTINUE

```

C

```

do 65 iy=1,ny
DO 60 IT=2,NT
QSEDIM(IT-1,IY)=(SUP(IT-1,IY)-SUP(IT,IY))/INCRET
C  WRITE(*,*) 'QSEDIM(IT-1,IY)',QSEDIM(IT-1,IY)
60  CONTINUE
65  continue

```

```

write(*,*) ' En qué fichero quieres grabarlo ?'
read (*,*) FICHOUT
OPEN (2, FILE=FICHOUT)
REWIND(2)
WRITE (2,*) 'LA VICTORIA '
WRITE (2,*) '  1 30  6  3  3  3'
WRITE (2,*) '  0 0  0  0  0  0  0          0'
WRITE (2,*) '  5 0  0'
WRITE (2,*) '  0 100  0  0          0 0  0  0'
WRITE (2,*) '  0 0'
WRITE (2,*) ' QSEDIM  LONG-SHORE TIME'
WRITE (2,'(a)') ' (f10.5)'
do 85 iT=1,nt-1
WRITE (2,200)(QSEDIM(IT,ICOL),icol=1,ny)
85  CONTINUE
200  format(50f10.5,/)
122  format(I5,8(f7.3))

```

C

```

CLOSE(1)
CLOSE(2)

```

C

```

STOP

```

C

```

END

```

Para orientar sobre la entrada de datos y su funcionamiento, se muestra un caso específico y la tipología del archivo de salida.

```

D:\PLAYA\EOF\QSED>erosiond
nombre del fichero de entrada ?
'vicperse.inp'
NX=          21
NY=          30
NT=           7
He leído la matriz de datos
En qué fichero quieres grabarlo ?
'qsed.inp'
Stop - Program terminated.

D:\PLAYA\EOF\QSED>edit qsed.inp

```

Archivo	Edición	Búsqueda	Opciones	Ayud
QSED.INP				
LA VICTORIA				
30	1	6	3 3 3	
0	0	0	0 0 0	0
5	0	0		0
0	100	0	0	0 0
0	0			
QSEDIM	LONG-SHORE	TIME		
(f10.5)				
-5.70833				
10.58333				
26.22917				
10.08333				
18.47917				
17.18750				
28.00000				
8.31250				
12.72917				
15.20833				
6.97917				
.70833				
6.91667				

MS-DOS Editor F1=Ayuda Presione ALT para activar menús | B 00001:001

