

Variabilidad espacio-temporal de la flecha del río Guadiaro

JORGE ROMÁN SIERRA (*), MARINA NAVARRO (**), JUAN JOSÉ MUÑOZ PÉREZ (**) y BEGOÑA TEJEDOR (**)

RESUMEN La continua migración de la flecha de arena en la bocana del río Guadiaro, provoca el cierre de su estuario. Este hecho supone un serio problema de eutrofización de aguas y mortandad de flora y fauna debido a la escasa renovación de sus aguas. Con el fin de investigar la evolución morfodinámica de la parte emergida de la flecha, se han realizado 7 levantamientos topográficos de perfiles longitudinales y transversales de la flecha durante 5 meses. Se ha desarrollado un minucioso análisis volumétrico de los datos de campo, mediante Funciones Empíricas Ortogonales. Tras severos procesos erosivos (de hasta 5,73 m³/ml-día) y acumulativos (de hasta 8,92 m³/ml-día), este método explica perceptiblemente la evolución espacio-temporal de los perfiles. Se observa que la acción del oleaje es determinante en la comprensión de la progresión tridimensional de la flecha.

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY IN THE SPIF OF GUADIARO RIVER

ABSTRACT *The continuous migration of the sand spit in Guadiaro River provokes the closing of its estuary. This fact involves a serious problem of water eutrofization and mortality within flora and fauna species due to the lack of water renovation. In order to investigate the morphodynamic spit evolution, 7 long-shore and cross-shore topographic profile levellings of the spit have been performed within a 5 month period. A meticulous volumetric analysis of the field data has been developed through Empirical Orthogonal Functions (E.O.F). After severe erosion processes (up to 5,73 m³/ml-day) and accumulative events (up to 8,92 m³/ml-day), this method explains the spatial and temporal profiles evolution noticeably. The wave action is determinant within the study and understanding of the three-dimensional spit evolution.*

Palabras clave: Río Guadiaro, Guadalquivir, Sotogrande, Flecha arena, Funciones Empíricas Ortogonales, Componentes principales, Eutrofización, Estuario.

1. INTRODUCCIÓN

Los estuarios presentes en entornos mesomareales muestran con cierta asiduidad situaciones de eutrofización de sus aguas, debido principalmente, a la oclusión de su desembocadura mediante una flecha de arena. Estos estuarios aparecen usualmente en medios con una energía moderada del oleaje, y se encuentran definidos por un canal formado sobre una flecha, donde, las corrientes mareales se aceleran, Hayes (1979). En estos ambientes se suceden estacionalmente importantes periodos de cierre y apertura de la bocana del estuario, así como procesos de erosión y acreción de las playas colindantes. Los procesos sedimentarios y la morfología del estuario del río Guadiaro, están relacionados con la acción combinada de las corrientes mareales y de las corrientes inducidas por el oleaje. La influencia relativa de ambas, provoca una migración compleja de la bocana y de las barras.

El cierre de la bocana del estuario coincide con la migración natural de la flecha y épocas de mínimo caudal del río durante periodos de estiaje, facilitando así la deposición de

la arena. La influencia del bajo caudal del río junto a la escasa renovación de aguas y a su alta carga orgánica, causa la eutrofización del estuario, generando así aguas anóxicas que ocasionan la muerte de importantes especies de flora y fauna. El incremento de los vertidos al río, procedentes de los núcleos urbanos situados aguas arriba (ya que la urbanización de Sotogrande, sita en la misma desembocadura, posee depuradora), añade un factor negativo determinante en la calidad de las aguas, (Caballero et al., 2007). Además, este proceso de eutrofización de las aguas lleva implícito una generación de gases con un fuerte y desagradable olor para las urbanizaciones colindantes.

Su estratégica situación en la vertiente migratoria oriental del Estrecho de Gibraltar propicia la presencia de una rica variedad de aves migratorias y estacionales, que encuentran en estos ecosistemas zonas de descanso en sus largos viajes septentrionales. Las condiciones ambientales naturales de la zona se ven afectadas en gran medida en función del cierre de la desembocadura del río por el avance de la flecha hacia el espigón de encauzamiento. En consecuencia de estos problemas sociales y medioambientales, el Ministerio de Medio Ambiente ha actuado con anterioridad, efectuando dragados de la bocana y otras actuaciones blandas encaminadas a solventar esta problemática (Muñoz-Pérez et al., 2000).

El principal objetivo de este artículo es la investigación de las tendencias evolutivas del comportamiento de la flecha

(*) Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico, Ministerio de Medio Ambiente. C/Marianista Cubillo, n° 7, 11071, Cádiz, España.

(**) Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, CASEM, Polígono Río San Pedro, s/n, 11510, Puerto Real (Cádiz), España.



FIGURA 1. Localización de la desembocadura del río Guadiaro.

del río Guadiaro. Este estudio se antoja imprescindible para conocer el origen y desarrollo de la dinámica natural de la flecha de arena. Esto permitirá seleccionar la técnica disponible más óptima para evitar el cierre de la bocana del río, así como mejorar su eficiencia temporal y económica.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estuario del río Guadiaro se encuentra situado en el sur de la Península Ibérica, transcurriendo próximo a la zona limítrofe entre las provincias de Cádiz y Málaga. Se ubica en el término municipal de San Roque, siendo éste uno de los más caudalosos ríos de la Cuenca Hidrográfica del Sur. Cuenta con la peculiaridad de que en el tramo final de su recorrido, forma un estuario mareal que abarca el Paraje Natural más pequeño de Andalucía (27 Ha), declarado como tal por la Ley 2/1989 de 18 de julio. En sus inmediaciones se encuentra el puerto deportivo y el campo de golf de Sotogrande y urbanizaciones mayoritariamente de segunda residencia (figura 1). En gran parte de su recorrido, prácticamente sin regular (Caballero et al., 2007), la mayor parte del volumen de agua circula bajo superficie y permite que el río fluya durante todo el año, aunque los aportes de la cuenca se producen durante una parte reducida del año y con un marcado carácter torrencial.

Tal y como se puede apreciar en la figura 2, a lo largo de las últimas cinco décadas la desembocadura del río Guadiaro ha ido modificando su morfología según avanzaba el transporte sedimentario hacia el noreste. A partir del año 1946 se puede observar el estuario con la desembocadura abierta al mar Mediterráneo y la formación de un delta bien desarrollado junto con depósitos sedimentarios e inlets a lo largo del estuario. Es a partir de 1956 cuando parece que el transporte neto sedimentario construye una flecha que posiblemente provoca el cambio de dirección de la desembocadura hacia el norte. Para el caso de un canal formado sobre una flecha, O'Brien (1969) deduce empíricamente la relación existente entre el prisma de marea y la sección estable de la bocana, para los casos de desembocaduras con y sin diques de

encauzamiento. La acción integrada de las corrientes de marea y del oleaje sobre la bocana, motivan su migración.

