

ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA ZONA COSTERA MEDIANTE EL ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

M. Díez¹, J. P. Sierra¹, J. M. Redondo², C. Mósso¹ y M. O. Bezerra²

RESUMEN: En este trabajo se presenta el desarrollo de la metodología necesaria para cuantificar parámetros hidrodinámicos mediante el tratamiento digital de imágenes de vídeo y su aplicación a los tests filmados en distintas campañas de campo desarrolladas en el Delta del Ebro. En dichas campañas se vertieron trazadores (manchas de leche con fluoresceína y boyas) de forma simultánea al registro de medidas hidrodinámicas. Además de los experimentos realizados, también se describe el postproceso de las imágenes, ya que éstas están sometidas a alteraciones, ruidos, deformaciones, etc., por lo que deben ser depuradas mediante un tratamiento específico (filtros, transformaciones, etc.) en cada caso. El estudio hidrodinámico se ha realizado a tres escalas: turbulencia, oleaje y corrientes. Los primeros resultados obtenidos son de mezcla turbulenta y corresponden a los coeficientes de dispersión longitudinal y transversal de manchas vertidas. Se analiza su evolución temporal y espacial y se compara con medidas hidrodinámicas. Después se estudia el oleaje en la zona de rompientes obteniéndose espectros calibrados con medidas directas y se examina su evolución al acercarse a la orilla. También se pueden obtener otros parámetros característicos como el ángulo de incidencia y la fracción de olas rotas. Por último se emplea el análisis de imágenes para estudiar corrientes mediante boyas. En uno de los tests se pudo identificar una corriente de retorno, bajo condiciones de baja energía, y cuantificar su velocidad y trayectoria.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los procesos costeros, especialmente la interacción entre oleaje, corrientes, turbulencia y morfología, necesita medidas detalladas de éstos fenómenos para entender la complejidad de la dinámica costera. Los aparatos basados en sensores dan medidas puntuales, por lo que para tener un control de la variación espacial serían necesarios muchos de ellos. Por el contrario, las imágenes permiten controlar simultáneamente y en todo el dominio cualquier parámetro con evidencias visibles. Así pues, a partir de los avances de la fotografía, muchos investigadores (por ejemplo Harris *et al.*, 1963; Sonu, 1969; Sasaki *et al.*, 1976; Horikawa *et al.*, 1978) empezaron a usar esta técnica para sus estudios hidromorfodinámicos. El desarrollo de las técnicas de vídeo, permitió un control temporal continuo de todo el dominio visual. Por otro lado, la evolución de los procesos de digitalización facilitó la cuantificación de los parámetros observados por medios exactos y eficientes (ver por ejemplo Holman y Sallenger, 1986; Hesslink, 1988; Holmann y Lippmann, 1987; Lippmann y Holman, 1991). Esto supone un gran avance para la técnica pues pone a disposición de la ciencia una herramienta sencilla, relativamente barata y con un gran potencial de medi-

da. La utilidad de esta metodología en estudios hidrodinámicos ha sido respaldada por los primeros resultados obtenidos en la medición de distintos parámetros; no obstante, se trata de un procedimiento novedoso y por ello es necesario ser cauteloso al interpretar sus resulta-

CAMPAÑAS REALIZADAS

La metodología necesaria para la adquisición de imágenes depende, en cada caso, de varios aspectos como:

- *Tipo de experimento:* de campo o de laboratorio.
- *Objetivos del experimento:* parámetros que se desean
- *Mecanismos de elevación:* estáticos u oscilatorios.
- *Campo visual:* cuanto mayor dominio mayor error, sobre todo si se emplea gran angular.
- *Puntos fiduciales para transformación de coordenadas:* deben estar uniformemente distribuidos por la
- *Sincronización temporal* con otras variables hidrodinámicas.
- *Selección del trazador más adecuado* por contraste y persistencia.

¹ Laboratorio Ingeniería Marítima, Departamento Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. ETSECCPB. Universitat Politècnica de Catalunya

² Laboratorio de Dinámica de Fluidos, Departamento de Física Aplicada. ETSECCPB. Universitat Politècnica de Catalunya

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.6 Num.3 (septiembre 1999), páginas 283-292, recibido el 7 de octubre de 1998 y aceptado para su publicación el 28 de junio de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

El Laboratorio de Ingeniería Marítima ha llevado a cabo distintas campañas de adquisición de datos hidrodinámicos y filmación de vídeo en la desembocadura del Delta del Ebro. Los experimentos se diseñaron principalmente para identificar y medir la estructura del flujo oscilatorio, el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes en la zona costera. Para lograr el detalle de estudio necesario, se trabajó a distintas escalas (macroturbulencia, olas de viento, ondas largas y corrientes) con instrumental de alta resolución. De todos los parámetros hidrodinámicos se seleccionaron los más importantes, y se diseñó un sistema integrado combinando equipos y compatibilizando sus características específicas. La sincronización de medidas permitió la correlación de los resultados obtenidos.

Para el estudio de las imágenes se decidió combinar técnicas que habían sido utilizadas anteriormente de forma separada como:

- El empleo de trazadores en campo (Crikmore, 1972; Zeidler, 1976; Maresca y Seibel, 1976; Sasaki *et al.* 1976; Wright *et al.*, 1986).
- La filmación de la zona de rompientes (Hotta y Mizuguchi, 1980; Kraus *et al.*, 1982).
- El análisis de las imágenes mediante digitalización (Lippmann y Holman, 1992; Walton, 1993; Ham y Maroski, 1993).

La primera campaña de campo fue Delta'93, llevada a cabo en diciembre de 1993 (Redondo *et al.* 1994). En ella se hicieron todas las pruebas necesarias para establecer la técnica de filmación, elección de trazadores, instante, lugar y volumen de vertido. Con los resultados de las imágenes se elaboró una metodología de trabajo dirigida especialmente a la cuantificación del coeficiente de dispersión. De todas las pruebas filmadas, sólo algunas reunieron las condiciones necesarias para poder ser analizadas y, en particular, solamente se determinaron los coeficientes de dispersión en dos de ellas.