```

D:\PLAYA\EOF\QSED>3pca
NOMBRE DEL FICHERO DE DATOS ?
'qsed.inp'
NOMBRE DEL FICHERO DE RESULTADOS ?
'qsed.out'

```

ANEJO 4

CLIMA MARITIMO

ANEJO N° 4.

4.1.- CLIMA MARITIMO.

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes elaboró en 1987 a través de la entonces Dirección General de Puertos un programa de desarrollo tecnológico en el ámbito de las obras marítimas y portuarias con el objetivo de preparar una serie de recomendaciones que constituyeran la Normativa española en este campo. En 1991 se publicó una de estas normas, la ROM 0.3-91 sobre Oleaje, con el Anejo n° I: Clima Marítimo en el Litoral Español.

La información disponible en cuanto a oleaje es de dos tipos:

- Los datos visuales de Oleaje recogidos en el *National Climatic Data Center de Ashville* (North Carolina, U.S.A.), tienen asignada una dirección y están tomados en aguas profundas.

- Los datos instrumentales registrados por las boyas integradas en la Red Española de Medida y Registro de Oleaje (REMRO), fondeadas cerca de la costa y de carácter escalar, comenzaron a funcionar, por etapas, a principios de los 80.

El Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), dependiente del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) reelaboró toda esa información, analizándola conjuntamente y definiendo unas características del oleaje para cada una de las 10 zonas en que se dividió el litoral español.

La zona que incluye nuestro tramo de costa en estudio es el Area IV; una fotocopia de la hoja correspondiente del Atlas de Clima Marítimo se expone, a continuación en la fig A4.1.

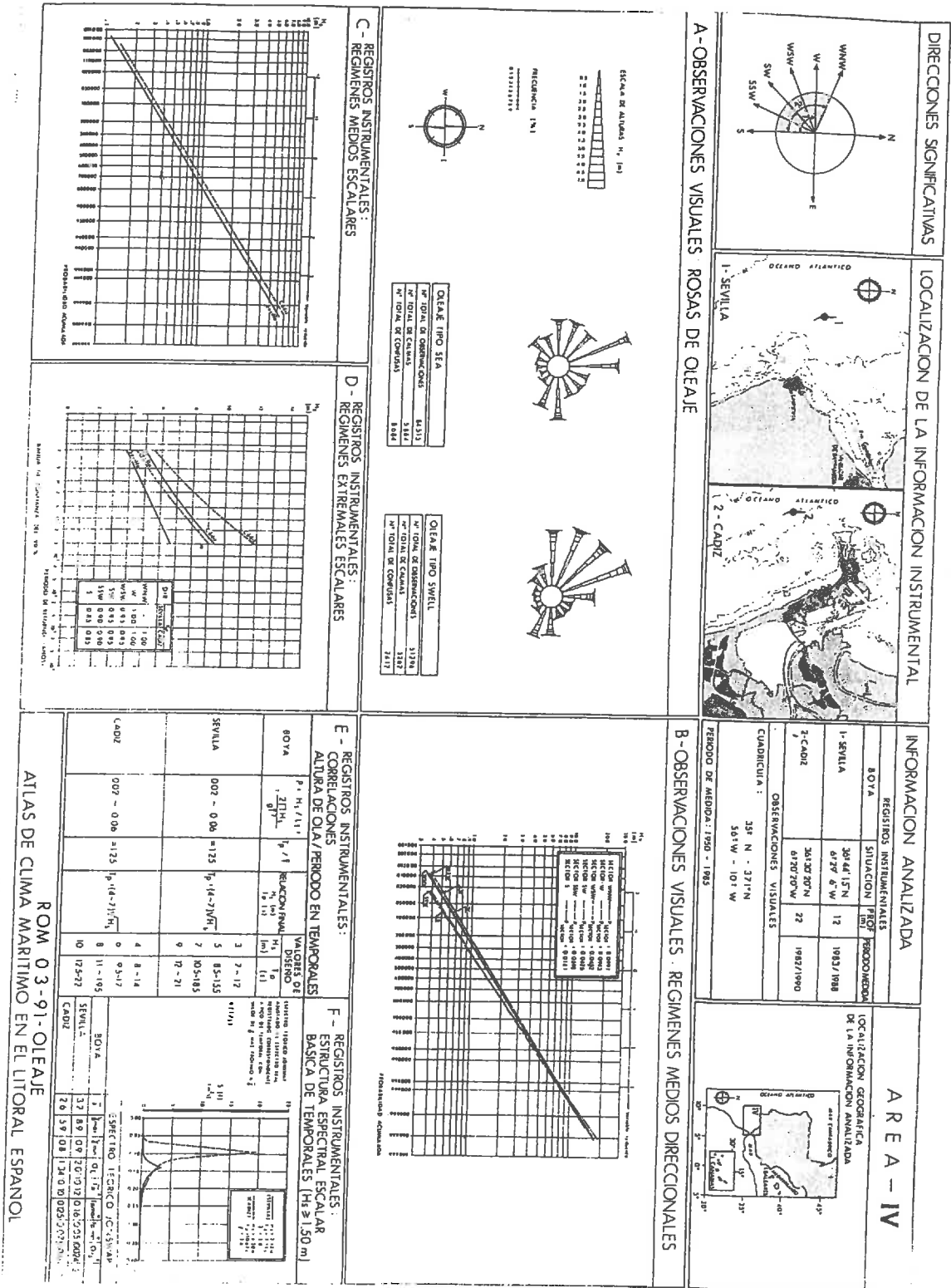


Fig. A4.1.- Hoja del Atlas de Clima Marítimo correspondiente a la vertiente atlántica del sur de la península.

Se aprecian las direcciones significativas del oleaje que, dada la configuración de la costa, orientada de NNO a SSE, cubren un sector desde WNW hasta el Sur.

La boya está ubicada frente a la costa de la ciudad de Cádiz, en el veril de los 22 metros. Sus coordenadas son 36° 30' 20" de latitud Norte y 6° 20' 20" de longitud Oeste. El periodo de datos de que se dispone es el transcurrido entre 1982 y 1990, ejercicio con el que se cierra para proceder a la elaboración de la ROM. No obstante, no por ello dejó de funcionar la boya. En el estudio que sigue, se dispone de los registros hasta el día de hoy gracias a la colaboración del programa de Clima Marítimo, dependiente en la actualidad del Organismo autónomo de Puertos del Estado.

