



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evolución Morfodinámica de la Playa Comprendida
Entre Punta Cancún y Punta Nizuc en el Estado de
Quintana Roo, México.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
(HIDRÁULICA)**

P R E S E N T A:

ERICK ALEJANDRO RAMÍREZ GONZÁLEZ

D I R E C T O R D E T E S I S:

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



MÉXICO, D.F.

ENERO 2007.

AGRADECIMIENTOS:

Quiero expresar mi gratitud y al mismo tiempo dedico este trabajo:

*A la familia **Ramírez González**, en especial a **mis padres** por su gran amor y apoyo incondicional.*

*A **Flor de Liz** por su amor, apoyo y paciencia que he recibido de ella.*

*A todos mis amigos y compañeros, principalmente a **Quiñones, Noe, Edgar y Gabriel** ya que hemos sido buenos amigos durante todo este periodo de estudios.*

*A todos los profesores que me impartieron clases pero en especial al **Dr. Rodolfo Silva C.** por su vocación de enseñanza y guía, que han llevado a la culminación de este trabajo.*

*Al **CONACYT** por la beca recibida durante la maestría.*

ÍNDICE.

ÍNDICE.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABLAS.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos del presente trabajo.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Descripción física.....	6
1.3.1. Localización.....	6
1.3.2. Clima.....	7
1.3.3. Geología.....	8
2. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA EN PLANTA.....	10
2.1. Zona costera.....	10
2.2. Tipos de zonas costeras.....	11
2.3. Escalas y formas morfológicas en planta.....	13
2.4. Sistemas costeros.....	17
2.5. Divisiones y celdas litorales en la zona costera.....	18
2.6. Erosión costera.....	20
2.7. Geomorfología en la zona en estudio.....	20
2.7.1 Fotografías aéreas.....	20
2.7.2 Mosaico Cancún antes de 1985.....	21
2.7.3 Mosaico Diciembre de 1985.....	23
2.7.4 Mosaico Enero de 1990.....	25
2.7.5 Mosaico Junio de 1999.....	27
3. NIVELES DE EROSIÓN.....	30
3.1. Funciones de una playa.....	30
3.2. Criterios de valoración de una playa.....	30
3.3. Formulaciones a largo y mediano plazo del perfil de playa.....	32
3.3.1. Formulaciones a largo plazo.....	32
3.3.2. Formulaciones a mediano plazo.....	33
3.3.3. Formulaciones a corto plazo.....	34
3.4. Perfil de playas.....	34
3.4.1 Tipos de perfiles.....	35
3.5. Evolución del perfil de playas en la zona de estudio.....	36
3.5.1 Levantamientos realizados.....	36
3.5.2 División del sitio en estudio.....	38
3.5.3 Características del sedimento.....	39
3.5.4 Cuantificación del sedimento.....	43
4. EVOLUCIÓN DE LOS PERFILES REPRESENTATIVOS SOMETIDOS A UN TEMPORAL.....	56
4.1. Modelos morfodinámicos de evolución de perfiles.....	56
4.2. Dominio discreto.....	62
4.3. Aplicación del modelo Petra.....	63
4.3.1 Perfiles.....	63
4.3.2 Temporal de cálculo.....	64

4.3.3. Simulación y resultados.....	68
5. MODELOS DE SIMULACIÓN EN PLANTA.....	72
5.1. Batimetría del sitio en estudio.....	72
5.1.1 Recopilación de información.....	72
5.1.2 Procesamiento de la información.....	73
5.2 Modelado de oleaje.....	74
5.2.1 Modelo numérico.....	75
5.2.2 Oleaje a propagar.....	77
5.2.3 Dimensionamiento del área de estudio.....	79
5.2.4 Resultados.....	81
5.3. Modelado de corrientes.....	84
5.3.1 Modelo numérico.....	84
5.3.2 Resultados.....	86
5.4. Modelo de erosión y sedimentación en playas.....	90
5.4.1. Modelo numérico.....	90
5.4.2. Resultados.....	94
6. ESTRUCTURAS PROPUESTAS.....	98
6.1. Tipología de las estructuras de protección de la costa.....	98
6.2. Diques rebasables.....	100
6.2.1 Análisis dimensional.....	101
6.3. Estructuras propuestas.....	102
7. DISCUSIÓN.....	106
8. CONCLUSIONES.....	110
9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	114
10. BIBLIOGRAFÍA.....	116
11. ANEXOS.....	118
11.1. Celdas litorales.....	118
11.1.1. Celdas litorales Cancún diciembre de 1985.....	118
11.1.2. Celdas litorales Cancún enero de 1990.....	119
11.1.3. Celdas litorales Cancún junio de 1999.....	121
11.2. Mapas de clima de oleaje.....	123
11.2.1. Propagación caso 1.....	123
11.2.2. Propagación caso 2.....	124
11.2.3. Propagación caso 3.....	125
11.2.4. Propagación caso 4.....	126
11.2.5. Propagación con estructuras caso 1.....	127
11.2.6. Propagación con estructuras caso 2.....	128
11.2.7. Propagación con estructuras caso 3.....	129
11.2.8. Propagación con estructuras caso 4.....	130
11.3. Memoria de cálculo diques propuestos.....	131
11.4 Procesos costeros.....	132
11.4.1 Procesos sedimentarios.....	132
11.4.2. Procesos del oleaje.....	138
11.4.3. Mareas y su influencia.....	145
11.4.4. Otros procesos oceanográficos.....	145

1. INTRODUCCIÓN.

La línea de costa es la zona que divide el mar de la tierra, y es un ambiente geológico único tanto en su composición como por la acción de los procesos físicos que actúan en ella, la mayoría de las líneas de costas en el mundo son playas y los procesos físicos bajo los cuales estas están sometidas son tanto marinos, (*mareas, oleaje*) y atmosféricos, (*viento, presión*). Cada uno de ellos se presenta con su propia escala espacial y temporal que genera una respuesta en la playa en dichas escalas de variabilidad.

Las costas y las extensiones submarinas de playas no son superficies estables, pues se acrecientan ó erosionan como respuesta a los cambios en los niveles de energía asociados con el oleaje y disponibilidad de arena. Por ejemplo una sola tormenta es capaz de desgastar una gran porción de playa en horas.

La playa en mayor o en menor medida cumple con diversas funciones, ya sea como defensa de la costa, hábitat de flora y fauna o como uso lúdico humano, esto lleva a considerar que la necesidad de regeneración está siempre originada por la falta de cumplimiento de alguna de estas funciones, y el objetivo de la misma es el restablecimiento de dicha función, al menos durante un plazo de tiempo.

El caso de las playas de Cancún es uno de los más dramáticos si se consideran el conjunto de condicionantes: económicamente ingresan mas de 10 mil millones de pesos anuales por la actividad turística; la afectación del sistema dunar con la construcción de infraestructura de comunicación y hoteles han reducido la flexibilidad de la isla barrera aislando al sistema laguna de Nichupté del de playa; la gran riqueza de sus ecosistemas que albergan desde el anidamiento de tortugas hasta segmentos de arrecifes coralinos, y; la gran vulnerabilidad asociada a fenómenos extremos, como los huracanes hacen de este sistema un caso muy complejo. Por tal motivo es importante el hacer una revisión histórica del comportamiento de la línea de costa e implementar nuevos programas de modelación para poder pronosticar de manera más eficiente los cambios en la línea de costa de la zona en estudio como parte sustancial de los equilibrios que se deben propiciar entre los procesos naturales y usos antropogénicos.

1.1 Objetivos del presente trabajo.

- Recopilar información histórica relacionada con la evolución de la línea de costa del área en estudio para desarrollar una base de datos que permita fundamenta la evaluación espacio temporal que el sistema ha experimentado.
- Ensamblar y presentar diferentes mosaicos fotográficos y perfiles playeros con el fin de ilustrar los cambios espacio-temporales que el sistema ha experimentado.
- Analizar la evolución morfológica en planta para diferentes años e identificar los procesos o eventos que la han influenciado.
- Estimar los volúmenes de erosión o depósito, velocidad de corrimiento, espesor, para diferentes perfiles ubicados a lo largo de la zona de playa comprendida entre Punta

Cancún y Punta Nizuc e identificar las zonas de mayor vulnerabilidad de la línea de costas en estudio.

- Establecer las tasas de erosión o depósito aceptables en el tramo costero de estudio, mediante el entendimiento de los principales mecanismos generadores del movimiento de la playa seca tanto en perfil como en planta.
- Evaluar el impacto y la vulnerabilidad que ocurre en cuatro perfiles playeros representativos de la zona en estudio para la configuración playera existente después del relleno, mediante la simulación de un evento extraordinario.
- Obtener diferentes escenarios hidrodinámicos mediante la simulación de distintos climas de oleaje, bajo diferentes condiciones iniciales con rangos estacionales y extraordinarios.
- Analizar los patrones morfodinámicos, que propician la migración de sedimentos y los cambios geomorfológicos de la línea de costa comprendida entre Punta Cancún y Punta Nizuc.
- Proponer diferentes alternativas para minimizar la migración de sedimentos.

1.2. Antecedentes.

Con el objeto de llevar a buen puerto el presente trabajo de investigación, la caracterización de la playa de Cancún se realiza a través de la generación de datos de campo y de la consulta de información histórica sobre el comportamiento de la línea de costa, clima de oleaje, marea, conformación del sedimento, etc. Con base en esta información se modelan diferentes escenarios y se presentan algunas alternativas de solución para mitigar el transporte de sedimentos hacia fuera del sistema.

En los años sesentas Cancún era una isla desierta y pocos sabían de su existencia, se conformaba de una duna en forma de siete y separada de tierra firme por dos estrechos canales permanentes que conectaban un amplio sistema lagunar con el mar. En época de tormentas eventualmente se abrían una serie de bocas y los dos canales permanentes se profundizaban, lo que garantizaba un equilibrio dinámico playa-laguna.

Fue a finales de los años sesentas, cuando se reveló la importancia del turismo como fuente captadora de divisas y de sus efectos concretos como la creación de empleos, por lo que en México fue considerada como una de las prioridades de aquel sexenio la de fortalecer algunos destinos turísticos existentes como Acapulco y diversificar la oferta turística, tomando como base una idea de vanguardia; construir ciudades turísticas integrales a partir de cero.

A pesar de ciertas desventajas, como su lejanía de los grandes centros de población, (*1,820 Km., de la ciudad de México*) y con comunicaciones deficientes, (*carretera Chetumal – Puerto Juárez inconclusa*), había fuertes razones para desarrollar en este sitio una ciudad turística, (*belleza extraordinaria, cercanía al esplendor de la cultura maya*).

En aquella época Quintana Roo tenía un estatus de territorio, y el cual estaba unido con el resto del país por la carretera Mérida – Valladolid – Puerto Juárez, (*construida apenas un sexenio antes*); tenía cuatro perímetros libres con estatus de zona fronteriza; Cozumel, Isla Mujeres Xcalak y Chetumal, esta última tuvo un cierto auge comercial debido a la importación. En este ambiente la creación de Cancún como desarrollo turístico se presentaba como el esperado detonador económico de la región.

Oficialmente el proyecto Cancún fue autorizado en 1969, pero en la práctica inició en enero de 1970 cuando arribaron los primeros ingenieros de Infratur, los cuales abrieron un camino de Puerto Juárez a la isla de Cancún, diseñaron un plan maestro de desarrollo y construyeron una pista aérea provisional.

Las pautas básicas del plan maestro fueron; La construcción de una zona turística sin áreas residenciales permanentes bajo el concepto de corredor turístico, la construcción de una zona habitacional para los residentes permanentes y la construcción de un aeropuerto internacional.

El desarrollo de la zona hotelera se subdividió en tres etapas: en la primera abarco toda el área de bahía de mujeres hasta Punta Cancún, la segunda comprendía desde la laguna Bojorques hasta Punta Nizuc y la tercera desde Punta Nizuc hacia el sur hasta los límites de la reserva territorial.

Entre las diferentes obras de ingeniería civil que se realizaron en la zona hotelera destacan: la consolidación de 240 has de suelo, (*100 para un campo de golf, 60 para el lote 18 A y 60 para las ruinas del Rey*), se rellenaron de manera directa 80 has. (*65 para ensanchar la isla, y 15 para la carretera que va al aeropuerto*), y el dragado de 372 mil m³ en los canales Sigfrido y Nichupté.

Para 1974 fue inaugurado el aeropuerto internacional de Cancún e iniciaron operaciones los primeros hoteles como el de Bojorques y el Caribe Cancún.

Cancún ha experimentado algunos momentos difíciles en su historia como la crisis económica de 1982 que provocó que las inversiones decayeran considerablemente y la incidencia de fenómenos naturales extraordinarios.

En septiembre de 1988, el huracán Gilberto tocó tierras mexicanas entre Cancún y la Isla de Cozumel, alcanzando velocidades de viento de 278 km/h con rachas de hasta 324 km/h, siendo clasificado como uno de los mayores a nivel mundial y el de mayor magnitud hasta ese entonces en el Caribe y Golfo de México. Su presencia ocasionó severos daños en el tramo de costa localizado entre Punta Cancún y Punta Nizuc, también las zona urbana y en las zonas de selva y manglar.

En 1989 le fue encargado al instituto de ingeniería de la UNAM realizar un estudio que tenía como fin el determinar la factibilidad de rehabilitación y protección de las playas de futuros eventos ciclónicos, proponiendo soluciones sustentadas en los estudios efectuados.

De dichos estudios las principales recomendaciones fueron:

Se recomendó un ancho uniforme de restitución de playas seca de 20m, para el cual se requerían del orden de 240,000 m³ de arena, y siendo para 30m, necesarios aproximadamente 700,000 m³.

Considerando una pérdida de arena de las playas de al menos 700,000 m³, en ese entonces se estimó que éstas se recuperarían de manera natural en aproximadamente 16 años. Lo cual fue la opción a seguir.

Poco después, algunos hoteleros se vieron en la necesidad de alimentar artificialmente las playas frente a sus hoteles, mediante el acarreo de camiones de arena y su posterior depósito en la costa, también en las zonas más erosionadas, se inicio la construcción de pequeñas obras de protección que no siempre se basaron en los mejores criterios técnicos para su construcción y diseño.

Sin embargo ante la persistencia de los problemas de erosión, los hoteleros más afectados decidieron construir obras más formales, que implicaban costos más elevados. Este tipo de obras consistió básicamente en espigones sumergidos conformados por contenedores sintéticos rellenos de arena, los cuales no mostraron su efectividad la mayoría de las veces, debido a la falta de estabilidad de los elementos que los constituyen. Esto convirtió dichas obras en remedios temporales y propiciaron que parte del problema se trasvasara a otros segmentos de la playa.

En el año 2000 se percibía que los problemas de erosión de las playas en el tramo estudiado permanecían e incluso en ciertos sectores habían incrementado, tanto así que frente algunos hoteles el oleaje incidía directamente sobre los muros y bardas que fueron utilizados como protección, que separan las edificaciones del mar.



Figura 1-1 Incidencia del oleaje sobre los hoteles.

Por lo que Fonatur y la Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre (de la antigua SEMARNP) encomendaron a la gerencia de estudios de Ingeniería Civil, (GEIC) de la CFE, la realización de un estudio que comprendiera los anteproyectos de las obras necesarias para la rehabilitación integral de dichas playas. Llegando a las siguientes conclusiones:

De acuerdo a las condiciones prevalecientes en el año 2000, si se quería un ancho de playa de 60 m y una cota de relleno de 2.5 m sobre el nivel del mar y suponiendo que el relleno se efectuase en la época de verano, el volumen resultó de 2,7 millones de metros cúbicos

En caso de que el relleno se efectúe en la época de invierno, el volumen resultó de 4 millones de metros cúbicos.

Se determinó que el afloramiento rocoso localizado frente a Punta Cancún, el cual constituía una barrera natural para el movimiento de arena en el área de interés, se encontraba

seriamente dañado, pues durante el huracán Gilberto grandes masas rocosas fueron removidas de su lugar y disgregadas, por lo que al ampliarse un hueco dio lugar a fuertes corrientes paralelas a la costa, las cuales facilitan la salida del material sólido con la consiguiente erosión de las playas aledañas.

En cuanto a Punta Nizuc, se observó que la separación entre las dos salientes que la conforman se acentuó por la presencia del huracán Gilberto, por lo que el patrón de corrientes también se vio modificado, bajo ciertas condiciones de marea y oleaje, que presuntamente provocó la salida de arena del tramo estudiado, de ahí la recomendación de sellar la abertura existente.

En base a estas consideraciones se propuso la construcción de obras terminales en ambas puntas, cuyo objetivo sería constituir dos estructuras de sellado que eviten o disminuyan sensiblemente la salida de la arena que se proyectó utilizar en el relleno artificial de las playas.

Es conveniente mencionar que el estudio de la CFE, al igual que los anteriores, es impreciso y tiene serias deficiencias en las conclusiones ya que parte del problema fue que se perdió flexibilidad en el sistema al sellar las bocas intermitentes que existían a lo largo de la isla barrera.

Durante el año de 2004, ante la perseverancia de estos problemas y ante el desarrollo de nuevas tecnologías de ingeniería de costas, la Secretaría de Turismo del Estado de Quintana Roo a través de los Fondos Mixtos CONACYT-Quintana Roo acude con Investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, buscando encontrar una solución al problema de erosión, y como respuesta se inician una serie de actividades relacionadas al monitoreo de la zona en estudio desde varios enfoques y se inician los estudios correspondientes.

En Octubre del 2005 Wilma impacta la península de Yucatán como Huracán de categoría 4, ubicándose su centro a unos 37 Km. al SO de Cancún, con vientos de 220 km/hr y rachas de hasta 270 km/hr, desplazándose lentamente por tierra.



Figura 1-2 Huracán Wilma.

La incidencia de este huracán provoco graves daños mas allá de la playa pues afectó la infraestructura hotelera y la zona habitacional, lo que llevo a declarar al municipio entero como zona de desastre.

Esta situación provoco que los ojos del mundo estuvieran enfocados en la situación que se vivía en el norte de Quintana Roo y en especial en Cancún.



Figura 1-3 Zona hotelera después del paso de Wilma.

Ante la presión de los inversionistas y de los habitantes, el gobierno federal, tomó cartas en el asunto y se comprometió a reconstruir la zona considerándola como una prioridad nacional, reconstrucción que también involucraba el proyecto de restitución de playas por lo que este se agilizó, realizándose un relleno artificial el cual concluyó en abril del 2006.



Figura 1-4 La pareja presidencial visita la zona de desastre.

1.3. Descripción física.

1.3.1. Localización.

La zona de estudio se localiza en el estado de Quintana Roo y exclusivamente dentro del ámbito territorial del Municipio de Benito Juárez, formando una isla barrera con un rumbo aproximado N 26° E, limitada por las coordenadas N 21° 02', W 86° 47' y N 21° 08', W 86° 44'. Colinda al norte sur y oeste con el mar caribe, al este con un sistema lagunar, la franja playera comprende una extensión de 14 km. de largo aproximadamente.



Figura 1-5 Coordenadas en la Zona en estudio.

1.3.2. Clima.

La zona de estudio está dominada por la influencia del mar Caribe y los frentes que vienen del norte. Su clima es tropical con temperaturas medias mensuales que varían de 23° C a 27° C a lo largo del año y temperaturas medias máximas que alcanzan los 33° C y medias mínimas que llegan a los 17° C.

Los eventos extremos que afectan a la región son los huracanes y tormentas tropicales, y en segundo lugar, los frentes fríos que se presentan todos los años durante el invierno.

La precipitación media anual de la zona es de alrededor de 1300 mm, con una alta variabilidad interanual producida principalmente por la presencia de tormentas tropicales y huracanes en la zona, el periodo de secas se presenta de febrero a abril.

Los vientos dominantes del Este, provenientes del mar caribe y con intensidades medias de 4 a 6 m/s son los que en primavera y verano, (*abril a septiembre*) tienen una mayor frecuencia que el resto del año, (*octubre a marzo*) que es cuando se observa mayor variabilidad en la dirección de los vientos.

Esta diferencia se debe a que de octubre a marzo la presencia de los frentes fríos genera vientos de otras direcciones, principalmente del norte, mientras que en el verano se intensifican los vientos alisios que provienen del Este.

1.3.3. Geología

La zona de estudio, se encuentra ubicada en la franja costera Oriental de la Península de Yucatán; en esta región afloran, desde el continente hacia la línea de costa, las siguientes unidades litológicas:

Calizas pre-pleistocénicas que se encuentran en la parte continental y conforman una terraza Karstificada, que se han correlacionado con la formación Carrillo Puerto, (*Bonet y Butterlin 1962*); esta formación está constituida por calizas fosilíferas en su base, y calizas compactas y arenosas hacia su cima. El gran desarrollo de conductos de disolución le proporciona un carácter acuífero muy elevado.

Se encuentran depósitos carbonatados del Cuaternario, (*CNA 1992*), en la zona costera sobre las calizas pre-pleistocénicas, que forman una franja de lomas, (*crestas*) alineadas de 150 Km. de longitud y entre 0.5 y 10 m. de ancho; estos depósitos están constituidos por antiguos sedimentos de playa como arenas calcáreas, acreció nadas en la margen continental y que cubren a calizas arrecifales; entre estas crestas de playa y la costa se encuentran calizas lagunares y calizas arrecifales. Ambos materiales, las arenas calcáreas y las calizas mencionadas, se han establecido del pleistoceno Superior, (*120,000 a 125,000 años, Ward, op.cit.*).

Las arenas consolidadas que conforman el alineamiento de lomeríos de crestas de playa están constituidas por una unidad basal de arenas calcáreas de grano fino, (*Ward y Brady 1979*).

En dirección del mar las rocas representativas del Holoceno son generalmente calizas arenosas compactas, con abundantes fragmentos de conchas y restos de parches arrecifales.

La zona en estudio, está unida a la parte peninsular por unos espolones, situados en los extremos norte y sur de la misma, entre los geólogos es identificada como isla Cancún.

Entre la península y la zona en estudio, se encuentra una laguna principalmente cerrada por los espolones, los cuales restringen la circulación de la laguna en su interior.

Según Ward y Wilson, (*1974*) las partes principales de la isla de Cancún corresponden a remanentes de crestas de dunas, las cuales se depositaron cerca del borde externo de una terraza *cárstica*¹ de 7.5 Km. de amplitud situada actualmente a 10 m de profundidad, la cual se formó durante el descenso del nivel medio del mar que ocurrió probablemente en la etapa temprana de la región wisconsiana² mas menos 30,000 años.

En la zona marginal del continente, en cambio, se desarrolló un conjunto de crestas de playa que se *acreción aron*³ a tierra firme, las que se manifiestan por un ligero escarpe que marca el contacto entre los sedimentos sin consolidar del Holoceno y las capas de calizas continentales.

Cuando la elevación del mar inundó la terraza, las crestas de dunas formaron una barrera que protegió al continente de la acción del mar, sin embargo, las corrientes fluyeron alrededor de las crestas inundando la terraza. Las islas de Contoy, Mujeres y Cancún son en

¹ Formación caliza producida por la acción erosiva o disolvente del agua.

² Estadios glaciales.

³ Crecimiento por adición de materia.

gran medida, remanentes de estas crestas de dunas constituidas por arenas calcáreas de grano muy fino generadas por la acción eólica.

Posteriormente durante la trasgresión del holoceno, entre los 1000 a 1500 años A.C., cuando el nivel del mar se ubicaba de 1.0 a 1.5 m bajo el nivel actual se formaron los espolones o tómbolos en ambos extremos de la isla, acumulándose además dunas en el extremo oriental del cinturón eolianítico del pleistoceno, dando así lugar a los tres cuerpos lagunares que conforman el sistema Nichupté, (*las lagunas Bojorquez, el Inglés y Nichupté*)

La plataforma continental se estrechó al sur de la isla y está controlada por una serie de bloques fallados normalmente y orientación 22.5°N que han provocado la existencia de *horst*⁴ y *grabens*⁵, los cuales afloran en ciertos lugares a la superficie y en diferentes dimensiones.; los sedimentos se depositan actualmente en un ambiente lagunar protegido por una barrera artificial.

Al norte los sedimentos se acumulan en dunas y bermas en la zona litorales a lo largo del estrecho, (*Ward y Wilson 1974*). Se observan en la isla Cancún tres tipos de ambientes de depósito: ambiente de playa, ambiente de laguna abierta o estrecho, ambiente de laguna restringida o protegida.

En la zona costera las fracturas han ocasionado canales de flujo principalmente de agua subterránea, a lo largo de los cuales existe una fuerte erosión química que da origen a la formación de caletas y lagunas costeras, (*Back 1979*).

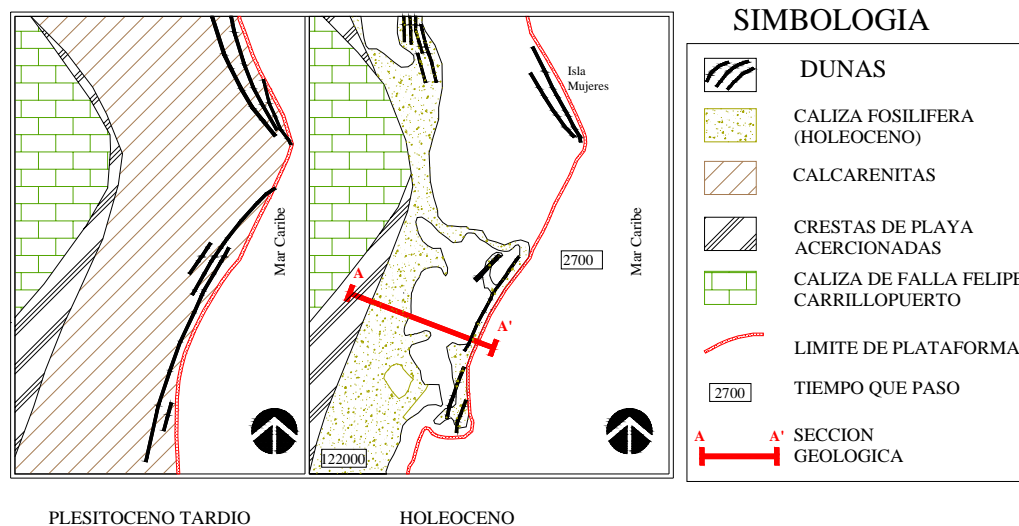


Figura 1-6 Evolución geológica de la zona en estudio

⁴ Pilar tectónico-bloque elevado delimitado por fallas de orientación aproximadamente paralela.

⁵ Fosa tectónica-zona de hundimiento tectónico delimitado por fallas paralelas.

2 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA EN PLANTA.

La geomorfología es la disciplina encargada del estudio y análisis de las formas de la superficie de la tierra y es de donde se desprende la geomorfología costera. Esta disciplina se centra en explicar los diferentes tipos de formas presentes en la costa, entendiendo los factores y mecanismos que las han conformado y las modifican, para tratar de determinar los posibles estados de equilibrio (*Woodroffe 2002*).

Los mecanismos que provocan los cambios morfológicos dentro de un sistema costero se manifiestan en distintas escalas espaciales y temporales, que consideran desde la estructura geológica, características tectónicas, tipo y disponibilidad del material sedimentario, posición y nivel del mar, la influencia del medio ambiente adyacente, así como las fuerzas dinámicas actuantes sobre el sistema como el oleaje, corrientes, mareas y viento.

2.1. Zona Costera.

Es la zona que corresponde el área de la plataforma continental y de la costa en la que los procesos morfodinámicos vienen determinados por la dinámica marina. Su desarrollo hacia tierra y hacia el mar depende, por lo tanto, de la tipología de la costa, de la plataforma continental y del clima marítimo de la zona

Distintos autores han definido la zona costera de diferentes maneras:

- Como la zona o región costera que abarca el área de transición donde el ambiente marino afecta al ambiente terrestre o viceversa, el ancho de dicha zona es relativa pues puede diferir de una a otra región (*Carter 1988*).
- Como la franja de 200m que se extiende por debajo y por arriba del nivel medio del mar (*Lindenboom 2002*).

Se reconoce a la línea de costa como una frontera actual que existe entre la tierra y el mar, esta frontera es parte de la interfase mar tierra así como las dunas, bajos o acantilados adyacentes a ésta.

Desde el punto de vista político y con fines de regulación y ordenamiento territorial en nuestro país, se enmarca que la zona federal marítimo terrestre cuando se presentan playas estará constituida por la faja de 20 metros de ancho de tierra firme, transitable y contigua a dichas playas, y se define como playa a aquella extensión acotada en sus límites por los ascensos máximos y descensos mínimos de bajamar y pleamar.

Es evidente que esta regulación de la zona federal marítimo terrestre no abarca la extensión territorial necesaria para la correcta y natural evolución de la zona costera acarreando serios problemas para dicha zona.

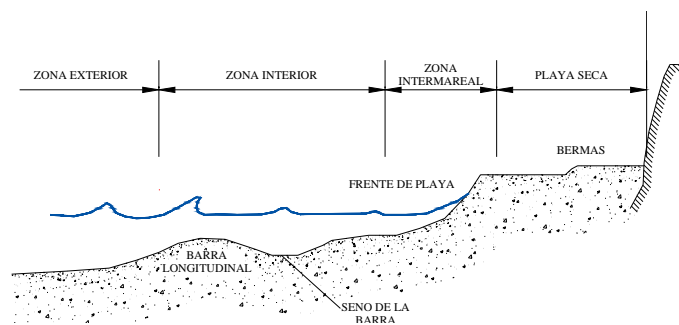


Figura 2-1 Límites de una zona costera en playa.

2.2. Tipos de zonas costeras.

Las costas presentan formas muy variadas cuyos rasgos dependen de las particularidades de la erosión marina, las características litológicas y las influencias bio climáticas. Se pueden distinguir entre las formas de erosión y las formas de acumulación, que provocan diferentes tipos de costa.

Las formas de erosión son producto de la acción destructora del mar sobre las rocas en la costa. Distinguiéndose tres tipos fundamentales, los acantilados, las plataformas costeras y las costas rocosas íntimamente ligadas. Ellas forman las costas de erosión.

Las formas de acumulación litoral son el resultado de la sedimentación marina y de la actividad de los seres vivos. Se localizan delante de las costas bajas y presentan gran cantidad de tipos, dependiendo de las modalidades de desarrollo y las condiciones del medio que las acogen. Los tipos principales son: las playas, en sus diferentes configuraciones, las dunas litorales, las áreas pantanosas marítimas y las marismas, las desembocaduras fluviales. Cada una forma un tipo particular de costa.

Los principales ambientes que se presentan en la zona costera son:

- Acantilados, plataformas costeras y costas rocosas.

Su morfología de estas formas puede ser estudiada a partir del análisis en planta o en perfil de las mismas, considerando que sus características y los procesos que operan sobre ellas (*litología y estructura, energía del oleaje, procesos subaéreos, etc.*) producen modificaciones lentas y difíciles de medir en periodos cortos de tiempo. Algunos rasgos erosivos sobresalientes de este tipo de estructuras son los arcos y las cuevas. De acuerdo con Sunamura, (1983, 1992) la tasa de erosión de los acantilados y plataformas costeras puede variar de acuerdo con la resistencia del material del cual estén compuestos entre 10^{-4} a 10^1 m/año.

- Formas intermareales, humedales y selvas de mangle.

Las zonas intermareales en costas que reciben una energía de oleaje moderada y que están rodeadas de vegetación como los humedales, marismas y selvas de mangle presentan por lo regular rasgos de depósito asociados al movimiento de partículas sedimentarias finas, (*lodos*). Usualmente las planicies intermareales arenosas o lodosas presentan superficies onduladas con barras y valles y canales maréales y es común la

presencia de rizaduras, (*ripples*) en el área del fondo que queda expuesta o cubierta por la acción de la marea.

Los humedales y selvas de mangle están compuestos por una alta densidad de plantas resistentes a salinidades, elevadas y presentan una gran importancia ecológica debido a su función como exportadores de nutrientes hacia aguas profundas, como zonas de anidación e incubación de especies y como elementos de protección de la costa ante eventos de alta energía.

- Estuarios y lagunas costeras.

Los estuarios pueden ser definidos como la parte marina de un sistema de drenaje continental en el cual se mezcla el agua dulce con la salada, recibe aportes sedimentarios tanto de tierra como de mar y sufre la acción de las mareas y de las olas (*Bird 2000*), en función de la importancia relativa de cada una de ellas es posible clasificarlas como dominados por el oleaje o por la marea (*Wodrooffe 2002*).

Las lagunas costeras son zonas con aguas interiores relativamente someras, separadas del mar por medio de barras arenosas o flechas las cuales se forman por arriba del nivel mareal gracias al transporte de sedimentos de origen marino y usualmente presentan una orientación paralela a la línea de costa.

Las bocas de las lagunas costeras pueden permanecer abiertas de manera permanente o bien intermitentes, debido a los aportes pluviales, (*tierra-mar*) o bien por el incremento de la energía del oleaje, (*mar-tierra*). Los estuarios y lagunas costeras son muy sensibles a las modificaciones climáticas y antropogénicas lejanas, (*construcción de diques y represas en ríos, deforestación, etc.*) y a las obras locales, (*construcción de obras de protección o abrigo para la navegación, dragados, etc.*).

- Deltas.

Los deltas se forman en la zona costera por el escurrimiento y acumulación de sedimentos aportados por ríos. Las características morfológicas de estas formas están fuertemente determinadas por la geología y topografía regional y son modeladas por procesos hidrodinámicos.

De acuerdo a la importancia relativa de los agentes de forzamiento los deltas pueden estar predominantemente regidos por el efecto de los ríos, de la marea o del oleaje. (*Wright 1985*).

- Arrecifes coralinos y algales.

Son sistemas geomorfológicos dinámicos los cuales representan las mayores construcciones biológicas sobre la tierra y presentan una importante complejidad geológica y diversidad ecológica.

Desde un enfoque geológico los arrecifes son estructuras masivas con un alto potencial de preservación, sin embargo desde una perspectiva de pequeña escala los individuos que conforman los arrecifes coralinos son muy frágiles y delicados.

Los arrecifes coralinos brindan una importante protección a las áreas costeras adyacentes debido a su potencial como elemento reflector y difractor de la energía del oleaje, sobre todo cuando ésta es elevada.

- Playas.

Son el rasgo geomorfológico costero más conocido, explotado y utilizado por el hombre y está presente aproximadamente en el 40% de las costas mundiales (*Bird 2000*).

Se entiende como playa a la acumulación de sedimento no consolidado, (*arena, grava o canto rodado*) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de presentarse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje.

Las playas tienden a establecer patrones de equilibrio con las condiciones ambientales dominantes tanto en perfil como en planta. Desde el punto de vista morfodinámico, diferentes estudios, (*Wright, 1979, Wright y Short, 1984*) han definido tres tipos básicos de playa el disipativo, intermedio y reflejante. Otros autores como Galván (*1968*), Guza e Inman (*1975*), Battjes (*1974*) y Dean (*1973*), han generado distintos criterios basados en variables que pueden ser medidas de oleaje, sedimentos y la forma de la playa, para establecer en un momento determinado el tipo de playa existente.

La descripción de la forma en planta de las playas, puede realizarse en función de las escalas de las mismas.

2.3. Escalas y formas morfológicas en planta.

Los vientos, las olas, mareas y corrientes son los principales fenómenos físicos que producen la energía que modifica las costas erosionando, transportando y depositando el sedimento. Estos agentes de forzamiento pueden actuar en un amplio rango de combinaciones desde una forma puramente individual o a través de interacciones y patrones complejos, la mayoría de las veces no lineales.

La energía de estos fenómenos presenta una alta variabilidad, la cual se puede manifestar de manera periódica, (*marea*), episódica, (*huracanes*) o en diferentes escalas espacio temporales.

Para un tipo de costa en particular o algún rasgo específico de la morfología costera, las escalas de variabilidad de las principales fuerzas actuantes determinarán los cambios característicos que ocurren en ellas.

Las fuerzas físicas que actúan sobre las costas y las características físicas de las mismas como su composición mineralógica y sedimentaria, orientación nivel de protección natural, pendiente, presencia de estructuras de protección, determinan la extensión, rapidez, magnitud y el tipo de cambios que se pueden experimentar.

- Formas de pequeña escala.

Estas formas se producen escalas de tiempo del orden de segundos o minutos y escalas de espacio en el orden de decímetros a metros, y reciben el nombre genérico de formas

de lecho. Estas formas de lecho son las rizaduras, producidas por el movimiento oscilatorio o las corrientes con escala de longitud de decímetros y de tiempo de segundos y las dunas y antidunas con escalas del metro y minuto.

- Formas de mediana escala.

Son aquellas que tienen una longitud característica del orden de la decena o centena de metro y un tiempo de evolución que oscilan entre horas a un año.

Las formas en planta de mediana escala son las que aparecen en los estados de playa intermedios entre el disipativo y el reflejante. Estas formas en planta son el resultado de la interacción de la hidrodinámica y el sedimento a mediana escala y no se deben de confundir con formas a gran escala en planta de las playas.

Entre las formas en planta de mediana escala se pueden nombrar las cúspides de playa o beach cups, mega cúspides o mega cups y barra rítmica, barras transversales y canales de retorno.

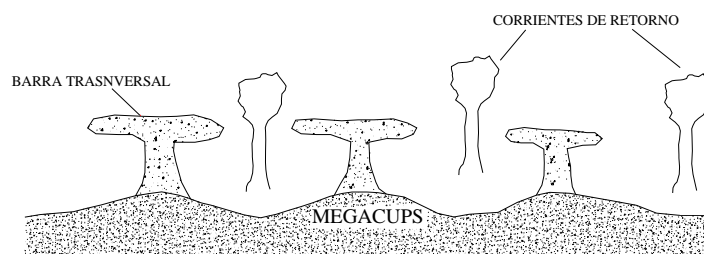


Figura 2-2 Representación de algunas formas de mediana escala.

- Formas de gran escala.

Son formas en planta con escala del orden de centenares de metros a kilómetros y a escalas de tiempo de variación del orden de estaciones, años, son el resultado de la interacción del oleaje con las condiciones de contorno, como pueden ser la batimetría el abrigo provocado por los bajos o arrecifes, cabos canales de marea, obras artificiales, etc. Las formas mas características en esta escala son los deltas, tómbolos, hemitómbolos, puntales, isla barrera, etc.

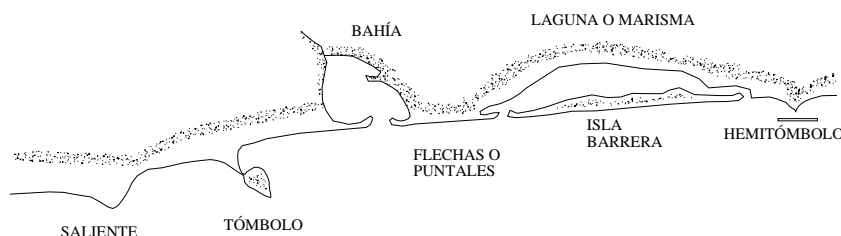


Figura 2-3 Representación de algunas formas de gran escala.

Las formas morfológicas más importantes son:

Barras crecientes, (*crescentic bars*): Barra claramente asimétrica, con el talud del lado de tierra con mayor pendiente que el lado de mar, lo cual indica un desplazamiento de la

barra hacia tierra, estas barras suelen estar cortadas longitudinalmente por canales de retorno, es una forma de mediana escala.

Canales de retorno, (*Rip channels*): Es una zona de mayor profundidad y que corta transversalmente las barras longitudinales y crecientes. Pueden estar expuestos en bajamar y están asociados a la hidrodinámica de las corrientes en la zona de rompientes, es una forma de mediana escala.

Barras transversales, (*Trasverse Bars*): Es una barra que se extiende en dirección aproximadamente perpendicular a la línea de costa, usualmente su lado de tierra queda unido al frente de playa. Entre las barras transversales existen siempre canales de retorno, es una forma de mediana escala.

Saliente de playa, (*Beach Cusps*): Son formas rítmicas de entrantes y salientes que se forman en el frente de playa, con longitud de onda del orden de decenas de metros, es una forma de mediana escala.

Mega saliente, (*Megacusps*): Se reconocen por ser formas rítmicas de entrantes y salientes que se forman en el frente de playa, están asociadas a secuencias longitudinales rítmicas de barras crecientes o transversales. Los entrantes en el frente de playa suelen estar enfrentados con los canales de retorno, mientras que los salientes coinciden con la zona de avance hacia tierra de la barra. Su longitud de onda es de cientos de metros y suelen ser formas de mediana escala.

Ondulitas, (*Ripples*): Formas rítmicas del lecho de las playas, de dimensiones horizontales de decímetros son formas de pequeña escala.

Dunas y antidunas: Son ambientes depositacionales que se forman por el transporte y acumulación de material sedimentario en la parte posterior de la playa generadas por el efecto de los procesos eólicos aunque en ocasiones aparecen en la zona de rompientes de las playas.

El tamaño, forma, evolución y persistencia de las dunas costeras se ve influenciado por una gran variedad de procesos físicos y biológicos, (*crecimiento de vegetación costera*). Existen diferentes tipos de dunas en las que sobresalen las dunas paralelas, las dunas parabólicas y las dunas transgresivas.

Las dunas presentan una importante movilidad, se han registrado en dunas de 10 a 20 m de alto avances del orden de 1 a 10 m/año (*Bird 2000*).

Tómbolo: Saliente de arena producido por la presencia de una isla, arrecife emergido natural o estructura artificial, debido al cambio de la dinámica del oleaje provocado por la estructura. En el tómbolo, el saliente de arena se une a la estructura formando un espigón natural de arena entre la costa y la isla o estructura, es una forma de gran escala.



Figura 2-4 Tómbolo localizado en Ixtapa Zihuatanejo. Guerrero, México.

Saliente o hemitómbolo: Saliente de arena con el mismo origen del tómbolo o debido al encuentro de dos corrientes costeras opuestas. En el caso de estar producido por una estructura, el saliente no alcanza la misma, es una forma de gran escala.

Cordón litoral, puntal o flecha: Es un cordón arenoso paralelo a la dirección general de la línea de costa, producido por los cambios de dirección de la línea de costa, en zonas con importante transporte longitudinal de sedimentos.

En determinadas costas con plataforma somera, los cordones litorales pueden surgir por transporte transversal del sedimento. Cuando el cordón tiende a cerrar una bahía en zonas maréales o con aportación fluvial importante, el cordón alcanza un equilibrio con el prisma de marea o con el caudal fluvial. En zonas sin marea o con poca aportación fluvial el cordón puede llegar a cerrarse casi por completo, dejando en la zona de tierra una laguna dulce denominada albufera.

Isla barrera: Si un cordón litoral queda separado por dos salidas al mar de la marisma interior, se denomina isla barrera.

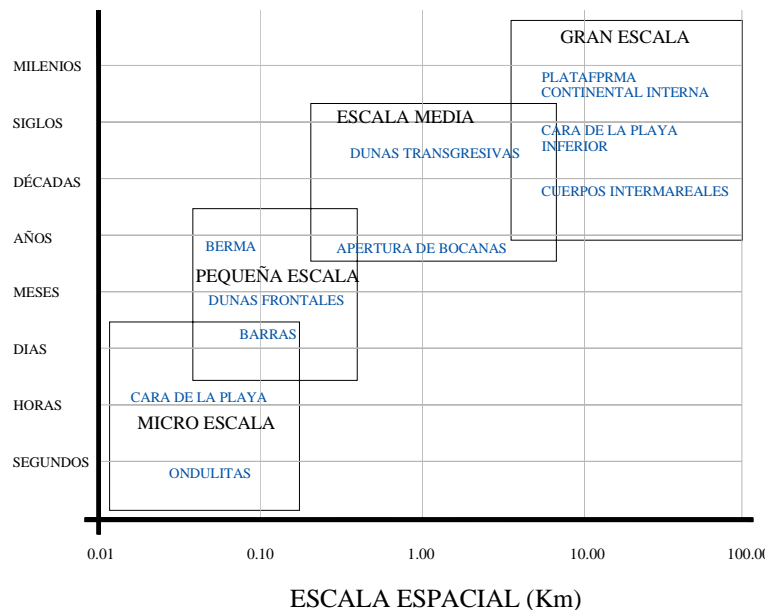


Figura 2-5 Caracterización temporal y espacial del cambio en la morfología (Adaptada de Cowell y Tom, 1994).

2.4. Sistemas costeros.

El estudio de la costa como un sistema proporciona un marco de trabajo en el cual se analizan las diferentes interacciones de las variables actuantes en la geomorfología costera, se observa a la costa como un sistema con entradas y salidas de energía o energía y materia.

Los sistemas costeros se encuentran en cualquier momento en un determinado estado, dicho estado puede ser definido o medido por la acción de diferentes variables.

Las formas finales de los distintos elementos con los que se compone la zona costera pueden ser definidos mediante la descripción de una serie de variables, tales como; características del oleaje, corrientes y mareas, así como la forma en planta, atributos finales y parámetros de las estructuras que se encuentran dentro del sistema.

Los factores externos al sistema pueden ser estudiados como variables independientes, estos comprenden las condiciones límites y los factores de forzamiento, cuando se presenta alguna alteración en estas variables pueden provocar cambios dentro del sistema.

Las variables internas del sistema son altamente dependientes de las variables externas, ya que algún cambio en estas provocará cambios significativos en las variables internas.

Pueden ocurrir ciertos cambios en las variables dependientes que provocan cambios intrínsecos dentro del sistema sin que se vean afectadas las fronteras del mismo. El reconocimiento de estos cambios morfodinámicos internos es importante ya que estos pueden ser causa de otros factores externos al sistema como la actividad humana.

- Interacciones entre sistemas.

Un sistema puede estar compuesto de varios subsistemas, en estudios muy detallados es necesario comprender las relaciones entre todas las variables, por mas complejas que estas sean, pero un alto nivel de generalización es suficiente para integrar las relaciones a gran escala.

La descripción de un sistema se puede hacer mediante un diagrama de flujo del conjunto de procesos-respuestas del sistema y su escala espacial de estudio puede variar de acuerdo a los límites con los que se han definido los subsistemas.

Para distinguir los procesos y reacciones que ocurren dentro de los subsistemas, estos se pueden detallar de acuerdo a un determinado nivel de refinamiento: La aproximación de caja negra: se utiliza cuando no se han identificado, los componentes del subsistema (*solo se identifican las relaciones entre las entradas y salidas*), en cambio cuando ya se han identificado todos los componentes de un subsistema con las correspondientes trayectorias de materia, energía y los puntos de acumulación, se llama la aproximación de la caja blanca un nivel intermedio entre estos dos es decir donde se han identificado los subsistemas y las relaciones entre flujos internos de energía y materia recibe el nombre de aproximación de la caja gris.

La fiabilidad de estas correlaciones está estrechamente ligada con la escala temporal, pues un nivel de entendimiento semejante a una caja gris, donde se puede describir el flujo general de los sedimentos en una determinada zona costera, puede ser suficiente para poder describir la evolución estratigráfica de dicha costa a una escala geológica.

Los estudios que se preocupan de describir de manera muy detallada las variables involucradas en los procesos de los subsistemas por más complejas que estas sean (*aproximación de la caja blanca*) reciben el nombre de estudios reduccionistas.

Por otra parte los estudios que se concentran en describir el sistema como un todo (*aproximación de la caja negra*), convencidos que la descripción del todo es mejor que la descripción de cada una de sus parte reciben el nombre de holísticos.

2.5. Divisiones y celdas litorales en la zona costera.

Una discretización de la línea de costa suele ocurrir, cuando existen grandes obstáculos que afectan el transporte longitudinal del sedimento, estos obstáculos pueden ser algunas salientes entre las cuales se genera una playa encerrada. Dado que la mayoría de las playas encerradas son playas que presentan obstáculos en sus extremos, se reconocen con el nombre de playas en bolsillo (*pocket beaches*), en las cuales el volumen de sedimentos permanece constante, es decir presentan un sistema de celdas cerrado (*Davies 1974*).

En estas abrigadas playas, el oleaje que llega a la costa generalmente es refractado, lo que provoca que en las pequeñas playas que se ubican dentro de este abrigo no reporten un transporte longitudinal de sedimentos, a esto se le conoce como *Swash aligned*, (*Davies 1980*). Para que este tipo de playas puedan extenderse, requerirán de un suministro extra de sedimentos.

Se les conoce como playas alineadas hacia la deriva (*drift aligned beach*) a aquellas que se encuentren adyacentes a algún río que pueda ser capaz de suministrar con nuevo sedimento a la playa. El oleaje debe de tener la energía suficiente para mover el sedimento, porque si el sedimento es transportado desde la costa el oleaje pudiese incidir hacia ésta con un ángulo oblicuo

Se conoce como playa semi-cerrada, (*embayed beach*) a aquella en la cual existe en su contorno una punta ubicada deriva arriba, el oleaje refractado crea una zona de sombra y una extensa zona rectilínea deriva abajo.

El concepto de las celdas litorales es similar al de los compartimentos. Las celdas son la parte de la costa en donde el sedimento es puesto en circulación, a pesar de que las celdas y los compartimentos son utilizados para representar las mismas cosas, se diferencian en que el uso de los compartimentos es mas apropiado en zonas costeras en las cuales existen numerosas puntas intermitentes con la playa en donde el transporte longitudinal de sedimentos se ve interrumpido, en cambio las celdas frecuentemente son de dimensiones menores. Las celdas de corrientes también pueden actuar como celdas de transporte de sedimentos.

Las celdas son dinámicas y no son cerradas, aunque puede haber algunas reservas de sedimentos dentro de ellas. Las fronteras entre las celdas pueden estar marcadas por

algún rasgo morfológico como por ejemplo las salientes, puntas e incluso las bocas de los ríos, los cuales tienden a alimentar con sedimento a las costas.

Algunos rasgos topográficos así como salientes y cañones representan a los llamados límites compuestos de los compartimientos, los límites abiertos de las celdas, se presentan cuando ciertas divergencias pueden cambiar su ubicación debido a patrones en la refracción del oleaje, los límites de las celdas incluso pueden migrar cuando estos están relacionados con las celdas de corriente o bocas de río, las cuales pueden cambiar a lo largo de las distintas escalas de tiempo.

El concepto de balance sedimentario generalmente es utilizado cuando se refiere al manejo de las celdas o compartimientos costeros (Komar 1996), lo cual es un cómputo de fuentes y sumideros dentro del sistema playero. Las fuentes de sedimento generalmente provienen de bocas de ríos, de acantilados, fuera de la costa, o de celdas adyacentes desde donde se desplazan a lo largo de la costa, otras formas de abastecimiento se generan en el lugar a través de la degradación de organismos calcáreos, como las conchas o como resultado de la erosión y transporte de material desde las dunas.

