

CARACTERIZACION MORFOLOGICA Y DINAMICA LITORAL DE LOS  
CAYOS HABITADOS DEL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRÉS Y  
PROVIDENCIA, EN EL CARIBE COLOMBIANO.

Proyecto

Estabilización Geomorfológica de los Cayos del Archipiélago de San Andrés y  
Providencia

Carlos Alberto Andrade Amaya, Ph.D.

FUERZAS MILITARES DE COLOMBIA

ARMADA NACIONAL

ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”

FACULTAD DE OCENOGRAFÍA FÍSICA

Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia. Mayo de 2010

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	16
1.1	OBJETIVO.....	24
2.	GENEREALIDADES DEL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRES Y PROVIDENCIA.....	25
2.1	HISTORIA DEL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA .....	25
2.2	CLIMA.....	27
2.3	CIRCULACION SUPERFICIAL.....	28
2.4	EL OLEAJE EN LOS CAYOS DE SAN ANDRÉS.....	29
2.5	HURACANES EN EL CARIBE COLOMBIANO .....	32
2.6	MAREAS EN EL MAR CARIBE .....	36
2.7	ASPECTOS BIOLOGICOS.....	38
3.	ASPECTOS DE OCEANOGRAFIA COSTERA – EL SISTEMA DE MODELADO COSTERO (SMC).....	39
3.1	MÓDULO DE PRE-PROCESO .....	40
3.1.1	Programa De Caracterización De Oleajes Y Dinámicas.....	40
3.2	MÓDULO DE CORTO PLAZO.....	40
3.2.1	Programa De Evolución Del Perfil Transversal En Playas (PETRA).....	41
3.2.2	PROGRAMA DE MORFODINAMICA DE PLAYAS (MOPLA) .....	41
3.3	MÓDULO DE LARGO PLAZO .....	46
4.	METODOLOGIA .....	47
4.1	FASE DE CAMPO.....	47
4.2	FASE DE LABORATORIO.....	48
5.	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL CAYO SERRANILLA .....	50
5.1	GEOMORFOLOGIA DEL CAYO SERRANILLA .....	52
5.1.1	PERFILES DE PLAYA.....	60
5.2	CARACTERISTICAS DEL OLEAJE CAYO SERRANILLA .....	63
5.3	SIMULACIONES DEL EFECTO DEL OLEAJE EN LA COSTA .....	66
5.4	REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA .....	68
5.5	BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN.....	71
6.	CARACTERIZACION MORFOLOGICA DEL CAYO SERRANA.....	74
6.1	MORFOLOGIA PLANTA Y PERFIL .....	77
6.2	PERFILES TOPOGRAFICOS Y DE PLAYA .....	82
6.3	GRANULOMETRIA .....	88

6.4	MEDICION DEL OLEAJE EN CAYO SERRANA .....	90
6.5	REGIMEN MEDIO DEL OLEAJE .....	93
6.6	REGIMEN EXTREMAL.....	94
6.7	REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA .....	95
6.8	BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE SERRANA .....	98
7.	CARACTERIZACION MORFOLOGICA DEL CAYO RONCADOR .....	101
7.1	DESCRIPCION GENERAL.....	102
7.2	TOPOGRAFIA Y PERFILES DE PLAYAS EN RONCADOR\ .....	106
7.3	GRANULOMETRIA .....	112
7.4	EL OLEAJE EN CAYO RONCADOR.....	114
7.5	REGIMEN EXTEMAL.....	117
7.6	REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA .....	118
7.7	BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE RONCADOR .....	121
8.	CARACTERIZACION GEOMORFOLOGICA DE CAYO BOLIVAR .....	125
8.1	CARACTERISTICAS GENERALES.....	126
8.2	PERFILES TOPOGRAFICOS Y DE PLAYAS .....	129
8.3	OLEAJE EN CAYO BOLIVAR .....	132
8.4	REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA .....	135
8.5	BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE CAYO BOLIVAR .....	138
9.	CAYO ALBUQUERQUE .....	141
9.1	DESCRIPCION GENERAL.....	142
9.2	PLANTA Y PERIL .....	145
9.3	REGIMEN DE OLEAJE EN CAYO ALBUQUERQUE .....	147
9.4	REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA .....	149
9.5	BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE ALBUQUERQUE .....	152
10.	EL CAYO DEL ATOLON BAJO NUEVO .....	156
10.1	DESCRIPCION GENERAL.....	156
10.2	MORFODINÁMICA DE PLAYAS .....	159
10.3	REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA .....	162
10.4	BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE BAJO NUEVO .....	165
11.	REFERENCIAS BILBIOGRAFICAS .....	168