Parece entonces formarse una contraflecha que no llega a cerrar completamente la desembocadura, probablemente debido al caudal del río y a las corrientes de marea. Durante esa década, tiene lugar la inundación de la llanura, formándose un lago que ya presenta poca renovación de aguas entre el río y el mar. A partir de 1973 cabe destacar la construcción de dos espigones a ambos lados de la desembocadura con el fin de regularla. También las primeras viviendas y carreteras al sur del antiguo delta, suprimiendo así los campos dunares de la zona. La desaparición del espigón sur de la desembocadura y el mantenimiento del espigón de la zona norte, parece que comienza a establecer la morfodinámica actual de la desembocadura. A partir de esa fecha en 1986, al norte de la desembocadura, se aprecia la construcción de más urbanizaciones por encima de campos dunares, y un puerto deportivo, sobre la playa de Torreguadiaro. Las dos décadas siguientes vienen marcadas por el desarrollo urbanístico hacia el interior y la apreciable pérdida de arena que sufren las playas de Guadalquítón y Torreguadiaro. Temporalmente, durante el año 2005 la flecha cerró la desembocadura del río en su totalidad, y tornó a abrirse meses después, mostrando así la variabilidad morfológica de la misma.

Periódicamente, en función del cierre de la bocana y solicitadas por la Consejería de Medio Ambiente y otros Organismos Públicos, se están realizando extracciones de áridos sobre la misma. Mediante maquinaria están siendo transportados a la playa sur de Guadalquítón. Estos by-pass de arena han sido llevados a cabo por la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente.

En la figura 3, se ofrecen varias fotografías de la bocana en distintas situaciones del año 2005, observándose la gran movilidad morfológica de la zona de la flecha de arena.

El carácter del viento incidente en la zona del río Guadiaro, debido a su localización geográfica, está determinado principalmente por la dinámica atmosférica reinante en el Estrecho de Gibraltar. Esta zona se caracteriza por ser una de las zonas con mayores vientos (en intensidad y duración) de toda España (Caballero et al., 2007).

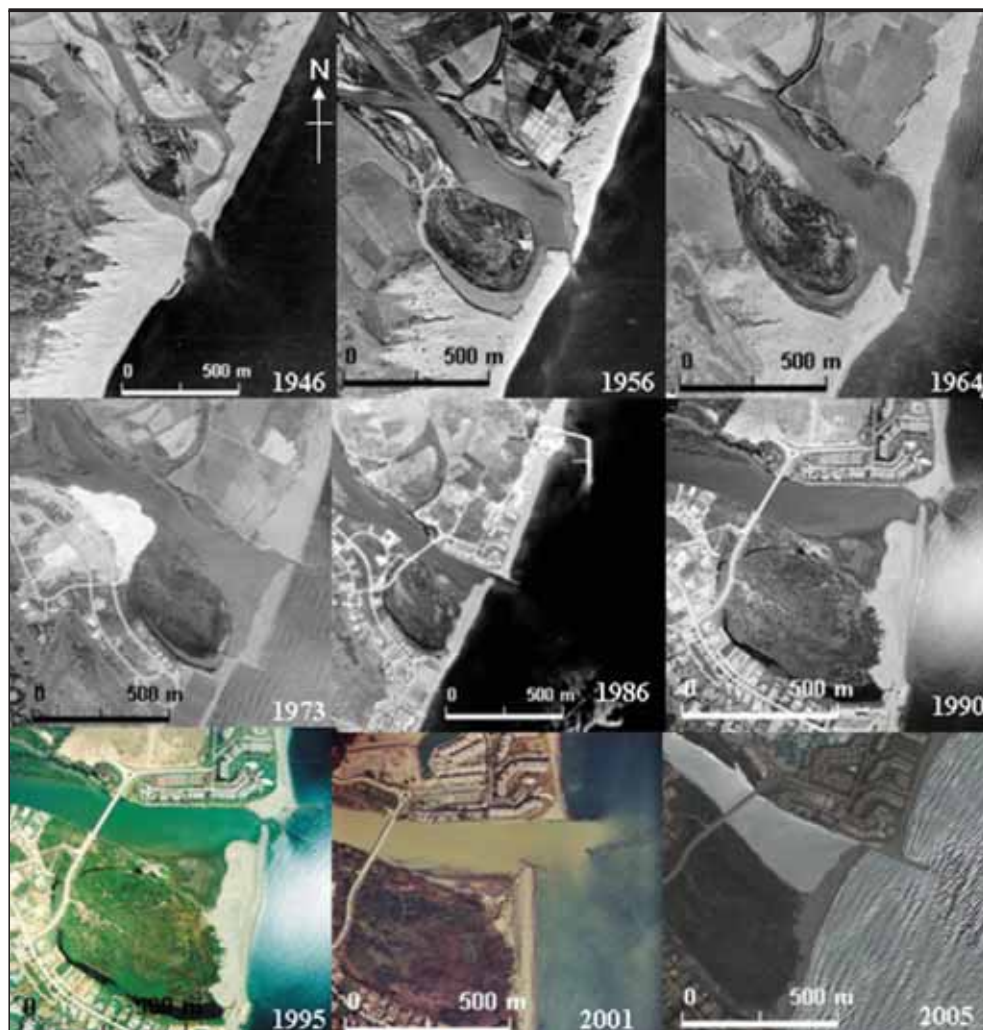


FIGURA 2. Evolución morfológica de la desembocadura del río Guadiaro (1946-2005).



FIGURA 3. Fotografías de la bocana en distintas situaciones durante el año 2005.



FIGURA 4. Representación de los perfiles longitudinal y transversales en la flecha.

3. METODOLOGÍA

3.1. TOMA DE DATOS

Se llevaron a cabo varias tomas de datos en la zona del estuario. Dentro de una amplia campaña se realizaron medidas hidrodinámicas (marea, corrientes, salinidad y temperatura) y medidas topo-batimétricas de la desembocadura del canal. Estos últimos datos son los que se tratarán en el presente artículo. Asimismo, se realizó una recopilación y análisis de bibliografía e información referente al área de estudio: evolución histórica de la zona costera (fotografías aéreas), datos de Clima Marítimo (viento y dirección), aportes en la desembocadura, batimetrías de la zona (general y detalle), épocas de dragado de arena, datos sedimentológicos y granulométricos del entorno del río Guadiaro, etc.

La toma de datos se desarrolló durante 5 meses aproximadamente (desde marzo a agosto de 2005), donde se realizaron 7 levantamientos topográficos. Se hizo coincidente con la época seca de escasa pluviometría, causa directa de que el caudal fluvial sea casi inexistente y exista una mayor probabilidad de cierre de la bocana y de eutrofización de sus aguas.

Para la toma de datos topográficos se ha utilizado un equipo compuesto por una estación total y un prisma. Los trabajos han consistido en realizar una serie de perfiles transversales y un perfil longitudinal de la flecha y de parte de la playa de Guadalquítón (figura 4), hasta la profundidad de -0,5 metros referida sobre el nivel más bajo de marea. Estos perfiles tienen una gran importancia ya que con ellos se podrá conocer de forma más precisa el desplazamiento de la duna (Navarro et al., 2007).