Para validar la metodología desarrollada se repitió lo mismo en la campaña Delta'96, realizada en noviembre de 1996 (Rodríguez *et al.*, 1997). En ella se efectuaron numerosos tests, con más contraste y resolución espacial. En esta campaña, la grúa donde se colocaron las cámaras de vídeo era más alta, 40 m, y estaba situada más cerca de la orilla (ver *Figura 1*). Además se probó una nueva técnica de elevación de las cámaras, un globo aerostático de Helio de 4 m de diámetro suspendido sobre la zona de rompientes (ver *Figura 2*). El globo permite obtener imágenes cenitales, con lo que no se distorsiona la geometría aparente por la inclinación de la superficie libre al pasar olas, pero sufre una oscilación por viento que obliga a trabajar con imágenes instantáneas en las que la cámara abarque el mismo dominio. Dado el gran número de aplicaciones hidromorfo dinámicas que tiene el análisis digital de imágenes de vídeo y la posibilidad del tratamiento a partir de medios de elevación oscilatorios como el globo, se decidió adquirir imágenes en una campaña en la zona costera, Delta'97, grabando desde lo alto de un mástil



Figura 1. Grúa empleada en la campaña Delta '96

(ver *Figura 3*). En esta campaña, llevada a cabo en marzo y abril de 1997 (Diez, 1998), predominaron corrientes de gran velocidad que arrastraban las manchas de trazadores dejando una gran estela durante escasos minutos. Al no tener una geometría cuasi-elíptica no pudieron ser analizadas con la misma metodología que las de Delta'96 para obtener el coeficiente de dispersión.

De la experiencia obtenida mediante la utilización de los distintos mecanismos de elevación de las cámaras, se deducen las siguientes conclusiones:

- La grúa es más manejable, cómoda y sólida y da una imagen desde la playa que no oscila pero es oblicua.
- El globo permite registrar imágenes cenitales pero oscilatorias y es muy frágil y difícil de controlar, sobre todo con viento intenso.
- El mástil permite trabajar lejos de la orilla, mar adentro, pero también se trata de imágenes oscilatorias.

Metodología del análisis de imágenes

La metodología incluye una parte de campo y otra de laboratorio. La primera corresponde principalmente a los medios logísticos de adquisición de imágenes y la segunda al instrumental de digitalización y manipulación de las mismas.

Durante la adquisición de las imágenes es muy importante anotar, cada vez que se realiza un corte en la filmación, el tiempo real y el de la cinta o temporizador del vídeo, además de los tests registrados simultáneamente, condiciones atmosféricas e hidrodinámicas y las incidencias u observaciones que se crean oportunas. Esta información resulta de gran utilidad a la hora de interpretar los resultados.

Una vez registradas las imágenes se hacen copias de seguridad sobre las que se recomienda insertar una señal con un temporizador. Paralelamente es aconsejable elaborar un informe que describa el contenido de las cintas, experimentos, calidad, condiciones meteorológicas y todas las observaciones realizadas durante la filmación, para facilitar una búsqueda rápida o la elección de los tests a analizar.

Para obtener resultados cuantitativos, las imágenes han de digitalizarse en forma de matriz numérica. El equipo



Figura 2. Globo aerostático de Helio (4 mφ)

de digitalización empleado era controlado por un software *DigImage* (Dalziel, 1994), a través de una interfase controladora (modelo DT2861). Esta configuración permitió obtener imágenes digitalizadas con un rango de intensidad de 0 a 255, una resolución de 512 x 512 píxels y una frecuencia de 25 Hz. Además *DigImage* dispone de las aplicaciones de procesado más comunes en el estudio de flujos, tales como distintas formas de capturar, almacenar y exponer imágenes, manipulaciones para el diseño e impresión, calibraciones de intensidad, transformaciones de coordenadas (de píxel a coordenadas topográficas), filtros y técnicas de promediado (plumas), series temporales de una sección, estadística de la distribución de intensidades, seguimiento de partículas, etc. Sin embargo, *DigImage* carece de flexibilidad para el tratamiento de información puntual, a nivel de unos pocos píxels (por ejemplo filtrar ruido).

Con la finalidad de superar estas dificultades y agilizar la metodología de análisis visual se elaboró un programa Fortran llamado *TICE* (Bahia, 1997). Este fue concebido como una herramienta para el análisis del coeficiente de dispersión de unas determinadas ventanas de estudio y requería modificaciones cada vez que se cambiaba de ejemplo. *Kd* (Diez, 1998) es un programa basado en *TICE* de forma que permite un uso generalizado para distintas manchas e incorpora más aplicaciones. El programa recoge todas las manipulaciones, correcciones y análisis necesarios para el estudio de la dispersión de trazadores y los aplica de forma ordenada. Muchas de estas aplicaciones también las recoge *DigImage*, pero de forma aislada.

APLICACIÓN A FENÓMENOS HIDRODINÁMICOS

Las imágenes se postprocesan para analizar fenómenos hidrodinámicos, obteniéndose resultados a tres escalas diferenciadas: mezcla turbulenta, oleaje y corrientes. En cada caso, el estudio debe asociar la intensidad de luz de la imagen con un parámetro de estudio.



Figura 3. Extremo del mástil del velero

En el caso de mezcla turbulenta se asocia con la concentración de trazador vertido y analizando la evolución de la geometría e intensidad del vertido se obtienen los coeficientes anisótropos de mezcla turbulenta. En el caso de oleaje se asocia con la inclinación de la superficie libre y realizando una transformación de Fourier de la serie temporal de intensidades en un punto se obtienen espectros de energía. Por último, mediante el seguimiento espacial y temporal de boyas lastradas, se efectúa un estudio de cometas. A continuación se describen la metodología y resultados obtenidos.

Estudio de mezcla turbulenta

Para una distribución gaussiana de velocidades, de acuerdo con la analogía propuesta por Einstein (1927) entre el movimiento Browniano y la difusión turbulenta, se puede calcular el coeficiente de difusión, en una dirección, como:

$$K_H = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\sigma^2}{dt} \quad (1a)$$

Siendo σ^2 la varianza del diámetro de la mancha del trazador en esa dirección, que se calcula como:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_i \sum_j (X_{i,j} - \xi_x)^2 \cdot \frac{1}{\sum_i \sum_j I_{i,j} / N} \quad (1b)$$

donde ξ_x la posición del centro de masa, X_{ij} la coordenada horizontal del punto (i,j) y I_{ij} su intensidad.

Así, a partir del estudio de una serie de imágenes instantáneas, adecuadamente tratadas (ver Rodríguez *et al* (1997), se obtiene el coeficiente de dispersión.

