

IMPACTOS DE CORTO PLAZO DEL HURACÁN *DEAN* SOBRE LA MORFOLOGÍA DE LA PLAYA DE CANCÚN, MÉXICO

• Raúl Martell-Dubois • Edgar Mendoza-Baldwin •
Universidad Nacional Autónoma de México

• Ismael Mariño-Tapia •
Instituto Politécnico Nacional, México

• Rodolfo Silva-Casarín • Edgar Escalante-Mancera •
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

En las últimas tres décadas, la playa de Cancún, ubicada en el estado de Quintana Roo, en el Caribe mexicano, ha experimentado procesos erosivos que han degradado sus condiciones de uso, de manera tal que se ha requerido la realización de dos campañas de alimentación artificial de arena. El objetivo del presente trabajo es determinar los impactos de corto plazo del paso del huracán *Dean* sobre la morfología, ya alterada, de la playa de Cancún, luego del primer relleno en 2006. El análisis combinado de la evolución de la línea de costa, a través de la comparación de perfiles de playa y las características del clima marítimo generado en la zona por el huracán, permitió evaluar los impactos de dicho meteoro en la zona de estudio. Como resultado del análisis, se obtiene que para el periodo 2006-2007, el paso del huracán *Dean* provocó pérdidas de arena en los sectores al norte y centrales del frente de playa. También se obtuvo que durante dicho periodo se perdieron en Cancún de manera global 31 m de ancho de playa. Este significativo retroceso se atribuye a la suma de los efectos del huracán con las alteraciones antrópicas llevadas a cabo sobre el ecosistema costero.

Palabras clave: huracán *Dean*, relleno artificial en Cancún, erosión de playa, alteración antrópica de playas.

Introducción

Las playas constituyen en la actualidad un recurso natural de elevado valor, no sólo por la belleza de su paisaje sino por su utilidad como soporte para el desarrollo de la industria del ocio y la recreación. En la región del mar Caribe, el turismo es una fuente importante de ingresos, a tal grado que buena parte de la economía de los países con costas en dicho mar depende de ellos.

Un caso que resulta de gran interés tanto por la relevancia económica que representa como porque de su bienestar depende la visión que se tiene en el ámbito internacional de los destinos de playa mexicanos es Cancún. Esta

playa, al igual que buena parte del estado de Quintana Roo, México, está siendo afectada por un proceso erosivo de nivel crítico tal, que ha sido necesaria la ejecución de dos rellenos artificiales, uno en el año 2006 y otro en 2010 (que está implícitamente incluido en este trabajo, ya que no ha sido afectado por ningún meteoro de gran magnitud). No es de sorprender, entonces, que el valor de uso de esta playa se haya visto disminuido, al grado que la calidad y cantidad de turistas que la visitan se ha degradado; baste señalar que entre 2008 y 2009, la ocupación hotelera promedio anual disminuyó de 71 a 60%, mientras que las tarifas promedio anuales de hoteles de tres estrellas se redujeron, lo que

parece indicar un aumento en la demanda de este tipo de hotelería (Balderas, 2009). Más allá de las causas sociales y humanas que acompañan la condición actual de este destino de playa, es de gran importancia retomar la discusión científica y técnica sobre la base de datos concretos, y generar conocimiento útil, a fin de allanar el camino a la propuesta de soluciones y la toma de decisiones. En este sentido, es necesario comprender los procesos morfodinámicos que hoy día tienen lugar en el sitio, entendidos como resultado de la interacción entre los sedimentos introducidos con los rellenos, el relieve natural, las condiciones del clima marítimo y la actividad humana que se desarrolla en esta zona, la cual ha dado lugar a un ecosistema altamente alterado que difícilmente recuperará, por sí mismo, un estado de equilibrio.

La playa de Cancún se ubica sobre una delgada barra arenosa de aproximadamente 12 km de longitud, cuyo ancho máximo no supera los 0.7 km. La frontera este de la barra presenta una playa arenosa, la cual es bañada por las aguas del Mar Caribe (ver figura 1), mientras que en la frontera oeste, la costa está bordeada por una estrecha franja de manglar. La barra arenosa encierra un cuerpo de agua salobre

denominado Sistema Lagunar Nichupté. Como se puede apreciar, la complejidad de los elementos que conforman el entorno resulta en un ecosistema con un alto grado de fragilidad. Es de esperar, entonces, que propiamente cualquier alteración de las condiciones naturales pueda ocasionar un desequilibrio irreversible del ecosistema.

En los años sesenta del pasado siglo, el sistema se podía considerar estable o, con mayor precisión, meta estable. La barra se encontraba en su estado natural y la playa, incluyendo la duna, alcanzaba cerca de 80 m de ancho, en promedio. A mediados de dicha década inició el desarrollo turístico masivo sobre la barra y, en cierto sentido, todo parecía funcionar de manera adecuada hasta la ocurrencia, en el año 1988, del huracán *Gilberto*, que produjo las mayores pérdidas de arena registradas hasta entonces. Lentamente, la playa inició un proceso de auto-recuperación, logrando incrementar su ancho, pero sin alcanzar su estado original. Sin embargo, entre los años 2004 y 2005, el paso casi consecutivo de los huracanes *Iván*, *Emily* y *Wilma* provocaron de nuevo serias afectaciones. En octubre de 2005, después del paso del huracán *Wilma*, la playa de Cancún

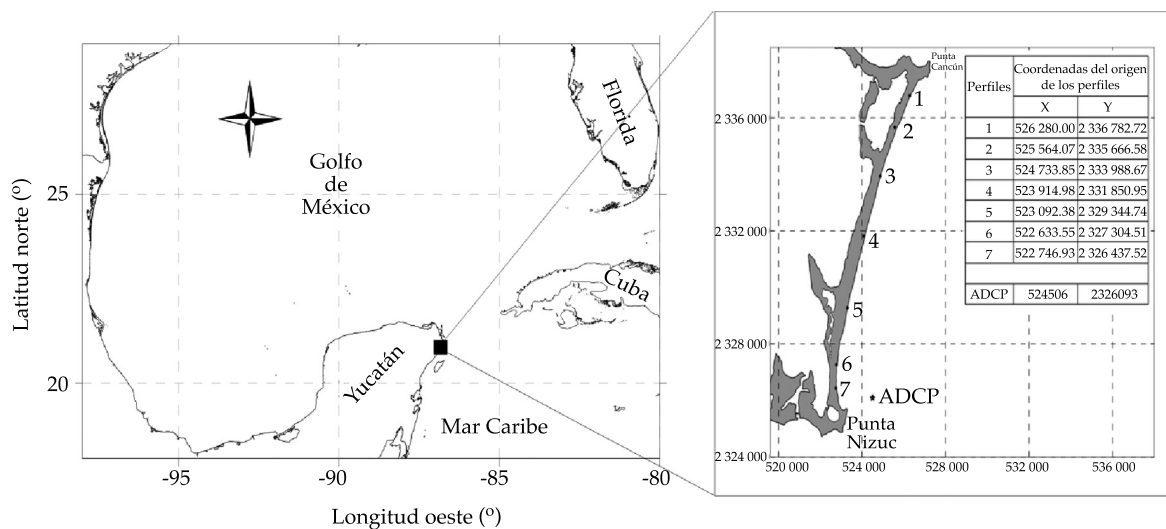


Figura 1. Esquema de ubicación de la playa de Cancún, el ADCP y los perfiles batimétricos.

desapareció por completo en más del 70% de su extensión (Silva *et al.*, 2006). Es por ello que en el primer semestre de 2006, las autoridades correspondientes tomaron la decisión de ejecutar el vertimiento de 2.7 millones de metros cúbicos de arena, con el objetivo de regenerar la playa de manera artificial (figura 2). El ancho de playa promedio logrado con el relleno fue de 70 m (Morán *et al.*, 2007), lo cual satisfacía las exigencias de una reparación de emergencia que permitiera el arribo de turistas y no agravar el daño económico de la región. Apenas un año después de ejecutado dicho relleno, entre los días 20 y 23 de agosto de 2007, el huracán *Dean* afectó la región, removiendo cantidades importantes de arena de la parte seca de la playa y dejando el sitio, una vez más, en estado vulnerable. En la figura 3 se presentan imágenes de antes (izquierda) y después (derecha) del huracán en las regiones norte (superior) y sur (inferior) de la playa; la pérdida de material en la playa seca es evidente, aunque no dramática.

El objetivo principal del presente trabajo es comprender, a la luz de la hidrodinámica y la batimetría registrada, los impactos que

produjo el paso del huracán *Dean*. Este análisis es fundamental para entender la respuesta de un sistema altamente alterado frente a eventos extremos, e intentar así avanzar hacia la posibilidad de realizar pronósticos de la respuesta de la playa de Cancún ante eventos meteorológicos extremos con su nueva configuración.

Recopilación de información

La recopilación de la información morfológica, sedimentológica y de clima marítimo se llevó a cabo por el Grupo de Puertos y Costas del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en conjunto con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (IPN), estación de Mérida (Cinvestav), y la Unidad Académica Puerto Morelos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Para evaluar la evolución morfológica, desde el punto de vista planimétrico, se procesaron imágenes de satélite de la zona tomadas desde 2006 hasta 2010. Las imágenes utilizadas provienen del



Figura 2. Vistas de Cancún después del huracán *Wilma* (izquierda) en octubre de 2005 y durante el relleno artificial en 2006 (derecha).



Figura 3. Vistas de Cancún antes (imágenes de la izquierda, 17 de agosto de 2007) y después del huracán *Dean* (imágenes de la derecha, 23 de agosto de 2007). En el panel superior se presentan imágenes de la erosión en Playa Marlin (región norte) y en el inferior se muestra la acumulación frente al hotel Bell Air (región sur).

satélite Quickbird, producidas por la empresa Digital Globe, y corresponden con las siguientes fechas: 05/2006, 09/2006, 09/2007, 08/2008, 02/2009 y 04/2010. De dichas imágenes se obtuvieron las configuraciones de las líneas de costa digitalizadas vía la aplicación de cómputo *Geomática*, versión 10.2. La precisión en la delimitación de la línea de costa es de 2 m y está determinada por la calidad de la rectificación de las imágenes empleadas. Se utilizó información del relieve proveniente de los levantamientos batimétricos realizados en abril de 2007 y febrero de 2008; estas batimetrías fueron provistas por el Departamento de Oceanografía de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México.

Los datos de clima marítimo se registraron con un ADCP marca RDI, que estuvo colocado entre el 25 de mayo y el 3 de septiembre del año 2007, a una profundidad de 20 m, en la ubicación que se muestra en la figura 1. El ADCP recabó información del perfil de corrientes, parámetros de oleaje direccional y la variación de la elevación de la superficie del mar. La velocidad y dirección de las corrientes se midieron en toda la columna de agua, en celdas de 1 m, en intervalos de muestreo de 30 min. La dirección del oleaje se registró a partir de las velocidades orbitales asociadas con el mismo. La altura de las olas y sus principales parámetros fueron inferidos a partir de la presión medida en el fondo, en bloques de 2 048 muestras tomadas cada hora a una frecuencia de 2 Hz.