Las salidas de sedimento se consideran como pérdidas, las cuales pueden ocurrir cuando se presenta cierta migración del material hacia las dunas, pérdidas hacia costa fuera y la migración hacia celdas adyacentes. Si la velocidad de suministro de sedimentos de las fuentes y las pérdidas de material por los sumideros se conoce, se puede determinar el balance sedimentario de la celda.

Además las actividades humanas cerca o en la zona costera afectan de manera significativa el balance de sedimentos, prácticas como el represamiento de ríos y el dragado de arena afectan de manera negativa, sin embargo una realimentación artificial en la playa se considera una alteración positiva.

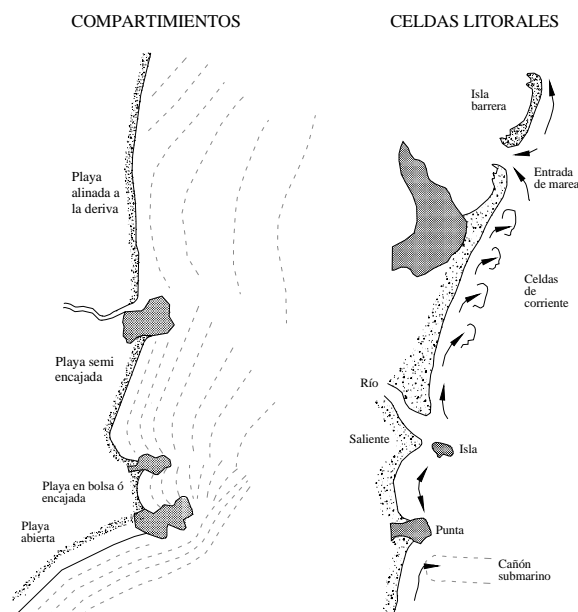


Figura 2-6 Compartimientos y celdas litorales a lo largo de la costa.
(adaptada de Woodroffe 2000).

2.6. Erosión Costera.

Este es un fenómeno natural que se origina por la interacción de los procesos climáticos meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios con la morfología costera y con la batimetría del fondo en la zona cercana a la costa, produciendo un retroceso en la línea de costa. En la Tabla 2-1 se muestran algunos de los factores naturales que pueden modificar la línea de costa.

La erosión costera se convierte en un problema cuando este retroceso de la línea de costa pone en riesgo la funcionalidad de la misma, como pueden ser el cambio en el entorno ecológico, su inhabilitación para fines recreativos y de esparcimiento o cuando se transforma en un desastre al impactar la infraestructura costera causando pérdidas económicas o peor aún humanas.

FACTORES	Efectos en la costa			Escala temporal de actuación							
	Erosión	Nada	Acum..	S.	Hrs.	Días.	Meses	Años	Déc.	Sig.	Mil.
Aporte sedimentario	X		X						0	0	0
Aumento del nivel del mar	X									0	0
Variabilidad del nivel del mar	X		X				0	0			
Mareas meteorológicas	X				0	0					
Oleaje de alta energía	X				0	0	0				
Oleaje de periodos cortos	X				0	0	0				
Olas de pendiente pequeña			X		0	0	0				
Corrientes a lo largo de la costa	X	X	X		0	0	0	0	0	0	0
Corrientes de retorno	X				0	0					
Flujos de retorno	X				0	0					
Presencia de bocas y bocanas	X							0	0	0	
Inundaciones	X		X		0	0					
Efectos eólicos	X				0	0	0	0	0	0	
Subsidencia costera	X								0		
Compactación costera	X		X		0						

Tabla 2-1 Factores que pueden modificar la línea de costa. (adaptado de The Heinz Center, 2000).

2.7. Geomorfología de la zona en estudio.

2.7.1 Fotografías aéreas.

Mediante el uso de imágenes aéreas tomadas desde aviones o satélites se ha podido analizar el impacto de las acciones dinámicas como el oleaje y el viento, para determinar distintos rasgos morfológicos, ubicar las zonas de erosión o acreción, y visualizar las formas en planta de corta, mediana y gran escala.

Esto se logra mediante la obtención de medidas reales a partir de las fotografías, con las cuales se han armado diferentes mosaicos correspondientes a: 1970, diciembre de 1985, noviembre de 1990, junio de 1999, y octubre de 2005. Con el apoyo de los mosaicos fotográficos se ha caracterizado la zona de playa de la isla Cancún, identificándola dentro de un compartimiento litoral delimitado por las puntas Cancún y Nizuc, Este

compartimiento se ha dividido en celdas litorales cada una delimitada por algún rasgo morfológico o estructura artificial sobresaliente que puede diferir entre los mosaicos, para cada celda litoral se ha hecho una descripción de las formas de mediana y gran escala, se ha medido el ancho de playa y su longitud y también se ha cuantificado el tipo de edificaciones adyacentes.

Todo esto se ha realizado con el objeto de identificar las zonas que han presentado problemas de erosión y determinar las posibles causas, y pronosticar futuros cambios en la morfología de la zona. la descripción de las celdas se pueden consultar en el **Anexo 1**

2.72 Mosaico Cancún antes de 1985.

Se contó con una imagen digital de un mosaico fotográfico en escala 1:1000 correspondiente a la etapa de inicio de urbanización del desarrollo turístico de Cancún. En dicha imagen no se observa la fecha de realización del vuelo, pero de acuerdo con el tipo de obras que se observan seguramente fue tomada entre los años 1969 a 1971.

Para las condiciones prevalecientes en aquella época, se delimitó una celda litoral que está constituida por una playa arenosa y semirrecta. En esta imagen se observa claramente a Cancún como una isla barrera, cerca de punta Cancún se aprecian los terraplenes que se realizaron en la construcción del bulevar Kukulklan y los rellenos hechos para ensanchar la isla.

Para su procesamiento, esta imagen fue escalada y orientada, adicionalmente se superpuso el lineamiento urbano actual, esto con el fin de comparar los anchos de playa seca, y se observó un ancho de playa máximo, medio y mínimo de 106.89, 70.95 y 24.80 metros respectivamente.

Cabe mencionar que en este mosaico se observa frente a lo que hoy son conocidos como los condominios Carisa y Savia, el brote de un afloramiento rocoso ubicado a la mitad de la playa, en otro punto se aprecia el relleno de una boca que conectaba la laguna con el mar en la zona que hoy es conocida como playa Chacmol y en particular frente al condominio Maralago, se observa otro relleno en el área donde se encuentra actualmente el hotel Hyatt y el Cancún Resort.

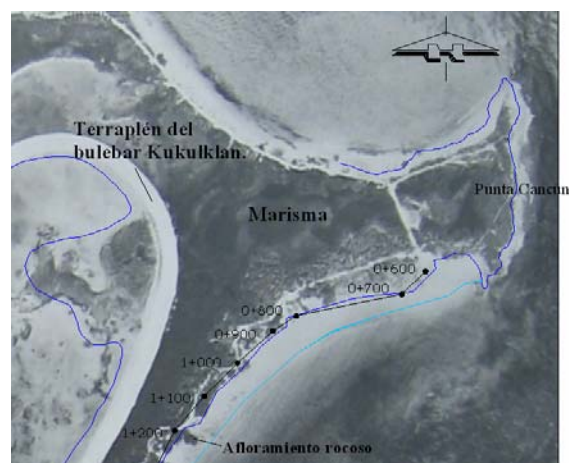


Figura 2-7 Punta Cancún.

Los eventos extraordinarios que incidieron sobre Cancún entre los años 1965 a 1970 y que pudieron haber modificado la morfología de la zona, fueron de magnitudes bajas, esto puede explicar la razón por lo cual los rasgos erosivos que se observan son extremadamente mínimos, dichos eventos fueron: 6 depresiones tropicales, 4 tormentas tropicales, un huracán clase 1, (*Inez en octubre de 1966*), y un huracán clase 2, (*Beulah en septiembre de 1967*).

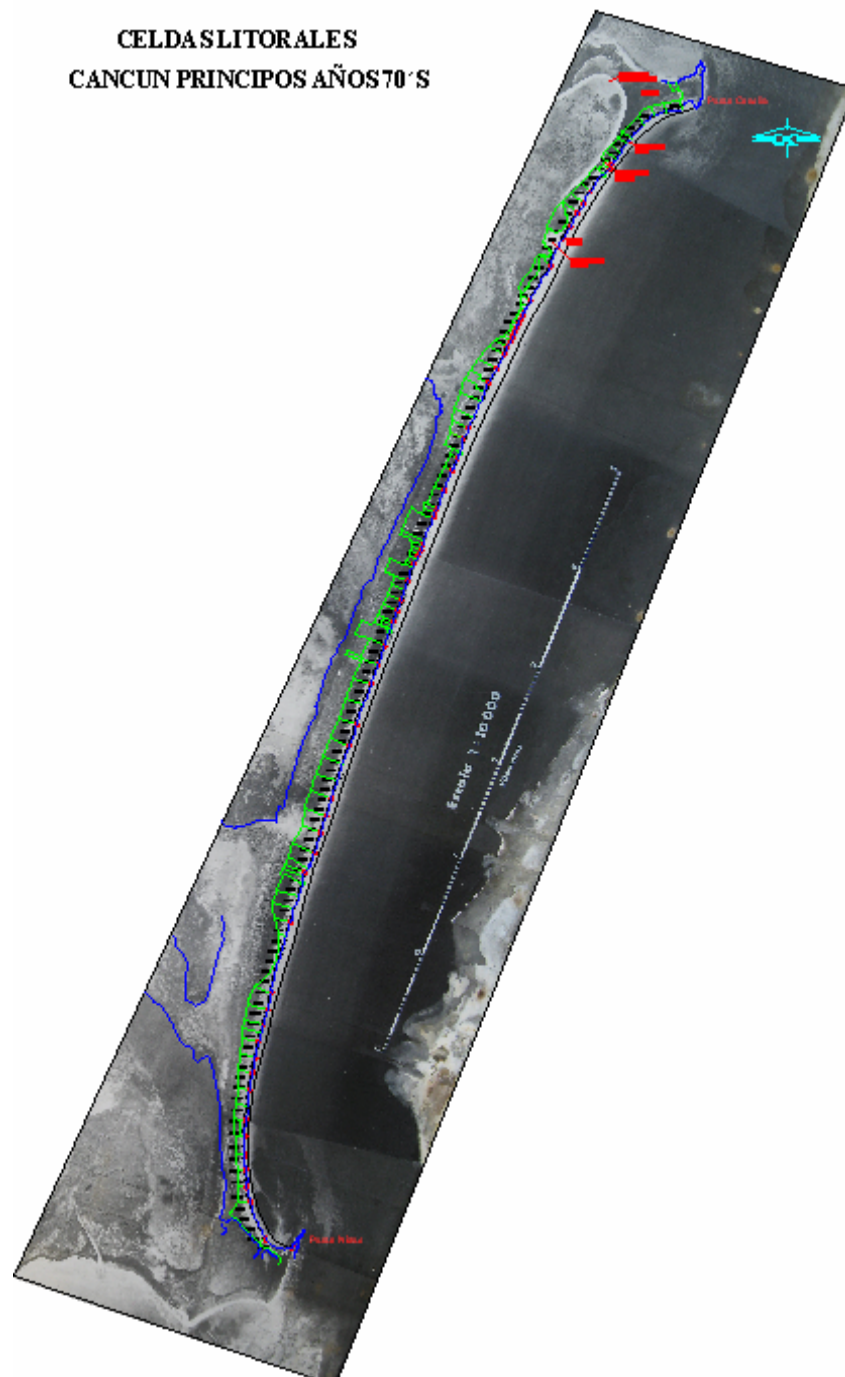


Figura 2-8 Mosaico principio años setentas.

2.7.3 Mosaico Diciembre de 1985.

Este mosaico fue hecho con un conjunto de 15 imágenes escaneadas de fotografías aéreas de escala 1:5000, cada imagen fue cuidadosamente ubicada utilizando puntos de referencia en cada una, una vez hecho el mosaico fue escalado para así tomar medidas

En este mosaico se identificaron cuatro celdas litorales, se midió el ancho máximo, medio y mínimo de playa seca los cuales son: 96.45, 42.69 y 6.06 metros respectivamente. Se identificó el número de edificaciones adyacentes a la playa: 17 hoteles en funcionamiento y 9 en construcción.

En la Figura 2-9, se muestra una parte del mosaico donde se observa la celda litoral No 3, también se presentan las características de dicha celda.

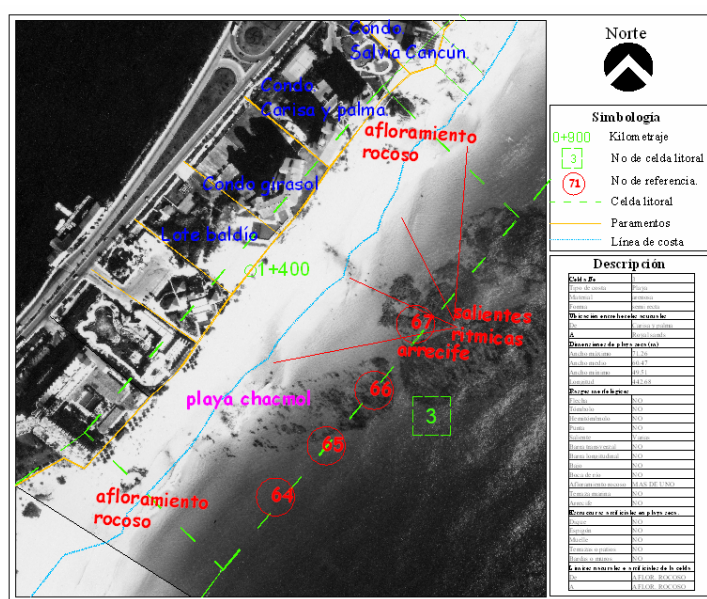


Figura 2-9 Celda litoral en 1985.

En este mosaico se observa que en la parte norte, en lo que se conoce como playa Chacmol, en especial frente a los condominios Salvia Cancún y Carisa y Palma, se observaban algunos rasgos de erosión (*afloramientos rocosos*), pero mas grandes y contrastan con el resto de la playa la cual se mantenía con un buen equilibrio sedimentario. La causa de este desequilibrio pudo haber sido la urbanización de la zona norte, se puede observar mayor número edificaciones en la zona cercana a punta Cancún que prácticamente estaba casi en su totalidad edificada sobre la duna costera, sin embargo en la parte sur las condiciones estaban en un estado casi inalterado.

Otro probable factor que afectó fue una mayor incidencia de eventos extraordinarios. El último evento que azotó Cancún antes de este registro fotográfico fue Kate en noviembre del mismo año, la cual seguramente no ocasionó severos cambios pues ésta solamente llegó a ser una depresión tropical, sin embargo Allen que en octubre de 1980 incidió en Cancún con vientos de categoría 4. A pesar de la incidencia de este huracán se observa que la playa estaba 5 años después en general en buen estado.

**CELDAS LITORALES
CANCUN DICIEMBRE DE 1985**

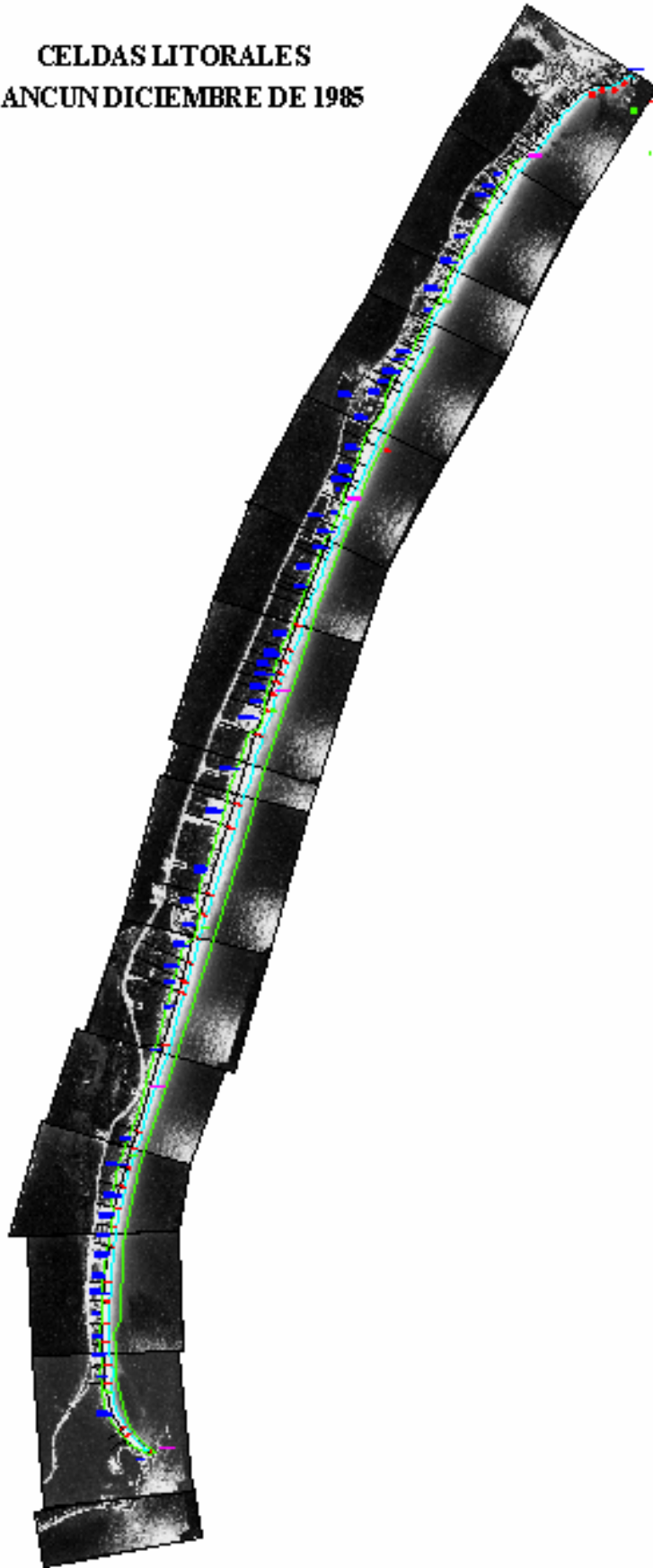


Figura 2-10 Mosaico Cancún 1985.

**CELDAS LITORALES
CANCUN ENERO DE 1990**

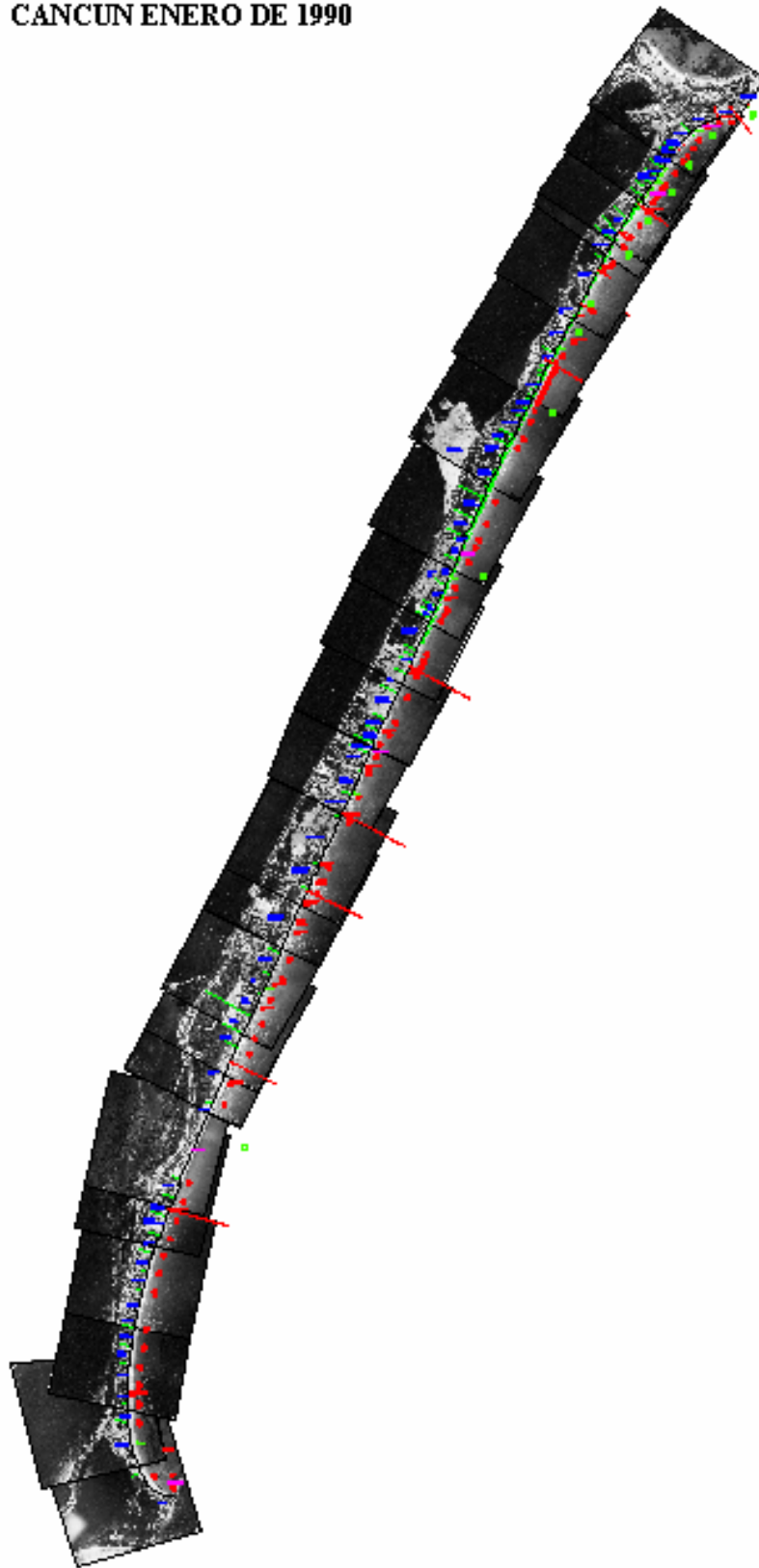


Figura 2-12 Mosaico Cancún 1990.

2.7.5 Mosaico Junio de 1999.

El mosaico correspondiente a este año fue armado a partir de 44 fotografías aéreas con escala 1:5000, se identificaron 12 celdas litorales. El ancho máximo, medio y mínimo de playa seca a lo largo de todo el mosaico es de 37.13, 16.26, y 0 metros respectivamente. A estas fechas en la zona de estudio se contaba con: 63 edificaciones en funcionamiento y 4 más en construcción.

En la Figura 2-13 se muestra la celda litoral No 3, en la cual se presentan las características de dicha celda. Se observa un Cancún casi en su totalidad urbanizado con edificaciones a lo largo de toda la zona costera y con un sistema con rasgos erosivos.

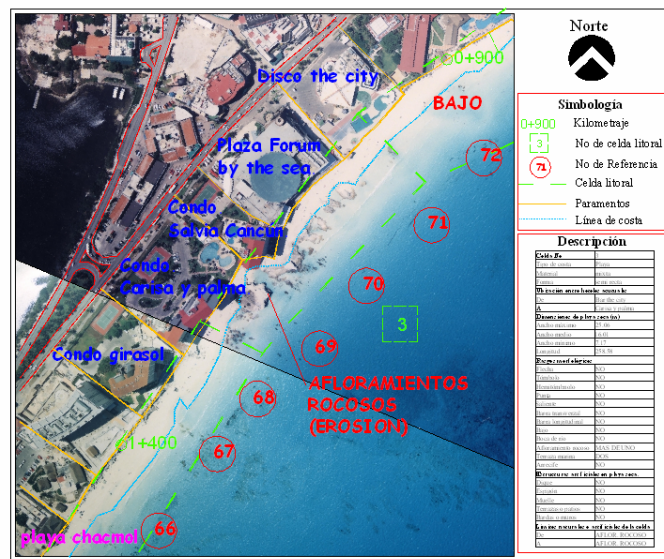


Figura 2-13 Celda litoral en 1999.

Cerca de punta Cancún frente a los hoteles *Salvia* y *Carisa* persisten los afloramientos rocosos y frente a los hoteles Gran Camino Real y Flamingo el ancho de playa es muy reducido. A su vez, se observa que se instalaron diversas estructuras artificiales como diques y espigones en la zona norte, y algunos muros de contención en la zona centro y sur.

El número de eventos extraordinarios que incidieron en Cancún entre Enero de 1990 a junio de 1999 fueron de intensidad baja; 5 depresiones tropicales, 4 tormentas tropicales, y un huracán de categoría 1, (*Roxane* que *incidió* en octubre de 1995).

Esto señala claramente que el sistema costero, aún después de 9 años de la incidencia del huracán Gilberto todavía no llegaba a recuperar el equilibrio sedimentario que tenía antes de dicho huracán, y presentaba condiciones muy vulnerables ante la incidencia de cualquier otro evento extraordinario, el cual ocurrió con Iván en 2004 y Wilma en 2005.

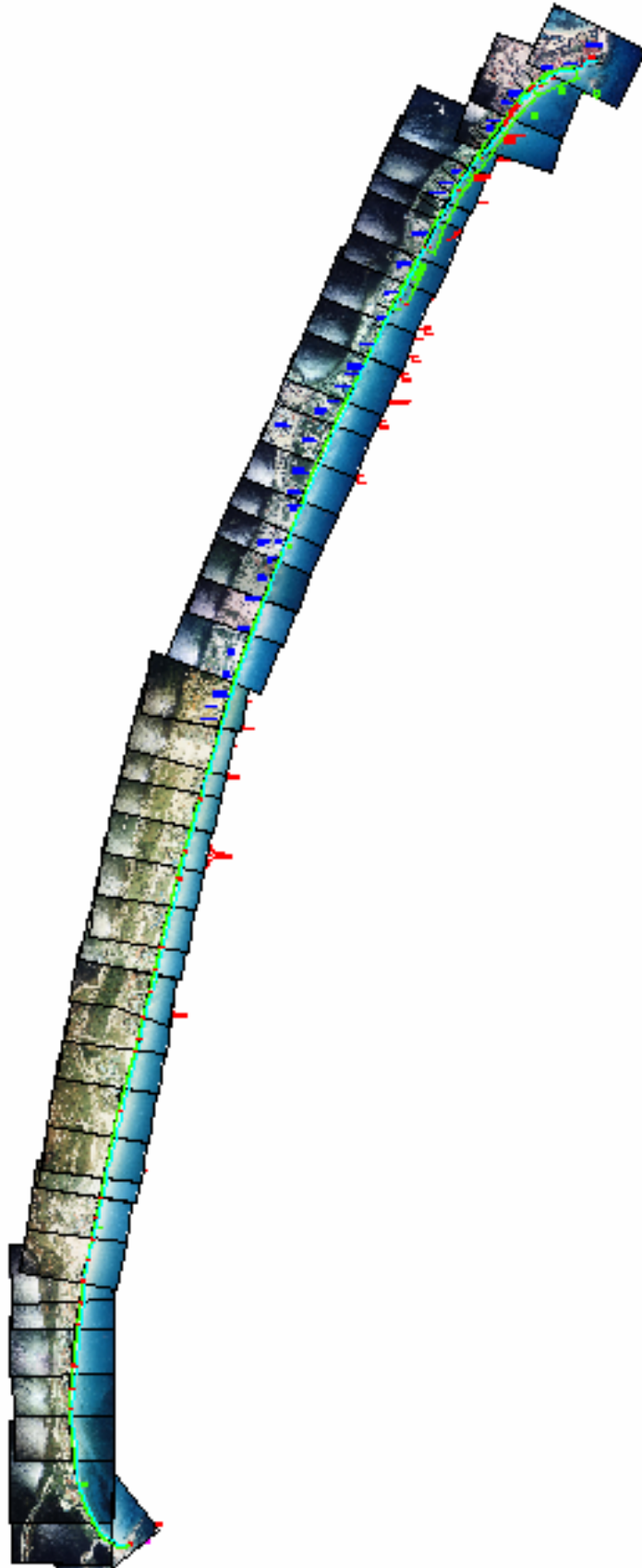


Figura 2-14 Mosaico Cancún 1999.

3. NIVELES DE EROSIÓN.

3.1. Funciones de una playa.

Las playas, como cualquier otro elemento del territorio, cumplen una serie de funciones naturales y son susceptibles de ser utilizadas para un determinado número de usos humanos. Si el grado de cumplimiento de dichas funciones y usos no es el adecuado, de acuerdo con unos determinados criterios de valoración, la playa necesitará ser regenerada. Las funciones de una playa pueden agruparse en 3 categorías:

- Defensa de la costa.

Una de las funciones que de modo natural realizan las playas es la disipación y reflexión de la energía del oleaje que incide sobre ellas. Esta modificación de la energía incidente evita, o reduce, los efectos de la dinámica marina sobre las infraestructuras existentes en el trasdós de la playa.

Para que un perfil de playa pueda defender correctamente la costa debe de contar con un volumen de arena suficiente, tanto en su perfil activo como en el perfil sumergido y en la duna. La disposición de dicho volumen, (*anchura y cota de la berma/duna*) constituye junto con las características del sedimento, (*tamaño medio, permeabilidad*) los parámetros que determinan la capacidad de defensa de la costa de una playa.

- Hábitat de flora y fauna.

Las playas constituyen el hábitat de diversas especies, por tal motivo, varias playas se encuentran protegidas por instituciones estatales y federales, con carácter de reservas de la biosfera o parques nacionales, para así garantizar la preservación del hábitat natural.

En aquellas regeneraciones cuyo objetivo fundamental sea la restauración de un hábitat determinado debe tenerse en cuenta que los factores más relevantes cuando una playa sirve como hábitat de una determinada especie son: diámetro y movilidad del sedimento y duración de la inundación.

- Uso lúdico humano.

Las playas y sus zonas adyacentes son lugar de un gran número de actividades humanas, fundamentalmente de carácter lúdico. Estas actividades pueden agruparse en función del lugar donde se realizan como; acuáticas, terrestres o de interfase.

3.2. Criterios de valoración de una playa.

Son aquellos indicadores que permiten establecer si una playa cumple o no con su función, y los cuales se pueden agrupar en:

- Defensa de la costa.

De acuerdo con los criterios establecidos en la ROM 02-90, para este tipo de función se sostiene que para obras sometidas a la acción de cargas variables, como es el caso del oleaje, el cálculo de la funcionalidad debe realizarse utilizando el valor característico máximo de las cargas, esto es, el valor extremo correspondiente al periodo medio de retorno (T) asociado a una probabilidad de presentación de la carga o riesgo (E) durante la vida útil de la obra (L_f).

La relación entre periodo de retorno, vida útil y riesgo puede ser expresada de acuerdo a la ecuación (4.1).

$$E = 1 - \left(1 - \left(\frac{1}{T}\right)\right)^{L_f} \quad (3.1)$$

- Hábitat de flora y fauna.

No existe criterio de valoración que permita, a priori, estimar el grado de funcionalidad que alcanzará una regeneración realizada para restaurar un determinado hábitat. Por tal motivo las regeneraciones realizadas para este fin se han ejecutado intentando mimetizar las características naturales existentes en la playa en lo que se refiere a la distribución granulométrica de sedimentos y disposición de la regeneración, (*horas de inundación*).

- Uso lúdico humano.

Los diferentes criterios están basados en la utilización de una serie de indicadores, que recogen aspectos muy variados como pueden ser:

Anchura; se considera como estrecha una playa con menos de 25m de ancho, y como amplia una que tenga más de 75m.

Longitud y forma; las playas rectas y largas son más adecuadas para intensidades altas.

Sedimento; las playas de arena fina de color blanco o dorado son las más apreciadas.

Intensidad de uso; se considerará saturada si su superficie útil es menor a 5 m²/persona, uso alto de 7 a 15 m²/persona, y uso bajo mayores a 20 m²/persona.

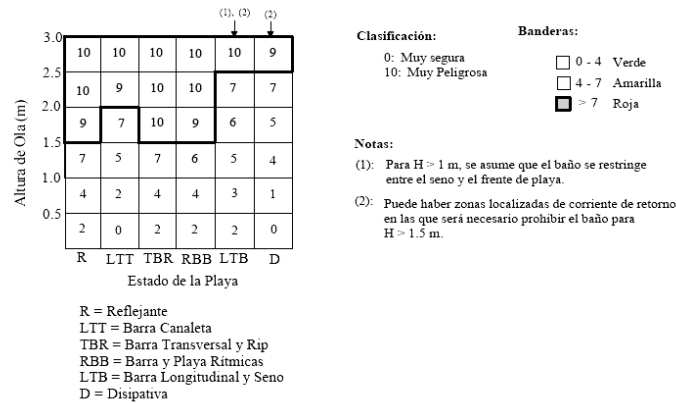


Figura 3-1 Niveles de seguridad de una playa y el tipo de riesgo.

3.3. Formulaciones a largo y mediano plazo del perfil de playa.

3.3.1. Formulaciones a largo plazo.

El objetivo del análisis a largo plazo es determinar cuál será la forma final, (*planta-perfil*) de la playa y la evolución temporal de dicha forma en escala de años, con el propósito de asegurar que la funcionalidad de la playa se mantiene durante la vida útil de la misma.

Para el análisis del perfil y de la planta de una playa hay un modelo basado en la hipótesis de equilibrio que sostiene que si la acción de las dinámicas actuantes se mantiene indefinidamente, la forma de la playa alcanzará una posición final constante, en equilibrio bajo dichas dinámicas. En la práctica no es necesario que la acción se mantenga indefinidamente sino que la respuesta de la forma sea mucho más rápida que la escala de interés.

En el caso de los perfiles se asume que las modificaciones del mismo se producen en escalas de tiempo que pueden ser consideradas como instantáneas en un estudio a largo plazo, lo que implica que el perfil siempre alcanza la posición de equilibrio.

En el caso de la forma en planta, también se puede analizar la forma final de equilibrio, aunque ésta solo tiene sentido en playas encajadas donde no hay una pérdida neta de material. Un análisis a largo plazo de perfil y planta de la playa debe estar acompañado de un estudio relativo a:

a).- Balance sedimentario de la zona de estudio.

Es un cómputo, en términos de macro escala, de los aportes y pérdidas existentes en la zona de estudio, el cual debe establecer las condiciones de contorno de los modelos de evolución, en el caso de playas abiertas, o la constatación de que la playa es encajada sin aportes o pérdidas externas. La realización de un balance sedimentario tiene como primer fin la identificación de los elementos más relevantes, esto es, fuentes, sumideros y tipos de sedimentos y mecanismos de transporte.

b).- Estado morfodinámico modal de la playa.

La evolución real de un tramo costero es un proceso tridimensional en el que interaccionan morfología y dinámica, tanto en perfil como en planta. La simplificación que supone el estudio separado de perfil y planta debe ser siempre revisada por medio de un análisis del estado morfodinámico modal de la playa que aporta información sobre el grado espacial de los procesos, de las formas de playa existentes y de la hidrodinámica asociada.

En el análisis a largo plazo, no es de interés la variabilidad de la morfodinámica de la playa en función de las características de oleaje y marea, sino el estado modal o más frecuente, que será el resultado de las condiciones modales energéticas de oleaje que aborda a la playa. La caracterización del estado modal de la playa se realizará por medio de los parámetros Ω y M' , dados por:

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \quad (3.2)$$

$$M' = \frac{M}{H_b} \quad (3.3)$$

Donde:

Ω = Estado morfodinámico.

H_b = Altura significante en rotura

T = Periodo de pico

W_s = Velocidad de caída del sedimento

M = Rango de marea

3.3.2. Formulaciones a mediano plazo.

Este análisis tiene como objetivo determinar la variabilidad que la playa presenta en su ciclo invierno-verano tanto en lo que se refiere a su planta, perfil y estado morfodinámico. La evaluación de los fenómenos que ocurren en esta escala de tiempos presenta serias dificultades, dado que su escala es demasiado grande para poder utilizar modelos de procesos cortos, (*ola a ola*), y demasiado pequeña para poder asumir que se ha alcanzado un equilibrio en ciertos fenómenos.

Algo frecuente en los perfiles de playa es su variabilidad estacional con erosión en su parte emergida y acumulación de la zona sumergida en invierno y viceversa en verano. Sin embargo, no es posible conocer la respuesta acumulada ante una sucesión de eventos erosión-acumulación, pues no se ha comprobado numéricamente que, partiendo de una misma posición inicial de perfil y ante la misma sucesión de eventos y distinto orden, la respuesta final es diferente.

El problema no puede ser tratado, por tanto, desde un punto de vista determinista y debe analizarse desde una óptica estadística. Actualmente, no existe ninguna formulación que permita estimar la variabilidad invierno - verano de la línea de costa, pero como criterio general puede decirse que:

- Es mayor cuanto mayor sea la variabilidad de los oleajes incidentes
- Es mayor cuanto mayor sea la profundidad de cierre
- Es mayor en estados morfodinámicos intermedios que en estados reflejantes o disipativos.

De este modo una playa en una zona expuesta tiene mayor variabilidad que otra en una zona protegida.

3.3.3. Formulaciones a corto plazo.

Los objetivos del diseño a corto plazo son analizar la respuesta de la playa ante la acción de un evento verificando que se cumplen los requisitos de funcionalidad y aportar información sobre los procesos costeros, como son el sistema de corrientes y transporte potencial, lo cual permitirá entender la morfodinámica de la playa para realizar un diagnóstico de la misma y proponer alternativas de solución.

El estudio de la respuesta del perfil de playa ante un evento de temporal se centra en la determinación de:

Retroceso de la línea de costa y forma final del perfil. Es decir, conocer la respuesta de la forma de un perfil y el retroceso de la línea de costa ante la acción de un temporal, requiere el uso de un modelo de evolución morfológica de perfil. Existen dos tipos diferenciados de modelos de evolución morfológica de perfil:

- Modelos empíricos o cerrados. Estos modelos establecen, antes del evento, el perfil de equilibrio que alcanzará el perfil si la acción dura tiempo suficiente y determinan los cambios del perfil en función del grado de desequilibrio del mismo.
- Modelos de procesos o abiertos. Determinan en cada instante el transporte de sedimentos debido a las condiciones hidrodinámicas y sedimentarias locales dejando que el perfil evolucione libremente. Esta situación requiere la existencia de varios modelos numéricos interconectados, como un módulo hidrodinámico, que calcula el oleaje y las corrientes a lo largo del perfil, un módulo de transporte, que evalúa el transporte por fondo y en suspensión y un módulo morfológico, que actualiza la batimetría en cada paso de tiempo.

Cota de inundación. Es la cota máxima alcanzada por la acción conjunta de la marea astronómica, marea meteorológica y ascenso del oleaje en una playa. Es una variable aleatoria que ha de obtenerse como suma de las variables deterministas y aleatorias anteriormente citadas.

3.4. Perfil de las playas.

Se define como perfil de playa a la variación de la profundidad del agua h , con la distancia a la línea de costa, x , en dirección normal a la misma. Esta definición asume que la batimetría es considerada localmente recta y paralela, por lo que la línea de costa puede ser representada por una curva de nivel cualquiera de la playa. Un perfil de playa esta compuesto por:

Playa seca: Zona del perfil delimitada entre el límite de tierra de la playa y el frente de la misma.

Berma: Zona casi horizontal de la playa formada por la disposición del sedimento debido al oleaje.

Escarpe de la playa: Escalón vertical de la playa seca formado por la erosión de la berma producido por un temporal.

Zona intermareal: Zona de playa comprendida entre la parte exterior de la berma y el límite de descenso del oleaje en bajamar.

Frente de playa: Sección de la playa que queda expuesta a la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje.

Escalón de playa: Zona de mayor pendiente que aparece en ocasiones en el límite inferior del frente de playa, suele contener sedimentos más gruesos que el resto del perfil.

Terraza de bajamar: Parte de la zona intermareal situada en el límite inferior del frente de playa y el límite de descenso del oleaje en bajamar.

Canaleta de bajamar: Depresión en la terraza de bajamar que puede aparecer inmediatamente por debajo del frente de playa.

Barra longitudinal: Acumulación de arena casi paralela a la línea de costa.

Cresta de la barra: Zona de mayor elevación de la barra longitudinal.

Seno de la barra: Depresión en el perfil de playa paralelo a la línea de costa asociado a la barra.

Playa sumergida: Zona de playa comprendida entre el límite de descenso del oleaje en bajamar y el límite exterior del perfil.

3.4.1 Tipos de perfiles.

Los perfiles cambian constantemente como respuesta a las diferencias del transporte transversal de sedimentos que produce la dinámica marina en especial el oleaje, entre los cambios más importantes están los asociados al desplazamiento de las barras, el avance o retroceso de la berma, lo que generan toda una tipología de formas de playa.

Existen dos formas extremas que presentan una geometría en planta aproximadamente bidimensional, es decir, en las que el perfil representa bastante aproximadamente la morfología de la playa y son:

Perfil disipativo: Característico de playas de arena fina y niveles de energía elevados, en general el frente de playa no puede ser distinguido de la terraza de bajamar y la zona intermareal tiene un talud ligeramente cóncavo con pendientes bajas y sin formaciones destacables, no existen bermas que delimiten la zona de playa seca por lo que el perfil cóncavo se inicia prácticamente en el pie de duna. La playa sumergida suele presentar una o varias barras longitudinales con senos y crestas poco marcados.

Perfil reflejante: Se presenta en playas de arenas medias a gruesas, con niveles de energía bajos. En este caso el borde de la berma marca claramente el inicio del frente de playa.

Sobre el frente de playa son frecuentes las salientes de playa, (*beach cusps*) y suele existir un escalón en la parte inferior del frente de playa compuesto de materiales mas gruesos, después del cual la pendiente del perfil baja considerablemente conservando una forma cóncava.

Entre estos dos extremos morfológicos del perfil, se presenta toda un espectro de estados intermedios, que no se pueden definir mediante un sólo perfil, pues son básicamente tridimensionales y la morfología está fuertemente relacionada con los sistemas circulatorios que se establecen en las playas.

Algunas playas muestran una gran variación en su perfil lo cual es una respuesta a condiciones de oleaje fuertemente variables, ya que el nivel medio de energía y los extremos de los temporales son muy superiores en los meses invernales, por lo que después de haber sufrido semejantes acciones estas playas alcanzan una posición de casi-equilibrio que se aproxima bastante a la de las playas reflejantes, y se dice que la playa ha alcanzado su Perfil de Invierno.

En contraste, tras largos períodos de calma, que son mas frecuentes en los meses estivales, la playa recupera un perfil cercano al disipativo, indicándose que la playa ha alcanzado su Perfil de Verano.

Los términos sobre perfil de invierno o perfil de verano son relativos y pueden no corresponder en un momento determinado con la estación del año en la que se encuentra el citado perfil, sino con el aspecto que presenta la playa en un momento determinado.

3.5. Evolución de perfiles de playa en la zona de estudio.

Se presenta un análisis de diferentes perfiles playeros que comprenden la zona de interés, estos perfiles fueron obtenidos a partir de distintos levantamientos topográficos entre los años 1989 a 2006.

3.5.1 Levantamientos realizados.

- Levantamientos Realizados por la empresa Consultoría Técnica S.C.

Esta compañía realizó una serie de levantamientos topográficos en abril de 1989, junio de 1990, diciembre de 1990 y noviembre de 1992.

En los cuales se perfiló a cada 100m entre punta Cancún y punta Nizuc. Estos perfiles fueron levantados a partir de la poligonal de la apoyo hacia el mar hasta una profundidad aproximada de 1.80 m.

Debido a que estos perfiles fueron proporcionados en un catálogo impreso, fue necesario escanearlos y así se obtuvo un conjunto de imágenes que posteriormente fueron digitalizadas. Una vez obtenidos los puntos que conforman cada perfil fue necesario realizar un ajuste de escalas tanto vertical como horizontal para poder sobreponer estos perfiles con los proporcionados de otras fuentes.

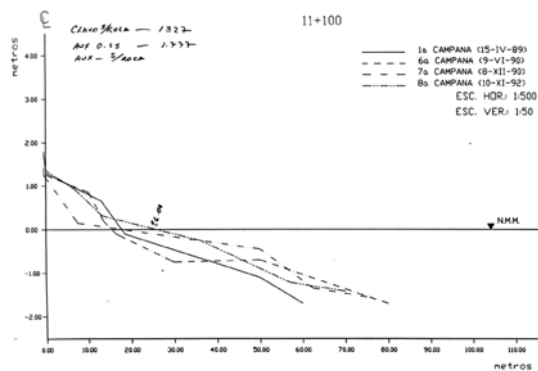


Figura 3-2 Perfil realizados por Consultec SA.

- Levantamientos Realizados por CFE.

A través de la gerencia de ingeniería civil, fueron proporcionados los planos de cuatro levantamientos; dos realizados en febrero y junio del 2000, y dos en febrero y junio del 2006. Estos planos comprenden 117 perfiles de playa con un espaciamento aproximado de 100 m, los perfiles cubren la porción terrestre, desde la poligonal de apoyo hacia el mar hasta una profundidad aproximada de 16 m. Estos planos, fueron proporcionados en formato digital DWG, (*autocad*) y los cuales venían con diferentes escalas horizontales y verticales por lo que se tuvo que transformar las escalas.

- Levantamiento realizado por el Instituto de Ingeniería UNAM.

Este levantamiento fue realizado en abril del 2005, y comprende un total de 56 perfiles con espaciamento aproximado de 200 metros este levantamiento cubre la porción terrestre y la zona de rompientes.

En la Tabla 3-1, se indican las fechas de celebración de las diferentes campañas.

No	Fecha de campaña de medición
1	Campaña celebrada en abril de 1989
2	Campaña celebrada en junio de 1990
3	Campaña celebrada en diciembre de 1990
4	Campaña celebrada en noviembre de 1992
5	Campaña celebrada en febrero de 2000
6	Campaña celebrada en junio de 2000
7	Campaña celebrada en abril de 2005
8	Campaña celebrada en febrero de 2006
9	Campaña celebrada en junio de 2006

Tabla 3-1 Campañas de medición de perfiles.

3.5.2 División del sitio en estudio.

Para un análisis más detallado, se dividió el sitio de estudio en 4 zonas en dirección longitudinal y 3 zonas en dirección transversal. Las zonas longitudinales están acotadas por los kilometrajes expresados en la Tabla 3-2.

ZONA	Límite inf.	Límite sup.
I	0+900	3+500
II	3+500	6+300
III	6+300	9+100
IV	9+100	11+900

Tabla 3-2 Límites longitudinales.

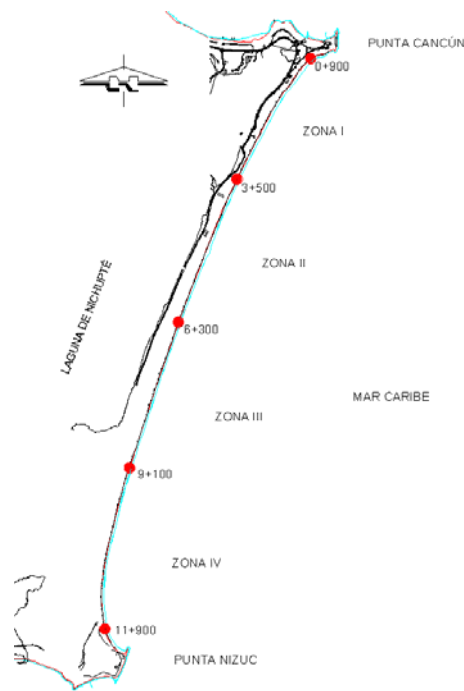


Figura 3-3 Zonas longitudinales.

En la dirección transversal se delimitó de acuerdo a la Figura 3-4, donde el límite C hacia el mar, queda definido como el promedio del ancho medido de la poligonal de apoyo hacia el nivel medio del mar para cada una de las zonas longitudinales.

ZONA	Límite inf.	Límite sup.
I	Poligonal de apoyo	Nivel medio del mar
II	Nivel medio del mar	Límite C hacia el mar
III	Poligonal de apoyo	Límite C hacia el mar

Tabla 3-3 Límites transversales.

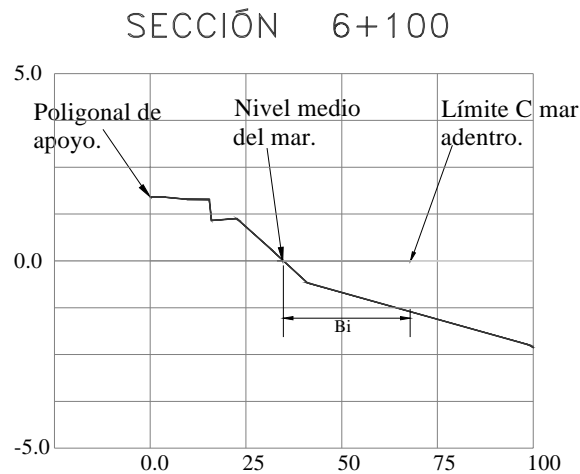


Figura 3-4 Límites zonas transversales.

3.5.3 Características del sedimento.

En virtud que las características físicas del material dan forma a la geometría en planta y perfil de la playa a través de la interacción entre el oleaje y el sedimento, es necesario determinar su: densidad, granulometría, velocidad de caída, volumen total del material y factor de forma.

- Muestreo.

Durante la campaña celebrada en abril del 2005 se realizo un muestreo a lo largo del área de interés en 4 locaciones distintas donde se recolectaron dos muestras, una en la berma del perfil y otra en la zona intermareal.

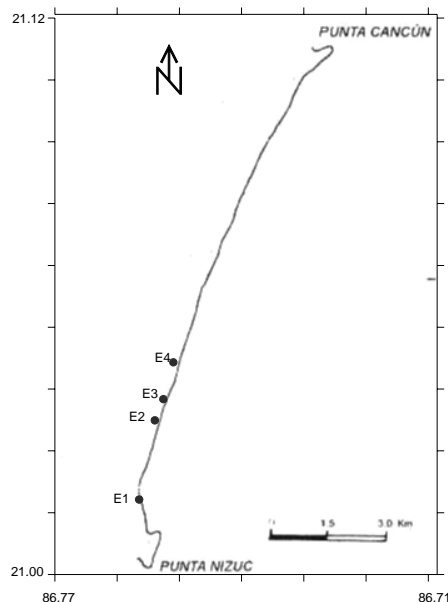


Figura 3-5 Ubicación de los muestreos.

Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio de geotecnia del Instituto de Ingeniería. El análisis consistió en hacer pasar las muestras por una serie de mallas.

En la Tabla 3-4 se indica el número de malla y su peso retenido para cada muestra.

No	Abertura (mm)	Peso retenido (gramos)					
		muestra 1	muestra 2	muestra 3	muestra 4	muestra 5	muestra 6
18	1	0	0	0	0	0	0
20	0.84	15	27.7	20.4	13.5	9.5	0
40	0.42	513.6	610.9	528.8	265.1	368.9	162.9
60	0.25	46.4	24.5	40.2	123	130.8	320.2
80	0.177	0.6	0	0.3	6.3	6	16.6
charola		0	0	0	1.1	0.4	1.6
Total:		575.6	663.1	589.7	409	515.6	501.3

Tabla 3-4 Análisis granulométrico.

- Densidad.

Para el cálculo de la densidad se colocaron las muestras húmedas en un matraz volumétrico donde se pesaron, luego de ser secadas se extrajo el aire con una bomba de vacío y posteriormente se les dejó reposar 24 horas, para luego nuevamente pesarlas. La densidad se obtuvo por diferencia de peso.

En la Tabla 3-5 se indica la densidad obtenida para cada muestra recolectada.

No	Densidad
muestra	(gramos)
1	2.72
2	2.73
3	2.74
4	2.75
5	2.77
6	2.79
Promedio	2.75

Tabla 3-5 Densidad media.

- Diámetros característicos y parámetros estadísticos.

Se trazó la curva granulométrica para cada una de las muestras y así se determinaron los diámetros D_{50} , D_{84} , D_{16} , D_{medio} y otros estadísticos de interés como la desviación típica, Sesgo y Curtosis. Las muestras se clasificaron según el criterio de Wentworth.

La desviación estándar se determinó como:

$$\sigma = \frac{D_{84} - D_{16}}{2} \quad (3.4)$$

Donde:

σ = Desviación estandar.

D_{84} , D_{16} = Diámetros característicos.

Por su parte el sesgo se calculó como:

$$(Sr)_a = \frac{1}{2}(D_{75} + D_{25} - 2D_{50}) \quad (3.5)$$

Donde:

(Sr)a = Sesgo.

D₇₅, D₅₀, D₂₅ = Diámetros característicos.

El coeficiente de Curtosis se definió como:

$$(Kq)a = \frac{D_{75} - D_{25}}{2(D_{90} - D_{10})} \quad (3.6)$$

Donde:

(kq)a = Coeficiente de Curtosis.

D₉₀, D₇₅, D₂₅, D₁₀ = Diámetros característicos.

En la Tabla 3-6 se indican los diámetros obtenidos de las curvas granulométricas, así como los parámetros estadísticos para cada muestra.

No muestra	1	2	3	4	5	6	Promedio
Ø medio (mm)	0.42	0.43	0.42	0.38	0.38	0.3	0.39
Ø 84 (mm)	0.78	0.79	0.78	0.76	0.76	0.63	0.75
Ø 50 (mm)	0.48	0.49	0.48	0.46	0.46	0.36	0.46
Ø 16 (mm)	0.46	0.35	0.46	0.33	0.35	0.28	0.37
Des. tip.	0.16	0.21	0.16	0.21	0.20	0.18	0.19
Sesgo	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.04	0.01
Curtosis	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	0.24	0.30

Tabla 3-6 Diámetros y parámetros estadísticos.

De la tabla anterior se observa que las muestras tienen un coeficiente de Sesgo de cero ó muy cercano a él, esto indica que los valores intermedios son mas grandes que el resto, por otro lado el coeficiente de Curtosis para las 5 primeras muestras es mayor de 0.263 lo que muestra que existe poca dispersión en los diámetros por lo que la curva es muy esbelta, (*leptocúrtica*) situación que no ocurre para la muestra 6.

- Velocidad de caída de grano.

Conocida la densidad del material, se calcula la distribución de velocidades de caída de grano, (*V_f*) de acuerdo a la formulación de Hallermeier (1981), la cual se expresa de acuerdo con la ecuación (4.7).

$$\begin{aligned}
 V_f &= \left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g \right]^{0.7} \frac{D_{50}^{1.1}}{6\nu^{0.4}} \text{ --- } (39 < B < 10^4) \\
 V_f &= \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \frac{gD_{50}^2}{18\nu} \text{ --- } (B < 39) \\
 V_f &= \left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g \frac{D_{50}}{0.91} \right]^{0.5} \text{ --- } (10^4 < B)
 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Donde :

$$B = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \frac{gD_{50}^3}{\nu^2} \quad (3.8)$$

Donde:

D_{50} = Diámetro característico.

γ = Peso específico del agua.

γ_s = Peso específico de la arena.

ν = Viscosidad cinemática.

En la Tabla 3-7 se indica el valor de la velocidad de caída para cada muestra.

No muestra	1	2	3	4	5	6	Promedio
Vel. caída. (m/s)	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05

Tabla 3-7 Velocidad de caída del material.

- Porosidad del material.

La porosidad del material es del **46%** y se calculó mediante:

$$P = \frac{\gamma_s - \gamma_a}{\gamma_s} \times 100 \quad (3.9)$$

Donde:

P = Porosidad.

γ_s = Densidad de sólidos.

γ_a = Densidad aparente.

- Ángulo de reposo del material.

Propiedad que se determina para los materiales no cohesivos. Para este caso es de **30.5°** (Según Lane y Simons).

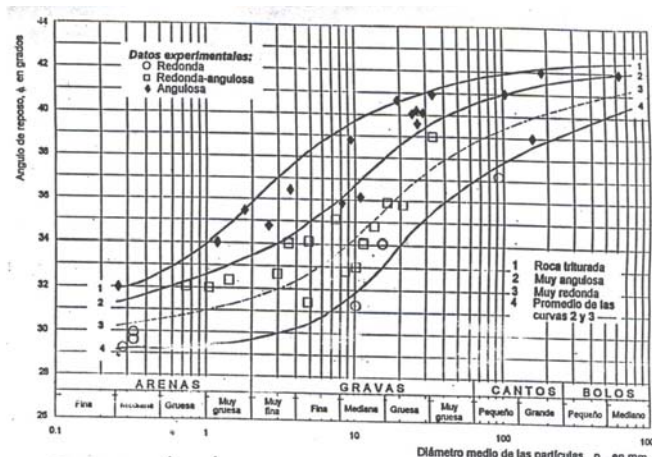


Figura 3-6 Áreas calculadas para cada perfil. Del tamaño y forma de las partículas, (adaptada de Laine y Simons).

3.5.4 Cuantificación del sedimento.

Para poder cuantificar cuanto material se ha perdido ó ganado entre los levantamientos recopilados, se siguió el procedimiento propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en su estudio “Evolución de las playas de Cancún Q. Roo” de abril de 1989.

El procedimiento se explica a continuación.

a).- Cálculo de las áreas por arriba, (A_i) y por debajo, (a_i) del nivel medio del mar.

En la Figura 3-7, se indica cuales son las áreas calculadas para cada perfil playero.

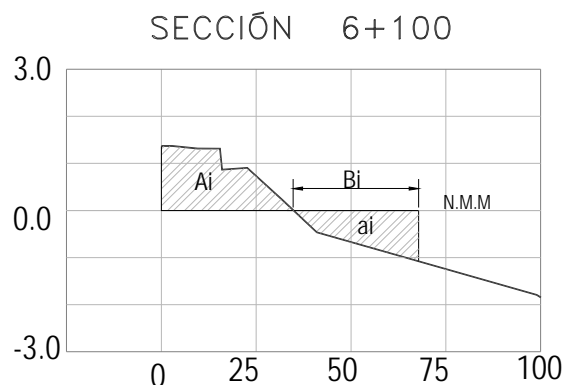


Figura 3-7 Áreas calculadas para cada perfil.

b).- Cálculo de los volúmenes de erosión o depósito para un ancho unitario de playa asociado a un perfil. Son obtenidos a partir de las expresiones (3.10) y (3.11).

$$VOL_{i_{A.N.M.M}} = -(A_i - A_{i+1})(L) \quad (3.10)$$

$$VOL_{i_{a.N.M.M}} = (a_i - a_{i+1})(L) \quad (3.11)$$

Donde:

$A.N.M.M$ = Arriba del nivel medio del mar.

$a.N.M.M$ = Abajo del nivel medio del mar.

A, A_{i+1} = Áreas por arriba del nivel medio del mar asociadas a un perfil playero, (m^2).

a, a_{i+1} = Áreas por debajo del nivel medio del mar asociadas a un perfil playero, (m^2).

L = Ancho unitario longitudinal, (m).

VOL_i = Volumen de erosión o depósito de material de cada perfil para un ancho unitario de playa.

La suma de los volúmenes anteriores corresponde al volumen total, (*valores positivos = depósito, valores negativos = erosión*).

c).- Cálculo del volumen de erosión o depósito para un ancho unitario de playa asociado a una de las cuatro zonas longitudinales y se obtiene a partir de (4.12).

$$VOL_{TOT.ZONA} = \sum_{i=1}^n VOL_i \quad (3.12)$$

Donde:

VOL_i = Volumen de erosión o depósito de material de cada perfil para un ancho unitario de playa.

$VOL_{TOT ZONA}$ = Volumen de erosión o depósito total de una zona en particular, ya sea arriba o debajo del nivel medio del mar o su total.

d).- Cálculo del espesor y la velocidad de erosión o depósito para una zona en particular entre dos campañas. Se obtiene con:

$$E = \frac{VOL_{TOT.ZONA}}{BiN} \quad (3.13)$$

$$V_{med} = \frac{E}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Donde:

E = Espesor de erosión o depósito de material asociado a una zona en particular entre dos campañas, (m).

V_{med} = Velocidad media mensual de erosión o depósito de material de una zona en particular entre dos campañas, (m/mes).

Bi = Ancho de playa medio transversal para cada zona específica.

N = Número de perfiles playeros que integran una zona dada.

Δt = Intervalo de tiempo entre dos campañas, ($meses$).

e).- Determinación del corrimiento de la línea de playa.

De los perfiles levantados en cada una de las campañas de medición, se obtuvieron los corrimientos máximo, medio y mínimo para cada perfil, medidos a partir de la poligonal de apoyo.

Movimiento de la línea de playa para cada perfil.

Calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta X = X_j - X_i \quad (3.15)$$

Donde:

ΔX = Movimiento de la playa entre dos campañas de medición.

X = Distancia medida entre la poligonal de apoyo y el nivel medio del mar.

i, j = Subíndices asociados a diferentes campañas de medición.

Los valores negativos corresponden a una disminución de en el ancho de la playa.

f).- Velocidad de corrimiento de la playa para cada perfil.

$$V_{cp} = \frac{\Delta X}{\Delta T} \quad (3.16)$$

Donde:

V_{cp} = Velocidad de corrimiento para cada perfil entre dos campañas de medición, (m/día).

ΔT = Periodo de tiempo entre dos campañas de medición.

g).- Índice de movimiento de la línea de playa por zonas.

La reducción o ampliación de la playa en su conjunto se realiza contabilizando el movimiento de la playa entre dos campañas, dado por:

$$\% \text{ erosion} = \frac{\text{Num. val. negativos}}{\text{Num. perfiles en la zona}} \times 100 \quad (3.17)$$

$$\% \text{ deposito} = \frac{\text{Num. val. positivos}}{\text{Num. perfiles en la zona}} \times 100 \quad (3.18)$$

h).- La velocidad de corrimiento de la playa por zonas corresponde al valor medio de la velocidad de los perfiles de una zona y se expresa con:

$$V_{cz} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{cp_i}}{N} \quad (3.19)$$

Donde:

V_{cz} = velocidad de corrimiento de la línea de playa por zonas, (m/día).

V_{cpi} = velocidad de corrimiento de la línea de playa asociada a un perfil, (m/día).

N = número de perfiles levantados en una zona dada.

En Tabla 3-8 y Tabla 3-9, se muestran las cantidades de material erosionado o depositado por arriba y por debajo del nivel medio del mar para algunos perfiles de las campañas celebradas.

Volumen (M3/ML)				
PERFIL	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
1+500	-0.79	-5.01	25.62	-19.19
3+500	-3.44	0.09	18.29	-5.27
6+300	12.25	22.14	6.93	-21.10
9+100	13.55	3.67	43.84	-77.11
11+900	2.79	-46.60	9.58	-27.64
PERFIL	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
1+500	-0.11	8.77	-4.07	74.87
3+500	23.25	-13.01	-23.41	81.11
6+300	12.04	-23.20	-4.46	33.09
9+100	13.32	-19.29	29.03	26.98
11+900	-89.31	84.24	13.40	68.25

Tabla 3-8 Volúmenes de erosión o depósito arriba del nivel medio del mar.

Volumen (m3/ml)				
PERFIL	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
1+500	-2.89	-4.48	4.30	-1.07
3+500	-3.62	4.09	-10.00	1.29
6+300	-2.04	6.06	-13.43	8.54
9+100	-7.65	-0.34	-9.15	13.35
11+900	-7.72	-11.45	-0.17	-13.59
PERFIL	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
1+500	6.59	-0.23	-10.57	124.03
3+500	-17.54	12.92	14.29	33.94
6+300	2.56	-21.13	26.06	-23.29
9+100	-5.55	5.85	-7.72	12.63
11+900	5.53	-4.28	5.53	92.37

Tabla 3-9 Volúmenes de erosión o depósito abajo del nivel medio del mar.

En Tabla 3-10 y Tabla 3-11 se muestran las cantidades de material erosionado o depositado por arriba y por debajo del nivel medio del mar para cada una de las cuatro zonas en que se dividió la zona de estudio y para cada una de las campañas celebradas.

Volumen (M3/ML)				
ZONA	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
I	16.77	-36.72	153.61	-63.54
II	91.23	19.59	258.27	-313.01
III	278.46	-8.46	253.89	-499.41
IV	68.24	-70.76	187.98	-453.96
TOTAL	454.70	-96.34	853.75	-1329.93
ZONA	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
I	160.16	-70.87	-132.47	1074.18
II	-39.87	201.95	-219.10	1235.86
III	305.46	-343.80	287.78	342.52
IV	98.31	-147.45	217.81	699.99
TOTAL	524.06	-360.17	154.02	3352.55

Tabla 3-10 Volúmenes de erosión o depósito arriba del nivel medio del mar.

Volumen (M3/ML)				
ZONA	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
I	-13.94	-18.27	83.61	-25.24
II	-21.94	17.23	144.04	-141.11
III	-177.22	-21.93	6.63	-71.23
IV	45.29	-65.62	45.94	-99.71
TOTAL	-167.81	-88.59	280.23	-337.29
ZONA	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
I	85.42	-18.37	-80.70	577.16
II	-19.63	193.62	-239.61	484.30
III	41.14	6.45	38.78	150.41
IV	10.27	-23.63	71.83	329.75
TOTAL	117.19	158.07	-209.70	1541.61

Tabla 3-11 Volúmenes de erosión o depósito debajo del nivel medio del mar.

En Tabla 3-12 y Tabla 3-13, se muestran el espesor de material erosionado o depositado por arriba y por debajo del nivel medio del mar para cada una de las cuatro zonas en que se dividió la zona de estudio y para cada una de las campañas celebradas.

Espesor (M)				
ZONA	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
I	0.13	-0.22	1.64	-0.25
II	0.43	0.09	1.09	-0.76
III	0.42	0.05	0.72	-1.03
IV	0.82	-0.02	0.50	-1.11
Promedio	0.45	-0.025	0.99	-0.79
ZONA	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
I	0.80	-0.19	-0.51	9.11
II	-0.18	0.89	-0.60	7.36
III	1.33	-0.75	1.03	0.85
IV	0.44	-0.47	0.96	2.04
Promedio	0.60	-0.13	0.22	4.84

Tabla 3-12 Espesor de erosión o depósito arriba del nivel medio del mar.

Espesor (M)				
ZONA	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
I	-0.11	-0.11	0.89	-0.71
II	-0.10	0.08	0.61	-5.55
III	-0.10	0.05	0.02	-6.44
IV	-0.52	-0.05	0.12	-10.68
Promedio	-0.21	-0.008	0.41	-5.84
ZONA	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
I	0.43	-0.05	-0.31	4.90
II	-0.09	0.85	-0.65	2.89
III	0.18	0.01	0.14	0.37
IV	0.05	-0.07	0.32	0.96
Promedio	0.14	0.19	-0.13	2.28

Tabla 3-13 Espesor de erosión o depósitos debajo del nivel medio del mar.

En la Figura 3-8 se observan las zonas de erosión y depósito medidas a lo largo de la zona en estudio para las diferentes campañas celebradas.

En las Tabla 3-14 se indican las cantidades del corrimiento máximo, medio y mínimo que se generó para diferentes perfiles de la zona en estudio, mientras que en la Figura 3-9, se observan los corrimientos máximo, medio y mínimo de todos los perfiles de la zona en estudio.

Corrimiento (M)			
PERFIL	Máximo	Medio	Mínimo
1+500	30.52	17.70	5.19
2+500	20.08	10.61	0.35
3+500	23.46	13.93	4.17
4+900	36.80	18.21	6.00
6+300	29.13	18.20	3.54
7+700	42.82	23.90	3.57
9+100	34.42	24.59	14.64
10+500	31.00	19.60	11.98
11+900	46.33	29.83	11.93

Tabla 3-14 Corrimiento de la línea de costa sobre algunos kilometrajes.

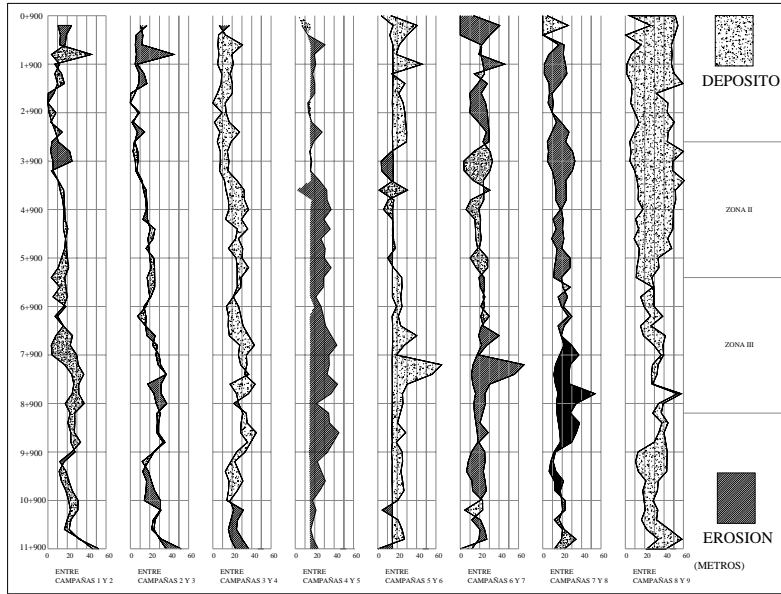


Figura 3-8 Zonas de erosión y depósito que se presentaron entre las distintas campañas medidas.

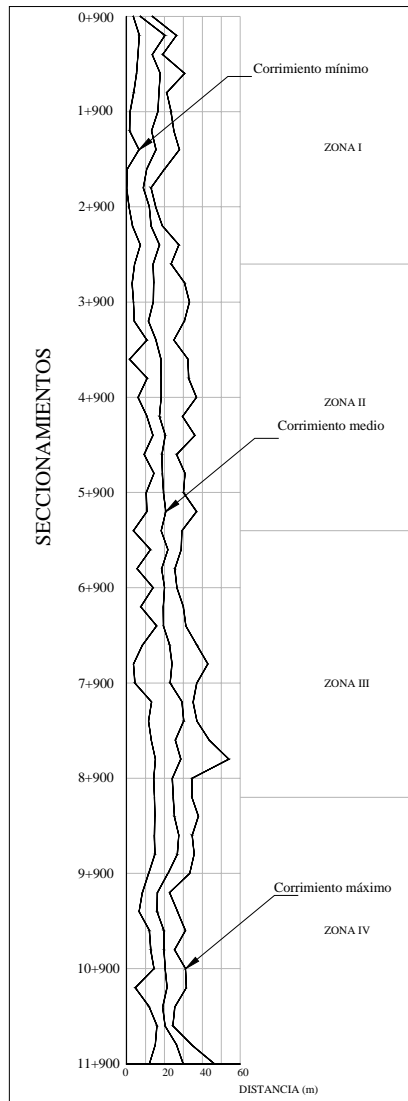


Figura 3-9 Corrimiento máximo, mínimo y medio de la línea de costa de Cancún entre 1989 a 2006.

Adicionalmente se midió la velocidad de corrimiento para cada una de las cuatro zonas y fue expresada en metros por día y esta se puede consultar en la Tabla 3-15, mientras que en la Tabla 3-16 se indica el intervalo de tiempo (*en meses*), transcurrido entre las distintas campañas.

VELOCIDAD (M/DIA)				
ZONA	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
I	0.0049	-0.0298	0.0172	-0.0012
II	0.0000	0.0088	0.0168	-0.0049
III	0.0243	-0.0072	0.0136	-0.0065
IV	0.0110	-0.0129	0.0032	-0.0047
ZONA	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
I	0.1051	-0.0044	-0.0382	0.3294
II	0.0054	0.0053	-0.0442	0.2964
III	0.1255	-0.0068	0.0272	0.0710
IV	0.0519	-0.0034	0.0257	0.1427

Tabla 3-15 Velocidad de corrimiento de la línea de costa por zonas.

TIEMPO (MESES)			
entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
14	6	23	87
entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
4	58	10	4

Tabla 3-16 Tiempo transcurrido entre campañas.

De los análisis del volumen de material que ha sido depositado o erosionado en cada zona de estudio, se puede interpretar dicha información de la manera siguiente:

De acuerdo a los perfiles observados.

- El comparar la campaña 1 con la 2 se observó que hubo erosión aproximadamente en el 54% de los perfiles de la zona I, pero en las demás zonas no se experimentó el mismo fenómeno, dado que apreció un depósito aproximadamente en el 80 % de los perfiles respectivos para una cada una de las otras zonas.
- Al comparar las campañas 2 y 3, en la zona I, III y IV aumentó el número de perfiles con erosión, aproximadamente en un 84%, 60% y 54%, respectivamente, y solamente la zona 2 mantuvo un nivel de perfiles con erosión menor al 50%.
- Entre las campañas 3 y 4 hubo una recuperación de material en casi todos los perfiles, siendo los perfiles de las zonas III y IV los que presentaron una mayor erosión, del orden del 13%.
- Para las campañas 4 y 5 se incrementó el número de perfiles con erosión en todas las zonas, tanto así que para las Zonas I, III y IV fue del 100%.
- Entre las campañas 5 y 6, para las zonas I, III y IV el número de perfiles que estaban en erosión fue menor al 15%, situación que no se observó en la zona II ya que aproximadamente mantenía un 73% de sus perfiles erosionados.

- Para la comparación de las campañas 6 y 7 hubo un mayor número de perfiles erosionados en las zonas I, III y IV, superior al 70%, y para la zona II fue inferior al 14%.
- Al hacer la comparación entre las campañas 7 y 8, el número de perfiles erosionados de las zonas I y II fue muy elevado, alrededor del 80%, pero para las zonas III y IV fue menor al 27%.
- Finalmente entre las campañas 8 y 9 los perfiles se recuperaron gracias al relleno artificial que se realizó en Cancún.

En la Tabla 3-17 se indica el porcentaje total de perfiles para cada una de las zonas que se encontraron en erosión tras comparar dos campañas consecutivas, mientras que en la Tabla 3-18 se muestran los volúmenes de material en depósito (+) y en erosión (-) entre dos campañas consecutivas para cada una de las cuatro zonas.

Porcentaje (%)				
ZONA	entre 1 y 2	entre 2 y 3	entre 3 y 4	entre 4 y 5
I	53.85	84.62	7.69	100.00
II	23.08	33.33	6.67	86.67
III	20.00	60.00	13.33	100.00
IV	20.00	53.85	13.33	100.00
ZONA	entre 5 y 6	entre 6 y 7	entre 7 y 8	entre 8 y 9
I	14.29	72.73	90.91	0.00
II	73.33	13.33	80.00	6.67
III	6.67	86.67	26.67	6.67
IV	13.33	93.33	13.33	6.67

Tabla 3-17 Porcentaje de perfiles con erosión.

ZONA	Entre 1 y 2	Entre 2 y 3	Entre 3 y 4
	TOTAL m3	TOTAL m3	TOTAL m3
I	2.82	-54.99	237.22
II	69.29	36.82	402.32
III	101.24	-30.39	260.52
IV	113.53	-136.37	233.92
ZONA	Entre 4 y 5	Entre 5 y 6	Entre 6 y 7
	TOTAL m3	TOTAL m3	TOTAL m3
I	-88.78	245.58	-89.23
II	-454.12	-59.5	395.56
III	-570.64	346.6	-337.35
IV	-553.67	108.58	-171.08
ZONA	Entre 7 y 8 m3	Entre 8 y 9 m3	
	TOTAL	TOTAL	
I	-213.17	1651.34	
II	-458.71	1720.16	
III	326.56	492.92	
IV	289.64	1029.74	

Tabla 3-18 Volumen total entre de erosión y depósito entre campañas y por zonas.

Al observar los resultados obtenidos, se deduce que:

Entre las campañas 1 y 2, arriba del nivel medio del mar, (*A.N.M.M.*), los perfiles de las 4 zonas presentaron un depósito de material que al parecer provino del material de estos mismos perfiles, pero localizado abajo del nivel medio del mar, (*a.N.M.M.*).

Por la fecha de realización de la campaña 1 se puede considerar que la playa presentaba un perfil característico de invierno, mientras que en la campaña 2 la playa se encontraba con perfil de primavera.

Cabe recordar que la campaña 1 se realizó tan solo a 5 meses de la incidencia del huracán Gilberto, lo que seguramente ocasionó que el material fuera depositado abajo del nivel medio del mar, y 14 meses después se realizó la campaña 2. Es posible considerar que el tiempo transcurrido entre estas dos campañas fue de calmas ya que únicamente se presentó en la zona una depresión tropical de 1.2 horas de duración, lo que facilitó el reacomodo del material

En la Tabla 3-19, se indica a modo de resumen algunas características físicas de los perfiles promediadas en cada una de las cuatro zonas en que se dividió la playa en estudio y para cada levantamiento celebrado.

	LEVANTAMIENTO 1			LEVANTAMIENTO 2			LEVANTAMIENTO 3		
ZONA	Ancho med.	h. berma	S	Ancho med.	h. berma	S	Ancho med.	h. berma	S
	(m)	(m)	(milésimas)	(m)	(m)	(milésimas)	(m)	(m)	(milésimas)
I	9.48	0.71	0.10	12.08	0.76	0.09	6.68	0.66	0.11
II	14.20	1.40	0.12	14.22	1.57	0.11	15.81	1.67	0.11
III	14.48	1.94	0.14	24.68	2.26	0.10	23.56	2.37	0.10
IV	22.76	2.59	0.12	27.38	2.49	0.09	25.05	2.59	0.10
	LEVANTAMIENTO 4			LEVANTAMIENTO 5			LEVANTAMIENTO 6		
ZONA	Ancho med.	h. berma	S	Ancho med.	h. berma	S	Ancho med.	h. berma	S
	(m)	(m)	(milésimas)	(m)	(m)	(milésimas)	(m)	(m)	(milésimas)
I	18.34	1.40	0.09	14.26	1.23	0.08	26.74	1.29	0.05
II	27.43	2.03	0.08	14.55	1.82	0.12	15.20	1.18	0.09
III	32.28	2.74	0.09	15.29	2.20	0.14	30.55	2.42	0.09
IV	27.23	2.78	0.10	14.85	2.08	0.14	21.07	2.11	0.13
	LEVANTAMIENTO 7			LEVANTAMIENTO 8			LEVANTAMIENTO 9		
ZONA	Ancho med.	h. berma	S	Ancho med.	h. berma	S	Ancho med.	h. berma	S
	(m)	(m)	(milésimas)	(m)	(m)	(milésimas)	(m)	(m)	(milésimas)
I	18.54	1.34	0.07	8.42	0.88	0.13	48.00	1.98	0.04
II	24.46	1.86	0.07	11.19	1.78	0.18	46.76	2.28	0.05
III	18.60	1.33	0.07	26.78	2.96	0.12	35.30	2.13	0.06
IV	15.11	1.35	0.09	22.82	2.48	0.11	39.94	2.41	0.06

Tabla 3-19 Características por zonas de los distintos levantamientos.

En las figuras 3-10, 3-11 y 3-12 se muestran los perfiles medidos en cada una de las 9 campañas para cada sección.

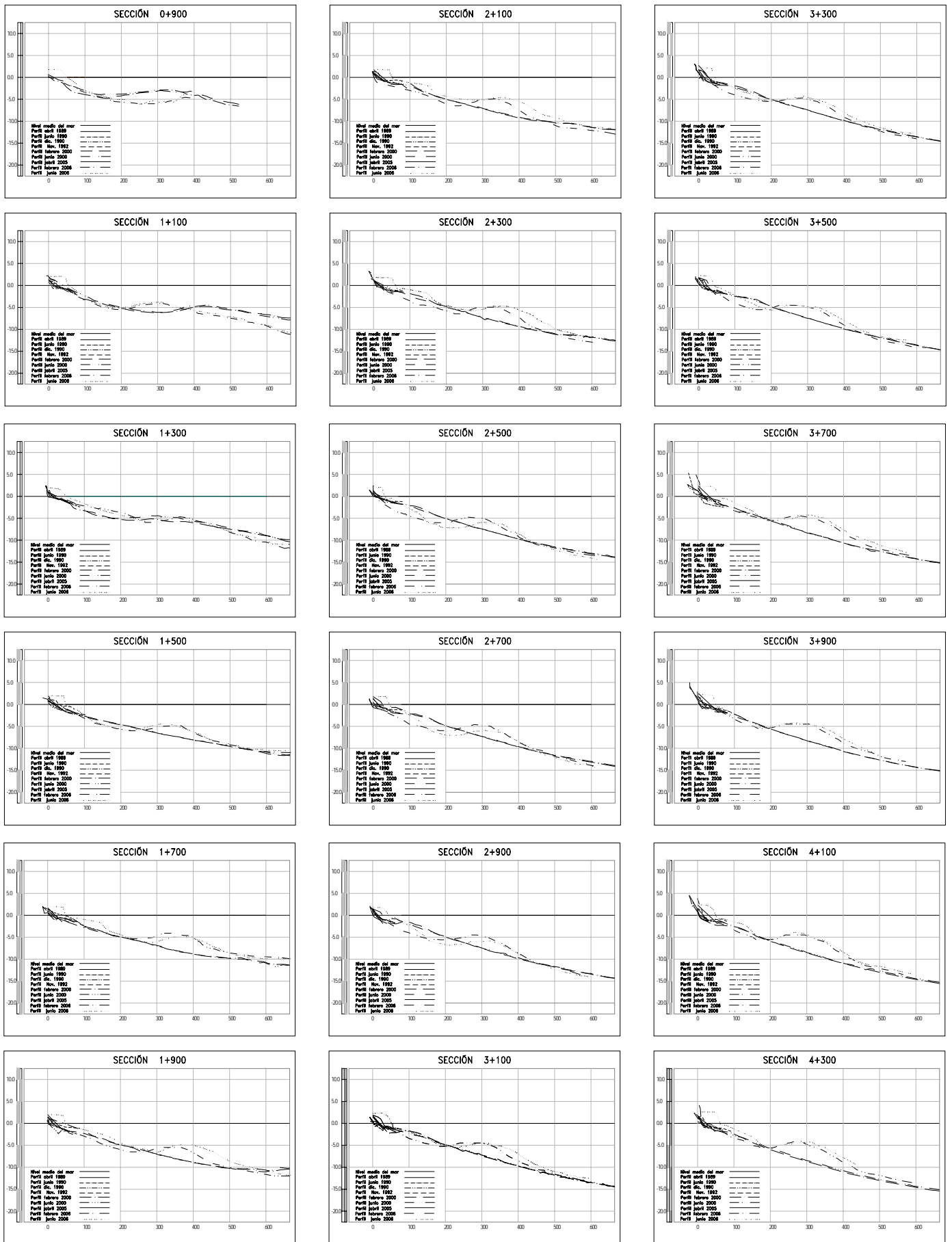


Figura 3-10 Perfiles del Km 0+900 al 4+300.

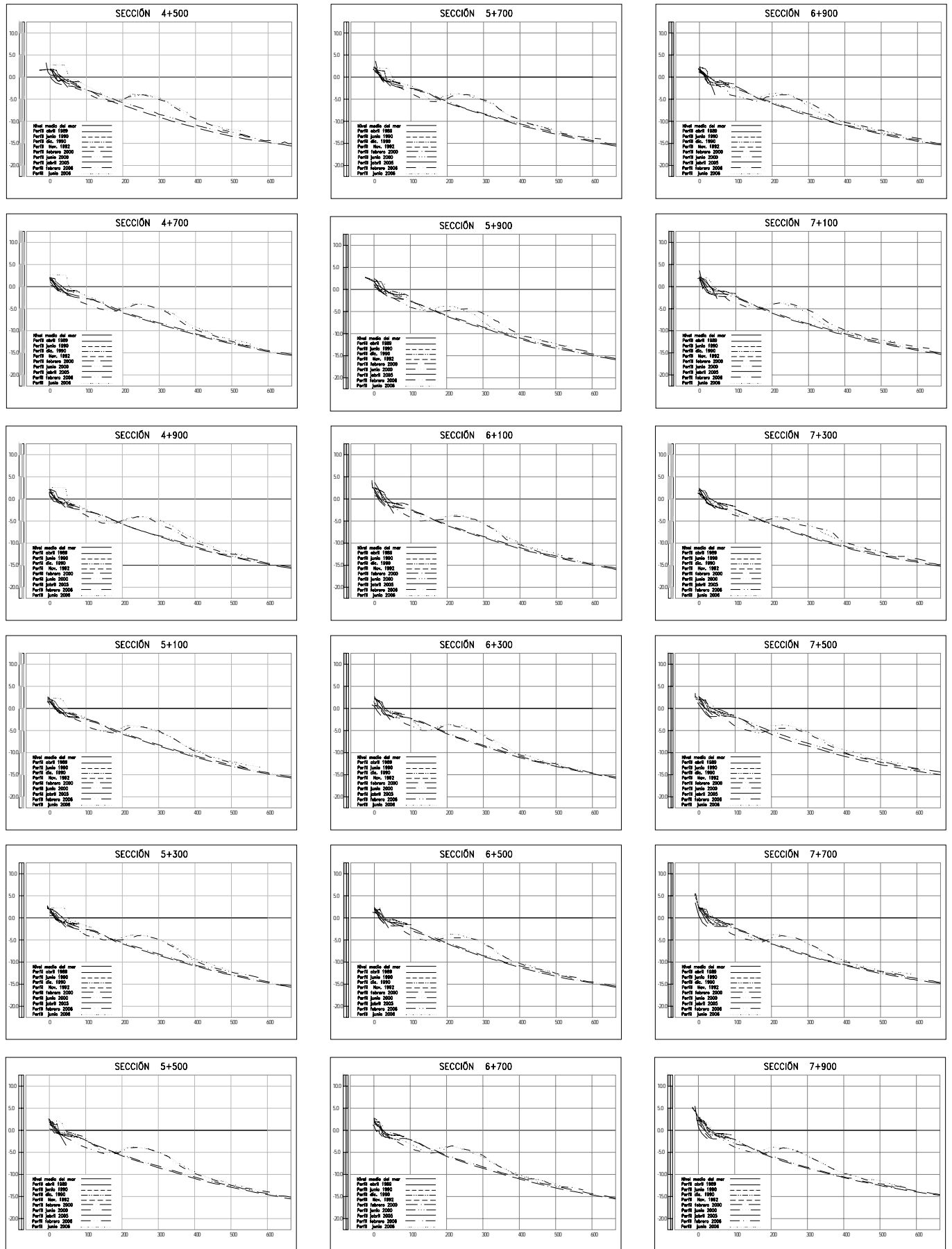


Figura 3-11 Perfiles del km 4+500 al 7+900.

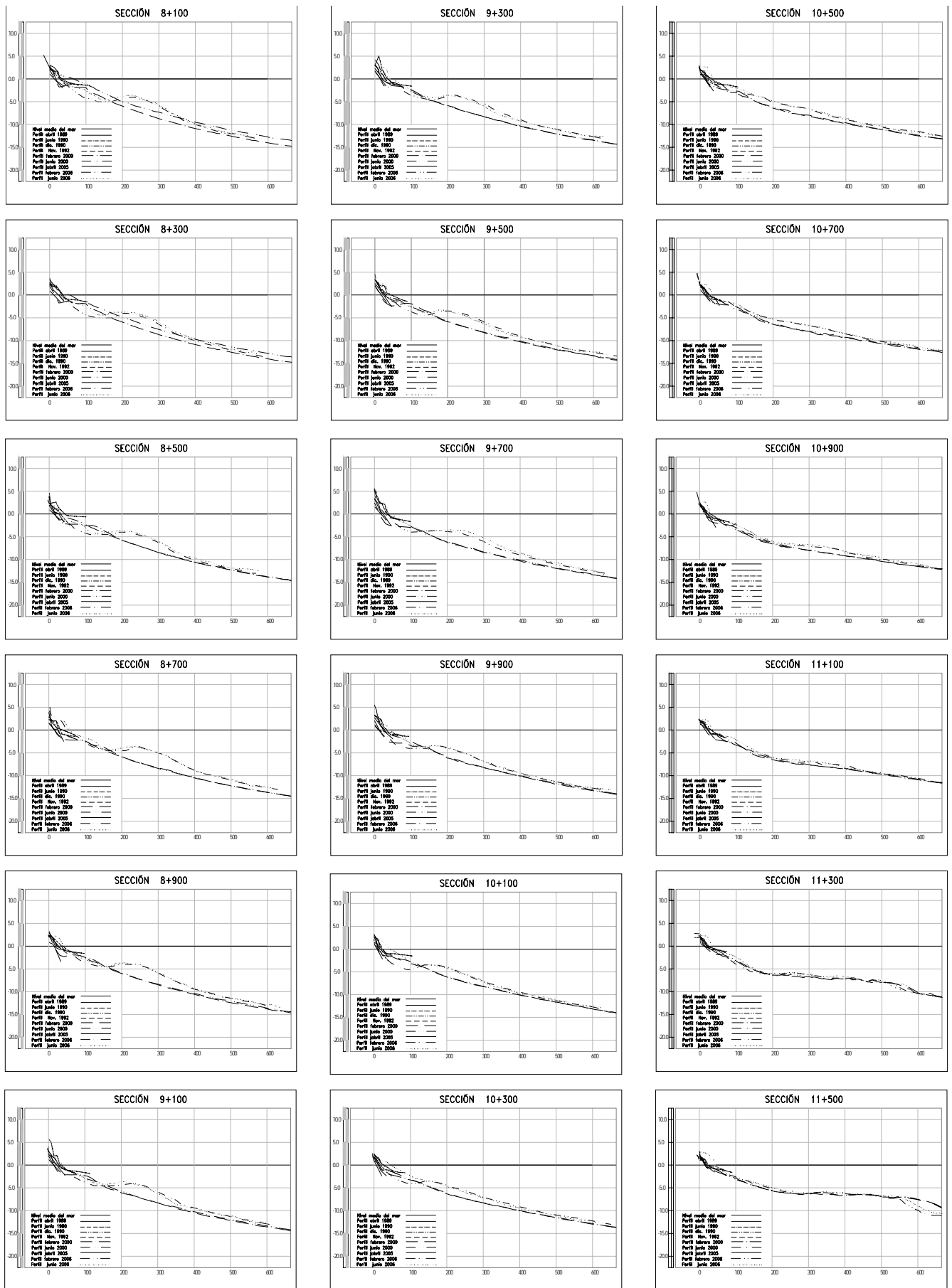


Figura 3-12 Perfiles del km 8+100 al 11+500.

4. EVOLUCIÓN DE LOS PERFILES REPRESENTATIVOS SOMETIDOS A UN TEMPORAL.

Se realizó una modelación numérica para valorar la evolución morfológica de un perfil de playa mediante el uso del programa denominado PETRA. Programa que forma parte del grupo de programas del SMC[®], (*sistema de modelado costero*).

Este modelo numérico que resuelve, para un perfil de playa, las ecuaciones del flujo de sedimentos dentro de la zona de rompientes, así como los cambios en la batimetría asociados a las variaciones espaciales del transporte de sedimentos. La magnitud del transporte varía en función de las características del medio, (*agua, sedimento, batimetría*) y de las condiciones hidrodinámicas, (*oleaje y corrientes inducidas por el mismo*).

La implementación de este modelo numérico tiene como objetivo conocer la respuesta del perfil ante la acción de un temporal en términos de retroceso de la línea de costa y forma final, (*volúmenes de erosión y acumulación*) a lo largo del perfil.

4.1. Modelos morfodinámicos de evolución de perfiles.

Zheng y Dean en 1997, propusieron la separación de los modelos de evolución morfodinámica de perfiles en dos grandes grupos; Modelos de bucle abierto y modelos de bucle cerrado. Los primeros, no asumen de antemano ninguna forma final del perfil y modelan el transporte de sedimentos en función del flujo y de las concentraciones del sedimento. Sus principales exponentes son; Roelvink y Broker, 1993; Nairn y Southgate, 1993; Rakha y Kamphuis, 1997; Rakha et al., 1997; Leont'yev, 1996.

En contraparte los modelos de bucle cerrado se caracterizan por hacer que el perfil inicial tenga una tendencia para llegar a una forma preestablecida, dependiente del clima marítimo y del sedimento como lo expresan; Larson y Kraus, 1989, 1990, 1991; Wise et al., 1996; Larson, 1996; Zheng y Dean, 1997; García, 2000.

El modelo Petra pertenece al primer grupo y se basa en el modelado de los procesos físicos que afectan al perfil de playa: propagación del oleaje, corrientes de retorno, transporte de sedimentos y variación de la batimetría. Para ello admiten ciertas condiciones hidrodinámicas estacionarias durante un intervalo de tiempo determinado, que dan lugar a una variación del fondo. Con el nuevo perfil se recalculan las condiciones hidrodinámicas y los nuevos flujos de transporte, se realiza este ciclo cerrado hasta la finalización del evento que se desea simular.

La evolución de la playa depende del transporte de sedimentos, el cual es función de las corrientes y el oleaje, siendo la corriente función del oleaje, por lo cual el modelo Petra esta dividido en diferentes módulos de diferente jerarquía.

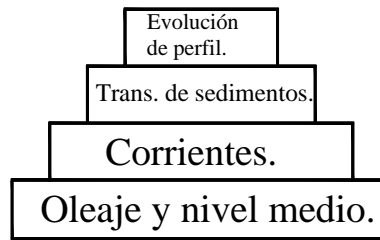


Figura 4-1 Jerarquía de los módulos del modelo.

- Módulo hidrodinámico.

El modelo Petra emplea formulaciones promediadas en la fase, para calcular las envolventes del campo de oleaje, de manera simultánea, se evalúan las variaciones del tensor de radiación y, por tanto, la alteración del nivel medio por efecto de la presencia del oleaje, utilizando teoría lineal.

Los modelos de propagación del oleaje que emplean formulaciones promediadas en la fase resuelven la ecuación de conservación de flujo de energía y la irrotacionalidad del número de onda, (*Ley de Snell para batimetría recta y paralela*).

$$\frac{\partial(Ec_g \cos \theta)}{\partial x} = -\overline{D}_b \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial k_p \sin \theta}{\partial x} = 0 \quad (4.2)$$

Donde:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2$$

$$c_g = \frac{c_p}{2} \left(1 + \frac{2k_p d}{\sinh 2k_p d} \right)$$

$$c_p = \frac{w}{k_p}$$

$$w = \frac{2\pi}{T_p}$$

$$d = h + \bar{\eta}$$

Donde:

E = Energía del oleaje.

ρ = Densidad del agua, (1025 kg/m³).

g = Aceleración de la gravedad, (9.81 m/s²).

H_{rms} = Altura cuadrática media de ola.

c_g = Celeridad de grupo.

c_p = Celeridad para un periodo pico.

ω = Frecuencia angular.

k_p = Número de onda correspondiente a un periodo pico.

d = Profundidad del agua.

h = Calado respecto al nivel medio del mar en reposo.

η = Sobre elevación del nivel medio.

φ = Ángulo medido del oleaje respecto al eje x .

x = Distancia en la dirección perpendicular a la costa.

D_b = Tasa de disipación de energía.

La evolución del nivel medio se obtiene de forma simultánea al oleaje, puesto que son dependientes, resolviendo la ecuación de balance de cantidad de movimiento en la dirección x :

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = -\rho g d \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \quad (4.3)$$

Donde:

$$S_{xx} = E \left[\frac{c_g}{c_p} (\cos^2 \theta + 1) - \frac{1}{2} \right] = \text{componente del tensor de radiación.} \quad (4.4)$$

En cuanto a la modelación de la tasa de disipación D_b el modelo Petra utiliza cuatro modelos diferentes: Battjes y Janssen, (1978), Thornton y Guza, (1983) Rattanapitikon y Shibayama, (1998) y Larson, (1995).

Los dos primeros basados en un modelo de disipación de tipo resalto hidráulico y los otros dos en la hipótesis propuesta por Dally *et al*, (1985). Estos modelos utilizan para caracterizar el oleaje el periodo pico T_p , como período del estado de mar y θ como dirección media, dejando la aleatoriedad del oleaje exclusivamente a la altura de ola. Esto quiere decir que el espectro de energía es estrecho en frecuencias y en direcciones.

Un aspecto importante a considerar en los modelos utilizados es la vinculación existente entre la ecuación de conservación de flujo de energía y la ecuación de variación del nivel medio. Así, los modelos de Battjes y Janssen, (1978), Thornton y Guza, (1983) y Larson, (1996) resuelven de manera simultánea ambas ecuaciones, (*para la tasa de disipación utilizan la profundidad local total $d=h+h$*). Sin embargo, el modelo de Rattanapitikon y Shibayama, (1998) utiliza como calado h , por lo cual la resolución de la ecuación de nivel medio se realiza posteriormente al cálculo de la evolución de la altura de ola.

De los 4 modelos de oleaje desarrollados para Petra:

- Los valores de los parámetros de calibración escogidos para cada modelo son los recomendados por cada autor.
- De acuerdo a las pruebas realizadas por los autores del modelo Petra, se ha comprobado que el modelo que mejor reproduce las medidas, tanto en ensayos de laboratorio como de campo, es el modelo de Thornton y Guza, (1983) utilizando como parámetros de calibración los recomendados por Mase y Kirby, (1992). Por lo tanto, este modelo es el que se empleará en la simulación hidrodinámica de los perfiles.

Modelo de disipación Thornton y Guza, (1983).

Este modelo se fundamenta en la similitud de la disipación de energía debido a la rotura del oleaje con la disipación de un “bore”, manejando una distribución de alturas de ola en un punto con una distribución del tipo Rayleigh. El modelo T.G. aplica una relación de D similar a la de Battjes y Janssen, (1978), la cual aplicada a una onda monocromática, aparece como:

$$D \approx \frac{1}{4} f \rho g \frac{(BH)^3}{d} \quad (4.5)$$

Donde:

D = Magnitud de la tasa de disipación de energía por unidad de área.

B = Parámetro asociado al tipo de rotura, ($B \sim 1$, la rotura es similar a la disipación del bore, $B < 1$, rotura en Spilling, y $B > 1$ rotura en voluta).

La extensión de esta relación de una onda monocromática a la disipación media por rotura en un oleaje aleatorio (\overline{D}_b), supone las siguientes hipótesis:

- a).- La frecuencia f es la asociada a f_p .
- b).- La distribución de alturas de ola en la zona de rotura es del tipo Rayleigh.
- c).- A diferencia del modelo de Battjes y Janssen, (1978), este modelo propone una función empírica de distribución de alturas de olas rotas $P_b(H)$, la cual depende de H_{rms} , d y γ no siendo necesario una altura de ola máxima de rotura H_b .
- d).- Solo considera balance de flujo de energía en la dirección x .
- e).- No tiene en cuenta la recomposición de olas cuando aumenta la profundidad en la dirección de la propagación.

La expresión para D_b es:

$$\overline{D}_b = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g \frac{B^3 f_p}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^7 \quad (4.6)$$

La fracción de olas rotas que define el modelo es:

$$Q_b = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h} \right)^n \quad (4.7)$$

El valor de $n = 4$ es fijado por Thornton y Guza.

Los autores recomiendan utilizar $n = 4$, $\gamma = 0.42$ y $B = 0.8$ para laboratorio y $B = 1.5$ para campo. Posteriormente, Mase y Kirby (1992), recomiendan para las constantes B y γ valores de 1 y 0.6, respectivamente. Finalmente se concluyó que los valores $B = 1.0$ y $\gamma = 0.6$ representan bastante bien la propagación en laboratorio y campo.

- Modulo de corrientes netas en el fondo.

La formulación empleada en el Petra permite determinar las corrientes netas en el fondo teniendo en cuenta tanto la estructura vertical de la corriente media, (*undertow*) como el arrastre por capa límite, (*arrastré de Stokes*). Utilizando la solución de De Vriend y Stive, (1987) para corrientes netas estacionarias, la cual se basa en un modelo de 3 capas: una capa superficial, (*sobre el seno de la ola*), una capa intermedia y una capa en el fondo.

Petra utiliza la expresión simplificada para corrientes netas en el fondo, *Urb*, que presentó Ranasinghe et al, (1999), expresándose como:

$$U_{rb} = -\left(\frac{1}{2} + 7\frac{d}{\lambda}\right)\frac{d\bar{D}_b}{\lambda}\frac{c_1}{\rho cv \xi_t} - Q_b\left(1 + 7\frac{d}{\lambda}\right)\frac{E}{\rho ch \xi_t} + (1 - Q_b)\frac{3}{4}\frac{u_m^2}{C} \quad (4.8)$$

Donde:

$$\xi_t = \max(0.8d, d - \frac{H_{rms}}{2})$$

$$C_1 = \frac{5}{36}\xi_t^2 + \frac{5}{48}(2\log 2 - 1) - \frac{5}{72}\frac{1}{\xi_t}(3\log 2 - 2).$$

$$u_m = \frac{\pi}{T_p} \frac{\cos \theta}{\sinh(k_p d)}$$

Donde:

d = Profundidad.

λ = Longitud de onda en rotura con periodo de pico.