Al ser obtenido por métodos indirectos, se trata de un coeficiente de dispersión aparente, pues no puede asignarse a las fluctuaciones turbulentas de velocidad puramente aleatorias ni a las del campo de concentraciones, pero es probablemente el resultado de la interacción de ambas.

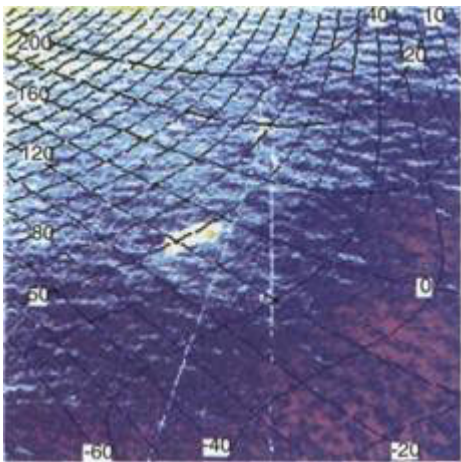


Figura 4. Imagen con una plantilla de coordenadas (X, Y) superpuesta

Para conseguir controlar la geometría de la mancha, debe efectuarse una transformación de coordenadas que a cada punto de la imagen (I, J) asigne una posición (X, Y), (ver Figura 4). En el análisis de las imágenes de las campañas mencionadas, se empleó una transformación bicuadrática de ocho coeficientes por eje:

$$\begin{aligned}
 X = & A1 + A2 * I + A3 * J + \\
 & + A4 * I * J + A5 * I^2 + A6 * J^2 + \\
 & + A7 * I^2 * J + A8 * I * J^2
 \end{aligned} \quad (2)$$

Además, hay que llevar a cabo algunas operaciones con el fin de depurar los efectos no deseados. Entre ellas destacan: filtrar ruido local como la espuma de la rotura, eliminar el fondo, promediar la oscilación producida por el paso de una ola, etc. La metodología empleada puede verse con mayor amplitud en Rodríguez *et al.* (1997).

Para estimar el efecto de la difusión turbulenta inducida por el oleaje se emplea el número de Reynolds de un flujo, R_w :

$$R_w = \frac{H \cdot V}{\nu} \quad (3)$$

donde H es la altura media cuadrática de ola incidente, n es la viscosidad cinemática del agua de mar y V es la velocidad orbital. H y V (ésta de forma indirecta) pueden cuantificarse mediante el vídeo.

En las Figuras 5 y 6 se representa la comparación de los resultados obtenidos por Zeidler (1976) con los registrados en varios experimentos con distintas características:

- Una playa longitudinalmente uniforme en el Delta del Ebro, la barra del Trabucador, donde se generaban corrientes por oleaje y viento.
- Una playa de 240 m confinada por dos diques en Vilanova i la Geltrú (Barcelona), donde sólo un fuerte oleaje puede producir comente longitudinal y entonces se forman dos o más celdas de circulación entre la rotura del oleaje (aunque éste no fue el caso de los experimentos).

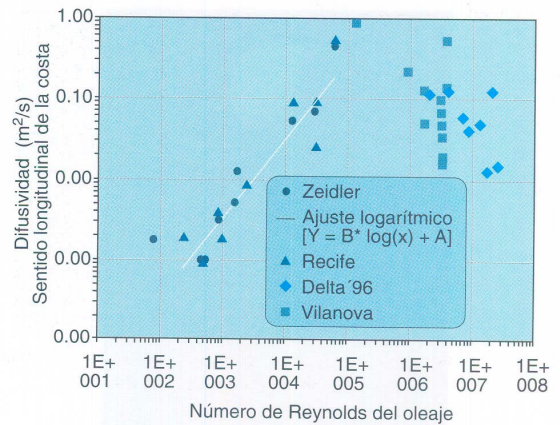


Figure 5. Coeficiente de difusión longitudinal respecto al número de Reynolds. Resultados de coeficientes de dispersión y turbulencia

- Una playa tras diques exentos en Olinda (cerca de Recife, Brasil), sometida a corrientes inducidas por marea y a un viento intenso.

Puede apreciarse que, en la mayoría de los casos, la difusión longitudinal es mayor que la transversal, y sólo en los casos en los que hay corrientes de retorno se produce

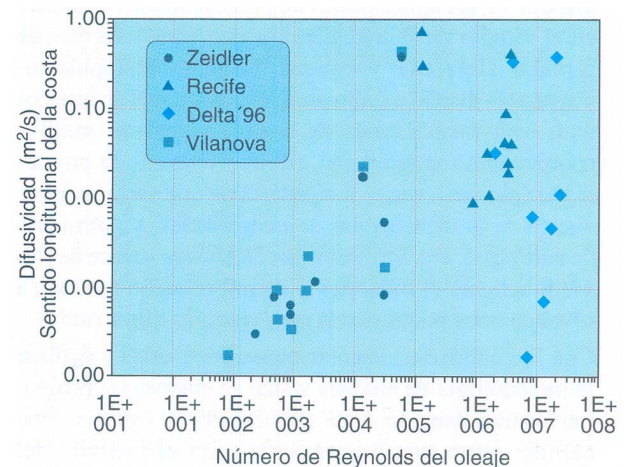


Figure 6. Coeficiente de difusión transversal respecto al número de Reynolds. Resultados de coeficientes de dispersión y turbulencia

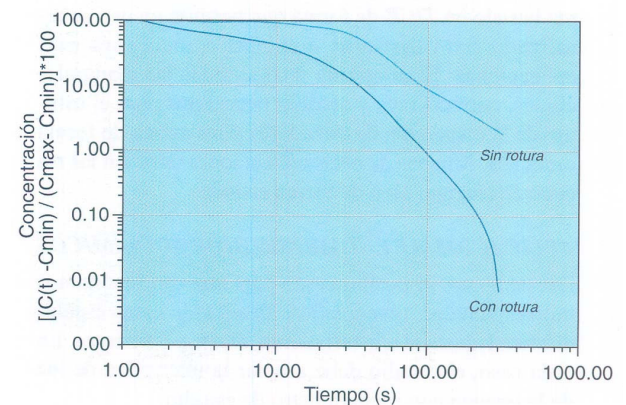


Figure 7. Comparación de la dispersión de contaminantes con y sin rotura en la zona previa a la barra