Revisión del estado del área de estudio

En este trabajo se ha considerado como zona de interés el frente de playa delimitado al norte por Punta Cancún y al sur por Punta Nizuc (ver figura 1). Es conocido que el principal agente natural que moldea la costa en dicha región de estudio son los efectos de las tormentas que en el curso de unas pocas horas descargan la suficiente energía como para inducir cambios morfológicos significativos. Al respecto vale la pena aclarar que el efecto de una tormenta se considera desfavorable en el sentido de que las playas de la zona de estudio tienen un uso predominantemente turístico y, desde esa óptica, todo proceso erosivo (temporal o permanente) actúa en deterioro de la citada actividad.

De acuerdo con Silva *et al.* (2008), una forma de definir estadísticamente una tormenta es cuando el oleaje supera el umbral de 1.5 veces la altura de ola significativa media anual (2 m para el caso de Cancún) por un periodo mayor a doce horas continuas. Bajo este criterio, quedan incluidos dentro de la categoría de tormenta tanto los huracanes como los frentes fríos (tormentas de invierno) que de forma periódica inciden en la zona.

A este respecto, si bien los frentes fríos ocurren con mayor frecuencia, la energía que acompaña a los huracanes tiene mayor capacidad de alterar los equilibrios que dan una forma determinada a la costa y es por ello que suele prestárseles más atención. Afortunadamente, en la actualidad se cuenta con información suficiente como para caracterizar estadísticamente los huracanes que han afectado la zona y tratar de dilucidar su impacto en la morfología. Como ejemplo, el cuadro 1 presenta un resumen de las características generales de algunos de los huracanes más significativos que han azotado las costas de Cancún en los sesenta años más recientes.

Tanto por su intensidad como por sus efectos sobre la playa de Cancún destacan los huracanes *Gilberto*, en 1988, y *Wilma*, en 2005. En el *Atlas de clima marítimo* elaborado por Silva *et al.* (2008), se calcula la energía normalizada (E_N) contenida en cada una de las tormentas que han afectado la zona de estudio en los últimos sesenta años, a fin de contar con un parámetro cuantitativo de clasificación. El cálculo de la energía normalizada inicia con la sumatoria de la energía específica (E_{TH}) para cada valor de altura de ola (H_i) en todo el registro:

Cuadro 1. Resumen de los huracanes más intensos que han azotado la región de estudio.

Huracán	Fecha	Velocidad de vientos máxima (km/h)	Altura de ola (m)	Presión central (hPa)
<i>Gilberto</i>	Septiembre de 1988	192	12.7	969.0
<i>Allen</i>	Agosto de 1980	189	11.9	947.2
<i>Wilma</i>	Octubre de 2005	176	12.8	930.0
<i>Isidoro</i>	Septiembre de 2002	152	11.1	974.6
<i>Dean</i>	Agosto de 2007	150	5.3	907.0
<i>Charlie</i>	Agosto de 1951	142	9.4	991.5
<i>Beulah</i>	Septiembre de 1967	136	11.0	968.0
<i>Roxanne</i>	Octubre de 1995	127	8.3	995.8
<i>Carla</i>	Septiembre de 1961	127	10.0	969.0
<i>Iván</i>	Septiembre de 2004	120	7.2	996.2
<i>Emily</i>	Julio de 2005	120	6.8	992.4
<i>Inés</i>	Octubre de 1966	117	6.1	992.4
<i>Hilda</i>	Septiembre de 1955	107	6.4	1 001.8

$$E_{TH} = \frac{1}{8} \rho g \sum_{i=1}^n \Delta t_i H_i^2 \quad (1)$$

Donde Δ es el intervalo de tiempo de persistencia de cada H_i .

Después se calcula el valor de energía específica (E_{TN}), correspondiente a una altura de ola de 2 m para 24 horas:

$$E_{TN} = (24) \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2)$$

Finalmente, la relación entre la energía específica (E_{TH}) y la energía de 2 m para 24 horas permite calcular la energía normalizada (E_N) cada 24 horas:

$$E_N = \frac{E_{TH}}{E_{TN}} \quad (3)$$

En la figura 4 se presenta la distribución temporal de la energía normalizada de las

tormentas ocurridas frente a Cancún en el periodo comprendido entre los años 1948 y 2010.

En el periodo que cubre la figura 4, Cancún fue azotado por un total de 1 096 tormentas, de ellas, se obtuvieron 1 035 con $E_N < 10$; 43 con E_N entre 10 y 20; 11 con $20 < E_N < 30$; 4 con $30 < E_N < 40$; 2 con $40 < E_N < 50$, y sólo una con $E_N > 50$. Resulta interesante destacar que en los sesenta años de registro, las cuatro tormentas con valores de energía normalizada entre 30 y 40 ocurrieron después de 1988; las dos tormentas con valores entre 40 y 50, después del año 2002, y la única tormenta con valores mayores de 50, en octubre de 2005. Estos valores indican una tendencia al incremento; sin embargo, desde el año 2006 no se cuenta con evidencias de tal incremento, por lo que no es certero hablar de una tendencia definitiva.

En la figura 4, el caso más interesante es, sin duda, el huracán *Wilma*, en octubre de 2005, cuya intensidad desde el punto de vista de la energía normalizada fue de 91 y representó más del doble de la intensidad de las tormentas más energéticas registradas para el periodo

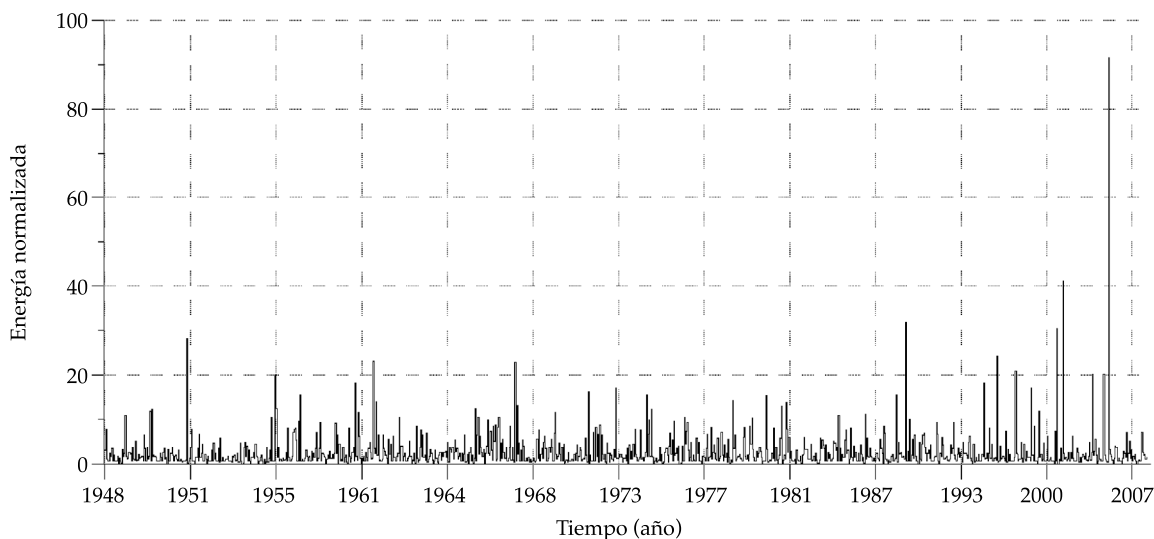


Figura 4. Distribución temporal de la energía normalizada de las tormentas que han afectado la playa de Cancún entre los años 1948 y 2007.

comprendido entre los años 1948 y 2010. No es de sorprender que los impactos provocados en la playa de Cancún por un fenómeno de tal magnitud no tuvieran precedente histórico. En el caso del huracán *Dean*, la energía normalizada recibida en Cancún por este meteoro alcanzó un valor de sólo siete unidades, con lo cual era de esperar que sus impactos sobre la playa fueran de una magnitud inferior a los de *Wilma*. Se hace necesaria, entonces, una revisión de las condiciones e historia de alteración antropogénica en que se encontraba la playa de Cancún al paso de huracán *Dean*, a fin de contar con un marco de referencia que permita entender de manera más realista el impacto de dicho meteoro.

Para facilitar el estudio de la evolución histórica de las actuaciones humanas en la playa de Cancún, se tomaron los mismos siete sectores que propone Félix (2007), quien empleó los siguientes criterios de seccionamiento:

- Los sectores 1 y 7 son las puntas extremas de la isla barrera.
- Los sectores 2 y 6 son las secciones más delgadas de la isla.
- En los sectores 3 y 5, la barra se ensancha y comienza a tener más estabilidad.
- El sector 4 constituye la parte más estable de la isla.

Como se señaló antes, a mediados de los años setenta se iniciaron las construcciones de infraestructura turística sobre la playa de Cancún. Félix (2007) estudió el crecimiento de cobertura antropogénica sobre la barra en dos periodos: el primero desde finales de los sesenta hasta el año 1983, y el segundo desde 1983 hasta 2006. Encontró que el segundo periodo fue de mucha mayor actividad y que los sectores centrales (3 al 5) fueron los que mayor ocupación registraron, como se observa en la figura 5. En dicha figura se han sumado las áreas ocupadas por infraestructura tanto turística como urbana y los terrenos en construcción. Es de notar, de acuerdo con lo reportado por Félix (2007), que

el área ocupada abarca no sólo la isla barrera, sino espacios vitales para la playa, como son las dunas costeras. Por lo que toca a cobertura vegetal, se encontró que los mayores cambios se realizaron entre finales de la década de los sesenta y 1983, lo cual se aprecia con claridad en la figura 5.

Otras alteraciones importantes al sistema en estudio han sido la pavimentación y construcción de vialidades que modificaron las características del escurrimiento superficial de las aguas pluviales; esto ha impactado de manera negativa en la estabilidad de la playa, al modificar los niveles freáticos. Por su parte, Pedrozo (2008) indica que otra modificación importante, ocasionada por la construcción de infraestructura, fue la interrupción de los ciclos naturales de intercambio de aguas y sedimentos que existían entre el Sistema Lagunar Nichupté, la barra arenosa y el mar. Esta rigidización de la isla de barrera es, probablemente, una de las causantes del aumento en las inundaciones, de la eutrofización del sistema lagunar por estancamiento de la circulación, y de un posible incremento en la sobre elevación de nivel del mar durante tormentas, por la imposibilidad de generar una apertura en la barra de arena que alivie el gradiente de presión sobre la playa, causando una pérdida acelerada de sedimento en la playa. Todas estas perturbaciones al medio natural y sus efectos derivados llevaron a la playa de Cancún a un nivel de fragilidad tal que no fue capaz de resistir el impacto del huracán *Wilma* y la playa prácticamente desapareció.

