

Erosión de la Barra del Trabucador durante la tormenta de octubre de 1990 (*)

Por JOSE A. JIMENEZ, AGUSTIN SANCHEZ-ARCILLA, MARC A. GARCIA

Laboratorio de Ingeniería Marítima. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña

JAN VAN OVEREEM, HANK STEETZEL

Delft Hydraulics Laboratory

Durante la primera quincena de octubre de 1990 se presentó en la costa catalana un temporal de gran magnitud. La acción del temporal sobre la costa del Delta del Ebro produjo la rotura de la Barra del Trabucador, movilizandando aproximadamente 70.000 m³ de sedimento. La mayor parte de este material fue depositado en la Bahía de los Alfacs por overtopping de la Barra, mientras que el sedimento restante fue transportado en dirección offshore mediante los mecanismos típicos de erosión del perfil bajo la acción de temporales.

I. INTRODUCCION.

Durante la primera quincena de octubre de 1.990 se presentó en la costa catalana un temporal de gran magnitud, donde coexistían olas de gran altura con un importante ascenso del nivel medio del mar. La combinación de ambos efectos actuando sobre la costa produjo una erosión importante en el Delta del Ebro.

Las manifestaciones más destacadas de esta erosión se localizaron en la Barra del Trabucador, (donde se produjo una rotura, formándose un canal de unos 800 metros de longitud y un calado máximo de 0.50 m.) y en la Illa de Buda, (donde la tormenta ocasionó una gran recesión de la línea de orilla, abriendo la boca de la antigua desembocadura a la altura de la granja de cigalas existente).

En este artículo se describe y caracteriza el temporal incidente así como sus efectos sobre la Barra del Trabucador, identificando los mecanismos de erosión que han actuado, junto con los de recuperación de la costa tras el paso de la tormenta.

II. DESCRIPCION Y EVOLUCION RECIENTE DE LA BARRA DEL TRABUCADOR

La Barra del Trabucador es una franja estrecha que une el cuerpo principal del Delta del Ebro

con la Península de los Alfacs (figura 1). Esta franja posee una longitud aproximada de unos 6.000 metros y una anchura muy variable a lo largo del tiempo, con valores máximos del orden de 200 metros y mínimos en torno a los 100 metros. La orientación media de la línea de orilla es de unos 40 grados respecto al Norte, medidos en sentido horario.

La baja cota que presenta, así como su anchura, convierten a esta zona en un tramo cos-

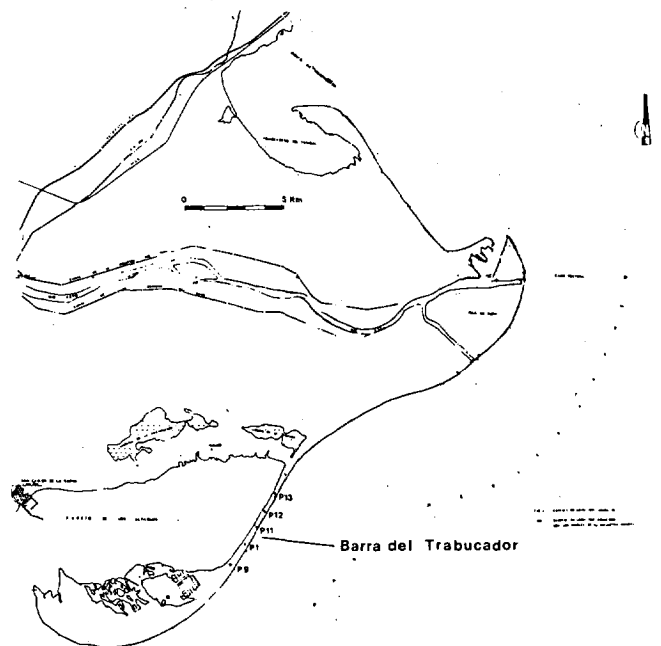


Figura 1. Delta del Ebro

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1991.

tero sumamente frágil ante el ataque del oleaje y con un alto riesgo de ser erosionado ante temporales de gran intensidad.

En el marco de un estudio realizado por encargo de la Generalitat de Catalunya sobre la estabilidad del Delta del Ebro, se ha caracterizado el comportamiento reciente de la Barra del Trabucador a partir de los resultados obtenidos en una serie de campañas batimétricas realizadas entre abril de 1.988 y junio de 1.989 (Sánchez-Arcilla et al., 1.990). Estos resultados son una especificación para el tramo en cuestión del balance sedimentario evaluado para el conjunto de la costa del Delta del Ebro durante ese intervalo de tiempo (Jiménez et al., 1.990).