D_b = Taza de disipación de energía con periodo de pico.

ρ = Densidad del agua.

c = Celeridad de la onda para periodo pico.

ν = Viscosidad de remolino.

ξ_t = Nivel del seno de la onda desde el fondo adimensional.

C1= Función de ξ_t .

E = Densidad de energía del oleaje.

Q_b = Proporción de olas rotas.

U_m = Velocidad orbital para el fondo.

Es importante señalar que la corriente *Urb* que calcula el modelo de la corriente media es el fondo, (*fuera de la capa límite*).

Turbulencia vertical:

El modelado de cierre para la viscosidad de remolino vertical es el utilizado por De Vriend y Stive, (1987):

$$\nu = Ku_* d + Md\left(\frac{D}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.9)$$

Donde:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$$

$$\tau_b = \rho f_w U_{rb} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{T_p \sinh(k_p d)} \right)^2 H_{rms}^2 + U_{rb}^2}$$

$$f_w = \left\{ 0.3 \text{ si } r \leq 1.57, 0.00251 \exp(5.21r^{-0.19}) \text{ si } r > 1.57 \right\}$$

$$r = \frac{A}{K_s}$$

$$A = \frac{H_{rms}}{2 \sinh(k_p d)}$$

Donde:

K, M = Constantes empíricas.

u_* = Velocidad al cortante.

τ_b = Tensión tangencial en el fondo.

f_w = Factor de fricción.

A = Amplitud del desplazamiento orbital.

K_s = Rugosidad de Nikuradse ($2.5D_{50}$).

- Modulo de transporte de sedimentos.

Este módulo determina el transporte de sedimentos con base en los campos de oleaje y de corrientes netas en el fondo. El modelo utiliza la formulación de Ranasinghe et al, (1999) que considera el efecto de la proporción de olas rotas en cada punto del perfil. Esta formulación expresada en peso sumergido puede escribirse como la suma de seis términos como:

$$\langle \dot{i}_{cs} \rangle = \langle \dot{i}_{asb} \rangle + \langle \dot{i}_{ass} \rangle + \langle \dot{i}_{scb} \rangle + \langle \dot{i}_{scs} \rangle + \langle \dot{i}_{slb} \rangle + \langle \dot{i}_{sls} \rangle \quad (4.10)$$

El transporte se ve afectado de diversas maneras por cada término.

Donde.

$\langle \dot{i}_{asb} \rangle$ = Transporte por fondo por asimetría de oleaje.

$\langle \dot{i}_{ass} \rangle$ = Transporte en suspensión por asimetría del oleaje.

$\langle \dot{i}_{scb} \rangle$ = Transporte por fondo por corriente neta.

$\langle \dot{i}_{scs} \rangle$ = Transporte en suspensión por corriente neta.

$\langle \dot{i}_{slb} \rangle$ = Transporte por fondo por influencia de la pendiente.

$\langle \dot{i}_{sls} \rangle$ = Transporte en suspensión por influencia de la pendiente.

Transporte en la zona de ascenso descenso:

Uno de los principales mecanismos que afecta la forma del perfil es el transporte de sedimentos en el talud de playa. La tasa neta de transporte en el talud es principalmente función de la pendiente local, las características del sedimento y las propiedades de la lámina de agua que asciende sobre el talud.

En el modelo Petra utiliza la formulación de Wise et al, (1996) y la cual se expresa como:

$$q = q_s \left(\frac{x - x_R}{x_s - x_R} \right)^{1.5} \frac{\tan \beta_1}{\tan \beta_0} \quad (4.11)$$

Donde:

$$Z_R = 1.47 H_{rms0} \left(\frac{\tan \beta_0}{\sqrt{\frac{H_{rms0}}{L_0}}} \right)^{0.79} \quad (4.12)$$

Donde:

q_s = Transporte definido en x_s a una profundidad determinada.

x_R = Coordenada definida por el límite horizontal que alcanza el ascenso de la lámina de agua.

β_1 = Pendiente local mayor que cero.

β_0 = Pendiente media del talud de playa.

Z_R = Run up.

H_{rms0} = Altura cuadrática media de ola en profundidades indefinidas.

L_0 = Longitud de onda en profundidades indefinidas.

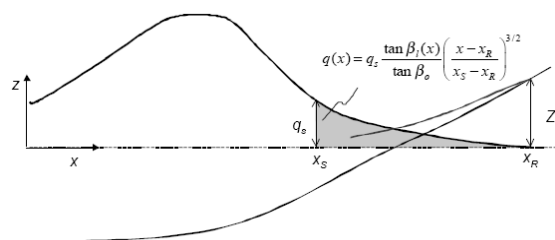


Figura 4-2 Transporte definido en x_s .

4.2. Dominio discreto.

La resolución numérica de las ecuaciones requiere transformar el dominio continuo en un dominio discreto, formado por una red densa de puntos donde se definen todas las variables que intervienen en el problema.

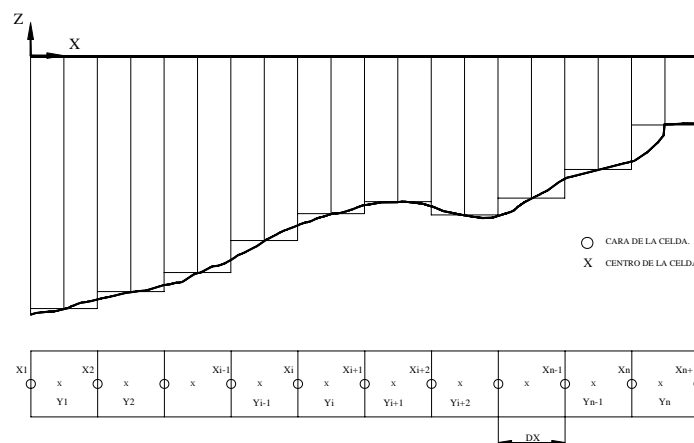


Figura 4-3 Esquema de discretización.

En la figura mostrada se observa que se ha separado el dominio de dos maneras:

- Tomando el valor de la variable de la cara de la celda, (X_i).
- Tomando el valor de la variable en el centro de la celda, (Y_i).

El uso de las variables X_i ó Y_i será función del tipo del método de discretización de las ecuaciones diferenciales, así los módulos de oleaje, corriente y transporte calculan los valores incógnita en la cara de las celdas, y el módulo que resuelve la ecuación de conservación del sedimento obtiene la variación del fondo en el centro de las celdas.

4.3. Aplicación del modelo Petra.

4.3.1 Perfiles.

Los perfiles sobre los cuales se va realizar la modelación son los 4 perfiles representativos que corresponden a cada una de las 4 zonas que se manejaron en el apartado 3.5.2. (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* y *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*).

En la Figura 4-4 se presentan los cuatro perfiles característicos medios de cada una de las cuatro zonas en que se ha dividido la playa en estudio.

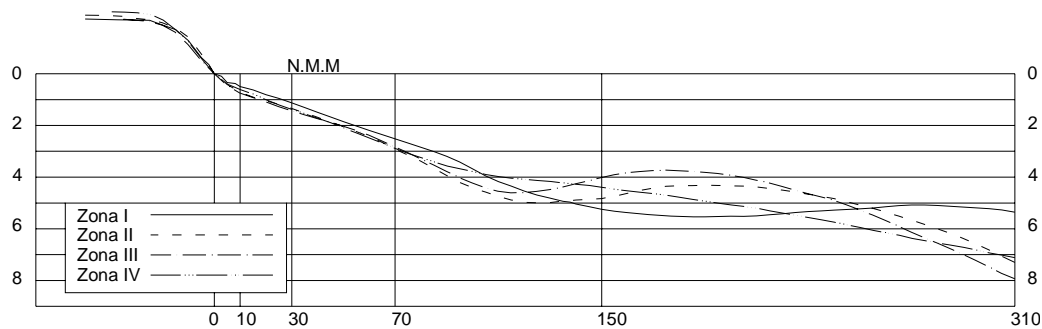


Figura 4-4 Perfiles representativos de las 4 zonas.

Zona	Distancia desde la línea de costa.				
	10m	30m	70m	150m	310m
I	0.50	1.13	2.52	5.25	5.36
II	0.76	1.38	2.95	4.87	7.34
III	0.75	1.43	2.83	4.02	7.93
IV	0.62	1.39	2.90	4.39	7.12
Promedio	0.66	1.33	2.80	4.63	6.94

Tabla 4-1 Valores medios de profundidades por zonas.

Zona	Distancia desde la línea de costa.				
	10m	30m	70m	150m	310m
I	0.055	0.043	0.039	0.036	0.019
II	0.072	0.045	0.042	0.032	0.024
III	0.076	0.048	0.041	0.027	0.026
IV	0.059	0.045	0.041	0.029	0.023
Promedio	0.066	0.045	0.041	0.031	0.023

Tabla 4-2 Pendientes medias por zonas en milésimas.

4.3.2 Temporal de cálculo.

Por su particular ubicación geográfica, Cancún es vulnerable a la incidencia de diversos temporales y por lo tanto a enfrentar sus efectos, los cuales dependiendo de su magnitud, pueden llegar a ser catastróficos. Se eligió al huracán Wilma como el temporal de cálculo, ya que éste ha sido uno de los fenómenos meteorológicos que más daños ha ocasionado en el área de estudio, por lo que su simulación sobre los perfiles rugeos resulta interesante.

- **Trayectoria del huracán Wilma.**

De los avisos meteorológicos publicados por el Servicio Meteorológico Nacional; se recopilaron los 43 avisos relacionados con Wilma, que van del 16 al 23 de octubre del 2005, los cuales se muestran como resumen en la Tabla 4-3.

No	Mes	Día	Hora	Latitud	Longitud	Cat.	Dir.	Vel.	máx. Sost.	Rachas
1	Octubre	16	16.00	17.70	79.60	D.T	W-NE	4	55	75
2	Octubre	17	10.00	16.30	81.50	T.T	SW	7	75	95
3	Octubre	17	16.00	15.80	79.90	T.T	SW	4	85	100
4	Octubre	18	10.00	16.50	80.60	H1	NE	11	120	150
5	Octubre	18	16.00	16.70	81.50	H1	W-NE	13	130	155
6	Octubre	18	22.00	16.80	82.10	H2	W-NE	13	175	215
7	Octubre	19	7.00	17.20	82.80	H5	W-NE	13	280	345
8	Octubre	19	10.00	17.40	83.20	H5	W-NE	11	280	345
9	Octubre	19	13.00	17.50	83.50	H5	W-NE	11	270	345
10	Octubre	19	16.00	17.70	83.70	H5	W-NE	11	260	315
11	Octubre	19	19.00	17.90	83.90	H5	W-NE	11	260	315
12	Octubre	19	22.00	18.10	84.30	H4	W-NE	13	250	305
13	Octubre	20	1.00	18.10	84.70	H4	W-NE	13	250	305
14	Octubre	20	4.00	18.30	85.00	H4	W-NE	13	240	295
15	Octubre	20	7.00	18.30	85.20	H4	W-NE	13	230	295
16	Octubre	20	10.00	18.40	85.50	H4	W-NE	11	230	290
17	Octubre	20	13.00	18.60	85.50	H4	NE	7	230	290
18	Octubre	20	16.00	18.90	85.70	H4	NE	9	240	295
19	Octubre	20	19.00	19.10	85.90	H4	NE	9	240	295
20	Octubre	20	22.00	19.30	86.00	H4	NE	9	240	295
21	Octubre	21	1.00	19.50	86.10	H4	NE	9	240	295
22	Octubre	21	4.00	20.00	86.20	H4	N-NE	9	240	295
23	Octubre	21	7.00	20.10	86.30	H4	N-NE	9	230	295
24	Octubre	21	10.00	20.20	86.50	H4	S-SE	7	230	290
25	Octubre	21	13.00	20.40	86.70	H4	NW	7	225	290
26	Octubre	21	16.00	20.60	86.90	H4	NW	7	220	270
27	Octubre	21	19.00	20.60	86.90	H4	NW	6	220	270
28	Octubre	21	22.00	20.80	86.90	H4	N-NW	6	220	270
29	Octubre	22	1.00	20.80	87.20	H4	ERRATICO	6	215	270
30	Octubre	22	4.00	20.90	87.20	H3	ERRATICO	ESTAC.	205	250
31	Octubre	22	7.00	21.00	87.00	H3	NW	LENTO	195	250
32	Octubre	22	10.00	21.30	87.00	H3	N	4	185	220
33	Octubre	22	13.00	21.20	87.00	H2	ERRATICO	4	175	220
34	Octubre	22	16.00	21.40	87.10	H2	N	4	160	195
35	Octubre	22	19.00	21.60	87.00	H2	N	5	160	195
36	Octubre	22	22.00	21.80	86.90	H2	N	5	155	195
37	Octubre	23	1.00	21.80	86.80	H2	N	5	160	195
38	Octubre	23	4.00	22.10	86.60	H2	N	6	155	195
39	Octubre	23	7.00	22.40	86.10	H2	NE	13	155	195
40	Octubre	23	10.00	22.70	85.80	H2	NE	13	155	195

41	Octubre	23	13.00	23.10	85.30	H2	NE	19	160	195
42	Octubre	23	16.00	23.50	84.90	H2	NE	22	165	205
43	Octubre	23	22.00	24.40	83.70	H3	NE	30	185	220

Tabla 4-3 Avisos del huracán Wilma (fuente CFE).

Se observa que el desplazamiento del huracán Wilma fue lento, llegando a ser hasta categoría 5, sin embargo la mayor parte del tiempo fue de categoría 4 en escala de Saffir-Simpson.

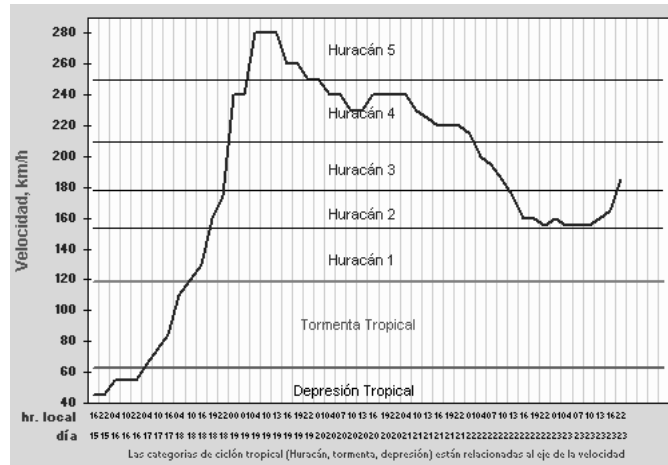


Figura 4-5 Variación de velocidad del viento en el centro del huracán.

- Dispositivo de medición.

Para este estudio, también se contó con datos obtenidos de un equipo Doppler, (AWAC de Nortek As[®]), el cual registró el clima de oleaje entre el 9 de agosto al 24 de noviembre del 2005, y que fue instalado en la batimétrica 20 frente a la costa de Puerto Morelos Q. Roo; lugar que se ubica a 30 km del sitio en estudio.



Figura 4-6 Recuperación del AWAC.

El instrumento midió velocidades de corrientes, períodos, altura y dirección del oleaje almacenando la información en su memoria interna, fue configurado de tal manera que el oleaje fue registrado cada 2 horas recolectando 2048 muestras, con una frecuencia de de 2Hz y con un longitud de muestreo de 1024s. Así mismo el equipo registró también los perfiles de velocidades de corrientes en toda la columna de agua en 22 celdas de 1m de ancho, medidas cada 10 minutos. Dentro de las mediciones registradas se encuentran

las correspondientes al clima de oleaje inducido por la presencia del huracán Wilma en aquella zona, por lo cual se decidió utilizar esta información para simular la evolución morfológica de los perfiles en la zona de interés, (Cancún).

Para determinar el clima de oleaje provocado por el huracán Wilma, se delimitó temporalmente del 16 al 25 de Octubre del 2005 la información obtenida por el quipo.

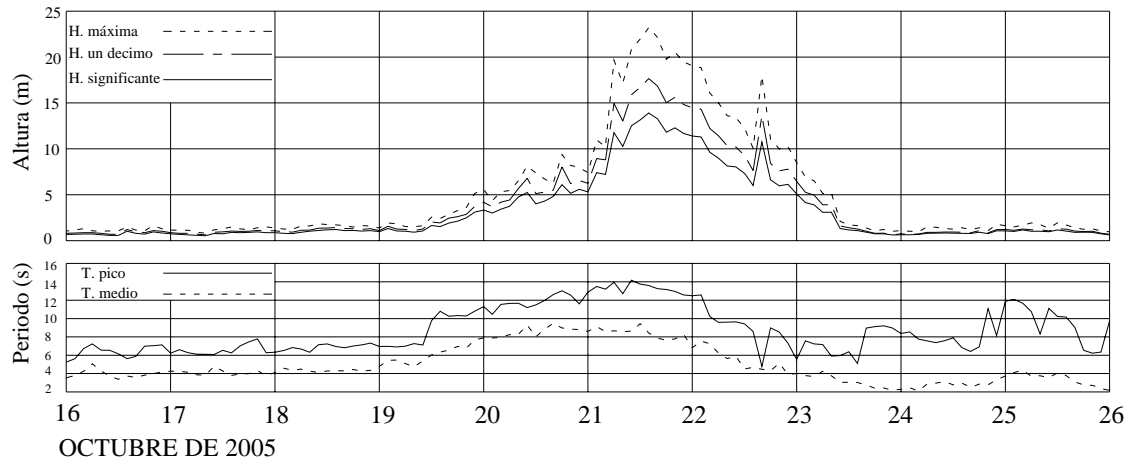


Figura 4-7 Clima de oleaje registrado durante incidencia de Wilma.

- Propagación al pie del perfil.

El modelo Petra limita la duración de los temporales a 96 horas de duración como máximo, por tal motivo se simuló del día 19 de las 22:24 horas al 23 de octubre de 2005 a las 22:24 horas.

En Tabla 4-4 se muestran 16 estados de mar de 6 horas de duración cada uno, los cuales fueron obtenidos del clima de oleaje registrado por el AWAC.

Edo. de mar No	Hs	Tp	Angulo
1	3.22	11.03	139.14N
2	4.24	11.38	138.71N
3	4.34	11.86	134.85N
4	5.31	12.26	130.84N
5	6.31	12.95	124.15N
6	10.21	13.45	106.42N
7	12.29	13.66	100.95N
8	12.02	13.09	101N
9	11.09	12.09	102.69N
10	9.07	10.23	114.48N
11	8.29	8.26	142.78N
12	6.76	8.27	140.59N
13	4.98	7.15	145.86N
14	3.12	6.54	149.66N
15	1.58	6.75	121.88N
16	0.92	8.52	109.72N

Tabla 4-4 Estados de mar del temporal a simular.

Con el modelo de propagación Oluca Mc, se propagó este oleaje hasta la playa, con una malla con el contorno superior en profundidad -20m. Dicha malla tiene unas dimensiones de 3,680 x 11,900m y un espaciado de 8 y 25m en el eje X e Y, respectivamente, el eje x de la malla esta girada 65.40° con respecto al norte.

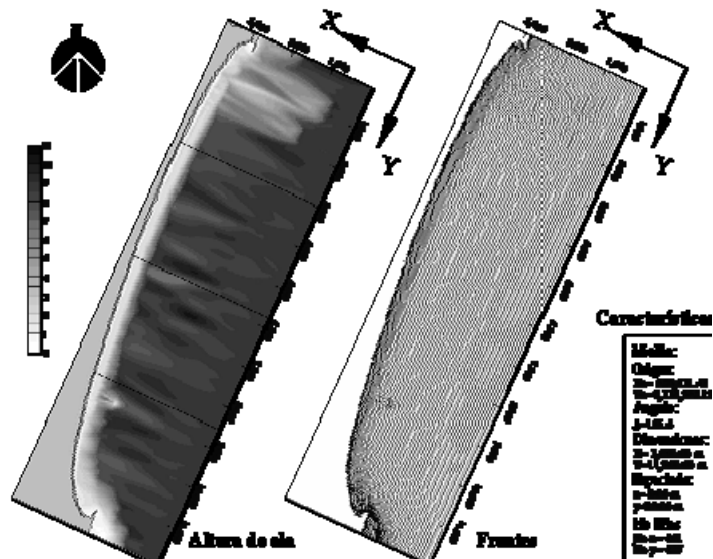


Figura 4-8 Líneas de iso altura de olas y frentes de oleaje de un estado de mar.

En la Figura 4-8 se muestran los resultados de la propagación en la malla de cálculo, (líneas de iso altura de ola y frentes de oleaje) para un estado de mar con $H_s= 9.07$ m, $T_p= 10.23$ s y ángulo de incidencia = 114.48N. Puede observarse, la refracción, asomeramiento y las zonas de abrigo que inducen ambas puntas ya que por efecto sombra reducen la altura de ola a prácticamente la tercera parte de su valor.

En la Tabla 4-5 se presenta a manera de resumen los resultados obtenidos en cada uno de los perfiles para todas las condiciones que representan al estado de mar inducido por Wilma.

Edo. de		Perfil 1		Perfil 2		Perfil 3		Perfil 4	
mar No	T_p	H_s	Angulo	H_s	Angulo	H_s	Angulo	H_s	Angulo
1	11.03	2.50	25.29	3.25	16.21	3.00	15.95	2.50	13.24
2	11.38	3.50	25.96	4.25	17.68	4.00	17.74	3.50	9.37
3	11.86	3.50	23.31	4.00	11.45	4.00	13.50	3.25	9.40
4	12.26	3.50	16.71	6.00	11.32	4.25	10.17	4.50	3.31
5	12.95	3.50	15.34	6.00	9.56	6.50	7.96	5.50	4.05
6	13.45	4.00	8.34	7.50	0.00	5.75	-0.98	7.50	-9.58
7	13.66	4.00	5.89	5.25	-5.11	5.00	-12.96	5.00	-11.37
8	13.09	4.00	6.39	5.00	-1.94	5.50	-12.42	5.25	-11.66
9	12.09	3.50	2.23	6.75	-4.66	5.50	-12.51	8.00	-7.63
10	10.23	3.50	7.92	7.50	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
11	8.26	3.50	38.39	7.00	22.93	8.00	22.53	6.75	17.27
12	8.27	3.50	-37.52	5.75	-14.54	6.25	18.54	5.50	16.15
13	7.15	3.50	45.01	4.00	-29.97	5.00	-29.72	4.00	-23.50
14	6.54	3.00		3.00	-43.61	3.50	-42.38	2.50	-32.52
15	6.75	1.50	-43.44	1.00	-12.05	1.00	-14.74	1.00	-6.79
16	8.52	1.50	-15.66	0.50	0.00	0.75	-2.97	1.00	-4.36

Tabla 4-5 Estados de mar del temporal a simular al pie de cada perfil.

4.3.3. Simulación y resultados.

Tras haber realizado la simulación del temporal, se presentan en las figuras Figura 4-9 los cambios en la geometría para cada uno de los cuatro perfiles para, (0, 48 y 96 horas de simulación).

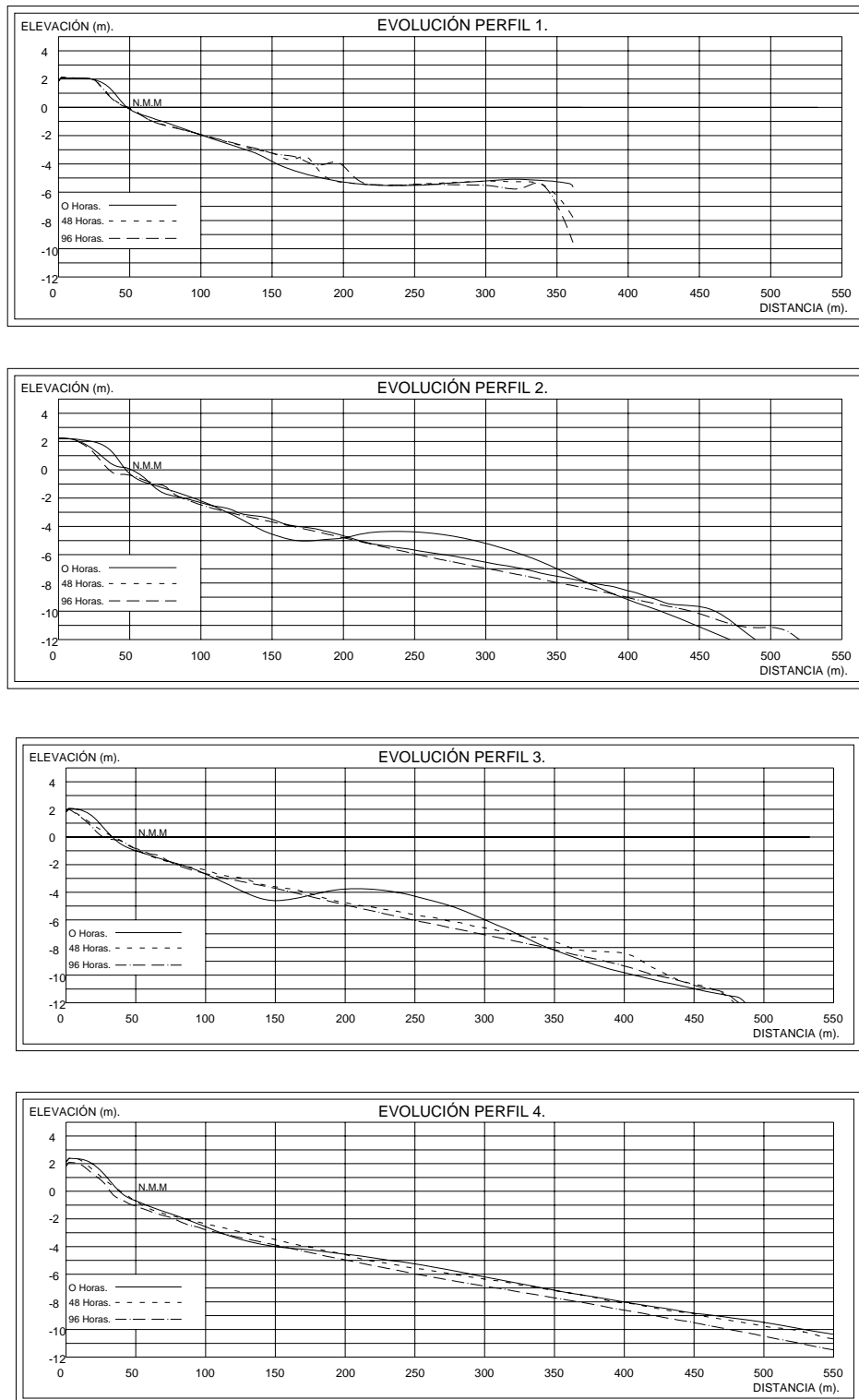


Figura 4-9 Evolución de los perfiles.

Con los perfiles obtenidos, es posible calcular el volumen de erosión o depósito para un ancho unitario, espesor y velocidad de erosión o depósito, movimiento de la línea de costa y la velocidad de este movimiento, los cuales son presentados en la Tabla 4-6.

Perfil	Áreas		Volumen			B	Erosión o depósito		Móv.	Vel. del móv.
	Ai	ai	ANMM	aNMM	Total		Espesor	Velocidad		
	(m ²)	(m ²)	(m ³ /ml)	(m ³ /ml)	(m ³ /ml)	(m)	(m ² /ml)	(m ² /h/ml)	(m)	(m/h)
P1										
0h	78.96	46.3				48.06				
48h	71.49	54.44	-7.47	-8.14	-15.61	48.93	-0.319	-0.007	0.875	0.018
96h	70.43	51.87	-1.06	2.57	1.51	48.10	0.031	0.001	-0.830	-0.017
P2										
0h	81.26	55.44				47.33				
48h	63.62	76.58	-17.64	-21.14	-38.78	51.38	-0.755	-0.016	4.050	0.084
96h	54.5	19.42	-9.12	57.16	48.04	35.56	1.351	0.028	-15.820	-0.330
P3										
0h	46.92	30.57				33.14				
48h	35.78	30.67	-11.14	-0.1	-11.24	34.23	-0.328	-0.007	1.090	0.023
96h	30.16	11.42	-5.62	19.25	13.63	26.73	0.510	0.011	-7.500	-0.156
P4										
0h	63.49	36.81				38.25				
48h	55.97	42.96	-7.52	-6.15	-13.67	39.17	-0.349	-0.007	0.920	0.019
96h	44.49	29.38	-11.48	13.58	2.1	31.64	0.066	0.001	-7.530	-0.157

Tabla 4-6 resultados.

Donde :

A_i = Area por arriba del nivel medio del mar.

a_i = Area por debajo del nivel medio del mar.

ANMM = Arriba del nivel medio del mar.

aNMM = Debajo del nivel medio del mar.

B = Ancho medio transversal de playa.

Dx = Movimiento de la playa entre dos mediciones.

De la Tabla 4-6, se observa que en los 4 perfiles ocurrió pérdida del material por arriba del nivel medio del mar, sin embargo se observa una acumulación por debajo del nivel medio del mar tras 48 horas de haber hincado la simulación. También se observa un retroceso de la línea de costa acentuándose mas en el perfil 2 con 15.82 metros el menor retroceso ocurrió sobre el perfil 1 con 0.83 metros.

Además de la evolución de los perfiles, el modelo Petra también incluye resultados sobre la evolución de la altura cuadrática media del oleaje a lo largo del perfil durante las 0, 48 y 96 horas de simulación como se muestra en la Figura 4-10.

En las Figura 4-11 se muestran los gráficos del incremento y decremento del transporte de sedimentos a lo largo del perfil durante las 0, 48 y 96 horas de simulación.

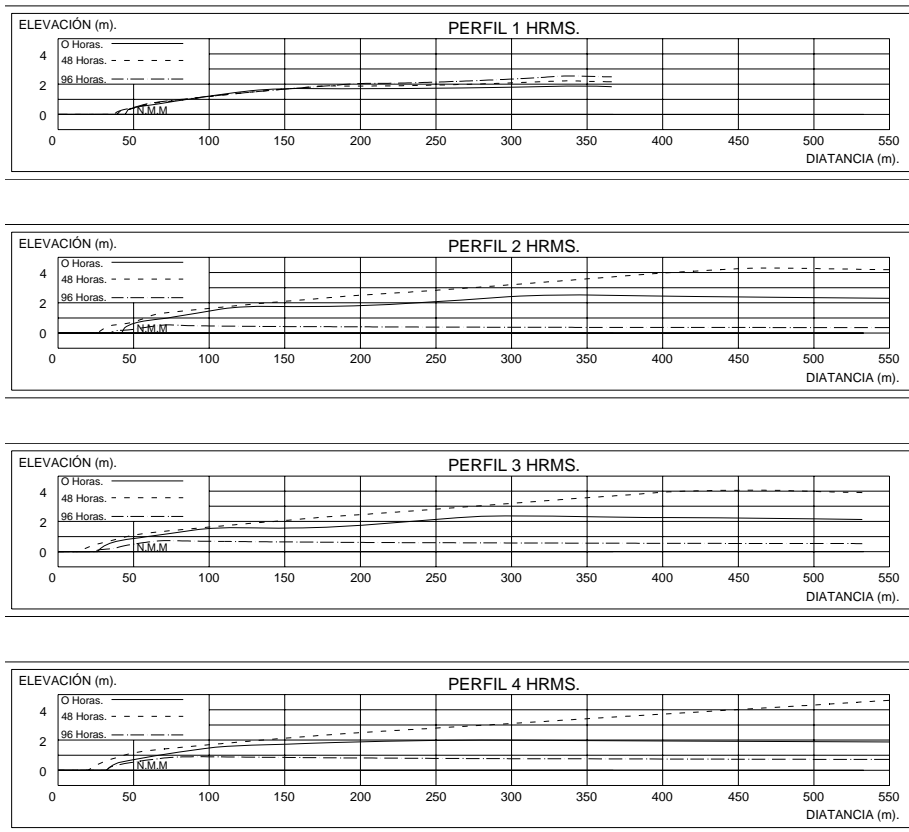


Figura 4-10 HRMS de los perfiles.

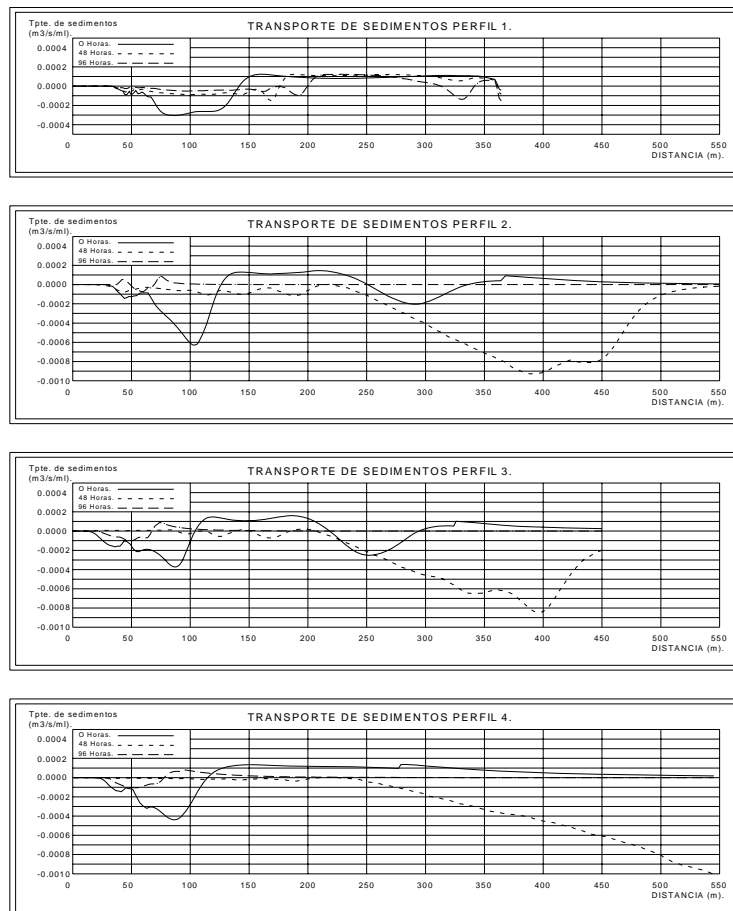


Figura 4-11 Transporte de sedimentos a lo largo de cada perfil.

5. MODELOS DE SIMULACIÓN EN PLANTA.

Para poder conocer los patrones morfodinámicos del área de interés se han utilizado una serie de modelos numéricos del Sistema de Modelado Costero, (*SMC*[®]), elaborados en la Universidad de Cantabria, España por el grupo de Ingeniería de Costas y Puertos.

Los Modelos numéricos empleados fueron: El modelo integral de morfodinámica de playas, (*MOPLA*), con el cual se puede simular la propagación de oleaje desde aguas indefinidas hasta la línea de costa con el modelo OLUCA y a partir de este oleaje simulado, se llevó a cabo el cálculo de corrientes inducidas en la zona de rompientes mediante COPLA, y finalmente, conocer la evolución morfodinámica con EROS. Estos modelos serán explicados más adelante.

5.1. Batimetría del sitio en estudio.

Es necesario contar con una batimetría de lo mas preciso posible, para generar un proyecto de propagación de oleaje, corrientes o transporte de sedimentos confiable para lo cual se realizó una recopilación de cartas náuticas y batimetrías.

5.1.1 Recopilación de información.

Se utilizaron dos cartas náuticas:

- La carta náutica No. 28202 de Esc. 1:30,000, de la “National imagery and mapping agency”¹, que corresponde a la zona de Cancún-Isla mujeres y delimitada por las coordenadas 21°20'8.4" lat. N 86°38'10" long. W a 20° 01' 8.4" lat. N 86° 50' 40" long. W.
- La carta náutica No. 27120 de Esc. 1:350,000, de la “National imagery and mapping agency”⁸ que corresponde a la zona comprendida entre la península de Yucatán a la isla de Cuba, (*canal de Yucatán*), delimitada por las coordenadas 23°57'00" lat. N 84°40'00" long. W a 20° 30' 00" lat. N 87° 12' 00" long. W.



Figura 5-1 Carta No. 28202.

¹ Agencia norteamericana encargada de realizar cartografías

Por otra parte, se contó con el levantamiento realizado por la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la CFE; que se realizó durante el mes de febrero de 2006. Este levantamiento topo-batimétrico cubre los 12 Km de extensión que hay entre punta Cancún en el norte hacia punta Nizuc al sur, con seccionamientos a cada 100 m y extendiéndose hacia el mar hasta la cota -14 aproximadamente. Cabe mencionar que las coordenadas correspondientes a este levantamiento son UTM referidas al Datum ITRF 92, con elipsoide GRS 80.

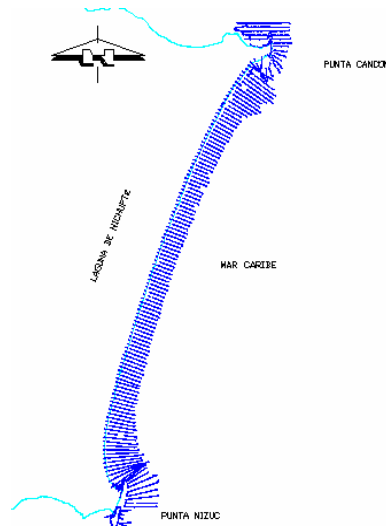


Figura 5-2 Levantamiento topo-batimétrico.

5.1.2 Procesamiento de la información.

Dado que el sistema de referencia de las cartas náuticas, (*coordenadas geográficas*) y el plano topo-batimétrico son distintos, fue necesario llevar a cabo una serie de transformaciones, las cuales consistieron en:

- a).- Una vez escaneadas las cartas, fueron escaladas y orientadas utilizando un formato "DWG"², y posteriormente fueron digitalizadas.
- b).- Los puntos batimétricos e isolíneas de cada carta se almacenaron en archivos ASCII del tipo batimetría XYZ.
- c).- Se realizó la transformación de dichos puntos, de coordenadas geográficas a las mismas coordenadas con las que se cuenta en el levantamiento topo-batimétrico.
- d).- Estas coordenadas obtenidas de las cartas fue anexada a las coordenadas del levantamiento topo-batimétrico.

² Formato que permite abrir y modificar archivos de Autocad®.

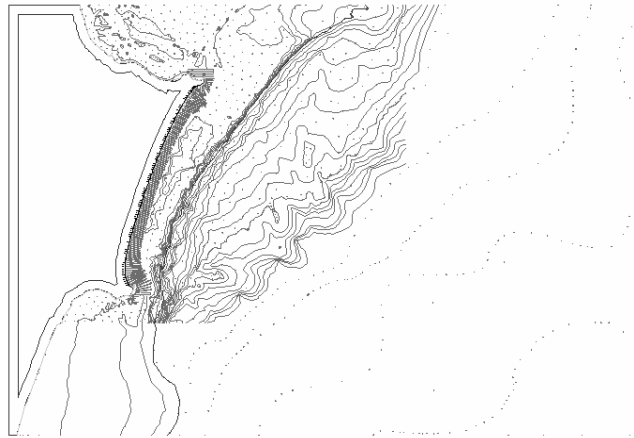


Figura 5-3 Cartas náuticas + levantamiento topo-batimétrico.

e).- Posteriormente se realizó una interpolación de dichas coordenadas de tal manera que se generó una malla uniformemente espaciada de puntos batimétricos, conocida como “GRD”³, indispensable para las aplicaciones a realizar.

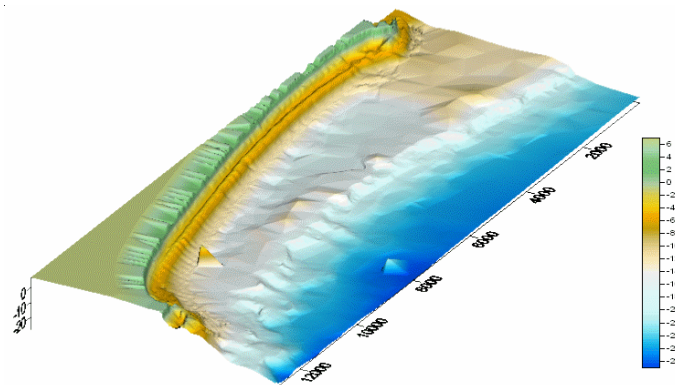


Figura 5-4 Cartas + levantamiento después de un proceso GRD.

5. 2 Modelado del oleaje.

El oleaje generado por viento en mar abierto, está formado usualmente por componentes que abarcan una gama ancha de frecuencias. A medida que estas se propagan a lo largo de la plataforma continental hacia la costa, las componentes con frecuencias altas se propagan con una menor celeridad que las de frecuencias bajas. Pero son las ondas largas las que toman la delantera con respecto al grupo de ondas que viaja a medida que se propagan hacia la costa.

En aguas profundas, las ondas generadas por el viento no se ven afectadas por la batimetría, pero a partir que el tren de ondas comienza a propagarse en aguas mas someras éste empieza a refractarse por efectos de la batimetría, corrientes o se difracta alrededor de repentinias y grandes variaciones del fondo, tales como cañones, sumideros,

³ Formato que permite abrir y modificar archivos de Surfer®

bajos, etc. Parte de esta energía es reflejada hacia mar abierto, pero a medida que la propagación continúa hacia la costa las ondas pierden parte de su energía, por efectos de la fricción en el fondo, la amplitud de la onda aumenta, por efectos de someramiento, y la longitud de onda se va reduciendo.

Dado que en aguas poco profundas la celeridad de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad, el frente de ondas se desplaza a una velocidad menor que la cresta de la onda, dando lugar a un vuelco de la cresta. Este vuelco genera un chorro de agua que se inyecta cerca de la base de la onda, dando lugar a una gran salpicadura. La turbulencia asociada a esta rotura de la onda es responsable, además de una gran disipación de energía, del transporte de sedimentos que se produce en la zona de rompientes.

5.2.1 Modelo numérico.

En general los modelos de propagación de ondas, se pueden clasificar en dos grupos:

1.- Los modelos basados en la simulación de flujos de superficie libre, que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes o las ecuaciones de Boussinesq.

2.- Los modelos basados en la teoría de propagación de ondas, en este grupo se encuentran los de la teoría del rayo y la ecuación para pendientes suaves, (*mild-slope equation*), los cuales asumen una serie de hipótesis sobre el fenómeno, que pueden llegar a ser restrictivas o irreales. Es en este grupo donde el modelo de propagación de ondas utilizado (Oluca Mc/Sp) pertenece.

El modelo de propagación de ondas Oluca Mc/Sp se basa en las siguientes hipótesis:

- El fluido se considerara no viscoso, incompresible y de densidad constante.
- El flujo es irrotacional y estacionario.
- En cuanto a las dinámicas actuantes no se considera la acción del viento ni la fuerza de Coriolis, la presión es constante en la superficie libre.
- Fondo con pendiente suave: El desarrollo matemático de las ecuaciones del modelo, se plantean con la hipótesis de que las variaciones del fondo con las coordenadas horizontales son pequeñas en comparación con la longitud de onda. Para el modelo lineal, Berkhoff, (1982) realizó una comparación entre un modelo numérico exacto y el de la ecuación de pendiente suave para ondas propagándose sobre una playa. Encontró que hasta pendientes del fondo de 1:3 el modelo de la pendiente suave es exacto y que para pendientes mayores predice adecuadamente las tendencias.

- En cuanto a la propagación se considera:

a).- No linealidad débil:

Dependencia débil de la ecuación de la dispersión con la amplitud de la onda o la altura de olas significativa, (*spectral*); modelo no lineal Stokes Hedges.

b).- Aproximación parabólica:

Las ondas se propagan en una dirección principal, (x), con lo cual se desprecian los términos $\left[\frac{\partial^2 ()}{\partial x^2} \right]$. La solución es tanto más aproximada en cuanto menor variación haya respecto a la dirección x .

Las principales limitaciones de la aplicación del modelo son:

- Limitaciones por propagación.
 - a).- La pendiente del fondo deben ser menores de 1:3, para garantizar la condición de pendiente suave.
 - b).- El ángulo de propagación en la primera fila, ($x = 0$) de la malla, debe estar dentro del rango $\pm 55^\circ$, con respecto al eje de propagación principal, eje x .
 - c).- Se debe tener especial cuidado para que la zona de estudio no se encuentre dentro de ángulos de propagación mayores a $\pm 55^\circ$ con respecto al eje x , dado que los errores comienzan a ser importantes para estos ángulos. Orientar en lo posible el eje x de la malla en la dirección principal de propagación del oleaje.
 - d).- El modelo ha sido diseñado principalmente para ser aplicado en zonas costeras y playas, donde los fenómenos de propagación dominantes son la refracción, asomeramiento, difracción y rotura en playas. No es aplicable en casos donde la reflexión es un fenómeno importante, como es el caso de resonancia y agitación en puertos.

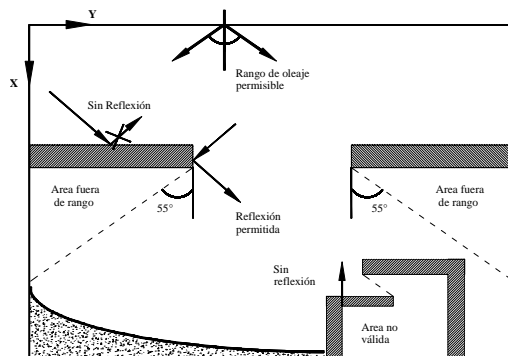


Figura 5-5 Zonas válidas de propagación modelo Oluca.

- Limitaciones por contorno y condiciones iniciales.
 - a).- Evitar cambios bruscos de profundidad en la batimetría.
 - b).- En la primera fila en, ($x = 0$) se definen las condiciones iniciales del oleaje, es decir que en esta fila se asume el oleaje incidente igual para todos los puntos, (*amplitud, período y dirección*), en la medida de lo posible se debe tratar que las profundidades en dicha fila no presenten variaciones muy fuertes.
 - c).- El modelo numérico se impone unas condiciones de contorno laterales; reflejantes o abiertas aplicando la ley de Snell, por tal motivo, se debe intentar mantener el efecto de

los contornos laterales, lo más alejado posible de la zona de estudio y dentro de lo posible, intentar que la batimetría en dichos contornos sea lo más paralela al eje, (y).

d).- Evitar los contornos laterales que alternan agua-tierra-agua, porque pueden generar ruidos numéricos en la ejecución.

e).- Debido a limitaciones del modelo numérico en los contornos, el modelo propaga las ondas en profundidades mayores a 0.30 m.

e).- Por efectos del modelo numérico, internamente el programa limita las batimétricas en tierra a (-7.0 m).

f).- Existen limitaciones en los tamaños máximos y mínimos de los elementos (Δx , Δy) en las mallas del dominio de cálculo. Se debe de tener especial cuidado en las cercanías de diques exteriores, en grandes profundidades, ($h > 20 m$), donde existe un tamaño mínimo de malla relacionado también con el período del oleaje y la profundidad.

5.2.2 Oleaje a propagar.

Las características del oleaje varían de una zona a otra de la costa, tanto por factores relacionados con la generación del mismo, como por su propagación hacia la costa, por lo que el primer dato requerido a la hora de caracterizar el oleaje reside en seleccionar el área de interés. Esto se logra después de analizar la batimetría y teniendo en cuenta las direcciones del oleaje que se van a propagar e identificando aquellos aspectos geomorfológicos y batimétricos significativos, (*bajos, cañones, penínsulas, islas, etc.*) que deban incluirse en dicha propagación del oleaje hacia la zona de estudio.

Para el inicio de propagación del oleaje en Cancún se recopilaron los datos del oleaje significativo estacional y anual medios en Cancún en aguas profundas, entre diciembre de 1989 a noviembre de 1990 y el registro del oleaje anual Ocean Waves Statistics, (OWS).

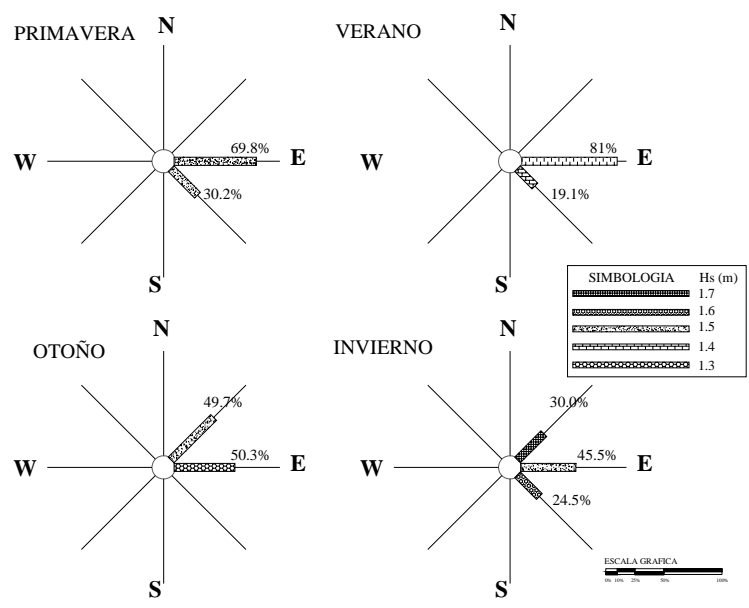


Figura 5-6 Oleaje significativo estacional medido Cancún Q. Roo.

Dirección	NE	E	SE	S
%	21.57	44.37	24.58	9.47
Hs (m)	1.58	1.48	1.54	1.5
Ts (s)	7.81	7.51	8.06	8.68

Tabla 5-1 Oleaje significativo anual medido Cancún Q.Roo.

Dirección	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
%	8.89	16.94	34.76	19.27	7.44	3.78	3.43	5.49
Hs (m)	2.13	1.84	1.72	1.83	1.75	1.66	2.12	2.46
Ts (s)	9.98	8.3	7.47	8.59	9.41	7.9	7.51	9.53

Tabla 5-2 Oleaje significativo anual fuente OWS, (Ocean waves statics).

Comparando las distintas fuentes de oleaje se observan tres direcciones principales E, NE y SE, siendo la dirección E la más predominante, ya que se presenta a lo largo de todas las estaciones del año, particularmente en primavera y verano debido a la acción de los vientos alisos provenientes del Este. La dirección SE tiene presencia en las estaciones de primavera, verano e invierno. En otoño e invierno debido a la presencia de los frentes fríos se observa una componente NE.

Se deduce que las características energéticas de las direcciones predominantes influyen en los cambios morfológicos en el área de estudio. Al comparar los datos anuales de las dos fuentes se observa una diferencia menor del 15% en las alturas de ola entre los datos medidos y los obtenidos del (OWS). Por tal motivo se han elegido los datos de la fuente, (OWS) para las direcciones predominantes para la propagación del oleaje ordinario.