Como respuesta a la devastación, a principios del año 2006 se llevó a cabo un proyecto de alimentación artificial de arena que cambió de forma permanente las características sedimentológicas, mecánicas, morfológicas y de respuesta ante eventos meteorológicos de la playa de Cancún. Se puede afirmar que hasta octubre de 2005, la playa evolucionó con sus sedimentos nativos y que, desde mediados de 2006, Cancún pasó a ser una playa regenerada de manera artificial, dada la introducción

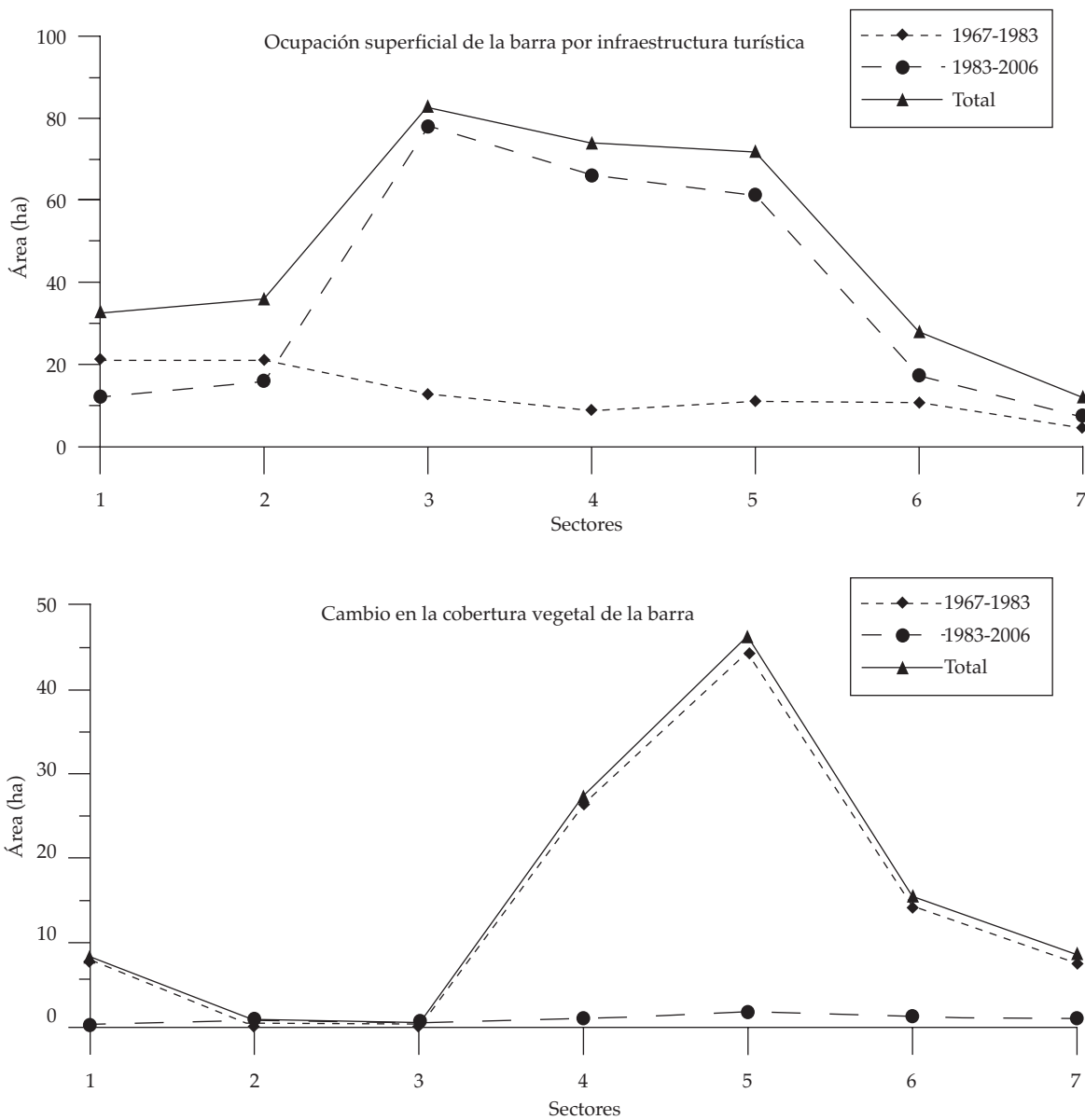


Figura 5. Evolución de la ocupación superficial de la barra por infraestructura turística, urbana y terrenos en construcción, así como cambios de la cobertura vegetal natural.

de sedimento de características diferentes al nativo. Las notorias diferencias entre los sedimentos nativos y los introducidos se presentan, de manera visual, en la figura 6.

De manera cuantitativa, en la figura 7 se presentan las curvas granulométricas de muestras tipo correspondientes a los sedimentos nativos y los introducidos con el relleno. Como

se puede apreciar, la arena introducida es poco compatible con la nativa, al ser de mayor tamaño y hallarse peor clasificada. Dadas estas diferencias es de esperar que luego del proceso de mezcla de ambos sedimentos tengan lugar variaciones en la configuración de la playa respecto de la de diseño y, más aún, la tendencia morfológica de este nuevo sedimento no puede

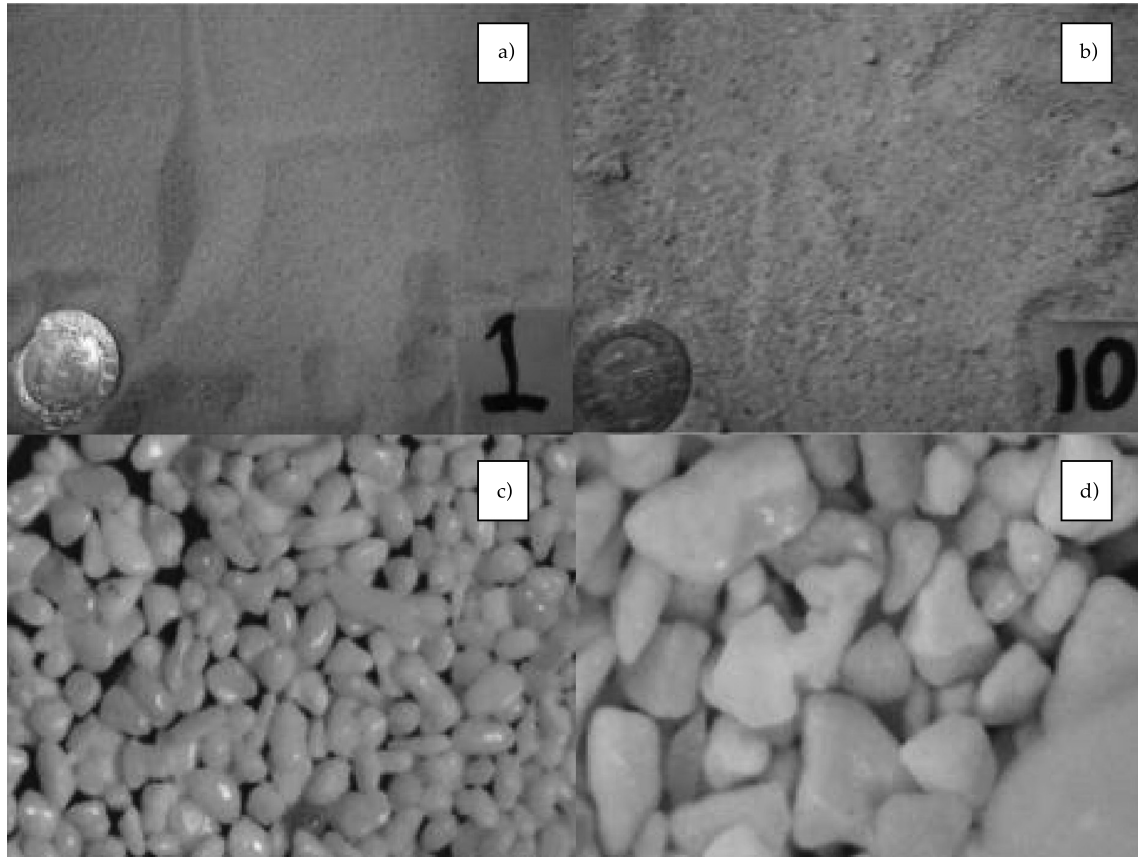


Figura 6. Sedimentos de la playa de Cancún antes (a y c) y después (b y d) de los trabajos de alimentación artificial de arena del año 2006. Vistas macro (a y b) y micro (c y d). Tomadas de Alcérreca, 2011.

ser la misma que se tenía con el material nativo. Las variaciones de un perfil de playa cuando se rellena con otro de distinto tamaño han sido apuntadas por diversos autores, dos ejemplos son González *et al.* (1999), y Dean y Darlymple (2002). De acuerdo con estos autores, entre las diferencias que son de esperar al introducir material de mayor tamaño al nativo se cuentan una pendiente más pronunciada (perfil más reflejante) y un tipo de rotura del oleaje más agresivo. Por otro lado, la pobre graduación de la arena y mayor porcentaje de finos, hace que importantes fracciones del sedimento se suspendan fácilmente y escapen del sistema, dejando en la playa el material más grueso, que en este caso está principalmente compuesto de restos de conchas que son incómodas de

pisar y tienen una forma menos redondeada, por lo que se esperaría también una mayor capacidad de transporte del mismo. A la luz de lo anterior, dada la cantidad de arena que se vertió y sumando el hecho de que la playa seca propiamente había desaparecido, se confirma que para la playa de Cancún este relleno marca un cambio permanente. En resumen, la playa de Cancún se encontraba ajustándose a las nuevas condiciones de áridos derivadas del relleno artificial y bajo un estado de fuerte transición al estar recuperándose del impacto de huracanes muy energéticos (temporada 2005 récord), cuando en agosto de 2007 fue afectada por el huracán *Dean* que, como se ha dicho, no causó daños drásticos en la playa, pero sí la erosión de forma apreciable.

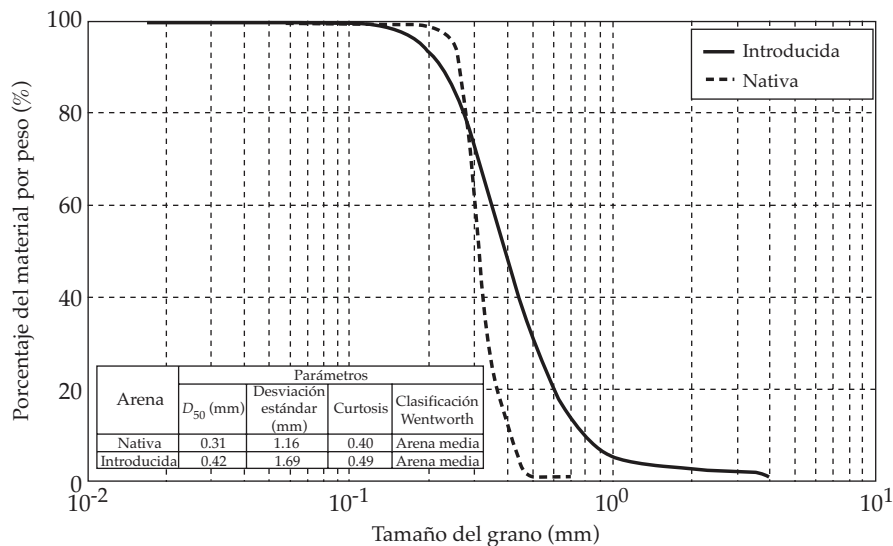


Figura 7. Curvas granulométricas y parámetros de las muestras tipo de los sedimentos nativos e introducidos en Cancún (Ruiz, 2010).

