



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

LABORATORIO DE INGENIERÍA Y PROCESOS COSTEROS

**EFFECTOS DE LA HIDRODINÁMICA EN UNA PLAYA ALIMENTADA  
ARTIFICIALMENTE**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
INGENIERÍA EN COSTAS Y RIOS

PRESENTA:

**JESÚS ARAGÓN GONZÁLEZ**

TUTOR

**Dra. CECILIA E. ENRÍQUEZ ORTIZ**  
FACULTAD DE CIENCIAS, SISAL

SISAL, YUCATÁN. NOVIEMBRE 2014



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Silva Casarín Rodolfo  
Secretario: Dr. Mariño Tapia Ismael de Jesús  
Vocal: Dra. Enríquez Ortiz Cecilia E.  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Torres Freyermuth Alec  
2<sup>do</sup>. Suplente: M. en C. Appendini A. Christian M.

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros. Sisal, Yucatán.

Instituto de Ingeniería, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. Enríquez Ortiz Cecilia E.

-----  
**FIRMA**

A Don Jesús y Doña Isabel, por la vida y el amor incondicional.

A Susy, Mane y René

A tía Cira.

# AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ingeniería por permitirme ser puma aunque haya nacido cimarrón.

El mayor de los agradecimientos a la Dra. Cecilia Enríquez por su confianza y dirección. Por toda la ayuda que me brindó para la realización de esta tesis.

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros por abrirme las puertas de tan noble institución. Mi más sincera gratitud al cuerpo de académicos e investigadores encabezados por el Dr. Paulo Salles, a los Doctores Alec Torres, Bernardo Figueroa, Tonatiuh Mendoza, José López y al M. en C. Christian M. Appendini, gracias por sus enseñanzas y apoyo en todo momento.

Al Consejo de ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico para llevar a cabo esta meta.

A Ismael Mariño por permitirme conocer el trabajo de campo.

A los doctores Rodolfo Silva Casarín, Ismael Mariño Tapia, Alec Torres Freyermuth y al M. en C. Christian M. Appendini por aceptar ser parte de mi jurado.

Agradezco a mis amigos estudiantes del LIPC, en especial a mis compañeros de cubo y de hogar, Daniel Pastrana, por las clases de Matlab, Alejandra Lira por los pastelitos, Pablo Ruiz por los monólogos infinitos. A mis camaradas sisaleñas Arantxa, Ari, Miri y Viri. A mis parceras Jennie y Estefany por la amistad que no tiene fronteras.

Poquito, poquito le agradezco a Leslie con E, gracias por tu cariño y por tu sonrisa que me llenó de felicidad.

A la comunidad de la Unidad Académica Sisal por todos los amigos que me brindó. El más sincero de los agradecimientos al pueblo de Sisal por esta grata experiencia, por tantos momentos inolvidables, por el mar y sus atardeceres, por demostrarme que la felicidad radica en la sencillez de la vida.

# RESUMEN

El presente trabajo se centra en el estudio de la hidrodinámica y morfodinámica de la playa de Cancún, Quintana Roo mediante el análisis de mediciones de campo y modelación numérica. Cancún ofrece áreas de esparcimiento con una alta demanda turística con implicaciones importantes en la derrama económica regional y nacional, sin embargo, el tipo de desarrollo de este destino turístico, propició que se hiciera rígida la barra de arena debido a la construcción de infraestructura sobre la duna costera, lo que impidió la dinámica sedimentaria natural del sistema, originando una erosión crónica de sus playas. Diversas intervenciones se han llevado a cabo para resolver el problema, sin dar una solución permanente. Esta contribución analiza la variación temporal y espacial del volumen sedimentario calculado a partir de mediciones de perfiles de playa antes y después de un relleno artificial. Mediante el análisis de datos de oleaje se caracteriza el clima marítimo de la región. El oleaje alimenta una serie de experimentos de modelación numérica para determinar los patrones de oleaje propagados a la playa de Cancún, las corrientes que resultan de las fuerzas del oleaje y el transporte sedimentario que resulta de esas corrientes. Esto se realiza utilizando el modelo numérico DELFT3D, acoplando el módulo de oleaje Delft3D-WAVE (SWAN) con el módulo hidrodinámico DELFT#D-FLOW e incorporando el modelo de transporte sedimentario. Se presentan los resultados que describen la dinámica costera de playas de Cancún y sus variaciones morfológicas en relación a las distintas condiciones del clima marítimo.

De los distintos análisis se observó que el oleaje incidente proviene principalmente de la dirección ESE y le sigue el oleaje del SE, con alturas significantes en un rango de 0.5 a 1 m y periodos de entre 5 y 10 segundos. Se observó que esta condición de oleaje reinante genera corrientes litorales con dirección hacia el Norte como se ha encontrado en estudios previos. En este estudio se encontró que además de generar corrientes hacia el norte, al propagarse a la playa de Cancún el oleaje del ESE, se genera un incremento en el nivel del agua generalizado (a lo largo de toda la playa) muy cercano a la línea de costa que genera un gradiente de presión importante y consecuentemente corrientes perpendiculares a la costa en dirección hacia el mar, tanto en la forma de corrientes de resaca (en la vertical) como a través de corrientes de retorno (en la horizontal).

A lo largo de la playa, se determinó un patrón de transporte sedimentario en dirección al norte en la zona central y norte de Cancún bajo la mayoría de condiciones de oleaje y principalmente en los casos de oleaje reinantes. Se observó un punto de erosión persistente y focalizado ubicado hacia la parte Sur de la playa de Cancún concordante con una mayor tasa de transporte sedimentario que se presenta en la misma zona. Del análisis de mediciones de la evolución de la playa posterior al relleno artificial del 2010 se encontró un sistema de escarpes de playa localizado en ciertas zonas de la playa y una disminución de volumen sedimentario (menor ancho de playa y decremento en elevación del perfiles) sugiriendo redistribución, asentamiento, consolidación y pérdida del material vertido.

# LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. A la izquierda se ubica Cancún como parte de la Península de Yucatán. A la derecha un acercamiento de la playa de Cancún. ....  | 10 |
| Figura 2. Localización de las cuatro zonas de medición de los perfiles de playa. De norte a sur: Zona I (Royal Sunset), Zona II (Playa Marlin), Zona III (Playa Delfines) y Zona IV (Sun Palace). El rombo en negro indica la posición del nodo de donde se obtuvieron los datos de oleaje del retro análisis de 30 años, descrito en la sección siguiente. ....  | 15 |
| Figura 3. GPS diferencial Base instalado en el techo de un hotel y GPS móvil utilizados en la medición de perfiles de playa. ....   | 15 |
| Figura 4. Mapa del Mar Caribe que muestra la ubicación de la boya 42056 de la NOAA, de donde fueron obtenidos los datos de oleaje utilizados para la validación del modelo numérico. ....   | 17 |
| Figura 5. Diagrama de flujo donde se muestra la interacción entre los diferentes modelos numéricos utilizados para este estudio. ....   | 18 |
| Figura 6. Malla escalonada utilizada por DELFT3D. Se muestra la celda computacional. En el centro de la celda se calcula el nivel de agua y la concentración de los constituyentes (salinidad, temperatura, transporte de sedimento). La profundidad se calcula en las esquinas de la celda computacional. ....   | 21 |
| Figura 7. Malla del modelo hidrodinámico y morfodinámico (izquierda) se especifica la condición utilizada para cada una de las fronteras. En la malla para el modelo de oleaje (derecha) se muestran las tres fronteras alimentadas con las características de oleaje. Para una mejor visualización de las mallas, en ambos casos solo se graficó uno de cada cinco puntos de malla. ....   | 22 |
| Figura 8. Dominio y batimetría de la zona de Cancún utilizada para el modelo de oleaje (izquierda) y para los modelos hidrodinámico y morfodinámico (derecha). ....   | 24 |
| Figura 9. Energía cinética total calculada a partir de los datos de corrientes generados en el modelo numérico que inicia en el reposo ante distintos pasos del tiempo. ....  | 26 |
| Figura 10. Rosa de oleaje (izquierda) y viento (derecha) generada a partir de los datos del retro análisis elaborado por Appendini et al. (2014) para los datos comprendidos entre los años 1979 a 2008, a una profundidad aproximada de 78m (localización en la Figura 2 de la sección de Metodología). ....   | 33 |
| Figura 11. <i>Altura significativa, período y dirección del oleaje en la región de Cancún entre los años 1979 a 2008. A una profundidad aproximada de 78m (localización en la Figura 2 en la sección de Metodología). Las figuras fueron generadas a partir de los datos del retro análisis elaborado por Appendini et al. (2014).</i> ....   | 34 |
| Figura 12. Diagramas de dispersión que relaciona la altura de ola y la dirección (arriba, izquierda), Período y dirección (arriba, derecha) y altura de ola y período (abajo, centro) para oleaje incidente en la región de Cancún entre los años 1979 a 2008. Las figuras fueron generadas con los datos de oleaje obtenidos del retro análisis de 30 años elaborado por Appendini et al. (2014). ....                           | 35 |
| Figura 13. Registro temporal de las características del oleaje. La línea roja indica la altura de ola significativa Los Puntos azules la dirección del oleaje. La figura muestra la localización temporal de las campañas de campo de medición de perfiles de playa (círculos de colores) y el período durante el que se realizó la alimentación artificial de playa, el cual se encuentra delimitado por los puntos azules. .... | 36 |
| Figura 14. Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona I durante los muestreos A (2009 06 08), antes del relleno de playa y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa. Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros. ....  | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 15. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) en la Zona I para cada campaña de medición: A (2009 06 08), antes del relleno y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa.....   | 38 |
| Figura 16. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona I. Se observan escarpes en los perfiles de las campañas B, C y D, posteriores al relleno de playa. ....  | 39 |
| Figura 17. Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona II durante los muestreos A (2009 06 08), antes del relleno de playa y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa). Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros..... | 40 |
| Figura 18. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) en la Zona II para cada campaña de medición: A (2009 06 08), antes del relleno y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa.....  | 40 |
| Figura 19. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona I. Se observan escarpes en los perfiles de las campañas B, C y D, posteriores al relleno de playa. ....  | 41 |
| Figura 20. Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona III durante los muestreos A (2009 06 08) y B (2009 12 08) antes del relleno de playa, C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa. Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros.....  | 42 |
| Figura 21. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) para cada campaña de medición correspondiente a la Zona III. ....  | 42 |
| Figura 22. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona III. ....  | 44 |
| Figura 23. . Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona IV durante los muestreos A (2009 06 08), B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08). Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros. ....  | 45 |
| Figura 24. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) para cada campaña de medición correspondiente a la Zona IV.....  | 45 |
| Figura 25. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona IV. ....   | 46 |
| Figura 26. Patrones de balance de sedimentos en la zona I de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.....  | 47 |
| Figura 27. Patrones de balance de sedimentos en la zona II de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.....   | 48 |
| Figura 28. Patrones de balance de sedimentos en la zona III de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.....  | 49 |
| Figura 29. Patrones de balance de sedimentos en la zona IV de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.....   | 50 |
| Figura 30. Condiciones de oleaje para el periodo comprendido entre el muestreo C (24/03/2010) y el muestreo D (08/06/2010). Los datos fueron obtenidos de las mediciones de la boya 42056 de la NOAA. ....  | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31. Rosa de oleaje de los datos obtenidos de la boya 42056 de la NOAA, para la temporada comprendida entre las campañas C y D. ....   | 53 |
| Figura 32. Propagación de oleaje proveniente del Norte (izquierda) y proveniente del ESE (derecha). La barra de colores indica la altura en metros.....  | 57 |
| Figura 33. Corrientes generadas por oleaje del Norte $I_t=6$ horas, $H_s=0.8$ m, $T_p=7$ s y $Dir=6^\circ$ . Componente perpendicular a la costa (izquierda), los valores positivos indican dirección hacia el mar y los negativos dirección hacia la costa. Componente paralela a la costa (medio), los valores positivos indican dirección hacia el Norte y los valores negativos hacia el Sur. Transporte de sedimento generado por dichas corrientes (derecha) expresado en $m^3/s/m$ y los vectores del transporte escalado 3 veces. .... | 57 |
| Figura 34. Corrientes generadas por oleaje del ESE $I_t=10$ horas, $H_s=1$ m, $T_p=8$ s y $Dir=114^\circ$ . Componente perpendicular a la costa (izquierda), los valores positivos indican dirección hacia el mar y los negativos dirección hacia la costa. Componente paralela a la costa (medio), los valores positivos indican dirección hacia el Norte y los valores negativos hacia el Sur. Transporte de sedimento generado por dichas corrientes (derecha) expresado en $m^3/s/m$ y los vectores del transporte escalado 3 veces. ....  | 58 |
| Figura 35. Cambios morfológicos inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. ....  | 59 |
| Figura 36. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.....   | 61 |
| Figura 37. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.....   | 61 |
| Figura 38. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.....   | 62 |
| Figura 39. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.....   | 62 |
| Figura 40. Propagación de oleaje proveniente del NE (izquierda) y del Este (derecha) hacia la playa de Cancún. La barra de colores indica la altura en metros.....   | 65 |
| Figura 41. Propagación de oleaje proveniente del SE (izquierda) y del Sur (derecha) hacia la playa de Cancún. La barra de colores indica la altura en metros.....  | 67 |
| Figura 42. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y los valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes  |    |

|  |    |
|--|----|
| perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y los valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s. ....   | 69 |
| Figura 43. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes litorales perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s. .... | 71 |
| Figura 44. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes litorales perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s. .... | 72 |
| Figura 45. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes litorales perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s. .... | 74 |
| Figura 46. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s. ....           | 75 |
| Figura 47. Corrientes generadas por el oleaje reinante proveniente del ESE de 1 m de Hs y Tp de 10 s. Se presentan solamente 1 de cada 13 vectores y únicamente las velocidades desde la línea de costa y hasta la isóbata de los 5 metros. La sección a corresponde a la zona Sur, la sección b a la zona central y la sección c a la zona Norte de la playa. ....  | 76 |
| Figura 48. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica. ....   | 78 |
| Figura 49. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica. ....   | 79 |
| Figura 50. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica. ....   | 80 |
| Figura 51. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica. ....   | 81 |
| Figura 52. Batimetría inicial de los experimentos correspondientes a la evolución de rellenos artificiales: Relleno "real" medido in situ (Validación), Relleno sintético de magnitud moderada y perfil  |    |

|   |    |
|---|----|
| medianamente reflectivo (Relleno 1) y relleno sintético intensivo (Relleno 2). Para mayor claridad se muestran solo la isóbata de los 5 metros. ....  | 84 |
| Figura 53. Comparación de los perfiles de las propuestas de relleno sintético y la batimetría base. El perfil corresponde a un transecto en la parte central de la playa. ....  | 84 |
| Figura 54. Batimetrías resultantes de la hidrodinámica simulada con las condiciones establecidas en la Validación.....  | 85 |
| Figura 55. Patrón de transporte de sedimento generado por las corrientes por oleaje para las propuestas de relleno 1 (izquierda) y relleno 2 (derecha) expresado en $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. ....   | 86 |
| Figura 56. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente oleaje para las propuestas de relleno 1 (izquierda) y relleno 2 (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica. .... | 87 |

# LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Direcciones seleccionadas para incluir en los experimentos numéricos y validación del modelo, obtenidas a partir del análisis de las características del oleaje en la sección anterior. Los experimentos numéricos serán descritos a detalle en la Tabla 2 ..... | 17 |
| Tabla 2. Oleajes para los experimentos numéricos. ....  | 31 |
| Tabla 3. Anchos de playa para la zona I (Royal Sunset) obtenidos para cada uno de los muestreos en la Zona I. ....  | 38 |
| Tabla 4. Anchos de playa para la zona de Playa Marlín (II) obtenidos para cada uno de los muestreos de la Zona II. ....   | 41 |
| Tabla 5. Anchos de playa para la zona de Playa Delfines (III) obtenidos para cada uno de los muestreos en la Zona III.....  | 43 |
| Tabla 6. Anchos de playa para la zona de Sun Palace (IV) obtenidos para cada uno de los muestreos en la Zona IV. ....   | 46 |
| Tabla 7. Volumen de sedimento en m <sup>3</sup> para cada una de las zonas en las cuatro campañas. ....   | 51 |
| Tabla 8. Balance de sedimento en m <sup>3</sup> en cada zona para las cuatro campañas. Los valores positivos indican ganancia de sedimento, mientras que los valores negativos indican erosión. ....  | 51 |
| Tabla 9. Parámetros de oleaje alimentados en las fronteras marinas para el escenario de validación del modelo morfodinámico de playas de Cancún. ....   | 55 |

# INDICE

|   |            |
|---|------------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>                                  | <b>III</b> |
| <b>RESUMEN</b>  | <b>III</b> |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>                                 | <b>IV</b>  |
| <b>LISTA DE TABLAS</b>                                  | <b>IX</b>  |
| <b>INDICE</b>   | <b>X</b>   |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                  | <b>1</b>   |
| 1.1. CONCEPTOS BÁSICOS                                  | 3          |
| 1.5. ANTECEDENTES                                       | 7          |
| 1.2. OBJETIVOS  | 8          |
| 1.3. METAS  | 8          |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN                                      | 9          |
| <b>2. ÁREA DE ESTUDIO</b>                               | <b>10</b>  |
| 2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA                               | 10         |
| 2.2. ORIGEN GEOLÓGICO                                   | 11         |
| 2.3. CARACTERÍSTICAS SEDIMENTARIAS                      | 12         |
| 2.4. CLIMA MARÍTIMO, CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS     | 12         |
| <b>3. METODOLOGÍA</b>                                   | <b>13</b>  |
| <b>3.1. TOPOGRAFÍA.</b>                                 | <b>13</b>  |
| 3.1.1. TOMA DE DATOS                                    | 13         |
| 3.1.2. PROCESAMIENTO DE DATOS                           | 13         |
| <b>3.2. OLEAJE Y VIENTO</b>                             | <b>16</b>  |
| 3.2.1. OBTENCIÓN DE DATOS                               | 16         |
| 3.2.2. ANÁLISIS DE DATOS                                | 16         |
| <b>3.3. MODELOS NUMÉRICOS</b>                           | <b>18</b>  |
| 3.3.1. MODELO DE OLEAJE                                 | 18         |
| 3.3.2. MODELO HIDRODINÁMICO                             | 19         |
| 3.3.3. MODELO MORFODINÁMICO                             | 20         |
| 3.3.4. DATOS DE ENTRADA                                 | 21         |
| 3.3.5. PRUEBAS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DEL MODELO | 25         |
| 3.3.6. PARÁMETROS FÍSICOS DEL MODELO DE OLEAJE          | 27         |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.7. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS _____                       | 28        |
| 3.3.8. PARÁMETROS MORFODINÁMICOS _____                       | 29        |
| 3.3.9. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS _____                          | 30        |
| <b>4. RESULTADOS _____</b>                                   | <b>33</b> |
| <b>4.1. OLEAJE Y VIENTO _____</b>                            | <b>33</b> |
| <b>4.2. MORFOLOGÍA _____</b>                                 | <b>35</b> |
| 4.2.1. VARIACIONES EN LOS ANCHOS DE PLAYA _____              | 36        |
| 4.2.2. VOLUMEN SEDIMENTARIO Y BALANCE ENTRE TEMPORADAS _____ | 46        |
| <b>4.3. MODELOS NUMÉRICOS _____</b>                          | <b>51</b> |
| 4.3.1. VALIDACIÓN MODELO MORFODINÁMICO _____                 | 52        |
| 4.3.2. MODELO DE OLEAJE _____                                | 63        |
| 4.3.3. MODELO HIDRODINÁMICO. _____                           | 67        |
| 4.3.4. MODELO MORFODINÁMICO _____                            | 76        |
| <b>4.4. PROPUESTAS DE RELLENO ARTIFICIAL _____</b>           | <b>82</b> |
| <b>5. CONCLUSIONES _____</b>                                 | <b>89</b> |
| 5.1. CONSIDERACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS _____      | 91        |
| <b>6. REFERENCIAS _____</b>                                  | <b>92</b> |
| <b>7. ANEXOS _____</b>                                       | <b>95</b> |

# 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia muchas ciudades importantes se han establecido en zonas costeras, tanto para aprovechar los recursos naturales que el océano ofrece como fuente de alimento para la población y la creación de enseres de uso cotidiano, así como para utilizar los puertos en el transporte de mercancías y personas. En nuestros días, la explotación de los recursos marinos busca la industrialización a fin de extraer recursos energéticos como petróleo y gas, y la adquisición de minerales de origen marino.

De acuerdo a Creel (2003), del *Population Reference Bureau*, cerca de la mitad de la población mundial (aproximadamente 3 mil millones de personas) vive dentro de los 200 km de franja costera, el promedio de la densidad poblacional en las zonas costeras es de 80 personas por kilómetro cuadrado, el doble del promedio de la densidad de población mundial, 14 de las 17 ciudades más grandes del mundo están ubicadas en las áreas costeras de las cuales 11 se encuentran en Asia y dos quintas partes de las ciudades con población entre 1-10 millones están ubicadas cerca de la línea de costa. Por otro lado, Silva *et al* (20104) definen a las Zonas Costeras de Baja Elevación a todas aquellas áreas bajas contiguas a lo largo de la costa que se encuentran a menos de 10 metros sobre el nivel del mar y mencionan que a pesar de que solo representan el 1.8 % de las tierras mundiales, sin embargo, para el año 2010 cerca del 10% de la población mundial vivían en estas áreas con una densidad poblacional de 288 habitantes por km<sup>2</sup> y se espera un incremento de hasta 455 habitantes por km<sup>2</sup> para el 2100.

En lo referente a nuestro país, Gutiérrez de MacGregor (1999) reporta que en 1995, en México, más 12.5 millones de personas (cerca del 13 % de la población) vivían en localidades urbanas costeras (menos de 200 m de altitud). En el 2009 el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía) presenta un recuento de las ciudades y zonas metropolitanas costeras mexicanas de más de 100 mil habitantes que existían el año 2005, 9 en el las costas del Pacífico y 8 en las Costas del Golfo y el Caribe. De los 31 estados y un distrito Federal que conforman la República Mexicana, 17 de estos son costeros y en su totalidad cuentan con aproximadamente 11 500 km de línea de costa y presentan diferentes configuraciones costeras como: lagunas, estuarios, bahías, istmos, islas de barrera, entre otros. Esta variedad de ecosistemas son para el país de gran valor, no solo por su biodiversidad, sino porque, su belleza natural representa un atractivo para visitantes de todas partes del mundo. Esto ha propiciado que se desarrolle en gran medida la industria turística en nuestro país, donde Cancún se ha convertido en las últimas décadas en el destino turístico más importante para México, atrayendo tanto al turismo nacional como internacional. El atractivo principal de Cancún es su playa, por lo que la erosión se considera un problema crítico, la pérdida de playa origina una disminución en el número de visitantes y con ello, un decremento en la derrama económica para la ciudad, el estado y el país.

A pesar de sus bondades, la zona costera es altamente vulnerable a peligros costeros como erosión de playa e inundaciones, que aunado al incremento de los asentamientos humanos a lo largo de la línea de costa pone en riesgo a la infraestructura que ahí se desarrolla. Por esto, es

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

necesario el estudio cada vez más detallado de los procesos oceánicos y el efecto que estos tienen sobre la franja costera.

Los peligros para las costas son principalmente de origen natural: tormentas, ciclones tropicales, frentes fríos (Nortes), sismos, tsunamis, deslizamientos y cambios en el nivel del mar entre otros. Sin embargo, la intervención humana en ocasiones puede magnificar los riesgos existentes o generar nuevos riesgos al realizar alteraciones de los terrenos costeros mediante: la remoción de vegetación, dunas, playas y alteración de cantiles; la implementación de servicios públicos (carreteras y puertos), desarrollos de centros turísticos e industriales y estructuras de protección costera mal planeados.

El término erosión está definida en la *Encyclopedia of Marine Science* (1998) como: la pérdida, disolución o desgaste de la corteza terrestre y la transportación del material por agentes naturales. Aplicando el término a la erosión costera se puede definir entonces como la pérdida del material sedimentario que compone una playa, duna o cantil, repercutiendo en cambios morfológicos de la costa. La erosión es un proceso natural que ocurre como respuesta a los procesos costeros del oleaje, vientos y mareas; la erosión es un problema cuando los desarrollos humanos se ponen en riesgo cuando el hombre pone un límite a la línea de costa. En muchas ocasiones las alteraciones humanas al sistema litoral contribuyen en incrementar las condiciones erosivas en la costa.

Para muchos países, entre ellos la gran mayoría de las islas caribeñas, las playas representan el recurso natural más importante y la industria turística es la fuente principal de sus divisas. Sin embargo, se ha presentado erosión y deterioro acelerado de sus costas a causa de la combinación de factores naturales como: los cambios en el nivel del mar, intensificación de tormentas tropicales, déficit en la producción natural de sedimentos, y ajuste en la tectónica de la corteza terrestre (UNEP, 2003). La identificación y posible solución de las causas de la erosión se dificulta más cuando la intervención humana es extensiva, vía construcción de infraestructura hotelera y carreteras sobre zonas de dunas, extracción de arena de la playa o ríos, desviación de los cauces de ríos y arroyos o la construcción de presas, así como la construcción de obras de protección mal planeadas. El Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) en 2003, argumentó que para mitigar el problema de la erosión costera es necesario que el desarrollo científico esté dirigido no solo a explicar de manera apropiada el fenómeno, sino a la generación e implementación de leyes y regulaciones que permitan el manejo correcto de las zonas costeras, y al desarrollo de técnicas ingenieriles que permitan la recuperación y protección de las zonas dañadas.

Para mitigar los problemas de erosión costera se ha recurrido a distintos tipos de protección: rígidos y suaves. Las soluciones suaves tratan de reproducir y/o restablecer la protección natural, e incluyen la alimentación artificial de playas y la restauración de dunas. Las soluciones rígidas incluyen la implementación de estructuras como rompeolas y espigones. Muchas veces los sistemas de protección incluyen una combinación de soluciones rígidas y suaves, asociados a la protección natural. Para su implementación se deben hacer estudios previos que tomen en consideración las

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

características propias del lugar, así como de clima marítimo, transporte de sedimento y morfodinámica, que nos permitan inferir el comportamiento del lugar.

Las sistemas de protección costeras por lo general están encaminadas en salvaguardar los intereses económicos, ya sea la infraestructura desarrollada para Puertos o desarrollos turísticos o para desarrollos industriales como hidroeléctricas o plataformas petroleras. En el menor de los casos se buscan sistemas de protección que promuevan la conservación de las playas tanto para uso recreativo como para protección de flora y fauna. Sin embargo, para el turismo de sol y arena, la zona más importante es la playa, ya que las personas suelen utilizarla como zona de recreación y esparcimiento. De esta manera las zonas turísticas idealmente deben preservar las playas para sus propios fines, además, la playa es una defensa natural que funciona como amortiguador contra la energía del oleaje y por lo tanto sirve como protección para la infraestructura costera.

Para desarrollar estrategias y medidas de protección costera, es común la utilización de modelos numéricos que intentan reproducir la dinámica costera. Así, los modelos representan una de las herramientas más importantes en la búsqueda de sistemas de protección que se adapten a cada una de las necesidades antes planteadas. Las zonas costeras aunque comparten características similares, la dinámica y comportamiento difieren de una localidad a otra por lo que los modelos no pueden y no deben ser aplicados o repetidos de una costa a otra, deben adecuarse a la hidrodinámica y morfología propia del área de estudio.

Para encontrar un sistema de restauración óptimo que ofrezca áreas de esparcimiento para la población, evitar la degradación continua de la playa que se presenta bajo las condiciones reinantes de oleaje, así como protección contra condiciones extremas, es necesario caracterizar la hidrodinámica y la morfodinámica de las playas de Cancún. Para lograr dicho objetivo se hizo una caracterización de la climatología del oleaje y los patrones de transporte sedimentario en base a la hidrodinámica local. También se analizó la variación temporal y espacial del volumen sedimentario medido antes y después de un relleno artificial para caracterizar la morfodinámica del lugar. En base a lo anterior se realizaron experimentos de modelación numérica para identificar la influencia del oleaje incidente con la hidrodinámica y morfodinámica de la playa de Cancún y generar conocimiento encaminado a determinar sistemas de protección (rellenos de playa, espigones, rompeolas, etc.) que contribuyan a una mayor estabilidad de las playas de Cancún.

### 1.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Los cambios morfológicos que se presentan en la zona costera son influenciados por las características del oleaje incidente, que a su vez se ve influenciado por la morfología misma de la zona sobre la cual incide. Cuando el oleaje se aproxima a la costa es afectado por la batimetría de la zona, transformando sus características a través de diversos procesos. Algunos de ellos se definen a continuación.

**Asomeramiento.** Cuando las olas se aproximan a la costa son afectadas por la batimetría, la cual produce un cambio en la longitud de onda y en la altura de la ola. Al pasar a aguas someras se

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

observa un decremento progresivo en la velocidad y longitud de onda y un incremento en la altura de la misma. Se asume como un proceso bidimensional en el cual el periodo de la onda y el flujo de energía en la dirección de la propagación de la onda permanecen constantes.

Una formulación conveniente para el asomeramiento es la siguiente:

$$K_s = \frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{C_0}{C_1}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Dónde:  $K_s$  representa el coeficiente de asomeramiento;  $H_0$  es la altura de ola en aguas profundas; y  $C_0$  es la celeridad de la ola en aguas profundas.

**REFRACCIÓN.** Se presenta cuando las olas inciden oblicuamente sobre la costa y se encuentran con un cambio de profundidad, provocando que el frente de la ola que viaja en aguas más someras, disminuya su velocidad dando lugar a un cambio de dirección. La cresta de la ola tiende a ser más paralela al contorno batimétrico. Para batimetrías rectas y paralelas, la cresta de la ola tiende a ser paralela a la línea de costa. El cambio en la dirección está relacionado al cambio en la velocidad de fase de la ola mediante la *Ley de Snell*.

$$\frac{\text{sen } \alpha_0}{C_0} = \frac{\text{sen } \alpha_1}{C_1} = \text{constante} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

**DIFRACCIÓN.** Fenómeno en el que la energía es transferida lateralmente a lo largo de la cresta de la ola debido a un cambio abrupto en la profundidad, por lo regular es más notorio cuando un tren de olas regular es interrumpido por una barrera física como pequeñas islas o rompeolas. Dichas estructuras cortan la energía del oleaje creando una zona de sombra donde disminuye la altura del oleaje

**ROTURA DEL OLEAJE.** Cuando un tren de olas que viaja desde aguas profundas hacia aguas someras, al aproximarse a la costa, presentan una transformación sistemática que generalmente consiste en un incremento en la altura de la ola y una reducción en la longitud y celeridad de la ola, resultando en un incremento en el peralte de la ola ( $H_0/L_0$ , donde  $L_0$ = Longitud de onda en aguas profundas) hasta el punto en que la ola se vuelve inestable y rompe disipando gran cantidad de la energía contenida en la ola principalmente en forma de turbulencia.

**REFLEXIÓN.** Proceso por el cual parte de la energía no disipada del oleaje genera otro oleaje en sentido contrario al incidir sobre un obstáculo. Las olas a medida que se aproximan hacia la costa son susceptibles de verse transformadas por la reflexión causada por cualquier estructura marítima, natural o artificial. La intensidad de la reflexión depende del poder disipador de la estructura. La reflexión puede generar un desplazamiento de la zona de rotura e influir en el sistema de corrientes y transporte de sedimentos asociado.

**ONDAS DE INFRAGRAVEDAD.** Son ondas de baja frecuencia (0.005-0.05 Hz) u ondas largas. Su generación puede ser debida a dos mecanismos: interacción no-lineal entre las componentes principales del espectro; y la variación de la localización del punto de rotura en la zona de rompientes. Su importancia radica en que modifican el oleaje incidente y juegan un papel

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

importante en el transporte de sedimentos cercano a la costa y en la inundación de playas durante eventos extremos (Torres-Freyermuth, 2012).

**TENSOR DE RADIACIÓN.** Tal como lo menciona Longuet-Higgins y Stewart (1964), las ondas superficiales poseen momentum el cual se dirige paralelo a la dirección de propagación y es proporcional al cuadrado de la amplitud. Si las olas son reflejadas por un obstáculo, este momentum debe ser revertido. Entonces la conservación del momento requiere que haya una fuerza ejercida sobre el obstáculo, equivalente a la tasa de cambio del momentum de la ola. Esta fuerza es la manifestación del tensor de radiación.

Asociado con el avance de la ola está el flujo o transmisión del momento. Longuet-Higgins y Stewart (1964) describen algunos de los efectos teóricos de segundo orden de las ondas gravitatorias de superficie en términos del tensor de radiación, el cual está definido como: el exceso de flujo de momento debido a la presencia del oleaje. El tensor de radiación es el exceso de momento cuando se aplica la presión dinámica, la presión hidrodinámica que se resta de la presión absoluta. Esto asegura que el momento evaluado corresponde únicamente a la presencia del oleaje. Si el eje  $x$  es colocado en la dirección de propagación, mientras que el eje  $y$  es paralelo a la cresta de la ola, entonces hay dos componentes diferentes de cero al tensor de radiación: el flujo  $x$  y  $y$  del momento  $x$  y  $y$ . El tensor de radiación a lo largo del plano  $x = \text{constante}$  (paralelo a la costa) en la dirección del avance de la ola (dirección  $x$ ) es dado por

$$S_{xx} = E \left[ \left( \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) + \frac{1}{2} \right] \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

A pesar de que el componente de la velocidad orbital paralela a la cresta de la ola es cero, todavía hay un flujo de momento en la dirección  $y$  porque la presión se aparta de la hidrostática cuando las olas están presentes. El flujo de momento  $y$  a lo largo del plano  $y = \text{constante}$  es

$$S_{yy} = E \left[ \left( \frac{kh}{\sinh 2kh} \right) \right] \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

El tensor de radiación es utilizado para predecir los cambios en el nivel medio del agua (*set-down* y *set-up*) asociados al arribo del oleaje a la costa. Además la componente paralela a la costa del tensor de radiación está asociada a la generación de las corrientes paralelas a la costa.

**CORRIENTES INDUCIDAS POR EL OLEAJE.** Cuando el oleaje alcanza la costa y rompe, genera corrientes litorales en la zona costera que pueden tomar varias formas dependiendo de las condiciones de la playa. Las corrientes litorales son importantes, ya que en combinación con el oleaje transportan el sedimento y repercuten en la morfología de la playa.

El transporte de masa  $M$  inducido por el oleaje genera un flujo de retorno (el cual en una playa uniforme es el *undertow*), por lo que puede no haber un flujo neto de agua hacia la costa debido a la presencia de la playa. El monto del flujo de masa hacia el mar es por lo tanto igual a  $M$ . Este flujo no está distribuido de manera uniforme sobre la profundidad, sino que tiene un perfil distinto causado por la variación en la tensión inducida por la ola sobre la profundidad.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Hay dos sistemas de corrientes inducidas por el oleaje: el primero consiste en un sistema de circulación en celdas compuestas de corrientes de retorno (*rip currents*) asociadas a las corrientes paralelas a la costa; el segundo tipo consiste en corrientes paralelas a la costa generadas por el arribo oblicuo del oleaje a la costa.

El patrón de las corrientes que dominan la circulación en la zona costera depende en gran medida en la oblicuidad con que el oleaje incide en la costa. Cuando las olas se aproximan en dirección normal a la costa y rompen con sus crestas paralelas a la costa, las corrientes generadas toman la forma de una celda de circulación. Las corrientes de retorno (corrientes fuertes y estrechas que fluyen hacia el mar desde la zona de *surf*) son la parte más obvia de esta circulación. Si las olas rompen en ángulos grandes respecto a la línea de costa, las corrientes litorales que se generan fluyen en sentido paralelo a la costa y están en gran parte confinadas a la zona más cercana a la costa, entre la zona de rompiente y la línea de costa. Estas corrientes son de vital importancia en el transporte sedimentario a lo largo de la costa. En este sentido las corrientes marcan la pauta para la dirección del transporte sedimentario de la playa, lo que llega a generar cambios en la topografía y a su vez la morfología de la playa influye en los patrones de corriente.

**TRANSPORTE DE SEDIMENTO PARALELO A LA COSTA.** El sedimento desplazado a lo largo de la costa por la acción del oleaje y las corrientes litorales se lleva a cabo principalmente por dos mecanismos: Transporte por carga de fondo (*bedload*) se refiere al movimiento de las partículas que están en contacto con el fondo las y pueden ser transportadas por deslizamiento, saltación y rodamiento; y transporte de carga en suspensión, que se lleva a cabo en la columna de agua y es desplazado por las corrientes. El transporte total es la suma de los dos mecanismos.

El transporte litoral a lo largo de la costa puede ocurrir en dos direcciones dependiendo de la dirección del oleaje. Por convención, si observamos hacia la costa, se denomina positivo cuando el transporte es hacia la derecha y negativo cuando el transporte es hacia la izquierda. Por lo general el transporte longitudinal en un sitio tendrá desplazamiento positivo en una o más temporadas del año y transporte negativo para el resto del año. El transporte neto es la suma de las componentes positivas y negativas, el transporte bruto es la suma de las magnitudes de las componentes

**TRANSPORTE DE SEDIMENTO PERPENDICULAR A LA COSTA.** Este transporte es en dirección normal a la línea de costa y es resultado del desplazamiento del agua debido al oleaje que incide normal a la costa y al *undertow*. El transporte perpendicular es muy importante debido a que el perfil de playa es formado por erosión-depositación asociado al transporte normal a la costa, además el modelado de corrientes longitudinales generadas por oleaje y transporte sedimentario paralelo a la costa requiere como entrada la forma del perfil de playa. El perfil de una playa arenosa cambia continuamente y puede ser modificada considerablemente después de una tormenta. Sin embargo, el acoplamiento entre la hidrodinámica y el transporte de sedimento no es del todo bien comprendido.

### 1.5. ANTECEDENTES

La problemática de la erosión de playas de Cancún es compleja y sobre las causas de la misma se han identificado diversos factores tanto naturales como antropogénicos. Naturales como la ocurrencia de huracanes y tormentas, así como el escaso aporte de sedimento al sistema. Entre las causas antropogénicas se puede citar la ocupación de la duna por la actividad turística y la incorrecta ubicación de obras de protección (Guido-Aldana, 2009). En la actualidad, la erosión en playas de Cancún se considera un problema prioritario para el país, sin embargo dicho problema no es reciente y es a partir del huracán Gilberto en 1988 que se hizo más evidente (Diez, 2009). La construcción de infraestructura sobre la duna a lo largo de la isla ha restringido el transporte perpendicular a la costa inducido por el viento y el oleaje, impidiendo la restauración natural de las dunas (Silva-Casarín, 2012).

Las playas de Cancún se caracterizaban por ser estables, con un ancho promedio (incluyendo las dunas) de 80 metros. Sin embargo, a mediados de los años 60's del siglo pasado inició su desarrollo como destino turístico, dando pie a la construcción sobre la duna costera. En el año de 1988 Cancún fue impactado por el huracán Gilberto, que fue el primero en evidenciar el problema de erosión en estas playas. Después del meteoro hubo una pequeña recuperación, pero entre los años de 2004 y 2005, se presentaron los huracanes Iván, Emily y Wilma, incrementando así el problema de erosión. Como una vía de solución rápida se decidió verter 2.7 millones de metros cúbicos de arena, dejando un ancho total promedio de 70 metros. De acuerdo a estudios realizados por Martell-Dubois (2012), la arena introducida era poco compatible con la arena nativa, ya que era de tamaño de grano mayor y poco clasificada. Guido-Aldana (2009) reporta que como complemento a este primer relleno, en 2007 se llevó a cabo la colocación de 1.5 km de geotubos. El paso del huracán Dean en 2007 nuevamente dejó en un claro deterioro a las playas de Cancún. La segunda y última alimentación artificial de Cancún (hasta ahora) se inició en Diciembre de 2009 y concluyó en Enero de 2010. El material de relleno, con un volumen aproximado de 5 000 000 m<sup>3</sup>, se vertió casi a todo lo largo de los 12 km del área de estudio (González-Leija, 2012), exceptuando la zona correspondiente a Punta Nizuc.