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 . Los Cayos del Archipiélago San Andrés y Providencia. En el mar Caribe colombiano. .....	18
Figura 2.1. 1 Fragmento de carta batimétrica COL 008, describe la región insular Caribe colombiano.....	25
Figura 2.4. 1 Características del oleaje para el área de los Cayos de San Andrés calculada con datos de 1948-2008 del retro-análisis de NCEP-NCAR.	30
Figura 2.4. 2 Características del oleaje significativo (Hs) en los Cayos de San Andrés.....	31
Figura 2.5 1 Historial de eventos de tormenta en el Caribe y la posición de los cayos de San Andrés en el recuadro.....	34
Figura 2.5 2 Huracanes y Tormentas que históricamente han influenciado las aguas cercanas al Archipiélago de San Andrés y Providencia. a. Hattie., b. Irene., c. Joan., d. Cesar., e. Beta., f. Wilma.....	35
Figura 2.6. 1 La marea astronómica en los Cayos de San Andrés inferida desde la observación de la modelación realizada en el Servicio Francés de Hidrografía para los Puertos de Cartagena, Cristóbal, Puerto Príncipe y Puerto Cortés. ...	37
Figura 5.1 Localización espacial en la carta náutica e imagen satelital del cayo Serranilla.....	51
Figura 5.1.1 Línea de costa del Cayo Serranilla .....	53
Figura 5.1. 2 Los transeptos de topografía realizados en Agosto de 2009.....	56
Figura 5.1. 3 Modelo del terreno, en Cayo Serranilla. Las alturas aparecen con valores negativos.....	57
Figura 5.1. 4 Perfiles de topografía en Cayo Serranilla (ver direcciones en Fig. 5.1.2).....	58
Figura 5.1. 5 Digitalización de las líneas de costa de las imágenes de 1944 (violeta), 1984 (verde), 2007(marrón) y 2009 (cyan) sobre la fotografía aérea tomada en 1944.,. El retroceso por año en los transeptos de la playa sur (abajo).....	59

Figura 5.1.1. 1 . Perfiles de topografía extraídos en Cayo Serranilla.....	61
Figura 5.1.1. 2 Perfiles de playa del Cayo Serranilla. ....	62
Figura 5.2. 1 Posición de los sensores de nivel en cayo Serranilla. ....	63
Figura 5.2. 2 Registro del sensor de nivel al costado "expuesto".....	64
Figura 5.2. 3 Registro del sensor de nivel al costado "protegida". ....	64
Figura 5.2. 4 Espectro de oleaje obtenido para el sector protegido de Serranilla. .....	65
Figura 5.2. 5 Espectro de oleaje obtenido para el sector expuesto de Serranilla. .....	65
Figura 5.3.1 Altura de ola significativa (Hs). Régimen medio, Cayo Serranilla.	66
Figura 5.3. 2 La altura de la ola como llega durante el régimen extremal (Hx12) para el cayo Serranilla.....	66
Figura 5.3. 3 Resultado de la simulación de la altura de la ola que llega al Cayo en caso de un huracán que produce oleaje que viene del norte (izquierda) y del suroeste (derecha). ....	67
Figura 5.4. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Serranilla. Periodo 5.3s, Hs=0.98m, dirección= N82E. ....	69
Figura 5.4. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Serranilla producidas por el régimen extremal del oleaje (Hs12).....	69
Figura 5.4. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha). ....	70
Figura 5.5. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual. ....	71
Figura 5.5.2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.....	72
Figura 5.5. 3 Resultado de la simulación de la variación de la topografía en el Cayo Serranilla en caso de un huracán que produce oleaje que viene del norte (izquierda) y del suroeste (derecha). ....	73

Figura 6. 1 Banco Serrana: a) Imagen satelital (Oceandots, 2002) b) Fragmento de la carta náutica COL 045 (CIOH, 2000). Abajo, Fotografía aérea de los corales de Banco Serrana antes de la rompiente. ....	75
Figura 6.1. 1 Localización espacial, carta náutica e imagen satelital del Cayo Serrana en el Caribe colombiano. La posición del Cayo en la Carta Náutica COL 213 e imagen de satélite de 2008 utilizada para la interpretación. ....	76
Figura 6.1. 2 Línea de costa del Cayo Serrana medida en Agosto de 2009 con GPS diferencial. ....	77
Figura 6.1. 3 Mosaico de fotografías de la playa noroeste que muestra la infraestructura habitacional y la línea de costa afectada por la erosión en el momento de la visita. ....	78
Figura 6.1. 4 Vista aérea del Cayo Serrana señalando las huellas de las distintas dunas en su crecimiento hacia el noreste. ....	79
Figura 6.1. 5 A la izquierda, la superposición de distintas líneas de costa del 2004 (verde), 2007 (azul) y 2009 (roja) de Cayo Serrana. A la derecha, la topografía del Cayo levantada en agosto de 2009. ....	81
Figura 6.1. 6 Perfiles de acreción y decreción. La línea de color verde corresponde a la línea de costa del año 1984, la de color azul al año 2007 y la de rojo a la obtenida del año 2009. ....	82
Figura 6.1. 7 Perfiles de playa y de topografía levantados en Cayo Serrana. ...	83
Figura 6.1. 8 Primera sección de perfiles batimétricos y topográficos. ....	84
Figura 6.1. 9 Perfiles de topografía extraídos en Cayo Serrana (ver orientación en la figura 6.1.7). ....	85
Figura 6.1. 10 La ruta del perfil 9 vista hacia el oeste (en sentido opuesto a la presentación de la figura anterior), muestra la orientación de las dunas con respecto de la dirección de la observación. ....	86
Figura 6.1.11 La posición de los perfiles de playa del sector norte y este. ....	86
Figura 6.1.12 Complemento de perfiles de playa, extraídos en Cayo Serrana. ....	87
Figura 6.3. 1 Puntos de muestreo de arena en cayo Serrana. ....	89
Figura 6.4. 1 Posición de los sensores de nivel en cayo Serrana. ....	90