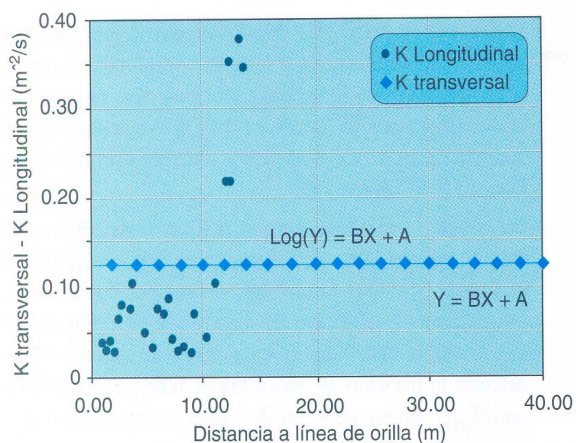


Figura 8. Evolución de los coeficientes de dispersión

el efecto contrario. Según Zeidler (1976) debe haber un crecimiento aproximadamente lineal para valores del número de Reynolds entre 10^3 y 10^6 . Sin embargo, los resultados obtenidos no confirman esta tendencia, ya que en los experimentos efectuados predominaban otros fenómenos como corrientes o viento. En particular, la presencia de corrientes producía un efecto de cizalla que tendía a alargar la mancha, lo que explicaría también la existencia de valores tan altos de R_w (del orden de 10^7).

La rotura del oleaje produce una turbulencia adicional a la generada por el oleaje y las corrientes, que aumenta la dispersión reduciendo su concentración hasta 10 veces, como se puede ver en la Figura 7.

El resultado de los test de Delta'96 muestra un comportamiento anisotrópico, ya que el coeficiente longitudinal es prácticamente constante mientras que el transversal muestra un crecimiento logarítmico (ver Figura 8).

También se ha analizado la correlación entre los coeficientes de dispersión y el tamaño inicial de la mancha y la localización del punto de vertido. Se ha comprobado que el coeficiente de dispersión aumenta en la zona donde hay mayor corriente longitudinal y que su relación con la distancia a la orilla del punto de vertido sigue una distribución parabólica (Figura 9), tal como proponen Thornton (1970) y Sasaki *et al.* (1976).

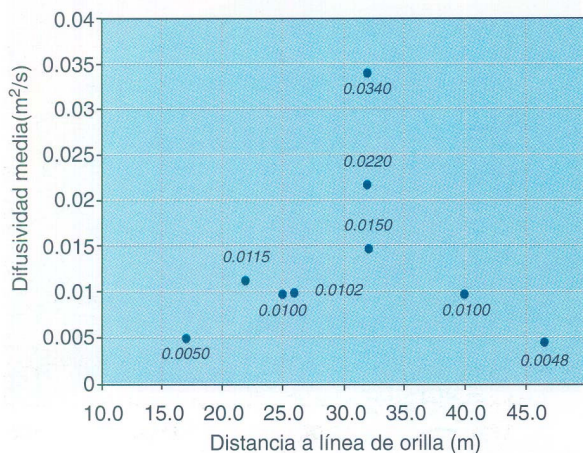


Figura 9. Correlación del coeficiente longitudinal y la distancia a la orilla en Delta '96

Estudio del oleaje

Mediante imágenes de vídeo de la zona de rompientes es posible estudiar distintas características del oleaje y la evolución que experimentan éstas a medida que se acercan a la orilla. Entre las características más destacadas figuran:

- *La dirección de las crestas.* A partir de unas imágenes de calidad (resolución y contraste) es fácil identificar las crestas del oleaje de tipo *sea* y *swell*. Con una función de transformación de coordenadas se puede controlar la evolución de la dirección del oleaje desde donde empiece a ser perceptible hasta la línea de orilla y en todo el ancho del dominio abarcado por el campo visual. Por lo tanto, además de controlar la propagación direccional del oleaje, un análisis de este tipo permite deducir información indirecta de la batimetría de la zona de rompientes por irregularidades longitudinales.
- *Dispersión frecuencial y espectros de energía.* La geometría característica del oleaje provoca que los rayos de luz se reflejen con una intensidad luminosa diferente en cada punto, de modo que en la cresta hay mayor intensidad pues hay más reflexión que en los senos. Este hecho permite establecer una relación entre intensidades y elevaciones de la superficie libre, que se determina por correlación con datos medidos directamente en el mismo punto con un sensor de superficie libre o de presión. En este caso, la calibración se ha realizado por interpolación lineal entre las alturas de ola medidas y las intensidades.

A partir de la digitalización de la serie temporal de una columna de píxeles correspondientes a una sección de la zona de rompientes, se pueden identificar las olas y sus características. Por ejemplo, la pendiente de las olas a lo largo de la serie temporal representa su velocidad de avance. A partir de una sección de la imagen de la Figura 10 se ha obtenido la serie temporal que se muestra en la Figura 11.

En ésta se puede observar que se producen «Y» de olas atrapadas por otras más rápidas debido a que tras la rotura se produce una dispersión frecuencial del oleaje.

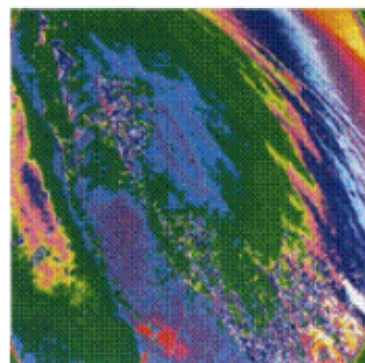


Figura 10. Imagen digitalizada de la playa

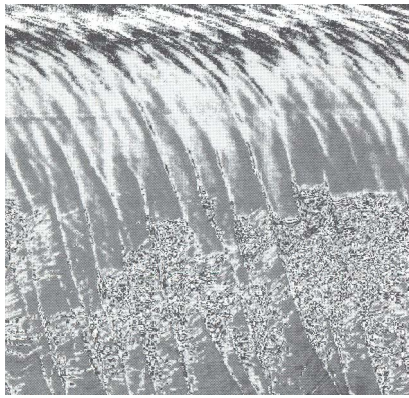


Figura 11. serie temporal de la sección anterior

Realizando una transformada de Fourier de los datos una vez calibrados, se obtiene su espectro de energía.