Las observaciones visuales se usan en este documento para preparar unas Rosas de Oleaje, distinguiendo entre Sea y Swell, y un régimen medio direccional en que para cada sector se relaciona una determinada altura visual con la probabilidad acumulada de ocurrencia de dicho valor o uno inferior.

Los registros instrumentales sirven para elaborar cuatro útiles gráficas:

- Regímenes medios escalares que relacionan H_s con su probabilidad.
- Regímenes medios escalares; ídem H_s con un periodo de retorno.
- Correlaciones altura ola / periodo de temporales (H_s y T_p).
- Estructura espectral básica, con los parámetros del JONSWAP.

El comportamiento morfológico de una playa no depende de la ocurrencia o no de una única ola por muy grande que sea, sino del oleaje que le llega en periodos muchos más largos.

Para calibrar los modelos de propagación desde alta mar hasta la playa, así como para dotar de direccionalidad a los datos de la boya, se decidió una campaña de toma de datos visuales en la orilla. Para ello, dos veces al día, se tomaba la dirección de los frentes del oleaje mediante brújula, el periodo del mismo con el procedimiento de contar el número de olas que rompen en diez minutos, así como una aproximación a la altura de la ola en rotura mediante inspección ocular con prismáticos de unas pértigas ubicadas en dicha zona y pintadas alternativamente de rojo y blanco cada diez centímetros (ver fotografías ilustrativas en fig A4.2 y A4.3).

Al disponer dos de ellas en el mismo perfil y conocer la distancia que las separaba, se puede, cronometrando el tiempo que tarda la ola en cubrir dicha distancia, averiguar la celeridad de la onda y, por ende, su longitud.

La fig A4.4 muestra la dirección, altura de ola y periodo del oleaje registrado en los puntos de control. Se han representado también los picos máximos de los registros de la boya para "temporales" en que $H_{1/3}$ era mayor de 1,0 metros. Lo mismo para el T_z periodo de cruce por cero) asociado a dicha $H_{1/3}$. La discrepancia entre los valores de la altura visual y la instrumental puede deberse a que la evolución de los temporales es muy rápida a lo largo del día en esta zona, tal como muestran los registros instrumentales. Por ello, pueden existir diferencias acusadas entre ambos valores si el momento de realización de la observación visual no coincide con el álgido del temporal. Amén de las divergencias propias de la propagación del tren de olas desde el veril de fondeo de la boya hasta la orilla.