3.2. LAS FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES

Se realizó un estudio mediante levantamientos topográficos, y su correspondiente análisis espacio-temporal detallado de la variación de la flecha de arena y sus playas adyacentes. Para el caso del cierre de la bocana del río Guadiaro, se ha conseguido aplicar el método de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF), con el fin de conocer la progresión de la flecha.

De acuerdo con Pruszek, Z. (1993), el Análisis de las 3 Componentes Principales (3PCA) o método de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF), se presenta como un fiable método de aproximación estadística que permite estudiar las evoluciones del perfil de playa y duna, así como otras irregularidades morfodinámicas del sistema. El método de las EOF ha sido ampliamente utilizado en geomorfología litoral, desde que Winant et al. (1975) y Aubrey (1979) definieron cambios morfológicos en perfiles de playa. Muñoz-Pérez y Medina (2000) y Muñoz-Pérez et al., (2001a) estudiaron, respectivamente, el comportamiento de los cambios en los perfiles transversales de playa debido a un ciclo mareal quincenal y la evolución de los perfiles longitudinales de playa. Además, Losada et al. (1991) y Medina et al. (1993) aplicaron esta técnica al estudio del transporte sedimentario transversal, mientras que Larson et al. (1999) investigaron comportamientos asociados a diferente escala espacio-temporal.

Por medio de este análisis se pueden analizar fiablemente las variaciones morfológicas en el perfil de la duna a estudiar, así como su variabilidad espacio-temporal. A su vez la representación de autofunciones es el mejor método en el sentido de ajuste de la variabilidad de los datos por mínimos cuadrados. El objetivo de este método es caracterizar los cambios acontecidos en el perfil con el mínimo número posible de autofunciones. Las funciones ortogonales se ordenan según su contribución a la varianza de los datos (definida como Valor Cuadrático Medio) seleccionándose aquellas que expliquen el mayor porcentaje de la variabilidad de los datos, es decir, cuya contribución a la varianza sea máxima (Muñoz-Pérez et al., 2001b). De este modo, es posible representar un elevado porcentaje de la varianza de los datos con un número muy reducido de funciones.

Estas funciones ortogonales se asemejan bastante al conocido análisis de Fourier, con la diferencia de que en el análisis de Fourier la variación es sinusoidal por definición, mientras que en el caso de las funciones ortogonales su forma viene dada por la estructura de los propios datos. Como las autofunciones son independientes entre sí, cada una de ellas explica un fenómeno físico distinto. La primera autofunción se asocia a valores medios, como el perfil de

equilibrio, mientras que la segunda suele estar ligada a variaciones estacionales. El uso de perfiles reconstruidos a partir de esas componentes, posibilita realizar una evidente interpretación física de cada una de ellas.

Para interpretar acertadamente los resultados expresados por las tres componentes, se requiere un conocimiento matemático especializado de las EOF. Con la finalidad de que el lector pueda dilucidar de una forma más clara e intuitiva las autofunciones, se ha procedido a la reconstrucción de los perfiles transversal y longitudinal. Para ello, se ha considerado la contribución de cada una de las componentes de forma independiente. Es importante tener en cuenta que la reconstrucción de los perfiles no proporciona una informa-

ción extra, sino que sólo facilita la explicación de los resultados. Por otra parte, cuando cada una de las campañas es reconstruida individualmente, es posible diferenciar distintos rasgos en todos los procesos. De esta manera y de forma directa, se pueden identificar las tasas de erosión/acreción para cada componente durante cualquier campaña, asociados a los diferentes fenómenos físicos que las ocasionan.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante todo el periodo del estudio se analizaron datos de viento y oleaje. Los valores de tales parámetros se han obtenido principalmente de la base de datos facilitada por Puer-

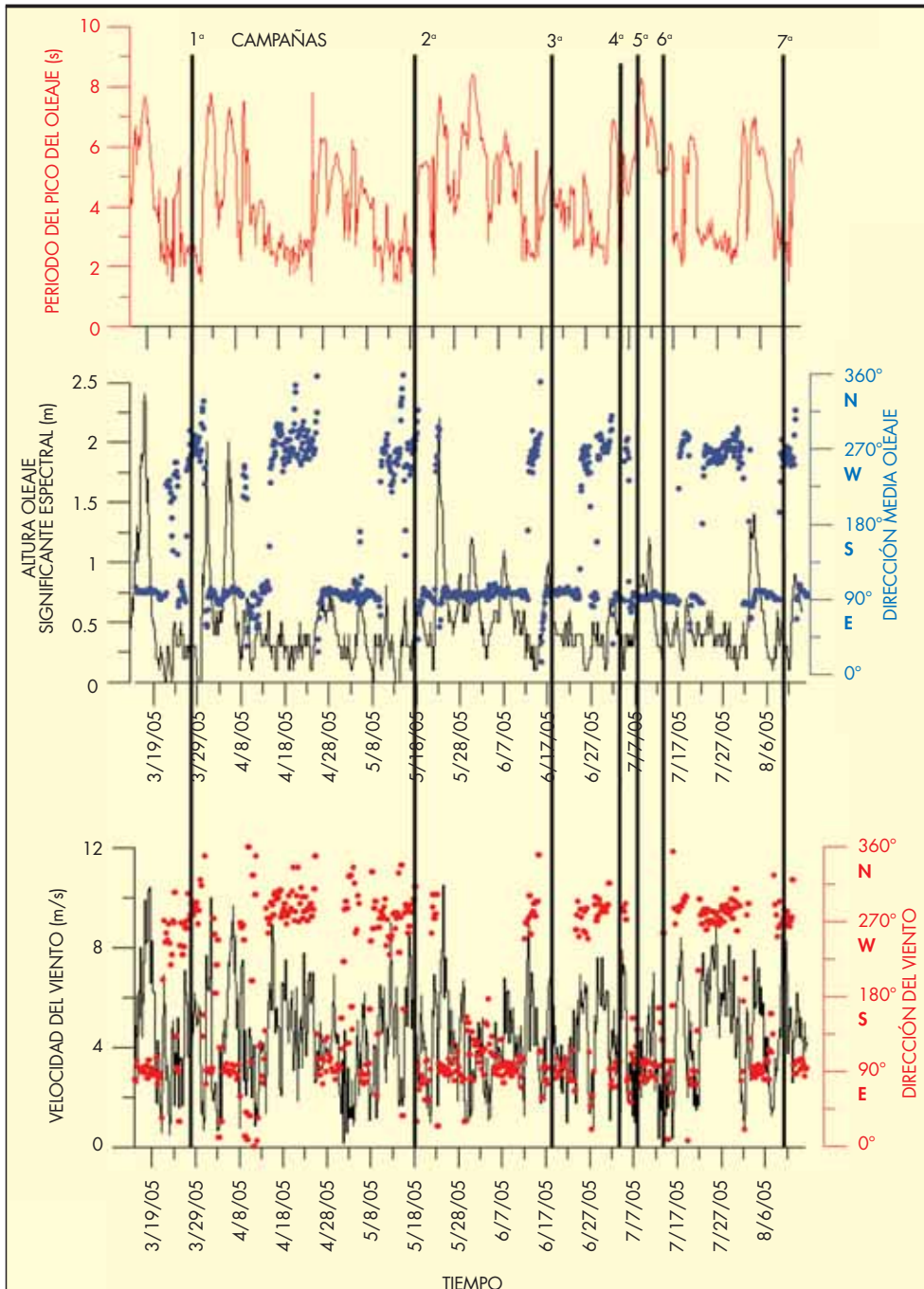


FIGURA 5. Representación de datos tomados de viento y oleaje.

tos del Estado. La descripción de los mismos, así como su elaboración hasta obtener un régimen direccional, se describen en la figura 5.