En la Figura 12 se han representado los espectros obtenidos a partir de series temporales de imágenes de vídeo (brutas y calibradas) y se compara con el obtenido por el sensor de altura de ola, ambos en la zona de rompientes. Puede apreciarse que los picos de los espectros tienen las mismas frecuencias. El nivel energético es similar, aunque no está distribuido de igual forma.

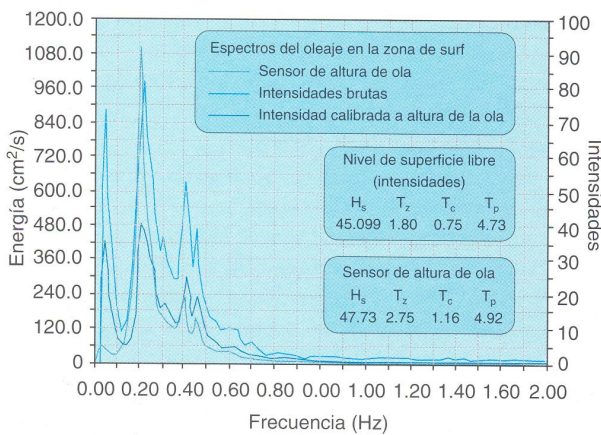


Figura 12. Espectros de intensidad

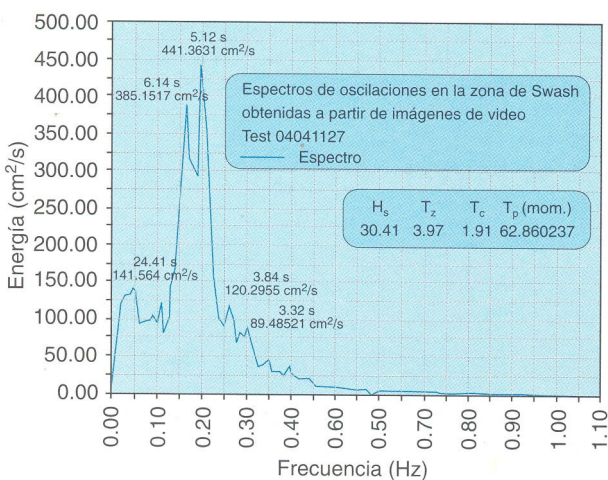


Figura 13. Espectro de la zona de swash

- *La línea de orilla.* Digitalizando las posiciones que toma la orilla en la serie temporal de una sección transversal fija y transformando las posiciones a cotas gracias a la batimetría es posible obtener el espectro de energía asociado al *setup+swash* haciendo una transformación de Fourier (ver Figura 13).

- *La rotura.* El oleaje al romper produce espuma, lo que supone un excelente trazador para el análisis digital de imágenes de vídeo. Realizando un promediado durante un número significativo de olas, unos 10 minutos, se puede ver la distribución espacial de la espuma. Para calcular la fracción de olas rotas se debe pasar un filtro on/off que asigna un valor de 1 para intensidades superiores a un umbral a partir del cual se determina que hay espuma y 0 para los valores inferiores, donde no hay espuma. Así pues, el valor de la intensidad promediada en cada punto es una medida relativa del tiempo con espuma. Ponderando por el periodo del oleaje y el tiempo de exposición se deduce la fracción de olas rotas.

Estudio de corrientes

Con imágenes de vídeo es posible cuantificar velocidades (desde un punto de vista lagrangiano) mediante trazadores como boyas. La gran resolución temporal y espacial de las técnicas de visualización de fluidos permite elaborar mapas de velocidades de zonas amplias de forma sencilla. La obtención de estos mapas tiene un gran interés, ya que su adquisición por medidas directas de correntímetros supone un gran despliegue de instrumental. Esta técnica tiene el inconveniente de que las boyas pueden ser arrastradas por el viento, por lo que para evitarlo deben estar lastradas, quedando parcialmente sumergidas.

En el análisis de uno de los tests efectuados en la campaña Delta'96 se pudo identificar una corriente de retorno y cuantificar su velocidad y trayectoria. En la Figura 14 se puede observar como las boyas, a pesar de ser arrojadas todas juntas, son transportadas, una tras otra, describiendo todas ellas una celda. Realizando el seguimiento de las posiciones adoptadas por las boyas en una serie de imágenes instantáneas se pudo cuantifi-

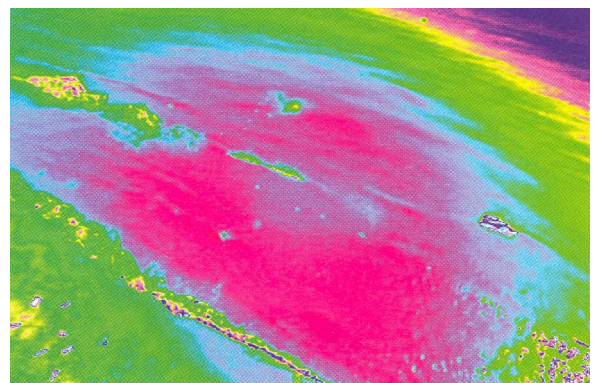


Figura 14. Imagen digitalizada de la zona de rompientes en la que se pueden observar boyas describiendo la trayectoria de una celda de corriente