Por otro lado se propone la propagación de un caso con condiciones extremas de oleaje y que corresponde a un estado de mar registrado durante la incidencia de Wilma, el estado más crítico.

En la Tabla 5-3 se presentan las características necesarias de propagación para 4 casos seleccionados de los cuales 3 son de condiciones estacionales y un cuarto para las condiciones extraordinarias. Con el uso del modelo numérico se obtendrán mapas de isoalturas de olas, y vectores de oleaje.

No Caso	Dirección	H (m)	T (s)
1	45N	1.84	8.30
2	90N	1.72	7.47
3	135N	1.83	8.59
4	101N	12.29	13.66

Tabla 5-3 Casos de propagación.

Para iniciar la propagación, es necesario definir los límites de profundidades indefinidas, donde las olas del estudio comienzan a verse afectadas por los efectos de asomeramiento, refracción, difracción, etc. Para los tres primeros casos que tienen períodos de ola entre 7.5 a 8.6 s y que con éste se definen los límites en profundidades indefinidas **d**. Una aproximación para definir **d** es por medio de la relación:

$$d \simeq 0.5L_0 \quad (5.1)$$

Donde:

L_0 = Longitud de onda en aguas profundas.

Como los valores del cuarto caso fueron obtenidos directamente de profundidades intermedias (*cota -20 metros*), el inicio de la propagación será esa profundidad.

PROFUNDIDAD DE PARTIDA (d)		
CASO	L_0 (m)	d (m)
1	107.16	53.58
2	86.80	43.40
3	114.78	57.39
4	117.49	20

Tabla 5-4 Profundidad de inicio de propagación.

En la Tabla 5-4 se muestra el valor **d**, el cual corresponde a la profundidad de partida o cercana a ella, a partir de la cual el oleaje es propagado hacia la costa, en todo el dominio de cálculo, en el modelo de propagación este punto de interés coincide con el punto, ($IR=1$, $JR=1$).

5.2.3 Dimensionamiento del área de estudio.

Para la aplicación del modelo se requiere transformar el dominio continuo, en un dominio discreto, (*una red densa de nodos*), en donde se definen cada una de las variables, ($h, H, \eta, etc.$) que intervienen en el problema. El número de nodos de la red rectangular es de MR x NR para los ejes X e Y respectivamente.

Donde el eje X tiende aproximadamente la dirección de propagación del oleaje, desde mar adentro hacia la línea de costa. En cada uno de los puntos el modelo numérico define los datos de entrada, la profundidad, las componentes U, V de la velocidad de las corrientes, los valores de amplitud compleja. Se asume que si el sistema de coordenadas X,Y tiene un origen en el punto, ($IR, JR = 1,1$) los nodos estarán separados a una distancia DXR, DYR uniforme en las direcciones X e Y, respectivamente.

El modelo de propagación de oleaje permite de acuerdo al dimensionamiento de matrices una malla de tamaño máximo de hasta 500 x 500 celdas.

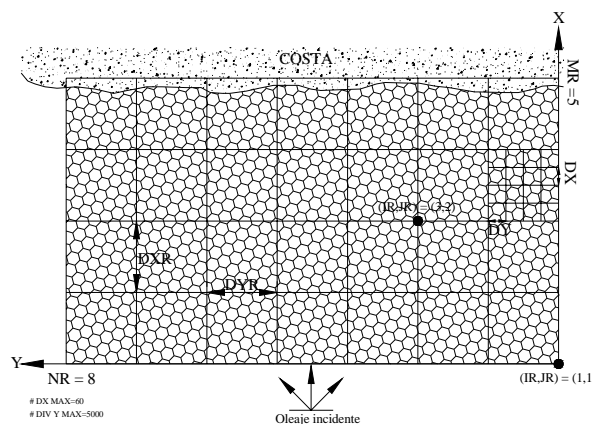


Figura 5-7 Dominio discreto.

El programa admite realizar una subdivisión de las celdas, obteniendo así una malla más fina. Esto es recomendable en aquellas zonas donde se requiere una mejor resolución como es en la zona cercana a la costa. Las subdivisiones de cada celda están separadas una distancia DX, DY.

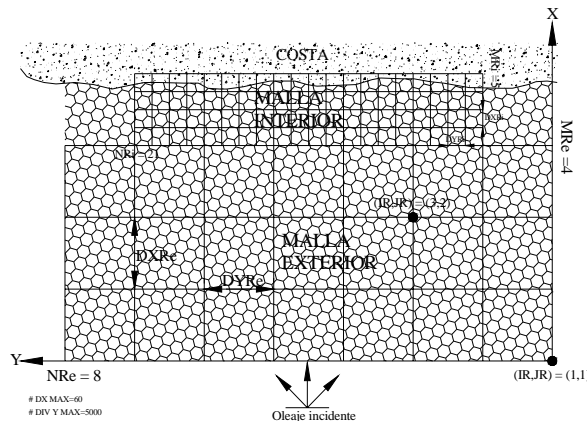


Figura 5-8 Malla exterior e interior.

Una vez identificados los límites de profundidad para cada caso, se puede definir, si la propagación del oleaje hacia la costa es posible realizarla mediante una sola malla, o con un conjunto de mallas anidadas de diferente resolución.

El empleo de mas de una malla, se debe de realizar siempre y cuando las profundidades límites **d**, puedan estar muy alejadas de la costa, (*depende de la batimetría*). Para casos estudiados que tienen periodos mayores a 8 segundos requirieron el uso de dos mallas, ya que el límite de aguas indefinidas está alejado de la línea de costa.

CASO	Mallas a utilizar	MALLA EXTERIOR								MALLA INTERIOR					
		Coord. origen		Angulo	Dimensiones		Espaciado		Coord. origen		Angulo	Dimensiones		Espaciado	
		X	Y	a	x	y	DX	DY	X	Y	a	x	y	DX	DY
4	1	530863.6	2335579.5	151.18	4780	12420	20	30							
1	2	536781.7	2335396.5	169.63	7860	12900	20	60	529050.1	2336811.4	169.63	4780	12900	20	30
2	2	537981.5	2332211.0	151.18	7860	12900	20	60	530863.6	2335579.5	151.18	4780	12420	20	30
3	2	537981.5	2332211.0	151.18	7860	12900	20	60	530863.6	2335579.5	151.18	4780	12420	20	30

Tabla 5-5 Dimensiones y características de las mallas empleadas para la propagación.

De la Tabla 5-5 se aprecia que la malla exterior presenta un tamaño de elementos de acuerdo a las variaciones espaciales de la batimetría. Esta malla se extiende en el eje **X**, hasta cuando se presenten variaciones en la batimetría que sean menores a los tamaños de los elementos de la malla, la nueva malla con mayor resolución se anida en la última fila en **X**.

Por otro lado se ha considerando la restricción del ángulo máximo permitido para la propagación del oleaje es de 55° con respecto al eje x de la malla, para cumplir con esta restricción fue necesario contar con dos mallas orientadas con diferentes ángulos para propagaciones menores a 60N y mayores a 81N.

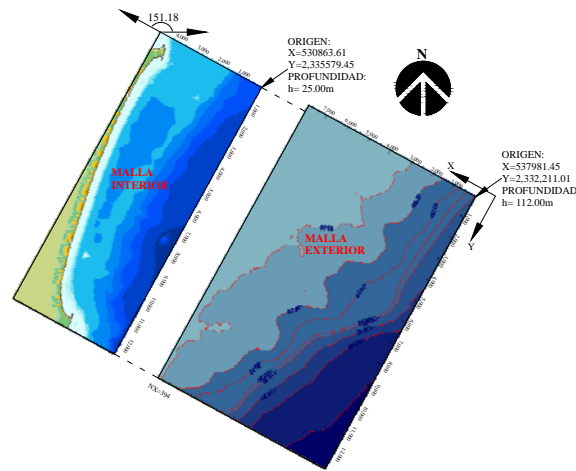


Figura 5-9 Malla interior y exterior caso 2 y 3 con $a= 151.18^\circ$.

- Malla interior.

La batimetría cercana a la línea de costa es prácticamente muy somera, encontrándose profundidades máximas de 9m a 310m de la orilla, frente al kilometraje 6+000, el cual se encuentra prácticamente en medio de toda el área de estudio.

Se observa que las curvas batimétricas entre la -10 y la línea de costa son paralelas. Entre la curva -10 a la -12.5 se observa una franja amplia la cual presenta su ancho máximo en la parte norte, cercana a punta Cancún, situación que indica que en este sector existen profundidades mas bajas que en el resto del área en estudio. Entre la curva -12.5 a la -15 se presenta una franja muy ancha a lo largo de toda la malla, dentro de esta franja, se observa un bajo ubicado frente a playa delfines frente al kilometraje 9+700 y a 750m de la línea de costa, presenta una profundidad mínima de 2.5m.

Además entre los kilometrajes 2+500 a 9+700 dentro de esta misma franja, se ubica una depresión en el fondo con forma alargada y profundidad de 17.5m.

5.2.4 Resultados.

Para poder describir de una manera clara la distribución del oleaje se describirá en función del coeficiente de propagación que es la relación entre la altura de ola observada y la altura de ola propagada.

- Caso 1, ($H=1.84m$, $T= 8.36s$, $\alpha= 45N$).

Malla exterior:

El oleaje propagado incide sobre las líneas batimétricas con un ángulo menor a 16° , esta configuración provoca que los frentes de onda se refracten y sufran cambios a partir de la curva -50. En los límites de esta malla se observa un coeficiente de propagación que varía entre 0.92 a 1.1.

Malla interior:

Del oleaje propagado hacia la costa, se observaron ciertos sectores donde se presento un coeficiente de propagación elevado, debido a que el oleaje al refractarse aglutina líneas donde se experimenta una mayor concentración de energía. También se observó una gran variabilidad transversal de alturas de ola.

Intervalo	Long.	Hi	Kp	a
Punta Cancún	100	1.89	1.03	66.8N
1+100 a 1+400	300	1.28	0.70	79.33N
1+900 a 2+300	400	2.93	1.59	82.03N
2+600 a 2+700	100	2.21	1.20	91.07N
2+800 a 3+100	300	2.41	1.31	94.27N
3+300 a 3+700	400	2.58	1.40	87.36N
9+500 a 9+700	200	2.66	1.45	103.79N
10+400 a 10+700	300	2.24	1.22	76.89N
11+000 a 11+400	400	2.56	1.39	71.88N
Punta Nizuc	100	2.02	1.10	53.90N

Tabla 5-6 Intervalos de mayor coeficiente de propagación caso 1.

De acuerdo a esta propagación, el oleaje incide con más energía hacia los extremos, Se observa que casi todos los sectores, la dirección del oleaje que incide hacia la línea de costa se mantiene dentro del primer cuadrante, (0-90 N) a excepción del oleaje que incide entre los kilometrajes 9+500 a 9+700, el cual presenta un ángulo de incidencia dentro del segundo cuadrante de 103.8N. Este cambio de dirección es debido a los efectos de difracción que causa el bajo que se encuentra frente a ese sector.

- Caso 2, ($H=1.72m$, $T= 7.47s$, $\alpha= 90N$).

Malla exterior:

Al iniciar la propagación el oleaje incide sobre las curvas batimétricas con un ángulo de 60° provoca una ligera refracción del oleaje, manifestándose a partir de la curva batimétrica -40, en los límites con la malla interior se observan los frentes de oleaje con coeficientes de propagación que varían de 0.73 a 1.

.Malla interior:

En la Tabla 5-7 se indican los sectores mas afectados para esta propagación:

Intervalo	Long.	Hi	Kp	a
Punta Cancún	100	1.48	0.86	101.53N
1+800 a 2+300	500	2.92	1.70	111.10N
3+500 a 3+900	400	1.98	1.15	104.80N
4+500 a 5+200	700	2.05	1.19	103.81N
6+500 a 6+800	300	1.95	1.13	97.00N
7+000 a 7+400	400	2.10	1.22	96.31N
7+800 a 9+000	1200	1.76	1.02	99.67N
10+300 a 10+500	200	2.07	1.20	95.00N
Punta Nizuc	100	2.04	1.19	79.47N

Tabla 5-7 Intervalos de mayor coeficiente de propagación caso 2.

En este caso se observan incidencias de oleaje con un coeficiente de propagación mayor a lo largo de todo el dominio. En todos los sectores con excepción al de punta Nizuc el oleaje incidente refractado se propaga con un ángulo de incidencia perteneciente al segundo cuadrante.

- Caso 3, ($H=1.83m$, $T= 8.59s$, $\alpha= 135N$).

Malla exterior:

El oleaje propagado incide con respecto a las curvas batimétricas de manera casi perpendicular a estas, pasando por la batimetría -40 se aprecia un sensible cambio en las alturas de ola con un coeficiente de propagación de 0.95. Después de la batimetría -30m el oleaje experimenta una sensible refracción y someramineto. Esto origina un aumento en el coeficiente de propagación a 1.10 en tres pequeños sectores, mientras que el resto de dicho dominio el coeficiente de propagación se mantiene en un intervalo de 0.82 a 0.95.

Malla interior:

En la Tabla 5-8 se indican los sectores mas afectados para esta propagación:

Intervalo	Long.	Hi	Kp	a
Punta Cancún	100	0.39	0.21	160.23N
1+100 a 1+500	400	1.79	0.98	136.84N
2+300 a 4+500	2200	1.98	1.08	128.60N
6+100 a 6+500	400	2.4	1.31	125.86N
6+900 a 7+300	400	2.4	1.31	125.18N
9+500 a 9+700	200	2.33	1.27	96.68N
Punta Nizuc	100	1.15	0.63	87.91N

Tabla 5-8 Intervalos de mayor coeficiente de propagación caso 3.

En este escenario se observa que los sectores en donde el oleaje incide hacia la costa con un coeficiente de propagación mayor de 1 se encuentran distribuidos de manera uniforme con una tendencia mayor hacia punta Cancún.

Aquí se observa que el ángulo de incidencia del oleaje en el sector Punta Nizuc es del primer cuadrante, todos los demás sectores presentan un ángulo del segundo cuadrante.

- Caso 4, ($H=12.29m$, $T= 13.66s$, $\alpha= 101N$).

En este caso el oleaje fue propagado en una malla, los frentes de ondas empiezan a propagarse incidiendo con un ángulo de 51° con la curva de nivel de -25 m, entre la curva -20 a la -25 m se observa que el coeficiente de propagación varía entre 0.98 a 1.10. Entre las curvas -20 y -15 el coeficiente de propagación varía entre 0.78 a 1.00.

En el área comprendida entre punta Cancún y los afloramientos rocosos cercanos a ésta se observa que el oleaje incide con un ángulo de 115N y un coeficiente de propagación cercano a 0.25. Por otro lado en Punta Nizuc, la altura de ola fue de 2.11m con una incidencia de 80.54N.

Un poco mas al sur, frente al kilometraje 1+400, el oleaje incide hacia la costa con dirección 76.5N, frente al kilometraje 3+300 el ángulo de incidencia es de 75.50N, frente al kilometraje 6+300 es de 66.34N y frente al kilometraje 9+300 el ángulo de incidencia es de 82.07N, todos estos datos obtenidos a una profundidad de -6m.

De acuerdo a las condiciones de oleaje que se presentaron sobre la curva batimétrica -5, se observo que el sector que se encuentra entre los kilometrajes 8+000 al 9+100, presento el mayor valor en el coeficiente de propagación con 0.33. En contra parte el sector delimitado por los kilometrajes 0+800 al 1+000, presentó el coeficiente de propagación mas bajo con 0.14. Un coeficiente de propagación de 0.28 que corresponde a una altura de ola de 3.5 metros y este fue el valor que más veces se presentó frente a distintos kilometrajes.

También se observo la evolución que experimentó la altura de ola sobre la curva batimétrica -2.5, presentándose el siguiente comportamiento: Entre los kilometrajes 11+100 al 11+300, se presentó un coeficiente de propagación de 0.16 con una altura de ola de 2.00m que fue el máximo registrado. Entre los kilometrajes 12+200 al 12+300, el coeficiente de propagación fue el mínimo con 0.06, la altura de ola registrada fue de 0.70m y un coeficiente de propagación de 0.14 entre los kilometrajes 1+400 a 9+00.

5.3. Modelado de corrientes.

Las corrientes que se generan en la costa influyen de forma importante en la conformación morfológica de las playas, siendo este sistema de corrientes, en muchos de los casos, de gran complejidad. Jonson, (1919), distinguió los siguientes tipos de corrientes que pueden contribuir al desarrollo de la línea de costa; corrientes debidas al oleaje, corrientes de marea, debidas al viento, corrientes planetarias asociadas a sistemas oceánicos circulatorios, las corrientes debidas a ríos, etc. De todas ellas, en la mayoría de los casos, las corrientes debidas al oleaje son las más importantes en el desarrollo de la línea de costa.

La rotura del oleaje genera una corriente fundamentalmente paralela a la playa, que es función del ángulo con el que el oleaje aborda la costa, (*corrientes de incidencia oblicua*) y de su altura de ola. Estas corrientes denominadas corrientes longitudinales, son de especial importancia en la disposición de equilibrio de una playa y mas concretamente en su forma en planta debido a su importante potencial de transporte de arena.

5.3.1 Modelo numérico.

Es necesario el modelado del sistema circulatorio en la zona de rompientes, para resolver el transporte de sedimentos y las variaciones morfológicas en la línea de costa. Los modelos Copla, (*MC* y *SP*), son modelos numéricos que resuelven las ecuaciones de flujo dentro de la zona de rompientes, tomando como datos de entrada los datos de salida del campo de oleaje calculado a partir de los modelos Oluca, (*MC* y *SP*).

El modelo Copla, (*MC* y *SP*) se basa, fundamentalmente, en la resolución de la ecuación de continuidad y las ecuaciones promediadas del movimiento, que requieren

expresiones para las tensiones tangenciales y turbulentas que obligan a introducir una serie de ecuaciones de cierre.

Con el fin de simplificar el modelo circulatorio, se reduce una dimensión, pasando a los modelos bidimensionales, (2-D). Existen dos aproximaciones diferentes de estos modelos, los puramente **2-D**, (2-DV, *Rally y Dean 1984, Stive y Battjes, 1984*), donde se asume que las velocidades y gradientes en la dirección paralela a la costa son nulos y los resultados obtenidos son velocidad y niveles. Por su parte los modelos 2-DH, (*Basco, 1983, De Vriend, 1987*) resuelven las ecuaciones del movimiento y de continuidad integradas en vertical sobre una malla y como resultado se obtiene niveles y las dos componentes horizontales de la velocidad; sin embargo, presentan el inconveniente de perder la estructura vertical del flujo.

El modelo Copla, (MC y SP) es un modelo circulatorio, bidimensionales **2-DH**, la resolución numérica utilizada en este modelo, es diferencias finitas y esquemas de tipo implícito, dado que éstos reducen las inestabilidades numéricas. El modelo bidimensional de corrientes en playas Copla, (MC y SP) está basado en las siguientes hipótesis:

- El fluido se considerara homogéneo, incompresible y de densidad constante.
- En cuanto al flujo:

La cambio del fondo del mar con respecto a la horizontal es lenta, (*aceleraciones verticales muy pequeñas*), lo que implica que las principales características del sistema de corrientes en playas estén contenidos en la variación horizontal de las propiedades integradas en la profundidad, por lo que la velocidad de corriente, (U , V) es independiente de la profundidad.

Los movimientos asociados a las corrientes de playa son permanentes, permitiendo esto promediar las ecuaciones que los representan en el tiempo, (*período del oleaje*) lo cual significa que para períodos de tiempo mayores al del período del oleaje las variaciones temporales son despreciables. Cada tren de ondas incidente crea su propio sistema circulatorio de corrientes.

Los efectos de viscosidad molecular son débiles, excepto en contornos, en consecuencia, se puede admitir que el movimiento oscilatorio es esencialmente irrotacional, (*Longuet-Higgins y Stewart, 1962*). Las fluctuaciones turbulentas debidas al oleaje son despreciables.

Las corrientes son suficientemente débiles como para considerarse su interacción con el tren de ondas.

- En cuanto a las dinámicas actuantes no se considera la acción del viento ni la fuerza de Coriolis y la presión es constante en la superficie libre.
- En cuanto a los contornos, como los modelos Copla- MC/SP se ejecutan a partir de los resultados de los modelos Oluca- MC/SP, éste emplea como contornos los mismos definidos en la malla de propagación.

5.3.2 Resultados.

Un análisis de los sistemas de corrientes obtenidos para los diferentes casos se describe a continuación y los mapas de isolíneas de velocidades y vectores de corrientes para cada caso se pueden consultar con mayor detalle en el **Anexo 2**.

- Caso 1, ($H=1.84m$, $T= 8.36s$, $\alpha= 45N$).

De los resultados numéricos, se observa que la dirección predominante del sistema de corrientes se desplaza a lo largo de la línea de costa en dirección hacia Punta Nizuc, es decir dirección SE. También se puede notar que a lo largo de la línea de costa existen zonas donde las corrientes alcanzan un máximo, como se puede observar en la Tabla 5-9.

Kilometraje	velocidad	Profundidad
	(cm / s)	(m)
1+400	25.00	2.50
2+400	35.00	1.50
2+750	35.00	1.25
3+150	35.00	1.25
3+650	25.00	1.25
7+900	25.00	2.50
10+700	12.50	2.50
11+275	35.00	2.00

Tabla 5-9 Kilometrajes donde se observan altas velocidades caso 1.

En Punta Cancún el oleaje incidente, genera un aumento en las corrientes de hasta 35cm/s, pero conforme esta toma dirección hacia la costa se va reduciendo en pequeños vectores con direcciones caóticas. En cuanto a punta Nizuc el efecto que se genera a causa de la rotura del oleaje es un sistema de corrientes en forma de remolino donde algunos de sus componentes chocan directamente con la corriente longitudinal, provocando un descenso en las velocidades de corrientes.

Además se observa que a lo largo de la línea de costa se crean circuitos de circulación de agua, donde las líneas de corrientes se organizan en bucles de entrada y salida de agua. En la siguiente tabla se indican los circuitos observados.

No	circuito	Kilometraje	Velocidad (cm/s)	
			Entrada	Salida
1	cerrado	1+300	25	0
2	abierto	2+200 a 2+500	12.5	25
3	abierto	3+500 a 3+900	6.3	12.5
4	abierto	5+100 a 5+800	3.1	3.1
5	abierto	6+100 a 6+500	6.3	3.1
6	cerrado	7+300	0	3.1
7	abierto	7+800 a 8+400	4.7	3.1
8	abierto	8+800 a 9+500	3.1	3.1
9	abierto	10+500 a 10+800	6.3	12.5
10	abierto	11+100 a 11+600	6.3	3.1

Tabla 5-10 Intervalos donde se forman circuitos de corrientes caso 1.

En la Tabla 5-10 se entiende como circuito abierto cuando además de la circulación longitudinal sobre la línea de costa existe un patrón de corrientes donde hay aportaciones y salidas de agua que se asemejan a una forma semicircular, por otro lado se entiende como circuito cerrado cuando además de la circulación longitudinal se presenta una entrada o una salida de corrientes aislada.

En un sector comprendido entre los kilometrajes 9+900 al 10+500 se observa una desviación en la circulación de las corrientes, pues son desviadas hacia una zona de alturas de ola reducidas a causa de los efectos de un bajo.

- Caso 2, ($H=1.72m$, $T=7.47s$, $\alpha= 90N$).

A pesar de que el oleaje al llegar a la línea de costa, debido a efectos de refracción, toma un ángulo incidencia del segundo cuadrante, el sistema de corrientes que se desplaza a lo largo de la línea de costa se dirige hacia punta Nizuc, a excepción de las cercanías a las puntas. Los puntos donde se experimenta una mayor velocidad de corrientes se observan en la Tabla 5-11.

Kilometraje	velocidad	Profundidad
	(cm/s)	(m)
1+200	19.00	2.50
2+100	19.00	3.75
3+900	19.00	1.90
4+200	19.00	1.90
5+300	19.00	2.50
6+550	19.00	1.25
7+900	19.00	1.25
11+150	19.00	1.25

Tabla 5-11 Kilometrajes donde se observan altas velocidades caso 2.

En Punta Cancún, con este escenario se generan vectores de corrientes con magnitudes cercanas a 19cm/s y con dirección SSE, mientras que en Punta Nizuc y debido a la orientación del oleaje incidente, cuando éste rompe contra la punta genera flujos de corrientes que se propagan a lo largo de la costa, pero con dirección contraria a la circulación general de corrientes, ambas circulaciones se interceptan frente al kilometraje 11+500 desviándose y creando una corriente de salida.

En este caso también se presentan circuitos de corrientes a lo largo de la línea de costa y se observan en la Tabla 5-12.

No	circuito	Kilometraje	Velocidad (cm/s)	
			Entrada	Salida
1	cerrado	1+100 a 1+650	12.5	6.3
2	cerrado	1+800	12.5	0
3	cerrado	2+100	12.5	0
4	abierto	5+000 a 5+400	6.3	3.1
5	abierto	6+000 a 6+400	3.1	6.3
6	abierto	6+700 a 7+000	3.1	6.3
7	abierto	7+200 a 7+500	3.1	3.1
8	abierto	7+800 a 9+300	3.1	3.1
9	abierto	10+400 a 10+700	3.1	6.3
10	abierto	11+000 a 11+500	1.6	3.1

Tabla 5-12 Intervalos donde se forman circuitos de corrientes caso 2.

En esta configuración la presencia del bajo no influye de manera significativa en la dirección y magnitud de las corrientes de rotura.

- Caso 3, ($H=1.83m$, $T=8.59s$, $\alpha=1350N$).

Dado que el oleaje llega a la línea de costa con una incidencia mayor a 90N, el sistema de corrientes que se genera a lo largo de la línea de costa se desplaza en general desde Punta Nizuc hacia Punta Cancún con una dirección NW. Los puntos donde las corrientes alcanzan un valor se expresan en la Tabla 5-13.

Kilometraje	velocidad	Profundidad
	(cm/s)	(m)
1+250	25.00	1.90
3+800	19.00	3.75
4+250	25.00	2.50
5+400	25.00	2.50
6+300	25.00	2.50
7+000	19.00	3.75
7+950	25.00	1.90
8+600	19.00	2.50
10+800	12.5	1.9
11+150	12.5	1.9
11+400	12.5	2.5

Tabla 5-13 Kilometrajes donde se observan altas velocidades caso3.

El oleaje que incide en Punta Cancún genera grandes velocidades de corrientes, hasta de 35cm/s, parte de las cuales se dirigen hacia el NW y otra parte incide sobre la costa cerca del kilometraje 0+900. Debido a la incidencia de propagación, sobre Punta Nizuc el oleaje es difractado, sin embargo se observa que a un costado de ésta se generan grandes velocidades de corrientes que al igual que en Punta Cancún toman dirección NW.

En su transito las corrientes a lo largo de la línea de costa se presentan algunos sistemas de circulación y los cuales se presentan en la Tabla 5-14.

No	circuito	Kilometraje	Velocidad (cm/s)	
			Entrada	Salida
1	cerrado	1+000	0.00	6.30
2	abierto	2+000 a 2+200	3.10	1.60
3	abierto	3+900 a 3+200	6.30	1.60
4	cerrado	4+400	3.10	0.00
5	cerrado	5+600	3.10	0.00
6	abierto	6+400 a 5+800	6.30	3.10
7	abierto	7+000 a 6+700	12.50	6.30
8	abierto	7+100 a 7+500	6.30	3.10
9	abierto	8+900 a 7+500	3.10	3.10
10	abierto	8+900 a 9+200	1.60	3.10
11	cerrado	9+700	6.30	0.00
12	cerrado	11+400	3.10	0.00

Tabla 5-14 Intervalos donde se forman circuitos de corrientes caso 3.

También se observó que la circulación de las corrientes dentro del circuito 8 y 10 tomaron dirección opuesta a la circulación general del sistema.

- Caso 4, ($H=12.29m$, $T=13.66s$, $\alpha=101N$).

El campo de corrientes presenta una configuración complicada que se puede describir de la siguiente manera:

En la zona donde las variaciones de altura de ola es muy dispersa, las corrientes son débiles, de 0 a 1.6 cm/s, y esto coincide sobre el área en donde la batimetría se mantiene constante o con pocos cambios.

Entre las curvas batimétricas 17.50 y 15 se aprecia un aumento en la pendiente del fondo que provoca un rápido cambio de alturas de ola, disminuyendo de 12 a 7m, lo que origina un aumento en las corrientes.

La dirección que toman estas corrientes es variable, observándose que en la zona extrema superior a partir del kilometrajes 1+400 rumbo al NW las corrientes toman dirección N.

Del Km. 1+400 hacia Punta Nizuc se observan numerosos circuitos de entrada y salida de corrientes. Se observan líneas de corriente que se dirigen cerca de la costa incidiendo frente a ésta de manera perpendicular, dichas líneas de corriente se propagan a partir de la curva batimétrica -15 hasta la -10, curvas que se caracterizan por estar muy separadas. Estas líneas se aprecian principalmente frente a los kilometrajes 4+250, 5+800, 6+800, 8+000, donde las corrientes se desplazan con una velocidad de 3.1cm/s. Cabe mencionar que el origen de estas líneas de corriente coinciden con los picos o salientes de los frentes de onda que presentan un gradiente elevado

En ciertos kilometrajes se aprecian retornos de corrientes, los principales son 1+500, 7+200, 8+900 e inciden hacia la curva batimétrica 15, en el caso de las corrientes de retorno se observa que se dirigen hacia los valles provocados por las salientes de los frentes de onda.

El oleaje incidente que interactúa con el bajo genera grandes corrientes con magnitudes de hasta 55cm/s y con dirección perpendicular a la costa. En las cercanías de Punta Nizuc, la separación entre las curvas 15 y 10 se va estrechando, lo que provoca que la variación en las alturas de ola sea gradual, esto provoca que el campo de corrientes presente magnitudes más homogéneas en esta área. En punta Nizuc las corrientes generadas alcanzan un valor máximo de 45cm/s con dirección NE, y un valor mínimo ampliamente disperso de 6.3cm/s.

En todo el dominio que se ubica entre las dos puntas se observa que el valor máximo de velocidades se presentan sobre la curva batimétrica 5, valores no mayores a 25 ni menores a 6.3cm/s. Entre las curvas 2.5 y la línea las variaciones en las corrientes oscilan entre 6.3 a 3.1cm/s, sin embargo frente a determinados puntos se presentan magnitudes mayores descritas en la Tabla 5-15.

Kilometraje	velocidad
	(cm/s)
1+100 a 1+350	12.50
6+400 a 6+550	12.50
7+900 a 8+000	12.50
9+700 a 9+900	12.50
10+250 a 10+350	12.50

Tabla 5-15 Kilometrajes donde se observan altas velocidades caso 4.

5.4. Modelo de Erosión y sedimentación en playas.

Las corrientes longitudinales se producen en la zona de rotura del oleaje y por lo tanto en esta zona los sedimentos se encuentran en suspensión y son fácilmente transportados por el efecto de dichas corrientes. Entonces para que una determinada forma de playa esté en equilibrio, es necesario que no existan corrientes longitudinales ó aún existiendo estas se presente un gradiente de transporte nulo, es decir que la arena que es erosionada de una zona sea remplazada por arena de otra zona de modo que se establezca un circuito cerrado.

Como las playas sufren cambios batimétricos bajo la acción de las principales dinámicas que actúan sobre ellas, es así como los modelos teóricos de evolución de playas tratan de integrar todas estas dinámicas con el objeto de poder predecir la evolución de las playas, teniendo como punto de partida que la secuencia e intensidad de la variación de los factores que controlan la dinámica es conocida.

5.4.1. Modelo numérico.

El modelo Eros es un modelo numérico que resuelve las ecuaciones del flujo de sedimentos dentro de la zona de rompientes y actualiza la batimetría debido a las variaciones espaciales del transporte de sedimentos. Toma como datos de entrada los siguientes:

- Datos de salida del oleaje calculados por el modelo Oluca.
- Datos de salida del campo de corrientes de rotura calculado por el modelo Copla
- Datos de características del sedimento de la playa.

Los modelos morfodinámicos se basan en el modelado de los procesos físicos que afectan a la playa como son; propagación del oleaje, corrientes de rotura, transporte de sedimentos y variación de la batimetría. En función de la interacción entre estos componentes se distinguen dos tipos de modelos:

Los modelos de erosión-sedimentación inicial, (*ESI*), que evalúan el cambio de la batimetría sin considerar la interacción entre componentes, (*oleaje y corrientes*).

Los modelos de evolución morfodinámica, (*MEM*) admiten unas condiciones hidrodinámicas estacionarias durante un intervalo de tiempo determinado, que dan lugar a una variación del fondo. Con la nueva batimetría se recalculan las condiciones hidrodinámicas y los nuevos flujos de transporte.

El modelo Eros permite la simulación morfodinámica tanto en el modo ESI como en el MEM.

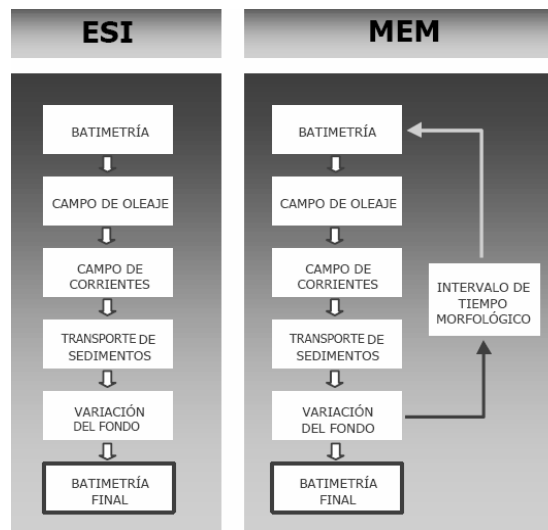


Figura 5-10 Estructura del modelo Eros.

Estructura del modelo Eros

En la simulación de la evolución morfológica de una playa es necesario que cada uno de los elementos que modelan los procesos físicos estén perfectamente integrados dada la fuerte dependencia que existe entre ellos, (*oleaje, corrientes transporte de sedimentos, variaciones del fondo*).

El programa calcula el transporte de sedimentos, a partir de los flujos de transporte se obtiene la tasa temporal de variación del fondo. Llegados a este punto caben dos posibilidades: simulación en modo ESI y simulación en modo MEM.

En el modo ESI se resuelve la ecuación de conservación del sedimento aceptando que en el intervalo de duración del evento, $t_f - t_0$, las condiciones hidrodinámicas no varían. En el modo MEM, sin embargo, el paso de tiempo morfodinámico, Δt_m , depende de dos criterios de estabilidad:

- Criterio de estabilidad numérico de Courant de migración de formas de lecho.
- Máxima variación del fondo admitida.

La estructura de Eros es la siguiente: Definido el paso de tiempo se resuelve la ecuación de conservación del sedimento. Al cambiar la batimetría, las características hidrodinámicas del sistema han cambiado, siendo necesario, por lo tanto volver a calcular el oleaje y las corrientes de rotura.

El modelo maneja dos formulaciones contrastadas, que computan el transporte total, suma del transporte en suspensión y del transporte por fondo.

Formulación de Bailard.

La fórmula derivada por Bailard, (1981) puede escribirse como la suma de cuatro términos:

$$\vec{q}_t = \vec{q}_{bo} - \vec{q}_{bs} + \vec{q}_{so} - \vec{q}_{ss} \quad (5.2)$$

$$\vec{q}_{bs} = \frac{c_f \varepsilon_B \tan \beta}{g(s-1) \tan^2 \phi} < |\vec{u}|^3 > \vec{i} \quad (5.3)$$

$$\vec{q}_{bo} = \frac{c_f \varepsilon_B}{g(s-1) \tan^2 \phi} < |\vec{u}|^2 \vec{u} > \vec{i} \quad (5.4)$$

$$\vec{q}_{so} = \frac{c_f \varepsilon_s}{g(s-1)w_s} < |\vec{u}|^3 \vec{u} > \vec{i} \quad (5.5)$$

$$\vec{q}_{ss} = \frac{c_f \varepsilon_s^2 \tan \beta}{g(s-1)w_s^2} < |\vec{u}|^5 > \vec{i} \quad (5.6)$$

Donde:

\vec{q}_t = Transporte total por fondo y suspensión, (q_x, q_y).

\vec{q}_{bo} = Transporte por fondo sobre lecho plano.

\vec{q}_{bs} = Transporte por fondo debido al efecto de la pendiente.

\vec{q}_{so} = Transporte en suspensión sobre lecho plano.

\vec{q}_{ss} = Transporte en suspensión debido al efecto de la pendiente.

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

s = Densidad relativa, (γ_s/γ_w).

γ_s = Densidad del sedimento.

γ_w = Densidad del agua.

C_f = Coeficiente de fricción, tal que $\vec{\tau} = rC_f \left| \frac{\vec{u}}{u} \right| \frac{\vec{u}}{u}$.

$\vec{\tau}$ = Tensión tangencial en el fondo.

\vec{u} = Velocidad en el fondo debida a la acción conjunta de ola y corriente (m/s).

ϕ = Ángulo de rozamiento interno del sedimento.

$\tan \beta$ = Pendiente del lecho.

\vec{i} = Vector unitario en la dirección pendiente arriba.

W_s = Velocidad de caída del grano.

ε_B = Factor de eficiencia del transporte por fondo, (0.10).

ε_s = Factor de eficiencia del transporte en suspensión, (0.02).

Formulación de Soulsby – van Rijn.

Soulsby, (1997) deduce una expresión analítica, que de manera bastante aproximada da la formulación para ola-corriente de van Rijn, (1993), donde se evalúa el transporte tanto por fondo como en suspensión.

$$q_t = A_s \bar{U} \left| \left(\bar{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{0.5} - \bar{U}_{cr} \right|^{0.24} \quad (5.7)$$

Donde:

$$q_t = (q_x, q_y). \quad A_s = A_{sb} + A_{ss}.$$

Donde:

$$A_{sb} = \frac{0.005h \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2}}{\left[(s-1) g D_{50} \right]^{1.2}} \quad A_{ss} = \frac{0.012 D_{50} D_*^{-0.6}}{\left[(s-1) g D_{50} \right]^{1.2}}$$

Donde:

\bar{U} = Velocidad promediada en la vertical (\bar{u}, \bar{v}).

U_{rms} = Velocidad orbital cuadrática media (u_{orbx}, u_{orby})_{rms}.

$$C_D = \left[\frac{0.40}{\ln \left(\frac{h}{z_o} - 1 \right)} \right]^2 = \text{Coeficiente de fricción debida a la corriente.}$$

\bar{U}_{cr} = Velocidad crítica de inicio de movimiento (*asumiendo rugosidad efectiva*).

$K_s = 3D_{90}, D_{90} = 2D_{50}$.

$$\bar{U}_{cr} = 0.19(D_{50})^{0.1} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.1 < D_{50} < 0.5 \text{ mm.}$$

$$\bar{U}_{cr} = 8.5(D_{50})^{0.6} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.5 < D_{50} < 2 \text{ mm.}$$

h = Profundidad.

D_{50} = Diámetro medio del sedimento.

D_{90} = Diámetro que es superado por un 10% en peso.

Z_0 = Rugosidad del fondo.

S = Densidad relativa.

ν = Viscosidad cinemática del agua (2×10^{-6}).

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)^{0.33}}{\nu^2} \right] D_{50}.$$

El modelo Eros tiene en cuenta el efecto de la pendiente del fondo en el inicio del transporte.

Discretización del dominio.

Dado que el modelo Eros emplea los resultados de la propagación del modelo Oluca y los resultados de las corrientes de rotura del modelo Copla, las mallas con la batimetría son las mismas.

5.4.2. Resultados.

Con resultados obtenidos de la propagación de oleaje y del modelado de corrientes en los casos en estudio, se estimó el transporte potencial neto y la tasa de transporte anual para diferentes profundidades cercanas a la costa

En el **Anexo 2** se presentan los mapas de vectores, isolíneas de magnitudes del transporte potencial neto.

- Caso 1, ($H=1.84m$, $T= 8.36s$, $\alpha= 45N$).

La dirección predominante del transporte de sedimentos, coincide con la de las corrientes con dirección SSW.

Del mapa de isolíneas, se observa que a lo largo de la línea de costa se presentan grandes variaciones de las magnitudes del transporte de sedimentos, los valores máximos varían entre las curvas batimétricas 1 a 8. En la Tabla 5-16 se presenta dicha variación:

Profundidades		TRANSPORTE POTENCIAL NETO (m3/hr)		
De	A	medio	máximo	mínimo
0	1	0.28	9.44	0
1	2	1.74	12	0
2	3	1.76	14.44	0
3	4	1.19	15.86	0
4	5	0.59	12.42	0.004
5	6	0.39	7.51	0.002
6	7	0.24	3.25	0.0008
7	8	0.16	1.95	0.0007

Tabla 5-16 Transporte potencial neto caso 1.

Se deduce de la tabla anterior que entre las curvas batimétricas 1 a 4 ocurre el mayor transporte potencial, con valores máximos entre las curvas 2 y 4. Se ha estimado la tasa de variación anual del sedimento bajo este escenario, presentándose de manera dividida entre los niveles +3 al -8 en intervalos de 1m, estos resultados se presentan de manera gráfica en la Figura 5-11.

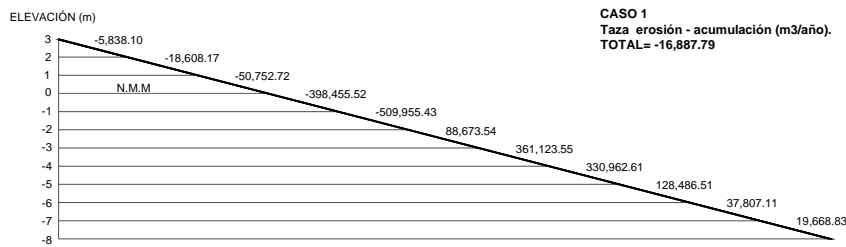


Figura 5-11 Tasa de erosión acumulación anual caso 1.

De la Figura 5-11 se observa que entre los niveles +1 a -2, se presenta la zona de erosión máxima, y entre los niveles de profundidad -4 a -6 metros se presenta la zona de mayor depósito.

- Caso 2, ($H=1.72m$, $T=7.47s$, $\alpha= 90N$).

Coincide la dirección del transporte de sedimentos con la de las corrientes y toman una posición a lo largo de la línea de costa con dirección SSW. En este caso los resultados del transporte potencial neto entre las curvas de batimétricas 0 a la 8 con intervalos de 1 metro y se presentan en la Tabla 5-17.

Profundidades		TRANSPORTE POTENCIAL NETO (m³/hr)		
De	A	medio	máximo	mínimo
0	1	0.200	7.270	0.000
1	2	1.107	19.330	0.000
2	3	1.560	19.290	0.000
3	4	0.600	5.690	0.000
4	5	0.270	4.500	0.000
5	6	0.140	1.840	0.002
6	7	0.090	1.410	0.001
7	8	0.060	0.830	0.001

Tabla 5-17 Transporte potencial neto caso 2.

De la tabla anterior se observa que entre las curvas batimétricas 1 a 3 m ocurre el mayor transporte potencial. La tasa de variación anual del sedimento bajo este escenario se presenta en la Figura 5-12 .

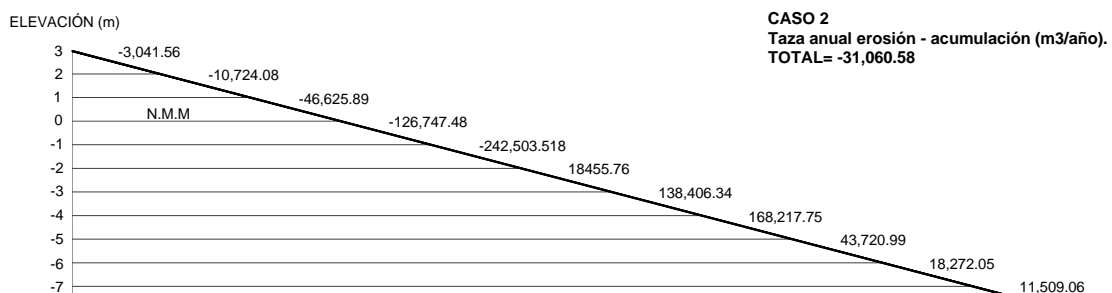


Figura 5-12 Taza de erosión acumulación anual caso 2.

De la figura anterior se observa que entre los niveles +1 a -2, se presenta la zona de erosión máxima, y entre los niveles -4 a -5 se presenta la zona de mayor depósito.

- Caso 3, ($H=1.83m$, $T=8.59s$, $\alpha=1350N$).

Al igual que en los casos anteriores, aquí también coincide la dirección del transporte de sedimentos con la de las corrientes y toman una posición a lo largo de la línea de costa con dirección NNE. En este caso los resultados del transporte potencial neto entre las curvas de batimétricas 0 a la 8 con intervalos de uno, se presentan en la Tabla 5-18.

Profundidades		TRANSPORTE POTENCIAL NETO (m3/hr)		
De	A	medio	máximo	mínimo
0	1	0.290	10.220	0.000
1	2	1.610	17.260	0.000
2	3	2.020	17.170	0.000
3	4	1.200	18.750	0.000
4	5	0.720	19.670	0.001
5	6	0.430	15.420	0.003
6	7	0.347	7.930	0.002
7	8	0.210	4.600	0.002

Tabla 5-18 Transporte potencial neto caso 3.

Se deduce de la tabla anterior que entre las curvas batimétricas 1 a 5 ocurre el mayor transporte potencial, con valores máximos entre las curvas 3 y 5. La tasa de variación anual del sedimento bajo este escenario se presenta en la Figura 5-13.

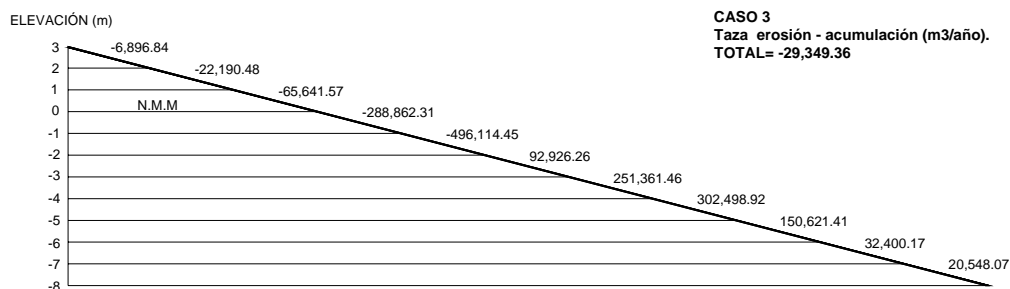


Figura 5-13 Taza de erosión acumulación anual caso 3.

De la Figura 5-13 se observa que entre los niveles +1 a -2 metros, se presenta la zona de erosión máxima, y entre los niveles -3 a -6 m se presenta la zona de mayor depósito.

- Caso 4, ($H=12.29m$, $T=13.66s$, $\alpha=101N$).

Este caso no es la excepción, pues también coincide la dirección del transporte de sedimentos con la de las corrientes y toman una posición a lo largo de la línea de costa con dirección NNE. Los resultados del transporte potencial neto entre las curvas de batimétricas 0 a la 8 m con intervalos de uno, son:

Profundidades		TRANSPORTE POTENCIAL NETO (m ³ /hr)		
De	A	medio	máximo	mínimo
0	1	0.860	108.080	0.000
1	2	4.635	177.070	0.000
2	3	9.600	263.190	0.000
3	4	13.660	252.550	0.000
4	5	20.470	287.230	0.030
5	6	31.510	258.500	0.050
6	7	45.150	236.470	0.063
7	8	45.870	189.370	0.020

Tabla 5-19 Transporte potencial neto caso 4.

De la Tabla 5-19 se observa que entre las curvas batimétricas 2 a 6 metros ocurre el mayor transporte potencial, con valores máximos entre las curvas 4 y 5 metros, la tasa de variación anual del sedimento bajo este escenario se presenta en la Figura 5-14.

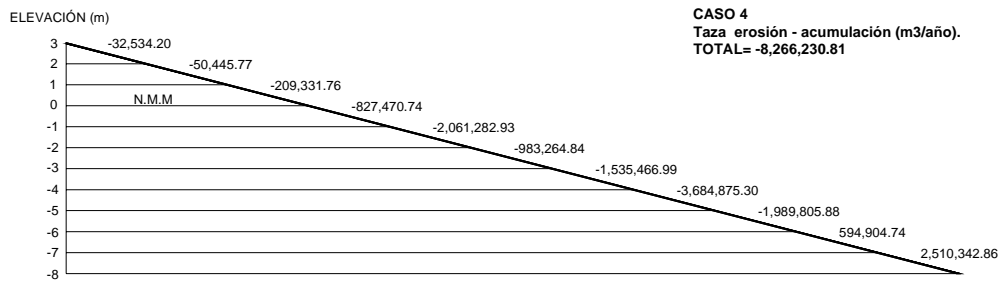


Figura 5-14 Taza de erosión acumulación anual caso4.

De la Figura 5-14 se observa que entre los niveles +1 a -6 metros, se presenta la zona de erosión máxima, y entre los niveles -7 a -8 se presenta la zona de mayor depósito.

6. ESTRUCTURAS PROPUESTAS.

Como se ha venido mencionando, las costas de Quintana Roo han tenido una relevancia estratégica, con el transcurrir de los tiempos, desde épocas prehispánicas con la cultura Maya, en la Colonia y después en las grandes haciendas de la época porfiriana, sin embargo es hasta los años 70s del siglo XX cuando Cancún adquirió una nueva dimensión en su importancia.

El fomento del turismo de grandes masas sobre este entorno debió de conducir a los gobiernos de diferentes niveles, (*municipal, estatal y federal*) en poner un especial cuidado en la protección de estas zonas costeras que se extienden más allá de Cancún.

En Cancún, con el paso de los años, se han comenzado a urbanizar todas las áreas limítrofes con las playas, convirtiéndose en terrenos hábiles para el turismo y con ello a aumentar considerablemente la densidad de población, teniéndose que prever que durante las temporadas altas exista el suficiente ancho de playa para poder satisfacer la expectativa turística creada en este lugar.