Asimismo, la observación visual sobreestima en todos los casos el valor del periodo de pico registrado por la boya.

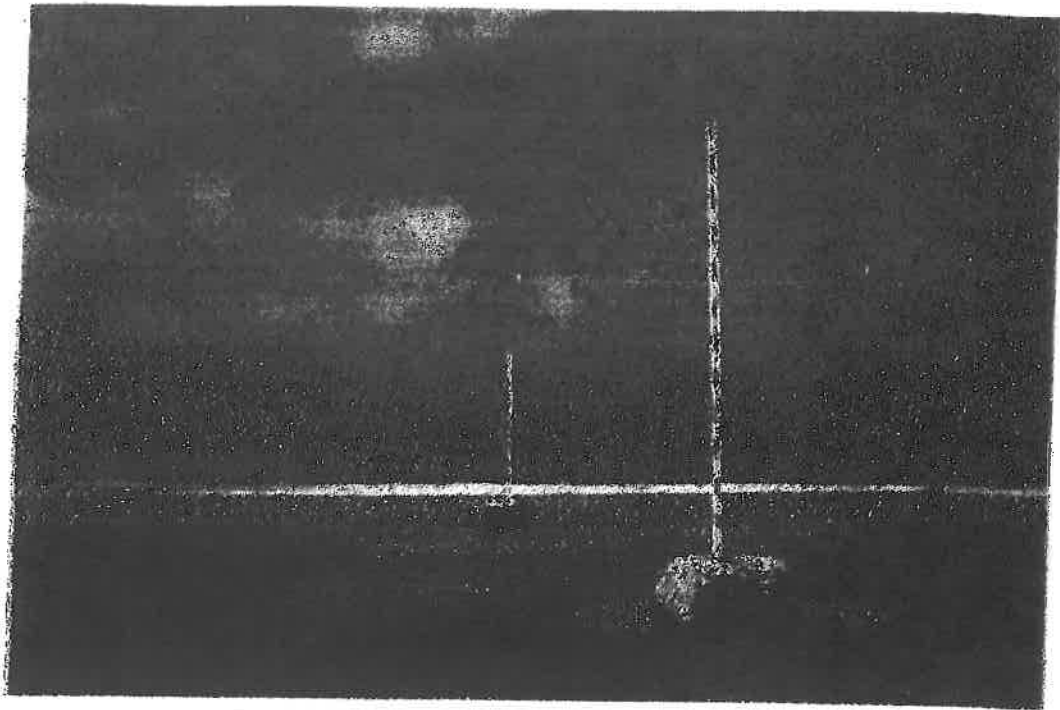


Fig. A4.2.- Perspectiva de la línea de 2 pértigas.



Fig. A4.3.- Montaje de pértigas de cerca.

Las direcciones del oleaje predominantes son las correspondientes al sector SW-W, con una tendencia en los meses de Julio a Octubre (en el año 1992) a presentarse oleajes de componente Sur, propios del levante en el Estrecho. En la fig. A4.5 se muestra el histograma anual de dirección del oleaje repartido por sectores de 22,5°. A partir del NW el porcentaje de presentación es casi nulo.

DIRECCION DE INCIDENCIA DEL OLAJE HISTOGRAMA ANUAL DE PRESENTACION

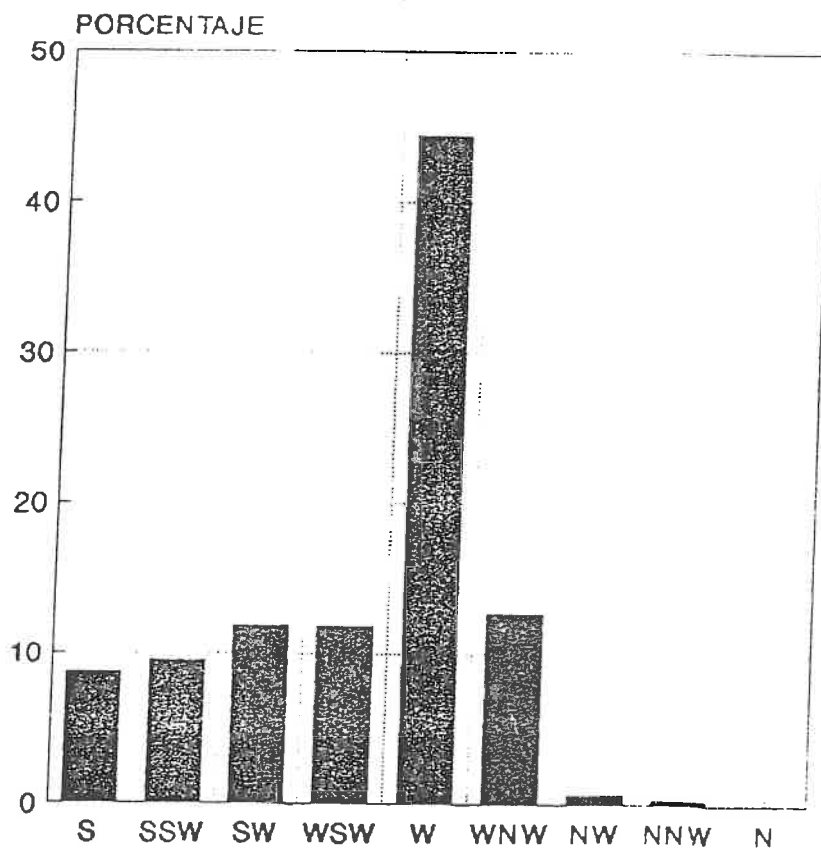


Fig. A4.5.- Dirección de incidencia del oleaje.

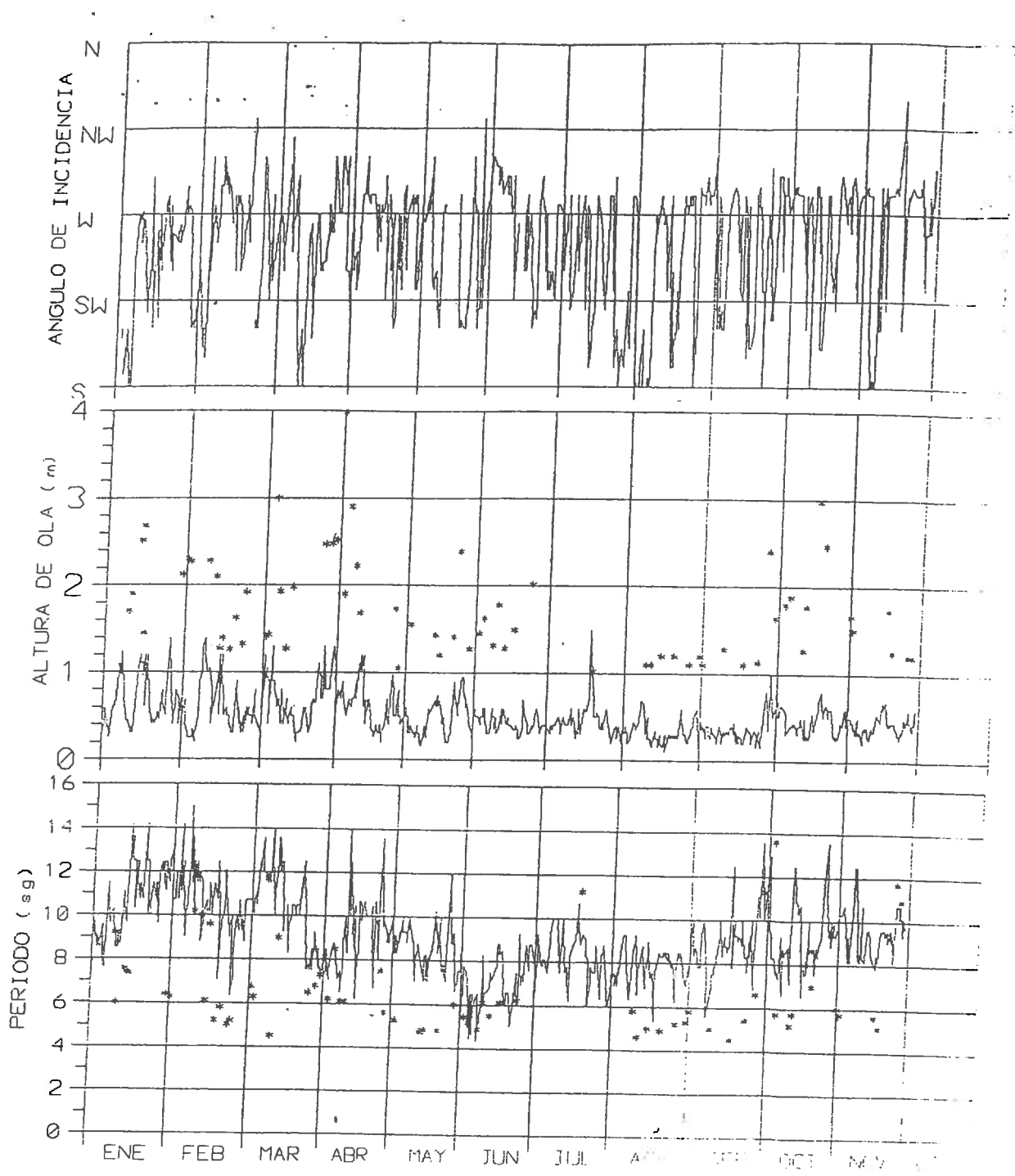


Fig. A4.4.- Observaciones visuales de oleaje 1992. Cortadura.

4.2.- DATOS INSTRUMENTALES.

Los ficheros ASCII donde se encuentran los datos estadísticos de los registros de la boya están compuestos por filas y columnas legibles por cualquier hoja de cálculo. La dispersión de los parámetros es distinta según el fichero tenga la extensión .INF, proveniente del Laboratorio de Puertos, ó .DAT, del Departamento de Clima Marítimo.

En el anejo se muestran dos ejemplos parciales de cada uno de ellos así como una explicación de a qué columna corresponde cada uno de los estadísticos que se presentan: altura de ola significativa, altura de ola máxima, de cruce por cero ascendente, periodo de la altura máxima, periodo de pico,... Una clara exposición del significado de los distintos parámetros puede consultarse en *Suárez Bores (1967)*. Cada fila corresponde a una hora determinada y el primer valor de la misma es la fecha de la toma del dato.

Puesto que la primera batimetría se produce en Diciembre de 1991, cogemos el oleaje desde Julio de ese mismo año, seis meses antes, pues suponemos que el estado actual de una playa es función de su estado previo y de la energía en ella disipada desde ese momento.