Diversos estudios se han llevado a cabo para generar conocimiento y comprender tanto la dinámica como la morfodinámica de playas de Cancún. Sierra-Carrascal (2005) determinó mediante la aplicación de un modelo numérico que la corriente longitudinal predominante es en dirección sur-norte. La variación en el clima de oleaje a lo largo del año produce una alteración en este patrón de corrientes y también produce un cambio en la línea de costa. La intensificación del oleaje invernal produce una mayor erosión tanto en la parte norte como en la parte sur de la playa de Cancún. Silva-Casarín y colaboradores (2012) estudiaron con un modelo numérico hidrodinámico el efecto de la sobreelevación por marea de tormenta en la región sin considerar estructuras antropogénicas y encontraron que los efectos de dicha marea se reflejan principalmente en la laguna y que bajo condiciones extremas se desarrollarían vías de comunicación entre la laguna y el mar que permitan el paso del agua entre estos dos cuerpos de agua, reduciendo el efecto de la marea de tormenta hacia el frente de la playa y disminuyendo la pérdida de arena del sistema. Respecto a la dinámica sedimentaria de Cancún González-Leija y colaboradores (2013) reportan un flujo de energía del

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

oleaje con una componente SE, lo que genera transporte longitudinal en dirección norte. Sin embargo, también reportaron una divergencia en el transporte longitudinal hacia la zona sur del área (Punta Nizuc), la variabilidad en la intensidad y extensión espacial de esta divergencia afecta la disponibilidad de sedimento entre las playas sureñas. Por su parte Díez y colaboradores (2009) sugieren que el volumen de arena calculado para los rellenos de playa de Cancún ha sido subestimado debido al tipo de perfil de equilibrio seleccionado para los estudios, además sugieren la implementación de estructuras rígidas complementarias a los rellenos artificiales.

### 1.2. OBJETIVOS

Evaluar los efectos del oleaje sobre la hidrodinámica y morfodinámica de las playas alimentadas artificialmente de Cancún, Quintana Roo, por medio de estudios que generen información que caracterice la dinámica del sistema y ayude a hacer más eficientes las alternativas de protección de la playa de esta región.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Analizar la variación espacio-temporal del volumen sedimentario medido antes y después de un relleno artificial, para determinar las características de las variaciones morfológicas de la playa y detectar las zonas susceptibles a una erosión crónica.
- Caracterizar la hidrodinámica de la zona ante condiciones normales y extremas de oleaje en la región y a partir de las corrientes generadas por el oleaje caracterizar la morfodinámica de la zona para determinar las condiciones ideales bajo las cuales se puedan implementar los rellenos de playa como sistema de protección para playas de Cancún.

### 1.3. METAS

- Caracterizar la hidrodinámica de la región
- Caracterizar la dinámica sedimentaria (transporte sedimentario) de la región.
- Identificar las condiciones de oleaje bajo las cuales las playas alimentadas artificialmente puedan desarrollar un perfil de equilibrio para determinar las fechas idóneas para llevar a cabo los rellenos de playa.
- Plantear recomendaciones para una alimentación artificial de playa eficaz para el mantenimiento de las playas de Cancún.

#### 1.4. JUSTIFICACIÓN

El estudio a realizar está justificado de acuerdo a los siguientes puntos:

- Debido a que Cancún es un sitio de alta demanda turística, es de vital importancia para la economía del Estado y del País el mantener sus playas en óptimas condiciones, para asegurar la derrama de divisas que el turismo conlleva.
- Surge un problema de erosión crónica al hacer rígida la línea de costa mediante el desarrollo de infraestructura hotelera sobre la duna costera, lo que impide la recuperación natural del sistema.
- La zona se encuentra en una franja que es impactada constantemente por tormentas y huracanes. El problema se hace más grave debido al escaso aporte de sedimento hacia el sistema.
- Soluciones locales (espigones y rompeolas) se han realizado para tratar de mitigar el problema, pero, por el contrario, solo han agravado la situación. Además se han realizado dos rellenos artificiales (2006 y 2009-2010), los cuales sólo dieron una solución temporal a la erosión de la playa de Cancún.
- Si bien se han realizado estudios hidrodinámicos y morfodinámicos, aún se desconocen muchos aspectos de la dinámica de Cancún. Un relleno artificial de playa tiene un tiempo de vida finito y en este caso, no se ha analizado la relación entre la dinámica de Cancún y la playa alimentada. Por lo que este estudio pretende generar información valiosa que permita hacer más eficiente este sistema de protección de la playa.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

A continuación se describen las características del área de estudio en relación a los factores más importantes que afectan la hidrodinámica y morfodinámica costera.

### 2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Cancún pertenece a una isla de barrera localizada en la península de Yucatán, en el Estado de Quintana Roo, en el Mar Caribe y está ubicada entre las coordenadas lat.  $21^{\circ} 08' 17''$  N, long.  $86^{\circ} 44' 27''$  y lat.  $21^{\circ} 01' 53''$  N, long.  $86^{\circ} 46' 47''$ W. La isla de barrera está delimitada al norte por Punta Cancún y al sur por Punta Nizuc. Cuenta con una longitud aproximada de 12 km de playa y un ancho promedio no mayor a 500 m. Forma parte del sistema lagunar Nichupté, el cual está conformado por varios cuerpos de agua: Laguna Bojorquez, Laguna Nichupté, Laguna Inglés, Laguna Caleta y la Laguna Cienega (Silva-Casarín, 2012). El sistema lagunar tiene comunicación al mar por la presencia de dos canales situados uno hacia el Sur de Punta Nizuc y el otro al Oeste de Punta Cancún. El clima característico es tropical, cálido y húmedo con temperatura media anual de  $27.5^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa promedio es de 86 % (Aldape-Pérez, 2010).

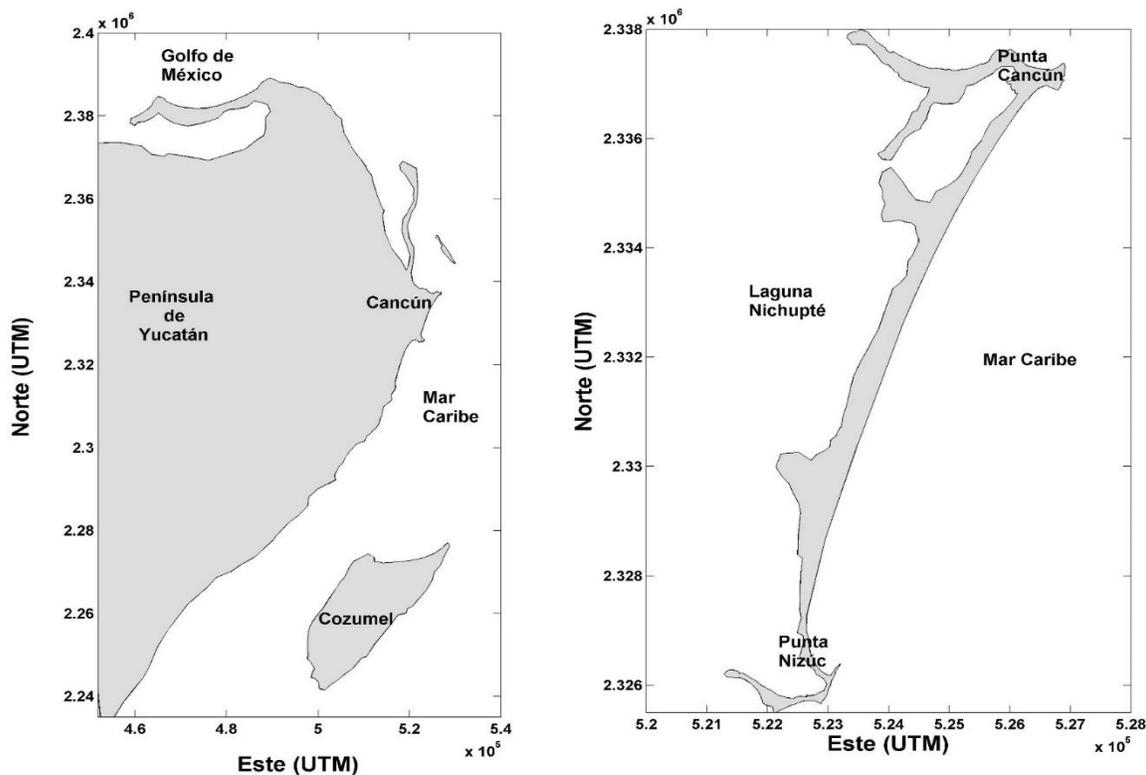


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. A la izquierda se ubica Cancún como parte de la Península de Yucatán. A la derecha un acercamiento de la playa de Cancún.

## 2.2. ORIGEN GEOLÓGICO

La franja costera del Noreste de la Península de Yucatán presenta un sistema de Islas de barrera integrada por: Holbox, Isla Contoy, Isla Blanca y Cancún. Por lo cual es pertinente la definición y descripción de esta geoforma costera.

Las islas de barrera se caracterizan por ser muy dinámicas y poco consolidadas y se definen como una estructura de acumulación sub-aérea y sub-acuática de sedimentos detríticos, formada a partir de la interacción del oleaje, marea, corrientes marinas y procesos eólicos. Estas se encuentran separadas del continente generalmente por un cuerpo de agua y su orientación es siempre paralela a la línea de costa (Hesp y Short, 1999)

Martin y Landim-Dominguez (1994) argumentan que la existencia de las lagunas costeras no se puede deslindar de la presencia de las barreras que las contienen y proponen tres factores principales en el origen y mantenimiento de las Islas de barrera: (1) la historia de los cambios del nivel del mar; (2) la dinámica de la playa; y (3) la amplitud de la marea. Por otra parte Hesp y Short (1999) consideran que los cambios en el nivel del mar (transgresión y regresión) son el factor primordial el desarrollo de las Islas de Barrera, el gradiente del sustrato y la morfología regional de la costa controlan la localización de la estructura con respecto al continente. Otros factores que influyen en el tipo y en la estabilidad de la estructura son el aporte sedimentario, la energía de la onda de marea, energía del viento, legado geológico y el tectonismo.

Respecto al origen de la Isla de Cancún, Ward (1997) menciona lo siguiente:

- La isla de Cancún inicia su formación durante el último periodo interglacial del Pleistoceno (Sangamoniano aproximadamente 130 000 años), cuando el nivel del mar se encontraba 5 o 6 metros sobre el nivel actual, propiciando la depositación de sedimento carbonatado en un sistema de crestas de playa construidas a lo largo de la costa noreste de la Península de Yucatán.
- Con el inicio del último periodo glacial durante la regresión del Wisconsiniano (aproximadamente 30,000 años), se produjo una progradación en la línea de costa a partir del descenso en el nivel del mar de aproximadamente 2 o 3 metros respecto al nivel actual. Este descenso continuó lentamente propiciando la formación de terrazas marinas escalonadas y paralelas a la línea de costa, entre los 10 y 140 metros bajo el nivel actual. Sin embargo, la producción de sedimentos carbonatados continuó dando paso a la formación de un sistema de crestas de arena carbonatada la cual está ahora ubicada a 9 metros bajo el nivel del mar. Una pequeña parte de estos cuerpos de arena corresponden a depósitos someros sub-mareales o de playa, pero en su gran mayoría pertenecen a sistemas de dunas eólicas pleistocenas.
- Con el incremento del nivel del mar en el Holoceno, las crestas eólicas se vieron erosionadas e inundadas. Los residuos de las crestas de dunas asociadas a estas terrazas constituyen lo que hoy es la parte principal de la Isla de Cancún y la Isla Contoy.

### 2.3. CARACTERÍSTICAS SEDIMENTARIAS

Debido a que el noreste de la Península de Yucatán carece de ríos y flujos superficiales, los sedimentos marinos someros de esta zona están constituidos casi en su totalidad por arenas carbonatadas de origen biogénico, provenientes principalmente de la degradación de corales y conchas de moluscos.

De acuerdo a Aguayo (1980) en la playa de Cancún se presentan 3 tipos de ambientes depositacionales. Para fines de este estudio el más importante es el de ambiente de playa que se describe a continuación:

**Ambiente de playa.** Se presenta a lo largo de la playa de Cancún, donde el impacto del oleaje es casi normal a la línea de costa. En la parte más cercana al mar se encontró arena fina muy bien clasificada, formada casi en su totalidad de oolitas y en proporciones menores por fragmentos de corales. En lo que corresponde a la zona de post-playa se observan dunas holocénicas formadas de oolitas bien clasificadas. En la zona de rompientes de punta Cancún se encontró material arenoso muy grueso moderadamente bien clasificado, conteniendo en su totalidad fragmentos biogénicos, principalmente fragmentos de coral. En la zona de Punta Nizuc se reportó sedimento formado por arena mal clasificada constituida por fragmentos de corales y en menor cantidad de moluscos.

Diversos autores han reportado las características sedimentarias de la arena de la playa de Cancún: Ruiz-Martínez (2009) describe Cancún como una playa meta-estable con sedimento calcáreo de diámetro promedio ( $D_{50}$ ) de 0.44 mm y densidad relativa ( $S_s$ ) de 2.701. Por su parte Chávez-Cerón (2011) menciona valores de  $D_{50}= 0.389$  mm,  $S_s= 2.632$ , densidad de 2703 kg/m<sup>3</sup>. Alcérreca-Huerta (2009) determinó valores de  $D_{50}= 0.393$  mm,  $S_s= 2.681$ .

### 2.4. CLIMA MARÍTIMO, CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS

La costa de Cancún se ve afectada en los meses invernales por la presencia de nortes y en el verano por tormentas tropicales, lo cual modifica el régimen de transporte sedimentario de acuerdo a la estación del año en dependencia de las características del oleaje incidente.

González-Leija (2013), menciona que el nivel del mar es influenciado de manera local por una marea astronómica semidiurna de pequeña amplitud, que en condiciones de marea viva tiene un rango de 0.2 a 0.4 m.

El oleaje típico incide principalmente del ESE y del SE con altura de ola significativa entre 0.5 y 1.5 metros con periodos entre 4-10 segundos (Figura 10 y Figura 11 en la sección de resultados). El viento presenta una dirección dominante desde el ESE y SE concordando con la dirección de propagación del oleaje. (Figura 10 en la sección de Resultados).

La dirección predominante de la corriente longitudinal es hacia el Norte (Sierra-Carrascal, 2005), sin embargo, González-Leija *et al.* (2013) reportan una divergencia en dirección hacia el Sur en el transporte longitudinal en la parte Sur de la playa de Cancún.

## 3. METODOLOGÍA

En este estudio se incluye el análisis de datos observados (mediciones *in situ*) que incluyen mediciones de perfiles de playa y mediciones de oleaje en mar profundo; y el análisis de datos de modelación numérica de oleaje, corrientes y transporte sedimentario. A continuación se describen las distintas metodologías.

### 3.1. TOPOGRAFÍA.

#### 3.1.1. TOMA DE DATOS

Se tomaron datos *in situ* de levantamientos topográficos, en cuatro campañas de campo, A (2009 06 08), B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08). Las cuales fueron implementadas por el equipo del Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física del CINVESTAV Mérida.

Dando continuidad al diseño de muestreo descrito por González-Leija (2012), se monitoreó la playa de Cancún dividiendo el área en cuatro zonas (Figura 2). De norte a sur: Zona I (Royal Sunset), Zona II (Playa Marlín), Zona III (Playa Delfines) y Zona IV (Sun Palace). La selección de las zonas monitoreadas consistió en ubicar secciones de playa a lo largo de toda la isla de barrera, a las cuales fuera factible el acceso para los muestreos.

Los levantamientos consistieron en medir perfiles de playa de alta resolución utilizando GPS diferenciales LEICA 1200. Se realizaron transectos cada veinte metros desde el pie de la duna o la base de los hoteles hasta la parte sumergida de la playa, aproximadamente 50 cm bajo el nivel del mar. Se realizó el levantamiento en cuatro zonas de aproximadamente 2 km cada una. Los perfiles se llevaron a cabo a pie, utilizando un GPS móvil montado sobre un carro de dos ruedas (Figura 3). Se instaló un GPS base sobre puntos fijos georreferenciados previamente localizados en el techo de hoteles cercanos para corregir los datos medidos por el GPS móvil.

#### 3.1.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

El ancho de playa para cada perfil se determinó mediante la aplicación del método de la distancia entre dos puntos (Ecuación 5). El cual consiste en calcular la longitud entre dos puntos contiguos, e ir sumando la distancia al siguiente punto hasta finalizar el perfil.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5}$$

Donde  $d$  es la distancia entre dos puntos,  $x_1$  y  $y_1$  corresponde a la posición del primer punto en la coordenada X y Y respectivamente, de igual manera,  $x_2$  y  $y_2$  representan la posición del segundo punto en la coordenada X y Y. Con este procedimiento se determina el ancho de los perfiles

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

individuales y se puede establecer el cambio en la línea de costa entre distintos muestreos y permite conocer el ancho mínimo, máximo y promedio de playa para toda la zona monitoreada.

Este procesamiento también se aplicó para calcular la distancia a lo largo de la costa y conocer el área total de muestreo. En este proceso se establece un punto inicial de cero a partir del cual se realiza la acumulación de la distancia que para el cálculo del ancho de playa, es decir en sentido perpendicular a la costa, corresponde a la base de los hoteles o la duna (en los sitios donde aún hay duna); y para la distancia paralela a la costa el punto cero queda indicado como el punto más al norte de cada zona muestreada. Estos puntos de inicio son iguales para cada una de las campañas.

Los perfiles de playa no coinciden espacialmente con exactitud entre una campaña y otra, por lo que para realizar una mejor comparación, se realizó una interpolación espacial con una resolución de 0.1 m aplicando la función *griddata* de Matlab. Una vez interpolados los perfiles de playa, se realizaron comparaciones entre los distintos muestreos y se obtuvieron los balances de sedimento entre las diferentes temporadas de muestreo. En primer lugar se calcula el volumen de sedimento para cada campaña dada por la integral (Ecuación 6). La cual en Matlab se resolvió mediante la sumatoria de la matriz interpolada. El balance sedimentario se obtiene restando al volumen de sedimento calculado para campaña más reciente el volumen de sedimento calculado para la campaña anterior.

$$\iiint S(X,Y) dX dY dZ = \text{Volumen de Sedimento} \dots\dots\dots \text{Ecuación 6}$$

Donde  $S$  es la superficie bajo la cual se requiere calcular el volumen,  $X$  y  $Y$  son la posición de cada punto,  $dX$ ,  $dY$  y  $dZ$  son la razón de cambios en cada una de las direcciones.

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

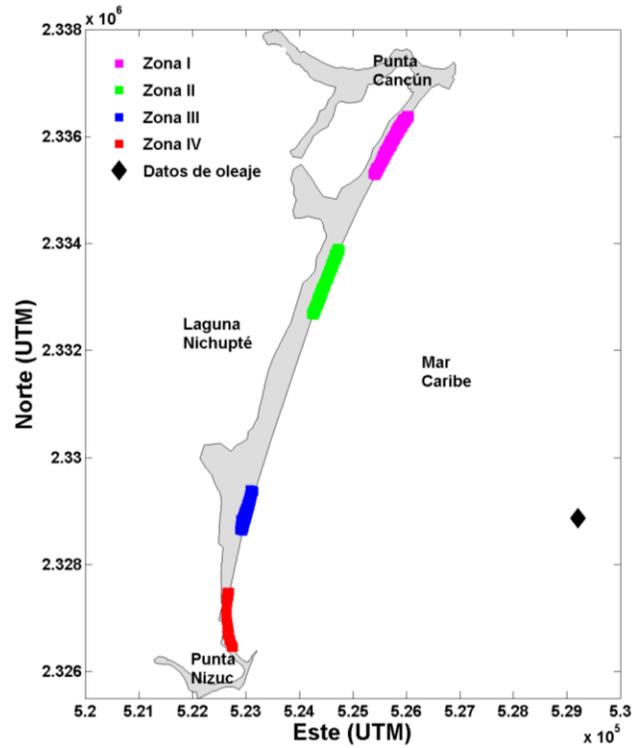


Figura 2. Localización de las cuatro zonas de medición de los perfiles de playa. De norte a sur: Zona I (Royal Sunset), Zona II (Playa Marlin), Zona III (Playa Delfines) y Zona IV (Sun Palace). El rombo en negro indica la posición del nodo de donde se obtuvieron los datos de oleaje del retro análisis de 30 años, descrito en la sección siguiente.



Figura 3. GPS diferencial Base instalado en el techo de un hotel y GPS móvil utilizados en la medición de perfiles de playa.

## 3.2. OLEAJE Y VIENTO

### 3.2.1. OBTENCIÓN DE DATOS

Para la validación del modelo numérico se utilizaron datos de oleaje medidos entre las fechas del 24 de marzo al 8 de Junio del 2010 obtenidos de la boya 42056 de la NOAA localizada en las coordenadas (19°48'6" N 84°51'24" W) hacia el ESE de Cozumel en aguas profundas frente al área de estudio (Figura 4), a una profundidad aproximada de 4684 m. Los datos recopilados consisten en series de tiempo de altura de ola significativa ( $H_s$ ), período promedio de la ola ( $T_p$ ), dirección del oleaje, velocidad y dirección del viento con una resolución temporal de una hora. Se determinaron las características de oleaje que se utilizaron como forzamiento para obtener los campos de oleaje, las corrientes por oleaje y el transporte sedimentario resultante en los modelos numéricos.

Para los experimentos numéricos se emplearon datos históricos de oleajes elaborados por Appendini *et al.* (2014), que utilizaron los campos de vientos del North American Regional Reanalysis (NARR) para correr un modelo de oleaje de alta resolución espacial y temporal, validados con datos del National Data Buoy Center (NDBC) e información de altimetría de oleaje (GlobWave). Los datos consisten en series de tiempo de altura de ola significativa ( $H_s$ ), período pico de la ola ( $T_p$ ), dirección del oleaje, intensidad y dirección del viento medidos cada tres horas desde el año 1979 hasta fines del 2008 y corresponden a una profundidad aproximada de 78 metros (ubicado en la Figura 2). A partir de estos datos se determinaron las condiciones típicas de clima marítimo para la costa de Cancún. Se generaron gráficos de las características del oleaje, como rosas de distribución del oleaje y viento, series de tiempo de la altura de ola significativa, período y dirección del oleaje incidente para los 30 años. Así mismo se hicieron histogramas para relacionar la altura de ola significativa con el período y con la dirección. Una vez determinadas las características del oleaje, estas fueron utilizadas como forzamientos para los experimentos numéricos de oleaje, hidrodinámicos y morfodinámicos.

### 3.2.2. ANÁLISIS DE DATOS

Para obtener una mejor información y realizar una mejor caracterización, los datos de oleaje se graficaron en series de tiempo de alturas de ola significativa, períodos y direcciones, al igual que en rosas de distribución del oleaje. Una vez visualizadas las series de tiempo de los datos, se generaron histogramas de las características del oleaje antes mencionadas. Lo anterior se hizo utilizando subrutinas computacionales de MATLAB. A partir de estos gráficos se seleccionaron las condiciones típicas y extremas del oleaje para caracterizar el clima marítimo y diseñar los experimentos numéricos.

Para la selección de los casos del diseño experimental y la validación del modelo, para el ángulo de arribo del oleaje, se hizo una discretización direccional para los 360° dividido en 16

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

direcciones. De estos sectores en que se dividió el oleaje, solo los más importantes fueron considerados para la modelación numérica y están contenidos en la Tabla 1.

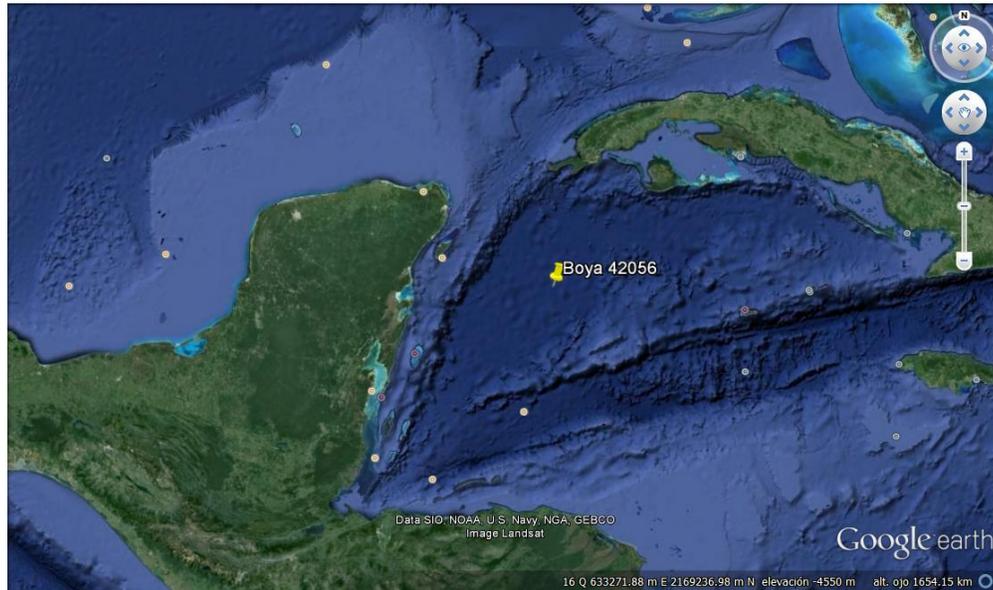


Figura 4. Mapa del Mar Caribe que muestra la ubicación de la boya 42056 de la NOAA, de donde fueron obtenidos los datos de oleaje utilizados para la validación del modelo numérico.

Tabla 1. Direcciones seleccionadas para incluir en los experimentos numéricos y validación del modelo, obtenidas a partir del análisis de las características del oleaje en la sección anterior. Los experimentos numéricos serán descritos a detalle en la Tabla 2

| DIRECCIÓN | GRADOS          |
|-----------|-----------------|
| N         | 348.75 – 11.25  |
| NNE       | 11.25 – 33.75   |
| NE        | 33.75 – 56.25   |
| ENE       | 56.25 – 78.75   |
| E         | 78.75 – 101.25  |
| ESE       | 101.25 - 123.75 |
| SE        | 123.75 – 146.25 |
| SSE       | 146.25 – 168.75 |
| S         | 168.75 – 191.25 |

### 3.3. MODELOS NUMÉRICOS

El paquete computacional DELFT3D es un sistema de modelos numéricos que pueden ser acoplados para la simulación de flujos hidrodinámicos, generación y propagación de oleaje, transporte de sedimento y cambios morfológicos, además del modelado de parámetros de calidad del agua y procesos ecológicos (Lesser *et al.*, 2004). DELFT3D está compuesto por un conjunto de módulos, cada uno de los cuales cubre cierto rango de aspectos de la investigación o problemas ingenieriles. Cada módulo puede ser ejecutado de manera independiente o en combinación con otros módulos. La información es intercambiada automáticamente entre los módulos a través de archivos de comunicación que permiten la interacción de los diferentes procesos (Figura 5). En este estudio se realizaron modelaciones acopladas de oleaje, hidrodinámica y morfodinámica en un dominio que abarca la región de Cancún en su totalidad. A continuación se presenta primero una breve descripción de los modelos y después se detallan las especificaciones con los que se implementó cada uno de los distintos modelos para este estudio.

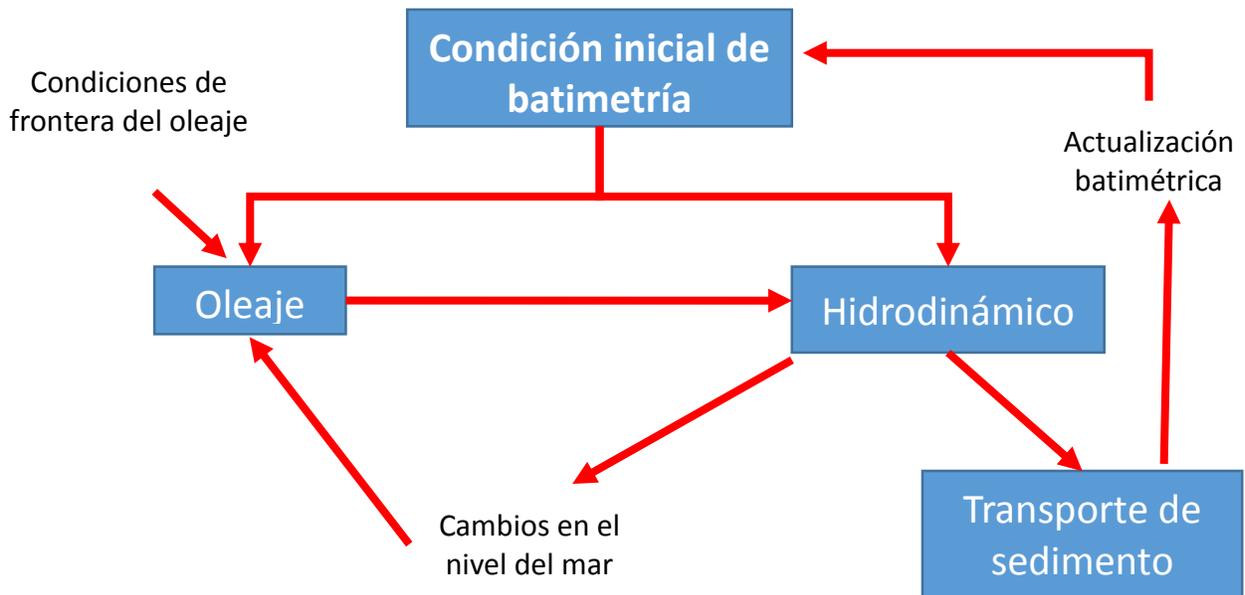


Figura 5. Diagrama de flujo donde se muestra la interacción entre los diferentes modelos numéricos utilizados para este estudio.

#### 3.3.1. MODELO DE OLAJE

El módulo Delft3D-WAVE es utilizado para simular la evolución del oleaje, tanto el generado por el viento localmente, como el alimentado en las fronteras del modelo. Este módulo calcula propagación de oleaje, generación de oleaje por viento, disipación e interacciones no lineales en base a los parámetros de batimetría, campo de vientos, nivel del agua y campos de corrientes. El modelo base es el modelo de oleaje SWAN de tercera generación. El modelo de oleaje SWAN, se basa en las ecuaciones de balance de acción (Ecuación 7) y cubre todo el espectro de oleaje (todas las direcciones y frecuencias). SWAN calcula la evolución del oleaje aleatorio de crestas cortas en

regiones costeras con profundidad intermedia y somera y puede tomar en cuenta el efecto de las corrientes. Es capaz de representar el proceso de generación de oleaje por viento, disipación por *whitecapping*, fricción con el fondo y rompimiento inducido por la profundidad y las interacciones no lineales entre las olas (Deltares, Delft3D-WAVE User Manual 2014).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\delta}{\delta \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\delta}{\delta \theta}(c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\sigma} \dots \dots \dots \text{Ecuación 7}$$

El primer término en el lado izquierdo de la ecuación representa la tasa de cambio local de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y tercer término representan la propagación de acción en el espacio geográfico (con la propagación de las velocidades  $c_x$  y  $c_y$  en el espacio  $x$  y  $y$  respectivamente). El cuarto término representa los cambios en la frecuencia relativa debido a las variaciones en la profundidad y corrientes (con la propagación de la velocidad  $c_\sigma$  en el espacio  $\sigma$ ). El quinto término representa la refracción inducida por la profundidad y la corriente (con la propagación de la velocidad  $C_\theta$  en el espacio  $\theta$ ). Las expresiones para estas velocidades de propagación son tomadas de la teoría lineal del oleaje (Deltares, Delft3D-WAVE User Manual 2014). El término a la derecha de la ecuación es el termino fuente, que en términos de densidad de energía, representa los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales entre las olas. En aguas profundas, tres componentes son significativos en la expresión del termino fuente total y corresponden a las contribuciones atmosféricas, disipación por *whitecapping* e interacciones no-lineales. Además de estos tres términos, en agua someras, términos fuente adicionales inducidos por efectos de batimetría juegan un papel importante, los cuales son la fricción con el fondo, rompimiento de la ola inducido por el fondo e interacciones no-lineales (Akpınar y Kömürçü, 2013).

### 3.3.2. MODELO HIDRODINÁMICO

Delft3D-Flow es un programa de simulación hidrodinámica multidimensional (2D o 3D) que calcula el flujo no estacionario y el fenómeno de transporte que resultan de distintos forzamientos (p.e. meteorológicos, mareas, flujos advectivos, etc.) dentro una malla rectilínea o curvilínea con fronteras establecidas. Para simulaciones en tres dimensiones, como la de este trabajo, se sigue la aproximación de las coordenadas “sigma”,  $\sigma$ , para definir la malla vertical. Este tipo de coordenadas siguen la configuración batimétrica, manteniendo así el mismo número de capas verticales independientemente de la profundidad.

El módulo hidrodinámico tiene la capacidad de acoplarse simultáneamente (*online*) con flujos atmosféricos de agua (modificando la salinidad) y de calor; de igual manera incorpora los cálculos simultáneos (*online*) del transporte de sedimentos y cambios morfológicos obtenidos en el módulo morfodinámico. De este modo, los procesos hidrodinámicos tridimensionales y la adaptación de perfiles de no equilibrio de la concentración de sedimento son tomados en cuenta automáticamente para el cálculo de sedimento en suspensión; los efectos de los sedimentos en suspensión sobre la densidad son incluidos automáticamente en los cálculos hidrodinámicos; los cambios batimétricos generados en el módulo morfodinámico pueden ser retroalimentados a los cálculos hidrodinámicos (Lesser *et al.*, 2004).

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El módulo DELFT3D-FLOW resuelve las ecuaciones de movimiento en dos o tres dimensiones. El sistema de ecuaciones consiste de: ecuación de momento horizontal, ecuación de continuidad, ecuación de transporte para constituyentes conservativos y el modelo de cierre de la turbulencia. La ecuación de momento vertical contempla la aproximación hidrostática, es decir que las aceleraciones verticales se asumen como pequeñas en relación a la aceleración gravitatoria y pueden ser despreciadas (Lesser *et al.*, 2004). En modelos 3D las velocidades verticales son calculadas a partir de la ecuación de continuidad. El conjunto de ecuaciones diferenciales en combinación con el conjunto de condiciones iniciales de frontera es resuelto mediante el esquema de diferencias finitas. Una explicación detallada de los esquemas numéricos y ecuaciones se presenta en los manuales del modelo (Delft3D-FLOW User manual, Delft, 2014).

### 3.3.3. MODELO MORFODINÁMICO

El módulo morfodinámico del sistema de modelación permite calcular el transporte de sedimento y morfología; se pueden calcular tanto el transporte por carga de fondo como el transporte en suspensión para sedimentos no cohesivos (arenas) o el transporte en suspensión para sedimentos cohesivos (limos y arcillas).

El transporte de sedimento en suspensión en tres dimensiones es calculado resolviendo la ecuación tridimensional de advección-difusión para los sedimentos en suspensión. Las velocidades locales del flujo y la difusión turbulenta están basadas en los resultados de los cálculos hidrodinámicos. Computacionalmente el transporte en tres dimensiones es calculado de la misma manera que el transporte de los otros constituyentes conservativos, como la salinidad y el calor.

Para el transporte de sedimentos no cohesivos se utilizó la formulación de Van Rijn *et al.* (2000). Mientras que la transferencia de sedimentos entre el fondo y el flujo es modelado utilizando términos fuente y sumidero actuando sobre la capa cerca del fondo que se encuentra arriba de la altura de referencia de Van Rijn, esta capa se denomina capa de referencia. A cada mitad del paso del tiempo los términos fuente y sumidero modelan la cantidad de sedimento que entran al flujo mediante la difusión hacia arriba desde la capa de referencia y la cantidad de sedimento que sale del flujo por el asentamiento del sedimento. El término del sumidero es resuelto implícitamente en la ecuación de advección-difusión, mientras que el término fuente se resuelve explícitamente.

El transporte por carga de fondo es calculado de acuerdo a la siguiente aproximación: primero la magnitud y dirección del transporte en el centro de las celda numérica es calculado utilizando la fórmula de transporte de Van Rijn (1993), posteriormente se determina la tasa de transporte en las interfaces de la celda, corregida por el efecto de la pendiente y de la disposición y composición del fondo de la siguiente celda numérica. Cuando se incluye el oleaje en las simulaciones, los cálculos de las magnitudes y direcciones del transporte por carga del fondo, para la capa horizontal asumen sedimento suficiente e ignora la composición del fondo. La formulación de Van Rijn (1993) distingue entre el sedimento transportado bajo la altura de referencia, que es tratado como transporte de fondo, y aquel sedimento por arriba de la altura de referencia, el cual es tratado como carga en suspensión.

**3.3.4. DATOS DE ENTRADA**

El dominio del modelo se implementó a partir de una batimetría de la zona de estudio. Adicionalmente, el modelo requiere de otros datos como forzamientos y es necesario definir diversos parámetros. A continuación se hace una descripción de los parámetros implementados para este estudio.

**3.3.4.1. MALLAS**

El método numérico implementado por el Delft3D-Flow está basado en un esquema de diferencias finitas. Para discretizar en el espacio las ecuaciones 3D de aguas someras, el área a modelar es cubierta por una malla que puede ser rectangular, curvilínea o esférica y sus coordenadas pueden estar definidas ya sea en sistema cartesiano o esférico. En este estudio se utilizaron mallas rectangulares. La malla debe ser ortogonal y bien estructurada. Para la discretización, las variables son acomodadas en un patrón llamado Arakawa C-grid o malla escalonada (Figura 6), donde los puntos del nivel de agua (puntos de presión) están definidos en el centro de una celda y los componentes de la velocidad son perpendiculares a la cara de celda de la malla donde están situados, la profundidad está definida en las esquinas (Deltares, Delft3D-Flow User Manual 2014).

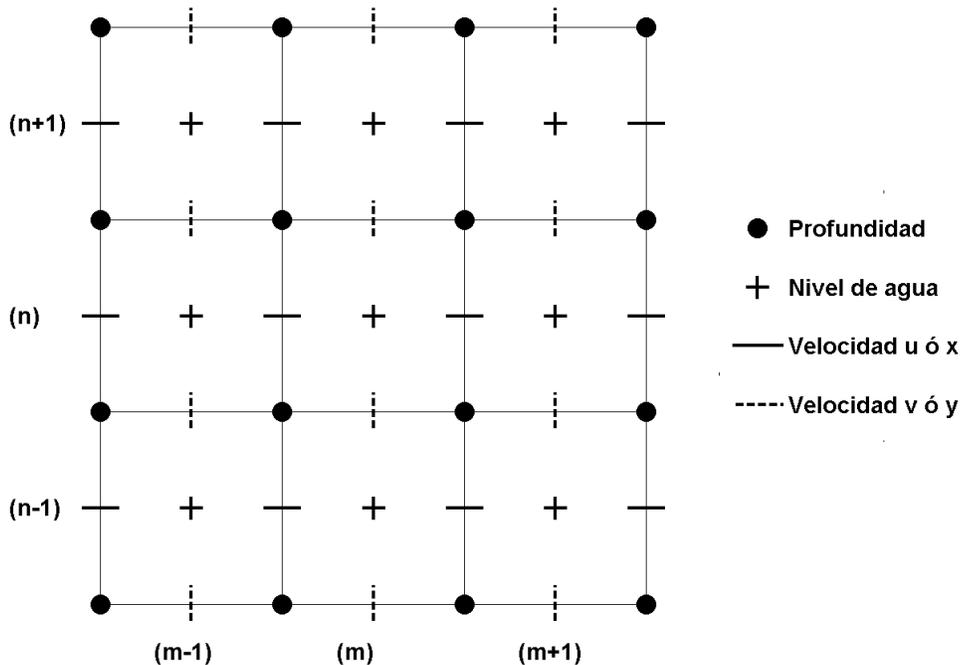


Figura 6. Malla escalonada utilizada por DELFT3D. Se muestra la celda computacional. En el centro de la celda se calcula el nivel de agua y la concentración de los constituyentes (salinidad, temperatura, transporte de sedimento). La profundidad se calcula en las esquinas de la celda computacional.

La construcción de las mallas debe seguir los siguientes criterios:

- Debe cubrir toda el agua y abarcar un poco más allá de la frontera en tierra.
- Debe ser ortogonal: las líneas de la malla deben intersectarse perpendicularmente.
- El espaciamiento de la malla debe variar suavemente sobre el área computacional para minimizar los errores de inexactitud en los operadores de las diferencias finitas. En este caso de estudio se utilizó una malla constante.

En la generación de mallas es importante considerar la extensión del área a modelar, el diseño y la resolución de la malla. Estos aspectos son cruciales ya que afectan la aplicabilidad del modelo al problema que se está manejando. En modelos regionales es común utilizar un sistema cartesiano de referencia y en esos casos es conveniente utilizar coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator). Para este estudio se diseñaron dos mallas rectangulares de diferentes resoluciones. La primera consiste en una malla gruesa con resolución espacial de 35 m, que abarca desde la profundidad aproximada de 78m en mar abierto hasta la línea de costa de Cancún y es de una extensión aproximada de 14.5 x 8.5 km (Figura 7, izquierda). Esta malla numérica sólo es utilizada para el modelo de oleaje. La segunda malla abarca un área aproximada de 14.5 x 3 km e inicia desde una profundidad aproximada de 25 m hasta la costa y su resolución espacial es de 17 m (Figura 7, derecha). Esta malla es implementada en el modelo hidrodinámico y el morfodinámico. Además se utilizó en el modelo de oleaje mediante una anidación con la primera malla. Las mallas fueron generadas con la aplicación de generación de mallas RGFRID de Delft-3D.