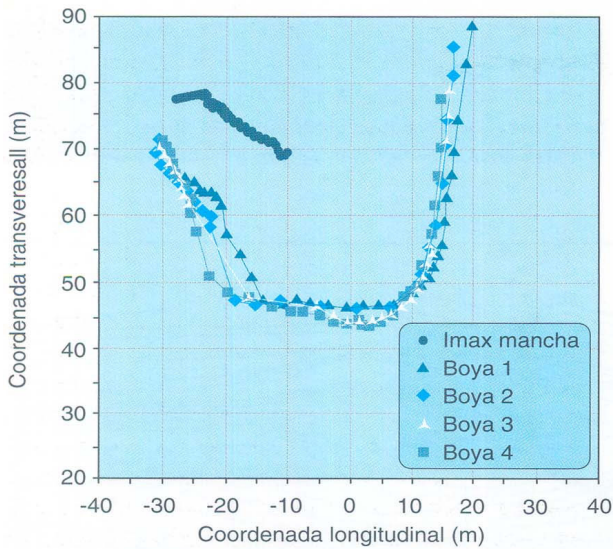


Figura 15. Trayectoria de las boyas y mancha

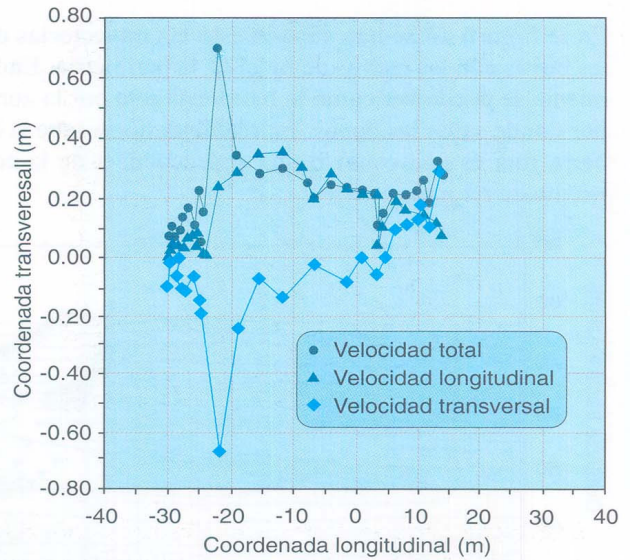


Figura 16. Velocidades registradas de las boyas (4ª boya)

car tanto la trayectoria como la distribución de velocidades, que se representan respectivamente en las Figuras 15 y 16. Las boyas se desplazan inicialmente hacia la costa, hasta atravesar la línea de rotura. Una vez allí, la corriente longitudinal las arrastra paralelamente a la orilla hasta un punto donde vuelven a dirigirse hacia mar adentro.

Simultáneamente junto a las boyas se vertió una mancha de leche y fluoresceína. Curiosamente la mancha tiene un comportamiento diferente a las boyas, su transporte es longitudinal y menor velocidad. Esta diferencia puede deberse a que la mancha, al mezclarse en toda la columna, tenga una respuesta promediada verticalmente mientras que las boyas respondan estrictamente a la capa superficial (la abarcada por la profundidad de lastre).

Pese a que las condiciones de oleaje eran muy poco energéticas ($H_s = 21$ cm y $T = 4,3$ s) puede apreciarse que las corrientes de retorno alcanzan los 60 cm/s mientras que la corriente longitudinal es de aproximadamente la mitad. 30-35 cm/s. Si se examina la velocidad total se ve que en los instantes iniciales y finales corresponde casi exclusivamente a velocidad transversal, mientras que en la zona intermedia corresponde a velocidad longitudinal, sin que se produzca interferencia entre ambos tipos de corrientes.

Tratando de establecer los posibles mecanismos inductores que generan dicha corriente, se constata que la batimetría no es uniforme, ya que pese a tratarse aparentemente de una playa longitudinalmente uniforme, la barra presenta canales que favorecen la aparición de corrientes de retorno (Ver Figura 17).

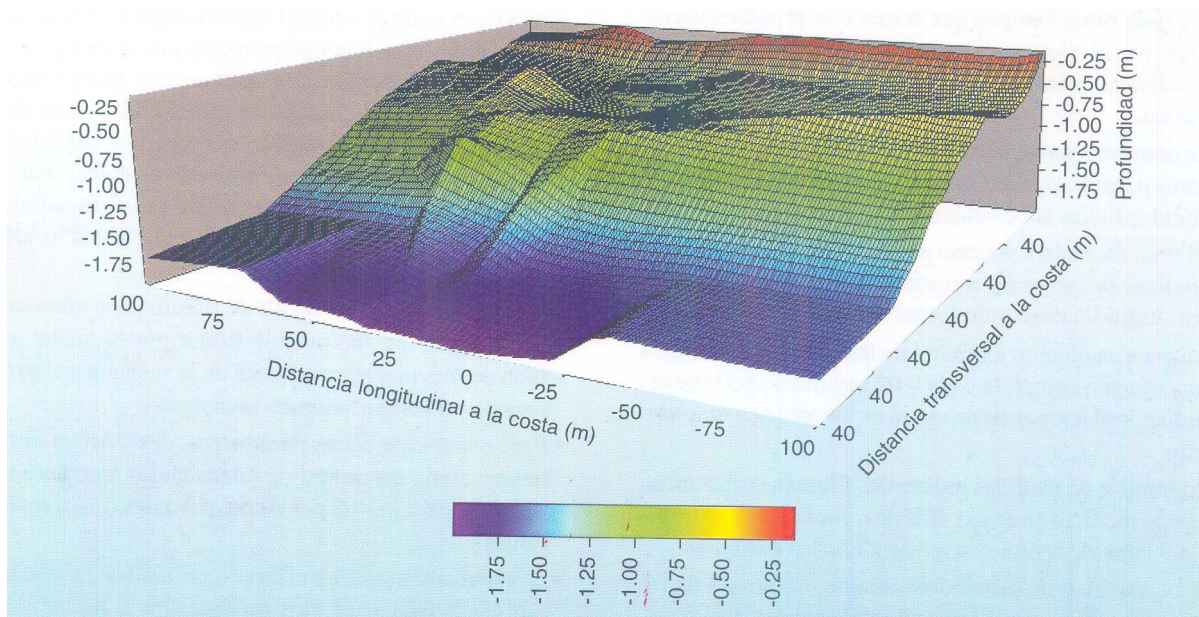


Figura 17. Representación tridimensional de la batimetría con la barra rota

En la *Figura 18* se han superpuesto las trayectorias de las boyas con las curvas de nivel de la batimetría. En la misma se puede ver como la barra está rota por la zona por donde salen las boyas. En realidad, no se sabe si la barra rota es una causa o una consecuencia de la corriente de retorno.