Los parámetros elegidos para esta caracterización son: la altura de coronación y anchura de la Barra y el volumen de sedimento en playa emergida. Estos parámetros se han evaluado en 5 perfiles de control situados en la Barra (P9, P10, P11, P12 y P13), los cuales han sido objeto de seguimiento en 5 campañas de topografía/batimetría (04/88, 07/88, 11/88, 03/89 y 06/89).

Las variaciones de la anchura de la Barra a lo largo del tiempo para cada uno de los perfiles pueden ser observadas en la figura 2. Es importante destacar que el perfil más regresivo a lo largo del período de seguimiento ha sido el perfil 11, (factor de disminución de anchura de 0.13/año (Ancho actual/Ancho inicial), obtenido mediante regresión lineal efectuada sobre el conjunto de datos disponibles). Esta tendencia en principio sólo es válida para el período de seguimiento,

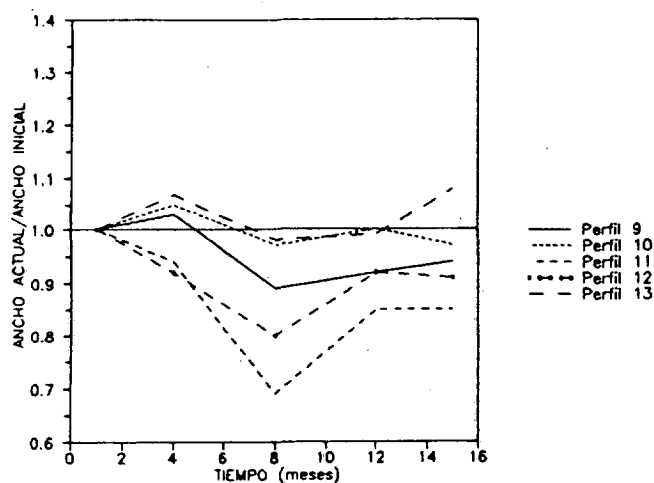


Figura 2. Variación del ancho de la Barra con el tiempo durante el período 04/88-06/89. (Después de Sánchez-Arcilla et al).

pero sirve para dar una idea del comportamiento por tramos de la Barra.

En la figura 3 se presentan las variaciones en el volumen de playa emergida por metro de línea de orilla en función del tiempo para cada uno de los perfiles. Este parámetro nos da una idea del índice de erosionabilidad de la Barra por parte del oleaje, ya que una disminución del mismo indica la cantidad de material desmontado de la playa emergida y susceptible de ser depositado en la playa sumergida. Ello supone asumir, de acuerdo con los datos existentes un débil gradiente de transporte longitudinal a lo largo de la Barra. Al igual que ocurre con la variación en la anchura de la Barra, el sector más desfavorable es el representado por el perfil 11, el cual presenta un índice de variación de 0.24/año (Volumen actual/Volumen inicial), obtenido asimismo por regresión lineal.

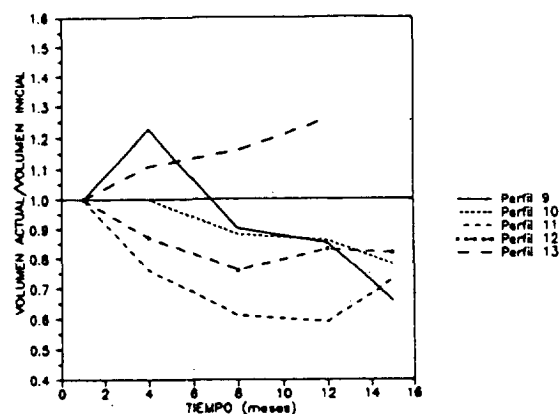


Figura 3. Variación del volumen de playa seca de la Barra con el tiempo durante el período 04/88-06/89. (Después de Sánchez-Arcilla et al).

Con este pequeño análisis realizado sobre los parámetros que definen la morfología y la variabilidad de la playa emergida de la Barra del Trabucador, se pueden identificar los tramos más sensibles de la misma a la acción del oleaje. El sector representado por el perfil 11, situado aproximadamente en la parte central de la Barra, es el que presenta una mayor tendencia erosiva a lo largo del año de estudio y es potencialmente el que tiene mayor probabilidad de sufrir el colapso en caso de presentarse un temporal de gran intensidad, como en el caso que nos ocupa.

III. CARACTERISTICAS DE LA TORMENTA DEL 8-11/10/90.

El lunes 8 de octubre de 1990 se presentó en la costa del Delta del Ebro una tormenta de unos tres días de duración, alcanzando sus momentos más críticos los días 8 y 10.