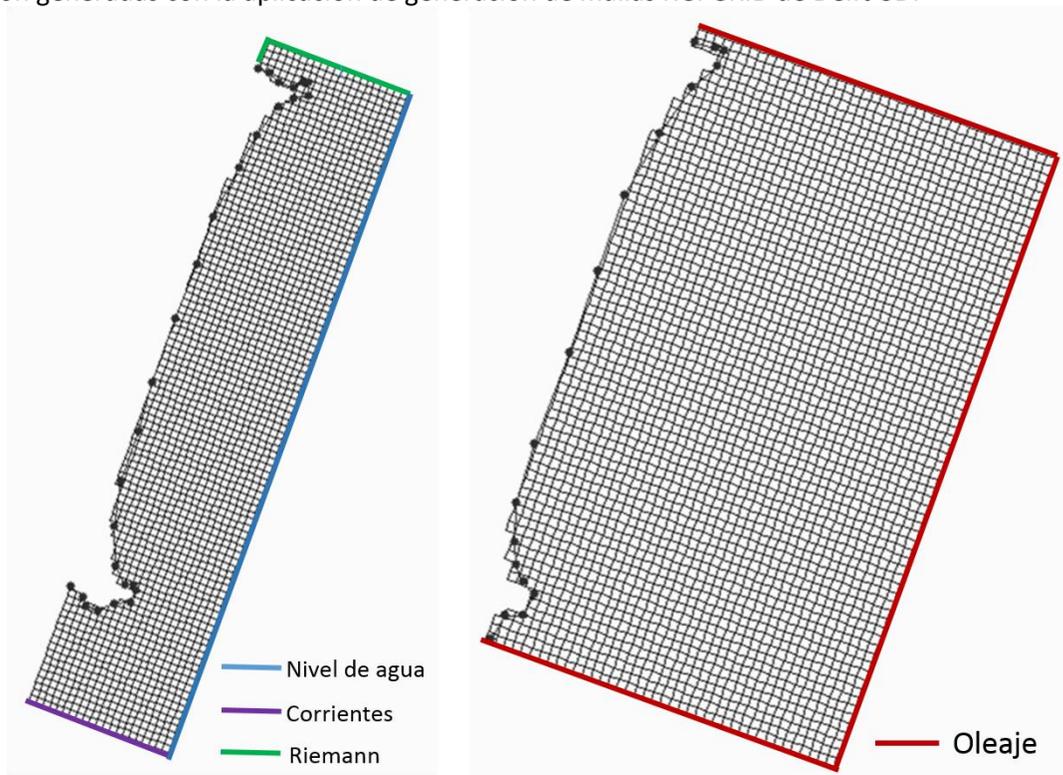


Figura 7. Malla del modelo hidrodinámico y morfodinámico (izquierda) se especifica la condición utilizada para cada una de las fronteras. En la malla para el modelo de oleaje (derecha) se muestran las tres fronteras alimentadas con las características de oleaje. Para una mejor visualización de las mallas, en ambos casos solo se graficó uno de cada cinco puntos de malla.

### 3.3.4.2. BATIMETRÍA.

Se generó una batimetría para el modelo numérico a partir de datos medidos *in situ* por el equipo del Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física del CINVESTAV Mérida. Se utilizó una ecosonda de doble frecuencia SyQuest Bathy 500 DF sincronizada con un GPS diferencial, ambos instalados en un bote de motor fuera de borda. Las mediciones se registran en transectos perpendiculares a la línea de costa de ~2 km, con espaciamientos de entre 100 y 400 m y abarcan un rango de profundidades de 1 a 20 m. Para este trabajo se utilizaron las mediciones del 2008 más cercanas (temporalmente) al relleno de playa que tuvo lugar en 2009. Estos datos fueron complementados con datos batimétricos de la base de datos ETOPO 1 de la NOAA-NGDC (Amante y Eakins, 2009).

Los datos batimétricos deben estar asociados a la(s) malla(s) numérica(s) en particular. En este caso se procesaron y generaron desde el módulo QUICKIN de Delft3D, La metodología incluyó los siguientes pasos:

- Se importan los datos batimétricos disponibles, los cuales deben estar georreferenciados y presentarse en un archivo con tres columnas: X Y Z.
- Se aplica una interpolación espacial, con el método de interpolación que mejor convenga, de acuerdo a la resolución de las mediciones. En este caso, se utilizó interpolación lineal, en la cual los datos son en primer lugar organizados dentro de una red triangular de Delaunay. Para hacer más eficiente la interpolación, esta se realiza por secciones las cuales se delimitan por medio de la aplicación de polígonos. La red de triangulación está diseñada de tal manera que, las longitudes laterales mínimas del triángulo son obtenidas, por lo que logra la máxima correlación entre la batimetría numérica y los puntos de datos batimétricos conocidos (Delft3D-FLOW User manual, Delft, 2014).
- Los puntos de malla que no tienen valores de profundidad después de la interpolación lineal o que su valor no es realista después de dicha interpolación son modificados mediante un mecanismo de extrapolación llamado difusión interna, el cual es un proceso de suavizado que no modifica los valores batimétricos ya existentes y es una forma sencilla para llenar la ausencia de datos entre los puntos de profundidad conocidos.
- Se realizó una revisión profunda de la batimetría generada, cuidando particularmente las zonas de traslape de las distintas fuentes de datos, donde podría haber gradientes pronunciados de profundidad; en esos casos las zonas de traslape se aíslan delimitándolas con polígonos y son tratadas con un método de suavizado que permite una transición más realista para prevenir inestabilidades y/o errores en los cálculos de la hidrodinámica.

Además de realizar modelaciones numéricas con los datos batimétricos medidos, se realizaron experimentos numéricos con batimetrías sintéticas que simulen alimentaciones de playa distintas. Para la primer propuesta de relleno artificial se generó una batimetría en la cual se modificó el relieve desde la franja más próxima a la zona de los hoteles (en la base de los hoteles) hasta los primeros 5 metros de profundidad. Modificó la altura de los perfiles asignando un valor de 5 metros sobre el nivel del mar en la parte de la base de los hoteles y se generó un nuevo perfil con una pendiente suavizada hasta un nuevo nivel de 0 metros (nivel del mar) que en esta ocasión se localiza

más hacia el mar que la distancia en que se encuentra la isóbata de los 3 metros de las batimetrías medidas. Este proceso se repitió a todo lo largo de la playa de Cancún y siguiendo el contorno batimétrico de los 5 metros de profundidad de la batimetría previa. Con este nuevo conjunto de datos se siguieron los pasos descritos anteriormente hasta configurar la nueva batimetría.

En una segunda propuesta se exageran las dimensiones del relleno: al igual que en la primer propuesta se asignó una altura del relieve en la base de los hoteles de 5 metros pero la playa seca se extendió aún más, de modo que en la isóbata de los 10 metros de la batimetría medida se asignó una profundidad de 5 metros y se interpolo de manera lineal hasta la base de los hoteles, generando así una pendiente más suavizada.

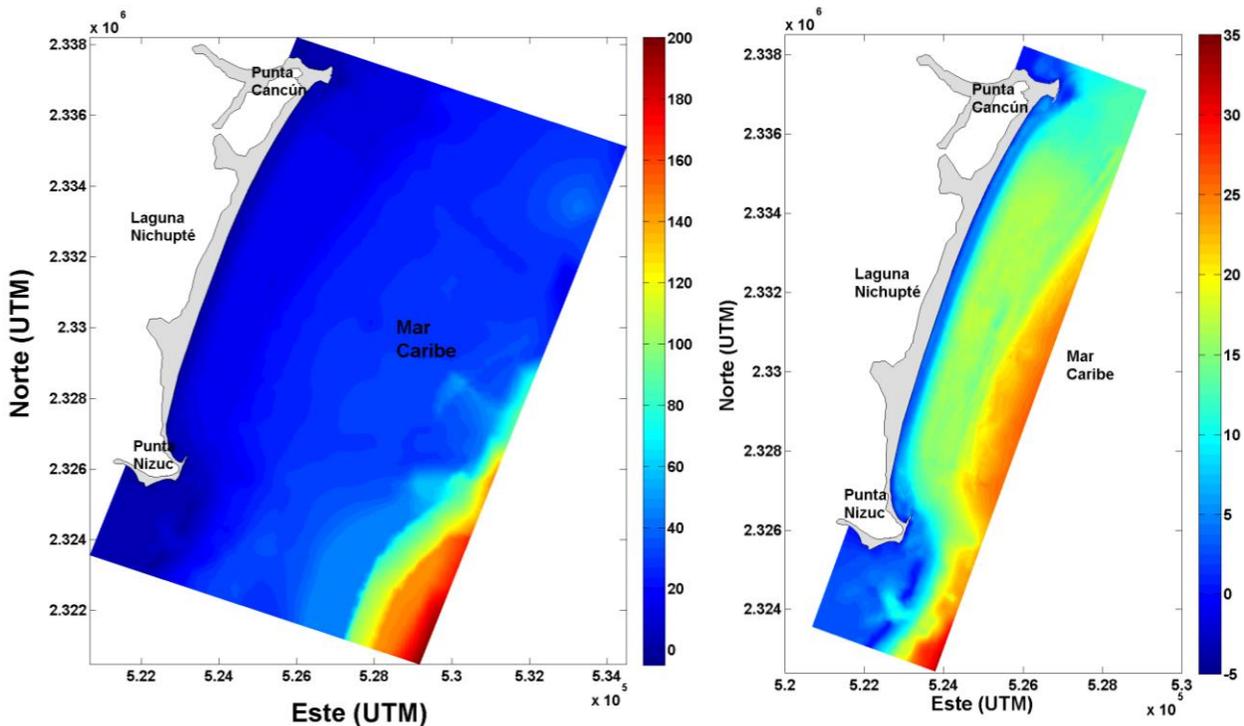


Figura 8. Dominio y batimetría de la zona de Cancún utilizada para el modelo de oleaje (izquierda) y para los modelos hidrodinámico y morfodinámico (derecha).

### 3.3.4.3. FRONTERAS

El modelo de oleaje cuenta con tres fronteras abiertas, definidas de acuerdo a su orientación (frontera marina al Este, frontera Norte y frontera Sur) que fueron alimentadas con las características de oleaje a propagar: altura de ola significativa ( $H_s$ ), período pico ( $T_p$ ) y dirección del oleaje en grados. Las características de oleaje de los distintos escenarios se asignaron uniformemente en todas las fronteras y a lo largo de ellas. Se seleccionó el espectro de la forma JONSWAP.

Para representar realísticamente la condición hidrodinámica que caracteriza a la región (corriente persistente hacia el Norte), en la modelación hidro y morfodinámica, la frontera Sur se

alimentó con corriente de 0.08 m/s hacia el Norte, que es un valor de corriente de mediana intensidad. Las fronteras Norte y Nor-Oeste utilizan la condición de Riemann para permitir que el modelo se ajuste a la hidrodinámica sin prescribir forzamiento alguno, en ambos casos el valor corresponde a cero. La frontera de Riemann simula una frontera débilmente reflectiva. La característica es que la frontera hasta cierto nivel es transparente para las ondas salientes, como los disturbios de onda corta. Las ondas salientes pueden cruzar la frontera abierta sin ser reflejadas hacia el dominio computacional como sucede con los otros tipos de frontera.

La frontera Este se mantiene abierta, pero igual que a las anteriores, no se asigna ningún forzamiento, de modo que el modelo permita la salida de cualquier onda o perturbación y el resultado se pueda enfocar en los efectos del oleaje. De este modo, la frontera Este fue definida con forzamiento de marea astronómica manteniendo los valores de amplitud y fase en cero

Para que las fronteras Sur y Este sean a su vez débilmente reflejantes se les asigna un valor alto del coeficiente de reflexión alfa. Este puede tener valores de entre 0 y 100. En este modelo se fijó el parámetro en 100 con el propósito de evitar la reflexión en las fronteras minimizando así los disturbios.

### 3.3.5. PRUEBAS DE SENSIBILIDAD Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para que un modelo pueda considerarse adecuado para representar procesos marinos, deben realizarse pruebas de sensibilidad a distintos parámetros que pueden alterar los resultados. Uno de ellos es el paso de tiempo. Por lo general se elige el paso del tiempo de acuerdo a argumentos para la precisión y estabilidad del modelo. Tanto la precisión como la reproducción de la escala de longitud espacial por la malla numérica, son dependientes del número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL).

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

Donde  $\Delta t$  es el paso del tiempo en segundos,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $H$  es la profundidad y  $\{\Delta x, \Delta y\}$  es un valor característico (por lo general el valor mínimo) de la escala espacial de las celdas de la malla en ambas direcciones. Generalmente el número de Courant no debe exceder el valor de 10 (Delft3D-FLOW User manual, Delft, 2014).

Asumiendo  $g=9.81$ ,  $H=1$  m,  $\{\Delta x, \Delta y\}= 16.5$  m y  $\Delta t=30$  s; entonces  $CFL \approx 5.7$ . Este valor se encuentra por debajo del recomendado en la literatura y de acuerdo a lo anterior, el modelo con estas características debiera ser estable.

Para confirmar la estabilidad, se realizaron pruebas de estabilidad con diferentes pasos del tiempo. Se ejecutaron escenarios con la misma condición y forzamiento, partiendo del reposo y variando entre ellos únicamente el paso del tiempo. Dichas condiciones son:  $H_s= 1$ m;  $T_p=7$  s;  $Dir=90^\circ$ . Se corrió el modelo hidrodinámico acoplado con oleaje por 24 horas de simulación. La velocidad de la corriente para la frontera Sur fue de cero m/s y la amplitud y fase de la marea astronómica de la frontera Este son de cero. La rugosidad del fondo utiliza valores uniformes en U y en V de 0.03 de acuerdo a las formulaciones de Manning. Para los distintos escenarios, se calculó la energía cinética

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

desde el inicio ( $EK=0$ ) y a lo largo de las corridas (Figura 9). De acuerdo a los resultados, se determinó que para un  $\Delta t=1$  min el modelo no llega a estabilizarse, si se hace el cálculo del número de Courant con este paso del tiempo el resultado es de  $\approx 11.4$  lo cual está por arriba de lo recomendado por la literatura. Con  $\Delta t=0.2$  min el valor de CFL se reduce hasta 2.27, pero esto implicó un incremento sustancial en el tiempo de cómputo y comparando con la gráfica de  $\Delta t=0.5$  min se puede comprobar que no hay variación en el tiempo en que el modelo llega a la estabilidad. En base a lo anterior, se decidió que el paso de tiempo óptimo para este modelo es de 30 segundos.

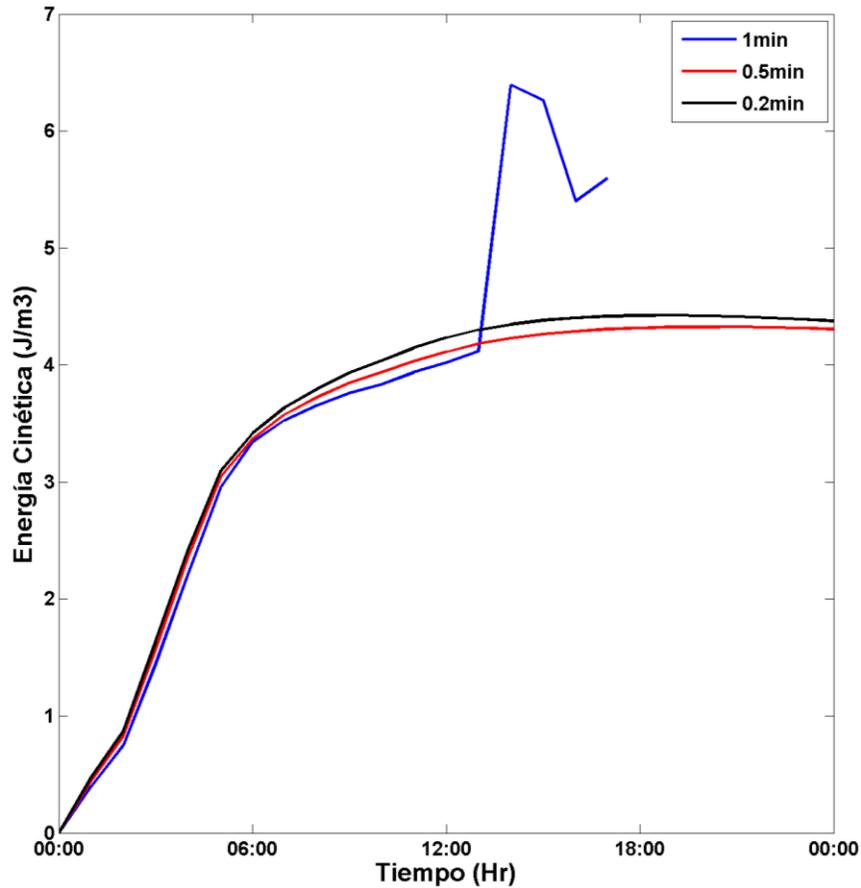


Figura 9. Energía cinética total calculada a partir de los datos de corrientes generados en el modelo numérico que inicia en el reposo ante distintos pasos del tiempo.

Previo a la determinación de los casos para los experimentos numéricos con el modelo morfodinámico y con la finalidad de eliminar casos innecesarios y ahorrar tiempo de simulación, se realizaron simulaciones de prueba con el modelo de oleaje para observar los cambios en los patrones en la dirección del oleaje inducidos por la variación en la altura de ola y el período, manteniendo en ambos casos la misma dirección del oleaje. Para esta calibración se utilizó oleaje del Norte con las características de los casos A, B, C y D descritas en la Tabla 2. Se determinó que el efecto sobre los patrones de propagación del oleaje causado por la variación del periodo es mayor que el provocado por la variación de la altura de ola.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Aplicando el modelo de oleaje acoplado con los modelos hidro y morfodinámico se realizaron corridas de pruebas manteniendo las características del oleaje constantes y variando el paso del tiempo (casos H e I en la Tabla 2). Dos pruebas más se hicieron con la dirección y altura de ola similares a los dos casos anteriores, pero ahora con diferente periodo (casos J y K en la Tabla 2). Por último se hizo una simulación utilizando un nivel de agua inicial de 0.5 metros para simular el efecto de una elevación por marea (caso L en la Tabla 2). Al analizar los resultados de todas estas pruebas, se encontró que no hay una variación significativa en los patrones de acumulación y erosión de sedimentos, por lo que se decidió mantener el parámetro del paso del tiempo en 0.5 minutos y el nivel de agua inicial en cero.

### 3.3.6. PARÁMETROS FÍSICOS DEL MODELO DE OLAJE

#### CONSTANTES

Se define la aceleración gravitacional en  $m/s^2$ . El valor asignado por defecto es  $9.81 m/s^2$ . La densidad del agua se asignó como  $1025 Kg/m^3$ . Se utilizó la convención náutica para la dirección de propagación del oleaje y viento que consiste en la dirección del vector medido en dirección de las manecillas del reloj a partir del Norte geográfico. Las fuerzas generadas por el oleaje son calculadas con el gradiente del tensor de radiación. El set-up inducido por el oleaje es calculado y tomado en cuenta en los cálculos de oleaje (durante el computo es adicionado a la profundidad que es obtenida del fondo y el nivel de agua); esta opción se usa cuando SWAN es aplicado como modelo independiente o si el set-up del oleaje no es considerado para los cálculos de corrientes (Flow).

#### PROCESOS

Para modelar la disipación de la energía en oleaje aleatorio a través del rompimiento inducido por la profundidad se utiliza el modelo de Battjes y Janssen (1978) aplicando un coeficiente Alfa de 1 para determinar la tasa de disipación y el coeficiente Gama que es el valor del parámetro de rotura definido como  $H_m/d$  que por defecto es igual a 0.73. Para calcular la disipación por la fricción con el fondo, se utilizó un coeficiente de  $0.067 m^2s^{-3}$  para condiciones de oleaje local y de  $0.038 m^2s^{-3}$  para condiciones de oleaje de mar profundo (*swell*). La difracción es tomada en cuenta por el modelo, la cual se basa en una aproximación de fase desacoplada para refracción-difracción. Es expresada en términos de la tasa de giro direccional de los componentes individuales del oleaje en el espectro 2D. La aproximación está basada en la ecuación para pendientes suaves (*mild-slope equation*) para la difracción y refracción.

El cálculo de la disipación por *White capping* utilizando el modelo de Komen *et al.* (1984) y la refracción son tomados en cuenta en la modelación y pueden influir en la propagación del oleaje en el espacio espectral y en los procesos físicos en el SWAN.

### 3.3.7. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS

Cuando se utilizan mallas Cartesianas se debe especificar la Latitud del área modelar para calcular la fuerza de Coriolis, que es función de la localización del área en el globo terráqueo. Se especifica en grados desde el Ecuador. Por convención, en el hemisferio Norte se expresa con valores positivos y el hemisferio Sur con valores negativos. Para este estudio se generalizó la posición de Cancún en los 21° Norte.

Cuando se están simulando procesos en tres dimensiones se debe especificar un *Número de Capas*, que definirá la malla vertical del modelo, además se le debe asignar el porcentaje del espesor que corresponde a cada capa, cubriendo el 100 % de la columna del flujo. Cuando se utiliza el modelo de malla  $\sigma$ , como es este caso, el espesor de las capas varía dependiendo de la profundidad, pero el número de capas es constante, por lo que la proporción del espesor de cada capa también permanece constante. Para las simulaciones utilizadas en este estudio se utilizó un modelo con 5 capas y a cada una le corresponde un espesor del 20 % de la profundidad total de cada punto de malla.

El modelo inicia del reposo, por lo que como condiciones iniciales se establece el nivel de agua como cero y la concentración de sedimentos de igual manera en cero. Se definió que se incluya el cálculo de transporte de sedimentos en suspensión y por carga de fondo para sedimentos no cohesivos, así como la actualización de la batimetría.

Se implementó el acoplamiento simultáneo y en las dos direcciones entre el módulo de oleaje y el módulo hidrodinámico del modelo Delft-3D. En este caso existe una comunicación directa entre ambos módulos. Para cada simulación del oleaje se genera un archivo de comunicación, entonces el modelo hidrodinámico reinicia utilizando el último resultado del modelo de oleaje y viceversa.

La rugosidad del fondo fue calculada a partir de las formulaciones de Manning, utilizando valores uniformes en las direcciones U y V iguales a 0.03. Las fuerzas en el fondo debidas al oleaje fueron calculadas con las formulaciones de Fredsøe (1984). Se definió la condición de deslizamiento libre para las fronteras laterales, debido a que en simulaciones hidrodinámicas de gran escala los esfuerzos tangenciales para las fronteras laterales o paredes verticales pueden ser despreciados.

Para calcular la viscosidad se definieron valores uniformes de coeficientes de viscosidad horizontal turbulenta igual a 25 m<sup>2</sup>/s, y de 10 m<sup>2</sup>/s para la difusividad horizontal turbulenta. Típicamente los valores para estos parámetros dependen del flujo y el tamaño de malla utilizado en la simulación. Para modelos de gran resolución, donde muchos de los detalles del flujo son resueltos por la malla, tamaños de malla del orden de decenas de metros o menos, estos valores deben estar en el rango de 1 a 10 m<sup>2</sup>/s. Para áreas más grandes con mallas más gruesas, tamaños de malla de cientos de metros o más, los valores de los coeficientes por lo general están el de rango de 10 a 100 m<sup>2</sup>/s.

A la difusividad y viscosidad vertical turbulenta en la vertical se les asignó un valor de 0 m<sup>2</sup>/s, que es el valor mínimo que puede asignarse al modelo, ya que estos parámetros son calculadas

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

a partir del modelo de cierre para la turbulencia de segundo orden k-Epsilon y que es utilizado para resolver la turbulencia en tres dimensiones. Los coeficientes para la energía cinética turbulenta y la disipación de energía cinética turbulenta son determinados a partir de la ecuación de transporte.

Los resultados numéricos del modelo hidrodinámico son representados como corrientes litorales generadas por el oleaje y para su determinación se utilizaron los valores de la velocidad horizontal de la capa del fondo del modelo sigma. Los datos de salida se pueden visualizar directamente en el módulo QUICKPLOT del DELFT3D, desde este módulo se exportaron los resultados numéricos y se utilizó una subrutina de Matlab para dividir las corrientes litorales en corrientes paralelas a la costa y en corrientes perpendiculares a la costa y cuyos valores están expresados en m/s.

### 3.3.8. PARÁMETROS MORFODINÁMICOS

Debido al tipo de sedimento localizado en el área de estudio, para el modelo morfodinámico se definió al sedimento como no cohesivo (arena). El transporte de sedimentos permite extender la relación de Eckart para incluir la influencia de la densidad de los sedimentos. Para este estudio al sedimento se le asignó un valor de densidad específica de  $2700 \text{ kg/m}^3$  y un tamaño de grano de  $390 \mu\text{m}$  (que corresponde a arenas medias) con una capa inicial uniforme de sedimento de 5 m.

Las actualizaciones en los cambios batimétricos inducidos por el transporte sedimentario son retroalimentados hacia el modelo hidrodinámico que toma en cuenta esta variación del fondo para los nuevos cálculos. En este estudio no se incluye el efecto del sedimento en la densidad del fluido. Para sedimentos gruesos no cohesivos, tal como corresponde al material presente en la zona de estudio, se especifica que para todas las fronteras abiertas, el flujo debe entrar llevando toda la fracción de arena del sedimento a su perfil de equilibrio de concentración. Lo que significa que la carga de sedimentos que entra a través de las fronteras será adaptada de manera casi perfecta a las condiciones locales del flujo, y muy poca erosión o acreción puede ser esperada cerca de (o como consecuencia de) las fronteras del modelo.

Cuando se llevan a cabo proyecciones morfodinámicas basadas en flujos hidrodinámicos, debe tomarse en cuenta que existe una diferencia muy grande entre las escalas de tiempo de un proceso y otro. Los cambios morfológicos ocurren en una escala de tiempo mucho más grande en comparación con los cambios hidrodinámicos. Para compensar esta diferencia de escalas se recurre a una técnica de aproximación haciendo uso de un *factor morfológico de escala de tiempo* o factor de aceleración morfológica ( $f_{MOR}$ ), a partir del cual, la velocidad de los cambios morfológicos es escalada proporcionalmente a una tasa donde comienza a tener efectos significantes en los flujos hidrodinámicos.  $f_{MOR}$  trabaja multiplicando los cambios en la capa del fondo de sedimentos por un factor constante, de esta manera se extendiendo de manera efectiva el paso del tiempo morfológico (Ecuación 9). Lesser *et al.* (2004) argumenta que simulaciones morfológicas grandes pueden ser logradas utilizando simulaciones hidrodinámicas de tan solo una fracción de la duración requerida. Sin embargo, Van der Wegen, *et al.* (2010) hace referencia a que esta aproximación solo es válida

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

mientras que los cambios en el fondo por cada paso del tiempo no perturben significativamente el flujo y no exceda del 5 % de la profundidad del agua.

$$\Delta t_{\text{morfológico}} = f_{\text{MOR}} \Delta t_{\text{hidrodinámico}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

Para este estudio se utiliza un  $f_{\text{MOR}}$  de 10, esto significa para este caso que una hora de simulación hidrodinámica representa 10 horas de simulación morfológica. En la ecuación anterior  $\Delta t$  corresponde a la mitad del paso del tiempo computacional, considerando que el paso del tiempo hidrodinámico utilizado es de 0.5 min, entonces, para este caso el paso del tiempo morfológico es de 2.5 minutos.

El ajuste (*spin-up*) hidrodinámico usualmente es referido al período de tiempo requerido por el flujo dentro del dominio del modelo para adaptarse a una condición de frontera específica y alcanzar la estabilidad. Es muy probable que durante esta estabilización los patrones de erosión y depositación no reflejen adecuadamente la verdadera morfología desarrollada, por lo que durante el tiempo de ajuste, los efectos morfodinámicos deben ser ignorados. En este estudio se definió que la actualización del nivel del fondo ocurra únicamente después del ajuste hidrodinámico, evitando influir en la morfología del fondo por las variaciones iniciales del flujo. A su vez, el desarrollo de la batimetría inicial está influenciada por el ajuste morfológico que adapta la batimetría a los ajustes de los parámetros del modelo relacionados a la carga de sedimento y la composición del fondo (Van der Wegen, *et al.*, 2010). Bajo estas consideraciones se estableció un *spin-up* morfológico de 120 minutos, lo que indica será después de este lapso de 2 horas desde el inicio del tiempo de simulación en que se incluirán en los cálculos las actualizaciones batimétricas. Durante este intervalo de tiempo todos los procesos restantes continuarán normalmente, sin embargo los efectos de los flujos de sedimento disponibles en el fondo no serán considerados en los cálculos. Se estableció un umbral de 0.1 m de profundidad para el cálculo del transporte de sedimento.

Los resultados del modelo morfodinámico se muestran como la tasa de transporte de sedimento expresado en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  y en la tasa de erosión y acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica. Los resultados se graficaron a partir de los datos de salida del modelo, los cuales fueron exportados desde el módulo QUICKPLOT de DELFT3D.

#### 3.3.9. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Con base en los resultados del análisis de Los datos climáticos se diseñaron una serie de experimentos numéricos para:

- La validación del modelo: Determinar la hidrodinámica y los efectos de ella en la morfodinámica de la playa ante las diferentes condiciones del clima de oleaje. Inicializando el modelo con una playa que fue alimentada sintéticamente y forzando con las condiciones que ocurrieron durante los meses siguientes al relleno. Los resultados de este experimento se compararan con las mediciones de la playa después del relleno.

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

- Analizar los cambios en la playa alimentada artificialmente ante las distintas condiciones del clima de oleaje que ocurren en la región de estudio: El modelo validado se utilizó para realizar pruebas para determinar bajo qué condiciones climáticas un relleno de playa se desarrolla de forma óptima para adquirir un perfil más equilibrado que prolongue la vida útil. De igual forma se realizarán experimentos para determinar las características óptimas del relleno, como son, el ancho de la playa y la pendiente o perfil inicial.

Se definieron un total de 31 experimentos numéricos, incluidas tres pruebas de validación, además de 12 simulaciones de calibración y 5 experimentos para las dos propuestas de relleno de playa de Cancún. Las características de las simulaciones se muestran en la Tabla 2.

*Tabla 2. Oleajes para los experimentos numéricos.*

| Caso | Proyecto       | Dirección (°) | Hs (m) | Período (s) | Nivel del agua (m) | $\Delta t$ (min) | Corrientes | Sedimentos |
|------|----------------|---------------|--------|-------------|--------------------|------------------|------------|------------|
| A    | Calibración 1  | 0             | 0.5    | 5           | 0                  | X                | X          | X          |
| B    | Calibración 2  | 0             | 0.5    | 9           | 0                  | X                | X          | X          |
| C    | Calibración 3  | 0             | 1      | 5           | 0                  | X                | X          | X          |
| D    | Calibración 4  | 0             | 1      | 9           | 0                  | x                | x          | x          |
| E    | Calibración 5  | 90            | 1      | 7           | 0                  | 1                | x          | x          |
| F    | Calibración 6  | 90            | 1      | 7           | 0                  | 0.5              | x          | x          |
| G    | Calibración 7  | 90            | 1      | 7           | 0                  | 0.2              | x          | x          |
| H    | Calibración 8  | 115           | 1      | 8           | 0                  | 0.1              | ✓          | ✓          |
| I    | Calibración 9  | 115           | 1      | 8           | 0                  | 0.08             | ✓          | ✓          |
| J    | Calibración 10 | 115           | 1      | 8.7         | 0                  | 0.5              | ✓          | ✓          |
| K    | Calibración 11 | 115           | 1      | 8.7         | 0                  | 0.1              | ✓          | ✓          |
| L    | Calibración 12 | 115           | 1      | 8.7         | 0.5                | 0.5              | ✓          | ✓          |
| 1    | CanN01         | 0             | 0.5    | 5           | 0                  | 0.5              | ✓          | ✓          |
| 2    | CanN04         | 0             | 1      | 9           | 0                  | 0.5              | ✓          | ✓          |
| 3    | CanNNE01       | 23            | 0.5    | 5           | 0                  | 0.5              | ✓          | ✓          |

### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

|    |              |       |       |     |   |      |   |   |
|----|--------------|-------|-------|-----|---|------|---|---|
| 4  | CanNNE04     | 23    | 1     | 12  | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 5  | CanNE01      | 45    | 0.5   | 5   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 6  | CanNE04      | 45    | 1     | 9   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 7  | CanENE01     | 68    | 0.5   | 5   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 8  | CanENE04     | 68    | 1     | 11  | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 9  | CanENE11     | 68    | 5.5   | 11  | 0 | 0.1  | ✓ | ✓ |
| 10 | CanE01       | 90    | 0.5   | 5   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 11 | CanE04       | 90    | 1     | 10  | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 12 | CanE11       | 90    | 8.5   | 12  | 0 | 0.05 | ✓ | ✓ |
| 13 | CanESE02     | 112   | 1     | 7   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 14 | CanESE03     | 112   | 1     | 10  | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 15 | CanESE10     | 112   | 9     | 13  | 0 | 0.05 | ✓ | ✓ |
| 16 | CanSE01      | 135   | 0.5   | 5   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 17 | CanSE05      | 135   | 1     | 10  | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 18 | CanSE09      | 135   | 4.5   | 11  | 0 | 0.1  | ✓ | ✓ |
| 19 | CanSSE01     | 158   | 0.5   | 5   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 20 | CanSSE04     | 158   | 1     | 8   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 21 | CanSSE08     | 158   | 5.5   | 14  | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 22 | CanS02       | 180   | 0.5   | 6   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 23 | CanS04       | 180   | 1     | 8   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 24 | Validación 1 | 6/114 | 0.8/1 | 7/8 | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 25 | Validación 2 | 6     | 1     | 8   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 26 | Validación 3 | 115   | 1     | 8   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 27 | Relleno 1    | 6/114 | 0.8/1 | 7/8 | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 28 | Relleno 1    | 6     | 1     | 7   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 29 | Relleno 2    | 6/114 | 0.8/1 | 7/8 | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 30 | Relleno 2    | 6     | 1     | 8   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |
| 31 | Relleno 2    | 115   | 1     | 8   | 0 | 0.5  | ✓ | ✓ |

## 4. RESULTADOS

### 4.1. OLAJE Y VIENTO

A continuación se describe la condición del clima marítimo predominante en la costa de Cancún. Esta sección hace referencia a los datos del retro-análisis de 30 años (Appendini *et al.*, 2014), que se usaron en este trabajo para hacer una caracterización general del clima de oleaje y determinar la tendencia en una escala de tiempo mayor. Adicionalmente se analizaron datos de mediciones de oleaje que corresponden a la temporada después del relleno artificial de diciembre del 2010, obtenidos de la boya de la NOAA. Los resultados de este análisis fueron descritos en la sección de validación, por lo que serán omitidos en esta sección.

La dirección predominante del arribo con cerca de un 40% es el ESE, seguida del SE (20%), mientras que el oleaje proveniente del Este representa menos del 20% como puede observarse en la rosa de distribución del oleaje (Figura 10). Estas direcciones corresponden al oleaje típico y también al oleaje extremo debido a tormentas Complementarias a estas direcciones están las provenientes del ENE con un poco más del 10% y del NE (~8%) que se presentan principalmente en la época invernal con el arribo de los frentes fríos.

La dirección predominante del viento es desde el ESE, SE y en menor cantidad del Este, lo cual coincide con las direcciones del oleaje incidente. Aunque los registros de vientos muestran de forma más clara la influencia del paso de los frentes fríos, caracterizados por incidencia de viento proveniente de la dirección del ENE y del NE.

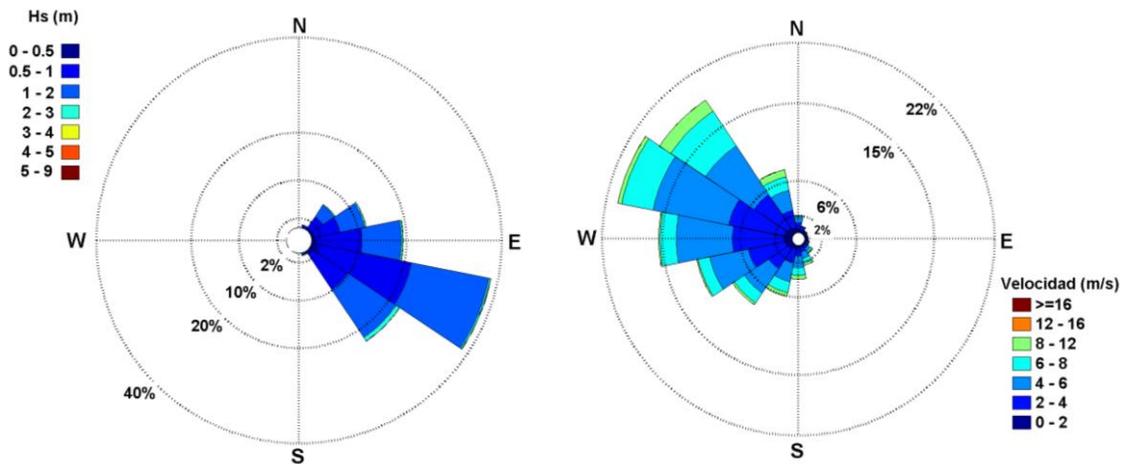


Figura 10. Rosa de oleaje (izquierda) y viento (derecha) generada a partir de los datos del retro análisis elaborado por Appendini et al. (2014) para los datos comprendidos entre los años 1979 a 2008, a una profundidad aproximada de 78m (localización en la Figura 2 de la sección de Metodología).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

La altura de ola predominante para la costa de Cancún se localiza en el rango de 0.5 a 1.5 metros, con periodos de entre 5 y 10 segundos y que corresponden al rango de dirección de 100-150 grados (Figura 11). En estos datos de retro análisis, el caso más extremo alcanza los 9 metros de altura con periodo de 13 segundos proveniente del ESE, que de acuerdo a la fecha corresponde a oleaje provocado por el Huracán Wilma (21 Oct. De 2005). Sin embargo, mediciones *in situ* frente a las costas de Puerto Morelos durante el paso del huracán Wilma registraron olas mayores a 12 metros (Silva *et al*, 2009).

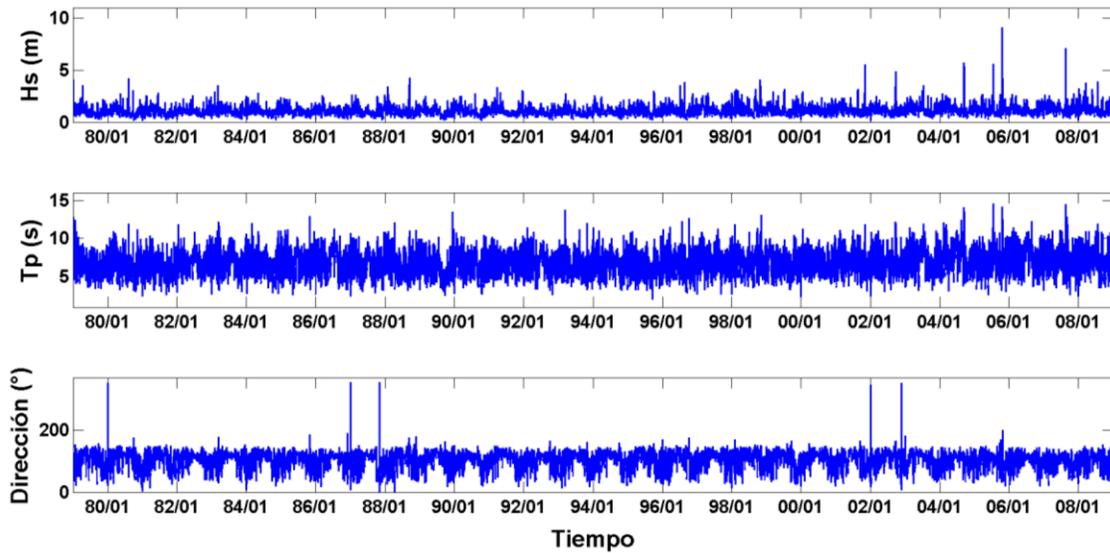


Figura 11. Altura significativa, período y dirección del oleaje en la región de Cancún entre los años 1979 a 2008. A una profundidad aproximada de 78m (localización en la Figura 2 en la sección de Metodología). Las figuras fueron generadas a partir de los datos del retro análisis elaborado por Appendini *et al*. (2014).