Análisis del impacto del huracán *Dean*

El recorrido del ojo del huracán *Dean*, entre los días 13 y 23 de agosto de 2007, se muestra en la figura 8. Este huracán se aproximó de forma lenta a la península de Yucatán, proveniente de las aguas cálidas del mar Caribe, con una velocidad promedio de 16 km/h. La trayectoria fue casi de este a oeste, con una ligera inclinación al norte. La presión mínima que registró el huracán fue de 905 hPa y tocó tierra cerca de la localidad de Majahual, Quintana Roo, después salió ya muy debilitado al Golfo de México, cerca de Ciudad del Carmen, en el estado de Campeche.

La ubicación del ADCP (figura 1) permitió captar las condiciones hidrodinámicas generadas por el huracán *Dean*, que impactaron el frente de playa de Cancún. En la figura 9 se presentan los registros de variables oceanográficas registradas por dicho equipo días previos y posteriores al paso de *Dean*. La altura de ola significativa, en la posición del equipo, comenzó a incrementarse bruscamente a partir de la noche del 20 de agosto hasta alcanzar un valor máximo de 7.32 m el día 21 a

las nueve de la mañana. Dicho oleaje extremo tenía un periodo pico espectral asociado de 16 segundos, es decir, ondas considerablemente largas tipo *swell* (distante). A medida que el huracán estaba más cerca del equipo, el oleaje *swell* comenzó a combinarse con el de tipo *sea* (local), lo que se observa como variaciones del periodo pico con tendencia a disminuir. Posteriormente, la altura de ola fue decreciendo, hasta que el día 23, al amanecer, ya había vuelto a la normalidad, aunque con un periodo todavía largo (10 segundos). No fue sino hasta 24 horas después de que se redujo la altura de ola, que el periodo registrado por el instrumento midió valores más cercanos a la normalidad para el sitio (cinco segundos). Respecto de la variación del nivel del mar (figura 9), es conocido que la marea en la zona de interés es de tipo mixta semi diurna, con una amplitud máxima aproximada de 0.30 m. Unos días antes de la aproximación del huracán (18 de agosto) se observó (figura 9) el inicio de un lapso de mareas muertas; el efecto del huracán se registró a partir de la noche del día 20 y durante el 21 de agosto, cuando se produjo un incremento sostenido del nivel del mar de

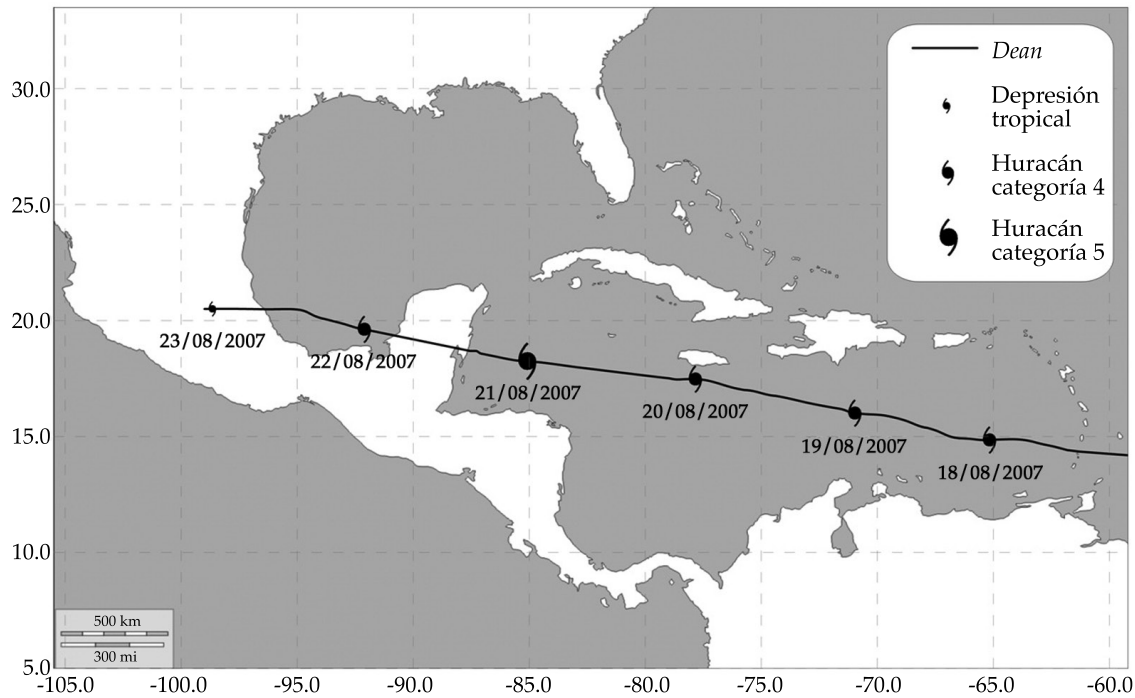


Figura 8. Recorrido del huracán *Dean* en aguas del mar Caribe y el Golfo de México.

hasta 0.8 m. Es de notar que una vez que se ha retirado el huracán, el nivel del mar parece no regresar a su condición normal, lo cual se debe, presumiblemente, a un asentamiento del equipo en el fondo marino.

En cuanto a la dirección de las olas que el huracán hizo incidir sobre la playa de Cancún, en la figura 10(a) se presenta el registro de alturas y direcciones asociadas de los días 10 al 30 de agosto de 2007. Es muy claro que en los días de efecto del meteoro, el oleaje tuvo dirección proveniente del sureste. El análisis de la variación temporal del flujo de energía del oleaje a lo largo de la costa es el objetivo del esquema representado en la figura 10(b). El intervalo de tiempo considerado para los cálculos es entre el 10 y el 30 de agosto del año 2007. El cálculo del flujo de energía (F) se realizó considerando los datos de oleaje registrados por el ADCP, a partir de la siguiente expresión:

$$F = \frac{E_0 \sin(2\alpha)}{2} \quad (4)$$

donde $E_0 = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 C_g$; C_g es la celeridad de grupo y α el ángulo de incidencia del oleaje. En la figura 10(b), flujos de energía positivos indican propagación de oleaje proveniente del norte, por lo que es de notar que el flujo de energía debido al huracán provino principalmente del sur.

A modo de resumen se presentan, en la figura 11, los espectros direccionales (tridimensionales), en los que se puede analizar la información referente al oleaje en forma integrada. En dicha figura se muestran los espectros correspondientes a las 10:00 horas de los días 20 (panel "a"), 21 (panel "b") y 22 (panel "c") de junio del año 2007. En el panel "a" se distingue una importante concentración de energía de banda estrecha con periodo pico cercano a los 16 s, es decir, aun cuando el huracán se encontraba relativamente lejos, sus efectos alcanzaron el punto de medición en forma de un *swell* bien definido. También se observa cierta cantidad de energía correspondiente a

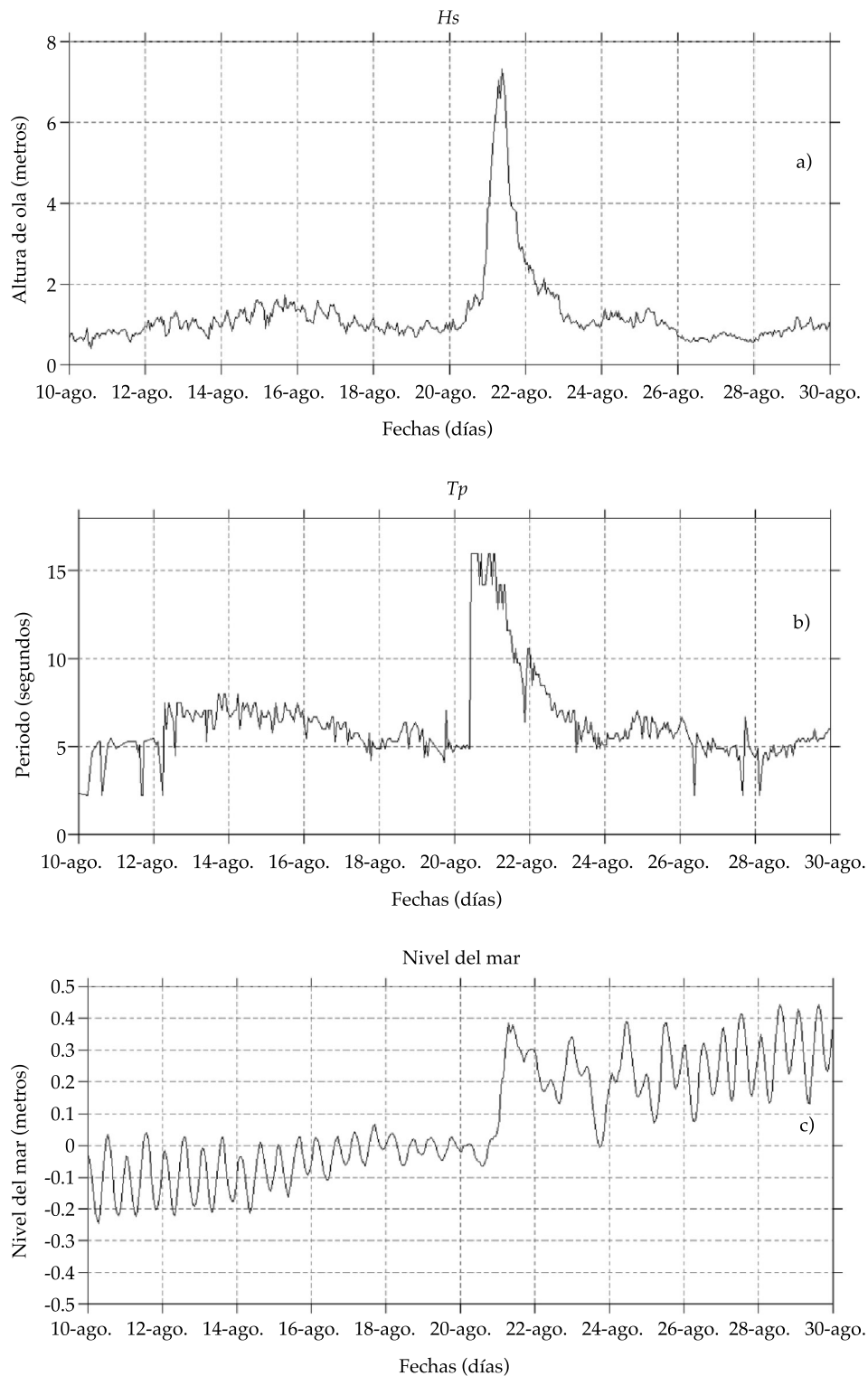


Figura 9. Registro de variables oceanográficas durante el paso del huracán *Dean*, del 10 al 30 de agosto de 2007; a) altura de ola significativa, b) periodo pico, c) dirección predominante y d) variaciones del nivel del mar.