El desarrollo que ha tenido Cancún es muy desordenado desde el punto de vista ambiental y se ha podido observar en las últimas décadas que los usos y procesos naturales no son compatibles. Una de las muchas posibilidades para dar respuesta inmediata a los problemas de erosión que enfrenta Cancún es la construcción de estructuras y el relleno artificial de las playas. A priori podría parecer excesiva la inversión que se requiere si se piensa que estas soluciones deben ser consideradas como temporales, no obstante basta revisar lo que Cancún ha representado para México en los últimos años por su actividad turística, entre otros ahí se han generado en los últimos 10 años más de 20 mil millones de dólares americanos y tan solo para su mantenimiento, se han aplicado en los 30 años de vida del destino, 20 millones de dólares americanos y esto, como una medida de emergencia por el huracán Wilma. Por tal motivo y con base a la renovación que requiere Cancún es que se proponen una serie de mecanismos de defensa costera que no buscan sino evitar, o en su defecto minimizar, el previsible déficit de arena que pueda producirse a causa de la dinámica litoral.

Son muchas las medidas protectoras que se cuentan actualmente para minimizar los efectos del oleaje, sobre la costa siendo una de las más extendidas en la actualidad la construcción de obras de protección del litoral. Las obras de protección del litoral, cumplen con la función de mantener o modificar la línea de costa en un determinado tramo del litoral, cabe recordar que su principal solicitación de cálculo es el oleaje.

6.1. Tipología de las estructuras de protección de la costa.

Las obras de defensa de las costas se pueden clasificar atendiendo a los siguientes criterios:

- Por el efecto que ocasionan las estructuras en el oleaje (*clasificación energética funcional*). En esta clasificación las estructuras de protección se clasifican en:

a).- Reflejantes; muros, pantallas, revestimientos y diques verticales.

b).- Disipativas; como la playa disipativa.

c).- Transmisoras; se caracterizan por tener mínima alteración del oleaje incidente como las estructuras muy sumergidas.

d).- Mixtas; gran cantidad de estructuras como diques de talud de materiales sueltos, porosos o perforados, diques rebasables, pantallas perforadas sobre pilotes.

- Por la deformabilidad de la estructura de protección se pueden clasificar en.

a).- Estructuras blandas; playas.

b).- Estructuras duras; se caracterizan por mantener su geometría casi inalterada a lo largo de su vida útil. Sin embargo en esta última clasificación también se consideran aquellas estructuras que permiten ciertas deformaciones en su geometría, sin que por ella pueda existir fallo de la estructura, (*flexibles*).

- Por la posición de la estructura con respecto a la línea de costa.

a).- Muros; se ubican a lo largo de la línea de costa y cumplen con la función de contener.

b).- Espigones; estructuras construidas de manera perpendicular a la línea de costa, que cumplen con la función de establecer una discontinuidad en la topografía de una playa realizando la contención de arenas.

c).- Diques: estructuras paralelas a la línea de costa y pueden ser exentos o conectados y cuyo objetivo es el de modificar la línea de costa, mediante el cambio de las condiciones de contorno que llegan a ella.

d).- Un dique exento tiene como objetivo final la protección y estabilidad de la línea de costa, frente a la acción del oleaje incidente y de la energía asociada a este. Es común asociar a los diques exentos con la generación de tómbolos o salientes en las playas que abrigan.

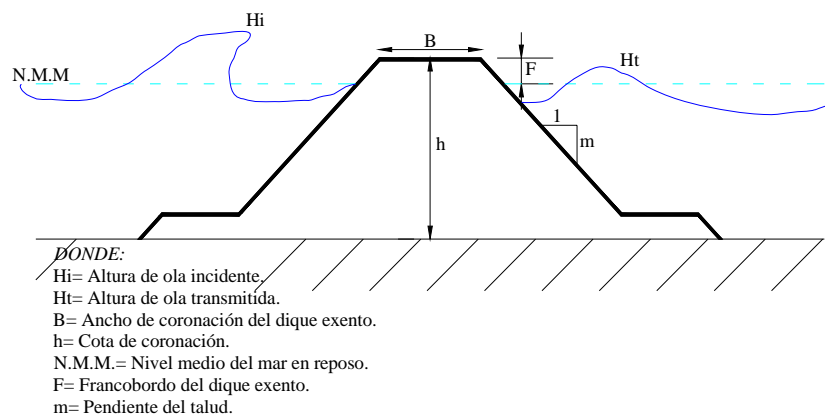


Figura 6-1 Dique exento.

- En función de la metodología de cálculo.

Atendiendo a esta tipología se definen las características de las estructuras requeridas que permitirán cumplir con los objetivos necesarios para la conservación y protección de la línea de costa en nuestra área de interés, estas características se expresan en la Tabla 6-1.

Talud :	Inclinado pendiente 1:5
Rugosidad de la superficie:	Rugoso
Permeabilidad :	Permeable según porosidad
Rebasabilidad:	Sumergido
Situación respecto a la costa:	Dique exento
Rigidez de la estructura:	Flexible. Dique en talud con manto principal multicapa
Tipo de porosidad:	Isótropa

Tabla 6-1 Características de las estructuras.

Se Propone la construcción de un conjunto de estructuras marítimas con las características antes mencionadas, las cuales suelen construirse en su mayoría de forma paralela a la playa a cercana a ésta, como si de una barrera se tratara.

Los propósitos de proponer estas estructuras son:

- a).- Retardar el proceso de erosión sedimentaria en la playa ya regenerada.
- b).- Incrementar la longitud de los bancos de arena presente en la zona.
- c).- Crear de forma natural una zona de playa allí donde no existe.
- d).- Mitigar los efectos erosivos generados en la costa como consecuencia de temporales.

6.2. Diques rebasables.

Los diques rebasables y sumergidos son aquellos que debido a su baja cota de coronación, han sido diseñados para permitir un rebase importante sobre ellos mismos, estos diques son diseñados para permitir la transmisión de una parte importante de la energía del oleaje, siendo el rebase sobre la corona el mecanismo más importante de transmisión, aunque en ciertos casos como el de los diques arrecife se observa una transmisión importante a través del cuerpo del dique, esto debido a que el tamaño del material de la escollera es similar a la del manto principal.

En la literatura especializada existe información experimental sobre la variación de la estabilidad del manto principal del talud exterior. Entre los trabajos más importantes se encuentran los resultados de los ensayos realizados por Aherens, (1987), sobre diques arrecifes emergidos y de Van der Meer, (1988) sobre diques multicapa emergidos, en cuyos ensayos ambos autores observan que la estabilidad de esta sección del dique aumenta al disminuir el francobordo.

En lo referente a los diques sumergidos se cuenta con la experimentación de Givler y Screnson, (1986) quienes demostraron que al igual que en los diques emergidos también aumenta la estabilidad al disminuir la altura de coronación. Posteriormente con las experimentaciones de Vidal et al, (1992), también se verifica este comportamiento.

En los diques rebasables o sumergibles, las secciones de la coronación y del talud posterior sufren en mayor proporción la acción de las dinámicas del oleaje con respecto al talud exterior. La información sobre la estabilidad de estas secciones es muy escasa, estando reducida a casos de avería en prototipos o en modelos de prototipos.

El US Army, (1965), Raichlen, (1972), Magoon et al, (1975), Walter et al, (1976), Andersen et al, (1992); presentan una serie de resultados experimentales sobre la estabilidad de diques berma rebasables, donde se involucran algunos casos de avería en el talud posterior y presentan una expresión paramétrica para así determinar la influencia de las distintas variables involucradas.

Van der Meer et al, (1992) presentan resultados experimentales de daño en el talud posterior de diques berma y rebasables, dado que los francobordos considerados son elevados, los resultados indican un aumento claro de la estabilidad, al aumentar el francobordo y una disminución al aumentar el periodo.

La experimentación de Vidal et al, (1992) sobre diques de escollera exentos rebasables y sumergidos indica que la disminución de estabilidad del talud posterior, al disminuir el francobordo alcanza un mínimo para francobordos positivos y depende del nivel de daño considerado. A partir de ese mínimo al disminuir el francobordo aumenta la estabilidad. En estos mismos experimentos de Vidal et al, (1992), se presentan resultados para la estabilidad de coronación de los morros rebasables y sumergidos, en los cuales también se observa un mínimo de estabilidad alrededor del francobordo nulo.

Finalmente Vidal et al, (1999) presenta una metodología de calculo basado en los resultados de la citada experimentación, metodología usada para evaluar el peso y diámetro del material para los diques propuestos en este estudio.

6.2.1 Análisis dimensional.

Debido al rebase, el flujo sobre el talud exterior disminuye en intensidad a medida que disminuye el francobordo y por lo tanto el peso de las piezas del manto exterior suele ser inferior al que sería necesario en el supuesto caso de que el dique impidiera el rebase. Por este motivo las formulaciones existentes para el cálculo del peso de las piezas del manto tienen en cuenta este aumento de estabilidad que se produce en el talud exterior, sin embargo otros sectores como la corona y el talud interior, sufren un aumento en la acción del flujo a medida que disminuye el francobordo con la siguiente disminución de estabilidad.

La combinación del aumento de estabilidad del talud exterior con la disminución de la misma en la coronación y talud interior pueden llevar a valores mínimos de estabilidad para un francobordo positivo. Como el flujo debido al oleaje en estos diques pasa sobre la coronación, la estabilidad de ésta y del manto interior se considera en el diseño del mismo, en el cual se incluyen ciertos parámetros en la formulación de estabilidad como son; el francobordo (F) y anchura de coronación (B), ambos parámetros son fundamentales.

Por lo que respecta a la estabilidad de los morros en estos diques, la geometría (R/L) y el francobordo son muy importantes, mientras que la anchura de la coronación no es tan determinante.

En la Figura 6-2 se esquematizan las componentes características de un dique sumergido.

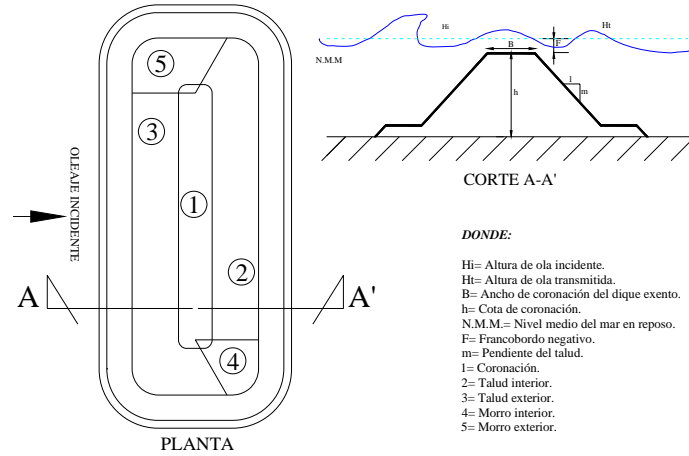


Figura 6-2 Dique Sumergido.

6.3. Estructuras propuestas.

Con el propósito de retener la mayor cantidad posible de sedimentos en la línea de costa se ha propuesto la construcción de diferentes estructuras a lo largo de la línea de costa, cuya descripción se plantea a continuación.



Figura 6-3 Ubicación de las estructuras propuestas.

- Propuesta No 1.

Para dar solución parcial al problema de fuga de arena hacia fuera del sistema, se propone la construcción de dos diques conectados a ambas puntas, (*dique 1 y 2 de Figura 6-3*). El propósito de la construcción de estos diques es el de interrumpir el transporte longitudinal de sedimentos que tiende a salir del sistema por las puntas, propiciando que la propia dinámica litoral regenere el tramo de costa allí donde ha habido erosión cercana a las puntas ó bien donde nunca ha existido.

Dichas obras deberán estar en armonía con el entorno, cuidando de no dañar la imagen de las playas, evitando en lo posible el uso de grandes estructuras que sobresalgan de la superficie del agua, para lo cual se propone la construcción de dos diques de material granular y totalmente rebasables.

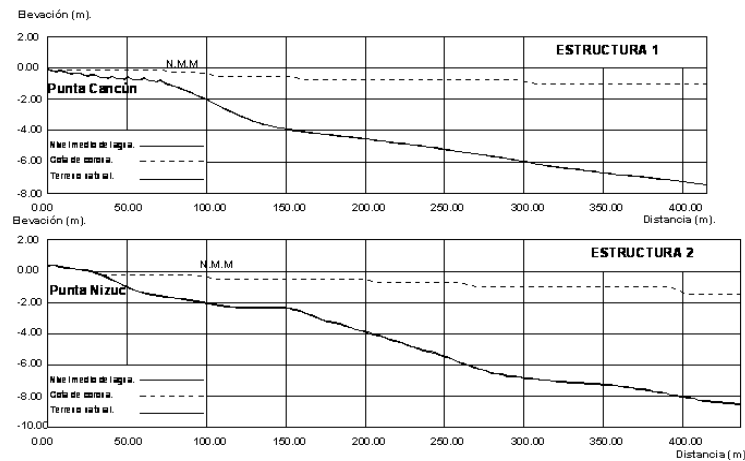


Figura 6-4 Fondo y cota de coronación estructuras 1 y 2.

Altura de ola de diseño.

De los planos de alturas de olaje para los caos estacionales, se observa que el valor de altura de ola frente al sitio donde se desplantaran las estructuras varía de 2.00 a 2.50m, para la estructura 1 y de 1.25 a 2.00 m para la estructura 2 por lo que la altura de ola de cálculo para estas estructuras será de 2.5m.

- Propuesta No 2.

En este caso se proponen construir, además de las dos estructuras conectadas a las puntas, dos estructuras de de apoyo adyacentes, (*diques 3 y 4* Figura 6-3). Se pretende que estas estructuras cumplan con la función de defensa de la costa, y estarán situadas de forma paralela a ella, (*diques exentos*), que generen una zona de “aguas tranquilas” en la parte situada en el trasdós de dichas estructuras y el mantener una cierta cantidad de sedimento en la playa ubicada en el trasdós de estas o contribuir a su creación en aquellas zonas donde es inexistente.

Estas estructuras son elementos que proporcionan unos excelentes resultados, sobretodo en el caso de que se combinen con otro tipo de medidas defensivas adicionales. Hay que recordar que estas no dejan de ser barreras dinámicas al recorrido normal de oleaje, por lo que la acumulación de arena que puedan generar en su parte trasera irá acompañada ineludiblemente de una erosión a ambos costados de dicha zona de acreción. Ello se debe a que cada zona de playa no puede ser tratada como un entorno cerrado en el que al final el volumen total de sedimento se ha de mantener. La altura de ola de diseño para este par de diques es de 2.5 metros.

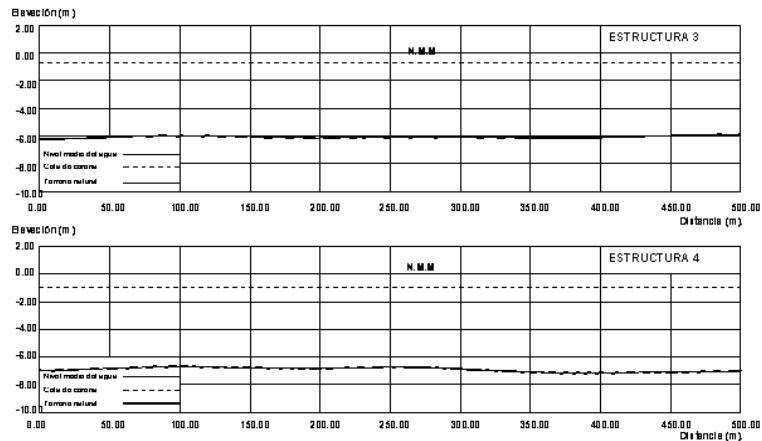


Figura 6-5 Fondo y cota de coronación estructuras 3 y 4.

- Propuesta No 3.

En esta propuesta también se incluye además de los diques antes mencionados un par extra de diques exentos, (*diques 5 y 6* Figura 6-3) ubicados en la parte central diseñados con un altura de ola de 2.5 metros.

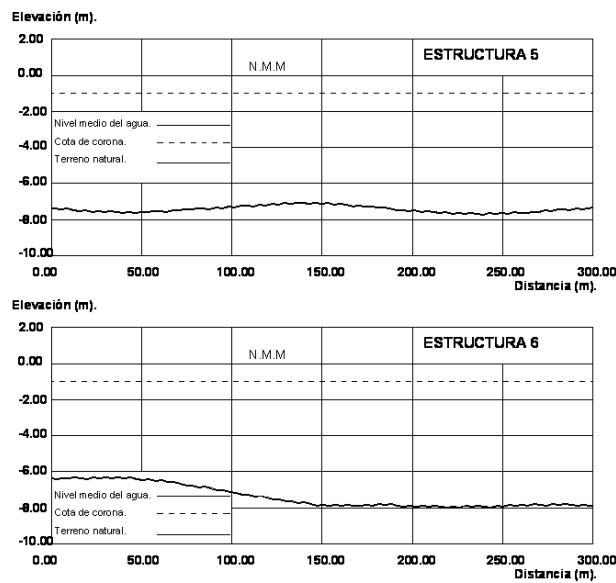


Figura 6-6 Fondo y cota de coronación estructuras 5 y 6.

Mediante las formulaciones de Vidal et al, (1992) para estructuras de material suelto y rebasables se ha realizado el análisis dimensional para determinar el peso y geometría de los elementos con los que se compondrán las estructuras.

Las estructuras estarán constituidas por roca caliza de primera con $\gamma_s = 2.2 \text{ T/m}^3$
La memoria de cálculo se puede consultar en el **Anexo 3**.

7. DISCUSIÓN.

Aún cuando la República Mexicana cuenta con más de 11 000 km de litoral, es decir, a pesar de que arriba del 70% del perímetro total de la nación sin contar el territorio insular se encuentra en contacto con el mar, no existe un marco jurídico actualizado y eficaz que defina las políticas de posesión, uso y explotación de las zonas costeras; mucho menos un reglamento de construcción y gestión de actividades en dichas regiones. A pesar de ello, a lo largo del litoral mexicano se ha desarrollado un elevado número de centros industriales y/o turísticos que generan una buena parte de la riqueza del país. Baste mencionar que prácticamente todo el turismo que visita México tiene como destino principal o combinado alguna playa; como ejemplos complementarios se pueden citar la extracción de hidrocarburos y las actividades de importación/exportación que dependen fuertemente del aprovechamiento litoral. En este sentido resulta incongruente el abandono que han sufrido las playas mexicanas desde el punto de vista de la generación de políticas públicas que favorezcan la explotación sustentable.

Por lo que respecta a la zona norte del estado de Quintana Roo, específicamente las playas de Cancún, varias veces han sido reconocidas internacionalmente al incluirlas dentro de la lista de las playas más hermosas del mundo (*top ten beaches*). Esta riqueza natural derivó en un desarrollo turístico-comercial que ha generado más de 20 mil millones de dólares en tan solo diez años, sin embargo, la falta de planeación y de visión integral provocó la degradación del ecosistema a tal escala que luego del paso del huracán Wilma en 2005 se realizó, por primera vez en treinta años, una inversión de 20 millones de dólares para recuperar la playa, misma que había desaparecido en su totalidad. Un balance simple claramente acusa la ínfima participación económica en el mantenimiento del sistema.

Esta única obra de recuperación consistió en rellenar artificialmente el frente costero de 12 km de longitud asegurando un ancho de playa seca mínimo para actividades recreativas y de defensa de la infraestructura hotelera. El material fue bombeado desde un banco localizado en el corredor entre Puerto Juárez e Isla Mujeres. Lamentablemente, y aún cuando el material de relleno ha demostrado ser de mayor tamaño que la arena original, el proceso de erosión de la playa no se ha detenido y más aún, el perfil que está encontrando la nueva playa dista mucho del nativo, al menos en la parte seca e intermareal. El único argumento que esta obra tiene en descargo es que constituyó una solución rápida ante un desastre natural a la vez que favoreció la recuperación económica de la región y la conservación de los empleos.

El diseño de una solución definitiva a los problemas de erosión de playa y eutrofización del sistema lagunar de Cancún requiere mirar desde los ángulos físico, ambiental, económico, social y político. Esto involucra replantear el problema en su conjunto a fin de encontrar una solución que a largo plazo resulte sustentable y permita mantener la calidad turística del sitio.

Bajo esta óptica, conviene hacer un breve recuento histórico-geológico del sistema playa-laguna de Cancún. Dicho sistema, aunque flexible, se mantuvo sano por miles de años (desde la trasgresión del holoceno en el 1500-1000 AC). Todo ese tiempo, la laguna y la costa estaban regidas por un ciclo en el que existía aportación subterránea de

agua dulce desde tierra hacia la laguna y eventualmente hasta el mar por debajo de la isla barrera. El recambio de agua en condiciones normales era lento puesto que solo dos bocas funcionaban de manera permanente una al norte y otra al sur de la laguna (estas bocas existen hasta hoy), este panorama permitió el crecimiento del manglar y de las especies que habitan la laguna, por su parte, la playa se encontraba en equilibrio dinámico sujeto a las variaciones estacionales del oleaje. El equilibrio se modificaba con la ocurrencia de pequeñas tormentas y huracanes de baja intensidad que provocaban un aumento en el nivel del mar y la apertura de dos a tres bocas intermitentes en la isla barrera a la vez que la playa erosionaba ligeramente. En estos casos la laguna funcionaba como vaso regulador y protegía el manglar, mientras que la entrada de agua salada mantenía los procesos biológicos sanos; una vez pasada la tormenta, el nivel del mar y de la laguna regresaban a la normalidad, las bocas cerraban y la playa iniciaba su recuperación.

La última etapa del ciclo operaba cuando se presentaban grandes huracanes, ahora el nivel del mar se elevaba más de tres metros y se abrían de cuatro a cinco bocas intermitentes, prácticamente toda el agua de la laguna era renovada en unas cuantas horas, gran parte del viejo mangle moría para dar paso a una nueva generación y la laguna era “limpiada”, la playa sufría erosiones que tardarían varios años en recuperarse y el ciclo volvía a comenzar.

Cuando se decide convertir Cancún en un desarrollo turístico, se realiza la traza urbana y se construye el hoy conocido boulevard Kukulkán. El consecuente ensanchamiento y rigidización de la isla barrera, así como la consolidación de terrenos ganados a la laguna modificaron el comportamiento del sistema al evitar la apertura de las bocas intermitentes, mientras que la construcción de hoteles y edificaciones sobre la duna de la playa disminuyeron su capacidad de auto-recuperación. Ahí el inicio de los procesos de eutrofización de la laguna y erosión de playa que hasta hoy subsisten.

La primera solución que salta a la vista, máxime desde los puntos de vista económico y turístico, es la restitución de la playa vía rellenos artificiales. Esta solución, sin embargo, es muy costosa ya que no hay forma de garantizar que el material se mantendrá dentro del sistema puesto que la playa no tiene capacidad de auto-recuperarse. En números redondos, se necesitan 4'000'000 de metros cúbicos de arena para lograr los sesenta metros de playa seca que originalmente se tenían. Dicho volumen de dragado más el necesario para el mantenimiento anual de la obra la puede hacer incosteable. Por otro lado, si el material depositado se lograra mantener en equilibrio, se estaría condenando a la laguna, al manglar y a las especies que ahí habitan a una muerte segura, ya que el nulo recambio de aguas actual no se solucionaría.

En este trabajo se ha presentado como solución alternativa la construcción de un grupo de estructuras (diques exentos y espigones de apoyo) que efectivamente demostraron cumplir con la función de disipar la energía del oleaje y contener el sedimento dentro del sistema. Sin embargo, esta solución no puede considerarse definitiva, ya que la construcción de dichos diques como estructuras permanentes supone el uso de más de 124'000 metros cúbicos de roca o de concreto lo cual involucra una inversión demasiado fuerte.

El costo de esta solución puede disminuir drásticamente con el uso de geotubos, a saber, estructuras formadas por cilindros de geotextil que se rellenan con descargas de dragado

o incluso material local. Esta alternativa tiene un funcionamiento hidráulico similar a las estructuras modeladas en esta tesis pero con un costo mucho menor. La única debilidad que presenta esta técnica es que los elementos de geotubo no se pueden considerar obras permanentes.



Figura 7-1 Geotubo funcionando como dique.

Desde esta perspectiva, la solución al problema ecológico de Cancún puede plantearse en términos de corto y largo plazo; el primero atendiendo a las necesidades inmediatas de la sociedad ya establecida y el segundo buscando que el sistema vuelva a condiciones lo más parecidas a su equilibrio original.

El esquema de protección a corto plazo es la construcción de estructuras en los puntos críticos que se detectaron a lo largo de este trabajo. Los elementos pueden ser rígidos o geotubos y dichas estructuras podrían estar sumergidas hasta 1.5 m por debajo del nivel del mar favoreciendo así el ambiente visual y las actividades recreativas.

Una segunda acción es el mejoramiento de la textura y calidad de las playas, esto se lograría con el bombeo de 1'000'000 de metros cúbicos de arena que realmente tenga la forma y tamaño del material nativo. Es importante recalcar que este nuevo material de relleno podría ser removido durante alguna tormenta, sin embargo, la existencia de las estructuras garantiza que el material quedará dentro del sistema y podría volver a llevarse a la playa a muy bajo costo.

Por otro lado, la solución de largo plazo obliga a retomar la visión integral del problema. En este sentido, se requiere proteger no solo la playa, sino la laguna, el manglar, la infraestructura turística e incluso la calidad del turismo de la zona y a la vez mimetizar las condiciones ambientales que gobernaban este sistema antes del desarrollo urbano.

En una primera instancia, es necesario flexibilizar la isla barrera de forma que sea capaz de responder a las condiciones climáticas como lo hacía en forma natural. Ante la imposibilidad de eliminar todas las edificaciones rígidas, se deben buscar zonas en las que sea factible comprar o expropiar terrenos para convertirlos en bocas que funcionarán de manera intermitente. Esto obligará a la construcción de pasos a desnivel en el boulevard Kukulkán. El resultado de esta acción es la conservación del medio natural y la disminución de las inundaciones en la zona hotelera causadas por huracanes. A largo plazo el sistema recuperará su ciclo de funcionamiento y las estructuras paralelas a la costa podrían incluso ser removidas.

Para la consecución de los objetivos de esta solución de largo plazo, existe un aparente “perdedor” que es el o los dueños de los predios que han de convertirse en bocas intermitentes, sin embargo, dada la dinámica económica de Cancún, los inversionistas ya han obtenido ganancias mucho mayores a su capital inicial de modo que están en condiciones de anteponer los intereses colectivos a los particulares. Respecto del ámbito económico, también es deseable la creación de un fondo que permita contar con recursos de disponibilidad inmediata para así responder ante futuros desastres.

Finalmente no se debe olvidar que en la zona del Caribe, Cancún está siendo sujeto de fuerte competencia tanto nacional (Riviera Maya) como internacional (Costa Rica, Belice, República Dominicana), por lo que mantener un turismo de alta calidad debe ser una prioridad y más cuando en el futuro, otros países (Cuba) serán incorporados a la oferta turística de esta región.



Figura 7-2 Varadero Cuba.

8. CONCLUSIONES.

Capítulo 1.

Cancún en apenas unas cuantas décadas se ha consolidado como un exitoso desarrollo turístico, que ha impulsado el desarrollo económico del estado de Quintana Roo y del sureste en general, captando el mayor porcentaje de divisas en materia turística para el país.

Paralelamente a este auge económico se ha presentado un gran crecimiento poblacional que está por encima de la media nacional, lo cual ha provocado un acelerado desarrollo en su infraestructura por lo que las zonas naturales tanto en la selva como en la costa estén degradándose afectando al sistema costero ya que se han maximizado los espacios para la construcción.

Durante la creación y ejecución del plan maestro de desarrollo, prevalecieron los intereses económicos por encima de las consideraciones técnicas y ambientales, provocando que los continuos cambios en su fisonomía natural sean directamente relacionados con una creciente vulnerabilidad ante la incidencia de eventos extraordinarios.

Capítulo 2.

Se observa que la zona en estudio presentaba originalmente la configuración morfológica de una isla barrera estrecha y con dos tómbolos en proceso de formación en sus puntas, pero esta configuración fue alterada mediante el acarreo y depósito de material hacia las puntas ensanchamiento de la isla y demás modificaciones realizadas para habilitar la zona para su urbanización.

La concepto jurídico sobre la zona federal marítimo terrestre con la cual se restringe la zona costera y da inicio a la construcción de infraestructuras en la costa, (*hoteles, vialidades, etc.*) mediante la cual se delimitan en nuestro país las playas, en el caso de Cancún no abarca la zona costera necesaria para la adecuada interacción de los procesos, hidrodinámicos y sedimentarios, por lo que esto es un factor que influye en el retroceso de la línea de costa alterando su funcionalidad de esta, por lo que sería necesario una reforma jurídica en este aspecto.

La construcción de edificaciones a lo largo de la costa y sobre la duna costera, han rigidizado el sistema y han restringido el suministro de material sedimentario hacia la playa.

Reducir el efecto reflejante de la energía en la línea de costa mejorará bastante la estabilidad de las playas y además esto beneficiaría al sistema lagunar.

Después de la incidencia del huracán Gilberto, el cual provocó un severo desequilibrio sedimentario en la playa, se observaron varios rasgos erosivos a lo largo de la costa como afloramientos rocosos y reducción del ancho de playa seca.

De acuerdo con el mosaico fotográfico de junio de 1999, y a pesar de no haber incidido fuertes eventos extraordinarios entre enero de 1990 a junio de 1999, se observa un patrón erosivo pues el ancho de playa seca medio se redujo en un 6.5%.

De acuerdo a la observación de los distintos mosaicos fotográficos se confirma la existencia de las bocas intermitentes y el desprendimiento de material rocoso en punta Cancún y la separación de las masas rocosas que conforman punta Nizuc, situación que ha propiciado que la zona en estudio le sea difícil recuperarse por sí sola.

Después de la incidencia del huracán Gilberto, Cancún quedó muy expuesto y vulnerable ante la incidencia de futuros eventos, como los que ocurrieron en 2002, (*Isidoro*) y 2005, (*Wilma*).

El relleno artificial realizado después del huracán Wilma fue una medida de carácter urgente y el cual necesita complementarse con otras acciones que pueden llegar a tener un alcance a corto o a largo plazo.

Capítulo 3.

La funcionalidad de la Playa en Cancún se ha delimitado al uso lúdico humano, sin embargo solamente para los perfiles medidos después del relleno se observan los anchos adecuados de playa seca recomendables para esta función.

Del análisis granulométrico realizado en las muestras recolectadas en abril del 2005, el material sedimentario presenta una clasificación de arena media.

Del análisis de los perfiles medidos se observó que entre las campañas 4 y 5, (*Noviembre de 1992 a febrero de 2000*), 6 y 7, (*junio de 2000 a abril de 2005*), 7 y 8, (*abril de 2005 a febrero de 2006*) se presentó mayor erosión por arriba del nivel medio del mar y por lo tanto un menor ancho de playa seca.

El tramo de playa comprendido entre los km 8+025 a 9+996, el cual se ubica entre el hotel Gran Oasis Cancún y Playa Delfines se concluye que es el sector playero menos vulnerable, debido que a lo largo de todas los perfiles medidos en las distintas campañas su ancho de playa fue siempre mayor a 10m.

Del km 2+430 al 3+042 ubicado entre los hoteles Hyatt Cancún Resort y Flamingo Cancún es el tramo más vulnerable, pues se han presentado anchos de playa menores a 2.5m

Capítulo 4.

El equipo de medición utilizado, (*Awac*) es confiable ya que soportó la incidencia del huracán Wilma sin desplazarse de su lugar.

Tras una simulación de 96 horas de un clima de oleaje correspondiente al huracán Wilma, se observa que la evolución que se presentó en los perfiles representativos fue casi nula para el perfil 1, pues se mantuvo prácticamente sin cambios, para el Perfil 2 se observó una reducción del 25 % del ancho de playa seca que corresponde a una pérdida

de 15.8m, en el perfil 3 la pérdida fue de 19.31% ó 7.50m, mientras que en el perfil 4 fue del 17.28% ó 7.53m.

De acuerdo a los cambios observados tras la simulación de 96 horas en los perfiles, se observa que la zona 2 la cual esta comprendida entre los km 3+500 a 6+300, sería la zona más vulnerable ante la incidencia de un evento extraordinario.

Capítulo 5.

De los tres casos de propagación con oleaje estacional se observa que en el caso 2, ($\alpha=90N$) se presenta una mayor longitud de costa, (3700m) con un coeficiente de propagación mayor de 1, sin embargo los coeficientes de propagación máximos se observaron en el caso 1, ($a=45N$).

Entre los kilometrajes 1+900 al 2+300 incidió un oleaje con los coeficientes de propagación mas elevados para todos los casos por lo que se considera o que este sector es el más vulnerable de la zona en estudio.

El oleaje propagado para el caso 4 reduce drásticamente en altura de ola al pasar por la curva batimétrica -15 metros, incidiendo sobre la costa con un coeficiente de propagación menor a 0.33.

Dentro de las propagaciones estacionales es para el caso 1, ($a=45N$) donde se presentan las velocidades de corrientes mas elevadas, con una dirección general de este patrón de corrientes de Punta Cancún hacia Punta Nizuc.

En el caso 2, ($\alpha=90N$) es en donde se observan las menores velocidades de corrientes debido a una incidencia mas oblicua del oleaje hacia la línea de costa.

Para la propagación del caso 4 (*oleaje extraordinario*), el sistema de corrientes cercano a la costa no es mayor de 12.5 cm/s.

Para todas las propagaciones la configuración de ambas puntas provoca un aumento en las velocidades de corrientes.

Con respecto al transporte potencial neto para las propagaciones estacionales, se observan magnitudes mayores de transporte entre las profundidades -2 a -3 metros y conforme la profundidad va aumentando el transporte potencial neto va disminuyendo.

Dentro de las propagaciones con oleaje estacional, es en el caso 3, ($a=135N$) donde el transporte potencial neto medio es mayor.

Para el caso 4 se observa un mayor volumen del transporte potencial neto a profundidades mayores siendo este máximo entre las profundidades -7 y -8 m.

Hay que tomar en cuenta que este modelo de propagación no describe todos los procesos involucrados, por tal motivo es recomendable interpretar los resultados con cuidado y criterio.

Capítulo 6.

Para evitar la salida de sedimentos del sistema y proteger las zonas con mayor erosión, es indispensable la construcción de estructuras que estén conectadas a las puntas y que obstaculicen la salida del material.

Es importante considerar que cualquier estructura que se construya debe ser rebasable ya que es importante mantener en la zona de estudio un entorno visualmente armonioso.

En todos los casos propagados se observa que las estructuras conectadas a ambas puntas disminuyen eficientemente el coeficiente de propagación del oleaje que incide sobre estas.

Los diques exentos de apoyo, (*estructuras 3 y 4*) proporcionan un adecuado abrigo generando una zona de calmas desde las puntas hasta estos diques en todos los casos.

Bajo las restricciones económicas es viable la instalación de geotubos en los sitios estudiados.

Las estructuras propuestas son compatibles con el proyecto de recuperación de arenales y por tanto pueden ser incorporadas como ampliación de alcances.

Las estructuras propuestas no evitarán la pérdida de playas en caso de un gran huracán, tan solo desacelerará el proceso de erosión.

Otras Conclusiones.

Los diferentes procesos físicos, biológicos y químicos influyen en la configuración de la línea de costa.

Los esfuerzos cortantes son las principales acciones que provocan el movimiento de sedimentos cercanos a la costa.

La viscosidad y la densidad del fluido influyen de manera directa en cuanto a la cantidad de sedimento dispuesto a suspensión, transporte y depósito.

La rugosidad del fondo afecta la velocidad del flujo y esta es un factor determinante para el cálculo del número de Reynolds.

Las ondas con periodos de 3 a 30 s son clasificadas como ondas gravitacionales, y son las principales tipos de ondas que ocasionan cambios en la morfología costera.

Los huracanes son los eventos extraordinarios más importantes y que han originado los principales cambios de la configuración de la línea de costa.

Debido a su latitud Cancún no se encuentra dentro de la zona de generación de huracanes, pero debido a la temperatura de la región los huracanes aumentan de tamaño en su paso por la zona.

9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.

Hacer una recopilación de un mayor número de fotografías aéreas para contar con un catálogo más completo de mosaicos de diferentes años.

Geo referenciar los mosaicos fotográficos obtenidos para así poder comparar con excelente precisión la evolución de la línea de costa para los diferentes años.

Realizar los levantamientos de los perfiles playeros con mayor regularidad (*4 por año, un en cada estación*) y prolongarlos hacia fuera del área de rompiente.

Sería deseable que los levantamientos se realizaran a partir de puntos preestablecidos y fijos para mantener una mejor precisión estos puntos podrían ser por ejemplo los límites entre los hoteles.

Realizar batimetrías de detalle desde la curva batimétrica -20 hacia la zona de rompientes.

Implementar nuevas tecnologías como el uso de cámaras que por medio de percepción remota sean capaces de obtener en tiempo real una adecuada imagen de la costa para después ortogonalizarla y así obtener planos en planta de la línea de costa y de la zona adyacente a esta para cualquier día u hora.

Instalación de un instrumento que registre de manera continua y por periodos largos de tiempo las velocidades de corrientes, periodos, altura de ola y dirección del oleaje ubicado en una profundidad límite entre aguas profundas e intermedias y a través de una estación de control recolectar en tiempo real la información registrada y procesarla instantáneamente para obtener un catálogo de clima de oleaje de la zona.

Realizar simulaciones hidrodinámicas con diferentes modelos numéricos disponibles y hacer comparaciones entre estos de los resultados y llegar a una correcta validación.

Realizar en laboratorio modelos a escala de las estructuras propuestas para probarlas y evaluar su funcionalidad antes de construirlas y así poder optimizarlas.

10. BIBLIOGRAFÍA.

Aguayo J. E., 1980, "Estudio Sedimentológico en el Area de Tulum-Cancún-Isla Mujeres en el Estado de Q. Roo.", Soc. Geológica Mexicana, Tomo XLI, Nos. 1 y 2.

Ávila A., A. Pedrozo, R. Silva y D. Simmonds, 2003, "Principales Teorías para el Modelado Matemático de la Propagación del Oleaje" IV Congreso Internacional, Puertos y Costas, Realidades y Prespectivas, AMIP. Acapulco Gro.

Camargo H. Jaime, 1990, "Evolución de las Playas de Cancún Q. Roo.", Instituto de Ingeniería UNAM., pp. 3-27.

Camargo H. Jaime, 1990, "Protección y Preservación de las Playas de Cancún Q. Roo.", Instituto de Ingeniería UNAM., pp. 5-40.

Caporro Luis, 2001, "Huracanes, Tifones, Baguíos, Willy-Willies y Ciclones", Avance y Prespectivas Vol. 20, Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados IPN. pp 221-233.

Lugo Hubp José, 1989, "Diccionario Geomorfológico", UNAM.: México.

Espinal J.C., Ramírez E., Ruiz F., Sánchez C., Lara A., y Silva R., 2005, "Sobre la Caracterización Morfológica de una Playa", V Congreso desarrollo costero y sustentable, AMIP. Veracruz, Ver.

Gelobert Oliver, 2005, "Diques de Baja Cota de Coronación", Tesina de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cantabria.

Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, 2000, "Estudios, Modelos de Simulación, y Proyecto ejecutivo para la Rehabilitación de las Playas en el Tramo Comprendido entre Punta Cancún y Punta Nizuc Cancún. Q. Roo. Segunda Etapa", CFE. pp. 23-49.

Galiana Mingot Tomas, 1987, "Gran Diccionario de las Ciencias", Ed. Larousse Paris Francia, pp. 193, 1140.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2000, "Documento de Referencia Vol.1, Dinámicas", Universidad de Cantabria, pp. 1-56.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2000, "Documento de Referencia Vol. 2, Procesos Litorales", Universidad de Cantabria, pp. 1-21, 25-43, 147-159.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2000, "Documento de Referencia Vol.3, Obras", Universidad de Cantabria, pp. 1-66, 132-205.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, "Documento Temático, Regeneración de Playas", Universidad de Cantabria, 207 p.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, “Documento Temático, Regeneración de Playas”, Universidad de Cantabria, 207 p.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, “Manual de Referencia, Modelo de erosión sedimentación”, Universidad de Cantabria, 41 p.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, “Manual de Referencia, Modelo de Corrientes de Rotura en Playa”, Universidad de Cantabria, 77 p.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, “Manual de Referencia, Modelo de Evolución del Perfil Transversal de Playa”, Universidad de Cantabria, 90 p.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, “Manual de Referencia, Modelo de Propagación de Oleaje Monocromático”, Universidad de Cantabria, 112 p.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, “Manual de Usuario Petra”, Universidad de Cantabria, 59 p.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2002, “Manual de Usuario Mopla”, Universidad de Cantabria, 271 p.

Inzunza Juan, 2003, “Meteorología Descriptiva” Universidad de Concepción Chile, pp. 191-216.

Isaac Azuz A., 2004, “El Manejo de los Cambios en la Morfología Costera”, El Manejo Costero en México, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 235-249.

Osnaya Romero Javier, 1990, “Cálculo de la Refracción del Oleaje en Cancún Q. Roo.”, Instituto de Ingeniería UNAM., pp.1-7.

Philip L., F. Liu, Losada J., “El Modelo Matemático en la Propagación del Oleaje en Ingeniería de Costas”.

Robert G. Dean y Robert A Dalrymple, 2000, “Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist”, World Scientific Vol. 2, pp. 1-5.

Robert G. Dean y Robert A Dalrymple, 2001, “Coastal Processes with Engineering Applications”, Cambridge University Press, pp. 3-78.

Silva Casarín R., 2005, “Análisis y Descripción Estadística del Oleaje”, Instituto de ingeniería UNAM., pp. 17-37.

US Army Corps of Engineers, 2002, “Coastal Engineering Manual, Chapter 2, Coastal Divesity” 29 p.

US Army Corps of Engineers, 2002, “Coastal Engineering Manual, Chapter 3, Coastal Morphodynamics” 93 p.

Woodrofe Colin D, 2002 “Coast from Proces and Evolution”, Cambridge University Press, pp. 1-35, 90-136, 248-265.

11. ANEXOS.

11.1. Celdas Litorales.

11.1.1. Celdas litorales Cancún diciembre de 1985.

Cancún Diciembre de 1985				
Celda No	1	2	3	4
Tipo de costa	Playa	Playa	Playa	Playa
material	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa
Forma	encajada	recta	recta	semirecta
Ubicación entre hoteles actuales				
De	Dreams Cancun	Hyatt Regency	Carisa y palma	Sandy village
A	Hyatt Regency	Carisa y palma	Sandy village	Club med
Dimensiones de playa seca (m)				
Ancho maximo	40.53	56.15	71.26	96.45
Ancho medio	19.36	35.30	60.47	55.63
Ancho mínimo	6.06	7.76	49.51	19.48
Longitud	162.76	612.45	442.68	11578.98
Rasgos morfológicos				
Flecha	No	No	No	No
Tómbolo	No	No	No	No
hemitómbolo	No	No	No	No
Punta	1.00	No	No	No
Saliente	1.00	1.00	mas de 1	mas de 1
Barras	No	Si	No	Si
Bajo	Si	No	No	Si
Boca de río	No	No	No	No
Afloramiento rocosos	Si	No	si	si
Terraza rocosa	No	No	No	No
Arrecife	No	No	No	Si
Otro	No	No	No	No
Estructuras artificiales en playa o cerca de la costa				
Dique	No	No	No	No
Espigón	No	No	No	No
Muelle	No	No	No	No
Otros	terrazza	muro de cont	No	No
	muro de cont			
Limites naturales o artificiales de las celdas				
De	Punta	Saliente	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso
A	Saliente	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Punta

11.1.2. Celdas litorales Cancún enero de 1990.

Cancún Enero de 1990								
Celda No	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo de costa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa
material	arenosa	mixta	mixta	mixta	mixta	mixta	mixta	arenosa
Forma	encajada	semirecta	semirecta	semirecta	recta	recta	recta	encajada
Ubicación entre hoteles actuales								
De	Dreams Cancún	Hyatt Regency	Disco the city	Carisa y palma	Sandy Village	Royal sunset	Hyatt resort	Hyatt resort
A	Hyatt Regency	Disco the city	Carisa y palma	Sandy Village	Royal sunset	Hyatt resort	Hyatt resort	Gran caribe real
Dimesniones de playa seca (m)}								
Ancho maximo	30.54	27.69	26.67	32.23	34.75	20.43	11.25	18.06
Ancho medio	19.34	14.86	17.85	24.98	20.86	13.15	8.79	8.89
Ancho mínimo	13.92	0.00	5.34	18.84	4.30	4.30	0.00	0.00
Longitud	76.21	501.22	291.70	398.02	277.08	338.56	202.07	103.27
Rasgos morfológicos								
Flecha	No	No	No	No	No	No	No	No
Tómbolo	No	No	No	No	No	No	No	No
hemitómbolo	No	No	No	No	No	No	No	No
Punta	1.00	No	No	No	No	No	No	No
Saliente	1.00	mas de 1	1.00	No	No	No	No	No
Barras								
Bajo	Si	Si	No	No	No	No	No	No
Boca de río	No	No	No	No	No	No	No	No
Afloramiento rocosos	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No
Terraza marina	No	No	No	No	No	No	No	No
Arrecife	No	No	No	No	No	No	No	No
Otro	No	No	No	No	No	No	No	No
Estructuras artificiales cerca o en la línea de costa								
Dique	No	No	No	No	No	No	No	No
Espigón	No	No	No	No	No	No	No	No
Muelle	No	No	No	No	No	No	No	No
otras	barda	barda	hotel	No	No	barda	muro de cont.	terrazza
	terrazza					muro de cont.	terrazza	barda
Limites naturales o artificiales de las celdas								
De	Punta	Saliente	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Roca	muro de cont.	terrazza
A	Saliente	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Roca	muro de cont.	terrazza	barda

Cancún Enero de 1990							
-----------------------------	--	--	--	--	--	--	--

Celda No	9	10	11	12	13	14	15
Tipo de costa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa
material	mixta	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa
Forma	recta	recta	recta	recta	recta	recta	recta
Ubicación entre hoteles actuales							
De	Gran caribe real	Flamingo	Particulares	Marriot	Fiesta americana	Hilton	Crown paradise
A	Flamingo	Particulares	Marriot	Fiesta americana	Hilton	Crown paradise	Club med
Dimensiones de playa seca (m)							
Ancho maximo	33.44	44.98	25.67	26.89	32.9	30.91	35.27
Ancho medio	11.33	19.17	17.00	17.62	22.88	19.38	23.7
Ancho mínimo	0.00	7.23	6.50	4.38	9.52	8.16	9.05
Longitud	534.39	2631.98	1279.19	713.67	1510.24	1271.99	2388.67
Rasgos morfológicos							
Flecha	No	No	No	No	No	No	No
Tómbolo	No	No	No	No	No	No	No
hemitómbolo	No	No	No	No	No	No	No
Punta	No	No	No	No	No	No	1.00
Saliente	1.00	mas de 1	mas de1	mas de 1	mas de 1	mas de 1	mas de 1
Barras							
Bajo	No	No	No	No	No	No	Si
Boca de río	No	No	No	No	No	No	No
Afloramiento rocosos	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Terraza marina	No	No	No	No	No	No	No
Arrecife	No	No	No	No	No	No	Si
Otro	No	No	No	No	No	No	No
Estructuras artificiales cerca o en la línea de costa							
Dique	No	No	No	No	No	No	No
Espigón	No	No	No	No	No	No	No
Muelle	No	No	No	No	No	No	No
otras	barda	barda	muro decont.	muro de cont.	No	No	No
Limites naturales o artificiales de las celdas							
De	barda	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	muro de cont.	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso
A	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	muro de cont.	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Punta