La mayor ocurrencia de casos de oleaje se localiza en el rango de los 60 a 150 grados, con alturas de ola que oscilan alrededor de 1 metro. Relacionando los períodos con la dirección del oleaje, se encuentra que la mayor cantidad de casos ocurren en un rango de 100 a 150 grados y corresponde a períodos de entre 6 y 9 segundos. En cuanto a la relación de la altura significativa del oleaje con respecto al período, el rango para los casos de altura de ola de mayor ocurrencia varía de los 0.5 a 1.5 metros, mientras que el rango de períodos es de los 4 a los 10 segundos (Figura 12). Los oleajes de mayor altura (6 a 9 metros) se localizaron en rangos de direcciones de entre los 70 y 125 grados y periodos de entre 12 y 14 segundos.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

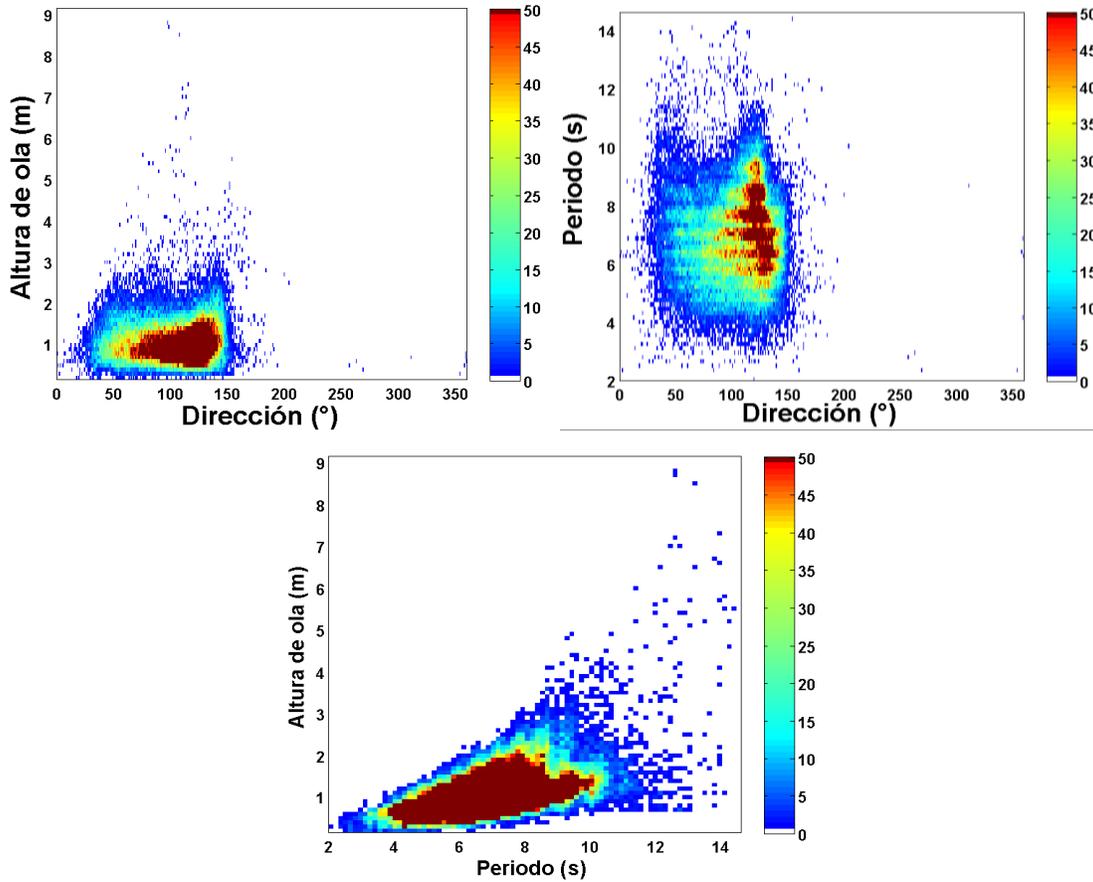


Figura 12. Diagramas de dispersión que relaciona la altura de ola y la dirección (arriba, izquierda), Periodo y dirección (arriba, derecha) y altura de ola y periodo (abajo, centro) para oleaje incidente en la región de Cancún entre los años 1979 a 2008. Las figuras fueron generadas con los datos de oleaje obtenidos del retro análisis de 30 años elaborado por Appendini et al. (2014).

### 4.2. MORFOLOGÍA

Los cambios morfológicos que ocurrieron en la playa de Cancún en las fechas cercanas al relleno de playa y obtenidos a partir del análisis de los perfiles de playa se describen a continuación. El diseño del muestreo fue descrito dentro de la sección de metodología. Como se mencionó anteriormente el relleno de playa se inició en Diciembre de 2009 y concluyó en Enero de 2010. Las fechas de los distintos muestreos, la fecha del relleno artificial de la playa y las condiciones de oleaje que prevalecieron durante todo el periodo estudiado se muestran en la Figura 13. En esta figura la proporción de las componentes x-y de los vectores de dirección del oleaje es desigual, donde la componente 'y' está magnificada con respecto a la componente 'x' para permitir su visualización. Entre las campañas C y D el oleaje predominante proviene del Este y ESE, con algunos eventos provenientes del Norte. Las alturas significantes de ola se encontraron principalmente en un rango de 0.5 m a 1.5 m.

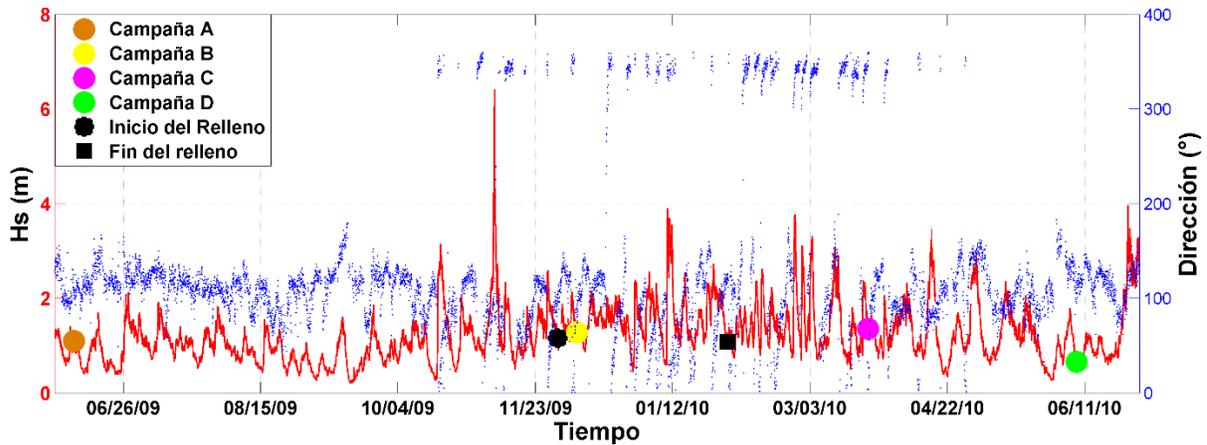


Figura 13. Registro temporal de las características del oleaje. La línea roja indica la altura de ola significativa Los Puntos azules la dirección del oleaje. La figura muestra la localización temporal de las campañas de campo de medición de perfiles de playa (círculos de colores) y el periodo durante el que se realizó la alimentación artificial de playa, el cual se encuentra delimitado por los puntos azules.

#### 4.2.1. VARIACIONES EN LOS ANCHOS DE PLAYA

##### ZONA I (ROYAL SUNSET)

Los cambios morfológicos en la Zona I a lo largo de los cuatro muestreos se muestran en la Figura 14. Durante la primer campaña (campaña A), la altura del perfil de playa cerca de la base de los hoteles es de aproximadamente 3 metros se redujeron de manera paulatina hasta 1 metro de altura y se reduce rápida y paulatinamente en los primeros 25 metros desde la base de los hoteles. De acuerdo a los datos del segundo muestreo (Campaña B), en toda la Zona I se presentó un incremento en la altura del relieve entre la campaña A y la campaña B, alcanzando, en algunas partes, alturas cercanas a los 4 metros. La ganancia de sedimento fue más evidente hacia la región Sur de esta Zona I (entre los 600 y 800 metros al sur del inicio del muestreo). De la campaña B a la campaña C, se observó una ganancia de playa considerable, con un incremento en la altura de los perfiles en la parte más marina, en la región del norte de esta zona (los primeros 700 metros desde el Norte). Los cambios entre las campañas C y D son menos notorios, presentándose una disminución ligera en la altura de los perfiles (Figura 14).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

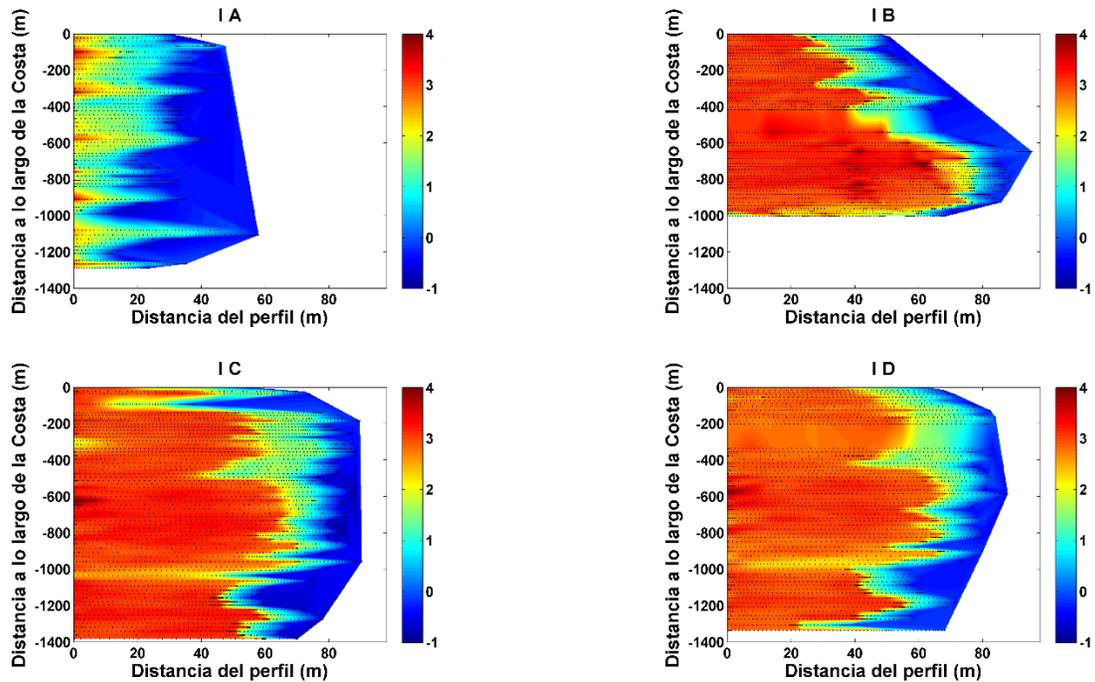


Figura 14. Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona I durante los muestreos A (2009 06 08), antes del relleno de playa y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa. Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros.

La evolución del ancho de playa en la Zona I (Figura 15) consistente con el comportamiento del relieve de los perfiles de playa; se presentó una ganancia considerable para las campañas B, C y D, subsecuentes al relleno artificial, con respecto a la campaña A, previa al relleno de playa. A partir de las mediciones realizadas durante la campaña A, se determinó un ancho promedio de playa para esta zona de 32 metros, con un ancho máximo de 50 metros y un mínimo de 12 metros. Para la campaña B, se observó una ganancia aproximada de 20 metros en el ancho de playa para los primeros 300 metros a lo largo de la costa (desde el Norte), para la región comprendida entre los 300 y 600 metros al Sur del inicio del muestreo, la ganancia de ancho de playa fue de alrededor de 30 metros. La parte más al Sur tuvo el mayor incremento en el ancho de playa, alcanzando en ciertas zonas una ganancia de más de 60 metros. En la campaña C, se observó un incremento en los primeros 600 m, a partir del Norte, sin embargo una disminución mínima se presentó para el resto de la zona. De la campaña C, a la D, se encontró una disminución en el ancho de playa a lo largo de toda la zona, que en conjunto con la pérdida de altura de perfil (Figura 16), sugieren la redistribución y/o compactación del sedimento vertido durante la alimentación artificial de la playa.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

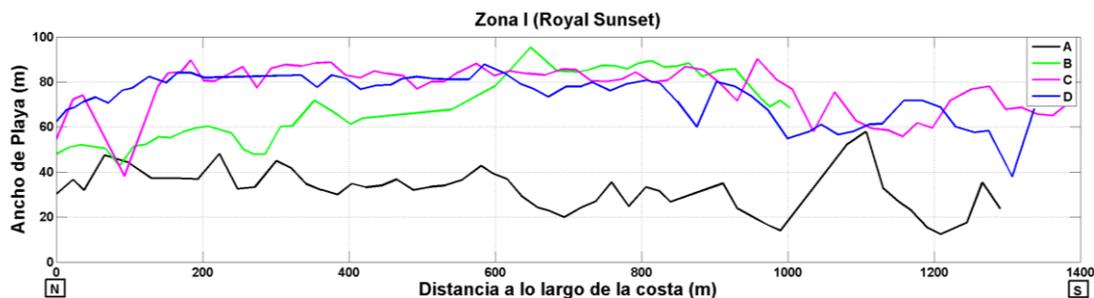


Figura 15. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) en la Zona I para cada campaña de medición: A (2009 06 08), antes del relleno y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa.

Evidentemente el ancho de playa mínimo y el ancho promedio menor de playa se encontraron en el muestreo de la campaña A, previo al relleno de playa. El ancho máximo de playa corresponde a la campaña B, posterior al relleno, sin embargo, el ancho promedio mayor que se presentó corresponde a la campaña C (Tabla 3).

Tabla 3. Anchos de playa para la zona I (Royal Sunset) obtenidos para cada uno de los muestreos en la Zona I.

| Campaña | Ancho de playa (m) |        |          |
|---------|--------------------|--------|----------|
|         | Mínimo             | Máximo | Promedio |
| A       | 12.35              | 57.88  | 32.01    |
| B       | 42.52              | 95.44  | 69.22    |
| C       | 38.13              | 90.21  | 77.21    |
| D       | 37.84              | 87.83  | 72.99    |

En esta zona se identificó la existencia de escarpes en los perfiles de playa en las campañas B, C y D, posteriores al relleno de playa, los cuales se localizaron principalmente en la parte más marina del perfil y alcanzaron en algunos casos alturas superiores a 1.5 metros (Figura 16). También se observó una disminución progresiva en las alturas de los perfiles de la Campaña B a la C y posteriormente a la Campaña D, lo cual pudo deberse a la compactación y redistribución del sedimento vertido durante el relleno. En la Figura 14, los escarpes fueron identificados por un cambio abrupto en los colores que indican la altura del perfil de playa y son más evidentes en la región Sur de la zona.

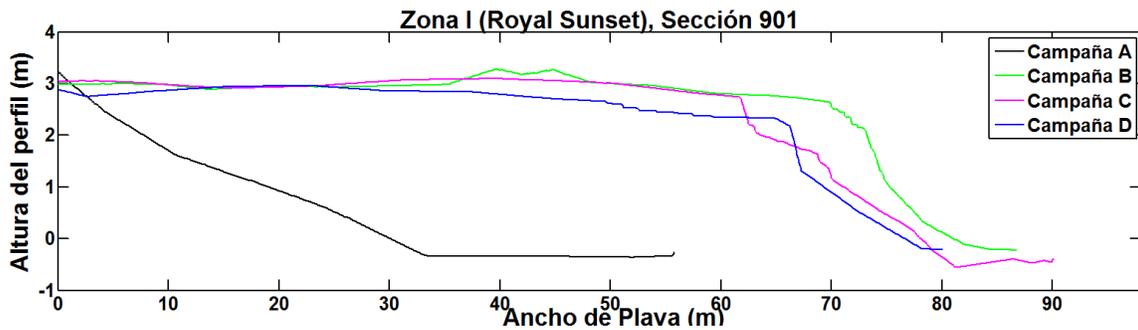


Figura 16. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona I. Se observan escarpes en los perfiles de las campañas B, C y D, posteriores al relleno de playa.

## ZONA II (PLAYA MARLÍN)

La evolución morfológica de la Zona II a lo largo de los cuatro muestreos se muestra en la Figura 17. El primer muestreo (campaña A) en la Zona II reveló alturas de hasta cuatro metros en algunos perfiles cerca a la base de los hoteles, particularmente en la región más sureña de la Zona II donde también se localizó el ancho de playa mayor (aproximadamente 39 m). En gran parte de la zona, para la campaña A, se encontraron alturas de perfiles que oscilan entre 1 y 2 metros en la parte cercana a la base de los hoteles y su ancho de playa alcanzó en algunos sitios una extensión de entre 7 y 10 metros (Figura 17 y Figura 18). El ancho promedio para la campaña A en esta zona es de 20 metros. Para la campaña B solo se tienen datos en la sección Norte (primeros 500 metros desde el Norte) lo que dificulta el análisis en la evolución del relleno de playa en esta zona. Sin embargo, se puede observar un incremento evidente en la altura del relieve, alcanzando más de tres metros para gran parte de la zona muestreada. De igual manera el ancho de playa se incrementó significativamente para esta campaña alcanzando un promedio de 55 metros y un ancho máximo de 64 metros y un mínimo de 38 metros (Tabla 4).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

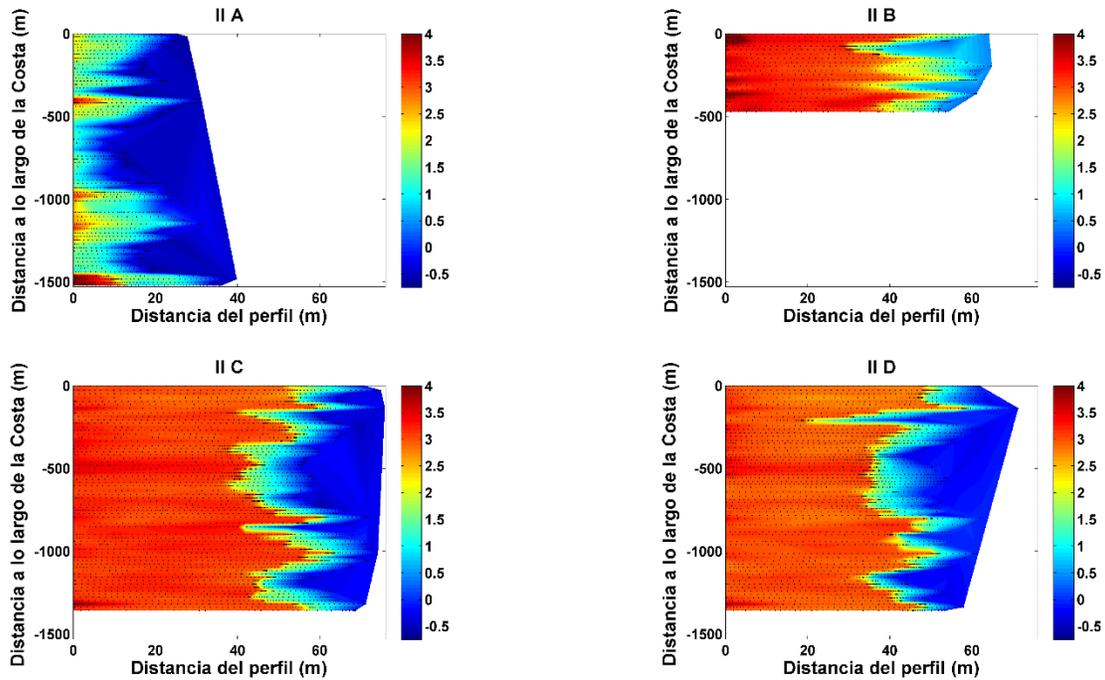


Figura 17. Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona II durante los muestreos A (2009 06 08), antes del relleno de playa y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa). Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros.

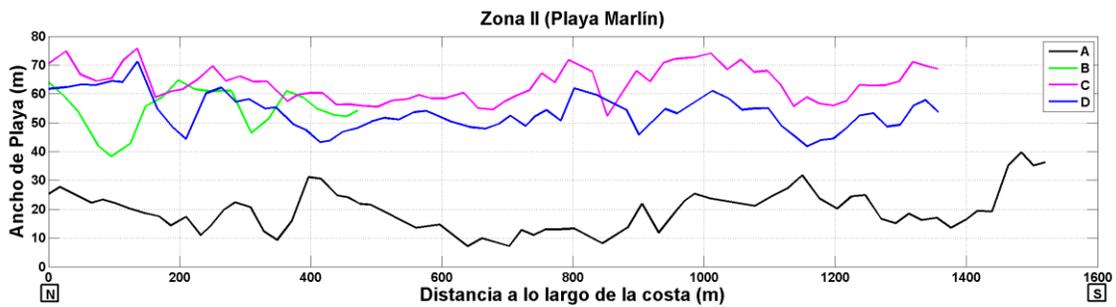


Figura 18. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) en la Zona II para cada campaña de medición: A (2009 06 08), antes del relleno y B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa.

En la campaña C se encontró un incremento en la altura de los perfiles de playa en los primeros 40 metros desde la base de los hoteles. En comparación con la campaña A, en la campaña C se encontró un incremento de hasta 50 metros en el ancho de playa. Siendo en esta misma campaña donde el promedio de ancho de playa es mayor para esta zona con 63 metros y el ancho máximo de 75 metros (Tabla 4).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4. Anchos de playa para la zona de Playa Marlin (II) obtenidos para cada uno de los muestreos de la Zona II.

| Campaña | Ancho de playa (m) |        |          |
|---------|--------------------|--------|----------|
|         | Mínimo             | Máximo | Promedio |
| A       | 7.11               | 39.75  | 19.86    |
| B       | 38.33              | 64.78  | 54.77    |
| C       | 52.34              | 75.76  | 63.48    |
| D       | 41.80              | 71.22  | 53.30    |

De la campaña B a la C se presentó un incremento promedio de 9 metros en el ancho de playa, sin embargo, de la campaña C a la D se presentó una disminución promedio de 10 metros en el ancho de playa a lo largo de toda la zona (Figura 18 y Tabla 4) y una disminución moderada en la altura de los perfiles de playa. También, se localizaron escarpes en la playa distribuidos a todo lo largo de la Zona II en las campañas B, C y D, los cuales en algunos casos, presentaron alturas superiores a 1.5 metros (Figura 19). Estos escarpes son consistentes en las campañas posteriores al relleno de playa de 2010 en las Zonas I y II, lo cual está de acuerdo con el estudio presentado por Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.* (2013) en el cual menciona la existencia de escarpes en la zona Norte de la playa de Cancún posterior al relleno de 2010, los cuales pueden tener su origen un diseño inadecuado del perfil de playa de relleno.

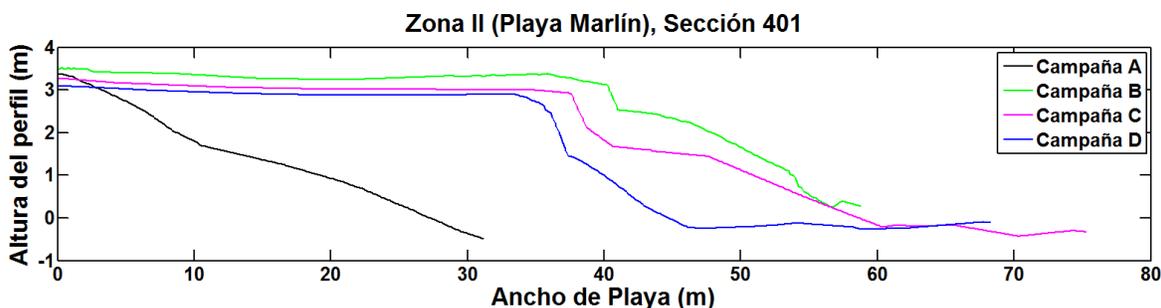


Figura 19. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona I. Se observan escarpes en los perfiles de las campañas B, C y D, posteriores al relleno de playa.

### ZONA III (PLAYA DELFINES)

La evolución morfológica de la Zona III se muestra en la Figura 20. Para esta zona, en el primer muestreo, campaña A, la altura de los perfiles de playa cerca de la base de los hoteles fue superior a los 5 metros. Esto ocurrió aproximadamente entre los 500 y 600 metros al sur del inicio

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

del muestreo (Figura 20) y de igual manera corresponde a la región que presentó el ancho mayor de playa (aproximadamente 50 metros) para esta campaña, exceptuando el perfil inicial y más norteño de la zona. El ancho de playa promedio para la campaña A fue de 30 metros, mientras que el máximo fue de 55 metros y el mínimo de tan solo 20 metros (Tabla 5). Debido a que el relleno de playa se inició de Norte a Sur, al momento en que se realizó la campaña B, los trabajos de alimentación artificial de playas de Cancún, aun no alcanzaban la Zona III de monitoreo. Tanto las alturas de los perfiles de playa como los anchos de playa para esta campaña fueron menores que para la campaña A (Figura 20 y Figura 21). La mayor elevación de los perfiles fue entre 3 y 4 metros en las partes más elevadas junto a la base de los hoteles. El ancho promedio de playa descendió a tan solo 24 metros, el ancho mínimo llegó a ser de 10 metros y el máximo alcanzó solamente 37 metros. Lo que sugiere que prevalecía una tendencia erosiva en esta zona.

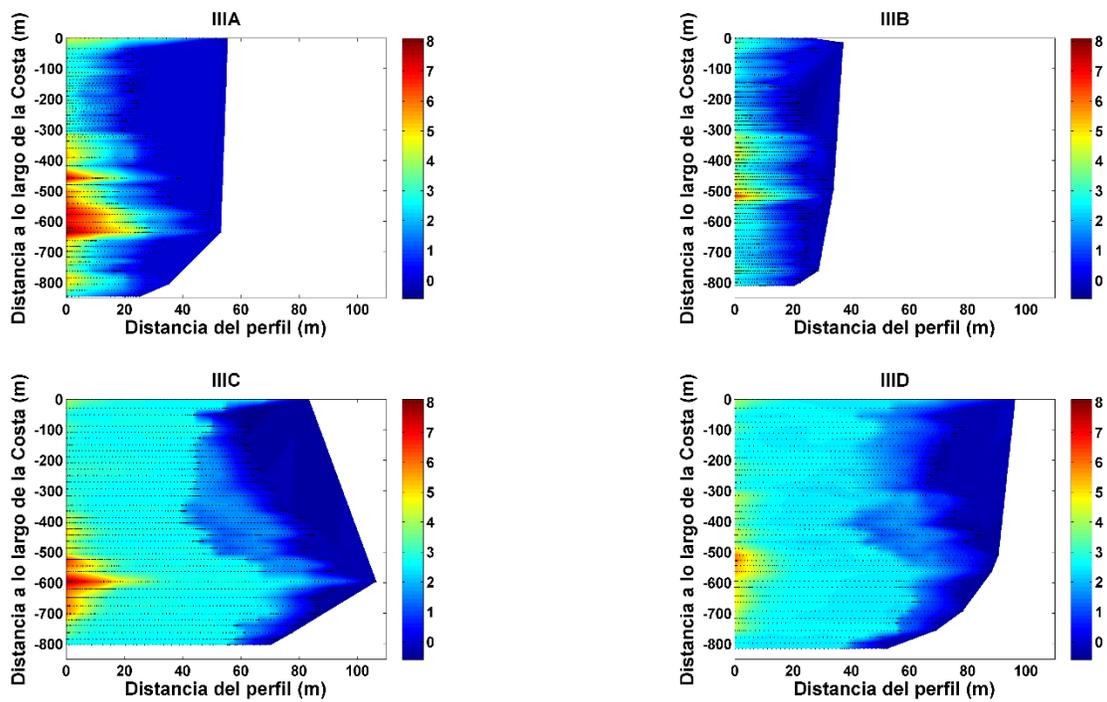


Figura 20. Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona III durante los muestreos A (2009 06 08) y B (2009 12 08) antes del relleno de playa, C (2010 03 24) y D (2010 06 08) posteriores al relleno de playa. Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros.

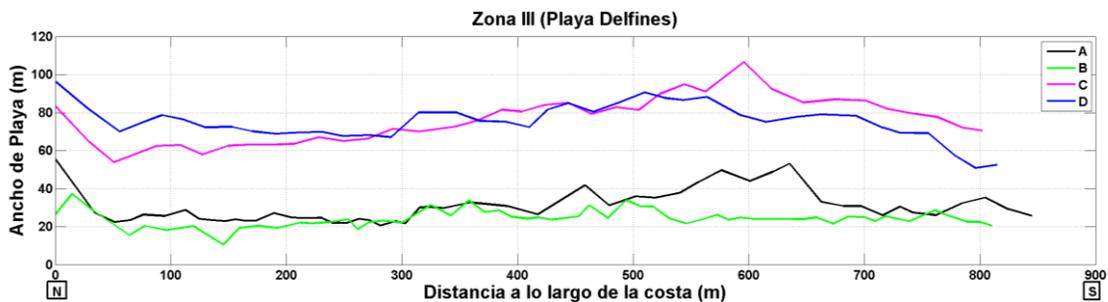


Figura 21. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) para cada campaña de medición correspondiente a la Zona III.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Un comportamiento erosivo se encontró en esta zona entre la Campaña A y la Campaña B ya que en promedio se presentó una disminución de 5 metros en el ancho de playa y una disminución sustancial en la altura de los perfiles (Tabla 5). Para la campaña C, se observó el incremento en el ancho de la playa seca debido al relleno artificial alcanzando ahora un promedio de ancho de playa de 76 metros y anchos mínimo y máximo de 54 y 106 metros respectivamente (Tabla 5 y Figura 22). De igual manera, se presentó un incremento en las alturas de los perfiles de playa recuperando a más de 5 metros la altura en la base de los hoteles en la sección entre los 500 y 600 metros al Sur del inicio del muestreo, y una altura de entre 2 y 3 metros para gran parte de la zona. De la campaña C a la D se presentó una disminución en la altura de los perfiles en la parte cercana a la base de los hoteles en la región Sur de la zona. De igual forma disminuyó la altura del perfil en la parte más marina de esta región. En la región Norte y Central de la zona, durante la campaña D, se observó un incremento en la altura de los perfiles de playa en la parte más marina a la vez que aumentó el ancho de playa. Sin embargo, la región Sur presentó una pérdida en el ancho de playa (Figura 21). En esta zona no se presentaron escarpes posteriores al relleno de playa.

*Tabla 5. Anchos de playa para la zona de Playa Delfines (III) obtenidos para cada uno de los muestreos en la Zona III.*

| Campaña | Ancho de playa (m) |        |          |
|---------|--------------------|--------|----------|
|         | Mínimo             | Máximo | Promedio |
| A       | 20.49              | 55.50  | 29.99    |
| B       | 10.55              | 37.24  | 24.31    |
| C       | 53.85              | 106.53 | 76.09    |
| D       | 50.84              | 96.34  | 75.18    |

Un ejemplo representativo del comportamiento de los perfiles de playa de la parte más al Sur de la Zona III se presenta en la Figura 22, donde se observa un patrón erosivo entre la Campaña A y B caracterizado por la disminución en el ancho de playa así como en la pérdida de la altura del perfil. Para la Campaña C el ancho de playa alcanza más de 100 metros y hay un incremento la altura del perfil, sin embargo, para la Campaña D nuevamente se presentó una disminución en el ancho de playa acompañado con pérdida de altura del perfil.

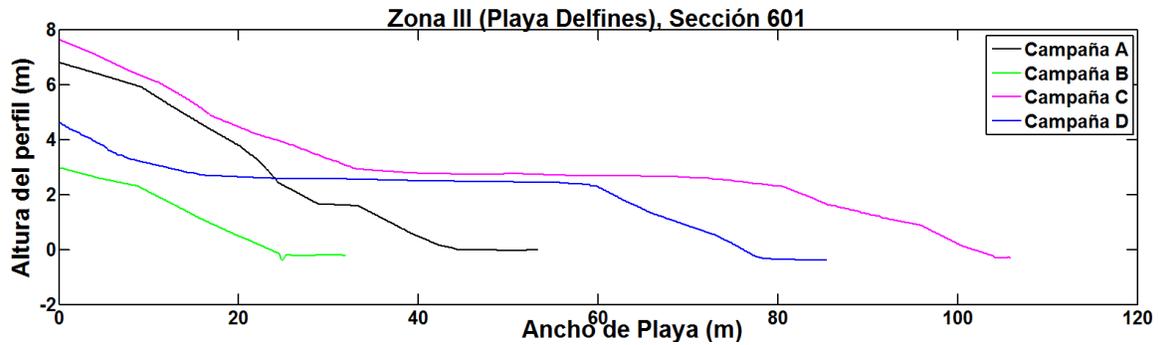


Figura 22. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona III.

#### ZONA IV (SUN PALACE)

En la Zona IV no se llevó a cabo el proyecto de rehabilitación de playas de Cancún. La evolución morfológica de la Zona III se muestra en la Figura 23. Los perfiles de playa medidos en esta zona presentaron para la campaña A alturas de hasta 4 metros en las partes cercanas a la base de los hoteles con un ancho promedio de playa de 43 metros y ancho máximo y mínimo de 60 y 22 metros respectivamente (Tabla 6). Para la campaña B, se observó una disminución generalizada en las alturas de los perfiles de playa, al igual que un retroceso en la línea de costa, que en algunas regiones alcanzó más de 30 metros (Figura 24). Esto muestra evidencia de una tendencia erosiva para esta temporada, dejando un ancho promedio de 27 metros y un ancho mínimo de 15 metros. Para la campaña C se observó una recuperación sustancial en el ancho de playa que alcanzó un incremento de hasta 30 metros de ancho de playa en la región más al Norte de esta zona. Así mismo se observó un incremento en las alturas de los perfiles de playa medidos para esta región. Sin embargo, a partir de la región Central y hacia el Sur, hasta el final de la zona, se presentó un patrón intercalado de pérdidas y ganancias en el ancho de playa entre las campañas B y C.

De la campaña C a la D nuevamente se observó una disminución en el ancho de playa en los primeros 500 metros desde el Norte y a lo largo de la costa donde se presentó el ancho mínimo de playa de 16 metros (Tabla 6), compensado con un incremento en el ancho de playa para la parte restante de la zona (Figura 24), donde fue medido un ancho máximo de 54 metros, el ancho promedio para la campaña D de esta zona fue de 34 metros (Tabla 6). Este patrón fue consistente con las alturas de los perfiles de playa medidos en el campo que de igual manera presentaron una disminución en la región Norte en la parte más marina y un incremento en las elevaciones de los perfiles en la parte más hacia el mar de la región Sur de la zona (Figura 23).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

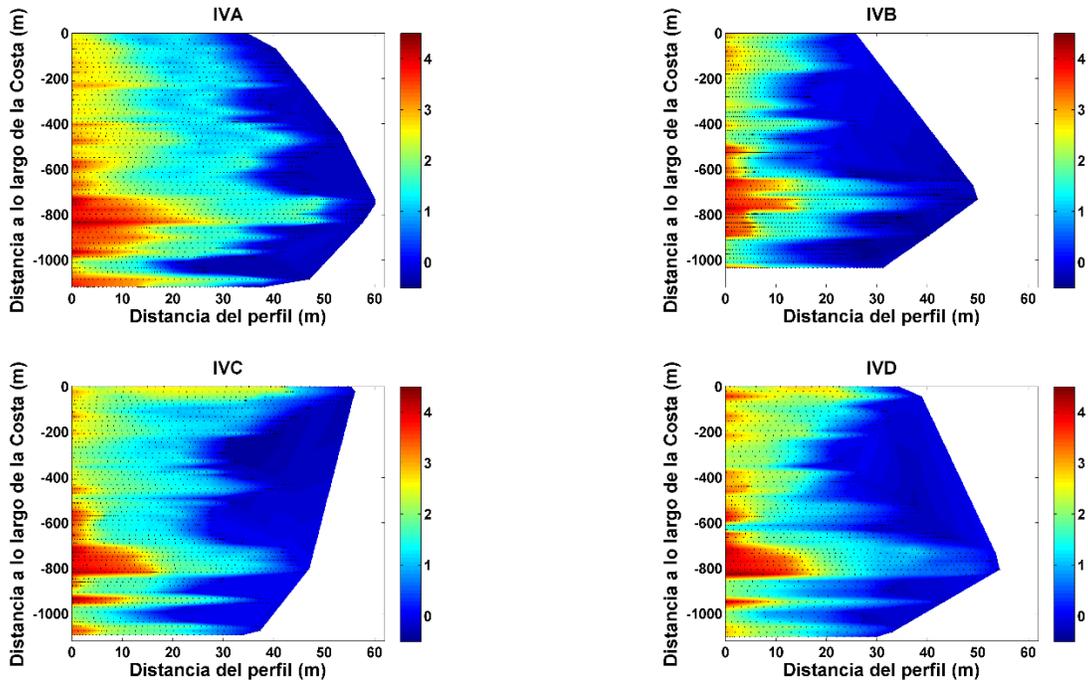


Figura 23. . Perfiles de playa interpolados espacialmente para representar la morfología de la playa de la Zona IV durante los muestreos A (2009 06 08), B (2009 12 08), C (2010 03 24) y D (2010 06 08). Los puntos indican los datos medidos en el campo. La barra de colores indica la altura en metros.

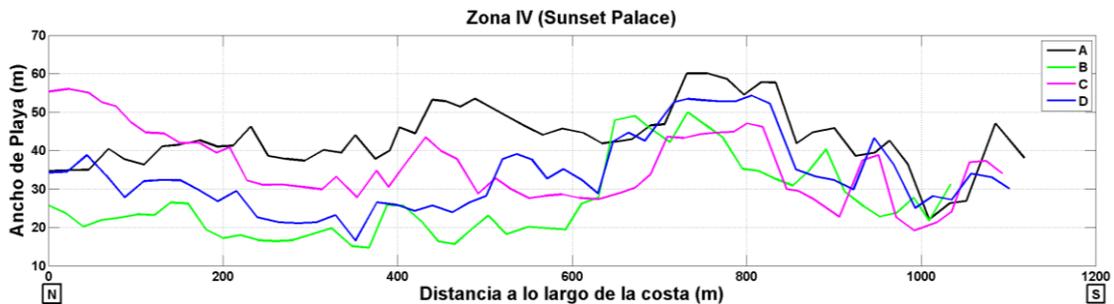


Figura 24. Ancho de playa desde el Norte (0 en el eje X) para cada campaña de medición correspondiente a la Zona IV.

Si bien en la Zona IV no se llevó a cabo el relleno de playa, no podemos decir que haya quedado exenta del beneficio del vertido de sedimento, ya que se observa un incremento en el ancho promedio de playa de la Campaña B a la Campaña C (Tabla 6), lo cual puede sugerir redistribución del sedimento vertido más al norte de la playa y transportado hacia el Sur hasta la Zona IV. De igual manera se presentó un incremento en la altura del perfil para esta temporada. Aunque de la Campaña C a la Campaña D nuevamente disminuye el ancho promedio de playa

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 6. Anchos de playa para la zona de Sun Palace (IV) obtenidos para cada uno de los muestreos en la Zona IV.

| Campaña | Ancho de playa (m) |        |          |
|---------|--------------------|--------|----------|
|         | Mínimo             | Máximo | Promedio |
| A       | 22.06              | 60.07  | 43.47    |
| B       | 14.72              | 49.98  | 26.85    |
| C       | 19.17              | 56.06  | 36.22    |
| D       | 16.54              | 54.32  | 33.78    |

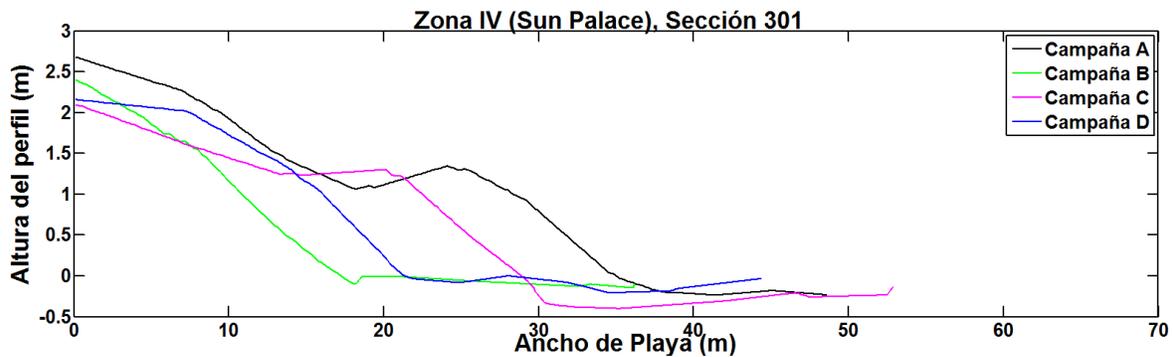


Figura 25. Perfiles de playa interpolados medidos en el campo para las cuatro campañas analizadas en este estudio, corresponden a una sección de la Zona IV.