Figura 6.4. 2 Medidas de oleaje en el Cayo Serrana y su respectivo espectro al suroeste. ....	92
Figura 6.5.1 Altura de ola significativa (Hs) en la propagación del oleaje monocromático en cayo Serrana parta el régimen medio. (Hs= 1.85, Tp= 6.05) .....	93
Figura 6.6. 1 Altura de ola significativa (Hs). Régimen extremal, Cayo Serrana. ....	94
Figura 6.6. 2 El oleaje alrededor de Cayo Serrana en caso de un huracán que genera oleaje del norte (izquierda) y del sureste (derecha). ....	95
Figura 6.7. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Serrana. Periodo 5.3s, Hs=0.98m, dirección= N82E. ....	96
Figura 6.7. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Serrana producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12) las condiciones de la simulación se encuentran en el anexo "C". ....	97
Figura 6.7. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha). Las condiciones de las simulaciones se encuentran en el anexo "C" .....	98
Figura 6.8. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual. ....	99
Figura 6.8. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.....	99
Figura 7. 1 Localización espacial, carta náutica e imagen satelital del Cayo Roncador en la Carta Náutica y en la imagen del satélite de esta área del Caribe colombiano.....	102
Figura 7.1. 1 Fotografía aérea y la Línea de costa del Cayo Roncador medida en agosto de 2009. Obsérvense lo rasgos principales del proceso litoral. ....	104
Figura 7.2. 1 Levantamiento con GPS diferencial y los perfiles y puntos topográficos levantados en Cayo Roncador el agosto de 2009. ....	106
Figura 7.2. 2 Perfil transversal del Cayo Roncador en el área norte en agosto de 2009.....	107

Figura 7.3. 1 La posición de las muestras sedimentológicas tomadas en Cayo Roncador. El diámetro promedio de los perfiles se encuentra señalado en la gráfica. ....	113
Figura 7.4. 1 Ubicación de los sensores de nivel en cayo Roncador.....	114
Figura 7.4. 2 El oleaje medido en el costado expuesto de Cayo Roncador ...	115
Figura 7.4. 3 Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado expuesto de cayo Roncador. ....	115
Figura 7.4. 4 Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado protegido de cayo Roncador. ....	115
. Figura 7.4. 5 Altura de ola significativa (Hs). Régimen medio, Cayo Roncador. ....	116
Figura 7.5. 1 Parámetros de oleaje empleados en la propagación extremal del oleaje. eb Cayo Roncador.....	117
Figura 7.5. 2 Altura de ola significativa (Hs). Durante un huracán que produce oleaje desde el SW izquierda y desde el Norte (derecha).....	118
Figura 7.6. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Roncador. ....	119
Figura 7.6. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Roncador producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12.....	120
Figura 7.6. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha). ....	121
Figura 7.7. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual. ....	122
Figura 7.7. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.....	123
Figura 7.7. 3 Mapas de erosión/sedimentación, producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).....	124
Figura 8.1. 1 Localización espacial, carta náutica COL 204 y una imagen satelital (Oceandots, 20100 del Cayo Bolívar en el Caribe colombiano. ....	126
Figura 8.1. 2 Línea de costa de los Cayos en el atolón Bolívar levantadas en Febrero de 2010. ....	127

Figura 8.1. 3 La línea de costa de Cayo Bolívar levantada en febrero de 2010. .....	128
Figura 8.3. 1 Cayo Bolívar. Altura de ola significativa (Hs). Régimen medio. .	133
Figura 8.3. 2 Resultados de la modelación de oleaje extremal de Cayo Bolívar. .....	134
Figura 8.3. 3 Cayo Bolívar. Altura de ola significativa (Hs). Régimen en caso de huracán del Suroeste (izquierda) y del norte (derecha).....	134
Figura 8.4. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Bolivar.....	136
Figura 8.4. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Bolivar producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12). .....	136
Figura 8.4. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha). .....	137
Figura 8.5. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual. ....	138
Figura 8.5. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.....	139
Figura 8.5. 3 Mapas de erosión/sedimentación, producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).....	140
Figura 9.1 1 Localización espacial, en la carta náutica COL 203 y la imagen satelital (Oceandots, 2010) del Cayo Albuquerque en el Caribe colombiano.	142
Figura 9.1 2 Línea de costa de los Cayos en el Banco Albuquerque.....	143
Figura 9.2. 1 Puntos de perfiles de playa y topográficos tomados en Albuquerque. ....	145
Figura 9.2. 2 Perfiles de playa y topográfico del Cayo con vegetación adyacente a Cayo Albuquerque.....	146
Figura 9.2. 3 Perfiles de playa y topográfico del Cayo Albuquerque.....	146
Figura 9.3. 1 Cayo Albuquerque. Altura de ola significativa (Hs). Régimen medio. ....	148

Figura 9.3. 2 Parámetros de oleaje empleados en la propagación extremal del oleaje.en Cayo Albuquerque.....	148
Figura 9.3. 3 Cayo Albuquerque. Altura de ola significativa (Hs). Régimen extremal. ....	149
Figura 9.4. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Alburquerque.....	150
Figura 9.4. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Alburquerque producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12).....	151
Figura 9.4. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha). ....	152
Figura 9.5. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual. ....	153
Figura 9.5. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.....	154
Figura 9.5. 3 Mapas de erosión/sedimentación, producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha). ....	155
Figura 10.1. 1 Imagen de satélite de Bajo Nuevo. Obsérvese el canal profundo que divide las dos rompientes y la posición del cayo emergido es señalada .	156
Figura 10.2. 1 Altura de ola significativa en Bajo Nuevo en condiciones medias de oleaje. ....	160
Figura 10.2. 2 Parámetros de oleaje empleados en la propagación extremal del oleaje. en Cayo Bajo Nuevo.....	161
Figura 10.2. 3 Cayo de Bajo Nuevo. Altura de ola significativa (Hs). Régimen extremal. ....	161
Figura 10.3. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Bajo Nuevo. Periodo 5.3s, Hs=0.98m, dirección= N82E. ....	163
Figura 10.3. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Bajo Nuevo producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12).....	164
Figura 10.3. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).....	165