Disponíamos, tras el relleno de las lagunas existentes, de tres años y medio de registros, lo que suponía a razón de 365 días y 24 horas un total de más de 30.000 filas de datos, cada una con 8 a 10 parámetros.

Puesto que la periodicidad de las batimetrías era semestral no parecía lógico el representar el oleaje por horas. Así pues, y con el fin de intentar abarcar esa información, decidimos representar la altura de ola significativa media de cada mes (H_{zs}), ídem la máxima de esas ($H_{zs \text{ máx}}$), el periodo de cruce por cero ascendente medio de cada mes (T_z) y el máximo de ellos ($T_{z\text{máx}}$).

En la fig. A4.6 se presentan dichos valores, y en la fig A4.7 únicamente aparecen los valores de ola para apreciar mejor sus variaciones.

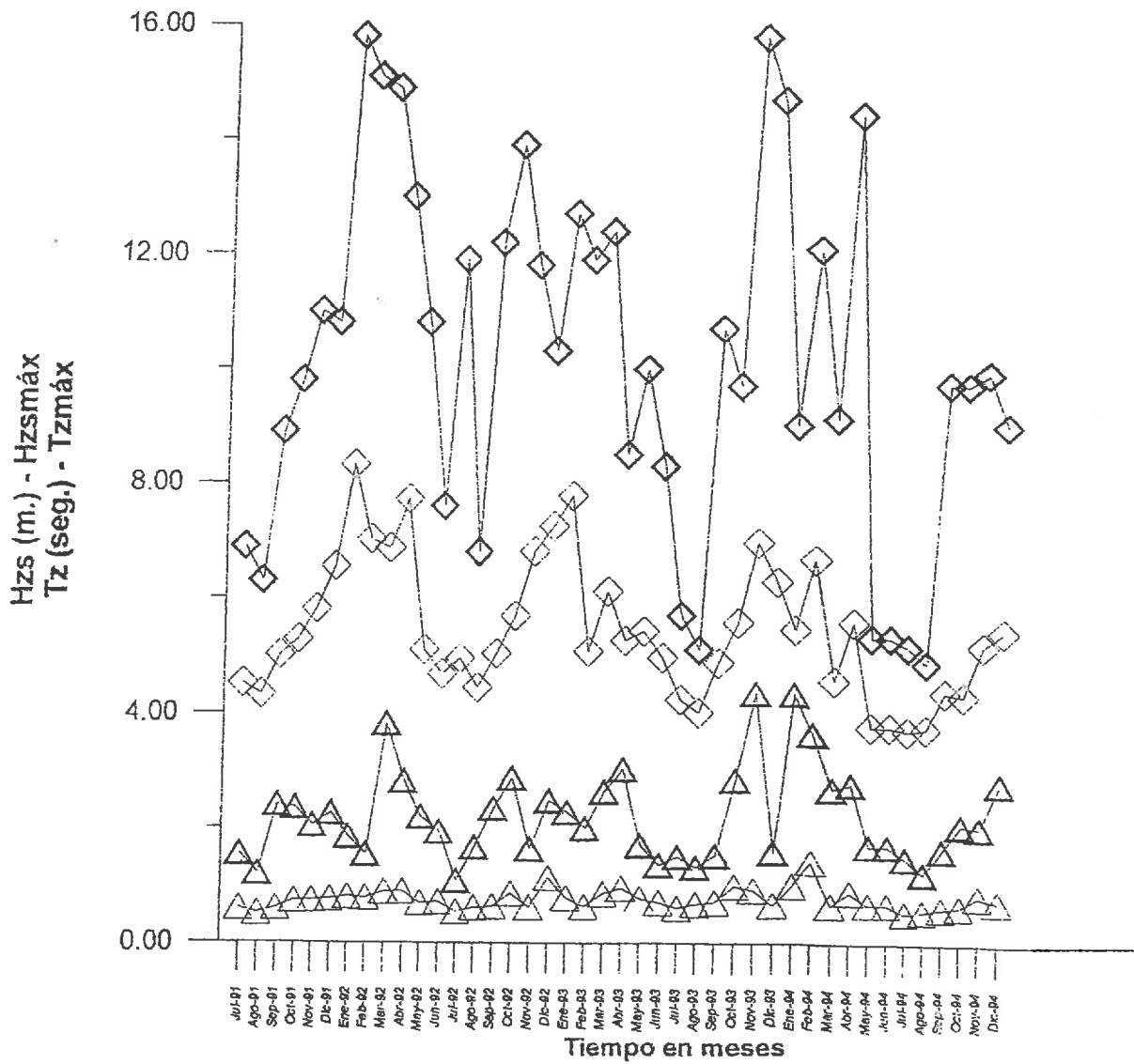


Fig. A4.6.- Datos de altura de ola y períodos medios y máximos mensuales.

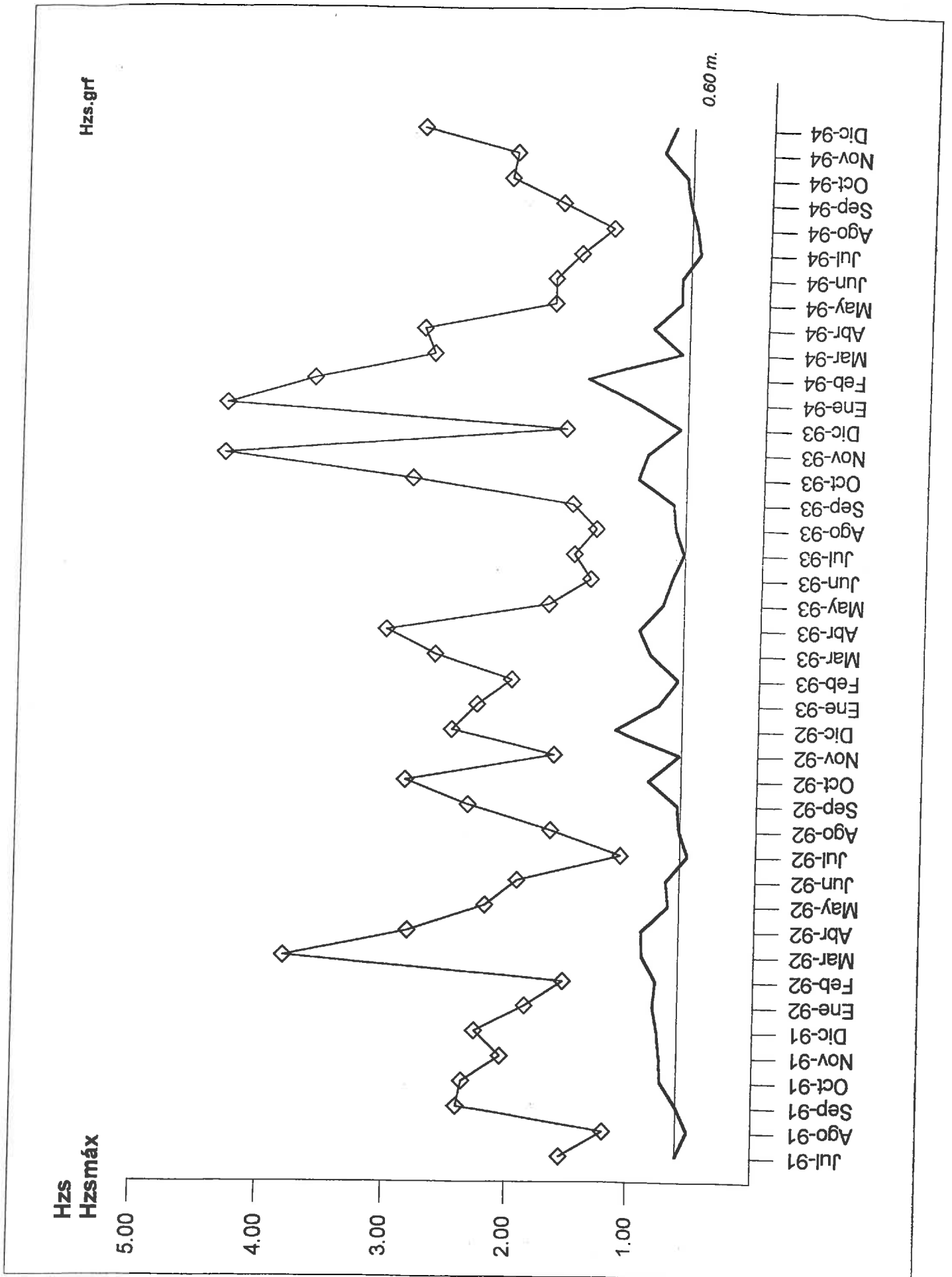


Fig. A4.7.- Altura de ola significativa media mensual (H_{zs}) y su máximos $H_{zs,max}$

De la observación de estos gráficos podríamos deducir que hay unos temporadas a las que denominamos *Calmas* (en general los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre) en las que la $H_{zs\ máx}$ no sobrepasa casi nunca los 2,00 metros.

Y por contra, el valor máximo de la altura de ola significativa media mensual supera los 2,50 metros en:

Marzo - Abril del 92.

Octubre - Diciembre del 92.

Marzo - Abril del 93.

Octubre - Diciembre del 93.

Enero - Abril del 94.

Podemos suponer que hay dos épocas de temporales: marzo-abril y octubre-diciembre-febrero que pueden, o no, estar unidas entre sí.

La expresión de "*época de temporales*" no significa que estos aparezcan con continuidad ni mucho menos, sino que existe una alta probabilidad de que venga alguno. Al extraer los valores medios hemos perdido la posibilidad de observar directamente cómo esos temporales tienen una duración de unos tres días y, en la mayoría de los casos, nunca superior a la semana. Algo puede deducirse de la comparación entre los valores de los distintos estadísticos:

$$\frac{\bar{H} \text{ máx mensual}}{\bar{H}_z \text{ máx mensual}} = \frac{4,54}{2,33} = 1,95$$

Con puntas en algunos meses de:

$$\frac{4,19}{2,07} = 2,02$$

Más claro aún se ve en:

$$\frac{\overline{H_{zs}} \text{ máx mensual}}{\overline{H_{zs}} \text{ mensual}} = \frac{2,33}{0,73} = 3,01$$

Con picos de:

$$\frac{4,34}{0,91} = 4,77$$

que nos da una indicación de la poca duración del temporal, ya que H_{zs} mensual sólo alcanza niveles del orden superiores al metro en octubre del 93 y enero-febrero del 94.

En el capítulo VI de VARIACIONES A MEDIO PLAZO se extrajeron algunas conclusiones del análisis de los parámetros medios del oleaje del año 1995 y comienzos de 1996. Allí sólo se presentaron los ajustes. Aquí, en la fig A4.8, mostraremos la gráfica de todos los datos así como la explicación del tratamiento de los mismos.

Dibujamos los valores medios horarios (≈ 8800) de todo el año 95 y principios del 96 de la altura de ola media y del período medio de cruce por cero ascendente. También se calculó el parámetro adimensional de velocidad de caída del grano, suponiendo un D_{50} constante de 0.24 mm., y el peralte medio de la ola en grandes profundidades. A estima se observaban dos máximos y un mínimo en las tres series y por ello se eligió un ajuste polinomial de 4º grado.

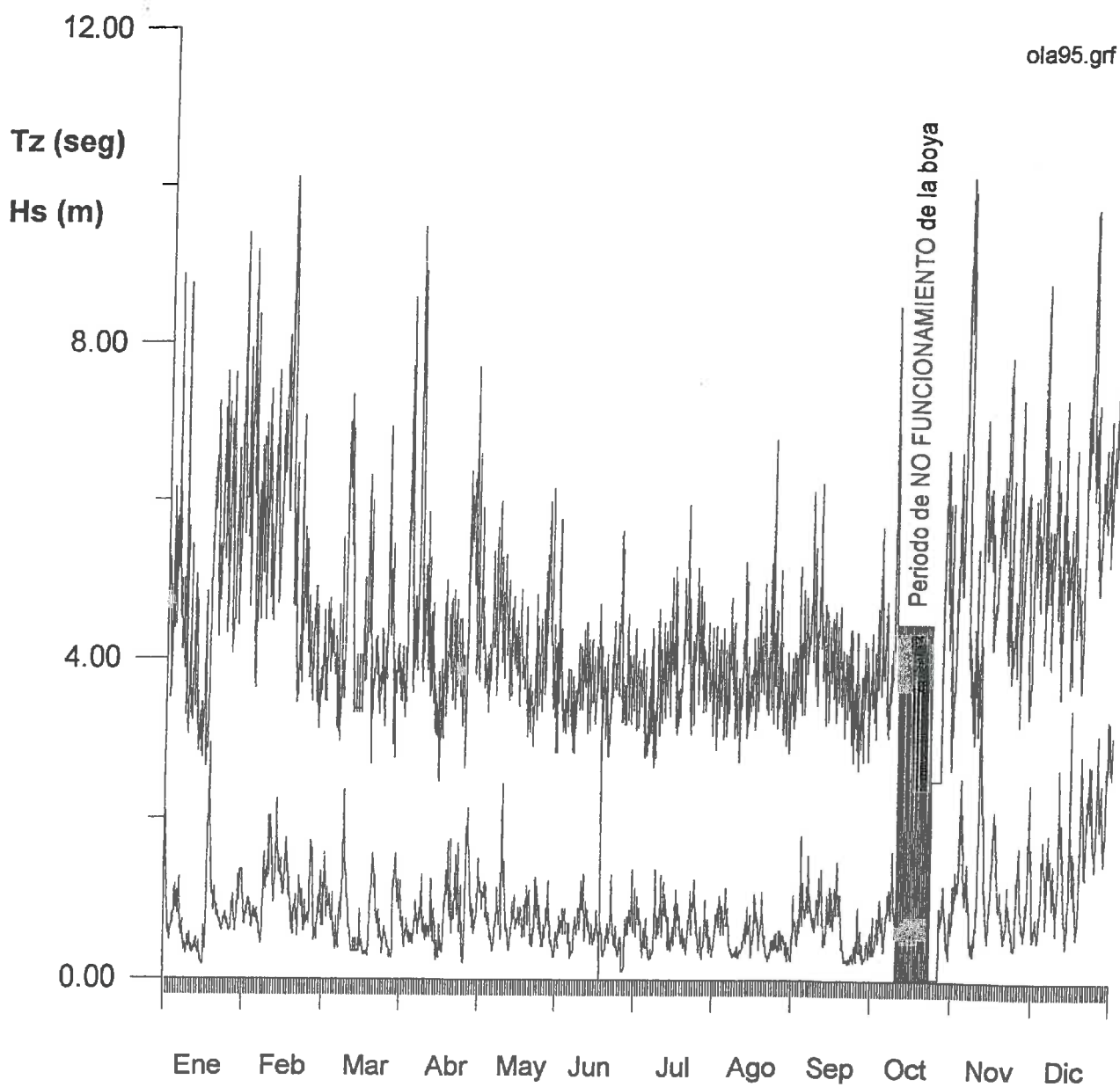


Fig. A4.8.- Representación de la altura de la significativa (H_{zs}) y el período de cruce por cero ascendente (T_{zs}) a lo largo del ejercicio de 1995.

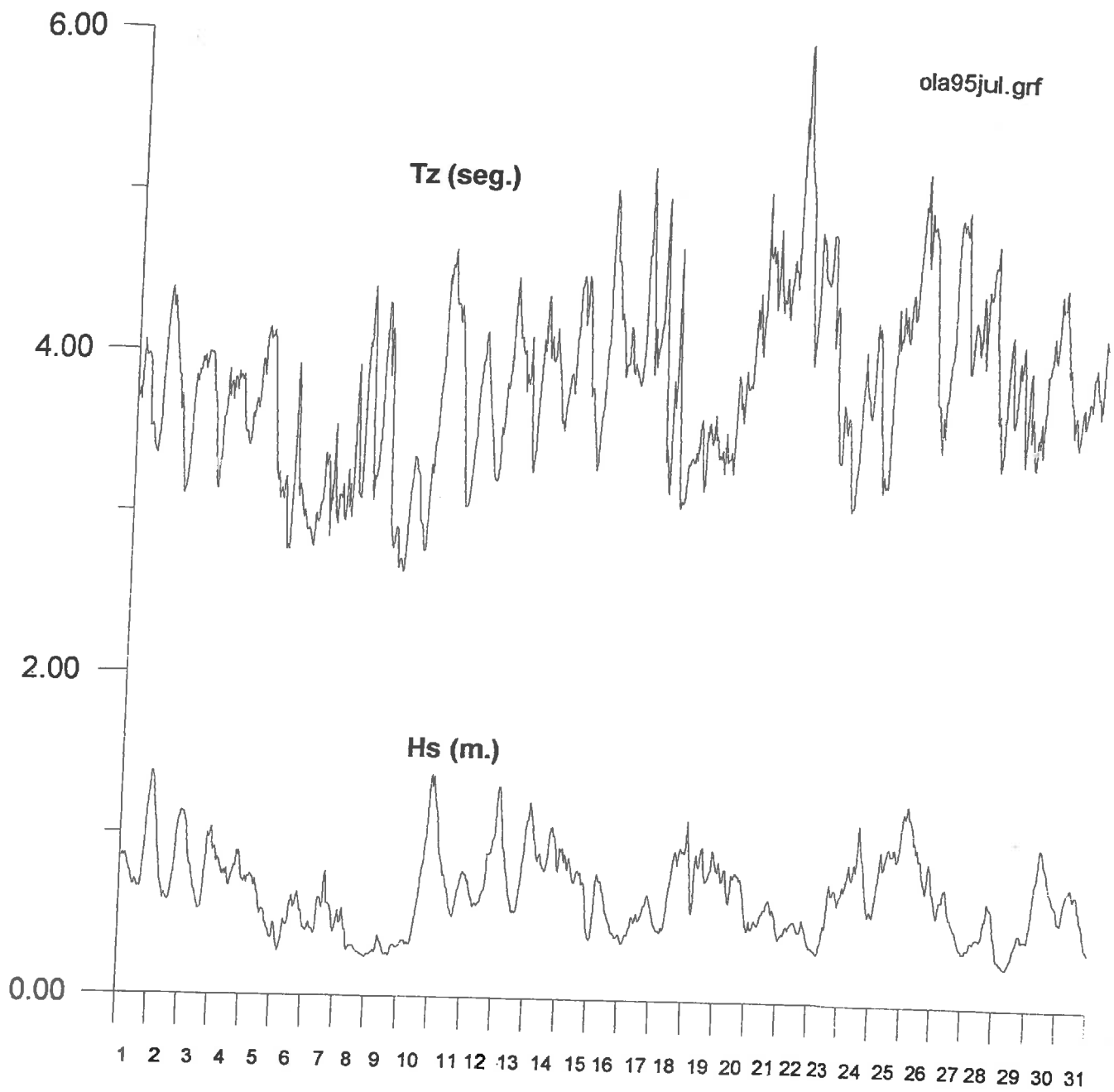


Fig. A4.9.- Representación de la altura de la significativa (H_{zs}) y el período de cruce por cero ascendente (T_{zs}) durante el mes de julio de 1995.

La altura de ola media permanece casi constante hasta mediados de septiembre en que empieza a crecer. El período medio es superior (5 seg.) en enero-febrero que en verano (4 seg. en junio-agosto) y sube hasta 7 seg. con los fuertes temporales de enero de 1996.

Por otra parte, puesto que intentamos ver posibles interrelaciones entre la altura de ola y el período medios y la velocidad de caída de grano adimensional $(H_{media}/T_{medio}) / w$ quizás fuera adecuado el establecer la relación entre $H_{1/3}$ y la H_{media} . Así se hizo, resultando un ajuste lineal con ordenada 0 en el origen y aproximadamente una pendiente de 1.61, que puede visualizarse en la fig. A4.10 El coeficiente de correlación resultó ser de 0.998. Se utilizaron todos los datos medios horarios de 1995 y los dos primeros meses del 96 (\approx 9800 puntos).