En esta zona existen principalmente dos tipos de vientos, los de Levante y los de Poniente. Los oleajes principales provienen del Este, siendo éstos los de mayor frecuencia de presentación y los que generan mayor altura de ola. Con menor frecuencia que los anteriores, se produjeron oleajes del sector Oeste. El resto de direcciones apenas presentan oleajes incidentes, presentando un porcentaje de presentación medio al 2%. Los oleajes del SE, SO y SSO como también los del S, tienen un porcentaje mínimo de presentación. Aún así, por su ángulo de incidencia son los que más pueden influir en la orilla. Los vientos predominantes corresponden al primer y tercer cuadrante, siendo los vientos de ENE los que más incidencia presentan. Se observa una gran similitud entre las frecuencias de los vientos de levante y de poniente, mientras que los vientos del N y S apenas presentan episodios del 2%.

Con las siete campañas llevadas a cabo, se ha realizado el estudio por medio de las EOF de dos perfiles concretos. En primer lugar se examinó el perfil longitudinal, con el fin de analizar qué factores son los que provocan el cierre o la apertura del río. En segundo lugar, se estudiaron todos los perfiles transversales mostrados en la figura 4. Debido a la limitación de espacio, se ha seleccionado un perfil transversal tipo correspondiente al P.K.0+200. De este modo, se trata de conocer cuáles son los procesos que hacen que la duna se desplace hacia el mar o hacia el estuario. Este perfil transversal se ha elegido lo suficientemente alejado de la desembocadura del río como para eliminar las condiciones laterales de avance-retroceso de la flecha.

4.1. ESTUDIO DEL PERFIL LONGITUDINAL

Aplicando las EOF se obtuvo una primera componente que representa el perfil medio que tiene el perfil longitudinal, presentando una contribución muy alta en la explicación del total de la varianza de los datos (88.58%). Tanto la segunda como la tercera componente quedan muy reducidas respecto de la primera (10,49% y 0,45% respectivamente). Debido a este gran peso de la primera componente, se hace necesario restarle a priori la media de los datos con el fin de observar de manera aislada qué sucede con la segunda y tercera componente. De esta manera, se puede estudiar la evolución de la duna a lo largo del tiempo. El estudio aislado de la segunda y tercera componente será el que nos indique las diferencias en la morfología del perfil a lo largo del tiempo (figura 6). En este caso, la segunda componente es la que explica casi la totalidad de la variación con un 91,05%, mientras que la tercera componente explica un 4,56% sobre el resto de la varianza de los datos.

Cabe destacar que el P.K. 0+000 metros coincide con la parte sur de la flecha, la más alejada de la bocana, mientras que el P.K. 0+400 metros es el lugar por donde el río desemboca al mar.

Analizando con precisión la segunda componente longitudinal, se puede apreciar como efectivamente durante la primera y segunda campaña, el perfil se mantiene casi inalterable en los primeros 220 metros. Es a partir de entonces donde comienza la flecha, por lo que su longitud variable es de sólo 180 metros. De forma general, durante estas dos primeras campañas de los meses de marzo y mayo, se da erosión en el resto del perfil longitudinal. Este periodo de erosión coincide con temporales de vientos alternos de levante y poniente de más de 12 m/s, y oleajes de levante con alturas superiores a los 2 metros y periodos de pico superiores a los

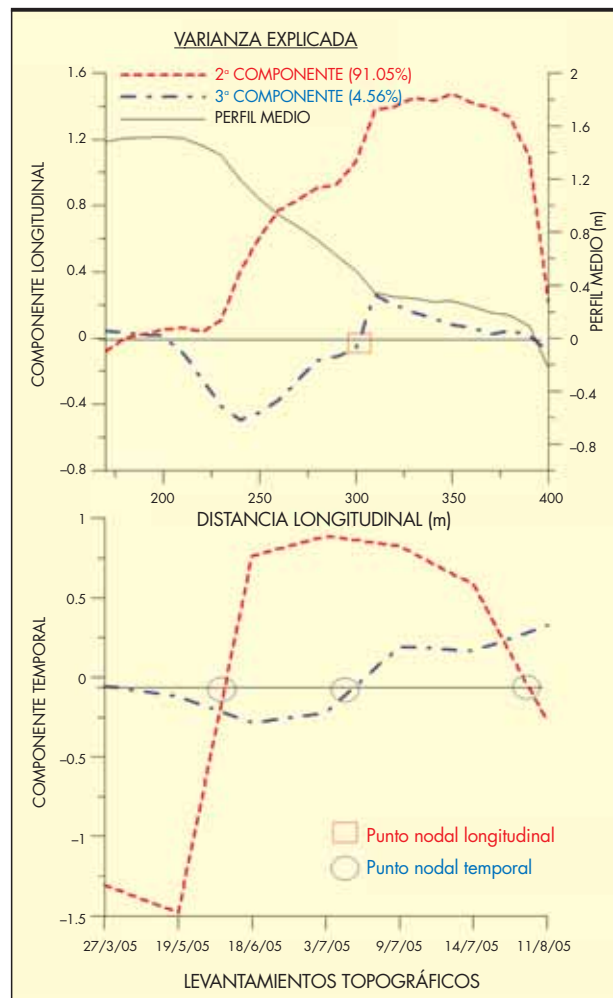


FIGURA 6. Representación aislada de la 2ª y 3ª Componente Longitudinal, una vez restada la media a los datos originales.

7 segundos. Entre la segunda y tercera campaña (mes de junio) sucede un cambio de tendencia (punto nodal), con una acreción fuerte en dirección a la bocana, manteniéndose hasta la sexta (mes de julio), provocando el cierre permanente. Este hecho se puede ver favorecido por la sucesión de periodos de calma tras los temporales de levante, con una altura media de oleaje inferior a 0,5 metros. En este periodo de calma relativa, únicamente se ha reflejado el 20 de mayo, con un pico de altura de ola superior a los 2 metros y vientos de hasta 10 m/s, ambos de levante. Este temporal aislado y su posible erosión no ha sido reflejada en los resultados, debido a que le han precedido periodos de calma, durante el mes que se tardó en la siguiente toma de datos. Antes de la última campaña sufre una ligera erosión en la desembocadura debido posiblemente a un temporal con oleaje con alturas de hasta 2 metros y periodos de pico de 7 segundos.