Figura 10.4. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual. ....	166
Figura 10.4. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.....	167
Figura 10.4. 3 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo Direccion Norte. ....	167

## INDICE DE IMÁGENES

Imagen 5.1 Cayo Serranilla. Zona de rompiente y vista aérea.....	50
Imagen 5.1. 1 Fotografías aéreas; a) Panorámica; b) Punta NE del cayo. Fotografías oblicuas; c y d) Costado Este del cayo. ....	54
Imagen 5.1. 2 Fotografía de distintas formas de vegetación que tiene el Cayo Serranilla.(A) En el Este (B) al sur (C) al norte y al (€) al oeste. Una vista de las palmeras sembradas (D).....	55
Imagen 5.1.3 . La terraza sur de Serranilla descubierta de arena. ....	60
Imagen 6. 1 Fotografía aérea Cayo Serrana y fotografía aérea del arrecife periférico al Este.....	74
Imagen 6.1. 1 Fotografías de la zona noroeste del cayo, se observa la acción del oleaje causando erosión . ....	78
Imagen 6.1. 2 Fotografías de la duna más reciente en el costado noreste de Cayo Serrana vista desde el aire desde la playa y por detrás en agosto de 2009.....	80
Imagen 7. 1 Cayo Roncador. Fotografía aérea del cayo y vista satelital del atolón .....	101
Imagen 7. 2 Fotografías de la parte norte de Cayo Roncador donde se aprecia la laguna y la gran cantidad de restos de coral que componen el sustrato del Cayo en ese sector.....	105
Imagen 8. 1 Fotografías aéreas de los cayos del atolón Bolívar.....	125
Imagen 8.1 1 El montículo de arena cercano a Cayo Bolívar. ....	129
Imagen 9. 1 Fotografía aérea de cayo Albuquerque.....	141

Imagen 10. 1 Vista aérea de la plataforma calcárea desnuda y la poca arena que tiene Bajo Nuevo, como se escurre en el centro hacia la plataforma. Esta pérdida de arena es común con vientos del norte cuando hay pasos de frentes fríos. .... 158

Imagen 10. 2 Vista de Bajo Nuevo (arriba) desde sotavento hacia el Este, (abajo) desde el Este. Se aprecia la plataforma sobre donde se construyó el faro, una pequeña planicie de caracolejo. .... 159

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Categoría Saffir-Simpson de tormentas tropicales. .... 32

Tabla 6.3. 1 Las características de las muestras de arena de las playas de Cayo Serrana..... 89

Tabla 7.3. 1 Posicion y datos de las muestras de arena tomadas en Roncador.  
..... 113

## 1. INTRODUCCIÓN

El archipiélago de San Andrés y Providencia se encuentra en el mar Caribe occidental como un conjunto de geofformas emergidas en alta mar al nor-occidente de la cueca de Colombia. Está constituido por tres islas, San Andrés, Providencia y Santa Catalina, además de los bancos de Serranilla, Serrana, Bajo nuevo, Quitasueño, Roncador, Bolívar y Albuquerque y bancos sumergidos del este y sur-este. Geográficamente se localiza entre los Paralelos 10° y 18° de latitud norte y los meridianos 78° y 82° de longitud oeste de Greenwich, sus extremos son el Bajo Alicia al Norte y los Cayos Albuquerque al Sur (figura 1.1). Le pertenecen a Colombia por herencia histórica en virtud del principio *utti possidetis juris*, desde 1803, cuando el rey de España otorgó al Virreinato de Santa Fe o Nueva Granada (del cual Colombia es sucesor), las islas de San Andrés y la costa de Mosquitos, desde el Cabo Gracias a Dios hasta el río Chagres<sup>1</sup>.

Milliman (1969) comenta que no es clara la historia del descubrimiento de los Cayos y que sus fechas son desconocidas. (Parsons, 1956) escribió que Banco Serrana fue “descubierto” y posteriormente nombrado por Pedro Serrana, un marinero español que naufragó en sus playas en algún momento antes de 1520 pero a decir por la actividad de la navegación española en el área los cayos habían sido descubiertos bien antes del siglo XVI.

Ninguno de los cayos es suficientemente grande para garantizar la colonización. Los cayos Bolívar y Albuquerque, al sur del archipiélago, han sido visitados por los nativos de San Andrés por muchos años. Los visitantes en estos cayos son pescadores que se establecen en kioskos provisionales durante varios meses, mientras realizan sus actividades pesqueras. Los isleños de Cayman tienen tradición de llegar hasta Serrana y Roncador a caza de tortugas, pero el mayor interés de estos dos cayos fue siempre el guano depositado por las miles de aves que allí habitaban. Según Parsons (1956) a

---

<sup>1</sup> GAVIRIA, Enrique. Colombia Insular y San Andrés Como Archipiélago Océánico. En: Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas

mediados del siglo XIX con el interés del guano como fertilizante cada vez más atractivo, los Estados Unidos reclamaron la posesión de los Bancos de Serrana y Roncador con la pretensión que James W. Jennett había “descubierto” los cayos durante la guerra civil. Como Colombia también reclamó los cayos advirtiendo que habían sido descubiertos trescientos años antes, la disputa continuó hasta que todo el guano fue removido por las compañías norteamericanas. En 1928 los Estados Unidos acordó la soberanía compartida de los Bancos alegando que mantenía los faros en que había colocado en estos. Posteriormente los Estados Unidos accedió a ceder sus pretensiones sobre los Cayos aceptando la soberanía de Colombia en ellos.