En este apartado se analizan algunos de los parámetros que describen el temporal: *oleaje* y *nivel del mar*.

Oleaje.

Las características del oleaje durante la tormenta fueron registradas por una boya direccional de la Direcció General de Ports i Costes (Generalitat de Catalunya) fondeada a la altura de Cap Tortosa.

Si caracterizamos el temporal a partir de la energía del oleaje incidente, se pueden identificar dos picos los días 8 y 10 donde la altura de ola significativa en aguas profundas alcanzó los 4.43 m. y 3.50 m. respectivamente. Estos dos picos se encuentran separados por un período —el día 9 en su totalidad— donde la altura descendió por debajo de los 2 metros (ver figura 4).

Los períodos de pico de la función de densidad espectral se encuentran en el rango de los períodos altos para las características normales del oleaje incidente en la costa del Delta del Ebro. Así, el rango de períodos registrados durante la tormenta se sitúa entre 7 y 10 seg. (fig. 5).

La dirección de aproximación del oleaje en aguas profundas asociada al pico del espectro de energía estuvo comprendida entre los 70 y 100

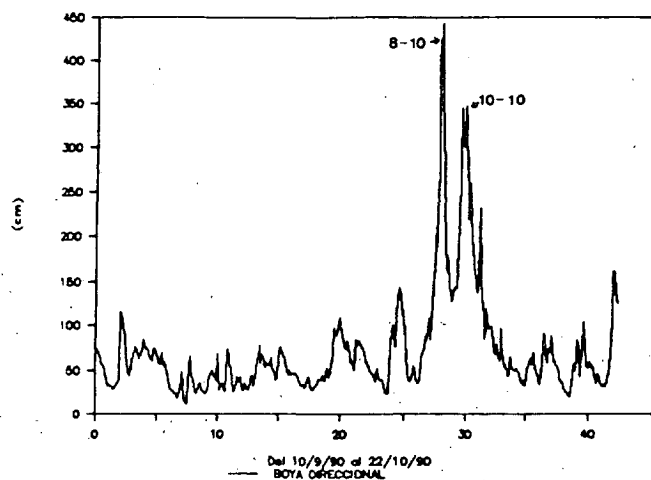


Figura 4. Altura de ola significativa offshore a la altura de Cap Tortosa.

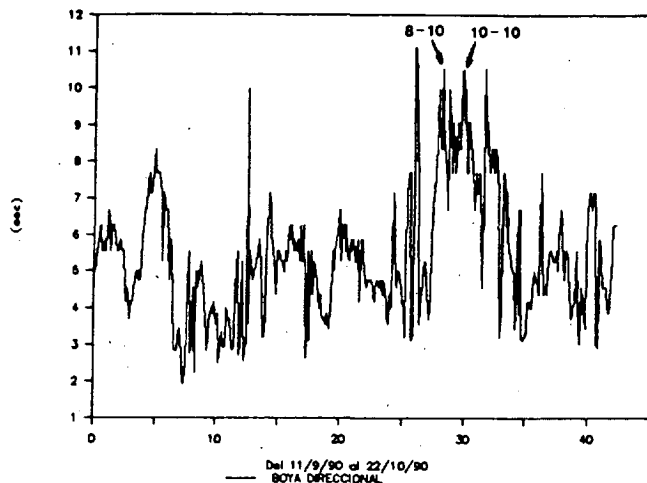


Figura 5. Período de pico del espectro.

grados, es decir, entre las direcciones ENE y E en todo momento, con poca dispersión direccional.

Para evaluar las modificaciones que sufrió el oleaje durante su propagación hacia la costa se simuló la propagación utilizando un modelo numérico de refracción (REFRAC) desarrollado por el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la U.P.C. Según los resultados obtenidos, la zona donde se alcanza mayor altura de ola (mayor coeficiente de refracción) a lo largo de la Barra del Trabucador es el entorno del perfil 11, que es la zona que sufrió el colapso.

Nivel del mar.

Durante la época de presentación de la tormenta el nivel del mar experimentó un ascenso adicional debido a causas meteorológicas. Así, el nivel del mar permaneció elevado —respecto a su nivel habitual— desde el día 8 de octubre hasta finales de este mes.