La tercera componente muestra una tendencia cambiante, reflejando un punto claro de cambio de tendencia del perfil a través de un punto nodal longitudinal de no variabilidad situado en el P.K. 0+300. También se refleja un punto nodal temporal entre la cuarta y quinta campaña que determinará el comportamiento erosivo o acumulativo. De este modo, a lo largo de las 4 primeras campañas se muestra una erosión casi inapreciable de la flecha en los primeros 200

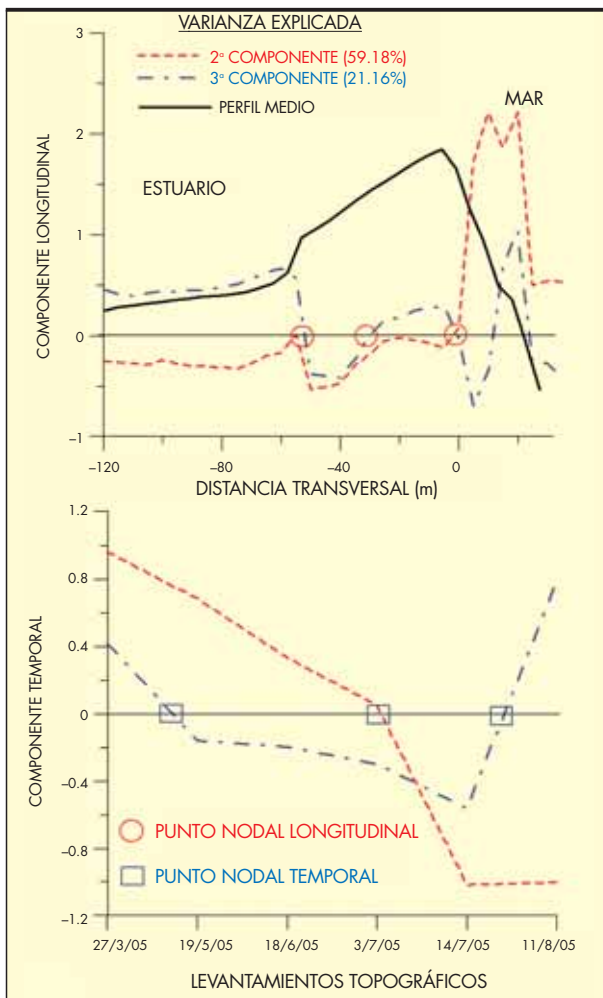


FIGURA 7. Representación aislada de la 2ª y 3ª Componente Transversal, una vez restada la media a los datos originales.

metros, acreción hasta los 300 metros, y de nuevo, tras el punto nodal longitudinal, erosión hasta el extremo de la flecha (P.K.0+400). Tras el punto nodal temporal, es decir a partir de la quinta campaña en adelante, acontece un cambio radical de tendencia del perfil, con erosión entre los 200 y 300 metros, y acumulación generalizada, tras el punto nodal longitudinal entre los 300 y 385 metros. Muy levemente se ve el cambio negativo erosivo del perfil longitudinal dibujado por la tercera componente en la parte extrema de la flecha (P.K.0+400), que provoca la apertura de la misma.

4.2. ESTUDIO DEL PERFIL TRANSVERSAL

En el caso del análisis del perfil transversal, únicamente hay seis levantamientos, ya que en uno de ellos, concretamente el 9/7/05, existieron problemas técnicos con los datos. Aunque se han calculado las tres componentes, únicamente se ha representado la contribución aislada de la segunda y tercera, tras restarle el peso de la primera (figura 7). También se ha dibujado el perfil transversal medio, donde el P.K. 0-120 está en la parte interior del estuario y el P.K. 0 coincide con el perfil longitudinal. Ambas componentes explican un 59,18% y 21,16% de la variabilidad restante de los datos.

La segunda componente del perfil transversal presenta

un punto nodal temporal en la cuarta campaña. Ello indica para las 3 primeras campañas, una erosión decreciente en el tiempo en la parte interna del perfil, junto al estuario. Asimismo, tras el punto nodal longitudinal situado en el P.K. 0, aparece una importante acreción durante estos primeros meses en la cara externa del perfil que da al mar. En las dos últimas campañas, la segunda componente ya es negativa, lo que indica una erosión puntual en esta zona expuesta al mar, debida a los temporales mencionados anteriormente. Este hecho podría haber permitido una ligera deposición en la cara interna del perfil, debido a que está a resguardo del oleaje y procesos erosivos marinos.

La tercera componente temporal del perfil transversal presenta dos puntos nodales temporales. De este modo, se vuelve negativa entre la segunda y la sexta campaña. Este hecho confirma que durante esas campañas el perfil ha sufrido erosión generalizada en la parte interna del perfil transversal. Sin embargo hacia la parte externa, se suceden las acreciones y erosiones. Concretamente, en la parte

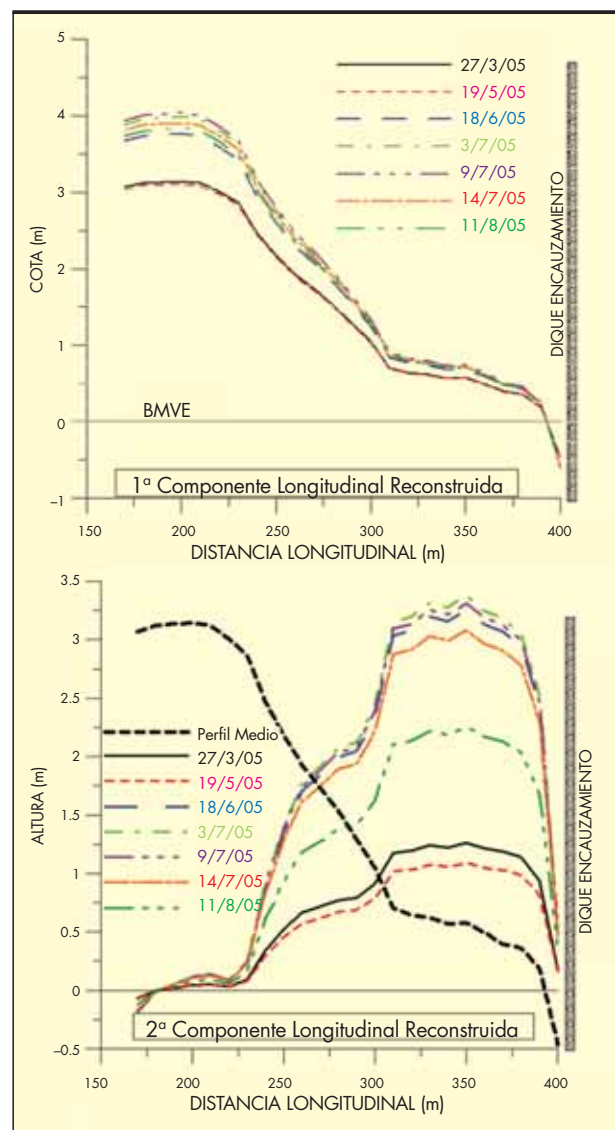


FIGURA 8. Representación de la 1ª y 2ª Componente Longitudinal Reconstruida.