A tiempo presente, el mar territorial de Colombia se establece según los tratados vigentes (ver Figura 1.1). Dichos tratados limítrofes de Colombia en el Caribe nor-occidental se basan en la existencia física de las geoformas emergidas del archipiélago, que en el caso de desaparecer por hundimiento, podría repercutir en la pérdida de Mar Territorial y Zona Económica Exclusiva de una extensión importante del territorio nacional. Como los estudios recientes muestran que las consecuencias en el aumento del nivel del mar durante los próximos cien años ocasionarán en las zonas costeras del Caribe, aparte de la erosión de las playas, pantanos y mangles, inundaciones permanentes en zonas costeras de tierras bajas<sup>2</sup>.

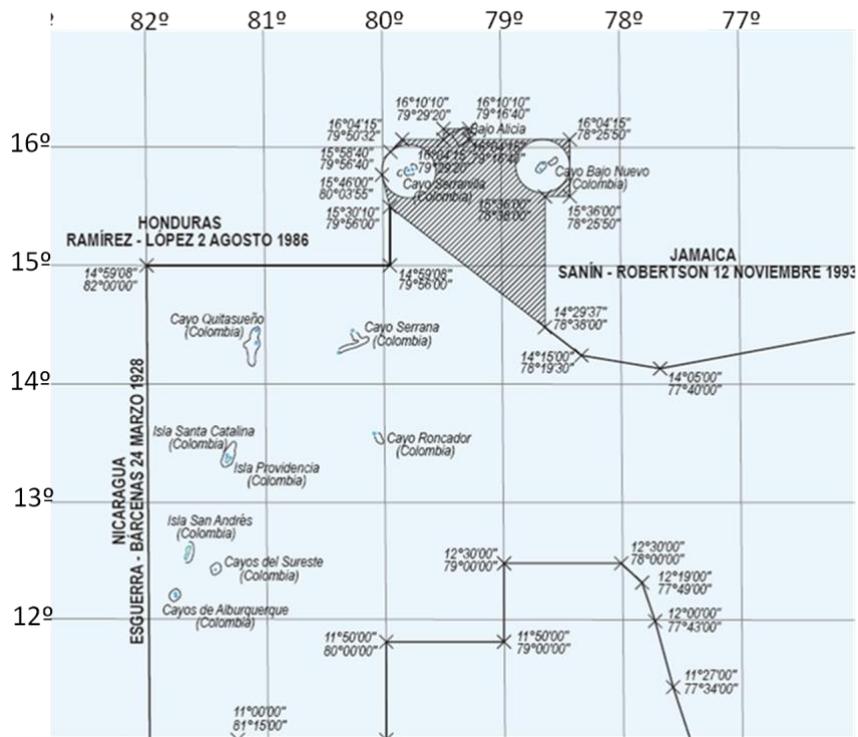
Considerando lo expuesto, el proyecto se desarrolló para evaluar por un lado el efecto del incremento del nivel del mar en los Cayos habitados del Archipiélago de San Andrés, al establecer la tendencia climática de la cota de inundación para el área además de la modelación de los procesos costeros experimentados por los cayos Serranilla, Serrana, Roncador, Bolívar, Alburquerque y Bajo Nuevo, según el régimen de oleaje incidente.

El aumento del nivel del mar a raíz del calentamiento generalizado del planeta conocido como el Cambio Climático global amenaza irremediablemente las zonas costeras e insulares de Colombia, como las de todo el mundo.

---

<sup>2</sup> ibíd., p. 2.

Figura 1. 1 . Los Cayos del Archipiélago San Andrés y Providencia. En el mar Caribe colombiano.



Aparte del Mapa Oficial de la República de Colombia - Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2002.

En el año 2007 el Panel Internacional para el Cambio Climático (IPCC) mencionó que la expansión térmica va a elevar el nivel del mar entre 0.3 y 0.8m para el año 2300<sup>3</sup>, una inminente y clara consecuencia del cambio climático global que ha hecho que los países tomen conciencia del riesgo y proclamen decisiones sobre el manejo de sus recursos.

Debido a su relativa baja altura, se teme que el Archipiélago de San Andrés y en especial sus Cayos, a causa de los efectos del cambio climático global experimenten cambios considerables en su morfología y en el peor de los escenarios hasta quedar sumergidos bajo el nivel del mar.

En este conocimiento y por esa razón Colombia hace parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) desde 1995 y ratificó el Protocolo de Kyoto de la misma Convención en el año 2000. Como

<sup>3</sup> (IPCC, 2007)

parte de la CMNUCC, Colombia desarrolló en el 2001 su Primera Comunicación Nacional bajo el liderazgo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), con la participación de más de 70 instituciones públicas y privadas nacionales<sup>4</sup>. La Primera Comunicación Nacional (CN1) determinó que los ecosistemas colombianos más vulnerables a los efectos del cambio climático serían los de alta montaña, la línea de costa y las islas del Caribe<sup>5</sup>. La determinación de los impactos y la vulnerabilidad frente al cambio climático de las zonas costeras continentales colombianas de la CN1 fueron complementadas por el Programa Holandés sobre Medidas de Adaptación para el Cambio Climático (NCCSAP) llevado a cabo por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). Con un ascenso del nivel del mar proyectado para el 2050 de aproximadamente 40cm en la costa Caribe y de 60cm en la costa Pacífica, los resultados determinaron, entre otras cosas, que el 64% y el 83% de los litorales Caribe y Pacífico respectivamente tendrían una amenaza por inundaciones marinas entre media y muy alta<sup>6</sup>.