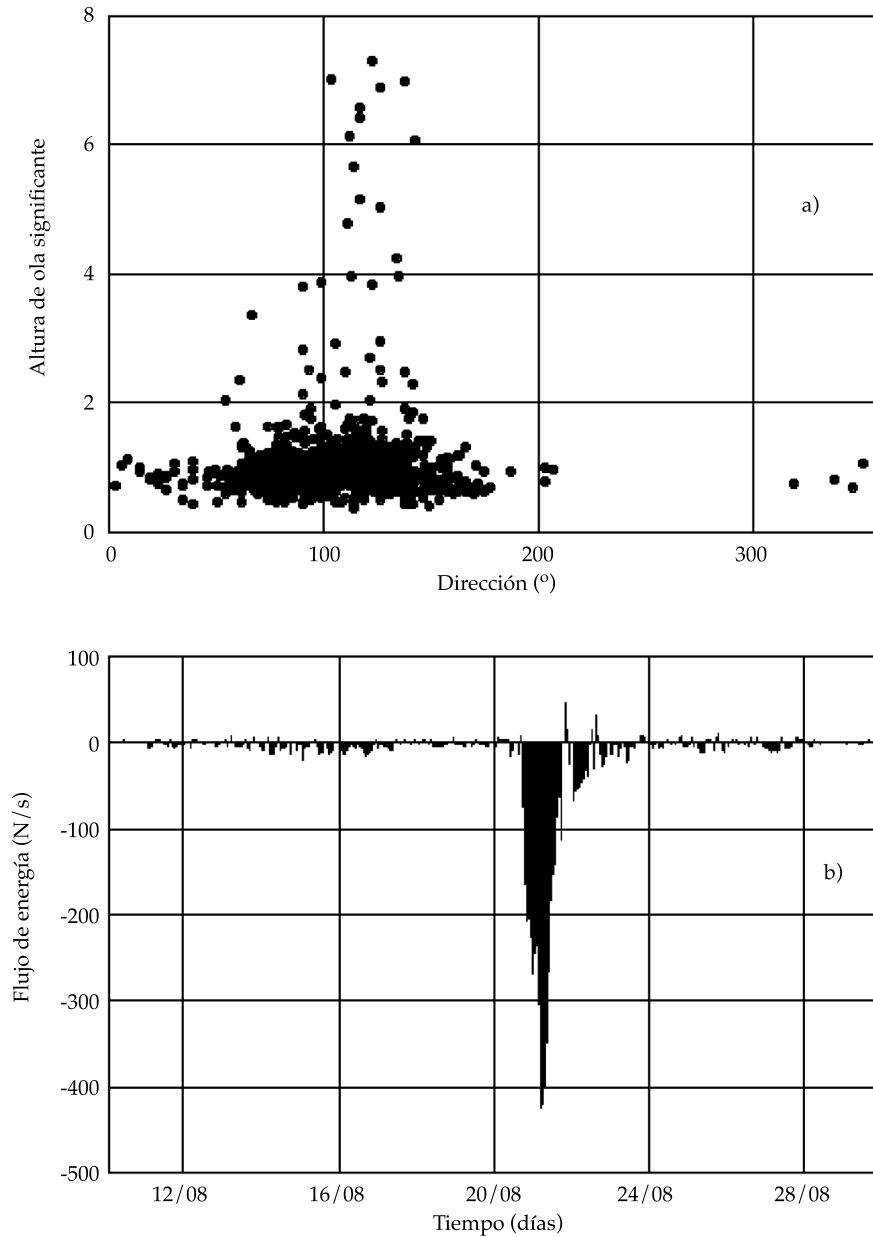


Figura 10. Dirección de incidencia del oleaje (a) y flujo de energía (b) provocados por el huracán.

oleaje local. Veinticuatro horas después (panel “b” de la figura 11), el meteoro se encontraba mucho más cerca de la zona de medición, por lo que el espectro manifiesta una gama de frecuencias mucho más ancha (de 5 a 16 s) con cinco picos muy energéticos y casi nula energía en altas frecuencias. Las direcciones del oleaje generado por el huracán cubren prácticamente

todo el segundo cuadrante con predominancia del sureste, como se mostró en la figura 10. El día 22 de junio, cuando el huracán ya había cruzado la península de Yucatán, el oleaje registrado por el ADCP seguía mostrando características de oleaje tipo *sea*, con periodos entre 3 y 10 segundos, aunque ya con mucho menos energía. Las direcciones seguían

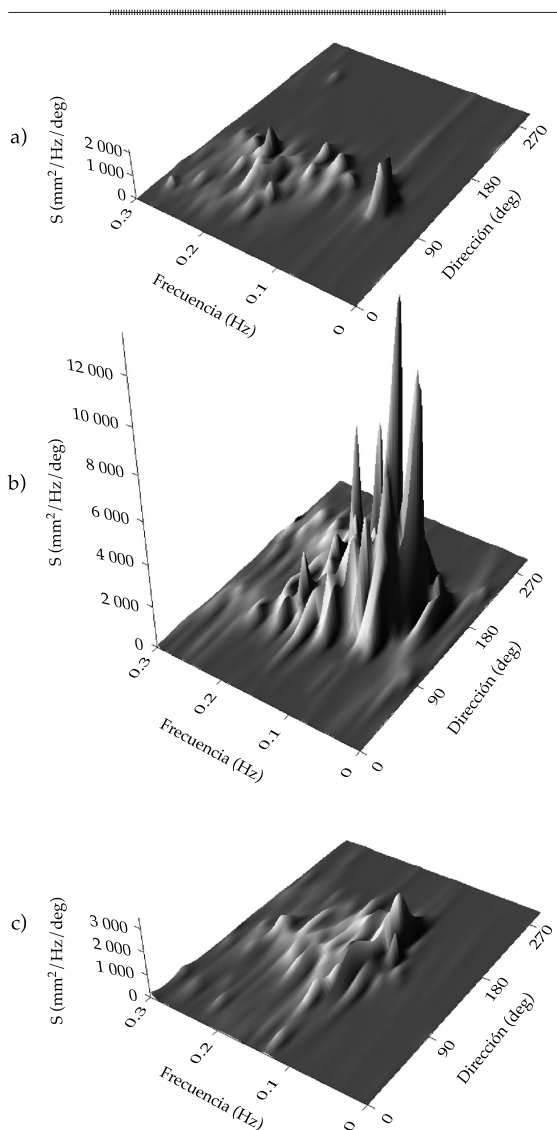


Figura 11. Espectros direccionales registrados a las 10:00 h de los días 20, 21 y 22 de agosto de 2007.

llegando del segundo cuadrante del meteoro, ahora con un poco más de predominancia sur.

El equipo ADCP también registró la dirección y velocidad de las corrientes marinas. En la figura 12 se presenta la rosa de las corrientes medidas en todo el verano (del 12 de junio al 3 de septiembre) y su comparación con las obtenidas sólo durante el paso del huracán *Dean*.

En la figura 12 se observa que las corrientes en todo el verano (panel izquierdo) se mueven

paralelas a la costa en ambos sentidos, es decir, en direcciones noreste y suroeste, con una ligera predominancia hacia el suroeste. Por su parte, durante el paso del huracán *Dean*, la corriente es casi únicamente hacia el suroeste, lo cual indica un claro transporte de la masa de agua en esa dirección y, por consecuencia, es la probable dirección del transporte de sedimentos. Como se puede apreciar, el oleaje viene del sur, pero las corrientes generadas por el viento del huracán vienen del norte y como resultado ambos procesos se superponen. Sin embargo, como es de esperar en la playa, el transporte sedimentario estuvo dominado por el oleaje, generándose movimientos en las direcciones perpendicular y paralela a la costa.

Al respecto, los cambios morfodinámicos inducidos por los efectos del huracán en el frente de playa de Cancún se analizarán a partir de la información disponible de los perfiles batimétricos de la playa representativos de cada sector (Félix, 2007) antes y después del paso de huracán, es decir, en abril de 2007 y febrero de 2008, respectivamente.

La selección de los perfiles utilizados para el análisis se realizó siguiendo como criterio principal su localización hacia el centro de cada sector; su ubicación se muestra en la figura 1. El uso de estos perfiles, en los que sólo se considera la parte sumergida, es válida, puesto que de acuerdo con Dean y Dalrymple (2002), el segmento más dinámico del perfil de la playa es la zona de lavado y sus proximidades, donde tienen lugar modificaciones de ciclo diario, mensual, estacional, anual e hiperanual, producto de las condiciones habituales de oleaje. Sin embargo, las condiciones hidrodinámicas habituales no alcanzan a modificar las dunas ni regiones profundas del relieve submarino. Por su parte, Van Rijn (2009) indica que sólo durante la ocurrencia de condiciones hidrodinámicas extremas es que el oleaje alcanza a erosionar las dunas y a provocar modificaciones en zonas profundas del relieve submarino, pero la profundidad a que ocurren las modificaciones depende de

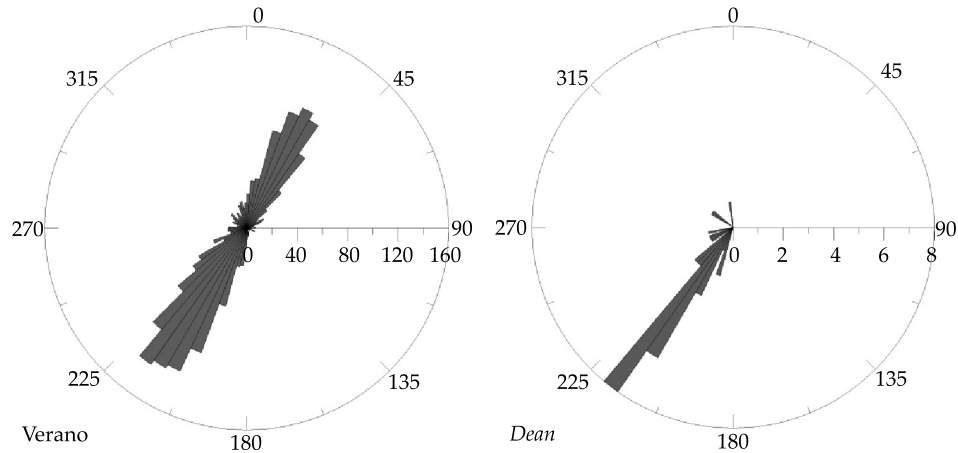


Figura 12. Rosa de corrientes superficiales registradas durante junio, julio y agosto de 2007 (izquierda) y las registradas al paso del huracán *Dean* (derecha).

las características del oleaje de la tormenta en cuestión (Vellinga, 1986). Es por ello que para evaluar el impacto erosivo sobre una playa de una tormenta tanto Van Rijn (2009) como Vellinga (1986) proponen como indicadores del mismo el análisis cuantitativo de los cambios en las dunas y en el relieve submarino, pues son los cambios que permanecen mayor tiempo en el sistema. En el caso de Cancún no existen dunas, por estar ocupado su espacio por el desarrollo turístico, por tanto sólo queda la alternativa de evaluar los impactos de condiciones hidrodinámicas extremas a partir de los cambios en el relieve submarino. Además, en el periodo comprendido entre las dos batimetrías utilizadas como referencia para el presente estudio, el único evento con oleaje extremo registrado fue el huracán *Dean*.