En la figura 6 se presenta de forma gráfica un

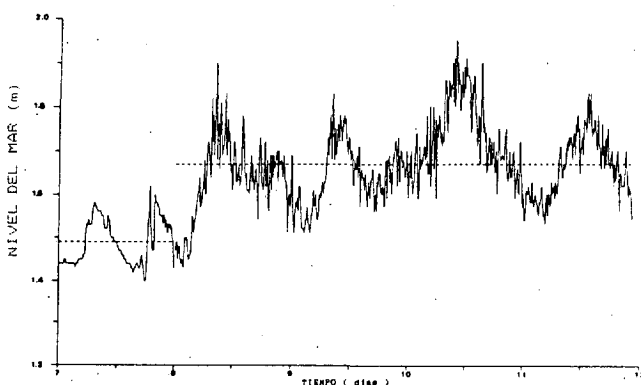


Figura 6. Registros de nivel del mar en L'Atmella desde 7/10/90-11/10/90.

registro de los niveles del mar durante la tormenta. Estos datos han sido registrados por un mareógrafo en el puerto de L'Ametlla de Mar. En el registro se observa el ascenso del nivel respecto a los días previos (día 7), donde el nivel medio del mar era el habitual. Este ascenso es del mismo orden de magnitud del rango de marea habitual.

IV. RESPUESTA DE LA BARRA DEL TRABUCADOR. MECANISMOS DE EROSION Y RECUPERACION DE MATERIAL SEDIMENTARIO.

Durante la duración del temporal antes descrito, la costa del Delta del Ebro se vió sometida a la acción de un oleaje de gran capacidad energética acompañado de un ascenso del nivel del mar —**storm surge**— originado por causas meteorológicas.

Este ascenso del nivel del mar tuvo como consecuencia inmediata la inundación de zonas de playa generalmente emergidas, permitiendo al oleaje actuar sobre tramos costeros por lo general protegidos de la acción del mismo.

A este ascenso del nivel del mar por causas meteorológicas se añadió el ascenso originado por el oleaje al propagarse hacia la costa a través de la zona de rompientes —**wave set up**—, el cual hizo aumentar todavía más el dominio de acción de las olas sobre la playa.

El resultado de esta combinación fué la transformación de la Barra del Trabucador en una playa expuesta casi en su totalidad a la acción del oleaje.

La consecuencia inmediata fue la actuación de un oleaje muy energético sobre la cara expuesta de la Barra a una cota superior a la habitual y el rebase cuasi-permanente de la misma —**overtopping**— (figura 7). (Este rebase puede producirse varias veces al año, aunque con menor intensidad, y origina la aparición de numerosos canales de desagüe a lo largo de la Barra que desalojan el agua en dirección a la Bahía de Los Alfacs y transportan pequeñas cantidades de sedimento).

La acción de la tormenta antes descrita sobre la Barra del Trabucador originó en la misma una erosión de gran magnitud (aproximadamente unos 70.000 m³ en la playa emergida), produciendo una discontinuidad en la parte central de

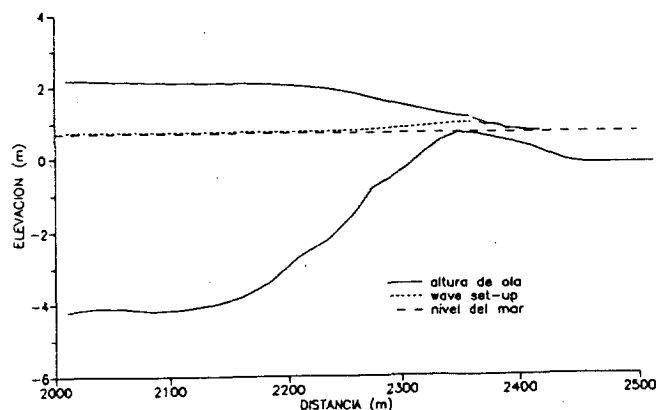


Figura 7. Ataque del oleaje durante la tormenta en el trabucador.

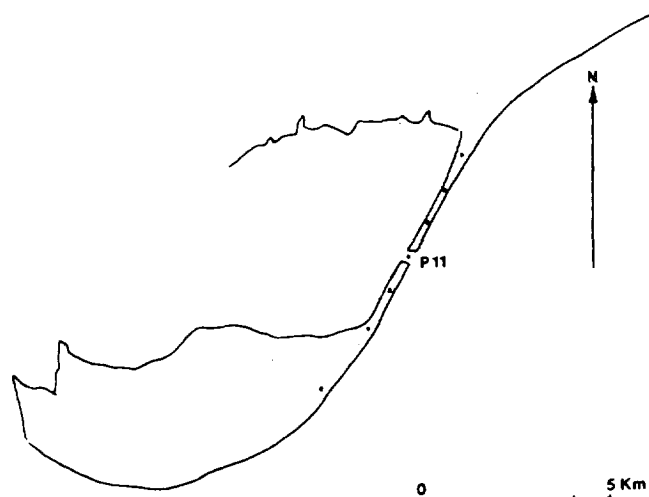


Figura 8. Localización de la abertura en la Barra del trabucador.

la Barra de aproximadamente unos 800 metros de longitud (figura 8). Esta magnitud ha sido evaluada a partir de un levantamiento topográfico de la abertura después de la tormenta, y de la topografía del perfil 11 tomada en marzo del 90, considerando que ésta es representativa de la totalidad de la abertura.