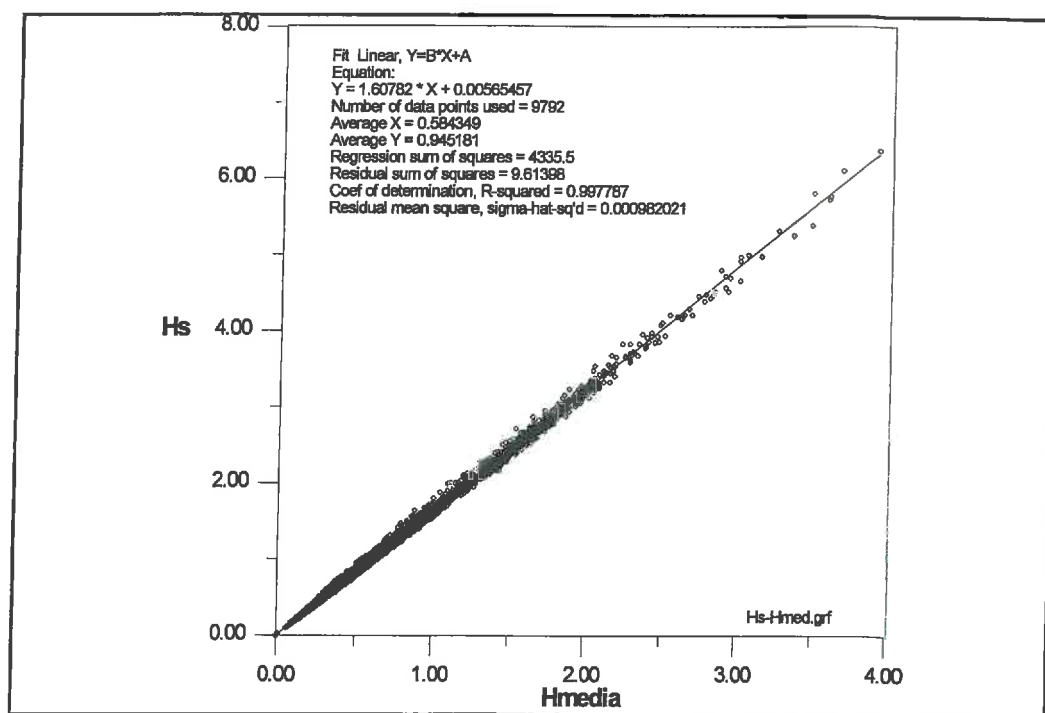


Fig. A4.10 Correlación entre H_{media} y $H_{1/3}$

4.3.- PROPAGACION DEL OLEAJE.

El hecho de que el fondo frente a la playa Victoria sea irregular y poblado de numerosos bajos y arrecifes rocosos propiciará fenómenos diferenciados de refracción que tendrán como consecuencia que en la orilla haya unas zonas con concentración de energía y otras donde haya disminuido. Al existir áreas con una mayor altura de ola y por tanto del nivel del mar, se producirán desplazamientos de volúmenes de agua hacia los lugares donde sea menor. Estas corrientes, coincidentes con el fenómeno de rotura y consiguiente puesta en suspensión del sedimento, serán las causantes del transporte del material. Puesto que, como ya hemos comprobado, la playa no es precisamente un dechado de homogeneidad, intentaremos ver que es lo que sucede en algunos casos particulares (no intentamos ser en modo alguno exhaustivos) y extraer con la debida precaución consecuencias de tipo general.

4.3.1.- Modelo REFDIR de propagación.

El modelo matemático aquí utilizado, puesto a punto por Kirby y Dalrymple, incluye los fenómenos de refracción y difracción de una manera explícita y combinada.

Al no conocer las condiciones de contorno en la orilla (es precisamente lo que queremos averiguar con la propagación) no podemos resolver la ecuación elíptica. El procedimiento utilizado consiste en usar una aproximación parabólica. Esta simplificación comporta algunas restricciones como la de no poder tener en cuenta oleajes que retrocedan (como los que podrían provenir de algunas reflexiones). Tampoco puede usarse para aquellos casos en que la dirección de propagación varíe más de 60° con respecto a la predominante (podría ser el caso de la entrada en abras, rías, puertos, etc..)

Se supone, además, que las variaciones de fondo en las coordenadas horizontales son pequeñas; es decir, se trata de una pendiente suave o "*mild slope*".

En cuanto a la ecuación de dispersión utilizada, se puede elegir entre la lineal, Stokes de orden dos, o una combinación Stokes-Hedges que mediante una formulación empírica sirve incluso para valores altos del parámetro de Ursell, en profundidades reducidas.