Levantamientos	ACRECIÓN (+) / EROSIÓN (-) (m ³ /ml-día)			
	1ª Componente Longitudinal	2ª Componente Longitudinal	1ª Componente Transversal	2ª Componente Transversal
27/03/2005				
	-0.08	-0.39	-0.07	-0.02
19/05/2005				
	2.52	8.92	0.12	-0.48
18/06/2005				
	1.72	1.01	-0.96	-0.08
03/07/2005				
	0.99	-1.30	-	-
09/07/2005				
	-3.01	-5.73	0.13	0.01
14/07/2005				
	-0.32	-3.66	-0.01	-0.20
11/08/2005				
MEDIA	0.30	-0.19	-0.16	-0.15
ACUMULADO	1.82	-1.15	-0.79	-0.77

TABLA 1. Diferencias tomadas a lo largo de los levantamientos topográficos en m³/ml-día.

externa del perfil, la más expuesta al oleaje, se muestra una erosión en la zona de rotura y una ligera acreción mar adentro (-0,5 m de profundidad). Cabe destacar que al igual que en la primera campaña, en la séptima, la tercera componente indica una acreción general en la parte interna del perfil y en la cresta, presentando alternancias erosiva y acumulativa en el frente de playa. Estos episodios corroboran la hipótesis de que la zona de la bocana del río es muy dinámica, pudiéndose cerrar en apenas un mes de periodo.

4.3. RECONSTRUCCIÓN DE PERFILES

A partir de las tres componentes longitudinales y transversales anteriores, se ha procedido a la reconstrucción de los perfiles mediante dos componentes. Se muestran así de forma mucho más claras e intuitivas las variaciones morfológicas de los perfiles longitudinales y transversales a lo largo del tiempo.

La primera componente longitudinal reconstruida coincide con el perfil medio y muestra una serie de perfiles (figura 8), que varía especialmente de unos a otros en la zona junto a la playa de Guadalquitón. Los cambios volumétricos reseñables se dan desde el P.K. 0 hasta el P.K. 0+200, llegando hasta valores diarios máximos de erosión de -3,01 m³/ml (durante la acción de temporales de viento y oleaje de Levante). Los cambios acumulativos en esta zona alcanzan valores máximos diarios de hasta 2,52 m³/ml. Se registra una acreción vertical de hasta 0,6 metros entre la segunda y la tercera campaña, en apenas 1 mes (2 cm/día) y de 0,3 metros entre la tercera y la cuarta, en apenas 15 días (2 cm/día). No obstante, y según la primera componente, cerca de la bocana

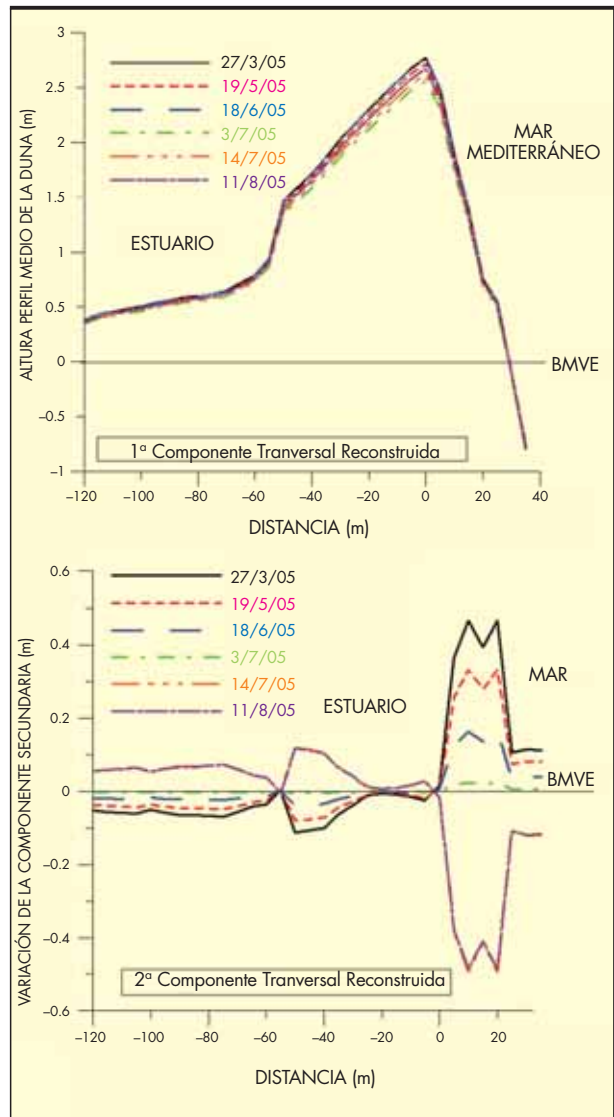


FIGURA 9. Representación de la 1ª y 2ª Componente Transversal Reconstruida.

van experimentando progresivamente unas variaciones volumétricas de menor magnitud. Estas variaciones de volumen se alternan con acreciones y erosiones a nivel general en toda la flecha.

Tras la reconstrucción de la segunda componente del perfil longitudinal, se obtiene que entre el primer y segundo levantamiento, y a partir del cuarto hasta el séptimo, se suceden erosiones de hasta -5,73 m³/ml. Entre el tercer y cuarto levantamiento se da la tendencia contraria, la de acreción, con valores máximos diarios de hasta 8,92 m³/ml (tabla 1). La zona activa de la flecha es de gran amplitud (concretamente los últimos 175 metros), y acumula gran cantidad de sedimento de manera muy dinámica. Según la segunda componente, las mayores diferencias volumétricas se suceden a 50 metros de la bocana (P.K. 0+350). Así, esta zona se presenta como el “almacén natural” de la arena que tapona la bocana, y que parece ser que se alimenta de la playa de Guadalquitón.

En el perfil transversal reconstruido (figura 9), las variaciones son proporcionalmente menores que en el perfil longi-