11.1.3. Celdas litorales Cancún junio de 1999.

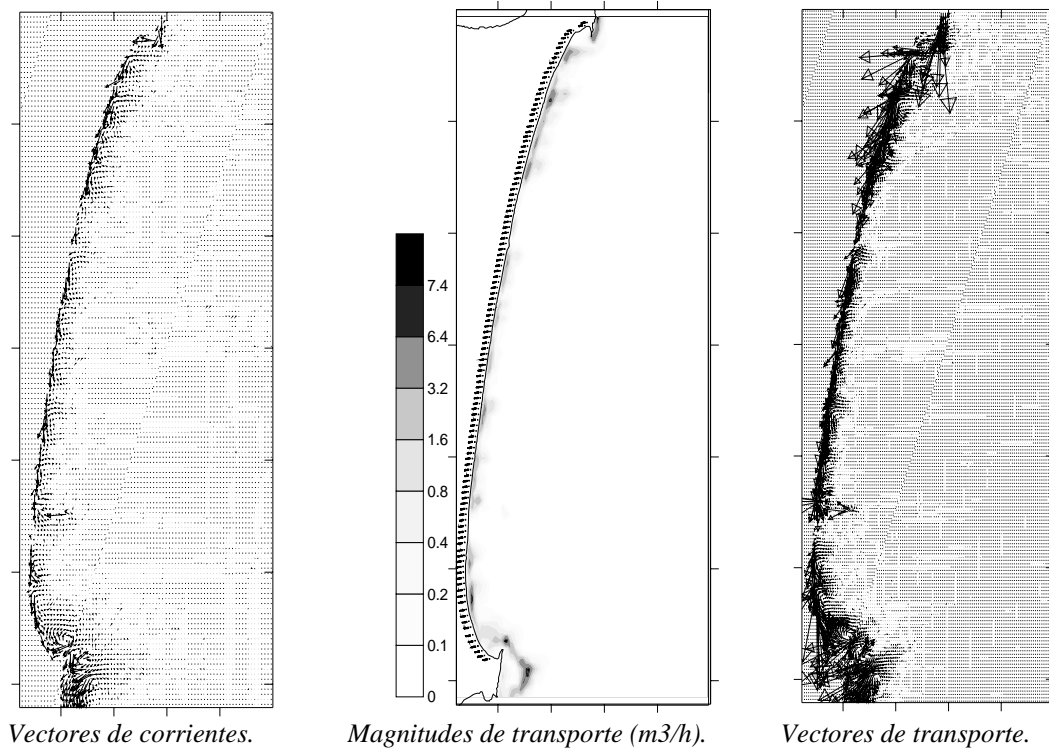
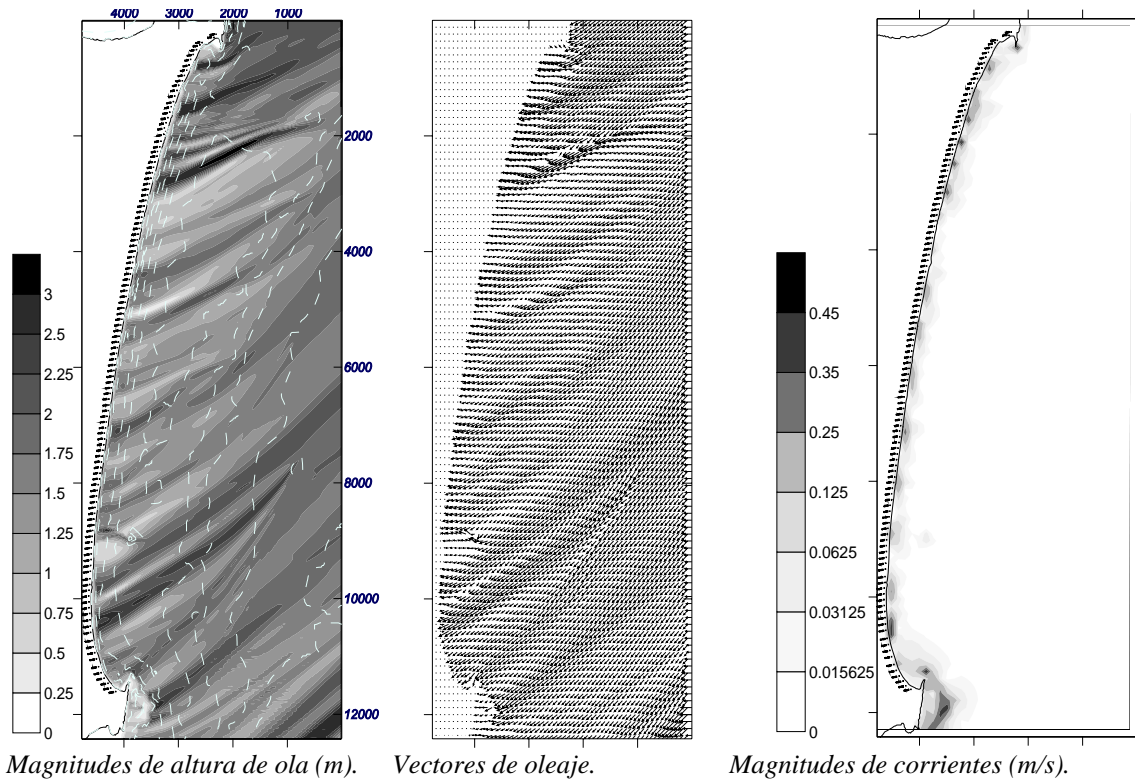
Cancún Junio de 1999						
Celda No	1	2	3	4	5	6
Tipo de costa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa
material	arenosa	arenosa	mixta	mixta	arenosa	arenosa
Forma	encajada	semirecta	semirecta	semirecta	recta	recta
Ubicación entre hoteles actuales						
De	Dreams Cancún	Hyatt Regency	Bar the city	Carisa y palma	Sandi Village	Miramar mison
A	Hyatt Regency	Bar the city	Carisa y palma	Sandi Village	Miramar mison	Miramar mison
Dimensiones de playa seca (m)}						
Ancho maximo	33.12	31.46	25.06	30.12	26.72	16.07
Ancho medio	17.17	16.67	16.01	26.33	21.27	12.92
Ancho mínimo	5.08	5.86	7.17	20.54	12.09	10.64
Longitud	175.35	390.63	258.58	396.30	151.80	44.85
Rasgos morfológicos						
Flecha	No	No	No	No	No	No
Tómbolo	No	No	No	No	No	No
hemitómbolo	No	No	No	No	No	No
Punta	1.00	No	No	No	No	No
Saliente	1.00	3.00	No	No	1.00	No
Barras	No	No	No	No	Si	Si
Bajo	Si	Si	No	No	No	No
Boca de río	No	No	No	No	No	No
Afloramiento rocosos	1 grande	mas de 1	mas de 1	1.00	1.00	No
Terraza rocosa	No	No	dos	No	No	No
Arrecife	No	No	No	No	No	No
Otro	No	No	No	No	No	No
Estructuras artificiales en playa o cerca de la costa						
Dique	2 sumergidos	No	No	No	No	No
Espigón	No	No	No	No	1 sumergido	2 sumergidos
Muelle	No	1.00	No	No	No	No
Otros	terrazza	muro de cont.	No	No	No	No
	muro de cont.					
Limites naturales o artificiales de las celdas						
De	Punta	Saliente	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Terraza marina	Espigón
A	Saliente	Aflor. Rocoso	Aflor. Rocoso	Terraza marina	Espigón	Espigón

Cancún Junio de 1999						
Celda No	7	8	9	10	11	12
Tipo de costa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa	Playa
material	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	mixta	arenosa
Forma	recta	semirecta	recta	encajada	semirecta	semirecta
Ubicación entre hoteles actuales						
De	Miramar mison	Royal sunset	Hyatt Resort	Hyatt Resort	Gran Caribe	Gran Caribe
A	Royal sunset	Hyatt Resort	Hyatt Resort	Gran Caribe	Gran Caribe	Club med
Dimensioes de playa seca (m)						
Ancho máximo	23.06	29.91	15.00	14.48	17.15	37.13
Ancho medio	17.09	13.29	13.43	13.26	6.34	21.34
Ancho mínimo	9.18	8.26	8.49	10.25	0.00	7.73
Longitud	78.00	337.34	199.65	115.00	321.42	9825.63
Rasgos morfológicos						
Flecha	No	No	No	No	No	No
Tómbolo	No	No	No	No	No	No
hemitómbolo	No	No	No	No	No	No
Punta	No	No	No	No	No	1.00
Saliente	No	No	No	1.00	No	26.00
Barras	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Bajo	No	No	No	Si	No	Si
Boca de río	No	No	No	No	No	No
Afloramiento rocosos	1.00	1.00	1.00	No	mas de 1	mas de 1
Terraza rocosa	No	No	No	No	No	No
Arrecife	No	No	No	No	No	Si
Otro	1 roca grande	2 rocas grandes	1 roca grande	No	No	No
Estructuras artificiales en playa o cerca de la costa						
Dique	No	No	No	No	No	No
Espigón	1 sumergido	No	No	No	No	No
Muelle	No	No	No	No	No	No
Otros	No	terraza	terraza	terraza	barda	terrazas
		muro de cont.		barda		
Limites naturales o artificiales de las celdas						
De	Espigón	Roca	Roca	Terraza de hotel	Barda hotel	Aflor. Rocosos
A	Roca	Roca	Terraza de hotel	Barda hotel	Aflor. Rocosos	Punta

11.2. Mapas de clima de oleaje.

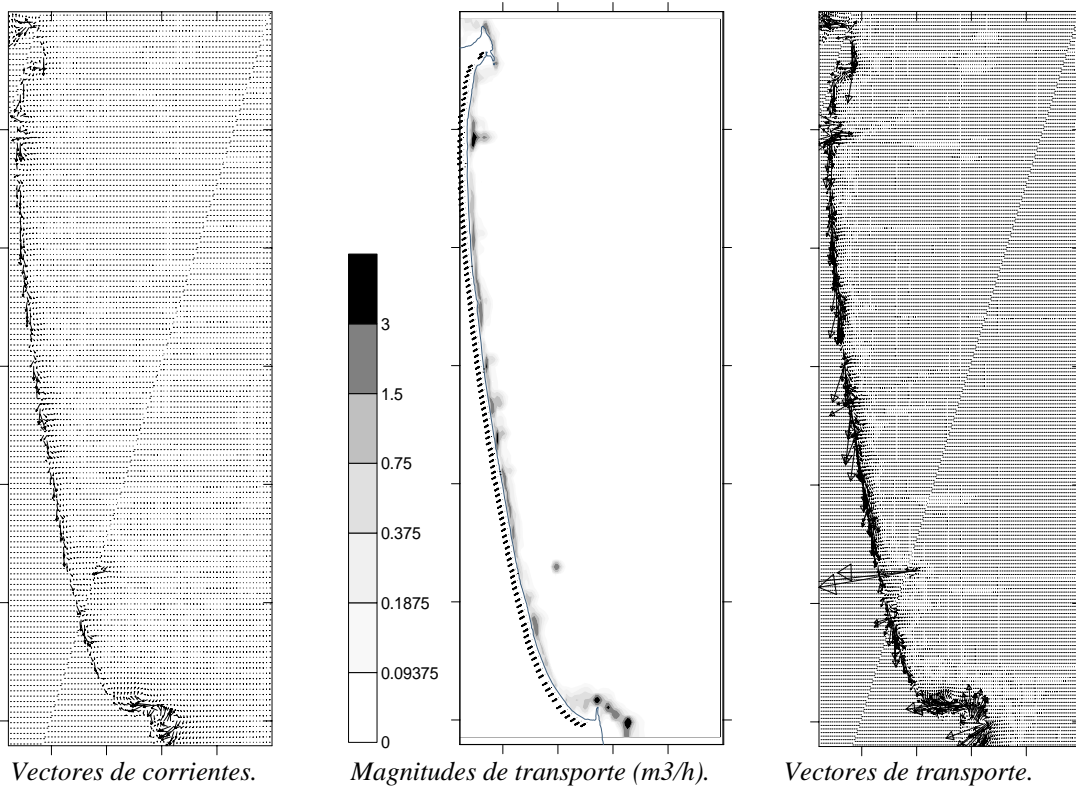
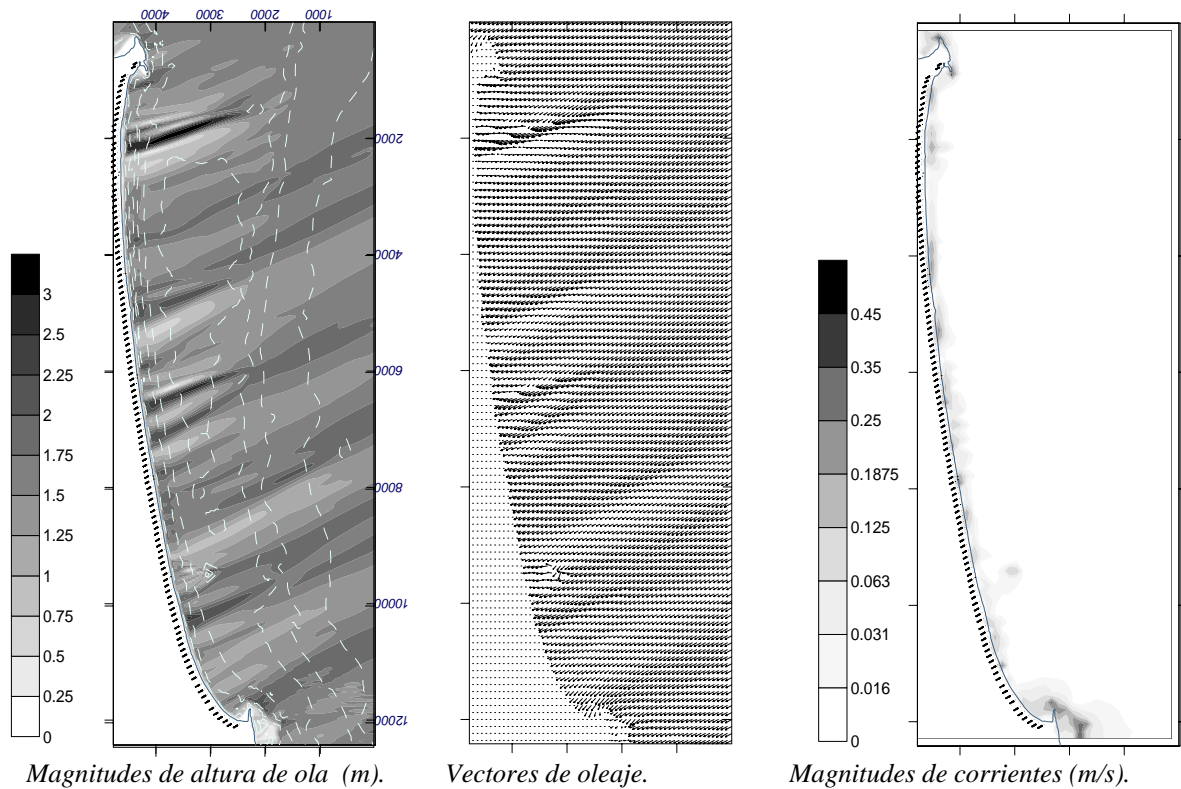
11.2.1. Propagación caso 1.

$H= 1.84\text{m}$, $T= 8.36\text{s}$, $\text{Dir.}=45\text{N}$. Malla girada 10.37° a la izquierda.



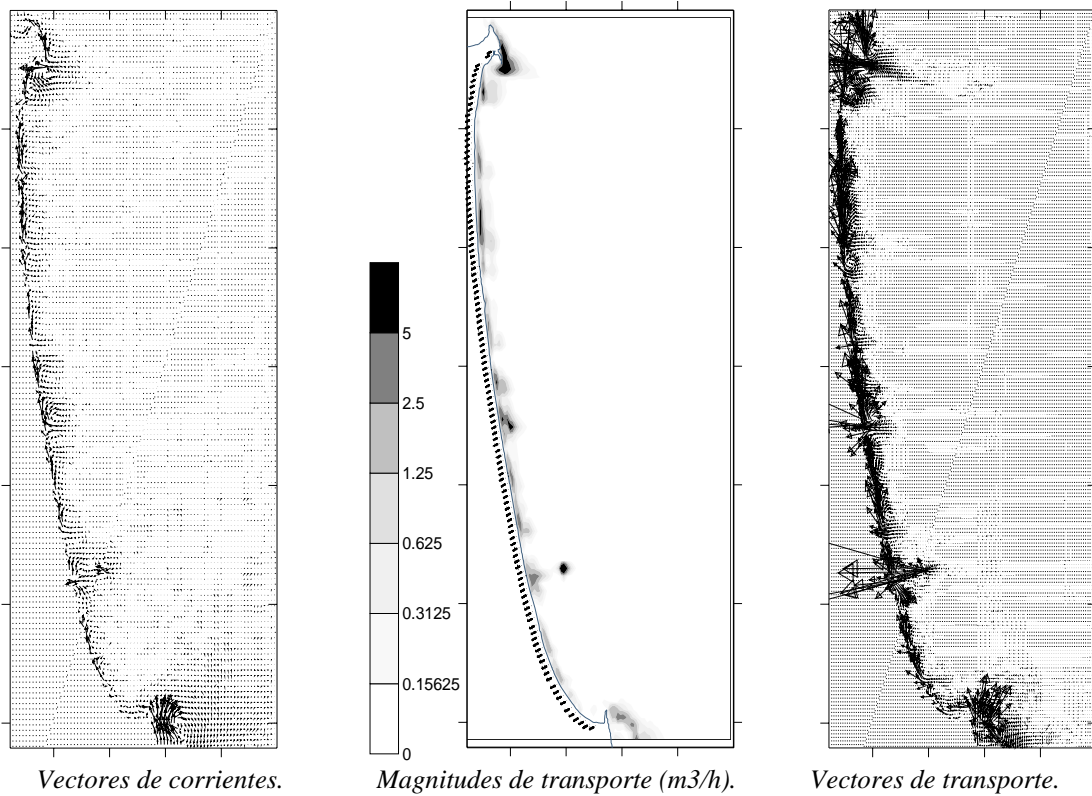
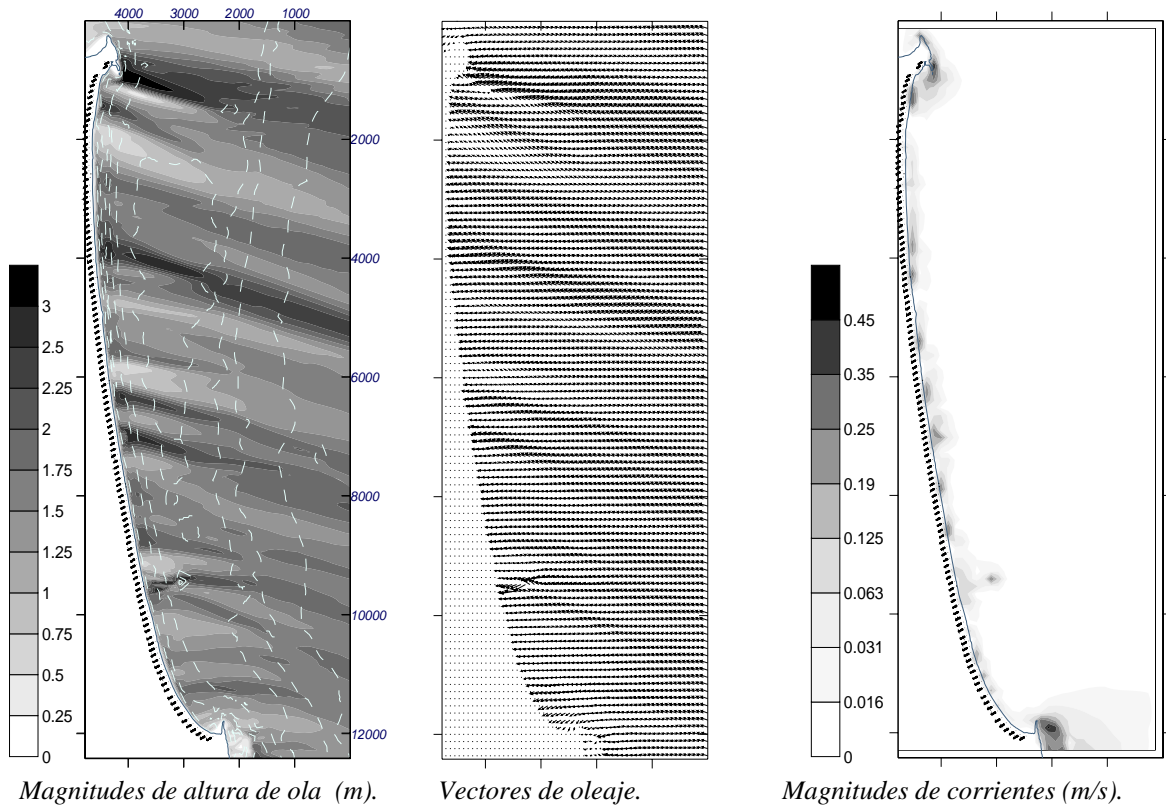
11.2.2. Propagación caso 2.

H= 1.72m, T= 7.47s, Dir.=90N. Malla girada 28.82° a la izquierda.



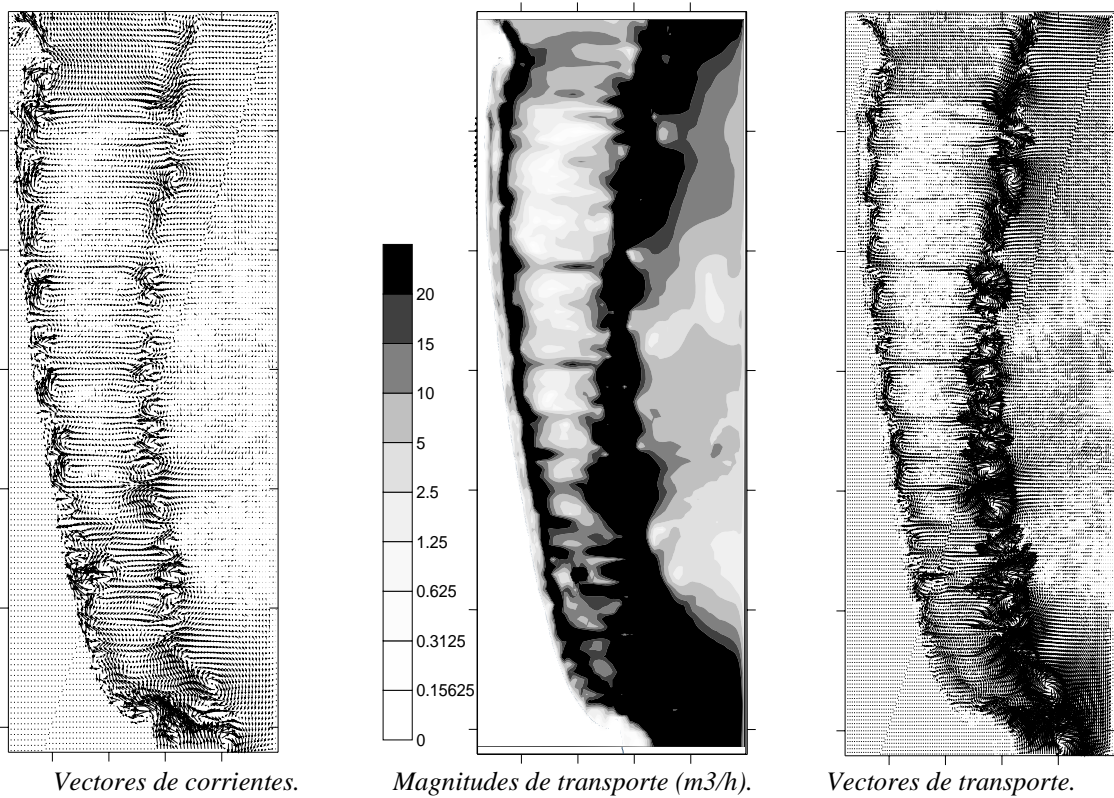
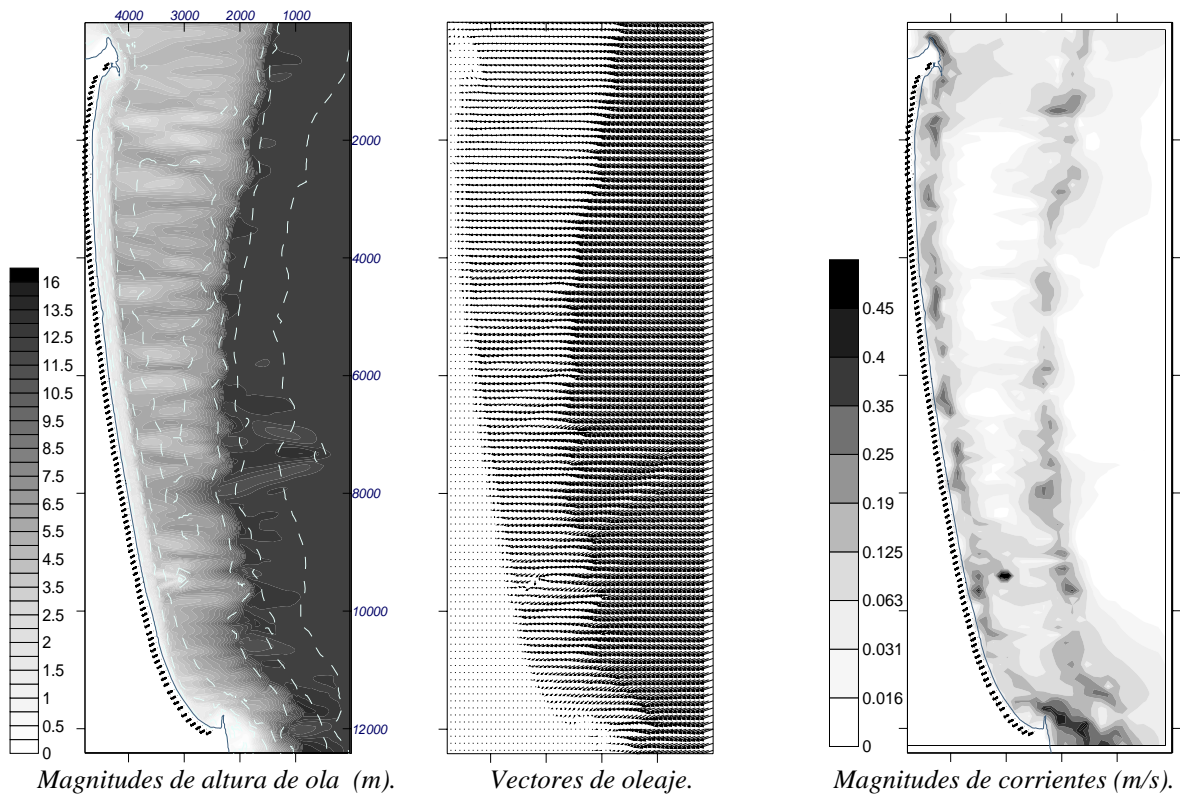
11.2.3. Propagación caso 3.

H= 1.83m, T= 8.59s, Dir.=135N. Malla girada 28.82° a la izquierda.

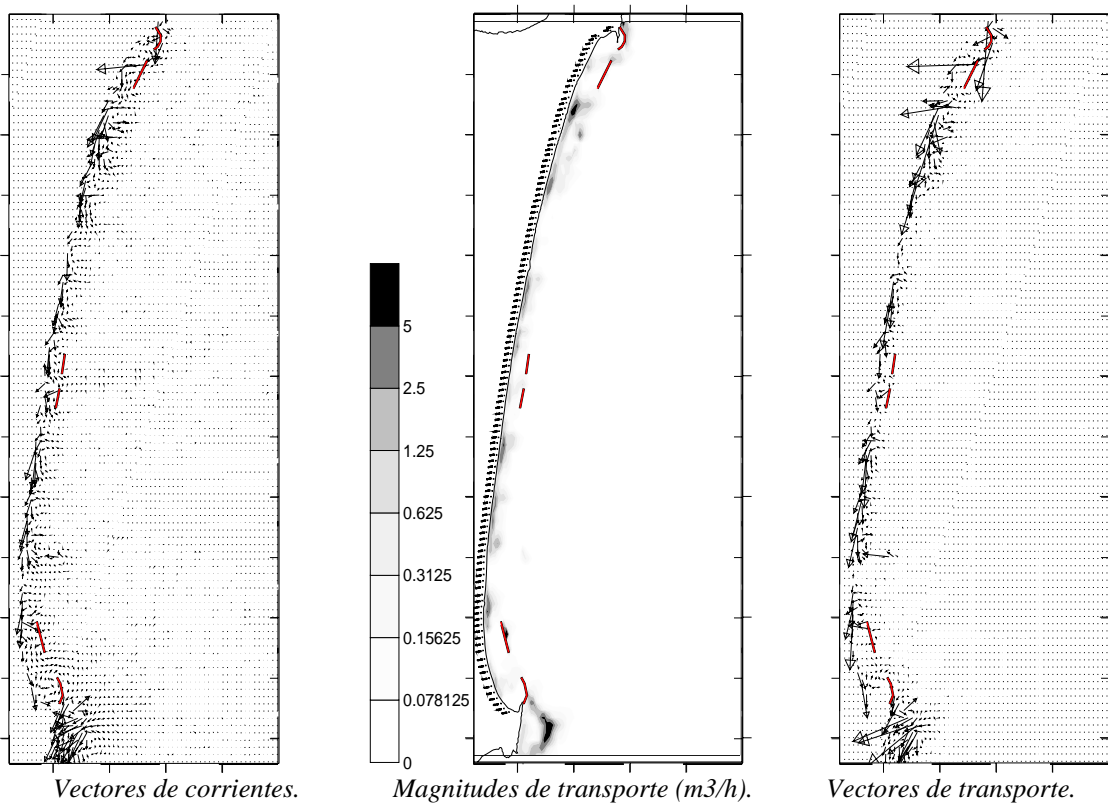
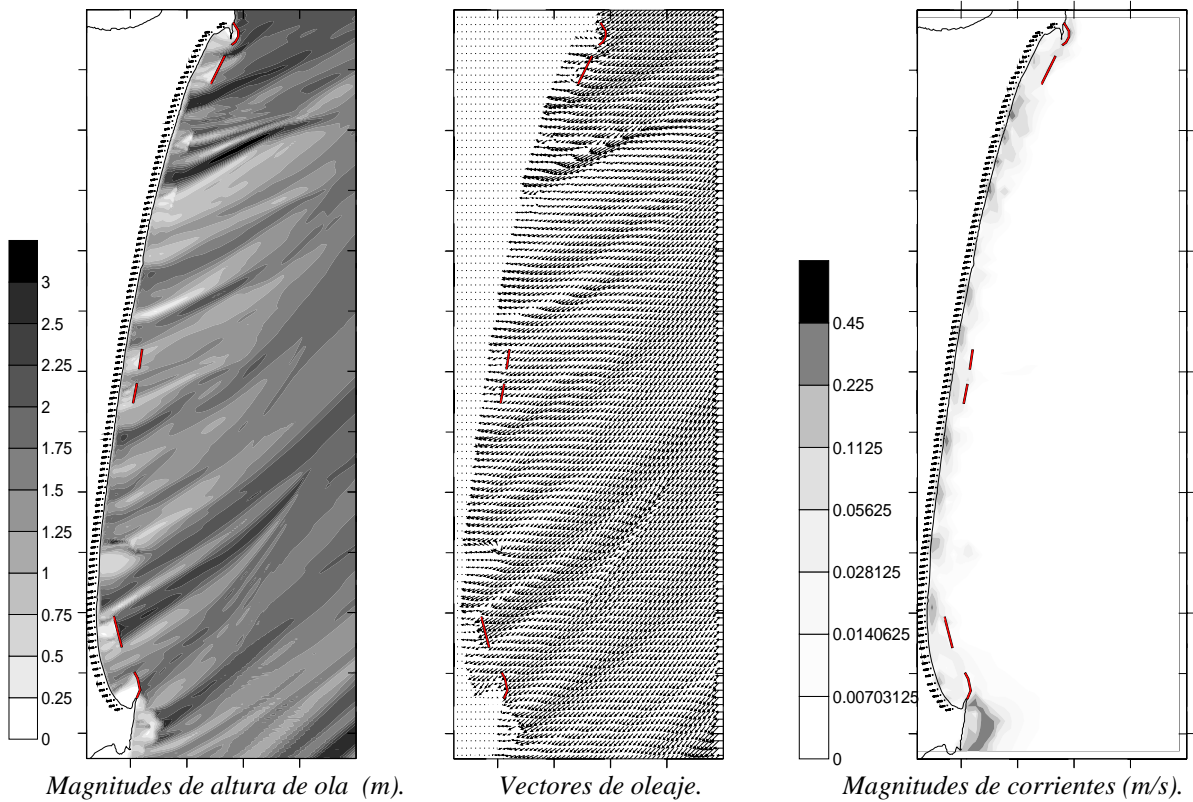


11.2.4. Propagación caso 4.

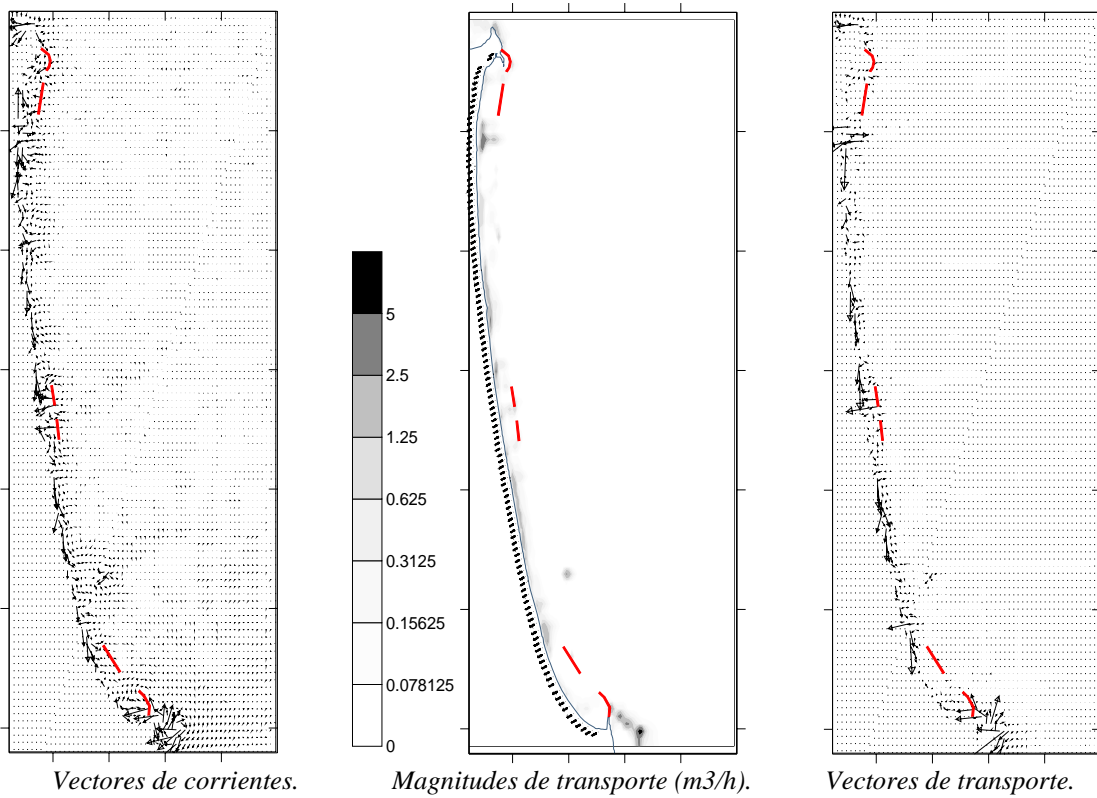
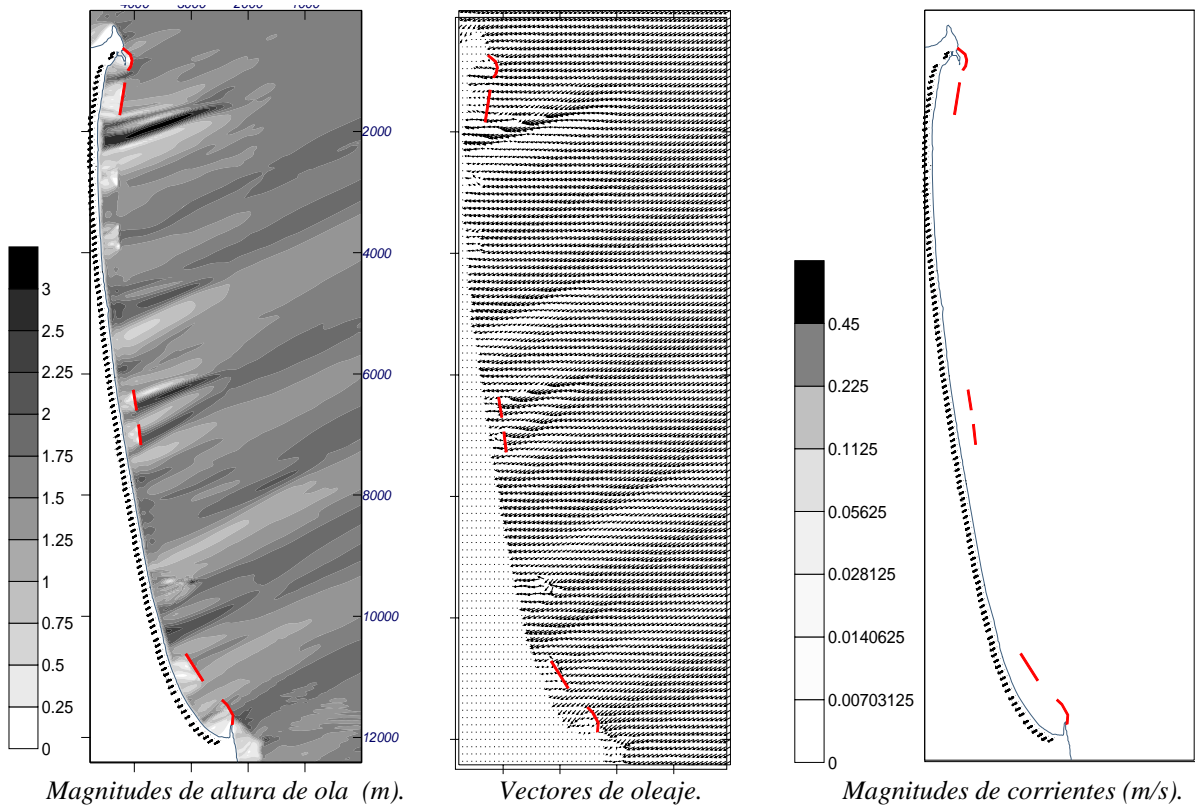
H= 12.29m, T= 13.66s, Dir.=101N. Malla girada 28.82° a la izquierda.



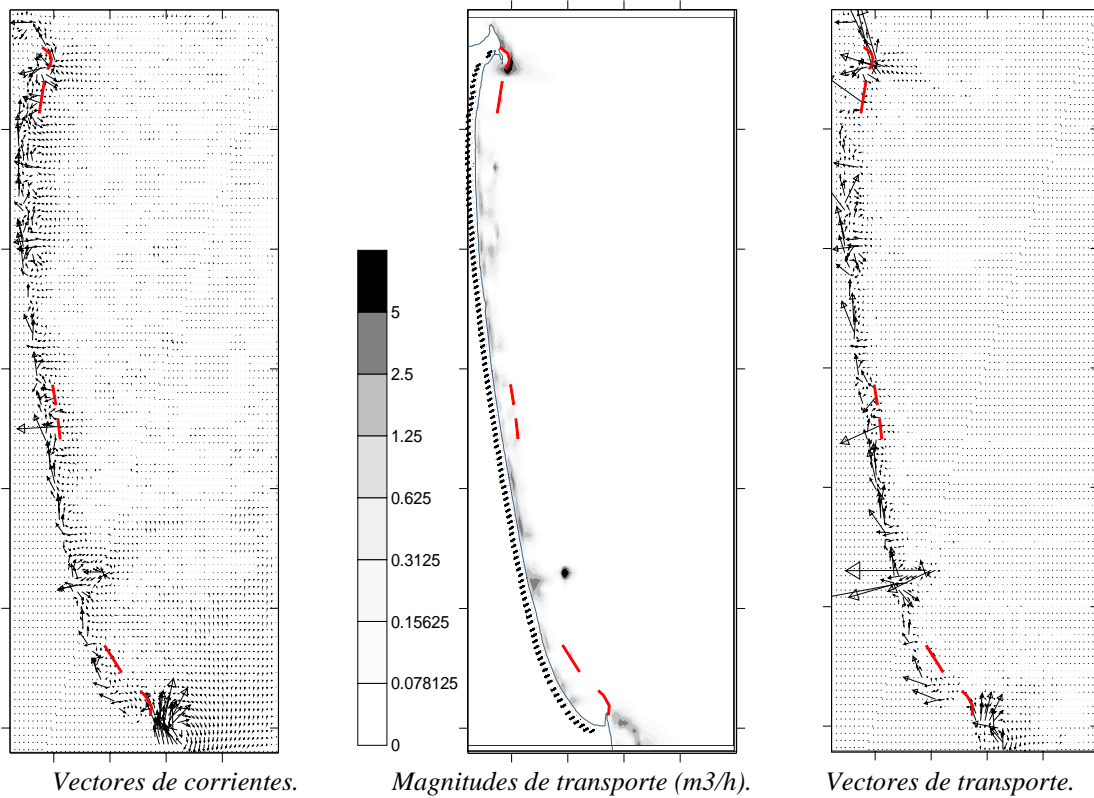
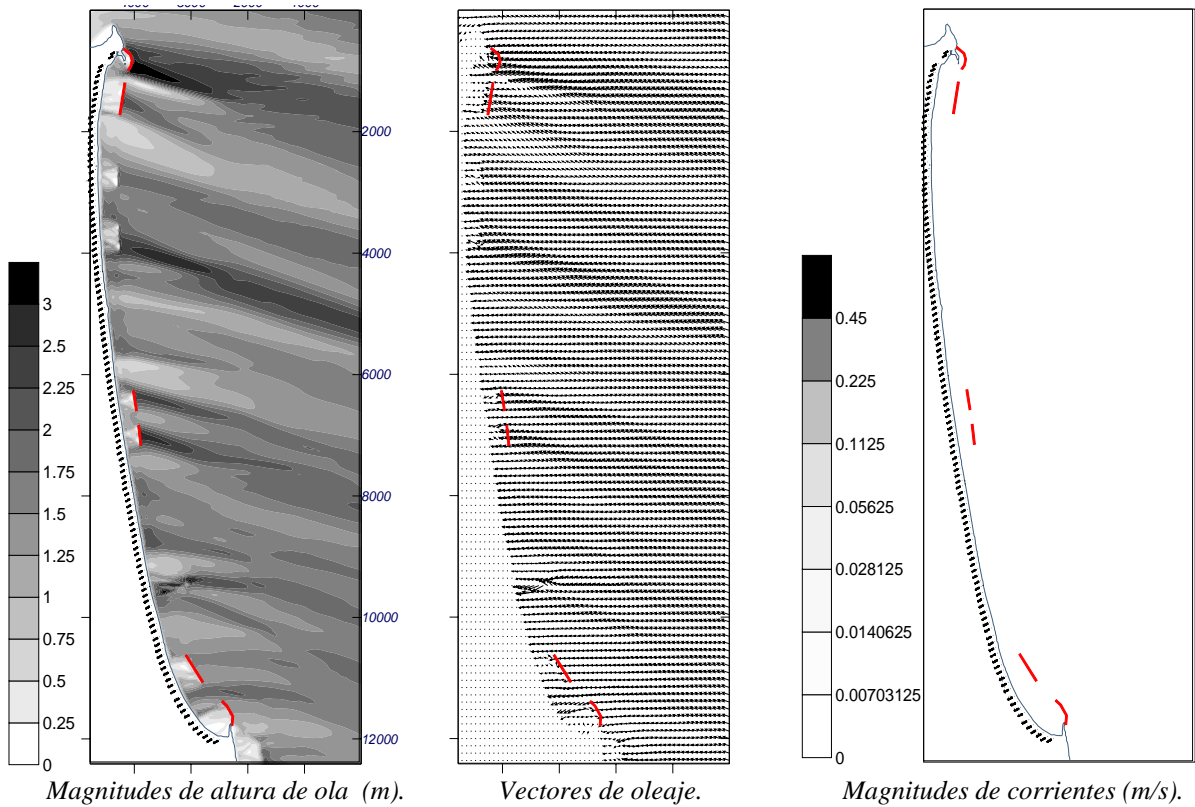
11.2.5. Propagación con estructuras caso 1.



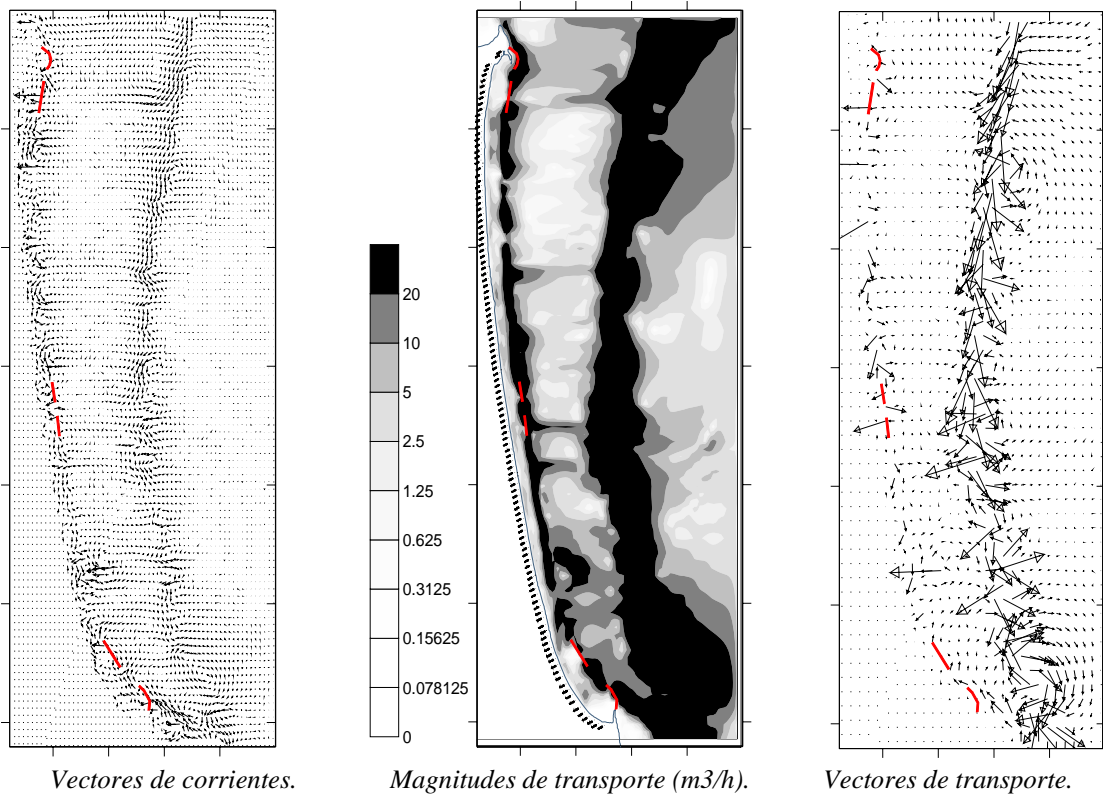
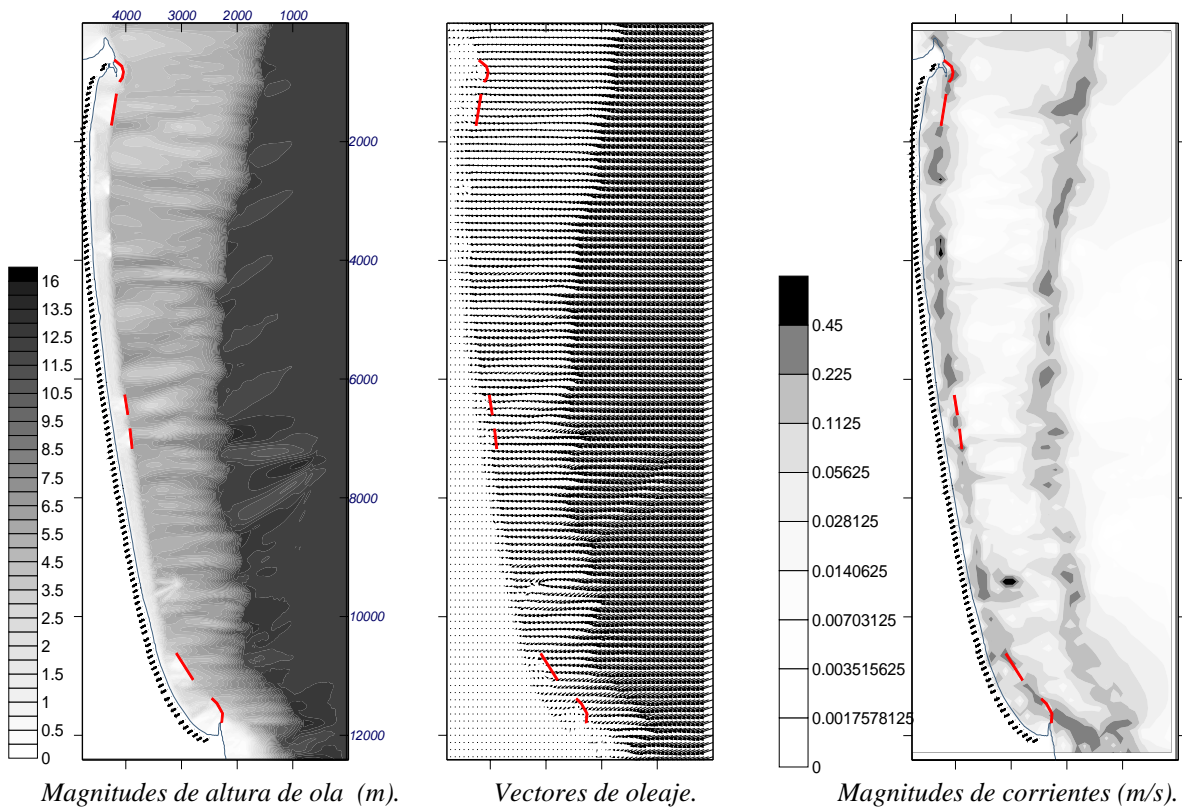
11.2.6. Propagación con estructuras caso 2.



11.2.7. Propagación con estructuras caso 3.



11.2.8. Propagación con estructuras caso 4.



11.3. Memoria de cálculo diques propuestos.

Franco bordo (m)	-0.125	-0.250	-0.500	-0.750	-1.000	Longitud
						Dique
Estructura 1	73.60	29.00	54.18	143.60	114.62	415.00
Estructura 2	50.27	49.28	103.44	61.23	172.59	436.81
Estructura 3	0	0	0	500	0	500
Estructura 4	0	0	0	500	0	500
Estructura 5	0	0	0	300	0	300
Estructura 6	0	0	0	300	0	300

Talud exterior (cot α) =	1.5				
Talud morros (cot α) =	1.5				
Talud interior (cot α) =	1.5				
Densidad del material (kg/m ³) =	2200				
Densidad del agua (kg/m ³) =	1025				
Nivel de destrucción=	Inicio de avería				
Altura de ola de diseño (m) =	2.5				
Franco bordo (m)	-0.125	-0.250	-0.500	-0.750	-1.000
Talud exterior					
Ø (m)	0.47	0.46	0.44	0.42	0.40
w (kg)	282.76	263.00	227.00	197.00	171.30
Coronación					
Ø (m)	0.52	0.54	0.51	0.46	0.39
w (kg)	422.92	415.00	352.00	251.76	156.20
Talud interior					
Ø (m)	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22
w (kg)	95.27	82.00	58.70	40.60	27.40
Morro					
Ø (m)	0.51	0.48	0.44	0.40	0.36
w (kg)	345.00	300.00	224.00	168.00	125.53

11.4 Procesos costeros.

Los cambios en la fisonomía de una costa son producto de la incidencia de una serie de procesos, los cuales pueden ocurrir de manera individual, sin embargo en la gran mayoría de los casos ocurren simultáneamente o en secuencia.

También las distintas formas costeras que se observan en una determinada línea de costa son el resultado de los procesos que operan en el presente sobre ésta y de aquéllos que operaron o que han operado por largo tiempo. La composición de las distintas formas de una costa pueden ser de material rocoso o sedimentos, siendo el estudio del transporte de sedimentos uno de los principales puntos de interés de la morfodinámica costera.

11.4.1 Procesos sedimentarios.

Los procesos erosionales que ocurren en una determinada costa, son causa de la suspensión, transporte y depósito de los sedimentos. Cerca de la línea de costa los fragmentos de rocas y sedimentos son transportados dentro de un fluido que generalmente es agua, pero ocasionalmente este fluido también puede ser aire o hielo.

La velocidad con que los procesos erosionales actúan, depende de las características del material donde inciden, (*rocas y sedimentos*) en especial las características individuales granulares tales como; porosidad, densidad, forma, tamaño, ángulo de reposo velocidad de caída y granulometría, también dependen de las características físicas y mecánicas del fluido.