El episodio erosivo resultante de la acción del oleaje puede ser esquematizado en dos fases simultáneas aunque regidas por mecanismos diferentes:

- *erosión en la cara expuesta de la Barra*, producida por la acción directa del oleaje sobre la misma, que originó un *transporte de sedimento en dirección offshore*, con el correspondiente depósito en playa sumergida. Esta es la típica

erosión que sufren los perfiles de playa bajo la acción de un oleaje muy energético.

- *erosión en la parte superior de la Barra (cresta) y en la parte del perfil abierta a la Bahía*, producida por overtopping. Al originarse un rebase bajo unas condiciones como las descritas, se produjo una corriente asociada a la sobre elevación diferencial dirigida hacia la bahía, con una magnitud tal que fue capaz de erosionar la Barra, y de *transportar el sedimento hacia el interior de la Bahía* donde fue depositado en la plataforma somera existente, en forma de barra sumergida a lo largo de toda la brecha abierta (figura 9). Si se hace una estimación de dicha velocidad utilizando la ley de velocidad de Chézy para los momentos más críticos (mayor sobre elevación), se obtiene una velocidad máxima del orden de 1.5 m/s.

El problema radica en poder cuantificar las cantidades de sedimento transportadas en ambas direcciones: offshore y hacia el interior de la bahía. Para poder tener una estimación, se realizó una simulación de la evolución de un perfil típico de la Barra del Trabucador (perfil 11) bajo la acción de la tormenta con un modelo numérico de evolución de perfil (COMOTC. Desarrollado por Delft Hydraulics). De esta manera, se puede estimar la erosión potencial que sufrirá el perfil por ataque directo del oleaje y el correspondiente depósito de material offshore. El resto de material que queda tras la simu-

lación será el erosionado por overtopping. Así, según las primeras estimaciones, del total del material erosionado en el perfil, aproximadamente el 28% se ha depositado offshore, y el resto, un 72% se ha depositado en el interior de la bahía. Este porcentaje, aplicado al total de material erosionado estimado, corresponde a unos 50.000 m³ de sedimento depositados en el interior de la bahía.

La situación final de la Barra tras la tormenta se resume en una ruptura de aproximadamente 800 metros de longitud, con una profundidad máxima de unos 0.40 - 0.50 metros respecto al nivel medio. Estas profundidades máximas se alcanzaban en dos 'canales' situados en los extremos de la franja erosionada y separados por una zona más somera aunque también por debajo del nivel medio (figura 10). Todo ello equivale a *una gran pérdida de sedimento que ha sido redistribuido y depositado, tanto en la cara interna como externa de la Barra del Trabucador*.

Una vez finalizado el temporal disminuyó la altura y el período (y por tanto la energía) de las olas incidentes en la costa del Delta del Ebro, aunque el nivel del mar se mantuvo por encima del nivel medio habitual durante varios días.

Este descenso en la energía permitió la aparición de los procesos usuales de recuperación del material erosionado, y por tanto la autoregeneración parcial de la Barra. Esta se ha realizado mediante dos tipos de mecanismos simultáneos: **transporte longitudinal** y por **transporte transversal** (en dirección onshore) del sedimento.

La recuperación por transporte longitudinal es debida a la incidencia oblicua del oleaje sobre la costa, que origina una corriente litoral bien en

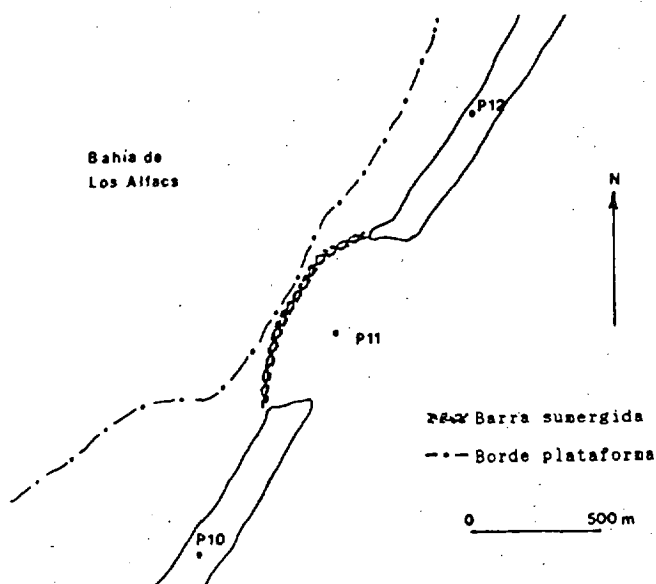


Figura 9. Barra sumergida formada durante la tormenta por arrastre de sedimentos hacia la bahía.