Sobre el incremento de nivel del mar ya existe suficiente evidencia científica que permite aseverar que se ha acelerado especialmente desde mediados de del siglo XIX. De manera global se ha establecido que entre 1961 y 1993 se registró un incremento de  $1.8 \pm 0.5$  mm/año, y en la década de 1993 a 2003 hubo un aumento de  $1.3 \pm 0.7$  mm/año, causada por el derretimiento de los casquetes de hielo de Groenlandia y la Antártida. Aunque este incremento no fue uniforme, la tendencia es a seguir creciendo a largo plazo<sup>7</sup>. De manera regional, varios estudios hechos en el mar Caribe han dado resultados con mayores valores, con efectos potenciales mayores y más pronto, sobre las regiones costeras. Dentro de los estudios específicos para la cuenca Colombiana, se ha estimado un aumento del nivel medio del mar de 3.58

---

<sup>4</sup> (INAP, 2007)

<sup>5</sup> (INAP, 2006)

<sup>6</sup> (INAP, 2007).

<sup>7</sup> Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds., 2008: Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

mm/año<sup>8</sup>. Para Cartagena específicamente se encontró un aumento de alrededor de 4.5 mm/año<sup>9</sup> y de hasta 5.6 mm/año<sup>10</sup>.

Modelos y estudios coinciden en que la aceleración de éste fenómeno está íntimamente relacionada con el calentamiento global, y de forma no muy clara aún con el forzamiento antropogénico, pues de acuerdo con el IPCC, la comprensión sobre algunos efectos del incremento del nivel del mar es insuficiente debido a que el desequilibrio que le imprime el calentamiento global al planeta es notorio y se evidencia en el derretimiento de los casquetes polares, el incremento del nivel medio del mar, pero además con la intensificación de los eventos de tormenta, por mencionar algunas de las consecuencias.

El aumento en el número e intensidad de las tormentas tropicales que han pasado por el mar Caribe en las dos últimas décadas, pone de manifiesto la necesidad de comenzar a evaluar los efectos de estos fenómenos en las zonas costeras e insulares colombianas. Expertos en el estudio del calentamiento global coinciden que la intensidad o el número de las tormentas en el Atlántico podrían aumentar, consecuencia a los efectos del incremento de la temperatura superficial del océano<sup>11</sup>.

El Archipiélago de San Andrés y Providencia se considera situado dentro del cinturón de huracanes del Caribe, y se cuenta con reportes de trayectorias de tormentas tropicales que influenciaron las aguas adyacentes del archipiélago los años 1818, 1876, 1877, 1906, 1940, 1961 (Hattie), 1971 (Irene), 1988 (Joan), 1996 (Cesar) 1998 (Mitch), 1999 (Lenny) y 2005.

Además, aunque un huracán no pase cerca de la línea de costa, puede generar importante oleaje (de fondo), fenómeno asociado a las olas de tormenta que son generadas en lugares remotos y que viajan cientos de kilómetros hasta llegar a las playas. Se caracterizan por aparecer sin previo aviso, cuando no

---

<sup>8</sup> (Torres et al., 2006).

<sup>9</sup> (Invemar, 2004; Andrade, 2008)

<sup>10</sup> Sutherland et al., (2008).

<sup>11</sup> Ortiz, J. Huracanes y Tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1990. Boletín Científico CIOH

existe un sistema de observación climático, con períodos entre 12 y 18 segundos y alturas de 2 a 4 m de acuerdo a la dinámica misma desde su formación hasta su arribo.

En resumen, debido a la poca altura de los Cayos del Archipiélago de San Andrés y a la acción combinada del ascenso del nivel del mar y el aumento en la actividad ciclónica proyectada para el Caribe colombiano, los Cayos bancos e islas del Archipiélago son vulnerables a sufrir retroceso de su línea de costa e incluso llegar a sumergirse sobre el nivel del mar, si no se toman las medidas de mitigación apropiadas para afrontar este problema lo cual es el objeto del estudio.

Como la ejecución de programas de contingencia ante las amenazas naturales que afrontan las zonas costeras requiere de un estudio detallado de las condiciones dinámicas de las playas y de las masas de agua que las bañan, se hace necesario de cara a los retos que representan el calentamiento global y la elevación del nivel del mar, comparar los patrones de cambio de la dinámica costera actual e histórica y plantear alternativas de protección del litoral que garanticen el bienestar de la Nación y la permanencia emergida de las geoformas en el Caribe.

Por otro lado, las zonas costeras están sometidas a la acción de un gran número de dinámicas tanto marinas (marea, ondas infragravitatorias) como atmosféricas (viento, presión). Cada uno de ellos tiene su propia escala espacial y temporal de actuación y genera una respuesta en dichas escalas de variabilidad<sup>12</sup>. La actividad de estas dinámicas se puede identificar en la propagación de la energía mecánica producida por las diferentes perturbaciones. Como consecuencia de la variabilidad de las perturbaciones, las respuestas de cada onda difieren tanto en el periodo y longitud como en sus mecanismos de control<sup>13</sup>. Una de las dinámicas más importantes en la estabilidad y evolución de una playa es la del oleaje. Su manera de análisis

---

<sup>12</sup> GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRAFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.