En las figuras 13 a 15 se presentan los perfiles antes mencionados. Con el fin de observar de manera más detallada las alteraciones morfológicas ocurridas en cada sector, la figura 16 presenta las curvas de variación de la profundidad en cada perfil como resultado del impacto del huracán.

El análisis de los perfiles revela que el comportamiento de las secciones 1 a 5 es el típico comportamiento de una playa sujeta a condiciones de tormenta, donde las barras de

arena tienden a migrar hacia afuera de la costa debido al energético transporte perpendicular a la playa.

En el sector 1, la máxima variabilidad de la profundidad se concentra alrededor de los 500 m y es acumulativa. En el caso del sector 2 hay dos zonas de alta variabilidad: una erosiva cercana a los 300 m y otra acumulativa cercana a los 550 m. En este sector se produjo una erosión relativamente uniforme, de alrededor 1 m, en los primeros 200 m desde la línea de costa (figura 13), luego en los siguientes 300 m se registró una acumulación igualmente de casi 1 m de ancho. Al comparar los perfiles antes y después del meteoro, se podría pensar que en este sector sólo se presentó transporte transversal que llevó el material de la parte alta de la playa a la parte baja; sin embargo, y de nuevo dada la dirección de las corrientes, si se considera que el transporte longitudinal fue importante, dicha hipótesis no puede aceptarse como el comportamiento único del perfil. Por otra parte, en este sector sí se observa un retroceso de la línea de costa cercano a 17 m.

En el sector 3 se identifican claramente dos mínimos erosivos contiguos: uno a los 280 m y el otro a los 350 m. Igualmente claros se presentan dos máximos acumulativos: el

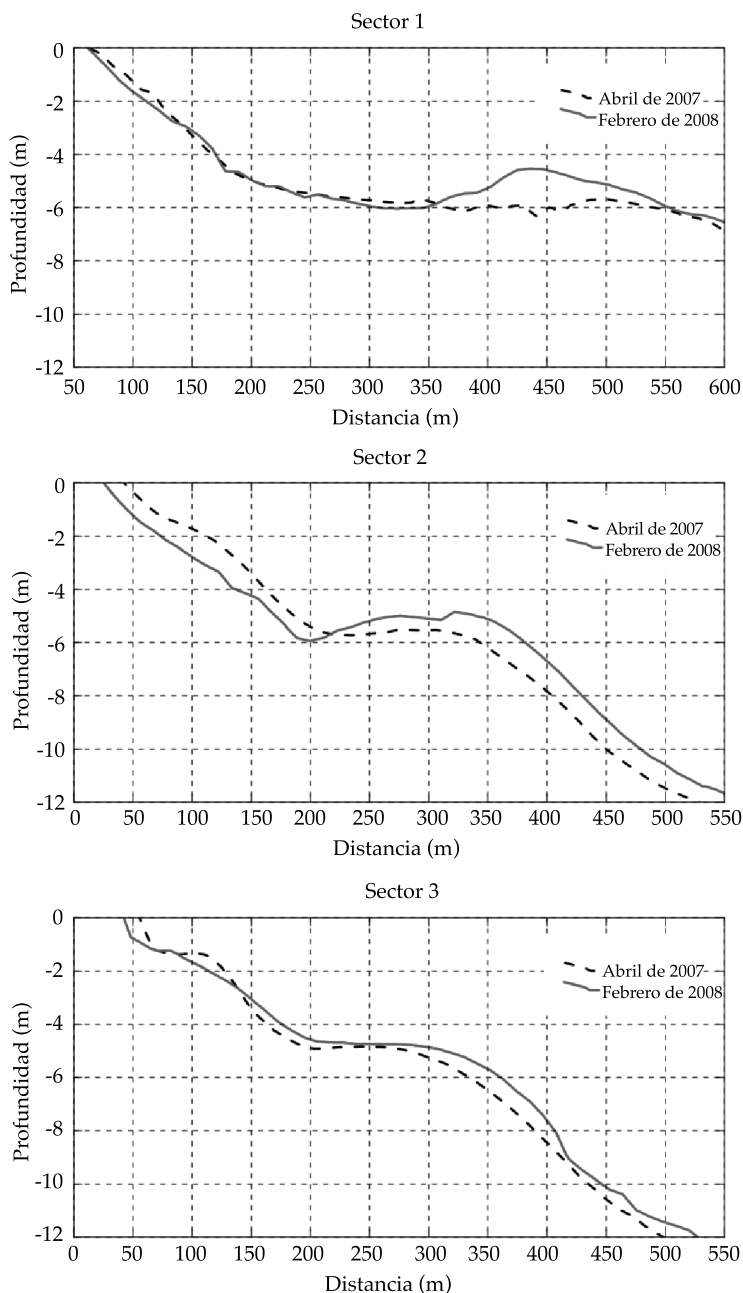


Figura 13. Variaciones de perfil de playa en los sectores 1, 2 y 3.

primero sobre los 400 m y el segundo sobre los 600 m. En este sector tuvo lugar un retroceso de la línea de costa de aproximadamente 13 m, como se puede observar en la figura 13. Es notorio también un suavizado general del perfil que, en su parte alta, sufrió el

aplanamiento de una barra arenosa, mientras que en la parte baja se observa una ligera acumulación de sedimento.

En el sector 4, la variabilidad es predominantemente positiva, con un máximo absoluto sobre los 550 m. Con un comportamiento muy

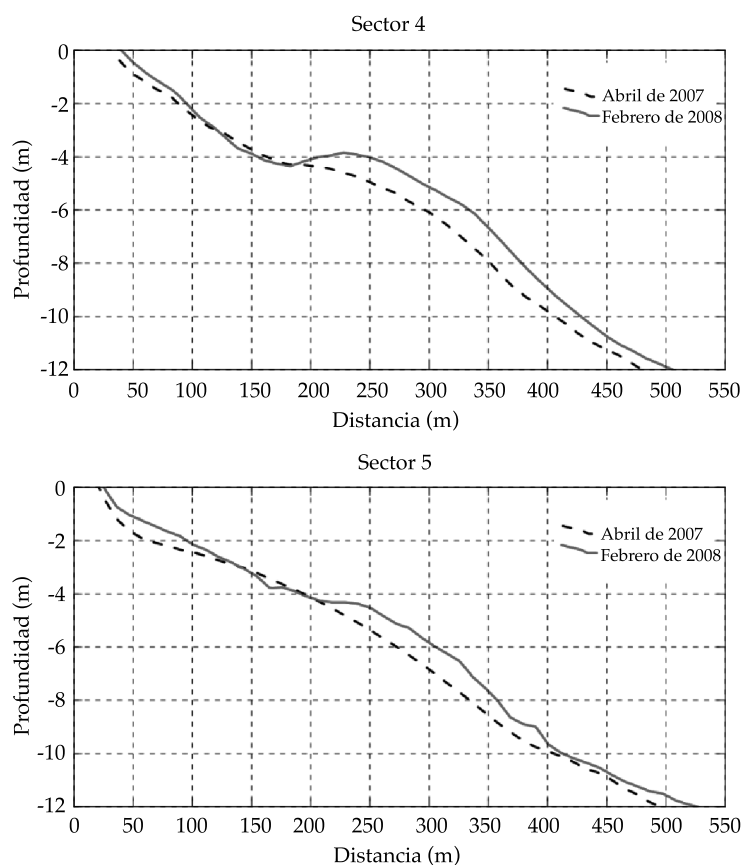


Figura 14. Variaciones del perfil de playa en los sectores 4 y 5.

similar se presenta el sector 5. En estos sectores, ubicados en la zona central de la playa, se produjo una notoria acumulación de arena en la parte baja del perfil (figura 14) al grado de que, en algunas zonas, el perfil se elevó cerca de 1 m. Como ya se había anticipado, estos sectores corresponden a la parte más estable del frente de playa de Cancún, luego no es extraño que sean estos dos perfiles los que menor erosión sufrieron e incluso que en el perfil de febrero de 2008 muestren un ligero avance de playa seca.

En el sector 6, la variabilidad es muy escasa. En el caso del sector 7, al igual que ocurría con el 6, la variabilidad es escasa, salvo un ligero máximo a la altura de 550 m. En estos sectores (figura 15), el relieve submarino se mantuvo sin cambios notables, lo cual coincide con la dirección del transporte longitudinal

provocado por el huracán (hacia el sur) y con la protección natural que punta Nizuc ofrece a estos dos sectores.

En resumen, los cambios morfológicos más relevantes los sufrieron los sectores al norte del frente de playa (1 al 3). Es de notar que el proceso más recurrente fue el depósito de material en la parte baja del perfil, por lo que la percepción desde tierra fue la pérdida de playa seca, es decir, erosión.

La curva calculada de la variabilidad media de relieve submarino indica que en los primeros 400 m, la misma es escasa; a partir de ese punto comienza un incremento progresivo de la variabilidad hasta llegar a un máximo sobre los 550 m, desde donde comienza a decrecer de manera paulatina.

Evidencia clara de un transporte perpendicular se encuentra solamente en el sector

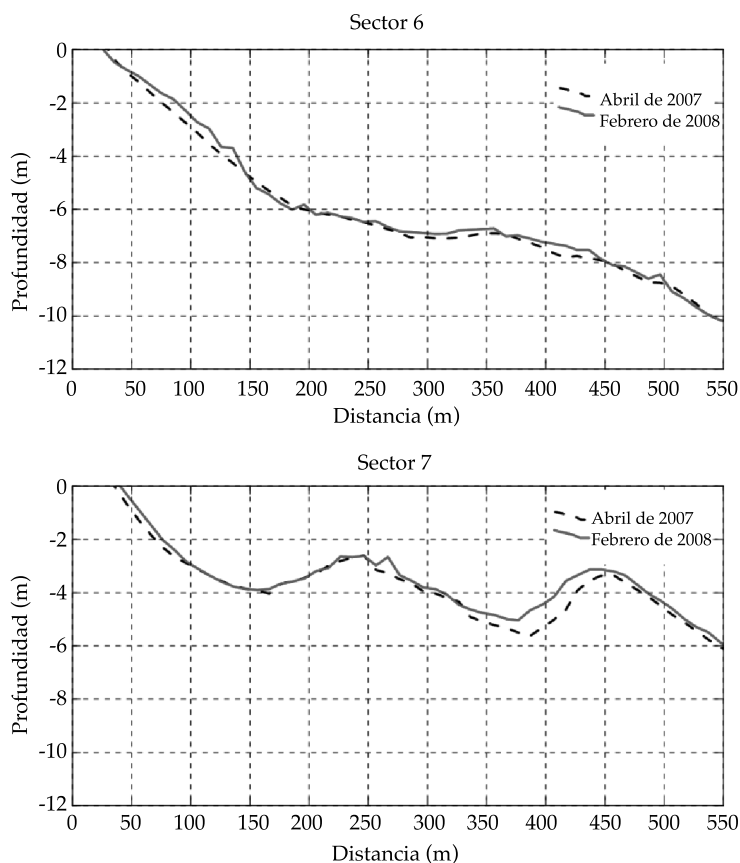


Figura 15. Variaciones del perfil de playa en los sectores 6 y 7.