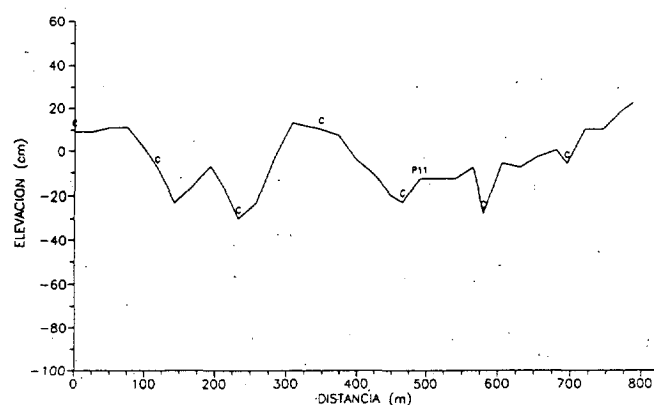


Figura 10. Perfil longitudinal de la brecha tomado el 16/10/90.

dirección NE, bien en dirección SW a lo largo de la Barra, dependiendo de la procedencia del oleaje. La acción de este mecanismo es visible mediante la aparición de pequeñas barras (flechas) en los extremos de la brecha que poco a poco la irían cerrando en ausencia de otros temporales y si existiese suficiente aporte sedimentario. Una recuperación mediante este tipo de transporte necesitaría para llevarse a cabo un ciclo anual completo debido a las tasas de transporte longitudinal estimadas para la zona. La acción de este tipo de transporte puede observarse en la evolución de la brecha tras el temporal: los primeros tramos que han ido recuperando material han sido los extremos de la misma y a la vez han aparecido pequeñas barras en ambos extremos de la abertura. Sin embargo, aunque este mecanismo es regenerativo, también tiene efectos perjudiciales. Así, al establecerse una dinámica longitudinal con una dirección predominante NE-SW, la corriente correspondiente, al no encontrar material disponible para ser transportado en la zona rota, irá erosionando el tramo sur de la Barra del Trabucador de forma continua, desplazando por tanto la brecha hacia el sur mientras ésta permanezca abierta.

La recuperación por transporte transversal, aunque es eficaz en la mayoría de ciclos erosión/acreción que se presentan en las playas, en este caso lo es sólo limitadamente por dos razones:

- En primer lugar, gran parte del material erosionado se ha acumulado en el interior de la Bahía, y no está disponible para ser transportado hacia la playa por el oleaje incidente. Este material depositado en el interior difícilmente podría ser transportado de modo natural hacia la Barra por el oleaje generado en el interior de la Bahía, ya que éste es de muy pequeña magnitud y en consecuencia, de muy baja capacidad portante. Este hecho limita de manera significativa la cantidad de material disponible para la acreción de la playa y su recuperación.

- En segundo lugar, hay que tener en cuenta que la cota de coronación de la Barra en el tramo erosionado se encuentra por debajo del nivel medio, y que además el nivel del mar inmediatamente después de la tormenta permanecía elevado. El oleaje, en estas condiciones, rompía a una profundidad determinada y al no encontrar una barrera física que lo detuviese seguía avanzando en forma de bore atravesando la abertura, pudiéndose reformar la ola y volver a romper,

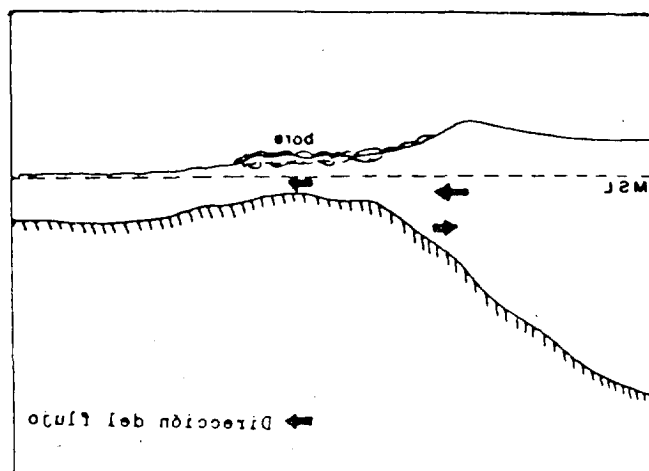


Figura 11. Rotura del oleaje sobre la brecha.

estableciendo de este modo un flujo hacia la bahía (figura 11).