### 4.2.2. VOLUMEN SEDIMENTARIO Y BALANCE ENTRE TEMPORADAS

#### ZONA I (ROYAL SUNSET)

Entre la campaña A y B, debido al relleno artificial una fuerte acumulación de sedimento fue observada en toda la Zona I (Figura 26), principalmente en la parte Sur de la Zona I y en la región sumergida (marina), donde la ganancia de sedimento alcanzó el orden de los 4 metros. De la campaña B a C, la acumulación de sedimento en la parte marina se observó únicamente en los primeros 600 metros desde el Norte. El resto de la zona presentó tendencia erosiva, con algunas franjas de sedimentación menores a un metro. Un patrón erosivo muy similar fue identificado para la temporada comprendida entre la campaña C y D, aunque las áreas de acumulación disminuyeron en extensión y magnitud, mientras que las regiones de erosión se vieron incrementadas, alcanzando pérdida de sedimento de hasta 4 metros. Debido a la alimentación de playa llevada a cabo en la

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

zona, el balance total de sedimento entre la campaña A y D fue de acumulación en un rango de 1 a 4 metros.

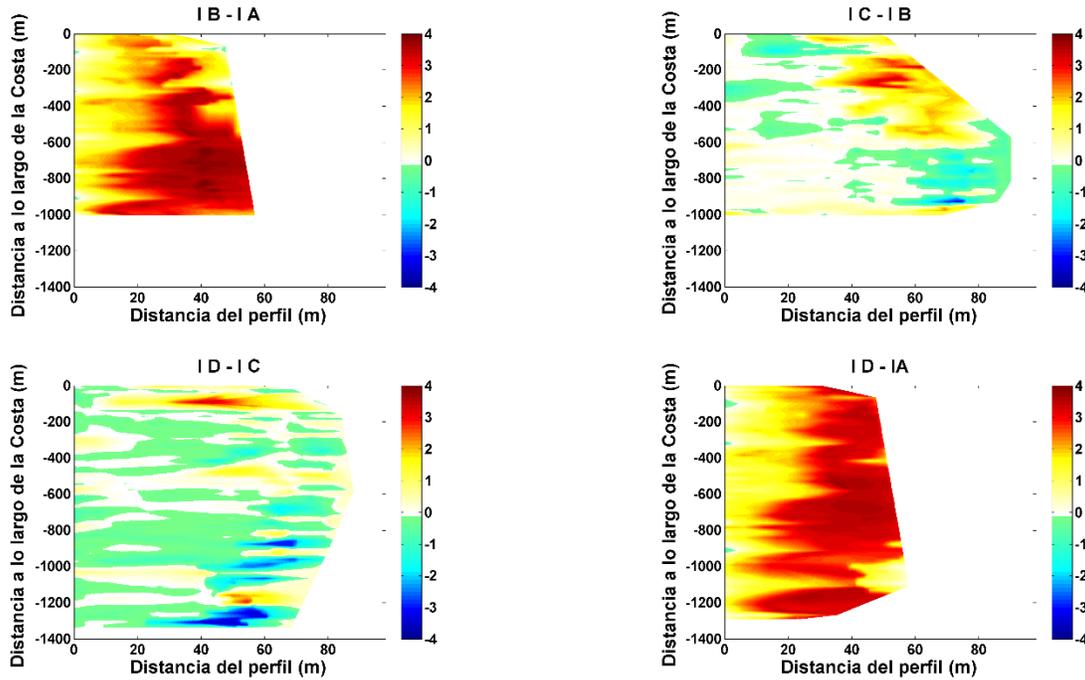


Figura 26. Patrones de balance de sedimentos en la zona I de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.

### ZONA II (PLAYA MARLÍN)

El análisis del balance sedimentario entre la campaña A y B y C de la Zona II (Figura 27), por falta de datos en la segunda campaña, se limitó a los primeros 500 metros de la zona. De la campaña A a B, la acumulación de sedimentos producto de la alimentación de la playa se generalizó en toda la zona, con valores de acumulación que fluctuaron de los 2 a los 4 metros en la altura del relieve, encontrándose los valores máximos al final de los perfiles hacia la parte sumergida. Entre las campañas B y C, áreas de acumulación intensa se presentaron en varias regiones de la zona alternadas con áreas de erosión. Entre las campañas C y D, la tendencia erosiva fue dominante en toda la zona, principalmente en la parte más marina de los perfiles. Al igual que en la Zona I, el balance total sedimentario entre la campaña A y D presentó una tendencia acumulativa en un rango de 1 a 3 metros, debido principalmente al relleno artificial.

La pérdida en la altura de los perfiles es debida probablemente al asentamiento de las partículas y la consolidación a la redistribución del sedimento. Tanto en la Zona I, como en la Zona II, la pérdida de volumen sedimentario acompañado de una ganancia en el ancho de playa sugiere un reacomodo en el perfil.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

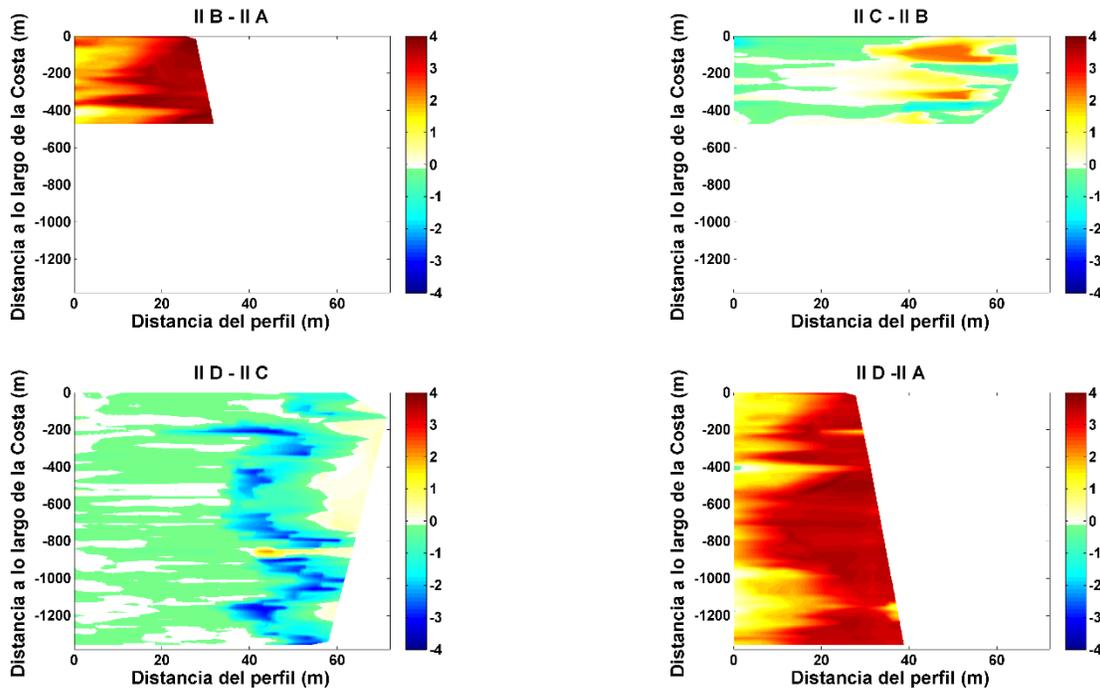


Figura 27. Patrones de balance de sedimentos en la zona II de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.

### ZONA III (PLAYA DELFINES)

En la Zona III se presentó tendencia erosiva entre las campañas A y B (Figura 28), principalmente hacia los 600 metros al Sur del inicio de la zona de muestreo, donde se focalizó la erosión. Entre las campañas B y C, prevaleció la acumulación de sedimentos vía la alimentación artificial de 2010, donde la ganancia mayor de sedimento se presentó precisamente en la región de los 600 metros al Sur del inicio del muestreo. Sin embargo, en esta temporada se presentaron pérdidas sedimentarias para la parte cercana a la base de los hoteles entre las secciones de los 300 y 500 metros al Sur del inicio del muestreo. Entre las campañas C y D, la tendencia erosiva se hizo presente nuevamente para la mayor parte de la zona, focalizando la erosión otra vez en la región de los 600 metros al Sur del inicio del muestreo. Sin embargo, para la campaña D se observaron áreas de acumulación en la parte sumergida de los perfiles en la sección Norte de la zona. El balance sedimentario total, entre la campaña A y D, presentó sedimentación en la mayor parte de la zona, principalmente en el área más marina. Sin embargo, a diferencia de las dos primeras zonas, se encontraron áreas de erosión en la parte cercana a la base de los hoteles, señalando un punto de erosión crítica hacia la sección de los 600 metros al sur del inicio del muestreo de la Zona III.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

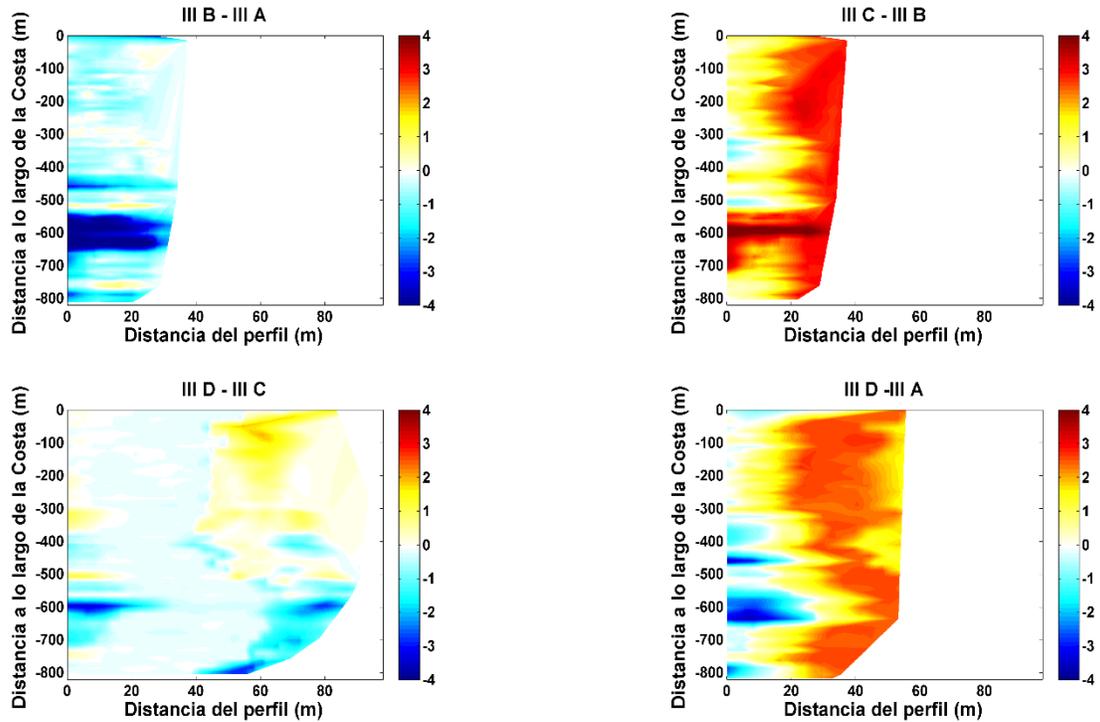


Figura 28. Patrones de balance de sedimentos en la zona III de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.

### ZONA IV (SUN PALACE)

La Zona IV es un caso especial, ya que como se ha mencionado antes, no fue sujeta a la alimentación artificial, por lo que los patrones naturales en el balance sedimentario (Figura 29) pueden ser estudiados. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que existe la influencia del transporte paralelo a la costa que es capaz de acarrear sedimento de las zonas vecinas. Para la temporada comprendida entre las campañas A y B, el patrón fue erosivo en la mayor parte de la zona, principalmente en la región Sur, con pérdidas mayores a los 2 metros. No obstante, se presentaron pequeñas áreas de acumulación en la parte cercana a la base de los hoteles. Un cambio radical ocurrió para la siguiente temporada de monitoreo, campañas B a C, ya que en esta ocasión, la tendencia fue hacia la acumulación de sedimento, aunque siguieron persistiendo áreas de erosión en algunas partes de la zona. El patrón del balance sedimentario entre la campaña C y D, fue una combinación entre áreas de acumulación y áreas de sedimentación sin que predominara tendencia alguna. Sin embargo, el balance sedimentario total entre la campaña A y D muestra que para esta zona, en la que no se realizó alimentación artificial, la erosión fue predominante, focalizándose en la región Sur.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

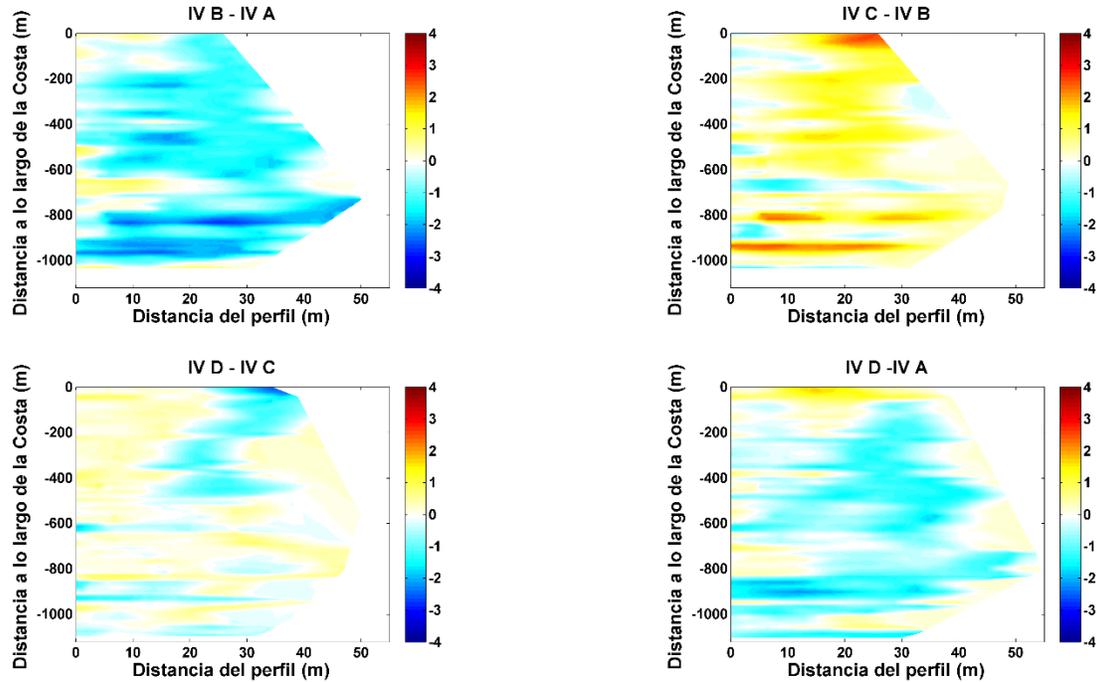


Figura 29. Patrones de balance de sedimentos en la zona IV de playas de Cancún entre las diferentes campañas. Los valores positivos (rojos) indican acumulación, los valores negativos (azules) erosión. La escala de valores de la barra de colores está indicada en metros.

En las Zonas I y II es evidente la ganancia de volumen sedimentario (Tabla 7 y Tabla 8) para las campañas posteriores al relleno de playa. Esta ganancia se prolongó hasta la tercera campaña, pero el volumen de la ganancia descendió significativamente. En la Zona III, donde el relleno de playa aún no se había llevado a cabo cuando se realizó la campaña B, se presentó pérdida de volumen sedimentario seguido de una ganancia considerable para la campaña C, cuando el relleno ya había ocurrido. En la Zona IV se presentó un comportamiento similar, con pérdida de sedimento entre las campañas A y B y recuperación de volumen sedimentario para la campaña C. Sin embargo, dado que en esta zona no se implementó la alimentación artificial, este patrón puede ser asumido como la tendencia natural del sistema. Para las cuatro zonas se presentó pérdida en el volumen de sedimento para la campaña D siendo máxima en la zona II y mínima en la Zona IV. La pérdida en las primeras tres zonas puede ser atribuida a la redistribución natural del sedimento vertido durante la alimentación artificial de la playa.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 7. Volumen de sedimento en m<sup>3</sup> para cada una de las zonas en las cuatro campañas.

| Zonas | Campañas |           |           |           |
|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
|       | A        | B         | C         | D         |
| I     | 3,196.00 | 24,956.00 | 23,016.00 | 16,988.00 |
| II    | 1,838.50 | 7,298.10  | 21,723.00 | 17,492.00 |
| III   | 6,001.30 | 3,118.60  | 13,857.00 | 12,878.00 |
| IV    | 7,610.40 | 3,188.40  | 5,630.20  | 5,209.10  |
| TOTAL | 18646.20 | 38,561.10 | 64,226.20 | 52,567.10 |

Tabla 8. Balance de sedimento en m<sup>3</sup> en cada zona para las cuatro campañas. Los valores positivos indican ganancia de sedimento, mientras que los valores negativos indican erosión.

| Zona | Fecha y campaña |                   |               |                   |
|------|-----------------|-------------------|---------------|-------------------|
|      | Jun – Dic '09   | Dic '09 – Mar '10 | Mar – Jun '10 | Jun '09 – Jun '10 |
|      | A-B             | B-C               | C-D           | A-D               |
| I    | 12,028.00       | 1682.10           | - 1,535.80    | <b>15,254.00</b>  |
| II   | 3,876.60        | 353.43            | -4,336.40     | <b>12,043.00</b>  |
| III  | -2,543.20       | 5,157.70          | -1,115.40     | <b>5,130.60</b>   |
| IV   | -3,910.20       | 1,929.50          | -442.40       | <b>-2,373.90</b>  |

### 4.3. MODELOS NUMÉRICOS

El efecto de la hidrodinámica producida por el oleaje incidente sobre la morfología de la zona costera de Cancún ha sido abordado mediante la aplicación de modelos numéricos de oleaje, hidro y morfodinámico acoplados vía el intercambio de información mediante archivos de comunicación, lo cual permite la actualización de un modelo con los resultados del otro. Para un mejor detalle se decidió separar la presentación de los resultados para cada uno de los modelos, pero tomando en cuenta que existe una retroalimentación entre los modelos.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Como se planteó en la metodología, el oleaje incidente fue dividido por sectores (Tabla 1 en la sección de Metodología), por lo que para la descripción de los resultados de cada uno de los modelos se siguió dicha división. Los resultados más significativos para cada sector se presentan a continuación y para fines prácticos sólo algunas figuras de los resultados son presentadas en este escrito. Todas las figuras del análisis se encuentran en los Anexo C, D, E y F correspondientes a cada uno de los modelos.

Para los experimentos se utilizaron condiciones de oleaje típicas y condiciones extremas de oleaje de tormentas y huracanes. Sin embargo, para las condiciones extremas el modelo morfodinámico no fue capaz de generar resultados confiables, ya que no logró llegar a la estabilidad, por lo que para estos casos sólo se presentan los resultados de los modelos de oleaje e hidrodinámico.

### 4.3.1. VALIDACIÓN MODELO MORFODINÁMICO

Para validar el modelo morfodinámico, de las cuatro campañas de mediciones analizadas para el presente trabajo, se seleccionaron las dos posteriores al relleno de playa que culminó en febrero de 2010. Estas campañas, C (24/03/2010) y D (08/06/2010), son las adecuadas para realizar la comparación entre los resultados del modelo y las observaciones de campo ya que el objetivo del estudio es evaluar la respuesta del relleno de playa a las condiciones de oleaje.

Los datos de oleaje fueron tomados de las mediciones de la boya 42056 de la NOAA ubicada hacia el ESE de Isla Cozumel (Figura 4), donde hay una profundidad aproximada de 4684 m. Siguiendo la metodología de propagación de oleaje que se realizó con los datos históricos de 30 años, se determinaron las características de oleaje cercano a la costa que se utilizaron como forzamiento para obtener los campos de oleaje, las corrientes por oleaje y el transporte sedimentario resultante en los modelos numéricos.

Del análisis de los datos medidos por la boya se determinó que entre estas temporadas el oleaje predominante proviene del Este y ESE, con algunos eventos provenientes del Norte (Figura 31). En base a lo anterior, para realizar este escenario de modelación se generó una secuencia de oleaje forzante de la forma siguiente: Norte, ESE, Norte y ESE.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

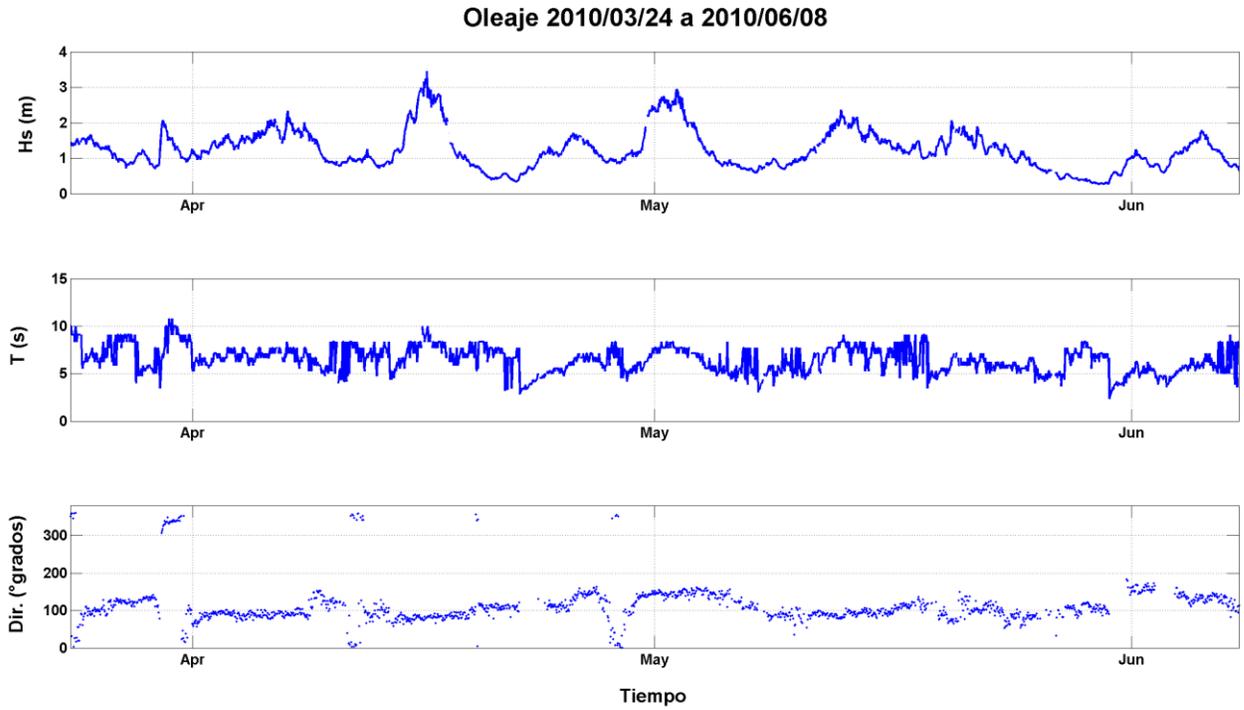


Figura 30. Condiciones de oleaje para el periodo comprendido entre el muestreo C (24/03/2010) y el muestreo D (08/06/2010). Los datos fueron obtenidos de las mediciones de la boya 42056 de la NOAA.

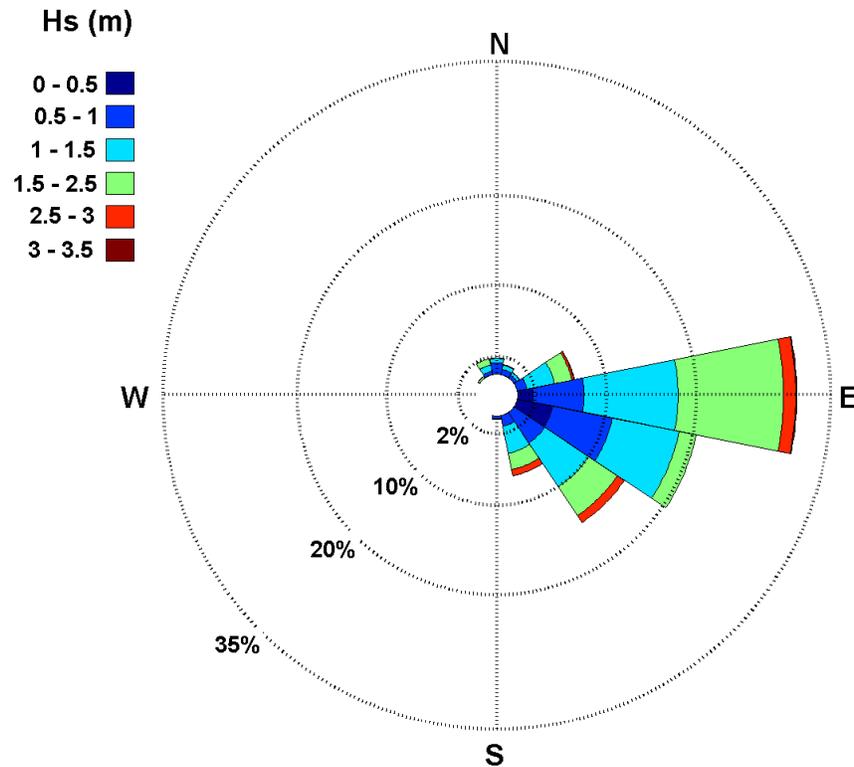


Figura 31. Rosa de oleaje de los datos obtenidos de la boya 42056 de la NOAA, para la temporada comprendida entre las campañas C y D.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Se corrió el modelo hidrodinámico para una simulación de 12 horas, forzado por el resultado del modelo de oleaje con las características de oleaje descritas previamente y acoplando al modelo de transporte de sedimentos con un factor de aceleración morfológica ( $f_{MOR}$ ) de 10. Este factor es utilizado para compensar la diferencia entre las escalas de tiempo de los procesos hidrodinámicos y los procesos morfológicos (Van der Wegen *et al.*, 2010). Trabaja multiplicando los cambios en la capa de sedimentos por un factor constante o extendiendo de manera efectiva el paso del tiempo morfológico. Simulaciones morfológicas grandes pueden ser logradas utilizando simulaciones hidrodinámicas de tan solo una fracción de la duración requerida (Lesser *et al.*, 2004). Esto significa para este caso que una hora de simulación hidrodinámica representa 10 horas de simulación morfológica.

$$\Delta t_{\text{morfológico}} = f_{MOR} \Delta t_{\text{hidrodinámico}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

El paso del tiempo ( $\Delta t$ ) hidrodinámico utilizado para la simulación es de 0.5 minutos de acuerdo a los resultados de las pruebas de sensibilidad (Sección de Metodología).

Como se mencionó anteriormente, los modelos hidro y morfodinámico tienen cuatro fronteras abiertas, ubicadas al Este, Sur, Norte y Nor-Oeste de la zona de estudio. Las tres fronteras marinas ubicadas al Este, Sur y Norte de la costa de Cancún, fueron alimentadas con los parámetros de oleaje que representaron el comportamiento del oleaje en el lapso transcurrido entre los muestreos C y D (Figura 30). Estos parámetros se obtuvieron a partir del análisis del clima de oleaje y están representados en la Tabla 9. *It* indica en qué momento después del inicio de la simulación es activado cada parámetro de oleaje. *Hs* es la altura de ola significativa expresada en metros, *Tp* es el periodo pico en segundos asociado al oleaje y *Dir* es la dirección de propagación del oleaje expresado en grados de acuerdo a la convención náutica.

El modelo de oleaje propaga estas condiciones del oleaje desde las fronteras hasta la costa y calcula los tensores de radiación del oleaje cercanos a la costa, que son las fuerzas generadoras de corriente en cada punto de malla. Con estas fuerzas, el modelo hidrodinámico calcula las velocidades. Adicionalmente, para incorporar el efecto de la corriente aledaña, que es persistente hacia el Norte, la frontera Sur se alimentó con un valor de corriente constante de 0.08 m/s. El resto de las fronteras abiertas se definieron con un carácter no reflectivo (parámetro  $\alpha=100$  en la frontera Este y frontera asignada del tipo Riemann al Norte y Nor-Oeste) sin forzar con ningún valor de corriente preestablecido para poder evaluar las corrientes generadas por el oleaje.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 9. Parámetros de oleaje alimentados en las fronteras marinas para el escenario de validación del modelo morfodinámico de playas de Cancún.

| It (min) | H <sub>s</sub> (m) | T <sub>P</sub> (s) | Dir. (grados) |
|----------|--------------------|--------------------|---------------|
| 0        | 0.5                | 5                  | 350           |
| 120      | 0.7                | 6                  | 360           |
| 240      | 1                  | 7                  | 110           |
| 360      | 0.8                | 7                  | 6             |
| 480      | 1                  | 7                  | 114           |
| 600      | 1                  | 8                  | 114           |

Los parámetros físicos utilizados en la simulación son los siguientes:

- Gravedad: 9.81 m/s<sup>2</sup>
- Densidad del agua: 1025 kg/m<sup>3</sup>
- Rugosidad: 0.03 (Formulación de Manning y uniforme)
- Viscosidad Horizontal de vórtice: 25
- Difusividad horizontal de vórtice: 10
- Densidad específica del sedimento: 2,700 kg/m<sup>3</sup>
- Diámetro medio de sedimento (D50): 390 µm
- Capa inicial de sedimento: 5 m
- $f_{MOR} = 10$
- Spin-up= 120 min

Para la solución del transporte sedimentario es necesario la aplicación de un dominio en 3D para el flujo, para este estudio el modelo hidrodinámico utiliza coordenadas Sigma ( $\sigma$ ) en la vertical. El cual consiste en la definición de capas en la vertical, cuyo espesor varía dependiendo de la profundidad, pero el número de capas es constante a lo largo del área horizontal de cómputo. Para esta simulación se definieron 5 capas con el mismo porcentaje de espesor. Los resultados numéricos de la capa del fondo son los que se presentan a continuación para mostrar las velocidades de corrientes litorales.

### RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN

Las características hidrodinámicas de la costa de Cancún son afectadas directamente por la incidencia del oleaje. Cuando el oleaje es proveniente del Norte (Figura 32, izquierda), la altura de

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

ola disminuye significativamente conforme se acerca a la costa debido a la influencia de la configuración de Punta Cancún. Dicho oleaje genera tanto para la zona I como para la Zona II en que se ha dividido el área de estudio, corrientes litorales paralelas a la costa (Figura 33, centro) con una dirección principal hacia el Sur (los valores positivos indican dirección hacia el Norte y los valores negativos hacia el Sur), cuyas magnitudes alcanzan los 0.1 m/s, y prevalecen corrientes perpendiculares a la costa (Figura 33, izquierda. Los valores positivos indican dirección hacia el mar y los negativos dirección hacia la costa) con dirección hacia la playa. Para estas dos zonas el transporte sedimentario principal es en dirección hacia la costa y hacia el Sur.

En la Zona III se presentan alternadamente celdas de transporte perpendicular a la costa en dirección hacia el mar y hacia la costa, siendo esta última dirección de corriente la que prevalece, concordando con los vectores de transporte de sedimento (Figura 33, derecha) que muestran la misma dirección y que para esta condición de oleaje es el transporte de máxima intensidad. En esta zona predominando una corriente hacia el Sur en la parte más oceánica y la parte más costera alterna dirección en sentido Norte y Sur.

Cerca de Punta Nizuc, en la Zona IV, en la parte más cercana a la playa la corriente paralela a la costa presenta una componente en dirección hacia el Norte y dominan las direcciones de corrientes perpendiculares a las costas dirigidas hacia el mar, aunque existes sectores donde la corriente se dirige hacia la costa. El transporte sedimentario es hacia la costa con algunos componentes hacia el Sur. En la parte más oceánica las corrientes longitudinales son en dirección Sur y las perpendiculares son hacia la costa.

La segunda condición de oleaje en la secuencia temporal de esta validación corresponde a oleaje con dirección ESE (Figura 32, derecha). El cual se aproxima de manera Normal a la costa y mantiene sus condiciones de altura de ola, a excepción de la zona de Punta Nizuc donde existe una disminución en la altura debido a la difracción con la saliente. Este oleaje genera corrientes litorales paralelas a la costa (Figura 34, centro) con dirección Norte desde Punta Nizuc hasta la parte central de la costa de Cancún, donde se encuentra con corrientes litorales, generadas por el mismo oleaje, que vienen en sentido contrario (dirección Sur) desde Punta Cancún, donde el oleaje también es difractado. Las corrientes perpendiculares a la costa (Figura 34, izquierda), a lo largo de la zona de estudio en la parte más marina, presentan componentes predominantes con dirección hacia la costa. Sin embargo, en toda la playa es evidente que en la parte más costera, se presentan una franja angosta donde los patrones de dirección son hacia el mar. Si bien esta condición abarca pocas celdas, se mantiene a todo lo largo del área de estudio, aunque este patrón se ve interrumpido por flujos de corrientes en sentido hacia la costa. Se observa también una clara ritmicidad en las corrientes con celdas alternadas de corrientes perpendiculares hacia afuera y hacia la costa a lo largo del área de estudio. El transporte de sedimento es para estas condiciones predominantemente hacia la costa (Figura 34, derecha), propiciado por el arribo perpendicular del oleaje que genera el apilamiento de sedimento hacia la parte más costera. Hacia punta Nizuc se observan vectores de transporte con componentes hacia el Sur y en Punta Cancún con componentes en dirección Norte, debida a la difracción que se presenta en ambas puntas en las mismas direcciones que el transporte.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

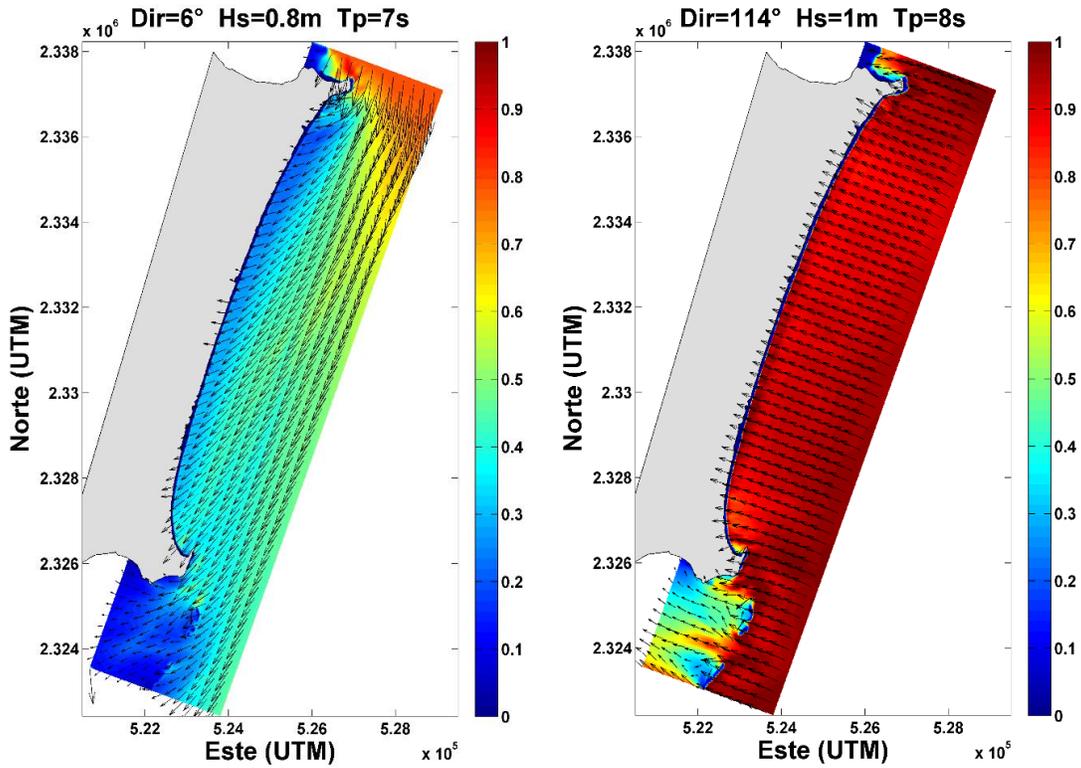


Figura 32. Propagación de oleaje proveniente del Norte (izquierda) y proveniente del ESE (derecha). La barra de colores indica la altura en metros.

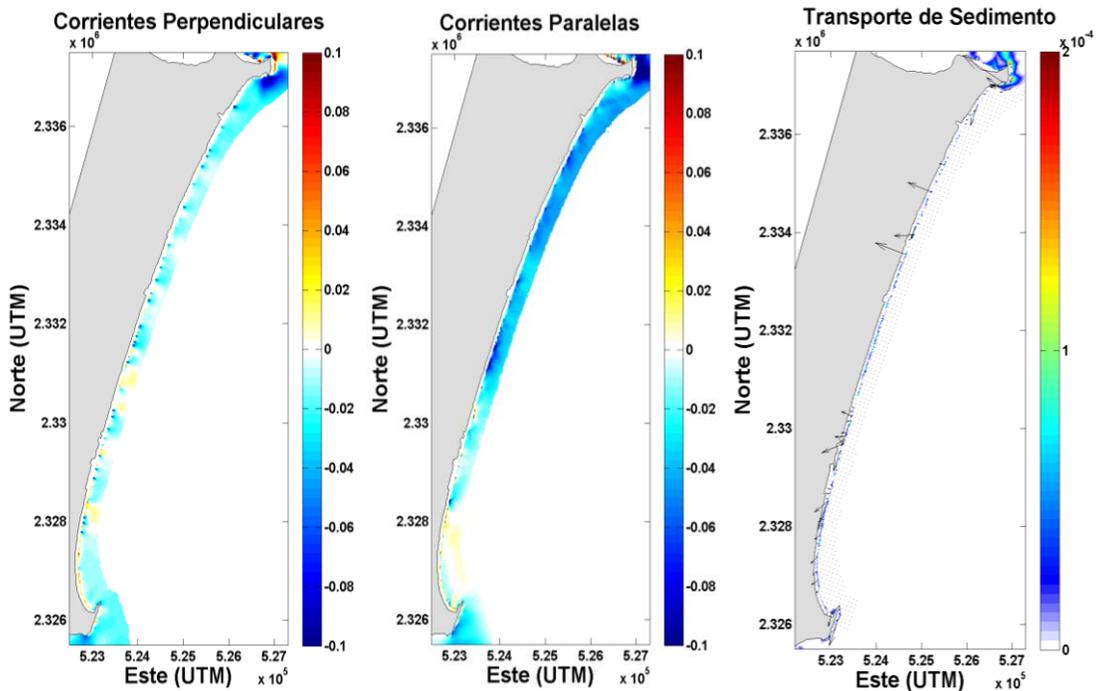


Figura 33. Corrientes generadas por oleaje del Norte  $t=6$  horas,  $H_s=0.8$  m,  $T_p=7$  s y  $Dir=6^\circ$ . Componente perpendicular a la costa (izquierda), los valores positivos indican dirección hacia el mar y los negativos dirección hacia la costa. Componente paralela a la costa (medio), los valores positivos indican dirección hacia el Norte y los valores negativos hacia el Sur. Transporte de sedimento generado por dichas corrientes (derecha) expresado en  $m^3/s/m$  y los vectores del transporte escalado 3 veces.