<sup>13</sup> GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRAFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Documento de referencia. Dinámica. Mecánica de ondas. Universidad de Cantabria.

está relacionada con el estudio de la teoría de ondas lineales, como las teorías de Stokes o Boussinesq, enfocadas hacia la descripción cuantitativa de la propagación de las ondas y análisis de los diferentes fenómenos de transformación del oleaje (asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y rotura) en su propagación desde aguas profundas hasta la playa. Parámetros como la altura de la ola, profundidad y longitud de la onda, son los parámetros a contemplar al momento de emplear una u otra teoría<sup>14</sup>. El motor principal de cambio de la morfología de las playas está dado en el fenómeno de rotura de oleaje, que es la manera como el oleaje es disipado y transformado en turbulencia y da lugar a la generación de corrientes y a la variabilidad del nivel del mar en la zona de rompientes.

Actualmente los avances en el análisis espectral del oleaje es una herramienta ampliamente empleada en la ingeniería de costas para ejecutar obras de estabilización de playas. Otro factor que influye en la modificación de la morfología de las playas son los cambios en la marea astronómica y meteorológica, quienes modifican la batimetría del área y generan diferentes patrones de disipación de las ondas de oleaje<sup>15</sup>. La zona de rompientes es la región de mayor interés en cuanto al análisis de estabilización de las playas y su estudio se desarrolla a partir de métodos numéricos de análisis de las corrientes transversales y corrientes longitudinales que describen las variaciones del fondo en sentido transversal (perfil de playa) y longitudinal (planta de playa)<sup>16</sup>.

El análisis de la aproximación de estos procesos de cambio se puede realizar en el corto y largo plazo. Los análisis a largo plazo se basan en hipótesis de estabilidad de los procesos involucrados en el largo tiempo y son expresados en el perfil de equilibrio en cuanto al transporte transversal se refiere y en cuanto al transporte longitudinal el patrón de equilibrio hace referencia a que no hay pérdida ni ganancia de playa y condiciona la evolución temporal de la línea

---

<sup>14</sup> GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.

<sup>15</sup> GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.

<sup>16</sup> GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.

de costa<sup>17</sup>. El análisis a corto plazo se basa en el estudio de los procesos erosivos de la línea de costa.

El proceso de erosión de las playas de arena, es un fenómeno que ocurre de manera natural y en ausencia de eventos externos de esta misma manera encuentra la “estabilidad”. La erosión costera es considerada como una redistribución de la arena de la playa frente a la costa, que se realiza más comúnmente durante las tormentas costeras. Estas tormentas van acompañadas de un aumento temporal del nivel local del mar, de modo que las ondas de energía de tormenta son capaces de atacar dunas y altas elevaciones de la playa. Los sedimentos son extraídos y puestos en suspensión por las olas y llevados mar adentro. Gran parte de la arena es devuelta a la playa después de la tormenta por el largo período de las olas del mar en condiciones normales del nivel de agua<sup>18</sup>. La erosión costera representa una amenaza de evolución lenta que se relaciona con el aumento del nivel del mar y el calentamiento global del planeta. Sin embargo, existe gran complejidad en los procesos físicos-naturales asociados, el modelamiento de estos procesos es tema de controversia e interés por parte de la comunidad científica a nivel mundial.

La información disponible de la dinámica oceánica y régimen climático en el mar Caribe Colombiano ha sido estudiada por parte de la Armada Nacional de Colombia aproximadamente desde el 1969, con la ejecución de los cruceros Océano I a IX (1984). Los patrones generales del comportamiento climático y los eventos oceanográficos relevantes han sido descritos a partir de los datos obtenidos de los cruceros, y representan la base del conocimiento en la zona para la época de muestreo<sup>19</sup>.

---

<sup>17</sup> GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.

<sup>18</sup> Zhang, *et al.*. Op. cit., p. 41.

<sup>19</sup> ARIAS, F. GIRALDO, L. PINEDA, R. LUNA, G. Monitoreo de las condiciones Oceanográficas del Caribe colombiano región III – Zonas 1 y 2. Informe final. Ministerio de Defensa Nacional. Dirección General Marítima. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH. Cartagena de Indias. Diciembre. 1993.

Con la elaboración del presente documento, se pretende evaluar las condiciones dinámicas del oleaje sobre los Cayos habitados en el Caribe colombiano y sugerir las alternativas de protección costera útiles para su estabilización geomorfológica, teniendo en consideración los posibles escenarios de elevación del nivel medio del mar, así como, el incremento pronosticado en el número e intensidad de huracanes en el Caribe tropical.

Las alternativas de protección estarán fundamentadas en los resultados obtenidos de la propagación del oleaje en condiciones medias y extremas en los Cayos, empleando el Sistema de Modelado Costero (SMC), creado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, el cual ha sido aplicado en numerosos proyectos de estabilización tanto de la costa española, como de otros países, y cuyos documentos de referencia y aportes bibliográficos son la piedra angular sobre la cual se ha establecido el análisis del estudio.