Teniendo en cuenta estos dos factores, la dinámica transversal que se ha establecido hace que el material depositado offshore haya comenzado a ser transportado hacia la costa, intentando recuperar la forma del perfil inicial. Este hecho puede verse en la figura 12, donde se presenta un perfil transversal en los días posteriores al paso de la tormenta. En ella se observa la recuperación de la parte exterior de lo que antes era playa emergida. Este tipo de comportamiento puede ser identificado prácticamente a lo largo de toda la parte erosionada, donde han ido apareciendo zonas muy someras paralelas a la alineación de la barra en el lugar donde antes se encontraba la línea de orilla. El sedimento que no se deposita en esta parte exterior y que es transportado de forma continua hacia la brecha no es capaz de depositarse de forma efectiva. El flujo que se

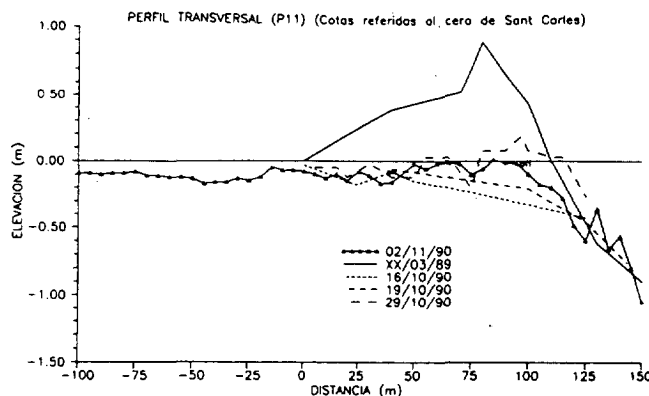


Figura 12. Evolución del perfil transversal tras la tormenta.

establece en dirección a la Bahía hace que este sedimento, al no encontrar una barrera que lo detenga, se pierda en el interior.

Una vez presentados los mecanismos de erosión y recuperación que han actuado y actúan en la Barra del Trabucador tras la tormenta del mes de octubre, cabe preguntarse cómo se comportaría la Barra a corto plazo durante el resto del invierno si no se interviniese 'artificialmente' (opción cero). Se plantean dos posibilidades:

(a). En el caso de *no presentación de ninguna tormenta* durante el invierno, los procesos regenerativos antes mencionados seguirían actuando de una forma continuada. El más eficiente de los dos sería el debido a la dinámica longitudinal, ya que hay más material disponible a ambos lados de la brecha que en la playa sumergida. El proceso natural esperado sería el crecimiento de sendas barras longitudinales en los extremos de la brecha que llegarían a soldarse. Como estado final tendríamos el relleno del canal y la soldadura de la Barra con una anchura inferior a la normal. En este estado, la zona se convertiría en un tramo muy sensible a procesos erosivos y potencialmente colapsable ante el ataque de las tormentas. En cualquier caso, este tipo de evolución es poco probable, ya que es de esperar que durante el invierno se presenten nuevos temporales.

(b). En el caso de *presentación de nuevas tormentas* la recuperación natural de la Barra se vería interrumpida. El ataque de la tormenta sobre las barras longitudinales que hubiesen crecido a ambos extremos de la brecha harían que el material acumulado en éstas migrase hacia el interior, perdiéndose en la bahía. Así, el canal quedaría abierto lo que aceleraría nuevamente los procesos erosivos aguas abajo de éste, y consolidaría la abertura, alterando la morfología actual de la costa y en consecuencia la dinámica sedimentaria de la zona.

Como puede verse, la *opción cero* presenta un *alto grado de riesgo* para la Barra del Trabucador y por extensión para la Península de Los Alfacs. Confiar en este tipo de regeneración natural es arriesgado cuando se está entrando en una época invernal donde es probable la presentación de nuevos temporales. Además hay que tener en cuenta la erosión potencial que podría sufrir el tramo situado aguas abajo de la abertura, es decir, la Península de Los Alfacs.

V. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

1. La conjunción durante el temporal del 8/10/90 - 10/10/90 de oleaje altamente energético (con altura de ola significativa máxima de 4.45 m., períodos de pico entre 7 y 10 s. y dirección predominantemente E) y un ascenso del nivel del mar del orden de 0.4 m. fué lo que originó la fuerte erosión sufrida por la costa del Delta del Ebro.