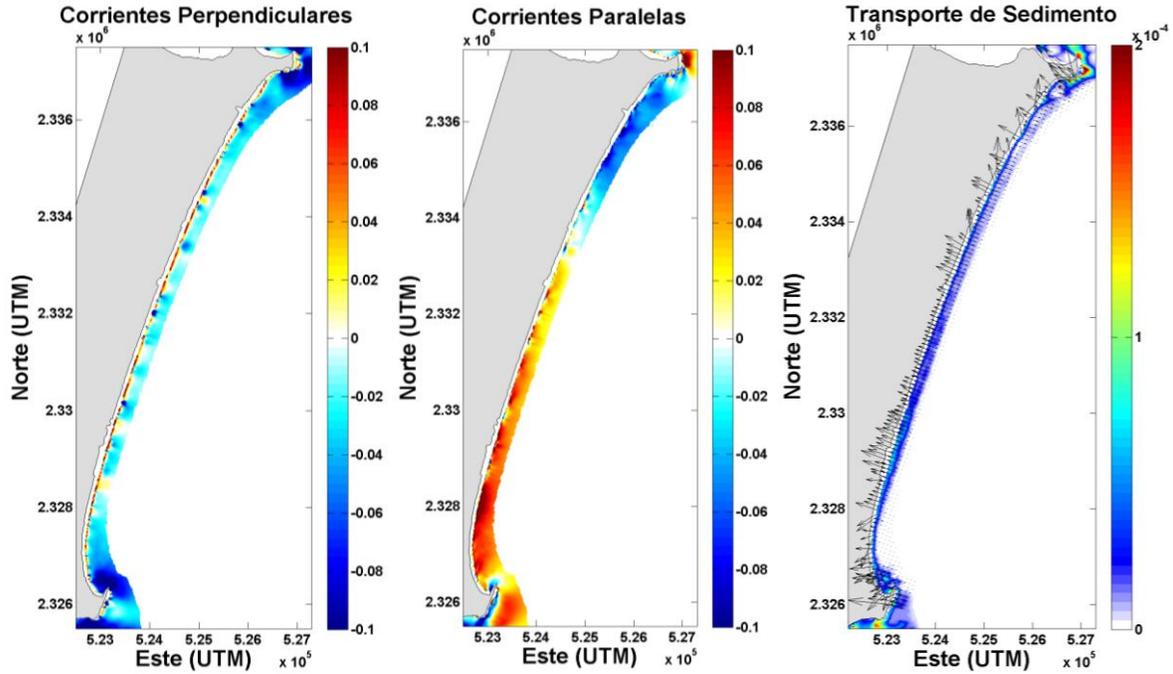


Figura 34. Corrientes generadas por oleaje del ESE  $t=10$  horas,  $H_S=1$  m,  $T_P=8$  s y  $Dir=114^\circ$ . Componente perpendicular a la costa (izquierda), los valores positivos indican dirección hacia el mar y los negativos dirección hacia la costa. Componente paralela a la costa (medio), los valores positivos indican dirección hacia el Norte y los valores negativos hacia el Sur. Transporte de sedimento generado por dichas corrientes (derecha) expresado en  $m^3/s/m$  y los vectores del transporte escalado 3 veces.

### EFFECTOS MORFODINÁMICOS

Debido a la secuencia de oleaje (Tabla 9) introducido como forzamiento, el resultado del transporte sedimentario es predominantemente hacia la costa en todo el dominio (Figura 34, derecha). Efecto morfodinámico generado por este transporte es la acumulación de sedimento para la región más costera y erosión hacia la parte más marina. Este patrón se generaliza para todo el dominio de la playa de Cancún (Figura 35). A continuación se presentan a los resultados por zonas para una mejor comparación con las mediciones de campo de los perfiles de playa.

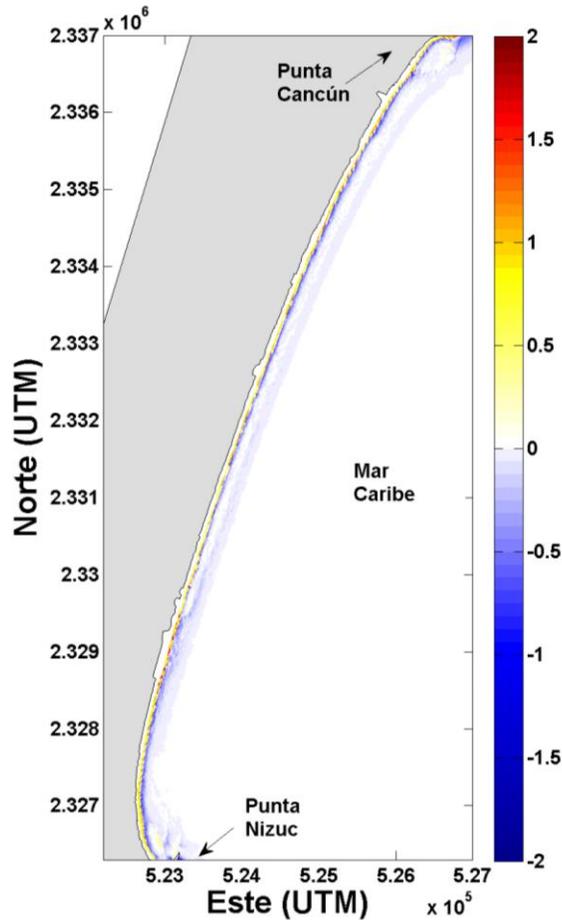


Figura 35. Cambios morfológicos inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica.

El cambio volumétrico que resulta del modelo numérico se obtiene en base a los cambios netos en el nivel del lecho integrado sobre la escala espacial de cada celda de la malla numérica. Como se ha descrito previamente, para las mediciones de campo el área de estudio se ha dividido en cuatro zonas, de las cuales se eligen secciones específicas para comparar el cambio de volumen computado y el obtenido mediante el análisis de datos de campo. Para una mejor visualización de los perfiles de playa medidos en campo se realizó una interpolación espacial utilizando la función *griddata* de Matlab. Esto con el objetivo de poder comparar perfiles de playa de distintos muestreos que originalmente no corresponden espacialmente. De esta nueva matriz de datos interpolados, se seleccionaron secciones cada 100 metros para graficar y comparar los perfiles. Las secciones de igual forma inician su numeración de Norte a Sur, correspondiendo el número 1 a la parte más norteña de cada zona. Todos los resultados se encuentran en el Anexo B.

Las celdas del modelo numérico son de  $\approx 17 \times 17$  m y corresponden a cada uno de los cuadros de color de las figuras que se presentan a continuación. Los valores positivos de la barra de

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

colores indican sedimentación (rojo) y los valores negativos erosión (azul). Los valores están dados en metros.

Se centrará la comparación en la parte que se encuentra bajo el contorno batimétrico de 0 m ya que se trata de un modelo hidrodinámico y solo resuelve las ecuaciones para las celdas que se encuentran bajo el nivel del agua.

Los resultados de la simulación numérica dejan ver, para las cuatro zonas monitoreadas, una acumulación de sedimento hacia la parte más costera de la zona de estudio del modelo (que corresponde a la parte más marina de los perfiles de playa de las mediciones de campo), precedida de una erosión hacia la parte marina inmediata. El transporte de sedimento se restringe hasta la isóbata de los 5 metros para estas condiciones de oleaje. En los perfiles medidos en el campo esta sedimentación es comprobable hacia la parte final del perfil, que corresponde a la playa sumergida. Como es de esperarse, existe una diferencia entre los volúmenes de sedimento acumulado determinado por el modelo con respecto a lo observado en los perfiles medidos en el campo; sin embargo, el orden de magnitud de dicha sedimentación es muy similar en ambos casos, que para este tipo de estudios es suficiente para considerar que el modelo es una buena representación de los procesos que se están estudiando.

En la Zona I, la parte más norteña de la playa, el modelo muestra acumulación de sedimento de manera constante en la parte sumergida del perfil a lo largo de toda la zona, aunque esta acumulación se restringe a la parte final del perfil (Figura 36). Para la Zona II (Figura 37), aunque la magnitud de la acumulación por celda computacional es menor que en la Zona I, la acumulación es para esta región más extensa espacialmente y es constante para la mayor parte de esta zona, aunque solo corresponde a una aparte muy reducida hacia el final de los perfiles. En la Zona III (Figura 37) se observa una acumulación mayor de sedimento, la cual se extiende hacia toda esta zona, en algunos casos alcanza los últimos 20 metros de los perfiles hacia el mar. En la Zona IV (Figura 38) la acumulación disminuye en intensidad comparada con la Zona III, pero ahora se extiende en una mayor área que en ocasiones se da en más de la mitad del perfil de playa. Comparando con el patrón de transporte sedimentario, la zona con magnitud mayor corresponde a la Zona III y después a la Zona IV que corresponden a las zonas con acumulación mayor de sedimento.

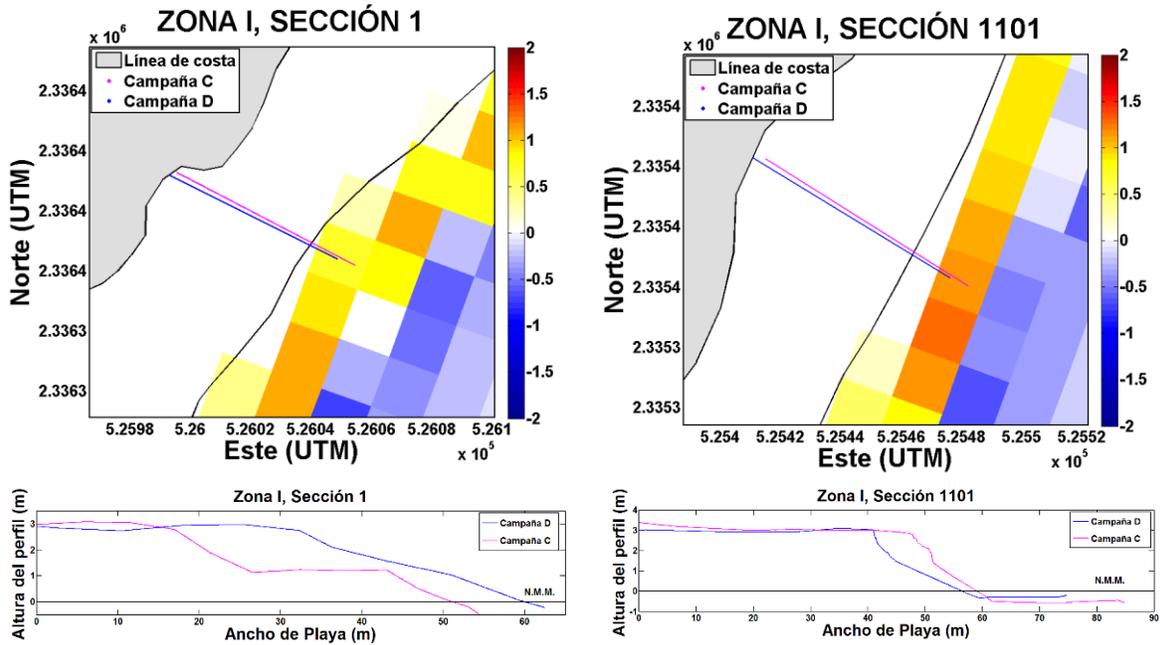


Figura 36. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.

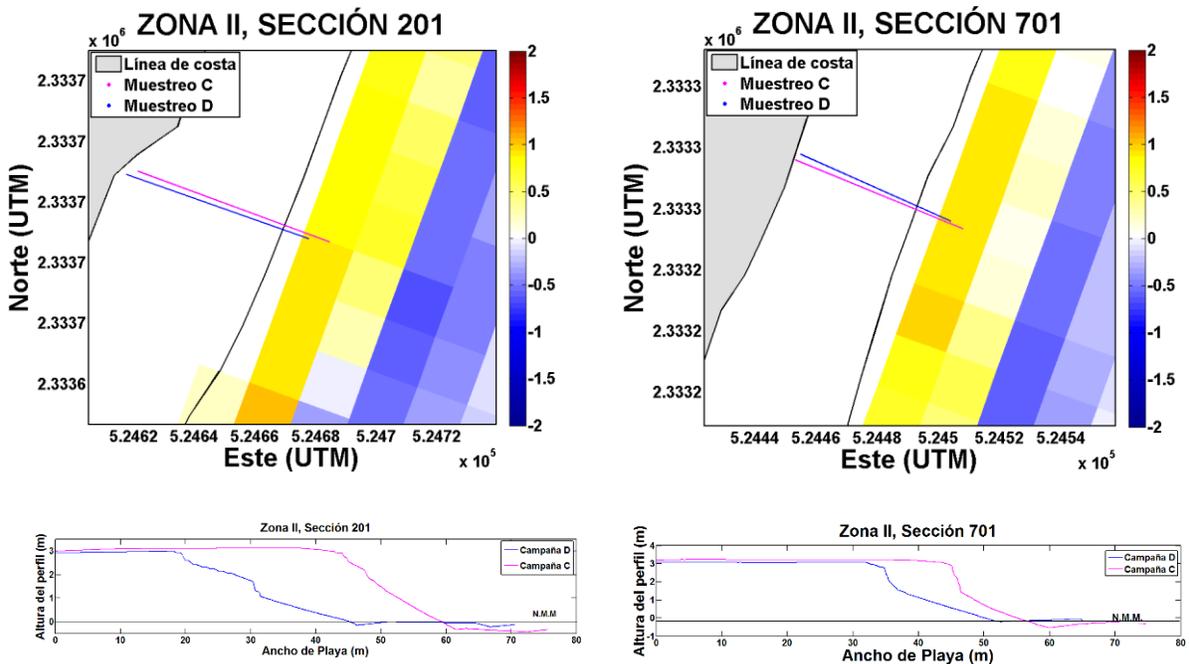


Figura 37. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.

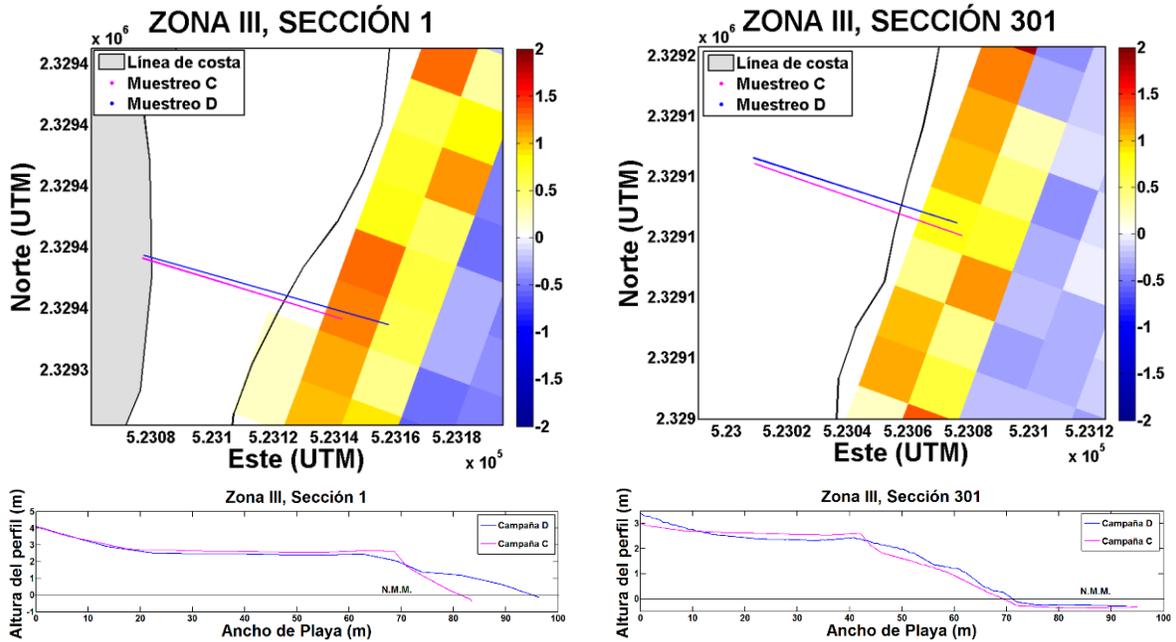


Figura 38. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.

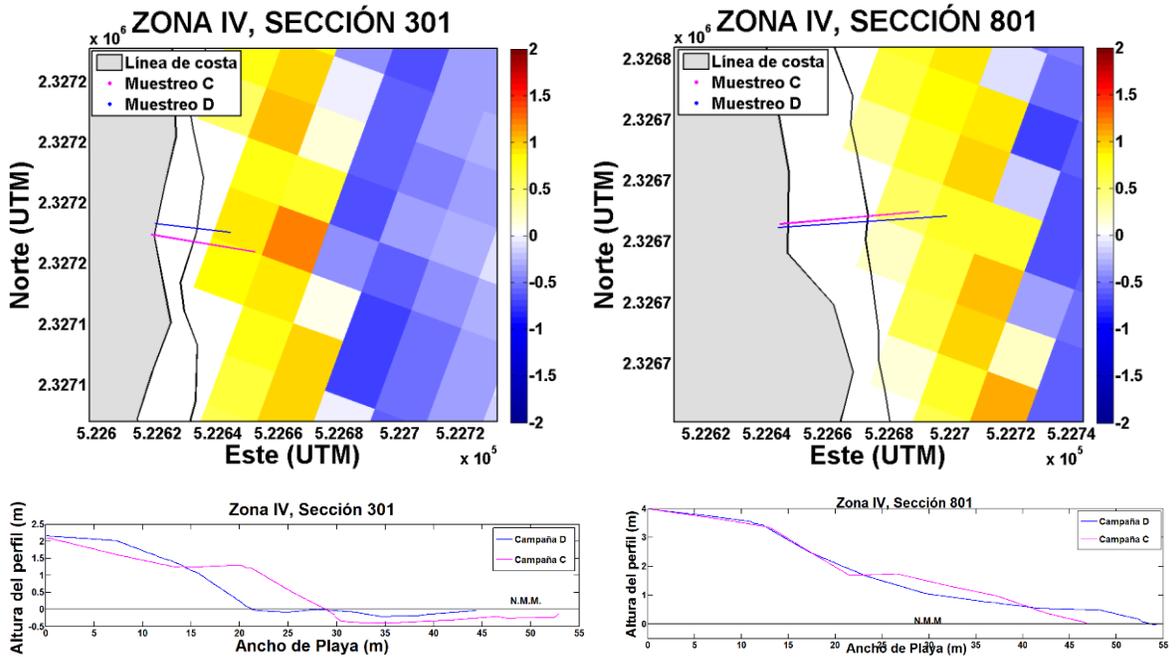


Figura 39. Cambios morfológicos (superior) inducidos por una combinación de oleaje del Norte y ESE correspondientes a las condiciones típicas de clima marítimo para la temporada de simulación. Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojo) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda de malla numérica. Perfiles de playa medidos en el campo (inferior), la línea roja corresponde a la campaña C y la línea azul a la campaña D.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

El patrón de erosión en la parte más marina y acumulación hacia la costa está en relación a las direcciones de transporte inducidas por el oleaje, las que de acuerdo al modelo, son principalmente hacia la costa, generando un apilamiento de sedimento en esta región.

Para las condiciones de oleaje de este escenario, uno de los factores que controlan el transporte de sedimento es el ángulo de incidencia del oleaje, que genera corrientes litorales perpendiculares a la costa con dirección principal hacia la costa, y a su vez la dirección del transporte es hacia la costa. Aunque hay zonas donde se observan corrientes litorales perpendiculares a la costa en dirección hacia el mar, el transporte de sedimento en esa dirección es casi nulo. Lo que sugiere que al arribo del oleaje se transporta el sedimento hacia la costa y para mantener el balance de masa, se generan corrientes de retorno pero sin transportar sedimento.

Los patrones de erosión y sedimentación están influenciados por la incidencia del oleaje, que cuando es proveniente del Norte transporta el sedimento hacia el Sur, al llegar el oleaje del ESE cambia el régimen de transporte, ahora predominante hacia la costa.

En la primera secuencia temporal de oleaje proveniente del Norte de esta validación, para la región Sur domina una corriente perpendicular hacia el mar, sin embargo no se refleja en un transporte de sedimento en esa dirección, ya que el oleaje no ha logrado poner el sedimento en disposición para ser transportado.

Se realizó por separado una simulación solo con oleaje del Norte (caso 25 en la Tabla 2 en la sección de metodología) con las mismas características de oleaje y los mismos parámetros físicos. De igual manera se simuló por separado para el oleaje del ESE (caso 26). Los patrones tanto de corrientes litorales como de transporte de sedimento son similares para las simulaciones de oleaje combinado y el oleaje individual, pero de diferente magnitud. Los resultados de estas simulaciones pueden ser consultados en los Anexos C, D, E y F.

### 4.3.2. MODELO DE OLAJE

#### **PRUEBAS DE CALIBRACIÓN**

En las pruebas realizadas con la finalidad de calibrar el modelo y realizar corridas exploratorias del resultado de la propagación, se plantearon cuatro escenarios con la misma dirección de oleaje, variando la altura y el periodo de la ola (casos A, B, C y D en la Tabla 2 en la sección de Metodología).

Los resultados de estas pruebas muestran que para oleaje de la misma altura, pero diferente período, se observó que para el caso del período más alto, las alturas de ola son mayores en algunos puntos, aunque esta diferencia es de escasos 10 cm, de igual manera existe una pequeña variación

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

en la dirección que toman los vectores de propagación del oleaje. Para oleaje de diferente altura pero con el mismo período el comportamiento en la dirección de propagación es el mismo. Se determinó que el efecto sobre los patrones de propagación del oleaje causado por la variación del periodo es mayor que el provocado por la variación de la altura de ola.

### **OLEAJE DEL NORTE (0°)**

A partir de los experimentos numéricos, se observa que cuando el oleaje proviene del Norte (caso 1 y 2 de la Tabla 2 en la sección de Metodología) éste es difractado por acción de la Punta Cancún, lo que produce que la altura de la ola disminuya antes de su arribo a la costa y los vectores de propagación llegan de forma oblicua hacia la costa. Al propagarse hacia el Sur, aunque la altura de ola disminuye significativamente en casi todo el dominio en la zona de Punta Nizuc el oleaje incide de manera perpendicular y con alturas de ola relativamente mayores que en el resto de la playa.

### **OLEAJE DEL NNE (23°)**

Con oleaje del NNE (casos 3 y 4), se observa el efecto de la difracción con Punta Cancún. En el área más marina el oleaje incide de manera oblicua a la costa y en la parte cercana a la costa torna sus vectores en dirección perpendicular a la costa a causa de la refracción. Aunque existe disminución de la altura del oleaje este no se disipa completamente llegando a la playa con casi la mitad de su altura inicial. En Punta Nizuc el oleaje arriba perpendicular a la costa con alturas de ola ligeramente mayores que en el resto de la playa.

### **OLEAJE DEL NE (45°)**

Cuando el oleaje proviene del NE (Figura 40, izquierda), persiste el efecto de difracción causado por la Punta Cancún al Norte del área de estudio, lo que provoca disminución evidente en la altura de ola incidente en la zona aledaña a esta punta. Para el resto de la playa el oleaje incide con más de la mitad de su altura inicial. En la zona de Punta Nizuc el oleaje incide directamente y con alturas de ola mayor que al resto de la playa.

### **OLEAJE DEL ENE (68°)**

Con oleaje del ENE el efecto de la difracción con Punta Cancún prácticamente desaparece a excepción de la región cercana a esta punta. La disipación es muy poca y el oleaje arriba casi con la misma altura de generación. Los vectores de propagación siguen presentando una componente

oblicua, sin embargo, el oleaje de alto periodo toma componentes perpendiculares a la costa en la zona cercana a Punta Cancún y también en el centro de la playa.

### OLEAJE DEL ESTE (90°)

Cuando el oleaje es procedente del Este, la disipación del oleaje es casi nulo y los vectores de propagación llegan de manera perpendicular a la costa. Sin embargo, para este ángulo de incidencia con características de oleaje de  $H_s=0.5$  m y  $T_p=5$  s, se aprecia una mínima difracción por efecto de Punta Cancún e inicia a ser apreciable la difracción con Punta Nizuc, lo que provoca disminución de la altura de ola en ambas puntas. Para oleaje con características de  $H_s=0.5$  m y  $T_p=5$  s (Figura 40, derecha) la difracción en Punta Cancún desaparece casi por completo y en Punta Nizuc es mínima, pero aún es apreciable.

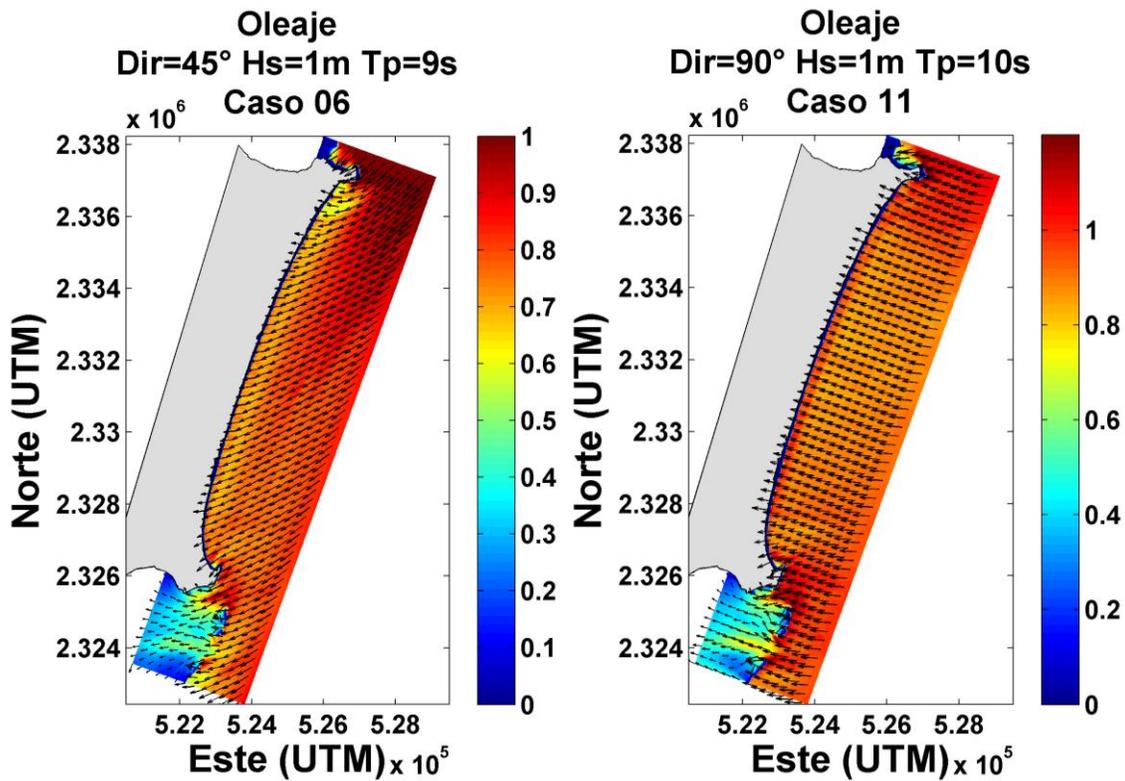


Figura 40. Propagación de oleaje proveniente del NE (izquierda) y del Este (derecha) hacia la playa de Cancún. La barra de colores indica la altura en metros.

### OLEAJE DEL ESE (112°)

El oleaje del ESE, el cual es el oleaje predominante en el área de estudio, arriba de manera perpendicular a la costa, la disipación del oleaje es casi nulo llegando prácticamente con la altura de ola de generación. Para estos casos se presenta difracción mínima en Punta Nizuc provocando

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

una ligera disminución en la altura de ola para esta zona. La difracción producida por Punta Cancún ha desaparecido casi por completo para estos casos.

Para oleajes extremos tanto del Este como del ESE, se presenta una disminución en la altura de ola conforme el oleaje se aproxima a la costa.

### **OLEAJE DEL SE (135°)**

Con oleajes de esta dirección se aprecia la difracción por efecto de Punta Nizuc provocando una disminución en las alturas de ola para la zona cercana a esta punta. En el resto del área de estudio, el oleaje incide de manera perpendicular a la línea de costa y llega con casi la totalidad de su energía (Figura 41, izquierda).

### **OLEAJE DEL SSE (158°)**

El oleaje arriba con ángulo oblicuo, pero conforme se acerca a la costa, los vectores cambian de dirección por efecto de la refracción e inciden en sentido perpendicular a la costa. La difracción por efecto de Punta Nizuc es evidente y se reduce en más de la mitad la altura del oleaje incidente en las zonas cercanas al punta Nizuc. El efecto de la difracción por esta punta abarca hasta la Zona III (playa Delfines). Para el resto de la playa se observa una disipación del oleaje inferido por una disminución mínima en las alturas de ola.

### **OLEAJE DEL SUR (180°)**

Con oleaje proveniente de dirección Sur (Figura 41, derecha), la altura de ola disminuye considerablemente y el oleaje arriba con ángulo oblicuo a la línea de costa. El efecto de Punta Nizuc produce una mayor difracción del oleaje evidenciado por una disminución en la altura de ola para las regiones cercanas a Punta Nizuc y su área de influencia alcanza zonas al Norte de la Zona III (Playa Delfines).

Cuando el oleaje viene del sector Sur, el efecto por difracción con Punta Nizuc empieza a ser evidente. Esto se observa con oleajes provenientes del SE, SSE y del Sur. Los cuales inciden en la costa con un ángulo oblicuo que se incrementa conforme el oleaje proviene de más del Sur.

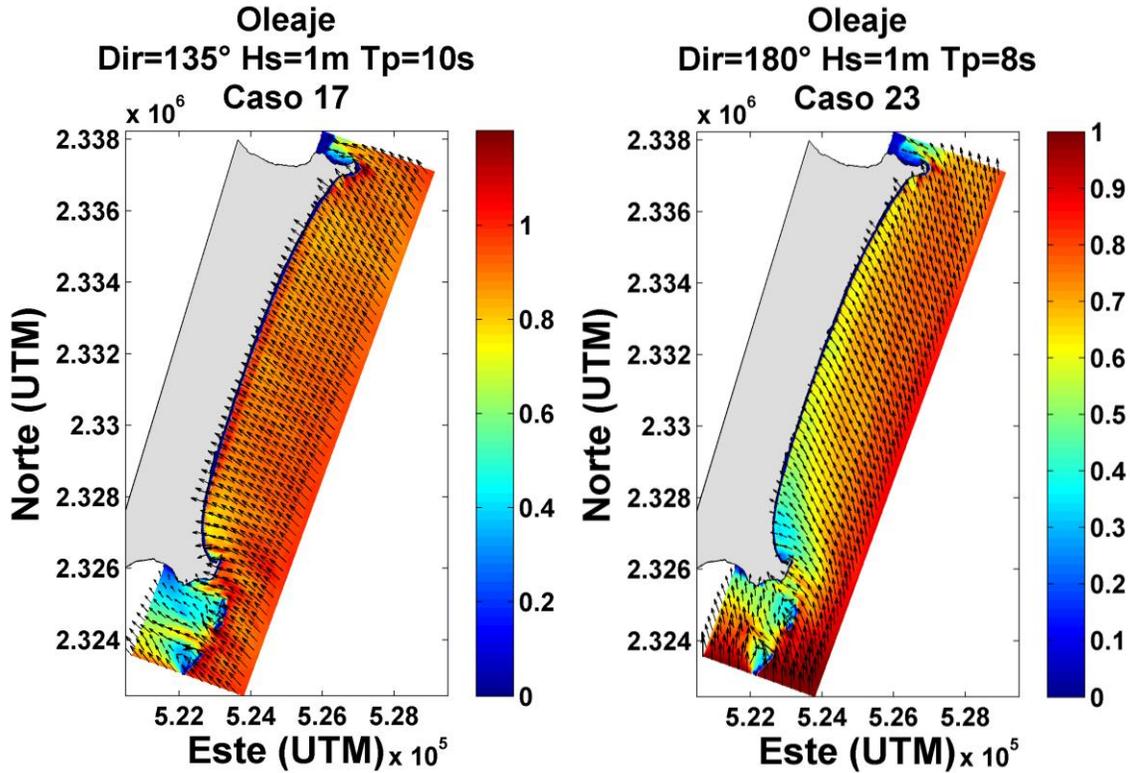


Figura 41. Propagación de oleaje proveniente del SE (izquierda) y del Sur (derecha) hacia la playa de Cancún. La barra de colores indica la altura en metros.

#### 4.3.3. MODELO HIDRODINÁMICO.

Una vez que el modelo de oleaje calcula los campos de oleaje propagado hacia la playa, el modelo hidrodinámico calcula las corrientes generadas por el oleaje. Para una mejor comprensión de los procesos, las corrientes litorales generadas por los tensores de radiación del oleaje incidente, han sido separadas en corrientes paralelas a la costa y perpendiculares a la costa. Al igual que con la propagación del oleaje la descripción se realiza de acuerdo a los ángulos de incidencia del oleaje dividido por sectores, sin embargo, se limitó a la descripción de los casos más representativos haciendo énfasis en las cuatro zonas monitoreadas. Para facilitar la lectura, solo las figuras representativas serán presentadas en esta sección aunque todas las figuras pueden ser consultadas en el Anexo B.

#### OLEAJE DEL NORTE (0°)

Las corrientes generadas a partir de oleajes provenientes del Norte en su componente paralela a la costa muestran para casi todo el dominio una dirección predominante hacia el Sur. En la Zona IV cerca de Punta Nizuc, en la parte más costera, se presenta una franja muy delgada de corrientes paralelas a la costa con dirección hacia el Norte.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

La corriente perpendicular a la costa en la parte más marina de todo el dominio es en dirección hacia la costa y en la región más costera son principalmente en dirección hacia el mar. Sin embargo, para el caso 2 (Tabla 2 en la sección de Metodología) en las Zonas II y III se observan corrientes en dirección hacia la costa, aunque, la intensidad de la corriente en dirección hacia el mar es mayor.

### **OLEAJE DEL NNE (23°)**

Con oleajes provenientes del NNE las corrientes perpendiculares a la costa muestran en todo el dominio una dirección hacia la costa en la parte marina; en la parte cercana a la playa se presentan direcciones hacia la costa y hacia el mar de manera alternada. Desde la Zona I y hacia el Norte hasta Punta Cancún predomina la corriente hacia la costa. En la Zona II se intensifica la corriente hacia el mar, aunque las corrientes en dirección hacia la costa aún prevalecen. Sin embargo, para la Zona IV la componente en dirección hacia la costa es casi nula. En la región contigua a Punta Nizuc se presenta dirección predominante hacia la costa.

Las corrientes paralelas a la costa muestran para todo el dominio direcciones hacia el Sur, excepto en la parte más costera donde se observan direcciones de corriente hacia el Norte principalmente en la Zona IV cercana a Punta Nizuc. En la Zona I las corrientes paralelas a la costa son en su totalidad en dirección hacia el Sur, conforme se desplaza al Sur en las Zonas II, III y IV en la región más costera se intensifican las corrientes paralelas a la costa en dirección Norte.

### **OLEAJE DEL NE (45°)**

Las corrientes paralelas a la costa generadas por oleaje incidente del NE (Figura 42, izquierda) en la mayor parte del dominio muestran dirección hacia el Sur alcanzando velocidades de hasta 0.1 m/s. Las Zonas II y III muestran dirección de corrientes paralelas a la costa hacia el Norte en la parte cercana a la playa. En la Zona IV la componente paralela a la costa en la parte más costera tiene dirección hacia el Norte y llega a alcanzar velocidades de hasta 0.1 m/s. En la parte más marina al igual que en el resto del dominio la dirección de la componente es hacia el Sur.

La componente perpendicular a la costa (Figura 42, derecha) en la parte marina tiene dirección predominante hacia la costa, sin embargo, se presentan zonas donde la dirección de la componente perpendicular en la parte marina es hacia el mar, en el Caso 5 esta condición se presenta en las Zonas II, III y al Norte de la Zona IV, en el Caso 6 solo se aprecia en la Zona IV. En la parte más costera, la corriente perpendicular a la costa presenta direcciones hacia el mar y hacia la costa de manera alternada. Desde la Zona I y hacia el Norte hasta Punta Cancún predomina la corriente hacia la costa. En la Zona II se incrementa la magnitud de la componente perpendicular a la costa en dirección hacia el mar alcanzando valores de cercanos a 0.1 m/s, no obstante, las corrientes hacia la costa aún prevalecen para esta zona. En las Zonas III y IV, en el Caso 6, en la parte

cercana a la playa las corrientes perpendiculares a la costa son casi en su totalidad hacia el mar, sin embargo, en el Caso 5 la dirección hacia la costa tiene mayor presencia en estas zonas.

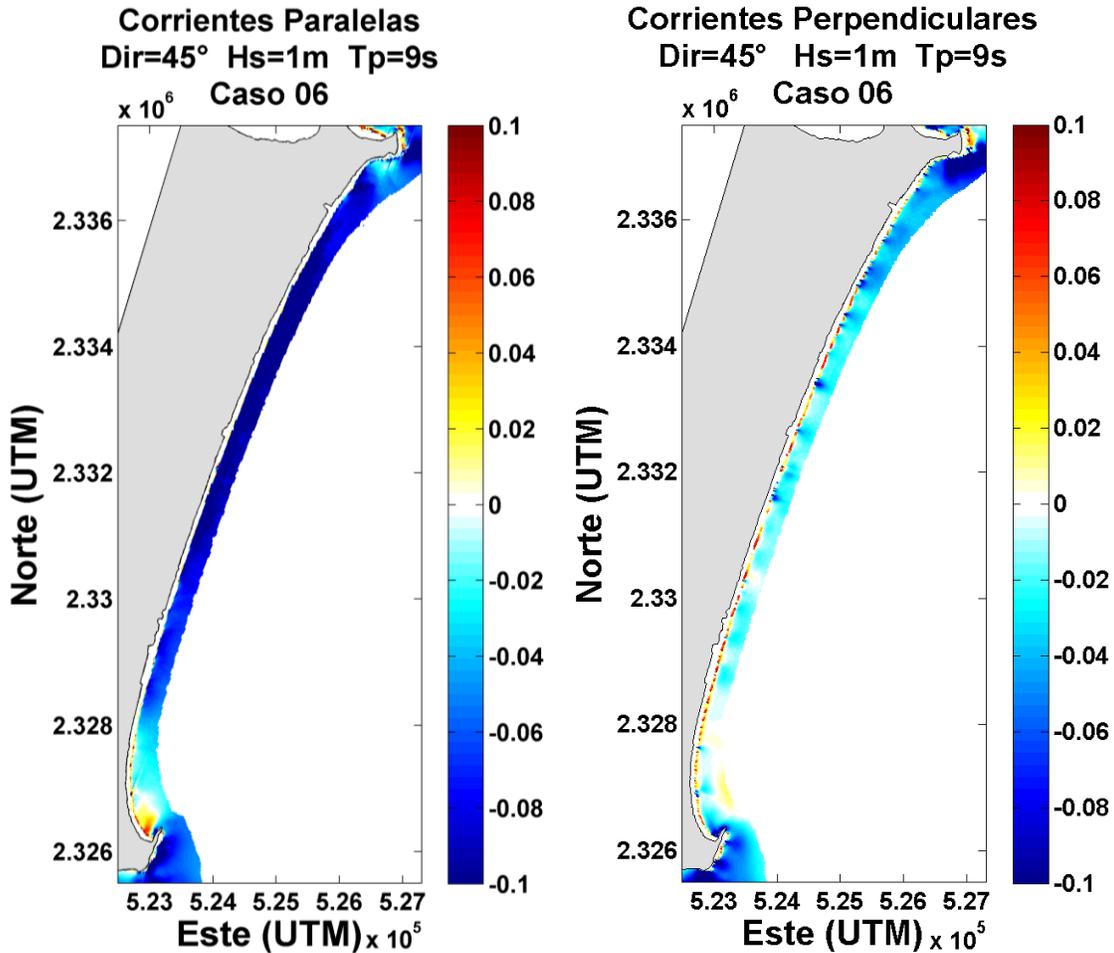


Figura 42. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y los valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y los valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s.

### OLEAJE DEL ENE (68°)

Con oleaje incidente desde el ENE, las corrientes paralelas a la costa muestran para todo el dominio una dirección predominante y consistente hacia el Sur con magnitud de hasta 0.1 m/s, exceptuando desde la Zona IV hasta Punta Nizuc donde la dirección de la corriente es predominante hacia el Norte con valores que alcanzan hasta 0.1 m/s.

La componente perpendicular a la costa presenta en gran parte del dominio, en la región más marina, dirección predominante hacia la costa. En las Zonas I y II, en la parte cercana a la playa, predomina la dirección de la corriente hacia el mar intercaladas con corrientes hacia la costa. En las

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Zonas III y IV, en la parte más marina, predomina las corrientes perpendiculares con dirección hacia la costa y en la parte cercana a la playa se encontraron corrientes intercaladas hacia el mar y hacia la costa, siendo predominantes las que se dirigen hacia el mar, las cuales en algunas regiones llegan hasta la parte más marina, lo que sugiere la ocurrencia de corrientes de resaca (*undertow*) en estas zonas.

Como ya se ha descrito, las corrientes generadas a partir de oleajes provenientes del sector Norte presentan similitud entre ellas. Sin embargo, en la componente perpendicular a la costa una diferencia notoria es la intensidad de las corrientes, la cual se incrementa al aumentar el ángulo del oleaje con respecto al Norte, oleaje del NE produce corrientes con magnitud mayor que el oleaje del NNE y este a su vez genera corrientes más intensas que el oleaje del Norte, tanto en dirección hacia la costa como en dirección hacia el mar. Las corrientes paralelas a la costa exhiben comportamientos muy similares entre ellas pero con distinta magnitud.

### **OLEAJE DEL ESTE (90°)**

Con oleaje proveniente del Este (caso 11) la dirección principal de la corriente paralela a la costa es hacia el Sur (Figura 43, izquierda), predominando esta condición desde el Norte de la playa en Punta Cancún hasta la Zona III. En esa zona, la corriente hacia el Sur se encuentra con corrientes paralelas a la costa con dirección Norte y que predominan desde Punta Nizuc.