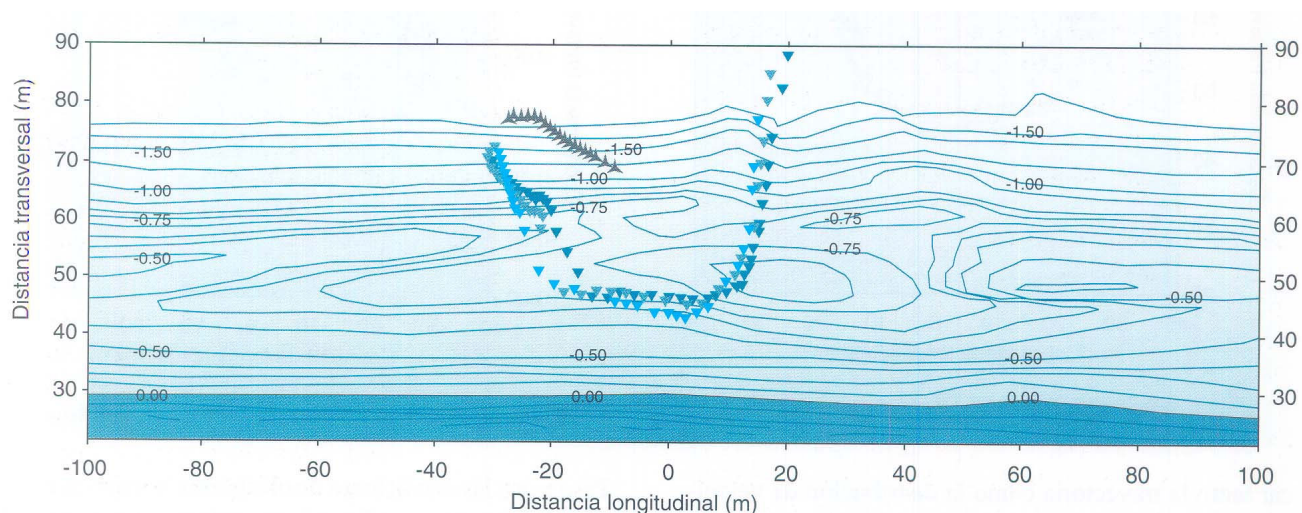


Figura 18. Representación de la batimetría con curvas de nivel y trayectoria de las boyas superpuesta

CONCLUSIONES

En primer lugar, se efectúa una valoración de la técnica del análisis digital de imágenes. Entre los principales aspectos favorables destacan:

- El reducido peso y tamaño de las cámaras permite su instalación en prácticamente cualquier lugar elevado como: farolas, grúas, globos aerostáticos, mástiles, y, en otra escala de estudio, satélites.
- Se puede registrar mucho tiempo a un costo relativamente bajo.
- Es una herramienta muy útil para estudiar, cualitativa y cuantitativamente, numerosos procesos hidrodinámicos o de otros campos que traten con procesos variables en el tiempo y que deban ser analizados estadísticamente, como por ejemplo la hidráulica o el tráfico.
- La coordinación con medidas realizadas con otros sensores permite calibrar las estimaciones efectuadas, así como estudiar la correlación de parámetros.
- El gran dominio abarcado por el campo visual permite analizar la variación espacial de numerosos parámetros hidrodinámicos de forma uniforme.
- La gran resolución temporal de las imágenes de video, una imagen completa cada 0.02 segundos, permite estudiar oscilaciones en un rango de frecuencias muy amplio.
- Al tratarse de medidas indirectas, filmadas a distancia, puede medirse en zonas difíciles, como la línea de orilla o zona de rotura, y bajo condiciones extremas.
- La capacidad de promediar durante un tiempo de filmación o de analizar series de imágenes instantáneas, permite eliminar oscilaciones naturales (como el oleaje) o de filmación (por movimiento de la cámara).

Trayectorias de la mancha y de las boyas

- ▲ Mancha
- ▼▼ Boyas (posición cada 10 s)

- La técnica de series temporales de una sección permite obtener espectros de oleaje con gran resolución frecuencial.
- El promediado temporal de las imágenes y las series temporales de imágenes instantáneas permiten estudiar imágenes con movimiento oscilatorio. Entre los principales aspectos desfavorables pueden mencionarse:
 - En lugares sin infraestructuras de soporte deben aportarse mecanismos de elevación como grúas o globos aerostáticos, que son caros y frágiles, en especial con viento.
 - Para tener control espacial deben tomarse puntos fiduciales repartidos homogéneamente por el dominio visual de la filmación. Para realizar una interpolación bicuadrática como la que se efectuó en los casos descritos, al menos se necesitan ocho puntos para determinar los coeficientes de cada eje. No obstante, cuantos más puntos disponibles haya, mejor transformación de coordenadas se logrará, pues los coeficientes se ajustan por mínimos cuadrados.
 - El video necesita una fuente de iluminación adecuada. En Delta'96 no fue posible filmar por la noche, por falta de luz, ni a primera hora de la mañana por exceso, pues el reflejo saturaba la imagen.
 - Para poder cuantificar parámetros, éstos deben visualizarse como un campo de intensidades mediante trazadores naturales (espuma) o artificiales (colorantes y boyas).
 - Las imágenes se deben filtrar o promediar para eliminar o amortiguar efectos no deseados o ruido, como por ejemplo la espuma, la oscilación producida al pasar una ola, la intensidad del fondo, etc.

- El postproceso de las imágenes es un trabajo laborioso y en ocasiones con un cierto grado de subjetividad, como separar la mancha del fondo, identificar las boyas o la orilla, solapar series temporales, etc.
- Las medidas indirectas requieren calibraciones con medidas directas para pasar la escala de intensidades a la correspondiente del parámetro medido (concentración, nivel de superficie libre, etc.).

En segundo lugar, de los resultados obtenidos pueden resaltarse los siguientes aspectos:

- El coeficiente de dispersión puede cuantificarse de forma similar a un coeficiente de viscosidad turbulenta si la mancha tiene una geometría elíptica. Su valor en la zona de rompientes puede variar unos órdenes de magnitud en función del punto de vertido. Los coeficientes medidos y su tendencia, muestran que en el interior de la zona de rompientes no es aplicable una ley del tipo "4/3" para el coeficiente de mezcla.
- Las series temporales de transectos (líneas horizontales o verticales de una imagen) han demostrado ser una técnica con un gran potencial para la caracterización del oleaje en la zona de rompientes. Los espectros obtenidos a partir de ellas reproducen picos a las mismas frecuencias que los instrumentos de medida directa como el *wave gauge* o el sensor de presión (ver *Figura 12*).
- Para frecuencias muy bajas, se acentúan mucho los picos de energía del espectro de intensidades. Una de las posibles causas de este efecto es que la intensidad no se corresponde exactamente al nivel de superficie libre, sino que es función de la pendiente de ésta. Por lo tanto, la intensidad depende también del número de onda, sobrestimando dicho nivel para ondas largas. Para identificar ondas largas se puede estudiar la zona de *swash* hallando el espectro de las series temporales de su posición, aunque su digitalización es laboriosa y subjetiva.
- A pesar de las condiciones de baja energía que se dieron en Delta'96, se detectó la formación de comentes de retorno de velocidad considerable (60 cm/s). Se observó que el comportamiento de la mancha de leche y fluoresceína no describía la celda de corriente como las boyas. Esta circunstancia puede responder al hecho de que la mancha está bien mezclada en casi toda la columna de agua, por lo que se desplaza según una hidrodinámica mucho más compleja, que puede incluir velocidades verticales, mientras que las boyas siguen una velocidad superficial, que es básicamente horizontal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto FANS, financiado por la Unión Europea (programa MAST III) bajo contrato número MAS3-CT95-0037) y del proyecto MAR96-1856 del programa CYTMAR de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología. Los autores desean agradecer asimismo a todas las personas que participaron en las campañas de medidas el trabajo realizado.

BIBLIOGRAFÍA

- Bahia, E. (1997) *Estudio numérico-experimental de la dispersión de contaminantes en regiones costeras. Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Catalunya. 344 p.
- Crickmore, M. J. (1972) *Tracer tests of eddy diffusion in field and model*. *Journal of Hydr. Div.*, ASCE, vol. 98, no. HY10, pp. 1737-1752.
- Dalziel, S. (1994). *DigImage, Image Processing for Fluid Dynamics*. *Cambridge Environmental Reserch Consultants Ltd*. March 1994.
- Diez, M. (1998) *Estudio de la hidrodinámica en la zona de rompientes mediante el análisis digital de imágenes*. *Tesina de Especialidad*. ETSECCPB, Universidad Politécnica de Catalunya. 184 p.
- Diez, M., Mósso, C. Sierra, J.P.; S.Arcilla, A.; Rodríguez, A.; Bezerra, M. O.; y Redondo, J. M. (1998) *Estimation of dispersion coefficients in low wave energy surf zone using video images*. *Proc. 4th Int. Conf. Littoral*. pp. 535-542, España
- Einstein, Albert (1927) *Investigations on the theory of Brownian Movement...* Assisted with notes by R. Fürth. (Transl. by A. D. Cowper). Methuen, London (Reprinted by Dover, New York, 1956).
- Ham, L. and Maroski, Z. (1993) *Application de la technique de traitement d'image a la reconnaissance au suivi de deferlement des vagues*. *Report d'avancement 5 21284 R4*, SOGREAH, 20 p.
- Harris, T, Jordán, J., McMurray, W., Verwey, C. And Anderson, F. (1963) *Mixing in the surf zone*. *Int. Jour. Water Pollution*. vol. 7, pp. 649-667.
- Hesselink, L. (1988) *Digital image processing in flow visualization*. *Annual Rev. Fluid Mech.* vol. 20, pp. 421-485.
- Holman, R.A. and Lippmann, T.C. (1987) *Remote sensing of nearshore bar systems making morphology visible*. *Proc. Coastal Sediments*. ASCE, pp. 929-944.
- Holman, R.A. and Sallenger, A. (1986) *High energy nearshore processes*. *EOS Trans. Amer. Geophysical Union*, vol. 9, pp. 929-944.
- Horikawa, K., Lin, M.C. and Sasaki, T.O. (1978) *Mixing of heated water discharged in the surf zone*. *Proc. Coastal Engineering*. ASCE, pp. 2563-2583.
- Hotta, S. and Mizuguchi, M (1980) *A field study of waves in the surf zone*. *Coastal Engineering in Japan*. vol. 24, pp. 41-76.
- Kraus, N., Isobe, M., Igarashi, H., Sasaki, T. and Horikawa, K. (1982) *Field experiments on longshore sand transport in the surf zone*. *Proc. Coastal Engineering*. ASCE, pp. 969-988.
- Lippmann, T.C. and Holman, R.A. (1991) *Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques*. *Proc. Coastal Sediments*. ASCE, pp. 542-556.

- Lippmann, T.C. and Holman, R.A., (1992) *Wave group modulations in cross-shore breaking patterns*. Proc. Coastal Engineering. ASCE, pp. 918-931.
- Maresca, J. and Seibel, E. (1976) *Terrestrial photogrammetric measurements of breaking waves and longshore currents in the nearshore zone*. Proc. Coastal Engineering. ASCE, pp. 681-700.
- Mosso, C. Sierra, J.P.; Diez, M.; S. Arcilla, A.; Rodríguez, A.; Santas, J. C. y Ruiz, V. (1998) *Experimental study of wave deformation in the near-shore zone. Delta '96 case*. Proc. 4th Int. Conf. Littoral. pp. 323-332, España.
- Redondo, J.M., Rodríguez, A. Bahía, E., Falques, A., Gracia, V., Sánchez-Arcilla, A. and Stive, M.J.F. (1994) *Image analysis of surf-zone hydrodynamics*, Proc. Coastal Dynamics'94. ASCE, pp. 350-365.
- Rodríguez A, Bahía, E., Diez, M., Sánchez-Arcilla, A., Redondo, J.M. and Mestres, M. (1997) *Experimental study of mixing processes using images*. Proc. Coastal Dynamics'97. ASCE. pp. 395-404.
- Sasaki, T., Horikawa, K. and Hotta, S. (1976) *Nearshore current on a gently sloping beach*. Proc. Coastal Engineering. ASCE, pp. 626-644.
- Sonu, C. (1969) *Tethered balloon for study of coastal dynamics*. American Soc. Photogrammetry Tech. Rep.no. 66. pp. 91-103.
- Thornton, E.B. (1970) *Variation of longshore current across the surf zone*. Proc. Coastal Engineering. ASCE, pp. 291-308.
- Walton, T. (1993) *Ocean City, Maryland, wave runup study*. J. of Coastal Research. vol. 9, no.1, pp.1-10.
- Wright, L., Nielsen, P. and List, J. (1986) *Morphodynamics of bar-trough surf-zone*. Marine Geology. vol. 70, pp. 97-128.
- Zeidler, R.B. (1976) *Coastal dispersion of pollutants*. Journal Waterways, Harbours and Coastal Engineering. ASCE, vol. 102, pp. 235-254.