2. Este temporal produjo la rotura de la Barra del Trabucador en su tramo más sensible, originando una abertura de unos 800 m. de longitud y un calado máximo del orden de 0.4 m. respecto del nivel medio del mar, con una pérdida de material estimada de 70.000 m³.

3. La mayor parte de este material, aproximadamente el 70%, fue transportado hacia la bahía y el resto en dirección offshore. Este transporte hacia la bahía se produjo como consecuencia del rebase cuasi-permanente que se estableció durante la tormenta. El material fue depositado en la bahía en forma de barra sumergida sobre la plataforma somera existente a espaldas de la Barra.

4. La recuperación natural del material erosionado y depositado en la bahía es prácticamente imposible, ya que los factores hidrodinámicos actuantes dentro de la bahía no poseen la energía suficiente.

5. La recuperación del material depositado offshore mediante un transporte hacia la costa (una vez pasado el temporal) es ineficiente para la reconstrucción de la Barra. Ello es debido a que, al permanecer el canal abierto tras la tormenta, el sedimento que sea transportado hacia la costa atravesará la brecha al no encontrar una barrera física que se lo impida, perdiéndose en su interior.

6. La existencia continuada de la abertura generaría, a largo plazo, un gradiente negativo en el transporte longitudinal a lo largo de la Barra, lo que induciría la presentación de problemas de erosión aguas abajo de la abertura. A su vez, la abertura actuaría como sumidero de sedimento para el material transportado en dirección onshore.

7. La conclusión final de lo expuesto es que hay que restaurar la Barra del Trabucador actuando artificialmente sobre la costa. Esta acción debe hacerse en un período de tiempo corto, pues la presentación de nuevos temporales

durante el invierno es bastante probable, y los mismos agravarían el problema aquí presentado.

En este momento la abertura de la Barra del Trabucador ya ha sido cerrada por la empresa concesionaria de las Salinas de la Trinitat existente en la Península de Los Alfacs.

En un posterior artículo se presentarán las medidas a adoptar propuestas, así como el método de ejecución planteado. Asimismo, se comentarán los efectos de las obras realizadas actualmente sobre la solución propuesta.

VI. REFERENCIAS

JIMENEZ, J.A.; GARCIA, M.A. y SANCHEZ-ARCILLA, A. 1990: "Anàlisi i proposta de solucions per a estabilitzar el Delta de l'Ebre: Balance sedimentari", Informe tècnic LT-2/8, Direcció General de Ports i Costes.

SANCHEZ-ARCILLA, A.; JIMENEZ, J.A. y GARCIA, M.A. 1990: "El proyecto sobre la regresión del Delta del Ebro, Balance de dos años de actividad", O. P. 15, pp: 108-113.

VII. AGRADECIMIENTOS

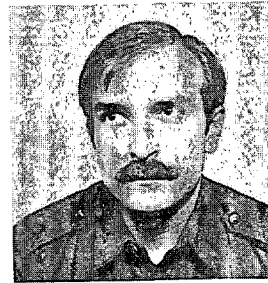
Se agradece de forma especial los comentarios realizados por el profesor Eco Bijker de la Universidad de Delft respecto al problema que nos ocupa. Sus opiniones y recomendaciones han sido muy útiles para la elaboración de este artículo.

Este trabajo ha sido financiado por el Departament de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat de Catalunya a través de la Direcció General de Ports i Costes, dentro de un estudio integral de la estabilidad de la costa del Delta del Ebro.

José A. Jiménez Quintana

Licenciado en Ciencias del Mar (Universidad de Las Palmas, 1987). Profesor Asociado Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Cataluña).

Agustín Sánchez-Arcilla Conejo



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1979). Catedrático y Director del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Cataluña).

Marc Antoni García López



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Cataluña, 1982). Doctor en Ciencias del Mar, Catedrático de la Escuela Universitaria (Universidad Politécnica de Cataluña).

Mr. Jan Van Overeem

Ingeniero Civil (Technical University of Delft). Head of the Coastal Morphology Section. Division of Harbours, Coasts and Offshore Technology Division of the Delft Hydraulics Laboratory (The Netherlands). Campos de actuación: Ingeniería de costas, morfología costera, transporte de sedimentos, regeneración de playas, etc.

Hank Steetzel

Ingeniero Civil (Technical University of Delft). Research Engineer en la Division of Harbours, Coats and Offshore Technology Division of the Delft Hydraulics Laboratory (The Netherlands). Campos de actuación: transporte de sedimentos, erosión de dunas, modelado numérico...