Las corrientes litorales perpendiculares a la costa en todo el dominio son en dirección hacia la costa en la parte más marina, mientras que la parte cercana a la playa presenta celdas de direcciones hacia el mar intercaladas con corrientes hacia la costa (Figura 43, derecha). Estos patrones de celdas varían dependiendo de la zona: en la Zona I predominan las corrientes hacia el mar con muy pocas intrusiones de corriente en sentido hacia la costa. En la Zona II aunque siguen dominando las corrientes en sentido hacia el mar, la presencia de corrientes hacia la costa es más evidente y de mayor magnitud que en la Zona I. Caso muy parecido ocurre en la Zona III, pero ahora las corrientes perpendiculares a la costa en sentido hacia la playa presentan mayor magnitud y abarcan espacios mayores. Nuevamente, en la Zona IV, las corrientes en sentido a la costa son de menor magnitud y se restringen a espacios más reducidos.

### **OLEAJE DEL ESE (112°)**

Las corrientes litorales paralelas a la costa generadas por oleaje incidente del ESE muestran desde Punta Cancún hasta la Zona II una dirección hacia el Sur con velocidades máximas de 0.1 m/s en la Zona I. Corrientes paralelas a la costa con dirección hacia el Norte, predominan desde Punta Nizuc hasta la Zona II donde se encuentran con las corrientes litorales de sentido contrario generado por el mismo oleaje. Las corrientes con dirección hacia el Norte alcanzan su máxima intensidad (0.1 m/s) en la Zona IV.

Con oleaje proveniente del ESE, las corrientes perpendiculares a la costa que se generan tienen una dirección hacia la costa en la parte más marina en todo el dominio. Hacia la parte más costera a lo largo de toda el área de estudio predominan corrientes hacia el mar alternadas con corrientes hacia la costa. El patrón de alternancia en el sentido de la dirección de la corriente varía de una zona a otra, en la Zona I la presencia de corrientes hacia la costa es muy escasa y en la Zona IV hay un incremento considerable en las corrientes con dirección hacia la playa.

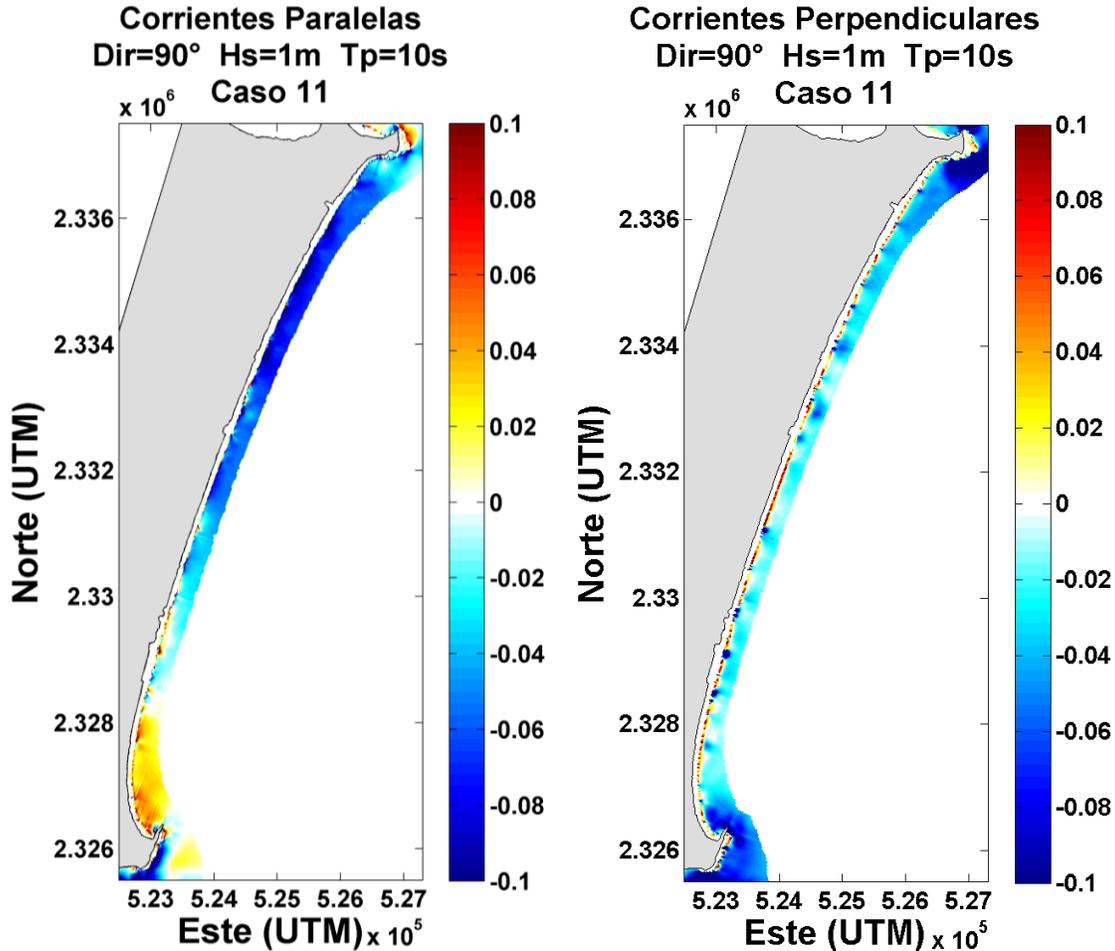


Figura 43. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes litorales perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s.

### OLEAJE DEL SE (135°)

Con oleajes provenientes del SE (caso 17) las corrientes paralelas a la costa que se generan son predominantemente en dirección Norte para todo el dominio, con mayor magnitud en las Zonas IV y III y van disminuyendo conforme se desplazan al Norte (Figura 44, izquierda). En la Zona I y hasta Punta Cancún, en la parte más costera, se presentan corrientes paralelas a la costa con

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

dirección Sur y corrientes perpendiculares a la costa (Figura 44, derecha) con dirección hacia el mar, con tan solo un par de sectores con corrientes hacia la costa. Las corrientes perpendiculares a la costa en la parte más marina son predominantemente en dirección hacia la costa en la mayor parte del área de estudio, exceptuando regiones como al Norte y al Sur de la Zona II y hacia el Norte de la Zona III, donde estas corrientes en la parte más marina presentan dirección principal hacia el mar. En la parte cercana a la costa, el patrón de celdas alternadas de corrientes hacia la costa y hacia el mar es claro, a pesar de que las corrientes perpendiculares a la costa predominantes son en dirección hacia el mar.

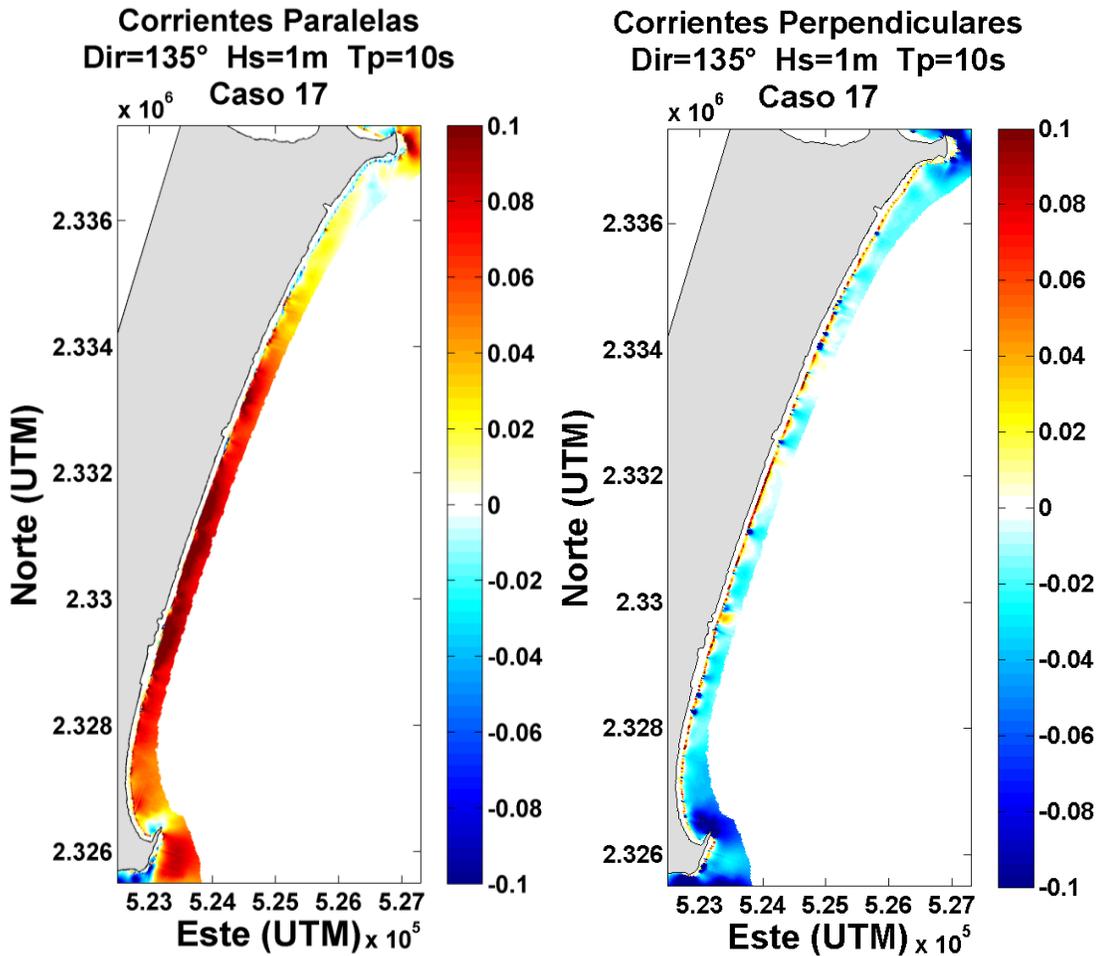


Figura 44. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes litorales perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s.

### **OLEAJE DEL SSE (158°)**

Las corrientes paralelas a la costa generadas por el oleaje incidente de este sector, son en todo el dominio predominantemente en dirección hacia el Norte con magnitudes de hasta 1 m/s, a excepción de una franja en la parte cercana a la playa desde la Zona I hasta Punta Cancún, donde la corriente muestra dirección hacia el Sur.

Las corrientes perpendiculares a la costa en la parte más marina muestran tres patrones muy claros: en los extremos del área de estudio la dirección es predominante en dirección hacia la costa, en la parte central de la playa se intercalan las direcciones hacia el mar y hacia la costa y en la región comprendida entre el Sur de la Zona I y el Norte de la Zona II la dirección es predominante hacia el mar. En las Zonas I y II, en la parte más costera las corrientes son en dirección hacia el mar con algunas interrupciones de corrientes en dirección hacia la costa. En las Zonas III y IV el patrón de comportamiento de las corrientes perpendiculares a la costa consiste en direcciones intercaladas hacia el mar y hacia la costa.

### **OLEAJE DEL SUR (180°)**

Cuando el oleaje incidente proviene del Sur (Caso 23) las corrientes paralelas a la costa son para casi toda el área de estudio en dirección hacia el Norte (Figura 45, izquierda), con magnitud mayor en la parte central de la playa (entre las Zonas II y III). La intensidad de las corrientes disminuye en las zonas cercanas a Punta Nizuc y desde la Zona I hasta Punta Cancún. Solo una estrecha franja en la parte más costera desde el Norte de la Zona II, pasando por la Zona I y hasta Punta Cancún, presenta componentes de dirección hacia el Sur.

Las corrientes perpendiculares a la costa (Figura 45, derecha) presentan para estas condiciones de oleaje dos patrones bien diferenciados: el primero abarca desde Punta Nizuc hasta el Sur de la Zona II, el cual se caracteriza por tener dirección predominante hacia la costa en la parte más marina mientras que la parte cercana a la playa presenta celdas intercaladas de corrientes con dirección hacia el mar y con hacia la costa. A partir de la Zona II y hasta Punta Cancún el segundo patrón de corrientes perpendiculares a la costa se hace presente y consiste en la intensificación de las corrientes en dirección hacia el mar hacia la parte más marina y la disminución y casi desaparición de las corrientes con dirección hacia la costa.

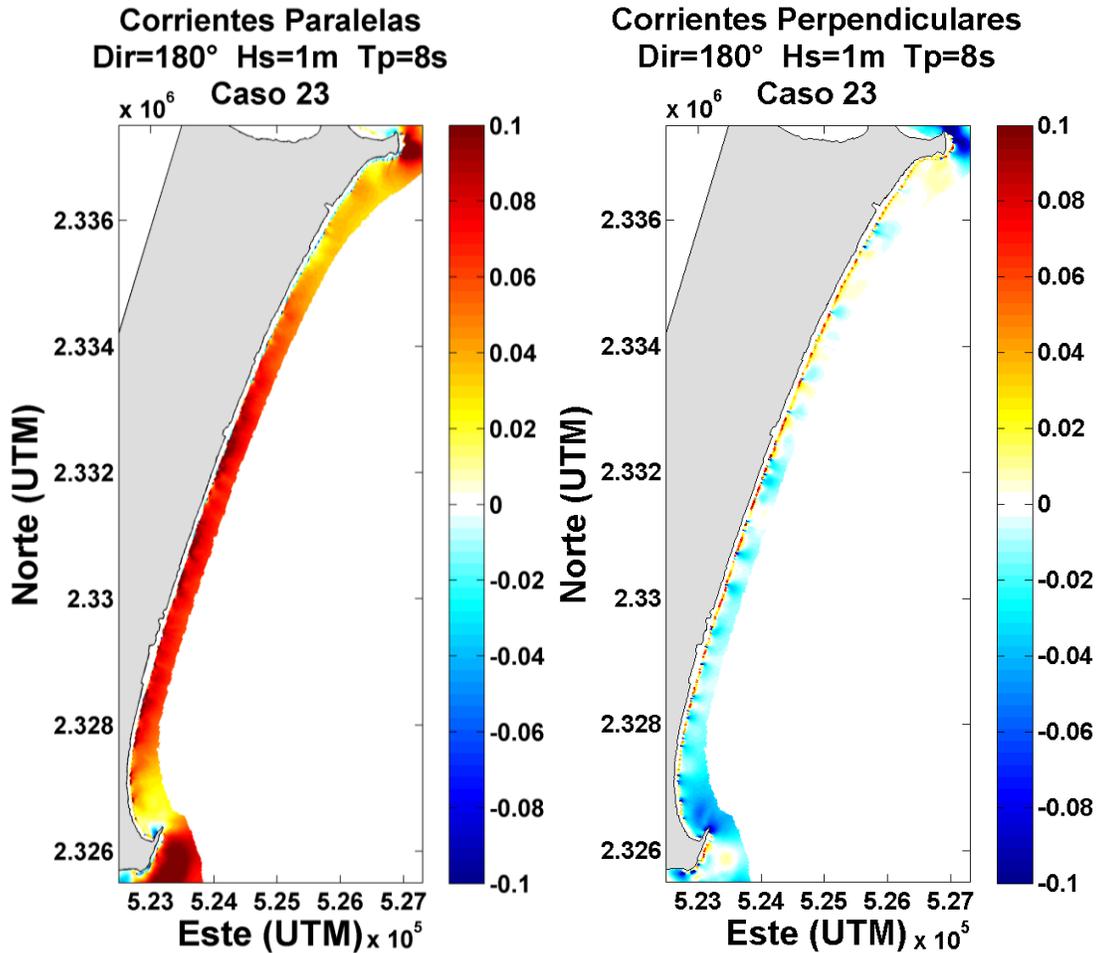


Figura 45. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes litorales perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s.

#### OLEAJE EXTREMAL DEL ESE (112°)

Durante condiciones de oleaje extremo proveniente del ESE (caso 15), las corrientes paralelas a la costa que se generan alcanzan en algunas zonas velocidades intensas (de hasta 1 m/s) (Figura 46, izquierda) principalmente hacia punta Nizuc y Punta Cancún. Desde Punta Nizuc hasta el Sur de la Zona I prevalecen corrientes paralelas a la costa en dirección Norte. Las velocidades de dicha corriente son mayores para la Zona IV y van descendiendo gradualmente hasta los 0.2 m/s hacia el Norte, donde se encuentran con corrientes en sentido contrario de magnitud muy similar. En lo que concierne a la región más costera, no se observa un patrón regular en las corrientes paralelas a la costa, sino corrientes de comportamiento caótico con cambios de dirección en espacios relativamente cortos. Esta condición se presenta desde Punta Nizuc hasta la región intermedia entre la Zona II y la Zona I, a partir de este punto y hasta Punta Cancún la corriente tiene dirección preferencial hacia el Sur. Las corrientes perpendiculares a la costa (Figura 46, derecha) en

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

la parte más marina tienen dirección hacia el mar en casi todo el dominio, exceptuando la zona de Punta Nizuc donde la dirección es hacia la costa. En la parte más costera, si bien no es posible determinar un patrón regular, predominan las corrientes con dirección hacia la costa que alcanzan velocidades de 1 m/s.

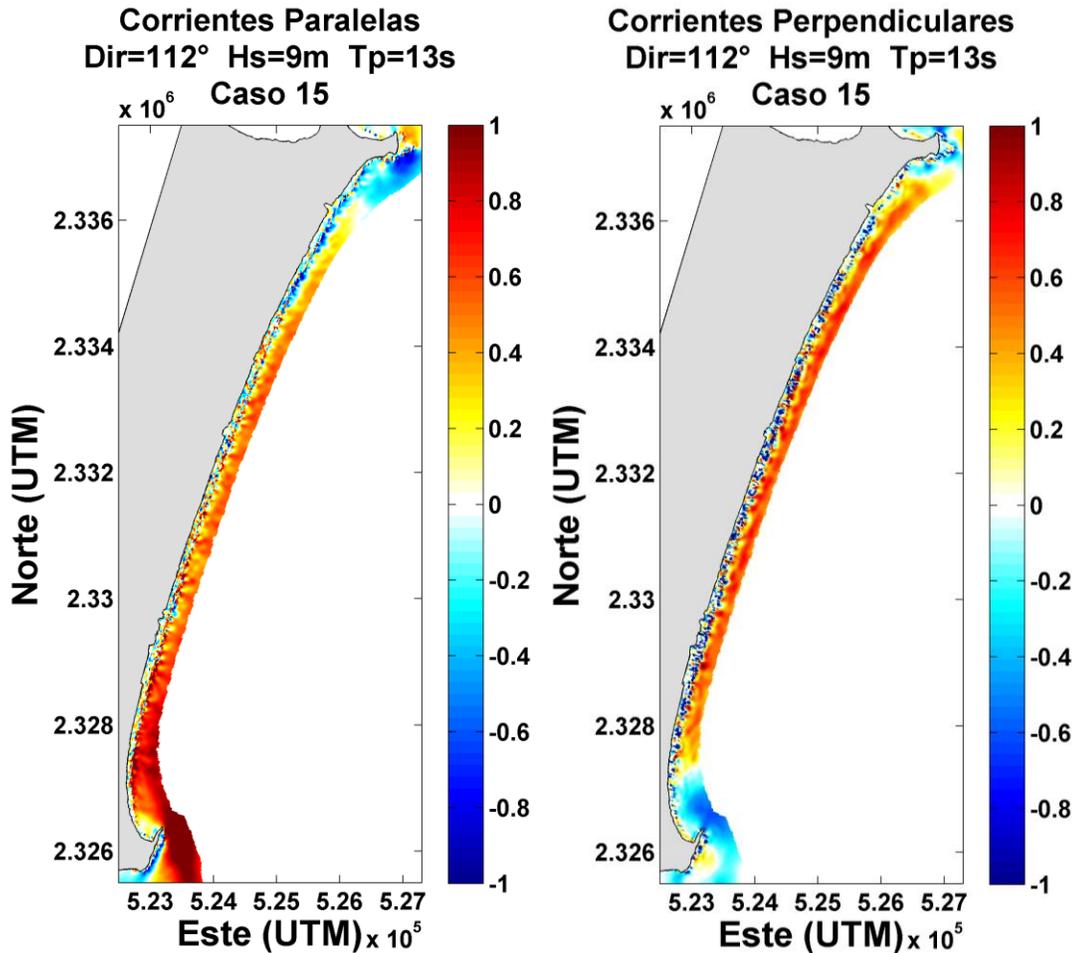


Figura 46. Corrientes litorales paralelas a la costa (izquierda) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el Norte y valores negativos (azules) dirección hacia el Sur. Corrientes perpendiculares a la costa (derecha) donde los valores positivos (rojos) indican dirección hacia el mar (Este) y valores negativos (azules) dirección hacia la costa (Oeste). La barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s.

Diversos autores (*i.e.* Komar, 1988; Dean y Dalrymple, 2002) mencionan que el comportamiento de las corrientes perpendiculares a la costa en patrones en forma de celdas de circulación es característico de oleaje que incide normal a la costa, como se observa en los casos de oleaje provenientes de sectores Este, ESE y SE principalmente. Con oleaje que se aproxima oblicuo a la costa las corrientes perpendiculares disminuyen y prevalecen las corrientes litorales paralelas a la costa.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Las velocidades de las corrientes generadas por el oleaje son principalmente en dirección perpendicular a la costa, aunque presenta componentes en sentido paralelo a la costa estas velocidades son de menor magnitud que las perpendiculares. Por lo que el transporte sedimentario perpendicular a la costa puede ser más importante que el transporte longitudinal a la costa. Este comportamiento se aprecia en la mayoría de los casos realizados en este estudio, sin embargo, solo se presenta el caso del oleaje reinante para ejemplificar dicho comportamiento (Figura 47).

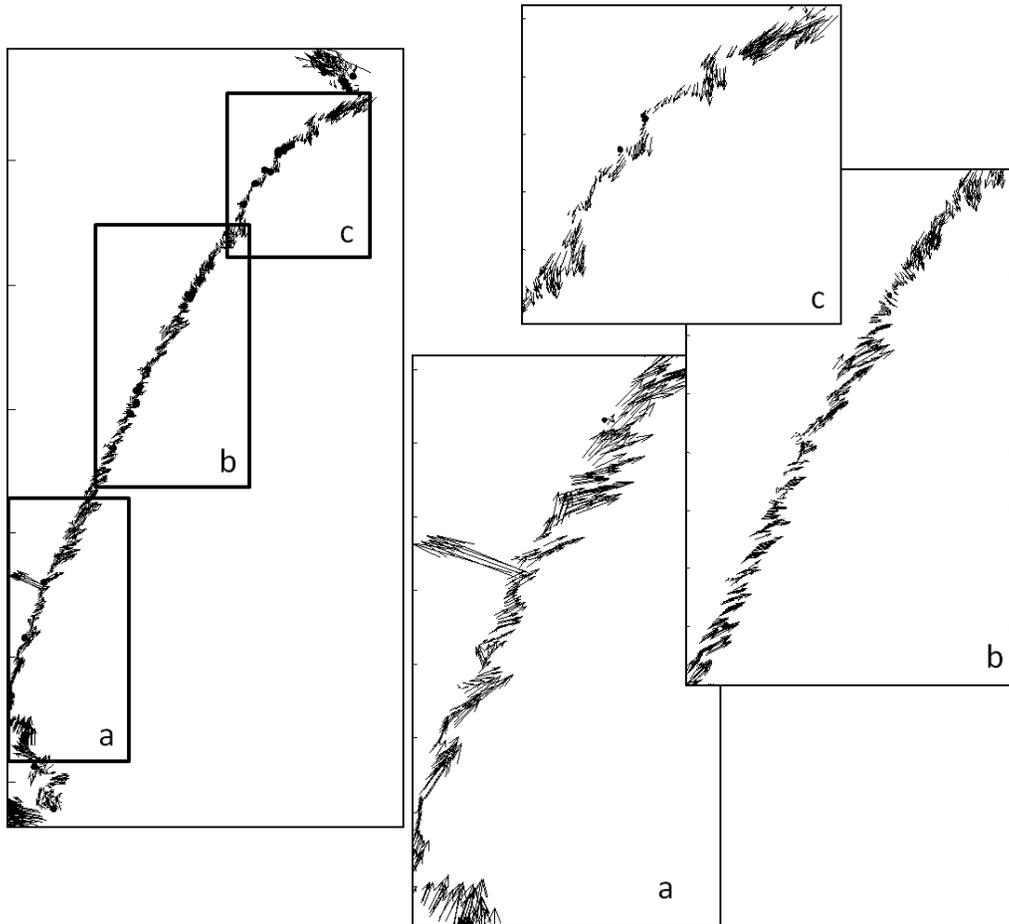


Figura 47. Corrientes generadas por el oleaje reinante proveniente del ESE de 1 m de  $H_s$  y  $T_p$  de 10 s. Se presentan solamente 1 de cada 13 vectores y únicamente las velocidades desde la línea de costa y hasta la isóbata de los 5 metros. La sección *a* corresponde a la zona Sur, la sección *b* a la zona central y la sección *c* a la zona Norte de la playa.

### 4.3.4. MODELO MORFODINÁMICO

Una vez que las corrientes litorales se calculan a partir del oleaje, se calcula el transporte sedimentario resultante de dichas corrientes y a partir de este se modifica la batimetría. Los cambios en la batimetría a su vez inducen cambios en la hidrodinámica y en los patrones del campo de oleaje. En este estudio, se acoplaron los tres modelos para permitir la interacción de todos los procesos que determinan la morfodinámica.

### **OLEAJE DEL NORTE (0°)**

El transporte sedimentario generado por las corrientes litorales generadas por el oleaje incidente del Norte muestra una dirección principal hacia el Sur a lo largo de todo el dominio y se hace más evidente desde el Sur de la Zona II y hasta Punta Nizuc. De acuerdo a los vectores de transporte, este tiene magnitud mayor en la Zona IV. Sin embargo, la tasa de transporte encontrado para estas condiciones es escaso. Los patrones de acumulación y erosión están limitados a unas cuantas celdas pero muestran algunas zonas de erosión concentradas principalmente en la Zona III.

### **OLEAJE DEL NNE (23°) y NE (45°)**

Con oleaje del NNE y del NE, en casi todo el dominio el transporte sedimentario tiene dirección hacia la costa y hacia el Sur (Figura 48, izquierda), concentrando su intensidad en ambas puntas. En Punta Cancún el transporte sedimentario tiene dirección predominante hacia la costa. En las Zonas II y III el transporte predomina hacia la costa pero presenta ciertas componentes hacia el Sur. El transporte es más intenso hacia la Zona IV y Punta Nizuc con direcciones hacia la costa y hacia el Sur. A lo largo de toda la playa, predomina la acumulación de sedimentos hacia la parte más costera con erosión en las celdas adyacentes hacia la parte marina (Figura 48, derecha). Para esta dirección de oleaje incidente la depositación hacia la playa se incrementa de Norte a Sur, la zona Norte presenta menor acumulación que la Zona II, a la vez que se intensifica para la Zona III y es en la Zona IV cerca de Punta Cancún donde ocurre la máxima variabilidad morfológica presentando mayor tasa de acumulación sedimentaria.

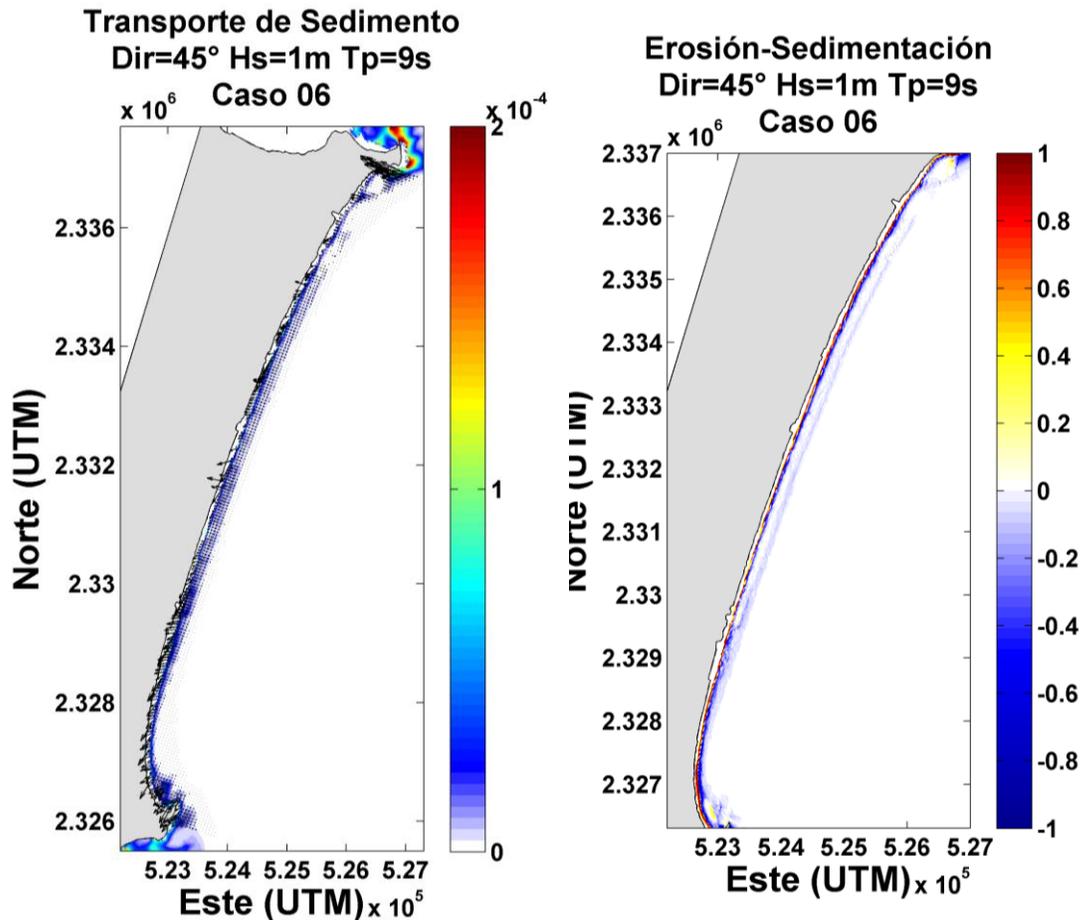


Figura 48. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en  $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica.

### OLEAJE DEL ESTE (90°)

El transporte sedimentario generado por oleaje del Este (Caso 11) (Tabla 2 en la sección de Metodología), presenta un comportamiento más homogéneo hacia las Zonas I y II con dirección de transporte hacia la costa (Figura 49, izquierda). En la Zona III se incrementa la magnitud del transporte, pero prevalece la dirección hacia la costa. En la Zona IV las condiciones de magnitud y dirección del transporte sedimentario son similares a las presentes en las Zonas I y II, sin embargo, la máxima intensidad de transporte se presenta entre la Zona IV y Punta Nizuc con dirección hacia la costa y hacia el Sur. Si bien el patrón de acumulación hacia la playa y de erosión en la parte marina prevalece para estas condiciones de oleaje, los cambios morfológicos (Figura 49, derecha) son mayores tanto en magnitud como en extensión abarcando mayor número de celdas computacionales que con los casos de oleaje del NNE y NE.

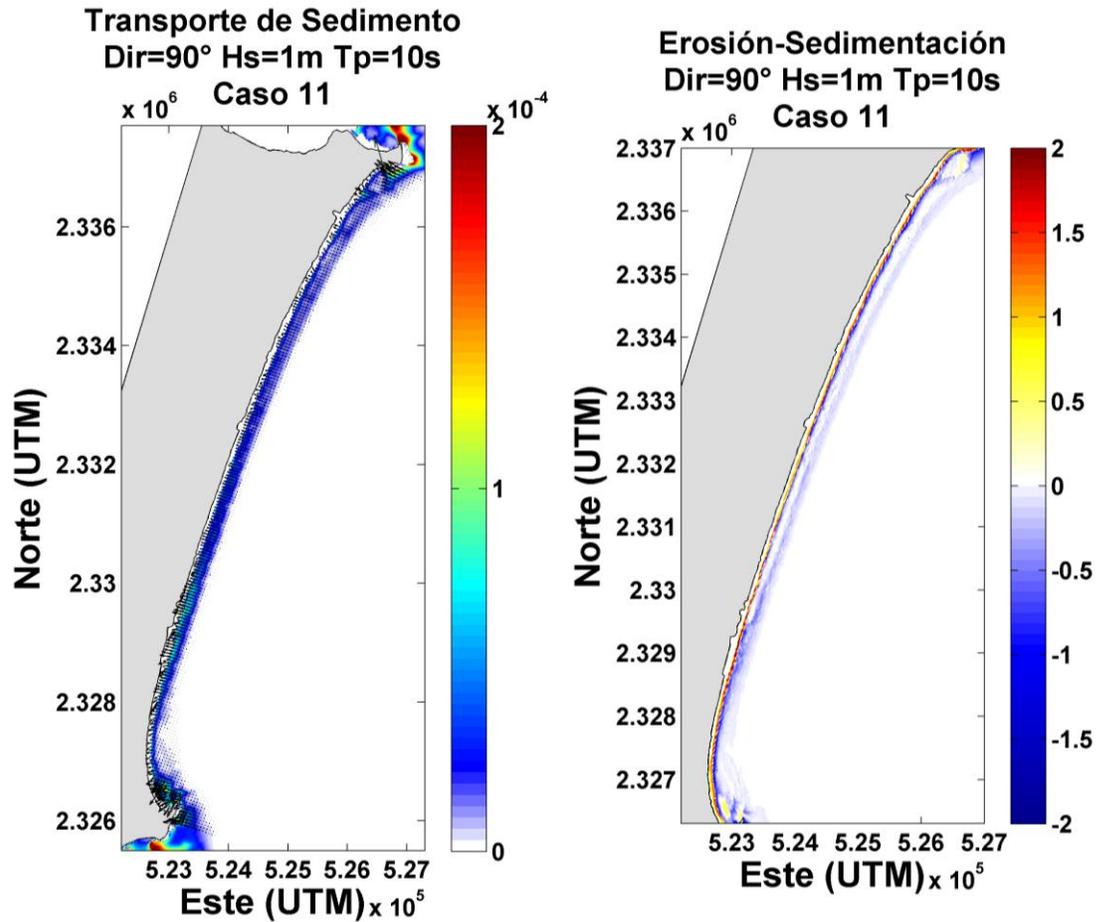


Figura 49. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en  $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica.

### OLEAJE DEL SE (135°)

Con las condiciones de oleaje del Sureste (Caso 17) (Tabla 2 en la sección de Metodología) el transporte sedimentario desde la Zona I y hasta Punta Cancún presenta componentes principalmente hacia la costa y hacia el Norte (Figura 50, izquierda). En la región Sur de la Zona II el transporte es principal es hacia la costa y hacia el Norte. El mayor transporte sedimentario se observó en la Zona III y con dirección hacia la costa. En la Zona IV también se presentó transporte hacia la costa pero de menor magnitud y con algunos componentes en dirección Sur. El patrón de erosión hacia la parte marina y acumulación de sedimentos hacia la parte más costera prevalece en todo el dominio, con mayor intensidad en la Zona II, sin embargo, la mayor cobertura espacial con acumulación se observó en la Zona IV (Figura 50, derecha).

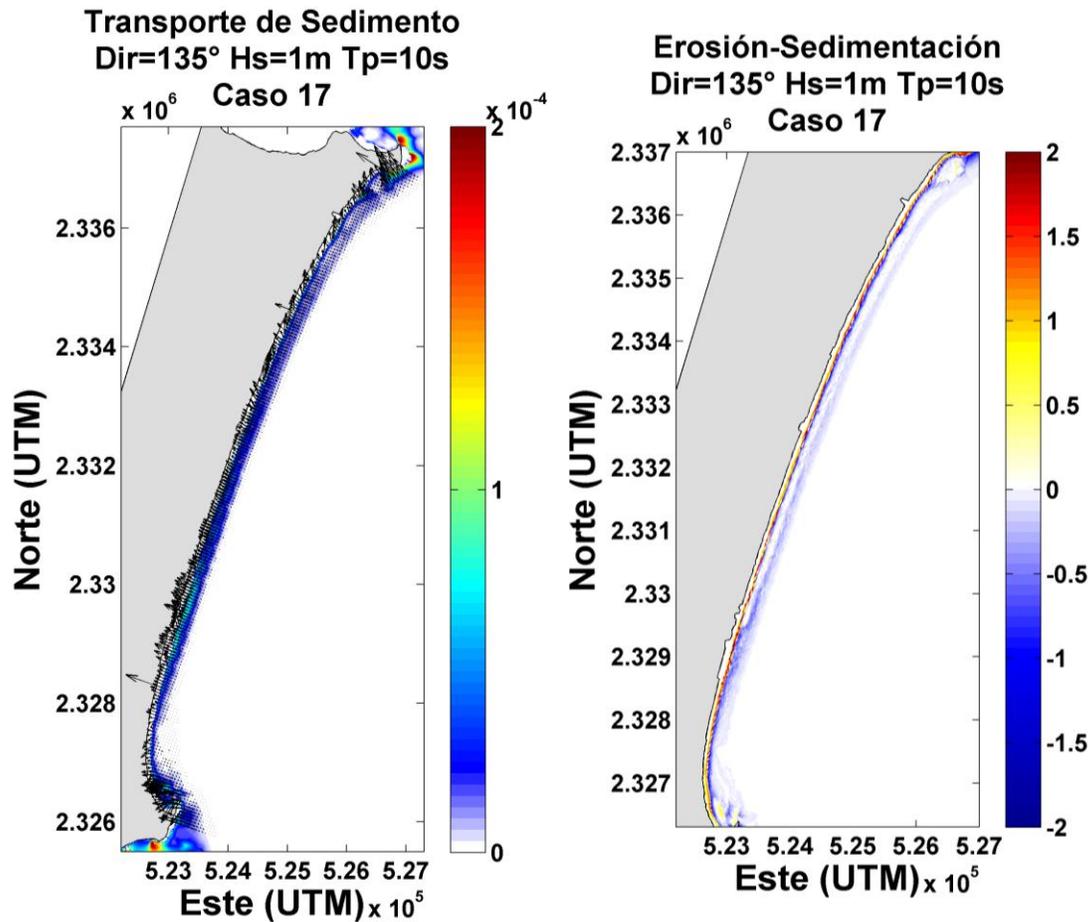


Figura 50. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en  $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica.

### OLEAJE DEL SUR (180°)

Bajo las condiciones de oleaje del Sur, caso 23, el transporte sedimentario (Figura 51, izquierda) es de menor intensidad que el generado con oleajes del SE y Este. Los patrones de transporte varían dependiendo de la zona: en la Zona I, la dirección es hacia el Norte, en la Zona II hacia la costa con algunas componentes en dirección Norte y es muy similar a la Zona III. En la Zona IV el transporte sedimentario tiene componentes en dirección hacia la costa. De igual manera la intensidad en la magnitud y extensión de la erosión y depositación de sedimentos (Figura 51, derecha) disminuye notablemente con respecto al producido por otras condiciones de oleaje. Pero permanece el patrón de acumulación hacia la zona de playa seca y erosión en la parte anterior hacia el mar. Este patrón incrementa su magnitud de Sur a Norte. Siendo para estas condiciones mayor la acumulación para la Zona I.

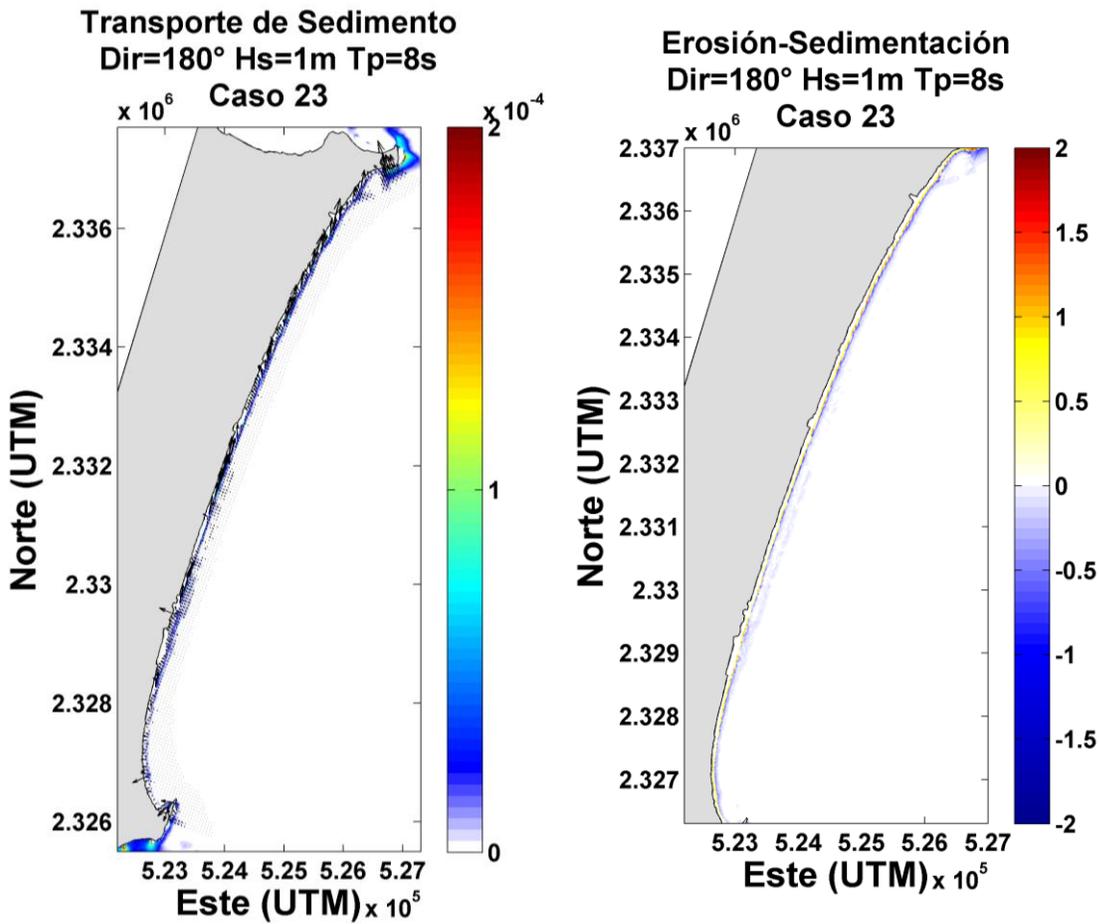


Figura 51. Patrón de transporte de sedimento (izquierda) generado por las corrientes por oleaje expresado en  $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica.