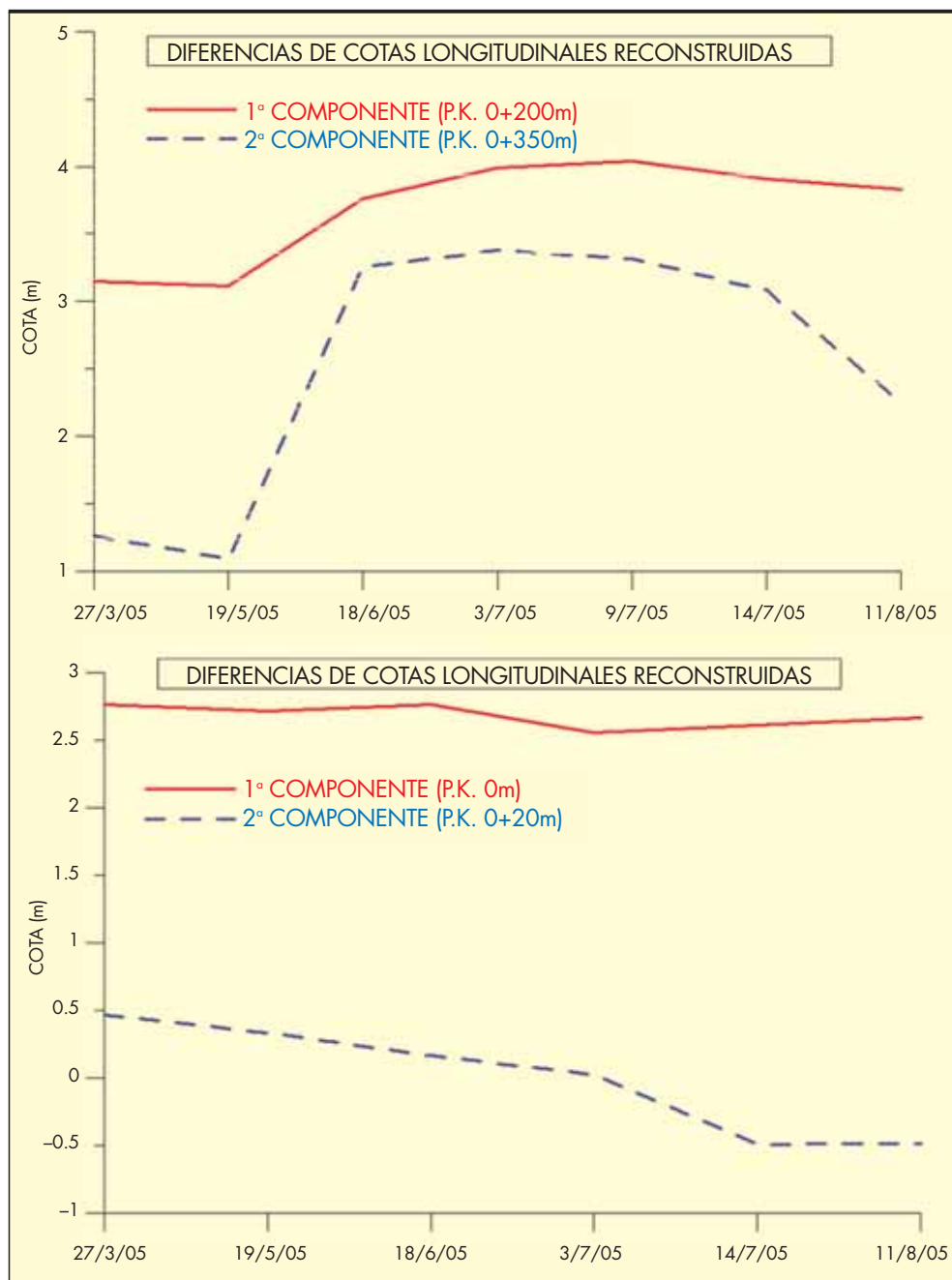


FIGURA 10. Incrementos de cota de los perfiles reconstruidos.

tudinal. Según la reconstrucción de la primera componente, existe una mayor variabilidad en la cresta de la flecha, donde hay diferencias del orden de hasta 0,3 metros. Como era de esperar, al igual que en el perfil longitudinal, se suceden episodios alternos de erosión y acreción. Durante las campañas, la máxima acreción en el perfil transversal es de $0,13 \text{ m}^3/\text{ml}\cdot\text{día}$, y una erosión máxima del orden de $-0,96 \text{ m}^3/\text{ml}\cdot\text{día}$. Por esta razón el balance volumétrico sale negativo en esta parte de la flecha, lo que indica que ha existido mayor erosión en el perfil transversal y acreción en el longitudinal en las mismas fechas. Este hecho puede ser debido a basculamientos naturales de los perfiles longitudinal y transversal de la playa.

Cabe destacar que en la reconstrucción de la segunda componente, existe un punto de inflexión en la cresta del perfil transversal. Desde la parte externa del perfil (P.K. 0+40) hasta dicho punto de inflexión (P.K. 0), el frente de la flecha expuesta al oleaje sufre erosión continua, mientras que en la parte interna del estuario, se dan procesos de acumulación de sedimento. Según lo expresado por la reconstrucción de esta componente, en esta zona es donde hay un mayor movimiento de arena.

Comparativamente, los resultados expuestos de los perfiles reconstruidos longitudinales y transversales, indican que las variaciones temporales en la vertical de la flecha son mucho mayores en el eje longitudinal (hasta de 170 cm.) que

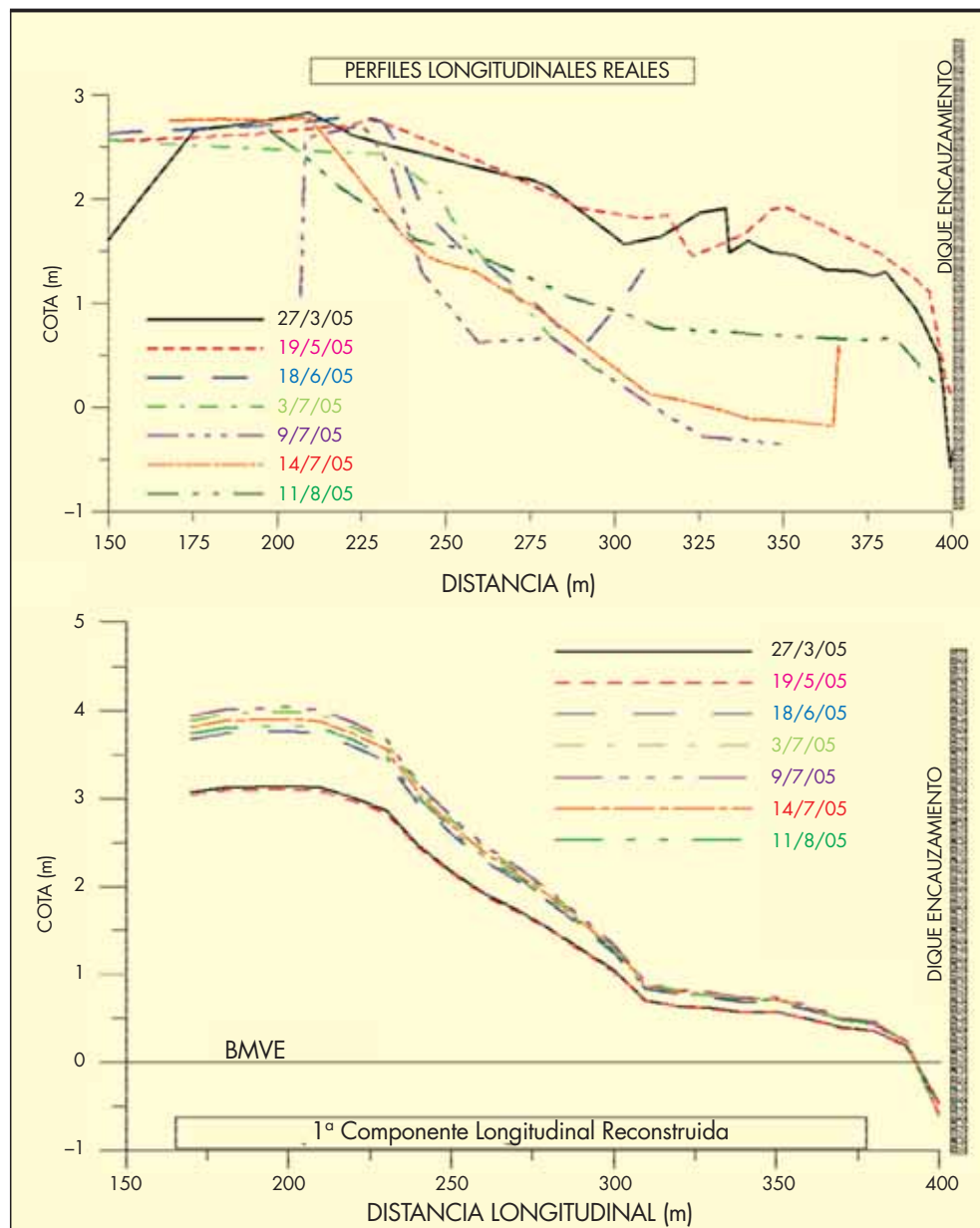


FIGURA 11. Comparación entre los perfiles longitudinales tomados y los reconstruidos.