Un elevado grado de simplificaciones matemáticas se ve involucrado en la aplicación de los principios de la dinámica de fluidos al transporte de sedimentos costero, esto en relación a la forma en que los granos idealizados se mueven bajo un flujo constante dentro de un fluido incompresible llamado in viscosidad, sin embargo en la práctica las condiciones naturales rara vez se comportan de acuerdo a estas suposiciones. Por ejemplo, los flujos generalmente no son ideales y las interacciones grano-fluido ó grano-grano, pueden ocurrir en diferentes escalas espaciales y temporales que influyen el inicio de movimiento de los granos debido a las corrientes, su comportamiento durante el transporte y finalmente su depósito, (*Bagnold, 1966*).

Sedimentos en suspensión.

La puesta en suspensión de un material granular depende tanto de la velocidad de caída del mismo como de la densidad y viscosidad del fluido.

La densidad es una medida del peso por unidad de volumen del fluido y ésta puede influenciar en la magnitud de las fuerzas, la efectividad con la cual ciertos disturbios como el oleaje viajan en el fluido. El agua dulce tiene una densidad de 1 Ton/m³, mientras que el agua de mar de 1.028 Ton/m³.

La viscosidad es una medida de la resistencia del fluido a la deformación o al flujo, esta es medida como una relación entre el esfuerzo cortante, (*la fuerza de corte aplicada a una unidad de área*), y la proporción de deformación y la temperatura dependiente.

Por otro lado la velocidad es la tasa en la que un fluido fluye, es un vector que tiene magnitud y dirección. La geomorfología costera está relacionada a una amplia variedad de movimientos del agua y estos incluyen los movimientos del oleaje y la influencia del flujo de los ríos en las desembocaduras.

Los flujos generalmente son complejos en la capa límite, sobre la superficie del lecho, por lo que es de importancia determinar si el flujo es laminar o turbulento. El flujo laminar es en el cual las líneas de corriente son paralelas y éste ocurre cuando la velocidad es baja y la viscosidad alta, en cambio en un flujo turbulento se forman varios remolinos dispuestos al azar y ocurre cuando el flujo es rápido y la viscosidad baja.

En la mayoría de los casos se presenta un flujo turbulento, y la velocidad de dichos flujos es variable en el tiempo, por lo que esta puede ser expresada como un promedio temporal denominada velocidad media. La forma de determinar los límites entre ambos estados es con el número de Reynolds. Este es un número adimensional y es obtenido mediante una relación de las fuerzas inerciales (*velocidad media bajo una profundidad o distancia definida*) y las fuerzas de viscosidad.

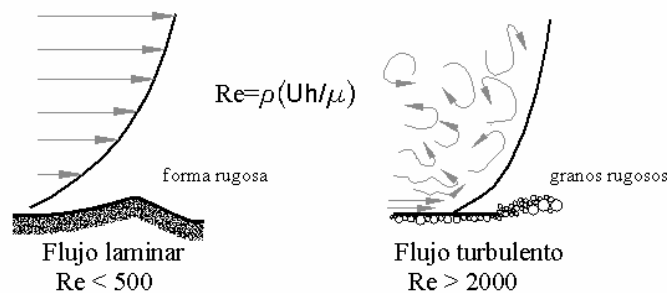


Figura 11-1 Número de Reynolds.

El flujo laminar ocurre cuando $Re < 500$, el flujo turbulento cuando $Re > 2000$ y el flujo en transición ocurre en el intervalo $500 > Re < 2000$. Aún en los flujos turbulentos existe una subcapa viscosa laminar en la capa límite directamente encima de la superficie del estrato y debajo del flujo turbulento.

La rugosidad del lecho es expresada también con la rugosidad de los granos o como las formas de fondo, esto es importante para determinar si un flujo es o no turbulento, (Hardisty, 1994).

El flujo se puede comportar de diferentes maneras, fundamentalmente por la relación de las fuerzas inerciales, (*caracterizada por la velocidad del flujo*) respecto a las de gravedad, (*caracterizadas por la raíz cuadrada del producto de la profundidad del fluido y la aceleración de la gravedad*) esto es expresado por el número de Froude.

Cuando el número de Froude es < 1 existe un régimen subcrítico, siendo más importantes las fuerzas de gravedad que las de inercia, ya que el flujo ocurre con poca velocidad y es tranquilo.

Cuando el número de Froude es > 1 el flujo está en un régimen supercrítico, donde las fuerzas inerciales predominan sobre las gravitacionales, el flujo es rápido o torrencial.

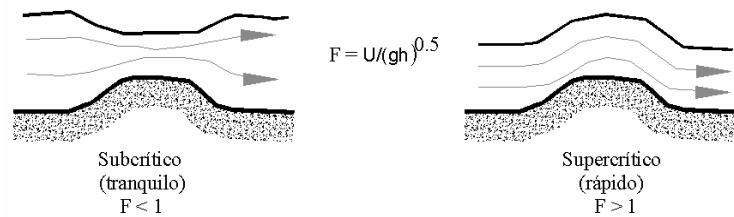


Figura 11-2 Número de Froude.

Cuando existe un cambio abrupto de un régimen a otro se manifiesta un salto o remanso hidráulico.

Un fluido en reposo ejerce una fuerza estática debido a su masa (*llamada hidrostática en el caso del agua*), esta energía potencial está en función de su masa y de la gravedad, en cambio un fluido en movimiento posee energía cinética, que es una medida del trabajo hecho o ganado dentro de ese estado de movimiento. Este pierde energía por fricción, y la suma de las energías cinética y potencial es una constante.

La solides del material es generalmente definida como la habilidad de éste para resistir las principales acciones erosionales, las fuerzas de tensión ocasionan estiramientos en el material, mientras que las de compresión ocasionan la trituración del mismo y las fuerzas cortantes ocasionan deformaciones por deslizamiento.

Mientras que las fuerzas compresibles pueden ser las dominantes cuando se presenta el impacto del oleaje sobre las superficies rocosas. Son las acciones provocadas por las fuerzas de corte las que se encargan del movimiento de los fluidos sobre el fondo marino y estas son las principales fuerzas con principal significado geomorfológico en la zona costera.

Los sedimentos pueden ser clasificados en material cohesivo y no cohesivo. El material cohesivo son los limos y arcillas, en los cuales sus partículas se mantienen juntas debido a la acción de las fuerzas electrostáticas que predominan sobre las fuerzas gravitacionales que intentan separar dichas partículas. Los materiales no cohesivos son las arenas y gravas

En la Figura 11-3 se observan las distintas fuerzas ejercidas en los granos de un lecho de sedimentos, los esfuerzos cortantes en este lecho están relacionados con la velocidad del flujo, la cual se define como la fuerza por unidad de área paralela al lecho y ejerce el arrastre del fluido a través del área proyectada del grano. Es imposible medir el esfuerzo de corte directamente, pero es muy probable que éste varíe en espacio y tiempo.

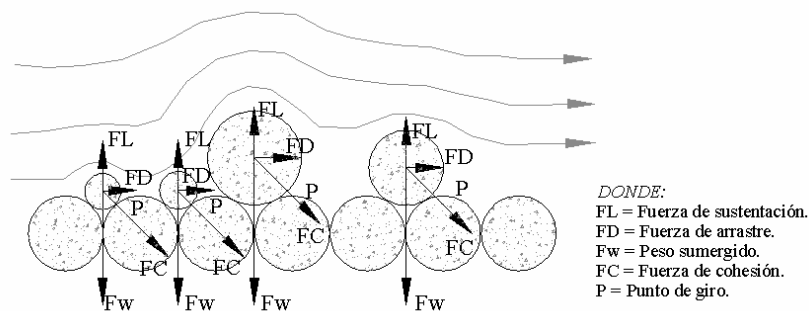


Figura 11-3 Fuerzas en las partículas.

En la práctica, se realizan promedios temporales de mediciones de velocidad en dos o más profundidades, que usualmente son representados gráficamente con la altura a escala logarítmica sobre el lecho, y lo cual es un indicador de la pendiente del perfil de velocidades que proporciona una estimación del esfuerzo de corte.

El inicio de movimiento del sedimento ocurre en la velocidad crítica de corte y depende principalmente del tamaño de grano. Para flujos turbulentos sobre fondo plano existe una aproximación adimensional del esfuerzo crítico llamada parámetro de Shields, que relaciona el diámetro del grano con la velocidad del flujo, pero la naturaleza de esta relación es compleja cuando el sustrato es irregular y los tamaños de grano son no uniformes.

Si el flujo está comprimido sobre las protuberancias granulares del lecho, las líneas de corriente se acelerarán y ejercerán una fuerza de levantamiento vertical llamada sustentación. El determinar el grado de levantamiento en flujos turbulentos es difícil debido a que normalmente existen varios remolinos.

La resistencia al movimiento proviene de las fuerzas gravitacionales y depende tanto del peso sumergido del grano como de la cohesión entre los granos. El movimiento ocurre donde las fuerzas actuantes provocan que un grano individual gire sobre los granos adyacentes.

Una comparación de tamaño entre los granos sujetos al arrastre, y el fondo en el cual éstos reposan es posible siempre y cuando se realice para granos rugosos que están en un lecho de granos más finos, donde se observa menor resistencia alrededor del punto de giro que la que se presenta para granos mas finos, (Komar, 1987).

Para el inicio de movimiento es importante determinar la forma del grano tal como su esfericidad y redondez, la textura de la superficie, y ciertas propiedades del sedimento como densidad, tamaño de grano y contenido de humedad.

Las variaciones en el inicio del movimiento para diferentes tamaños de grano son indicadas en la curva empírica original obtenida por Hjulstrom, (1935) y se muestran en la Figura 11-4.

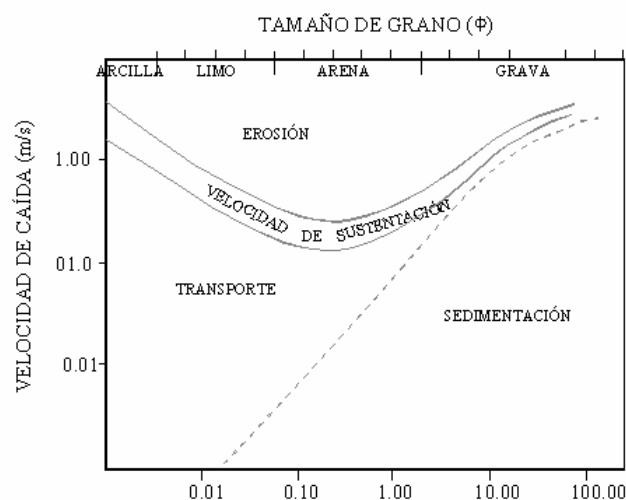


Figura 11-4 Relaciones de sedimentos basada de Hjulstrom 1935.

Si bien se puede observar una mayor variabilidad para sedimentos de grano más fino que la mostrada en la curva indica una mayor cohesión en limos. Alrededor de tamaños de grano del orden de a 0.060 mm, está proporcióna una relación más regular entre el tamaño de grano y la velocidad o el esfuerzo crítico de corte necesario para poner en suspensión el sedimento. Esto frecuentemente se expresa con una relación adimensional llamada la función de suspensión de Shields, (*Van Rijn 1993*).

Hay varias razones del porque estas relaciones teóricas no describen adecuadamente las condiciones en la mayoría de las costas. Las generalizaciones son obtenidas para sedimentos ideales, en los cuales el tamaño de grano es uniforme, esférico y de densidad constante. La mayoría de las formas costeras están compuestas por distribuciones bimodales o irregulares del tamaño de los sedimentos, ya que los granos son de varias formas y densidades, adicionalmente para el inicio de movimiento del sedimento por arrastre del fluido, el movimiento puede ocurrir con bajas velocidades, donde el impacto de los granos ya puestos en transporte incrementa la suspensión.

En sedimentos mezclados las relaciones de los tipos de esfuerzo – deformación son frecuentemente no lineales y las formas de fondo como los ripples propician el límite de la movilidad del sedimento. Bajo el efecto del oleaje esto es común, pues se observa una ráfaga de sedimentos granulares moviéndose hacia delante bajo una ola y después se mueven hacia atrás nuevamente antes de la siguiente ola. Los ripples influncian las velocidades de corte y puede resultar en suspensión y transporte. En velocidades más elevadas los movimientos de las ráfagas de sedimentos pueden convertirse en láminas de flujo con las cuales se borran las formas de fondo.

Transporte de sedimentos.

Una vez que el sedimento es puesto en suspensión, su transporte depende de varios factores. Los granos sedimentarios pueden ser movidos en el agua por deslizamiento o rodamiento, a mayores velocidades el impacto sobre los granos estables puede provocar un brote de nuevos granos a ser suspendidos en la columna de agua, a este proceso se le conoce como saltación.

Las diferentes formas de transporte están en función del tamaño del grano y es posible reconocer secciones separadas en la distribución del tamaño de sedimentos que están relacionadas con la suspensión, saltación y rodamiento o por el arrastre en superficie (*Visher, 1969*).

La viscosidad y el grado de turbulencia de un fluido son factores muy importantes en el transporte de sedimentos, pero la concentración de sedimentos en el fluido y la viscosidad del mismo por si mismas alteran la forma en que el sedimento es puesto en suspensión.

Las estimaciones de la cantidad de sedimento transportado por un fluido, están limitadas; teóricamente debido a la falta de apropiadas ecuaciones y empíricamente debido a las mediciones en campo de la taza de transporte (*Van Rijn 1993*). Existen varias formulaciones predicativas, todas ellas con la misma estructura general que permite estimar la carga de fondo, la mayoría de estas están basadas en los trabajos de Bagnold, (*1966*). Pero estas no toman en cuenta muchas de las complejidades del flujo en estimación, (*Allen 1994*).

Existen ciertos problemas metodológicos:

Primero se asume que la tasa instantánea de transporte de sedimentos, está en función de la velocidad experimentada en un punto en el tiempo, aunque esto requiere un tiempo determinado para que el sedimento sea puesto en suspensión o depositado. Es muy poco probable mantener un registro lo suficientemente continuo de mediciones de velocidad y en suficientes lugares para así calcular el transporte de sedimentos.

Generalmente es preferible el uso de formulaciones que integran el flujo en la vertical para predecir el transporte neto de sedimentos, sobre el paso de una ola solitaria, de un ciclo mareal o eventos más largos en vez de estimaciones instantáneas de la tasa de transporte en velocidades máximas del flujo, (*Hardisty, 1994*).

Las estimaciones también están basadas en el supuesto de que hay una ilimitada cantidad de sedimentos para ponerse en suspensión lo cual es algo raro.

Existen varias aproximaciones que pueden ser empleadas para la medición del transporte de sedimentos en suspensión. Es posible medir las concentraciones del sedimento suspendido utilizando dispositivos de medición ópticos o acústicos y así obtener un registro continuo y largo. Esto es una ventaja en comparación al transporte por fondo donde las trampas de sedimento proporcionan solo un conjunto de mediciones del movimiento de los sedimentos.

De cualquier modo tratar de utilizar las concentraciones en suspensión y la velocidad media para calcular el transporte de masa generalmente proporciona resultados pobres, debido a que el perfil vertical de concentraciones es muy variable, (*Black y Rosenberg 1991*). Es común realizar mediciones instantáneas del transporte de sedimentos, pero estas nos revelan poca información sobre la dinámica de la forma costera a escalas de largo tiempo.

Frecuentemente la velocidad de actuación de los procesos es muy variable, y el transporte neto no es una función lineal de velocidades instantáneas. Por ejemplo bajo condiciones de baja energía los procesos del oleaje incidente dominan en el transporte de sedimentos a través de la costa, mientras que bajo condiciones de tormenta, los movimientos de infragravedad dominarán el acarreo de sedimentos tanto dentro como fuera de la costa, (*Hardisty 1994*).

Los promedios temporales del comportamiento del transporte de sedimentos pueden ser calculados por métodos más tradicionales. Es factible el uso de trazadores o colorantes fluorescentes para marcar el rastro del sedimento. Es apropiado para determinar la velocidad del transporte de sedimentos mediante un cálculo en el cambio del volumen de sedimentos en el tiempo, por ejemplo haciendo una comparación de una serie de perfiles playeros, lo cual proporciona un indicador del transporte neto en un plazo largo.

Depósito del sedimento.

El establecimiento de una velocidad de caída es la forma como los granos se estabilizan a través del fluido y puede ser medida experimentalmente. Después de ser introducidos en un fluido, los granos están acelerados hasta que se establece una velocidad constante llamada Velocidad Terminal de Caída.

La velocidad a la cual el sedimento queda fuera de suspensión en un fluido de cualquier viscosidad está determinada por la ley de Stokes, que depende de la relación de la densidad de la partícula y la del fluido pero varía con el cuadrado de diámetro del sedimento. Esto

también está en función de la forma del grano, y es generalmente determinado como un sedimento con grano ideal, (*esfera de cuarzo*). Los sedimentos reales difieren en muchas formas. Por ejemplo los fragmentos de conchas difieren en forma y densidad y estos muy probablemente se estabilicen mucho más lentamente que las esferas de cuarzo.

La estabilización de un sedimento depende de la viscosidad del fluido y que está parcialmente en función de las concentraciones del sedimento en suspensión, cuando esta concentración es elevada existe mayor contacto entre los granos que alteran las características de estabilización.

11.4.2. Procesos del oleaje.

El oleaje es considerado como una respuesta a los forzamientos que se llevan a cabo en la interfase agua – atmósfera a causa de la actuación de los portadores de energía, entre ellos cabe destacar al viento.

Esta respuesta se traduce en una gama de ondas que difieren entre si por su periodo, longitud y dirección a tal grado que pueden encontrarse ondas capilares con periodos inferiores a 1s, hasta oscilaciones inducidas por mareas con periodos de hasta días, sin embargo para los problemas de interés en ingeniería, las ondas con periodos de 3 a 30s conocidas como ondas gravitatorias son de especial interés para estudio.

Para su estudio se puede considerar a las ondas como oscilaciones uniformes y periódicas de la superficie libre del agua, distinguiendo entre dos tipos de oscilaciones; progresivas y estacionarias.

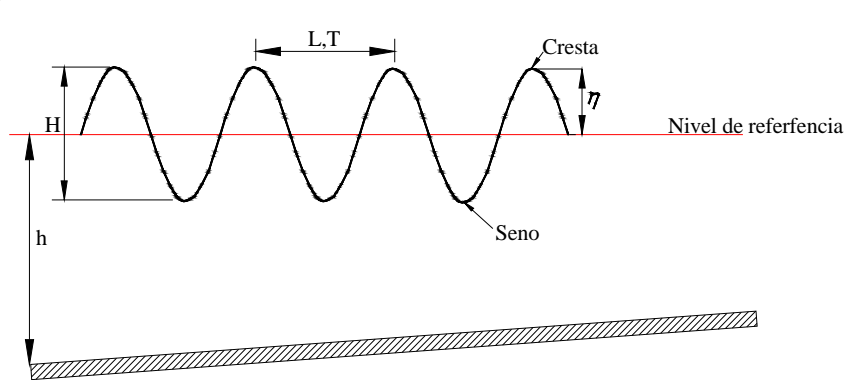


Figura 11-5 Parámetros asociados a la onda.

η	Desplazamiento vertical de la sup. Libre con respecto a un nivel de referencia
T	Periodo de tiempo que transcurre en observarse un punto igual en la sup. libre.
L	Distancia horizontal entre dos puntos iguales de la superficie libre.
Cresta	Punto donde la sup. libre alcanza un máximo.
Seno	Punto donde la sup. libre alcanza un mínimo.
H	Distancia vertical total entre la cresta y el seno
h	Distancia desde el fondo hasta el nivel de referencia

Tabla 11-1 Características de una onda.

Teoría de ondas.

El objetivo fundamental de cualquier teoría de ondas es determinar la celeridad C , cuando las magnitudes H, L, h ó H, T, h son conocidas. El movimiento de las ondas se puede caracterizar mediante tres parámetros adimensionales expresados en la Tabla 11-2.

No.	Parámetro	Relación	Descripción
1	Peralte de la onda	$\varepsilon = H/L$ ó kH	Variación vertical de la onda en una longitud de onda.
2	Altura relativa de la onda	$\delta = H/h$ ó Ah	Oscilación vertical de la onda respecto a la profundidad.
3	Profundidad relativa	$\mu = h/L$ ó kh	Penetración del móv. de la onda respecto a la prof.

Tabla 11-2 Parámetros adimensionales de onda.

Los movimientos de pequeña amplitud, pueden ser considerados como lineales siempre que se respete las siguientes condiciones: $\varepsilon \ll 1$ ó $\delta \ll 1$, sin embargo si estas relaciones son grandes se considerará un movimiento de amplitud finita o no lineal.

De acuerdo con el parámetro de profundidad relativa las ondas se clasifican como se observa en la Tabla 11-3.

$h/L > 0.50$	Profundidades indefinidas
$0.05 < h/L < 0.50$	Profundidades intermedias
$h/L < 0.05$	Profundidades reducidas

Tabla 11-3 Profundidad relativa del oleaje.

Existe otro parámetro adimensional que considera 3 características de la onda, (L, h, H) y el cual sirve para definir el régimen que le corresponde a una onda, para así poder seleccionar la teoría de onda mas adecuada, es el parámetro de Ursell y es representado por la ecuación (11.1).

$$Ur = \frac{\delta}{\mu^2} \quad (11.1)$$

Donde:

Ur = parámetro de Ursell.

δ = altura relativa de la onda.

μ = profundidad relativa de la onda.

De acuerdo a estos parámetros las ondas se pueden estudiar de acuerdo a dos regímenes; Stokes y ondas largas, la valides de cada teoría está en función de la profundidad relativa como se muestra en la Figura 11-6.

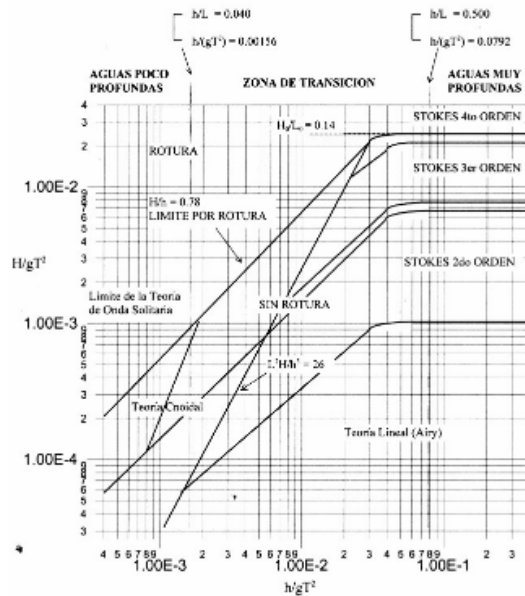


Figura 11-6 Regiones de validez para diferentes teorías de oleaje.

Cabe observar que los parámetros h/gT^2 y H/gT^2 son parámetros que suelen utilizarse para describir la profundidad relativa y el peralte de la onda.

Clasificación del oleaje.

El oleaje puede ser clasificado atendiendo a diferentes características del mismo.

- Según su distancia de generación.

De fondo o swell. Se manifiesta cuando el oleaje no está bajo la influencia directa del viento a causa del cese de éste, y pueden desplazarse decenas o hasta cientos de kilómetros desde su zona de generación y según la dirección del viento sin ser mantenidas por éste. Son ondulaciones sinusoidales con gran simetría y circularidad: crestas y senos redondeados, altura y espaciado uniformes. Suele ser un oleaje en proceso de decaimiento o dispersión.

Local o Sea. Se produce en la zona de generación en alta mar, donde raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar un período bien definido, presentan gran irregularidad respecto a la periodicidad, la altura de la superficie libre es muy impredecible, también se observa una desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas, las cuales presentan una altura relativamente grande a su longitud de onda.

- Según el tipo de rotura.

Cuando el oleaje se propaga en profundidades decrecientes, su longitud de onda disminuye, por lo que el peralte aumenta. Cuando se alcanza una determinada relación entre el peralte, profundidad, h y pendiente del fondo, definida por un criterio de rotura, la ola se vuelve inestable y rompe.

El tipo de rotura del oleaje depende del peralte del mismo y de la pendiente del fondo.

El Número de Iribarren, (I_r) ó parámetro de similaridad, es un parámetro ampliamente aceptado como controlador del tipo de rotura y se expresa con la ecuación (11.2).

$$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{Ho}{Lo}}} \quad (11.2)$$

Donde:

Ir = Número de Iribarren.

$\tan \beta$ = Pendiente del fondo.

Ho = Altura de ola en aguas profundas.

Lo = Longitud de ola en aguas profundas.

Dado que en las playas se utiliza con frecuencia la altura de ola en rotura, Hb , para la definición de este parámetro se suele utilizar el número de Iribarren en rotura, Irb , definido por la ecuación (10.3).

$$Irb = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{Hb}{Lo}}} \quad (11.3)$$

Donde:

Irb = Número de Iribarren en rotura.

$\tan \beta$ = Pendiente del fondo.

Hb = Altura de ola en zona de rotura.

Lo = Longitud de ola en aguas profundas.

Oscilación, (*Surging*): Cuando $Ir > 3.3$ ó $Irb > 2$, ocurre en playas con pendientes altas, se aprecia la formación de una cresta que no llega al vuelco y se diluye cuando las olas ascienden y descienden por el talud con un mínimo de aire atrapado, se observa reflexión elevada.

Colapso, (*Colapsing*): Cuando $2.5 < Ir < 3.3$ ó $1.5 < Irb < 2$ la ola comienza a desmoronarse por su base y colapsa, el aire queda parcialmente atrapado, formado espuma. El período de ascenso - descenso coincide con el período del oleaje y el flujo sobre el talud alcanza valores máximos. La reflexión comienza a disminuir debido a la pérdida de energía por turbulencia.

Voluta, (*Plunging*): Cuando $0.46 < Ir < 2.5$ ó $0.40 < Irb < 1.5$. Se observa un adelanto en cada cresta respecto a su base, encerrando una considerable cantidad de aire. El chorro que alcanza el agua penetra violentamente la superficie, levantando otra onda por delante de la original e inyectando turbulencia hasta el fondo. El giro generado por el volteo introduce una fuerte rotación en el flujo y el aire atrapado escapa a la superficie de forma explosiva. Se disipa gran cantidad de energía en los primeros momentos de la rotura, posteriormente, la ola continúa rota formando un bore¹, hasta llegar a la zona de ascenso y descenso, el coeficiente de reflexión es menor que en el caso de colapso.

Descrestamiento, (*Spilling*): Cuando $Ir < 0.46$ ó $Irb < 0.4$. El chorro de la voluta se hace progresivamente más débil, por lo que se afecta sólo a la parte superior de la onda permaneciendo el resto prácticamente inalterado.

¹ Resalto móvil después de la rotura.

La disipación de energía es muy gradual, pero dado la gran longitud del área de rompientes, (*más de 3 ondas simultáneamente en la zona de rompientes*), este tipo de rotura transforma eficientemente la energía del movimiento oscilatorio. La zona de ascenso-descenso por el talud de playa es mínima, pero las variaciones transversales del nivel medio, (*set-up*) son máximas, pues una buena parte de la cantidad de movimiento asociada al movimiento oscilatorio se emplea en modificar el nivel medio, en el caso de incidencia oblicua se emplea para crear corrientes longitudinales. El coeficiente de reflexión es mínimo.

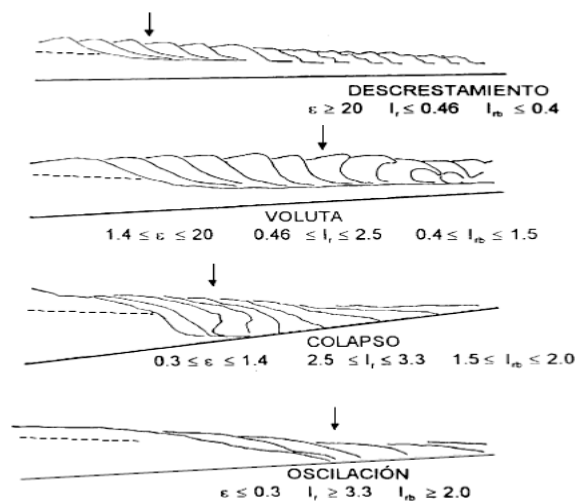


Figura 11-7 Tipos de rotura.

Medición del oleaje.

El oleaje puede ser medido en series de olas, (*Horikawa 1988, Komar 1998*). La frecuencia del oleaje puede ser estimada mediante la medición del paso del tiempo de una ola en un punto estacionario; La longitud de onda en campo es difícil de medir, pero esta puede ser determinada mediante fotografías aéreas. La altura de ola frecuentemente es medida mediante la instalación de sondas estacionadas en playas donde la energía del oleaje no fuese lo suficientemente grande para dañar el equipo.

Los equipos de medición instalados sobre boyas ancladas en mar abierto son utilizados frecuentemente para obtener registros continuos y de largo plazo. Los análisis a corto plazo se basan en registros de oleaje de 10 a 20 minutos de duración, esto se realiza en donde se pueden hacer generalizaciones de un régimen de oleaje en particular en donde las características son estacionarias, y no experimentan cambios graduales en el tiempo.

Los transductores de presión, proporcionan una forma muy efectiva para medir las variaciones en el nivel del agua, pero no se realizan los suficientes registros de frecuencias para detectar las variaciones del nivel del agua a corto plazo asociadas al paso de una ola, en especial cuando se mide en aguas someras.

Estos dispositivos generalmente son usados para medir mareas, y frecuentemente son fijados en el fondo del mar, dentro de una estructura que los protege y fuera de las variaciones de la superficie asociadas al oleaje.

Las distintas mediciones de registros del oleaje incluyen; mediciones no direccionales mediante sensores acústicos, sensores de velocidades orbitales, sensores de presión,

correntímetros y acelerómetros. Actualmente son utilizados los métodos de percepción remota proporcionan información sobre el oleaje ubicado lejos de las costas.

En la Figura 11-8 se observa el análisis de un registro análogo de las variaciones del nivel del agua. Utilizando el método de pasos ascendentes por cero, (*registrando una ola en el instante de tiempo en que el nivel del agua se eleva y cruza la línea cero*). Las olas individuales pueden ser detectadas desde un registro de series de tiempo continuo de las variaciones del nivel del agua.

Estos pueden ser expresados en un histograma de alturas de ola, como aproximaciones estadísticas o por un análisis espectral, el cual es utilizado para generar un gráfico de la energía contra la frecuencia desde una serie de tiempo.

Los parámetros estadísticos como la altura de ola media y máxima son las primeras en ser identificadas, también es posible identificar la altura de ola significativa tomando el promedio del tercio mayor del conjunto de alturas de olas obtenidas. La altura de ola media tiende a ser el 0.63% de la altura de ola significativa, (*Horikawa 1988*).

Los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar a partir de una serie de tiempo son:

- Variación del nivel medio del mar.

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (11.4)$$

Donde:

η_i = Elevación de la superficie libre del mar.

N = Número de eventos o muestras.

- La variación de la media cuadrática, (*varianza*) de la superficie del agua.

$$\eta_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \quad (11.5)$$

Donde:

η_{rms}^2 = La varianza.

η_i = Elevación de la superficie libre del mar.

N = número de eventos o muestras.

- La altura y el periodo medio.

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i \quad (11.6)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i \quad (11.7)$$

Donde:

N_0 = Número de olas individuales del registro.

H_i = Altura de ola.

T_i = Periodo de ola.

- La altura cuadrática media.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (11.8)$$

Donde:

N_0 = Número de olas individuales del registro.

H_i = Altura de ola.

- La altura de ola máxima, significativa y un décimo.

$$H_{MAX} = H_1 = H_{[N_0]} \quad (11.9) \quad H_S = H_{1/3} = \frac{3}{N_0} \left[\sum_{i=1}^{[N_0/3]} H_i + \frac{1}{3} H_{[N_0/3]+1} \right] \quad (11.10) \quad H_{1/10} = \frac{10}{N_0} \left[\sum_{i=1}^{[N_0/10]} H_i + 0.4 H_{[N_0/10]+1} \right] \quad (11.11)$$

Donde:

N_0 = Número de olas individuales del registro.

H_i = Altura de ola.

H_{MAX} = Altura de ola máxima.

H_S = Altura de ola significativa.

$H_{1/10}$ = Altura de ola un décimo.

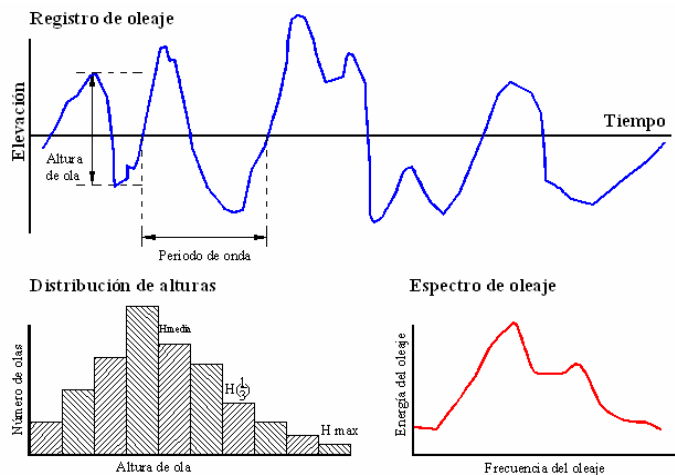


Figura 11-8 Registro análogo de oleaje, distribución de altura de ola y espectro.

Clima de oleaje.

Existen diferentes patrones de relevancia con respecto al clima del oleaje. Las olas más largas están asociadas a la acción del viento proveniente de latitudes templadas, caracterizadas por la presencia de los vientos del oeste y actividad frontal. En el hemisferio sur, esto ocurre especialmente en latitudes cercanas a los 60°S y en el hemisferio norte entre los 40 a 60° N.

Los vientos fuertes son raros en las calmas ecuatoriales de estas latitudes, las tormentas tropicales intensas conocidas como huracanes en el atlántico, tifones en Asia y como ciclones en las regiones al oeste del pacífico, influyen de manera significativa en muchas costas tropicales, pero estas no se inciden entre +5° y -5° del ecuador.

11.4.3. Mareas y su influencia.

En la mayoría de las costas se observa elevación y descenso rítmicos del nivel del agua. Las mareas son ondas largas generalmente con periodos de alrededor de 43,000 s, (*semidiurna*) El oleaje que constituye las mareas es conducido por la atracción gravitacional de la luna y en una menor extensión por el sol.

Fue Newton quien demostró que las fuerzas gravitacionales son originadas por el producto de las masas de dos objetos dividido por el cuadrado de la distancia entre ellos. De esto se sabe que a pesar de que el sol tiene una masa mucho mayor que la de la luna, este está más alejado por lo que la influencia gravitacional que ejerce este astro es solo 0.46 veces de la que ejerce la luna.

El cambio de nivel del mar debido a la acción de las mareas, tiene importantes consecuencias en la morfología de las playas, debido a que puede modificar sustancialmente la propagación del oleaje, (*someramiento, refracción, rotura*), al variar continuamente la batimetría de la misma.

Marea meteorológica.

Es el ascenso o descenso del nivel del mar a causa de los efectos del clima, este fenómeno se puede observar cuando existe una variación en la presión, provocando un aumento en su nivel cuando la presión baja como puede ser por la incidencia de un flujo ciclónico, un frente de calor, análogamente la disminución del nivel del mar puede ser causada por un aumento en la presión.

11.4.4. Otros procesos oceanográficos.

Un gran número de procesos oceanográficos son de gran relevancia en la morfología costera. Las corrientes oceánicas tienen un efecto global sobre la distribución de organismos y climas de oleaje. El hielo marino es un factor importante para algunas costas de latitudes altas, los patrones de circulación global como las circulaciones en aguas profundas, los fenómenos del niño y de la niña en el océano pacífico, pueden provocar cambios a largo plazo en la morfología de las costas que son afectadas por estas variaciones, a su vez la incidencia de eventos extremos tales como tormentas y tsunamis pueden ser traducidos en términos de cambios de las formas en planta de las costas.

Corrientes oceánicas.

Las diferencias de densidad suelen ocasionar diferentes procesos químicos, físicos y biológicos que incluyen a las corrientes provocadas por las mareas y las corrientes residuales. Por otro lado las corrientes oceánicas son el resultado de la acción que ejerce el viento sobre la superficie del océano abierto y conducidas por gradientes horizontales de presión y diferencias de densidad que dan como resultado diferencias de temperatura y salinidad.

La distribución de las masas terrestres es un factor que influye en el patrón de corrientes a lo cual debe sumársele la acción de las fuerzas de Coriolis.

El calentamiento de las aguas ecuatoriales junto con el exceso de calor en los trópicos, da como resultado una expansión del aire que se levanta, mientras que en los polos hay un déficit y el aire cae.

Los patrones oceánicos de circulación están relacionados con grandes escalas de tiempo, algunos aspectos de la circulación oceánica han cambiado al mismo tiempo de que el nivel del mar ha fluctuado.

En el atlántico norte se pierde calor de la atmósfera y el agua densa cae y esto propicia la circulación en aguas profundas.

La circulación en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido anti-horario en el hemisferio sur es a causa de las corrientes calientes provenientes del extremo oeste de los océanos las cuales intercambian su calor proporcionando ricos nutrientes a las aguas a lo largo de la margen este de los océanos.

Los patrones circulatorios de las corrientes afectan de manera indirecta a los procesos costeros, en especial sobre la influencia climática. Por ejemplo la aridez que se presenta en gran número de costas del este de la mayoría de las masas continentales por otro lado la distribución de algunos organismos como los corales o cualquier otra comunidad de animales de aguas poco profundas están influenciados por la circulación oceánica no solo en cuestiones de temperatura de la superficie del mar, ni de proporcionar microorganismos y nutrientes que alimenten estos ecosistemas.

Los patrones circulatorios están también fuertemente influenciados por las iteraciones atmósfera océano que se asocian a cambios como el fenómeno del niño.

Circulación atmosférica.

Los movimientos atmosféricos que ocurren en nuestro planeta, se presentan en diferentes escalas temporales y espaciales por lo que la intensidad de los efectos que causan es muy diversa, estas escalas se expresan en la Tabla 11-4.

Escala	Dimensión Espacial	Dimensión Temporal	Algunos eventos
Planetaria	Miles de kilómetros a todo el globo.	Semanas a meses	Alisios, vientos del oeste, ondas planetarias.
Sinóptica	Cientos a miles de kilómetros.	Días a semanas	Ciclones, anticiclones, frentes, huracanes.
Meso-escala	uno a cientos de kilómetros	1 hora a 2 días	Brisas de mar, montaña, tormentas, tornados.
Micro-escala	centímetros a metros	Minutos	Turbulencia, remolinos, ráfagas de polvo.

Tabla 11-4 Escala de los movimientos atmosféricos.

- Celdas de viento:

Se le denomina celda de viento a aquellas circulaciones de aire mediante las cuales hay un intercambio de calor de una a otra región, las principales celdas que se distinguen son la celda de Hadley, Polar y la de Ferrel. La zona en estudio se ve influenciada por la acción de la celda de Hadley.

La celda de Hadley está localizada entre el ecuador y los 30° de latitud norte y sur.

En el ecuador el aire más cálido se eleva y se condensa, liberando calor latente y formando grandes cúmulos que producen abundante precipitación, el aire a niveles superiores en esta celda, se mueve hacia los polos y entre 25-35° de latitud sur y norte se produce subsidencia.



Figura 11-9 Celda de Hadley.

Debido al efecto de Coriolis los vientos en altura que inicialmente se movían hacia los polos, son desviados en dirección oeste a este cuando alcanzan la latitud de 25°, por lo que el flujo de aire hacia los polos se restringe.

Por otra parte, el flujo de aire en superficie hacia el ecuador es desviado por la fuerza de Coriolis, generándose los *vientos alisios*.² Los vientos alisios soplan del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur, convergiendo en el ecuador en una región con un gradiente de presión muy débil, llamada zona de calmas ecuatoriales.

Presión atmosférica.

La presión es el principal efecto generador de los vientos, que a su vez producen variaciones de la temperatura, humedad relativa, precipitación y del oleaje. La presión atmosférica es la presión que ejerce el peso de toda la masa de una columna de aire sobre un nivel dado. La atmósfera posee una masa del orden de 5.3×10^{18} Kg y a nivel del mar su valor es aproximadamente 101325 Pa que corresponde también a una altura de 760 milímetros que se eleva una columna de mercurio por efecto de la presión atmosférica.

La presión atmosférica es proporcional a la temperatura, por lo que si se eleva la temperatura del aire manteniendo la densidad constante, la rapidez de sus moléculas aumenta, y por lo tanto su fuerza, generando aumento de presión.

También la presión atmosférica es proporcional a la densidad, tal que si la densidad aumenta, la presión aumenta. A medida que se sube en la vertical se experimenta una reducción de la presión, porque la densidad del aire disminuye, debido a la disminución de la masa de aire en niveles mas altos, se estima que la presión disminuye cerca de 1.2 hPa

² Vientos del sector este que soplan todo el año, con velocidades y dirección constante entre las latitudes 30°N y 30°S de los océanos pacífico, atlántico e índico.

cada 10 metros de elevación en la vertical en las capas más bajas de tal manera que hasta 5 km de altura la presión disminuye aproximadamente 100 hPa cada kilómetro.

Las variaciones de presión producen una fuerza, llamada fuerza del gradiente de presión, que contribuye a la formación del viento. Cuando una masa de aire es sometida a una mayor presión de un lado que el otro, el desbalance produce una fuerza dirigida desde la zona de alta presión a la de baja presión en forma perpendicular a las *isobaras*³, cruzándolas en ángulo recto.

Viento.

El calentamiento diferencial en la superficie de la tierra causado por la desigual distribución de la radiación solar, junto con las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y océanos, generan diferencias de presión, lo cual es causa de la formación del viento.

El aire fluye desde las áreas de altas presiones a las de baja presión, por lo que el viento no es más que un intento natural por balancear las diferencias de presión de gran escala. Existen factores que afectan al viento como son; el efecto de la rotación terrestre y la fricción del aire con la superficie.

- Efecto de la rotación terrestre o de Coriolis.

El efecto de Coriolis describe como todo objeto que se mueve libremente sobre la superficie de la tierra, es desviado a causa de la rotación terrestre hacia la derecha de su movimiento en el hemisferio norte. La dirección de esta fuerza, tiene una gran componente apuntando en sentido opuesto a la fuerza de presión. Esto produce que la dirección del movimiento del aire no cruce las isobaras, sino que aproximadamente pase paralelo a ellas.

La magnitud de la desviación producida por la fuerza de Coriolis depende de la latitud, siendo máxima en los polos mientras que en Ecuador se anula.

- Efecto de la fricción.

La fricción consiste en disminuir la rapidez del viento y desviar el movimiento del aire a través de las isobaras, hacia el área de bajas presiones. El grado de irregularidad del terreno determina el ángulo que se desvía el viento respecto a las isobaras, como también la magnitud de su disminución.

Sobre los océanos la fricción es pequeña y el aire se desvía entre 10° a 20° respecto a las isobaras y su rapidez disminuye aproximadamente 2/3 respecto de su valor si no hubiese roce.

³ Son las líneas que unen puntos de igual presión, la separación entre las isobaras indica el gradiente de presión.

Tormentas y eventos extremos.

La importancia geomorfológica de un evento extremo está regida por la cantidad de energía que este emplea sobre un determinado lugar, y estos cambios son relativos a la resistencia que dicho lugar presenta al cambio. En un lapso de tiempo, pueden ocurrir generalmente un número relativamente largo de eventos moderados, y un pequeño número de eventos fuertes.

Si el periodo de observación es lo suficientemente largo, entonces los registros pueden ser más o menos representativos de todos los eventos, pero esto es un caso raro. La relación entre magnitud-frecuencia generalmente es dibujada en una gráfica de probabilidades de la cual las repeticiones pueden ser determinadas y extrapoladas mas allá del conjunto de datos observados para estimar la magnitud de eventos aún mas largos que no han sido experimentados.

Los datos de oleaje pueden ser descritos en función de una excedencia anual de probabilidades. Ha existido un largo debate de cómo se deben de realizar los trabajos geomorfológicos ya sea por eventos recurrentes de intensidad moderada o por eventos de altas magnitudes y frecuencia baja. Por ejemplo una tormenta que incide una vez en cada 100 años probablemente sea de mayor impacto que alguna tormenta con un periodo de ocurrencia de 10 años, pero es poco claro si esta pudiese tener un impacto mayor que los diversos eventos que inciden cada 10 años, ya que estas ocurren en un largo tiempo.

Los intervalos repetitivos son probabilísticos, ya que estos no nos indican cuando el evento puede ocurrir y solamente indican la probabilidad asociada de un evento con un tamaño en particular. Los eventos de magnitudes altas presentan pocas probabilidades de ocurrencia, su repetición es en promedio larga.

Los intervalos de repetición son determinados suponiendo que el clima es estacionario, es decir, constante en un largo periodo de tiempo. Si ocurriesen cambios en el clima también pueden observarse cambios en la frecuencia esperada de los eventos, y esto puede afectar la capacidad de extender los registros de datos para extrapolar la magnitud de los eventos poco frecuentes.

Se considera como una tormenta, cuando se presenta una velocidad del viento de aproximadamente 8 en la escala de Beaufort (*ver Tabla 11-5*), pero esta escala es mas usada generalmente para hacer comparaciones de eventos frecuentes de alta energía.

Número de Beaufort	Velocidad del viento (Km./h)	Denominación	Aspecto de la mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	Calma	Despejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	Ventolina	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	Flojito (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	Flojo (Brisa débil)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	Bonancible (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	Fresquito (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	Fresco (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas

7	50 a 61	Frescachón (Viento fuerte)	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento
8	62 a 74	Temporal (Viento duro)	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas dificultosa
9	75 a 88	Temporal fuerte (Muy duro)	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	Temporal duro (Temporal)	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	Temporal muy duro (Borrasca)	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles
12	118 y más	Temporal huracanado (Huracán)	El aire está lleno de espuma y rociones. Enorme oleaje. Visibilidad casi nula	Destrucción total

Tabla 11-5 Escala de Beaufort.

El movimiento del agua durante una tormenta, depende de los cambios en el nivel de esta provocados por variaciones laterales en la presión barométrica, por las corrientes superficiales transportadas por el viento, por el alcance máximo del agua en la zona cercana a la costa, por el transporte de masa y por el alcance máximo del oleaje.

El oleaje de una tormenta es generado cuando la presión atmosférica es baja lo que ocasiona que la superficie del mar responda con un aumento en su elevación, (*Flather 2001*). Si un oleaje en el cual se encuentra una sola cresta y coincide con las mareas altas en perigeo, (*cuando la luna está más cercana a la tierra*) la superficie del mar puede incrementarse en varios metros, (*Gubert y McInnes 1999*).

Las tormentas de latitudes altas son el producto de sistemas de baja presión llamados huracanes los cuales se tardan en formarse alrededor de 3 a 4 días. Los huracanes se mueven lentamente y las condiciones de tormenta ocasionadas pueden influir sobre la costa aumentando el nivel del agua por varios días.

Los huracanes se forman en los mares tropicales durante la estación cálida, cuando el aire es muy húmedo y se halla a temperaturas de más de 26° C. La llegada de masas de aire frío provoca la condensación de una parte de la humedad del aire tropical y libera su calor latente de condensación, por lo que la inestabilidad vertical el aire es la energía que da nacimiento a un huracán.

La puesta en rotación de dicho evento extremo es a causa de la acción de la fuerza de Coriolis, siendo esta excesivamente débil en las cercanías del ecuador por lo que los huracanes no pueden formarse en las latitudes inferiores a los 5° siendo la latitud óptima de formación los 10°.

La perturbación naciente empieza a desplazarse hacia el oeste pero esta no tarda en describir una trayectoria parabólica y tomar rumbo hacia el NO hasta incidir hacia la costa y penetrar hacia tierra donde se disipan rápidamente o al situarse sobre aguas más frías.

En un huracán la presión disminuye a razón de 0.1 a 1 milibar por kilómetro desde la periferia hasta el centro, donde puede ser inferior a 900 milibares, por lo que esta disminución tan rápida de presión provoca vientos con velocidades de 100 hasta 200 km/h. Visto desde un avión o fotografiado por un satélite artificial, un huracán tiene un aspecto de un torbellino formado por espirales de cúmulo nimbos.

En el centro presenta una zona circular llamada el ojo y carente de nubes y dentro de la cual no soplan vientos. Se experimentan tres etapas durante el paso de un huracán, presenciado

desde tierra o sobre el mar, primero se manifiesta un fuerte viento cuya intensidad aumenta constantemente, cesa bruscamente debido al paso del ojo para después entrar en la transición entre el ojo y la parte interna del huracán con la que el viento sopla con mayor fuerza.

Cuando un huracán llega a la costa, la dirección y velocidad el viento cambia y la presión provoca que el oleaje se agite. Estas tormentas generalmente están acompañadas de grandes precipitaciones pluviales las cuales también afectan de manera importante.

Otros eventos extremos y más raros son los Tsunamis, que son ondas de gran longitud, escasa amplitud y de extraordinaria velocidad de propagación, su origen es en los océanos a causa de algún disturbio como puede ser un terremoto ó un deslizamiento submarino que modifica bruscamente el perfil del fondo oceánico. Un tsunami se manifiesta en la costa con una retirada del mar, (*onda negativa o seno*) a la que le sigue el flujo de la primera ola sísmica, (*onda positiva*).

La deformación del fondo provoca la propagación de varias ondas progresivas que se propagan con gran rapidez, (*500 a 900 km/h*) y por lo general la onda mas devastadora es la tercera o la cuarta, presentan una gran longitud de onda de entre 150 a 200 km entre dos ondas mientras que la amplitud es muy pequeña aproximadamente 0.50m.

Estas ondas poseen una gran energía potencial donde su escasa amplitud es compensada por su gran longitud y esta energía se disipa principalmente al incidir en la costa. Una estimación de su velocidad de propagación es considerar su proporcionalidad con la raíz cuadrada de la profundidad. Por ejemplo una onda que se propaga a 800 km/h sobre fondos de 5000m, lo hará 57 km/h a 25 metros de profundidad.

Así pues cuando la onda se acerca a la costa es frenada cada vez en mayor grado. Los efectos destructores de estas ondas difieren según la pendiente del fondo y de la configuración de las costas. Por ejemplo un estuario puede recibir por su boca un caudal determinado que al ir estrechándose se experimenta un aumento en la altura del agua, por otro lado las costas abiertas con fondos arenosos atenúan las ondas.