Se tiene en cuenta la disipación de energía para la rotura del oleaje; para determinar el inicio de la misma se utiliza el criterio de rotura de la onda solitaria. También se contempla el amortiguamiento por fondo poroso, capa límite de fondo turbulenta y límite de superficie laminar.

La ecuación se resuelve mediante diferencias finitas. Las condiciones de contorno laterales no se han conseguido definir como completamente transmisoras o absorbentes del oleaje. La reflexión en los laterales de la onda incidente se puede propagar hacia el área de interés dando resultados erróneos. Es importante, por tanto, el dimensionar la malla a su ancho de forma que las alteraciones producidas por esas reflexiones ficticias no alcancen nuestra zona de estudio.

4.4.- EXPLICACION DEL PROGRAMA COPLA O MODELO DE CORRIENTES.

Los cambios en la morfología de las playas vienen determinados por los distintos fenómenos de transporte de sedimento que se producen. Este movimiento de arena precisa, para ser importante, de una turbulencia que ponga al material en suspensión; es decir, la rotura del oleaje.

Una vez eliminado el rozamiento con el fondo y trabazón entre los granos, las partículas de arena necesitan para desplazarse que el volumen de agua en que se encuentran inmersas se mueva a su vez; es decir, una corriente.

Las corrientes pueden ser generadas por la marea, el viento, los ríos,...; pero, salvo casos particulares, se puede afirmar que las debidas al propio oleaje son las de mayor peso.

El modelo aquí utilizado, el COPLA (corrientes de playa) ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria. A partir de las ecuaciones de Navier Stokes y con las hipótesis de fluido homogéneo y variación lenta de la profundidad con respecto a las direcciones horizontales, se deducen las ecuaciones usadas por el modelo. Puesto que nos interesan unas velocidades netas, las promediaremos en un período de tiempo y las integraremos en la profundidad. El sistema de coordenadas está situado en el nivel medio del mar, donde "x" será la dirección perpendicular a la línea de costa, "y" paralela a la misma y "z" será la profundidad.

Las alturas de ola y su dirección en cada punto de la malla se extraen automáticamente de los ficheros de salida del programa de propagación antes explicado, el REFDIF, que debe ser corrido previamente para cada caso que se desee estudiar (altura de ola, período, dirección y nivel de marea).