en el transversal (hasta de 60 cm) en un orden del 300% (figura 10). Para poder dar una explicación de estas variaciones, hay que centrarse tanto en los datos de viento como en los datos de la altura significativa de oleaje. En el perfil transversal parece existir una relación inversamente proporcional entre la altura significativa de ola y la altura de la flecha. Estas alturas de oleaje tienen a su vez una relación directa con el viento predominante en cada momento. Los vientos de Poniente suelen tener una velocidad similar a los de levante, aunque son éstos últimos los que realmente provocan una mayor altura de ola y que por dirección, más afectan a la costa. Con estos vientos se observa que cuanto mayor es la velocidad, mayor es la altura de la ola y por tanto, menor la potencia de la flecha. Con oleajes de levante, la erosión de la flecha es mayor lejos de la bocana. Cerca de la misma, parece que la refracción del oleaje provocada por la presencia del espigón, supone una deposición del sedimento.

La representación gráfica de los perfiles topográficos mediante la reconstrucción, muestran una evidente evolución de los mismos y acepta la posibilidad de medir directamente acreciones y erosiones (figura 11).

5. CONCLUSIONES

Las funciones empíricas ortogonales, han demostrado ser una herramienta muy útil para estudiar la evolución temporal de los datos recogidos en perfiles longitudinales y transversales en la flecha del Río Guadiaro.

- Las variaciones volumétricas estudiadas en el perfil longitudinal son a mayor escala que en el perfil transversal. En el P.K. 0+200 se dan periodos diarios erosivos y acumulativos moderados: $-3 \text{ m}^3/\text{ml}$ y $+2,52 \text{ m}^3/\text{ml}$ respectivamente. En el P.K. 0+350 se suceden grandes diferencias volumétricas diarias de hasta $-5,73 \text{ m}^3/\text{ml}$ y $+8,92 \text{ m}^3/\text{ml}$.

- Los resultados expuestos de los perfiles mediante la aplicación del análisis de las componentes principales y su posterior reconstrucción en las 3 direcciones del espacio, indica que los movimientos de la flecha son mucho mayores en el eje longitudinal que en el transversal en un orden del 300%. Este es un comportamiento poco común en sistemas dunares, puesto que éstos avanzan transversalmente en sentido de la dirección del viento, es decir de barlovento a sotavento. En este caso particular, la flecha tiene una gran dependencia con el río y el mar, viéndose su distribución espacial muy condicionada por estos sistemas.
- El factor determinante de la dinámica marina y sedimentaria de la flecha es el oleaje. Los vientos de Levante por su dirección y constancia, son los que principalmente provocan variaciones en la altura del oleaje y por consiguiente, en la morfología de la flecha. Cuanto mayor es la velocidad del viento de levante, mayor es la altura de la ola y por tanto, menor es la potencia de la flecha.
- Los datos analizados tras la reconstrucción de las tres componentes principales, se expresan de una forma sencilla. Esta investigación es necesaria para conocer el origen y desarrollo de la dinámica natural de este tipo de flechas de arena, siendo posible adaptar el estudio a otras situaciones similares de cierre de ríos.

6. AGRADECIMIENTOS

Al personal de la Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico por su inestimable ayuda y atención en la recopilación de información.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aubrey, D.G. 1979. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. *Journal of Geophysical Research*.
- Caballero, I., Roque, D., Chapela, L., Tejedor, B., Gómez Pina, G., Muñoz-Pérez, J.J. 2007. Influencia del oleaje en las condiciones de cierre de la desembocadura del río Guadiaro (Cádiz). IX Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. 29-30 Mayo. Kursaal, San Sebastián.
- Hayes, M.O. 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: S.P. Leatherman, Editor, *Barrier Islands, from the Gulf of St. Laurence to the Gulf of Mexico*, Academic Press, N.Y. (1979), pp. 1-28.
- Larson, M., Hanson, H., Kraus, N.C., Newe, J. 1999. Short-and long-term responses of beach fills determined by EOF analysis. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.
- Losada, M.A., Medina, R., Vidal, C., Roldan, A., 1991. Historical evolution and morphological analysis of 'El Puntal' spit, Santander (Spain). *Journal of Coastal Research*.
- Medina, R., Vidal, C., Losada, M.A., Roldan, A.J. 1993. Three-mode principal component analysis of bathymetric data, applied to 'Playa de Castilla' (Huelva, Spain). *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*.
- Muñoz-Pérez, J.J., y Medina, R. 2000. "Profile changes due to a fortnightly tidal cycle". *Int. Conf. on Coastal Engineering (ASCE)*, Sidney, 3063-3075.
- Muñoz-Pérez, J.J., de la Casa, A., Gómez Pina, G., Acha A. 2000. "Environmental Restoration of the Guadiaro River Estuary, Cádiz, Spain". *Periodicum Biol. Vol. 102, Supplement 1*.
- Muñoz-Pérez, J.J., Medina, R. and Tejedor, B. 2001 (a). "Determination of longshore variations by EOF method in Victoria Beach (SW Spain)". *Scientia Marina*, 65(4), 393-402.
- Muñoz-Pérez, J.J., Tejedor, L., Medina, R. 2001 (b). Las funciones empíricas ortogonales y los cambios en el perfil de playa a corto, medio y largo plazo. *Física de la Tierra*, 13, 139-166.
- Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román Sierra, J., Tejedor, B., Rodríguez, I., Gómez Pina, G. 2007. Morphological evolution in the migrating dune of Valdevaqueros (SW Spain) during an eleven-year period. *International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*. October 3-5, Santander, Spain.
- O'Brien, M.P. 1969. Dynamics of tidal inlets. *Mem. Simp. Int. Lagunas Costeras. UNAM-UNESCO*, 28-30 November 1967, México, DF, pp. 346-397.
- Pruszek, Z. 1993. The analysis of beach profile changes using Dean's method and empirical orthogonal functions. *Coastal Engineering*, 19, 245-261.
- Winant, C.D., Inman, D.L., Nordstrom, C.E. 1975. Description of seasonal beach changes using Empirical Eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*.