2, donde es notoria la erosión ocurrida en la cara del perfil y la migración hacia el mar de la barra de arena, donde se acumuló más material. La excepción a este comportamiento es el sector 6, donde los cambios en el perfil batimétrico son pocos, y en el sector 7, que tiene dos barras de arena. De manera peculiar, este último perfil muestra migración hacia la costa de la barra externa ubicada a 600 m de la línea de costa, cerca de 100 m más lejos que las barras de los otros sectores. Este comportamiento ha sido reportado anteriormente en las costas de Duck, Carolina del Norte, en Estados Unidos, para barras externas durante tormentas (Lippmann *et al.*, 1993; Miller *et al.*, 1999). El proceso responsable es la asimetría del oleaje, que acarrea la arena hacia la costa y provoca

que la barra migre hacia la costa, a pesar de las energéticas condiciones hidrodinámicas.

Es de notar que no se incluye en el análisis la información de los cambios en la playa seca, pero se puede suponer que el material que formó las barras debe haberse transportado en su mayor parte en forma perpendicular a la playa desde esta zona, aunque tampoco se descartan los aportes generados por el transporte longitudinal a la playa proveniente de otros sectores.

Como se describió antes, el estado que guardaba la playa de Cancún cuando se presentó el huracán *Dean* era un sistema en transición, dado el volumen de material vertido unos meses antes, y por tanto en pleno ajuste a las nuevas propiedades sedimentológicas derivadas del relleno. Aunado a esto, el

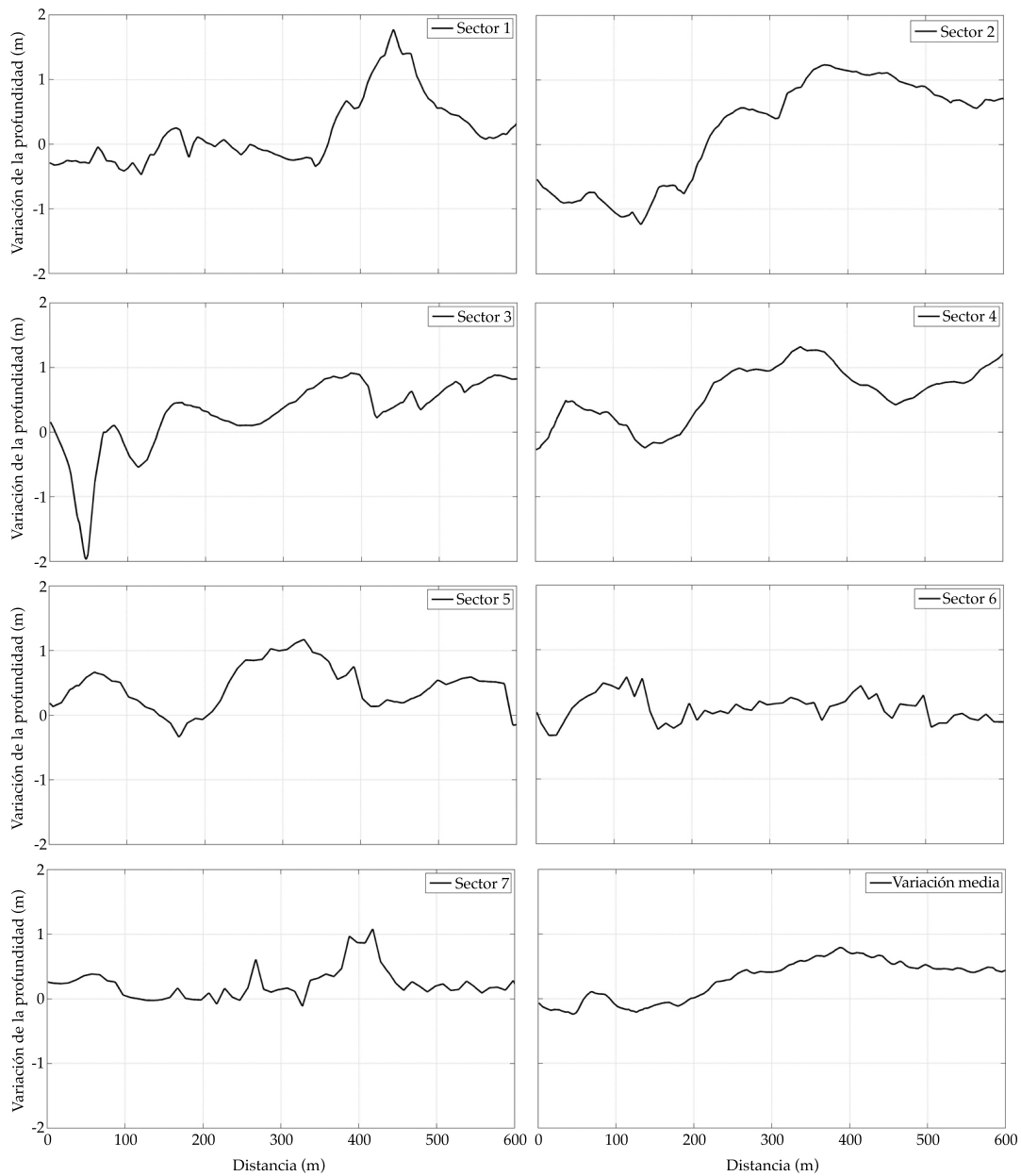


Figura 16. Variabilidad de la profundidad, con la distancia de los perfiles en cada uno de los sectores y variabilidad media.

material del relleno, cuya forma era alejada de la esfericidad, resultó de más fácil arrastre que el sedimento nativo y el resultado fue una erosión de la playa seca que, posiblemente, hubiera sido de menor cuantía con otro tipo de material más compatible con el original.

Para cuantificar globalmente los cambios morfológicos que se observaron en la playa a

partir de las mediciones del relieve submarino realizadas antes y después de la tormenta, se calcularon las variaciones volumétricas totales de los perfiles de playa. En la figura 17 se presenta el resultado del cálculo de los volúmenes de arena removidos, en este caso los perdidos y los ganados para cada perfil a lo largo de los siete sectores en que se ha dividido

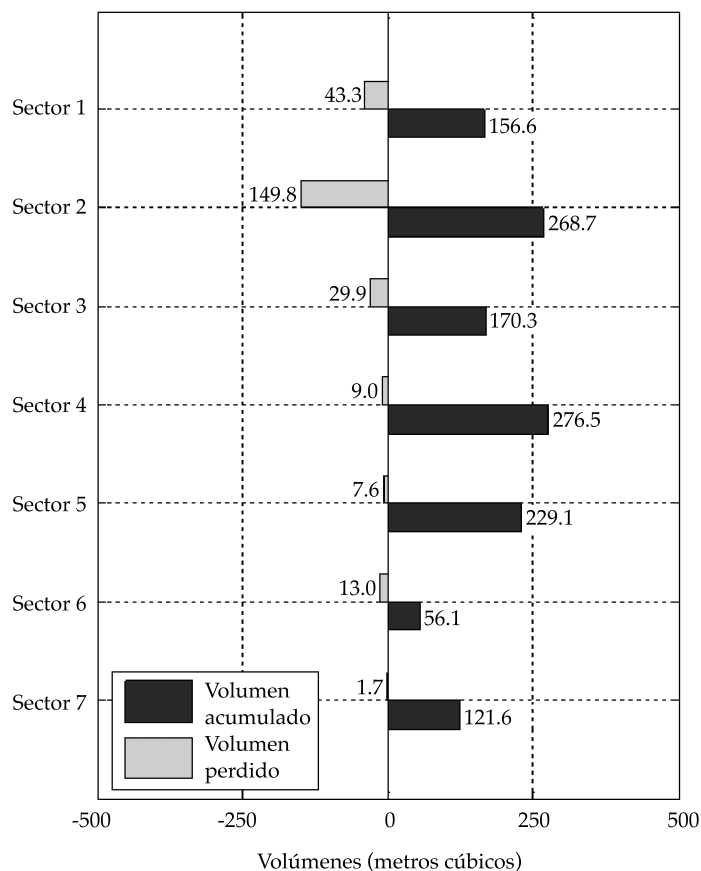


Figura 17. Volúmenes de arena acumulados y perdidos a lo largo de toda la playa.

la playa. Nótese que en cuanto al volumen total movido, el sector 2 es el que revela la mayor dinámica. Como se puede apreciar, los mayores volúmenes perdidos se localizan hacia el norte de la playa, decreciendo hacia el sur hasta llegar a ser casi despreciables en el sector 7. Por su parte, las mayores acumulaciones tienen lugar hacia el centro del sistema playero y decrecen igualmente hacia el sur. La diferencia entre el volumen acumulado y el volumen perdido es positiva para todos los sectores, lo cual indica que existe una acumulación neta de sedimentos sobre el perfil batimétrico. La multiplicación del volumen neto acumulado en cada sector por la longitud del mismo permite determinar el volumen neto acumulado sobre cada sector y la suma de cada uno de ellos constituye una estimación del volumen total acumulado

en el lecho marino, que es equivalente al volumen removido de la playa emergida. Con la realización de estos cálculos se estima un volumen neto removido de 1.8 millones de m^3 de arena.