Como se describió en la sección de Metodología, el tiempo de simulación de los modelos fue de 12 horas, con un factor morfológico ( $f_{MOR}$ ) de 10, lo que se traduce en un tiempo de simulación de 5 días para el modelo morfodinámico permitiendo al modelo generar cambios morfológicos visibles en la playa de Cancún. La alta depositación en la parte más costera y la erosión en las celdas contiguas en la parte más marina sugiere la formación de “escarpes submarinos” a lo largo de la playa en combinación con “canales” adyacentes. Estas estructuras varían en su localización dependiendo del oleaje incidente: con el oleaje del NE, se formaron en las Zonas IV y III, aunque también se observan en la región entre las Zonas I y II; con oleaje del Este, ESE y SE estas estructuras se localizan en la Zona III. La formación de estas estructuras conlleva a la modificación de un perfil de playa disipativo hacia un perfil de playa reflectivo.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En los casos de oleaje extremo (casos 9, 12, 15, 18 y 21 en la Tabla 2 de la sección de Metodología) el modelo morfodinámico no alcanzó la estabilidad y los resultados son no satisfactorios. Dado que en esos casos se espera que la intensidad de las corrientes sea considerablemente mayor que en el resto. Se realizaron simulaciones reduciendo considerablemente el paso del tiempo (muy por debajo del sugerido por la relación de Courant) para prevenir la inestabilidad por la hidrodinámica. Adicionalmente, esperando que con corrientes intensas el transporte se intensifique, se redujo el factor morfológico ( $f_{MOR}$ ) a la mitad. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios. Otra simulación fue llevada a cabo sin incluir la actualización de la batimetría con el  $f_{MOR}$  reducido y los resultados de nueva cuenta fueron no satisfactorios.

Sin embargo, los resultados de los modelos de oleaje e hidrodinámico para condiciones de oleaje extremal son satisfactorios y muestran patrones coherentes y esperados que se presentaron en la Figura 46. Como se mencionó anteriormente, para el dominio de este estudio, con la resolución de las mallas utilizadas para la modelación y los parámetros implementados, no se lograron resultados adecuados de transporte sedimentario para casos extremales por lo que para este estudio no se incorporan los resultados morfodinámicos de casos extremos.

González-Leija *et al* (2013) mencionan la prevalencia de un potencial de transporte sedimentario en dirección hacia el Norte para la mayor parte de la playa y refieren una divergencia que se origina entre las Zonas III y IV consistente en transporte paralelo a la costa hacia el Sur, hacia punta Nizuc y alcanza su mayor extensión con oleajes mayores a 1 m provenientes del Este y Noreste, lo cual concuerda con los resultados obtenidos con el modelos de transporte de sedimento realizado en este estudio, donde en la mayor parte de la playa se observa transporte hacia el Norte y transporte hacia el Sur en la parte cercana a Punta Nizuc. Con el oleaje del NE se produce la mayor extensión de transporte hacia el Sur (Figura 48). Aunado a esto, entre las campañas C y D se observa una disminución en el ancho de playa para la parte Sur de la Zona III y parte Norte de la Zona IV (lugar donde se ubica dicha divergencia), con un incremento en el ancho de playa en la parte Sur de la Zona IV, lo cual indica que en esta sección de la playa el sedimento es transportado hacia el Sur por el efecto de la divergencia.

### 4.4. PROPUESTAS DE RELLENO ARTIFICIAL

Durante la alimentación artificial de la playa de Cancún de 2006 se vertieron cerca de 3 millones de  $m^3$  de arena alcanzando un ancho de playa promedio de 70 metros. Sin embargo después del paso del huracán Dean en 2007 la playa quedó nuevamente en una situación crítica. No se puede decir que el relleno no fuese funcional, ya que este sirvió para amortiguar la energía del evento; probablemente si el relleno no se hubiese realizado previo al huracán, este habría descargado su energía directamente sobre la infraestructura hotelera de Cancún, con los daños y pérdidas que eso hubiera implicado. En el relleno posterior en 2010 se incrementó de manera sustancial la cantidad de material vertido siendo en esta ocasión un volumen de más de 5 millones

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

de m<sup>3</sup> alcanzando un ancho de playa en algunos puntos superior a 100 metros; esto con el fin de prevenir que al paso de otro huracán la playa de Cancún quede nuevamente en una situación crítica. Hasta el momento (Noviembre del 2014) no se ha presentado algún evento de esta magnitud que propicie la remoción repentina del sedimento de la playa. Sin embargo, se ha apreciado una disminución paulatina en el ancho de la playa y en la altura del perfil de playa varias zonas. Esto es reflejo de que el problema de la erosión persiste en el sistema.

Si bien el objetivo del presente estudio fue determinar los patrones de transporte que resultan del clima de oleaje de la región, y analizar la dinámica sedimentaria que siguió al relleno artificial de playa en Cancún en el año 2010, se consideró prudente explorar el transporte sedimentario que pudiera tener el sistema ante un relleno de playa hipotético o idealizado con un incremento considerable tanto en el ancho de playa como en la altura del perfil de playa. En la práctica, esto representaría un incremento considerable en el volumen de material requerido con el incremento proporcional en el capital económico requerido para realizar dichos rellenos, y utilizando el modelo numérico se pueden explorar opciones y observar los patrones morfodinámicos que pueden ocurrir con rellenos de playa de gran magnitud y comparar los resultados con un relleno real como el que tuvo lugar en Cancún en el año 2010.

Como ejemplo del tipo de casos que pudieran simularse con esta herramienta, en este estudio se generaron dos condiciones ficticias de relleno de playa, se observó el efecto en la hidrodinámica y el resultante efecto morfodinámico. Se realizaron simulaciones con las condiciones de batimetría sintética forzando con las mismas condiciones de oleaje utilizadas en los experimentos numéricos que corresponden a la validación del modelo.

Tanto las batimetrías de las propuestas de relleno (sintéticas) como la batimetría “real” generada a partir de las mediciones y utilizada en el resto de los experimentos de este estudio se presentan en la Figura 52. Se incrementó considerablemente el ancho de playa para las dos propuestas: en la primera propuesta (en color negro) la curva batimétrica del nivel 0 se localiza después de la isobata de 3 metros de la batimetría real (en color rojo); sin embargo, la isóbata de los 5 metros se encuentra en la misma posición para ambos casos. Lo que indica un perfil más abrupto (*e.g.* reflectivo) para la propuesta 1; en la propuesta 2 (color azul) el contorno batimétrico de los cero metros se encuentra en algunos casos después de los 5 metros de profundidad de la batimetría base, la curva batimétrica del nivel 5 de la propuesta 2 coincide con la isóbata de 10 metros de la batimetría base. De este modo, la propuesta 1 describe un relleno artificial medio y la propuesta 2 un relleno intenso (Figura 53).

Los cambios batimétricos en los tres casos simulados fueron muy similares (Figura 54): desplazamiento de la isóbata de 0 metros hacia el mar, generando ganancia en el ancho de playa seca, la cual fue mayor para la propuesta 2; retroceso de la isóbata de los 3 metros hacia la costa, produciendo que en esta sección de la playa se generara una pendiente más abrupta al estar más cerca entre ellas las isóbatas de los 0 y 3 metros; la isóbata de los 5 metros se mantuvo sin cambio en los tres casos, lo que suavizó la pendiente de la playa para esta sección.

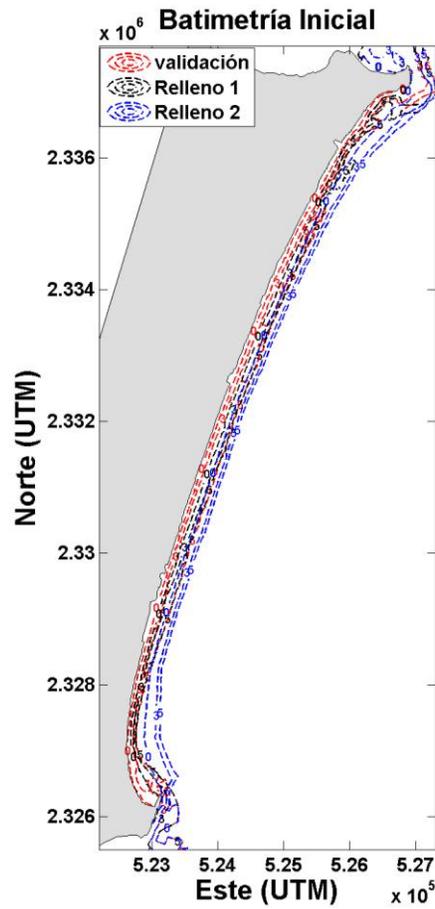


Figura 52. Batimetría inicial de los experimentos correspondientes a la evolución de rellenos artificiales: Relleno “real” medido in situ (Validación), Relleno sintético de magnitud moderada y perfil medianamente reflectivo (Relleno 1) y relleno sintético intensivo (Relleno 2). Para mayor claridad se muestran solo la isóбата de los 5 metros.

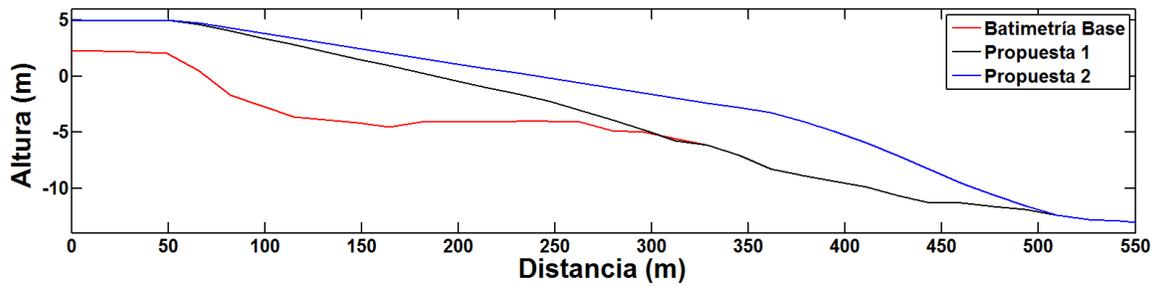


Figura 53. Comparación de los perfiles de las propuestas de relleno sintético y la batimetría base. El perfil corresponde a un transecto en la parte central de la playa.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Una diferencia significativa se observó en la Zona II: la batimetría base mostró un desplazamiento mínimo en la isóbata de 0 metros hacia el mar y las dos propuestas de rellenos presentaron un desplazamiento mayor, generando una ganancia de playa seca mayor para los casos de las propuestas de relleno. En las Zonas III y IV, la batimetría base y la propuesta 1 presentaron un desplazamiento mínimo de la isóbata de 0 metros y el desplazamiento de la propuesta 2 fue mayor, pero el retroceso de la curva batimétrica del nivel 3 fue menor para los dos primeros casos, provocando que para esta sección la pendiente sea más abrupta. Sin embargo, como la isóbata de los 5 metros se mantuvo sin cambio en los tres casos, la pendiente de la propuesta 2 resultó más suavizada (disipativa).

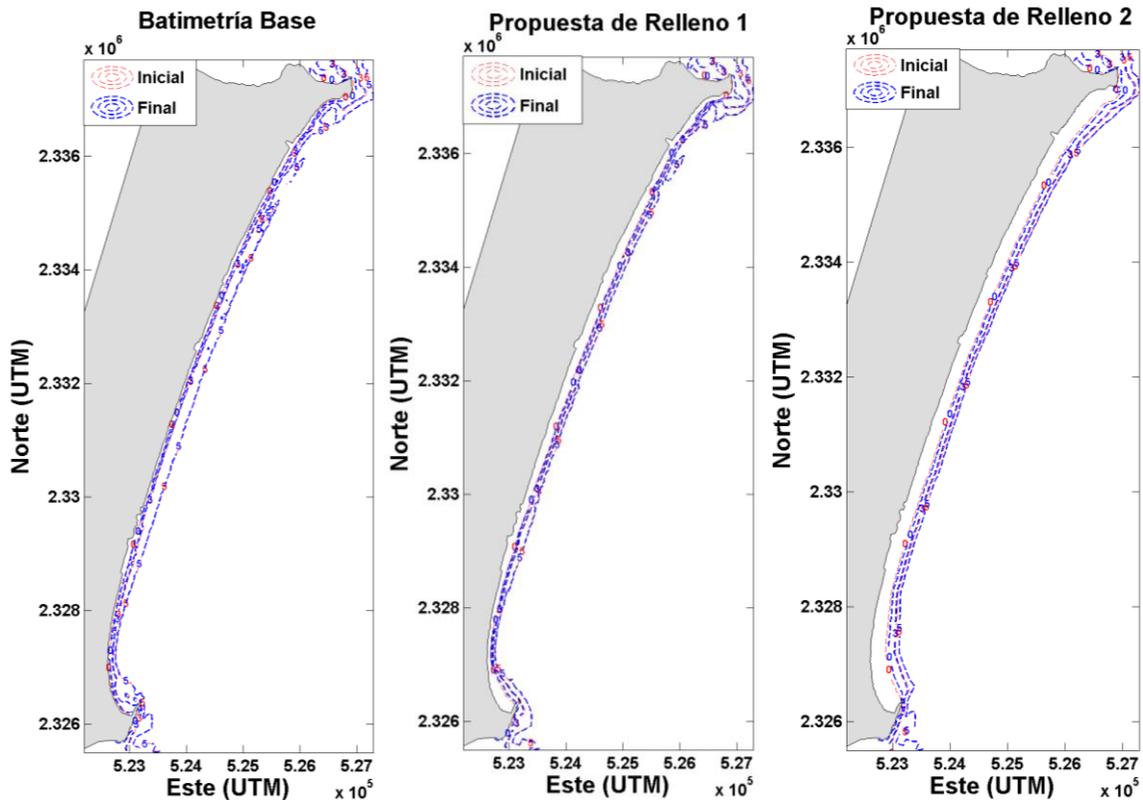


Figura 54. Batimetrías resultantes de la hidrodinámica simulada con las condiciones establecidas en la Validación.

El transporte sedimentario en ambas propuestas (Figura 55) muestra una dirección principal hacia la costa aunque difieren en magnitud. En la propuesta 1 (relleno medio con pendiente pronunciada) la tasa de transporte es claramente inferior a la que se presenta en la propuesta 2. Esto debido a que en la propuesta 2 (relleno medio con pendiente suave) el área sobre la cual el oleaje ejerce su influencia para poner el sedimento en suspensión y transportarlo es mayor que en la propuesta 1, por lo tanto tiene mayor capacidad de transporte. Esto se ve reflejado en los cambios morfológicos (Figura 56) que muestran en la propuesta 2 áreas más extensas de erosión en la parte más marina y áreas de depositación en la parte más costera que abarcan varias celdas. La propuesta

1 también presenta erosión en la parte marina y acumulación en la parte cercana a la playa, pero de menor magnitud y en franjas angostas de erosión-depositación. Hay que tener presente que las condiciones de oleaje en realidad son variables con patrones de transporte bajo distintas condiciones generarán diferentes resultados. Es importante mencionar también que al modificarse la pendiente de la playa trasladando la zona de surf hacia mar adentro, se migra de igual forma la rotura del oleaje, que en esas condiciones ocurrirá a una mayor distancia de la línea de hoteles.

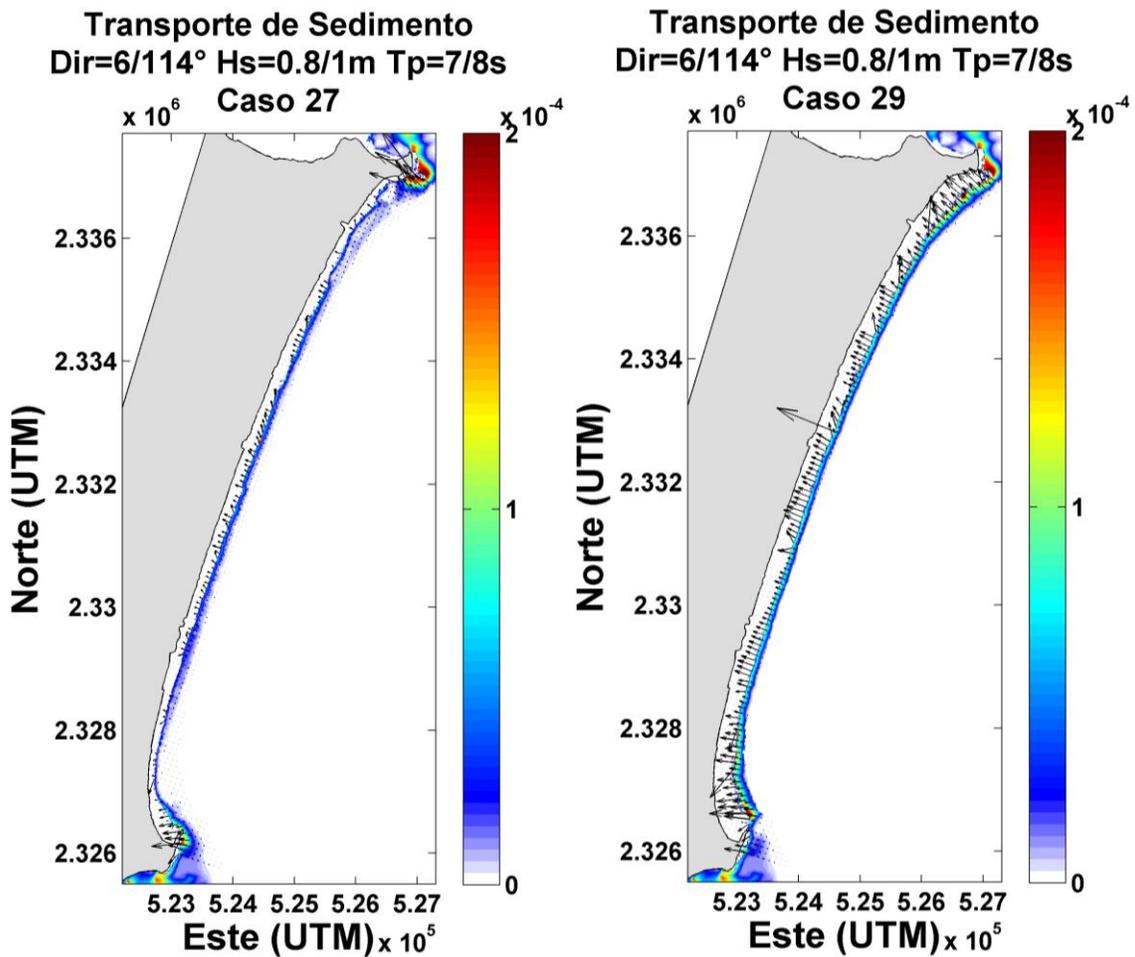


Figura 55. Patrón de transporte de sedimento generado por las corrientes por oleaje para las propuestas de relleno 1 (izquierda) y relleno 2 (derecha) expresado en  $m^3/s/m$ ; los vectores del transporte escalados 3 veces.

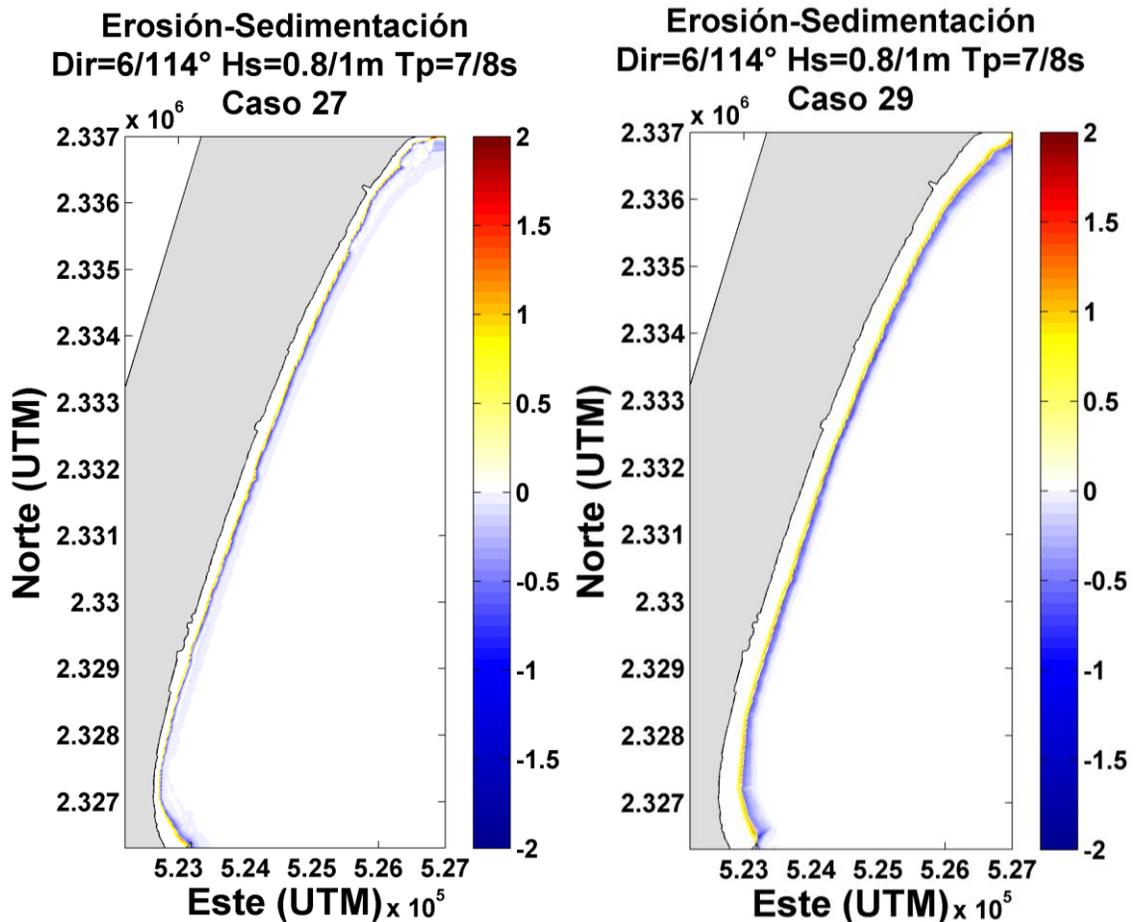


Figura 56. Cambio morfológico inducido por el oleaje incidente oleaje para las propuestas de relleno 1 (izquierda) y relleno 2 (derecha). Los valores negativos (azul) indican erosión y los valores positivos (rojos) acumulación de sedimento expresado en metros por cada celda numérica.

A pesar de que el relleno de playa llevado a cabo entre 2009 y 2010 en playas de Cancún hasta el momento no ha sido sometido a fuerzas de la magnitud de un huracán es evidente la disminución en el ancho de playa y en la altura de los perfiles además de la aparición de escarpes en algunas zonas debido al régimen de oleaje persistente en esta área. A pesar de esto, la prevalencia en el ancho de playa en gran parte de la playa de Cancún hace pensar que dicho relleno ha sido funcional.

Un relleno artificial cumple con las tareas de proporcionar el espacio de playa que busca el turismo y de proteger la infraestructura de los efectos erosivos del oleaje. Sin embargo, en la mayoría de los casos no es una solución que elimine permanentemente el problema de la erosión y muy probablemente Cancún no será la excepción. Pero un relleno artificial diseñado

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

apropiadamente puede ser más duradero y eficiente dependiendo del volumen de sedimento vertido, de la forma del perfil de playa y de las características del oleaje (que se relaciona con la época del año en que se realiza el vertido).

En este caso, si bien el relleno de la propuesta 1 en comparación con el relleno real del 2010 presentó tasas menores de transporte sedimentario que pudiera sugerir un tiempo de vida mayor, tendría un costo económico considerablemente mayor. En cuanto a las características del oleaje, de acuerdo a los resultados de los experimentos numéricos la temporada que más favorece a la implementación de rellenos de playa es la época invernal ya que implica transporte sedimentario de menor magnitud y en dirección Sur, tomando en cuenta que para la mayor parte de las temporadas el transporte sedimentario es hacia el norte y de mayor magnitud. El relleno del 2010 se llevó a cabo en esta temporada y, como se menciona anteriormente, en comparación con los rellenos previos ha dado resultados satisfactorios que seguramente podrían optimizarse. Una de las consideraciones que se recomienda atender además de la forma y volumen del sedimento vertido, es diferenciar el volumen de sedimento con refuerzo en la zona de mayor vulnerabilidad. Debido a que la mayor tasa de transporte sedimentario para la mayoría de los casos se localizó en la Zona III de playa Delfines, se recomienda que en esta zona se vierta mayor cantidad de sedimento con la finalidad de que prevalezca un ancho de playa idóneo para la protección de la infraestructura.

## 5. CONCLUSIONES

La playa de Cancún es una zona de alta dinámica donde existe un proceso de erosión crónica y la falta de aporte de sedimento hace que sea un problema persistente. Hasta la fecha, las acciones de protección implementadas han dado soluciones parciales y de corta duración a este problema; por el contrario las acciones locales implementadas por muchos hoteleros agravaron la situación mientras que los rellenos de playa han dado solo una solución temporal.

En este estudio, a partir de las observaciones de campo, se detectaron cambios morfológicos importantes al norte (Zona I: Royal Sunset) con erosión en la parte sur y acreción en la parte norte. Esto sugiere la redistribución de sedimento desde la parte sur hacia la parte norte de la zona I. Los resultados numéricos de los experimentos refuerzan esta teoría ya que bajo la mayoría de condiciones de oleaje y principalmente en los casos de oleaje reinantes se determinó un patrón de transporte sedimentario en dirección al norte en esta zona.

Otra región que presentó cambios morfológicos sobresalientes es la Zona III (Playa Delfines) donde a partir de las mediciones se determinó un punto de erosión persistente y focalizado. A partir de los experimentos numéricos en esta zona se observan tasas de transporte de sedimento mayor que en el resto de la playa.

Se encontró un sistema de escarpes de playa localizado en la parte aérea de las Zonas I y II de la playa de Cancún en las campañas posteriores al relleno de playa que se llevó a cabo en el 2010. Posterior a dicho relleno, se presentó una disminución en el ancho de playa acompañado por un decremento en las alturas de los perfiles de playa. Esto sugiere tanto una redistribución del sedimento colocado en el relleno, como un asentamiento y consolidación del material vertido debido probablemente al drenado del agua y acomodamiento de las partículas del sedimento. Los cambios inducidos en el perfil de playa debido a asentamiento y compactación del material utilizado durante la alimentación artificial pueden tener un papel importante en la evolución del relleno por lo que estos aspectos deben considerarse al momento del diseño de los rellenos de playa.

El oleaje incidente proviene principalmente de la dirección ESE y le sigue el oleaje del SE, con alturas significantes en un rango de 0.5 a 1 m y periodos de entre 5 y 10 segundos. Esta dirección del oleaje al propagarse a la playa de Cancún, se aproxima de manera normal a la costa con escasa disipación manteniendo su condición de altura de ola hasta una distancia muy cercana la costa. En la zona litoral, se genera un incremento en el nivel del agua generalizado (a lo largo de toda la playa) y consecuentemente se refleja en la aparición de corrientes hacia el mar, tanto en la forma de corrientes de resaca (en la vertical) como a través de corrientes de retorno (en la horizontal).

Las corrientes perpendiculares a la costa generadas por el oleaje dominante describen patrones de circulación en forma de celdas litorales con dirección hacia el mar intercaladas con corrientes hacia la costa, comportamiento característico de oleaje que incide normal a la costa. Con esta condición del oleaje también se generan corrientes litorales paralelas a la costa en dirección

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

hacia el Norte desde Punta Nizuc hasta la Zona II (Playa Marlín) aunque su intensidad es mucho menor que la de las corrientes perpendiculares a la costa. Los resultados numéricos describen con estas condiciones de oleaje un patrón de transporte sedimentario con dirección hacia la costa en la parte cercana a la playa que genera acumulación de sedimentos en la franja más costera del modelo, seguida de una franja ancha de erosión en la zona adyacente litoral. Se presenta también transporte sedimentario con dirección hacia el Norte desde la Zona II (Playa Marlín) hasta Punta Cancún y transporte hacia el Sur desde el sur de la Zona III (Playa Delfines hasta Punta Nizuc).

El cambio en las condiciones del oleaje incidente a lo largo del año controla los patrones de corrientes de la playa de Cancún. La dirección de las corrientes paralelas a la costa es consistente al cambio del ángulo de arribo del oleaje. Oleaje del Norte genera corrientes hacia el Sur y oleaje del Sur genera corrientes hacia el Norte. En general las corrientes perpendiculares a la costa son más intensas que las corrientes paralelas y se presentan en patrones de celdas de circulación las cuales varían en extensión y localización de acuerdo a la de incidencia del oleaje indicando una hidrodinámica más compleja de lo reportado en estudios anteriores. Esto sugiere que el patrón de transporte de sedimentario en la playa de Cancún también puede estar regido por un sistema de celdas de transporte sedimentario distribuidas a lo largo de la playa. Sin embargo los resultados numéricos de transporte sedimentario determinados a partir de este estudio muestran patrones de transporte sedimentario en dirección norte para la mayor parte de la playa y con una divergencia localizada en la parte cercana a Punta Nizuc donde el transporte tiene dirección hacia el Sur apoyando la direccionalidad hacia el norte del potencial de transporte litoral reportado en estudios previos (González-Leija, 2013).

El oleaje proveniente del Norte propicia transporte sedimentario hacia el Sur de menor intensidad que el transporte generado por oleaje del Sur que produce transporte sedimentario hacia el norte de la playa. De igual manera las corrientes perpendiculares a la costa son de menor intensidad cuando el oleaje incidente proviene del Norte, por lo cual puede considerarse que la mejor época para realizar un relleno de playa es la invernal ya que puede propiciar que el sedimento se redistribuya hacia el Sur de la playa y en épocas de oleaje reinante del ESE y SE nuevamente el sedimento pueda ser transportado hacia el Norte dando tiempo a que el sistema se acerque más a alcanzar un perfil de equilibrio.

Las corrientes de resaca (*undertow*) que se generan con el oleaje reinante son las principales causantes del transporte sedimentario hacia fuera de la costa y en consecuencia de la erosión persistente en la playa de Cancún. Estas características hidrodinámicas y morfodinámicas deben ser consideradas al momento de diseñar el sistema de protección a base de rellenos artificiales para que estos sean duraderos y permitan una dinámica sana de la playa de Cancún.

### 5.1. CONSIDERACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

En este estudio se detectó la necesidad de implementar un modelo con mallas de mayor resolución tanto en la horizontal como en la vertical en la franja más costera para poder resolver el transporte sedimentario en la zona de *swash* y poder así caracterizar las corrientes de resaca. Sin embargo, una malla de mayor resolución también implica la necesidad un mayor de tiempo de cómputo y el requerimiento de equipos con mayor capacidad.

Adicionalmente para caracterizar de manera más completa la relación entre la hidrodinámica y la morfología de la playa de Cancún hace falta incorporar en futuros estudios la influencia de otros forzamientos como el viento, la marea y las corrientes aledañas de mayor escala.

## 6. REFERENCIAS

Akpinar, A., M.I., Kömürkü, 2013. Assessment of Wave Energy of the Black Sea Based on 15-Year Numerical Hindcast Data. *Applied Energy*. Vol 101, p.p. 502-512.

Alcérreca-Huerta, J.C., 2009. Determinación de la Velocidad de Caída de Sedimentos Costeros de la Península de Yucatán, México. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Nacional autónoma de México. Facultad de ingeniería. México

Aguayo C., J.E., R., Bello M., M.A., del Vecchio C., J., Araujo M. y M.A., Basañez L., 1980. Estudio Sedimentológico en el Área de Tulum-cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo XLI, Nos. 1 y 2, pp. 15-32.

Aldape-Pérez, G., 2010. La Configuración del Espacio Turístico en Cancún, Quintana Roo, México. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio, pp: 185. España.

Appendini, C.M., A., Torres-Freyermuth, P., Salles, J., López-González y E.T., Mendoza, 2014. Wave Climate and Trends for the Gulf of México: a 30-Yr Wave Hindcast. *Journal of Climate*. Vol. 27 American Meteorological Society, pp. 1619-1632.

Baretta-Bekker, H.G., E.K., Duursma y B.r., kuipers, 1998. Encyclopedia of Marine Science. Segunda Edición. Springer-Verlag. Berlin.357 pp.

Chávez-Cerón, V., 2011. Determinación Experimental del Inicio de Arrastre de Arenas del Estado de Quintana Roo, México. *Tesis de licenciatura*. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. México

Creel, L., 2003. Ripple Effects: Populations and Coastal Regions. Population Reference Bureau

Dean, R.G., y R.A., Dalrymple, 2002. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press. Reino Unido. 475 pp.

Deltares, DELFT3D-Flow User Manual, Delft, The Netherlands, 2014.

Deltares, DELFT3D-WAVE User Manual, Delft, The Netherlands, 2014.

Diez, J.J., Esteban, M. D., y Paz, R.M., 2009. Cancun-Nizuc Coastal Barrier. *Journal of Coastal Research*, 25 (1), pp. 57-68.

Fredsoe, J. y R., Deigaard, 1992. Mechanics of Coastal Transport. *Advanced Series on Ocean Engineering*. Vol 3. World Scientific. 369 pp.

## CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

González-Leija, M.B., 2009. Análisis de las Variaciones Morfodinámicas en la Playa de Cancún, Q.Roo: Herramientas para el manejo costero. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Campeche. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. México

González-Leija, M.B., Mariño-Tapia, I., Silva-Casarín, R., Enríquez, C., Mendoza, E., Escalante-Mancera, E., Ruíz-Rentería, F., y Uc-Sánchez. E., 2013. Morphodynamic Evolution and Sediment Transport Processes of Cancun Beach. *Journal of Coastal Research*.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2010. Documento de Referencia. Vol. 1. Universidad de Cantabria.

Guido-Aldana, P., Ramírez-Camperos, A., Godínez-Orta, L., Cruz-León, S., y Juárez-León, A., 2009. Estudio de la Erosión Costera en Cancún y la Riviera Maya, México. *Avances en Recursos Hidráulicos*, Num. 20, pp. 41-56.

Gutiérrez de MacGregor, M.T y J., González-Sánchez, 1999. Las costas mexicanas y su crecimiento urbano. *Investigaciones Geográficas*. Boletín 40, pp. 110-126.

Hesp, P.A., y A.D., Short, 1999. Barrier Morphodynamics. Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. John and wiley & Sons Ltd.

INEGI. Mujeres y Hombres en México, 2009. Décimo Tercera Edición.

Komar, P.D., 1998. Beach Processes and Sedimentations. Segunda Edición. Pentice Hall. Estados Unidos. 544 pp.

Lesser, G.R., J.A., Roelvink, J.A.T.M., van Kester y G.S., Stelling, 2004. Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. *Coastal Engineering*. Vol 51, pp. 883-915.

Longuet-Higgins, M.S., y R.W., Stewart, 1964. Radiation Stresses in Water Waves; a Physical Discussion with Applications. *Deep Sea Research*. Vol. 11, pp. 529-562.

Martell-Dubois, R., Mendoza-Baldwin, E., Mariño-Tapia, I., y Silva-Casarín, R., 2012. Impactos de Corto Plazo del Huracán Dean Sobre la Morfología de la Playa de Cancún, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(4), pp. 89-111.

Martin, L., y J.M. Landim-Dominguez, 1994. Geological History of Coastal Lagoons. *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Oceanography Series, 60, pp. 41-67.

National Oceanic and Atmospheric Administration and National Geophysical Data Center; <http://www.ngdc.noaa.gov>.

Padilla-Hernández, R., 2002. Numerical Modelling of Wind Wave Energy Dissipation at the Bottom Including Ambient Currents. *PhD. Thesis*. Katholieke Universiteit Leuven. Belgium.

## CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Silva, R., y Pedrozo-Acuña, A., 2013. Post-Nourishment Beach Scarp Morphodynamics. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 576-581.

Ruiz-Martínez, G., 2009. Determinación del Estado morfodinámico de Segmentos de Playa que Poseen Obstáculos Sumergidos y Emergidos. *Tesis Doctoral*. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. México.

Sierra-Carrascal, E., 2005. Shoreline Response due to Longshore Sediment Transport in Cancún Beach, México. *MSc Thesis*. UNESCO-IHE Institute for Water Education. Los Países Bajos.

Silva-Casarin, R., E., Mendoza-Baldwin, E., Escalante-Mancera, I., Mariño-Tapia y F., Ruíz-Rentería, 2009. Oleaje inducido por el huracán Wilma en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 2, pp. 93-109.

Silva-Casarín, R., Ruiz-Martínez, G., Mariño-Tapia, I., Posada-Vanegas, G., Mendoza-Baldwin, E., y Escalante-Mancera, E., 2012. Manmade Vulnerability of the Cancún Beach System: The Case of Hurricane Wilma. *Clean-Soil, Air, Water*. 40 (9), pp. 911-919.

Silva, R., Martinez, M.L., Hesp, P., Catalan, P., Osorio, A.F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P., Cienfuegos, R., Klein, A. y Govaere, G., 2014. Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. *In: Silva, R., y Strusinska-Correia, A. (eds.), Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases*. Journal of Coastal Research, Special Issue, No 71, pp. 1-16. Coconut Creek, Florida.

Torres-Freyermuth, A., 2012. Transformación de ondas infragravitatorias en medios marinos no-homogeneos. *Gaceta electrónica*, septiembre 2012. Instituto de Ingeniería, UNAM; <http://www.iingen.unam.mx/esmx/BancoDeInformacion/BancodelImagenes/Documents/Transformaciondeondas.pdf>

UNEP/GPA, 2003. Diagnosis of the Erosion Processes in the Caribbean Sandy Beaches; report prepared by Environmental Agency, Ministry of Science, Technology and Environment, Government of Cuba, March.

Van der Wegen, M., A., Dastgheib, B.E., Jaffe y D., Roelvink, 2011. Bed Composition generation for Morphodynamic Modeling: Case Study of San Pablo Bay in California, USA. *Ocean Dynamics*. Vol. 61, pp. 173-186.

Ward, W., 1997. Geology of Coastal Islands, Northeastern Yucatan Peninsula. Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands. *Developments in Sedimentology* 54. Elsevier Science B.V., pp. 275-298.

## 7. ANEXOS

En la sección de resultados se muestran sólo algunas de las figuras que se generaron durante la realización de este estudio, por lo que a la par de este escrito se anexa un disco compacto en el cual están guardadas todas las figuras para su consulta.

Anexo A. Perfiles de playa medidos en el campo en las cuatro zonas monitoreadas correspondientes a las cuatro campañas de medición. Se graficaron todos los perfiles individualmente.

Anexo B. Perfiles de playa interpolados espacialmente de las cuatro zonas. Se graficaron las perfiles de las cuatro campañas en una sola figura para visualizar el cambio en el perfil de una campaña a la otra. Las secciones inician de Norte a Sur y se grafica un perfil cada 100 metros.

Anexo C. Propagaciones de oleaje de todos los casos experimentales.

Anexo D. Corrientes Litorales generadas por el oleaje de todos los casos experimentales.

Anexo E. Patrones de transporte de sedimento de todos los casos experimentales.

Anexo F. Patrones de erosión-depositación de todos los casos experimentales.