Con el fin de situar el efecto del huracán en el contexto histórico reciente de Cancún, se revisó la tendencia general del ancho de playa seca entre mayo de 2006 y febrero de 2009. Esto se llevó a cabo comparando los anchos de playa medidos a partir de imágenes por satélite. Los anchos promedios correspondientes a cada sector representan la distancia promedio entre las curvas correspondientes a la línea de costa y el límite del desarrollo turístico. Por ello, cada distancia obtenida es representativa del ancho de playa en cada sector analizado. En la figura 18 se presenta la evolución de los

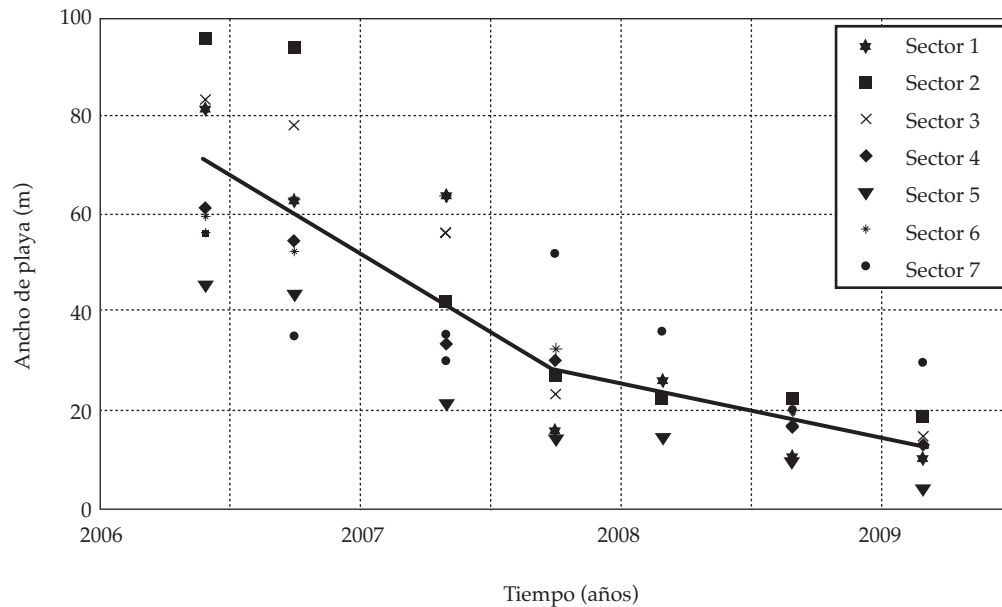


Figura 18. Evolución del ancho de playa en el periodo comprendido entre los años 2006 y 2009.

anchos de playa para cada sector desde mayo de 2006 hasta febrero de 2009, y en la misma figura se muestra la línea de tendencia de los valores medios en cada toma por satélite.

En todos los sectores, el ancho de playa ha tendido a disminuir, es decir, el comportamiento de la playa es hacia la erosión. En los primeros meses después de terminado el relleno (entre mayo y septiembre de 2006) se encontró una pérdida promedio de 8 m de playa, lo cual parecería un ritmo aceptable de reacomodo del material vertido y dicha pérdida debería tender a minimizar. Sin embargo, entre septiembre de 2006 y septiembre de 2007 se obtuvo una pérdida promedio de 29 m de playa, lo cual es resultado, evidentemente, de dos factores: el paso del huracán y deficiencias en el trabajo de relleno, como incompatibilidad del sedimento y posibles fallas en la etapa de construcción. Es imposible determinar cómo hubiera sido la distribución del relleno sin la ocurrencia del meteoro, pero sí se pueden delimitar dos extremos: por un lado, que el relleno se hubiera distribuido de forma paulatina, con

poca pérdida de material y derivado en una cierta estabilidad de la playa; el otro extremo es que el huracán provocó, en unas horas, lo que le hubiera sucedido de manera inevitable al relleno. El comportamiento de la playa luego del huracán parece verificar una condición más cercana al segundo extremo, ya que la tendencia erosiva continuó, y entre septiembre de 2007 y agosto de 2008 se perdieron otros 10 m de playa, y de agosto de 2008 a enero de 2009 se perdió un metro más. En efecto, la pérdida va en descenso, pero cabe señalar que el ancho de playa promedio en enero de 2009 es de apenas 14.5 m, muy lejos de los 60 m que se dejaron al finalizar el relleno y, salvo por el número 7, todos los sectores muestran pérdida de arena.

Conclusiones

La ocurrencia del huracán *Dean* en el frente playero de Cancún corresponde a la actuación de un evento extremo sobre un sistema altamente alterado y en proceso de adecuación. La construcción de infraestructura sobre las

dunas, el incremento en la rigidez de la barra arenosa y la ejecución de un relleno artificial con material poco compatible se distinguen como los principales focos de fragilidad de la playa, al grado que un evento climatológico que debió provocar daños menores, removió arena al grado que, en algunas zonas, el oleaje golpeó los paramentos de los hoteles.

El huracán *Dean* registró un oleaje máximo de 7.32 m de altura significativa y periodo pico de 16 s, generando un estado energético y de corrientes que, en el frente de playa de Cancún, dirigieron el transporte de sedimentos de norte a sur. Estas condiciones hidrodinámicas provocaron alteraciones en la morfología de la playa de Cancún, interpretadas a partir de la comparación de los perfiles del relieve antes y después del huracán. Dicha comparación reveló que en los sectores 1, 2 y 3, ubicados en el extremo norte del sistema, se produjeron las mayores afectaciones; en los perfiles representativos de estos sectores se registraron retrocesos de la línea de costa y se formaron barras submarinas. En los sectores 4 y 5, al centro de la playa, se observan signos de acumulación, que se manifiestan mediante un ligero avance hacia el mar de la línea de costa y la elevación de los niveles del relieve submarino. En los sectores 6 y 7, ubicados en el extremo sur de la playa, no se verificaron cambios significativos.

El análisis realizado indica la presencia de un proceso erosivo permanente en la playa, como se demostró vía el procesamiento de fotografía por satélite histórica. La relevancia turística del sitio hizo posible la ejecución de un relleno artificial que no tuvo el éxito y funcionamiento esperados. Sin duda alguna, la ocurrencia del huracán *Dean* influyó de manera significativa en el ritmo de pérdidas del material del relleno; pero, a la vez, evidenció las deficiencias del mismo.

Recibido: 10/10/11

Aceptado: 20/03/12

Referencias

- BALDERAS, O. *Barómetro Turístico. Cancún, Quintana Roo. Diciembre 2009* [en línea]. Asociación de Hoteles de Cancún/ACTI, México, 2009. Disponible en la *World Wide Web*: <http://www.acticonsultores.com>.
- DEAN, R. and DALRYMPLE, R. *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge: Cambridge University Press., 2002, 475 pp.
- FÉLIX, A. *Análisis de la dinámica geomorfológica de la zona hotelera de Cancún como contribución al desarrollo de un Plan de Manejo Costero*. Tesis de maestría. Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche, 2007, 137 pp.
- FRANKLIN, J.L. *Tropical Cyclone Report Hurricane Dean*. National Hurricane Center, NOAA, 2008. *World Wide Web*: http://www.nhc.noaa.gov/pdf/TCR-AL042007_Dean.pdf.
- GONZÁLEZ, R., MEDINA, M., and LOSADA, M.A. Equilibrium beach profile model for perched beaches. *Coastal Engineering*. Vol. 36, 1999, pp. 343-357.
- LIPPMANN, T.C., HOLMAN, R.A., and HATHAWAY, K.K. Episodic, nonstationary behavior of a double bar system at Duck, N.C. USA, 1986-1991. *Journal of Coastal Research*. Vol. 15, 1993, pp. 49-75.
- MILLER, H.C., SMITH, S.J., HAMILTON, D.G., and RESIO, D.T. Cross-shore transport processes during onshore bar migration. *Proceedings of Coastal Sediments'99*. Long Island, USA; ASCE,, 1999, pp. 1065-1080.
- MORÁN, D.K., SALLES, P., SÁNCHEZ, J.C., and ESPINAL, J.C. Beach nourishment evolution in the Cancun beach, Quintana Roo, Mexico. *Proceedings of Coastal Sediments '07*. ASCE, New Orleans, 2007, 13 pp.
- PEDROZO, D. *Respuesta hidrodinámica del Sistema Lagunar Nichupté, Cancún, México*. Tesis de maestría. México, D.F.: Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008, 149 pp.
- RUIZ, G. *Determinación del estado morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos*. Tesis de doctorado. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010, 668 pp.
- SILVA, R. et al. *Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Atlántica Mexicana*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
- SILVA, R., MARIÑO, I., ENRIQUEZ, C., MENDOZA, E., ESCALANTE, E., and RUIZ, F. Monitoring shoreline changes at Cancun beach, Mexico: effects of hurricane Wilma. Word Scientific Publishing ICCE. *Coastal Engineering*. Vol. 4, 2006, pp. 3491-3503.
- VAN RIJN, L.C. Prediction of dune erosion due to storms. *Coastal Engineering*. No. 56, 2009, pp. 441-457.
- VELLINGA, P. Beach and dune erosion during storm surges. *Delft Hydraulics Communications*. No. 372, 1986, 200 pp.

Abstract

MARTELL-DUBOIS, R., MENDOZA-BALDWIN, E., MARIÑO-TAPIA, I., SILVA-CASARÍN, R. & ESCALANTE-MANCERA, E. *Short-term impact of Hurricane Dean on the morphology of the beach at Cancun, Mexico*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 4, October-December, 2012, pp. 89-111.

Over the last 30 years, the Mexican Caribbean beach at Cancun, Quintana Roo has experienced such severe erosion that two artificial sand replenishment programs have been needed. The aim of this study is to determine the short-term impact of Hurricane Dean on the morphology of the already modified beach system of Cancun, after the first replenishment in 2006. The combined analysis of the evolution of the coastline, by comparing beach profiles, and the characteristics of the local maritime climate generated by the hurricane allowed for the evaluation of the hurricane's impact on the study area. As a result of this analysis it was found that Hurricane Dean caused large losses of sand in the northern and central sectors of the beachfront during 2006-2007. It was also shown that during that period the Cancun beaches lost 31 m in width, overall. This significant retreat of the beach is attributed to the combined effects of the hurricane and the anthropogenic modifications of the coastal ecosystem.

Keywords: Hurricane Dean, artificial replenishment in Cancun, beach erosion, anthropogenic modification of beaches.

Dirección institucional de los autores

M.C. Raúl Martell Dubois

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de
Ecología y Sistemática, Cuba
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación
Coyoacán
04510 México D.F., MÉXICO
Teléfono +52 (55) 5623 3600, extensión 8627
Fax: +52 (55) 5616 2164
RMartellD@iingen.unam.mx

Dr. Edgar Mendoza Baldwin

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación
Coyoacán
04510 México D.F., MÉXICO
Teléfono +52 (55) 5623 3600, extensión 8632
emendozab@iingen.unam.mx
emendozab@ii.unam.mx

Dr. Ismael Mariño Tapia

Centro de Investigación y Estudios Avanzados
Instituto Politécnico Nacional
Km. 6 antigua carretera a Progreso, Cordemex

97310 Mérida, MÉXICO
Teléfonos: +52 (999) 9429 400, 9429 458
Fax: +52 (999) 9812 923
imarino@mda.cinvestav.mx

Dr. Rodolfo Silva Casarín

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación
Coyoacán
04510 México D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5623 3668
Fax: +52 (55) 5616 2164
rsilvac@iingen.unam.mx

M.C. Edgar Escalante Mancera

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Estación Puerto
Morelos
Universidad Nacional Autónoma de México
Prol. Av. Niños Héroes s/n, domicilio conocido
77580 Puerto Morelos, Quintana Roo, MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5622 6546 al 49, extensión 189
escalant@cmarl.unam.mx
eescala@gmail.com