## 1.1 OBJETIVO

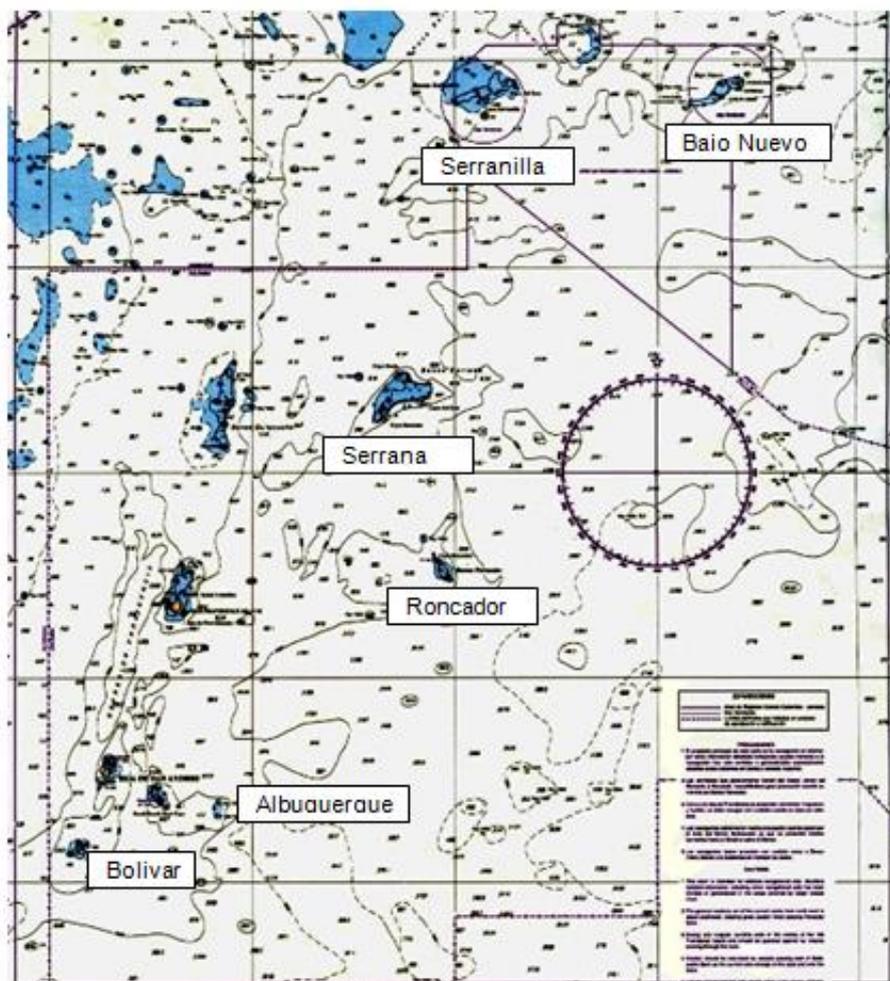
El objetivo del presente documento es el de caracterizar la oceanografía y la geomorfología de la costa de los Cayos habitados de San Andrés mediante la medición de parámetros oceanográficos en el área, el uso de sensores remotos y de modelos numéricos.

## 2. GENERALIDADES DEL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA

### 2.1 HISTORIA DEL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Sta. Catalina se encuentra situado en la parte baja, al lado de la Elevación Centroamericana del mar del Caribe occidental. Abarca dos islas oceánicas altas y permanentes y una serie de atolones y de los bancos de coral alineados en una dirección de NNE (Figura 2.1.1).

Figura 2.1. 1 Fragmento de carta batimétrica COL 008, describe la región insular Caribe colombiano.



Tomado de: Carta Náutica COL 008. CIOH.

Aunque geográficamente más cercano a América Central que al continente suramericano, el archipiélago ha sido parte de la República de Colombia desde 1822. Las islas nunca fueron ocupadas por una población aborigen india del Caribe, pero fueron visitadas de vez en cuando por indios Miskitos de la costa centroamericana, que llegaban a capturar pescados y tortugas. Aunque fueron “descubiertas” temprano en el siglo XVI por marineros españoles, los primeros colonos en las islas al principio del siglo XVII eran contrabandistas holandeses y puritanos ingleses. A partir de 1641 hasta 1822 las islas cambiaron de manos entre las reyes ingleses y españoles, con conquistas ocasionales de los piratas de Jamaica y de Haití (Parsons 1956, 1964).

Solamente las dos islas principales, San Andrés y Providencia (con Sta. Catalina) están habitadas permanentemente, siendo la primera el centro administrativo y comercial, con industria del turismo y una población de entre 60.000 a posiblemente 90.000. Con una superficie solamente de 25 km<sup>2</sup>, San Andrés es probablemente la isla más densamente poblada del Caribe. Por el contrario la inmigración del continente a Providencia ha sido siempre baja. Sus 4.500 habitantes son sobre todo de habla inglesa, viven predominantemente con agricultura de subsistencia, la pesca, la cría de ganado y el turismo en reducida escala. Varias isletas minúsculas existen cerca de las islas principales y en la mayor parte de los atolones del Archipiélago. Éstos son visitados regularmente por pescadores y por barcos turísticos cargados en San Andrés y en Providencia. Los puestos militares de la infantería de marina colombiana existen en las isletas arenosas de los atolones.

Formalmente el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se localiza al noroeste de Colombia sobre el Mar Caribe, entre los paralelos 12° y 16° latitud norte, y los meridianos 78° y 82° longitud oeste de Greenwich. Es el único departamento conformado por islas, Cayos e islotes sobre una plataforma volcánica del occidente del mar de las Antillas. Con un área terrestre de 57 Km<sup>2</sup> y un área marina de 349.800 Km<sup>2</sup>, donde se encuentra uno de los sistemas arrecifales más productivos del Caribe .

La historia de las islas atolones y bancos del archipiélago, se remonta hasta finales del Periodo Triásico hace unos 80 millones de años, y está aparentemente relacionada con el origen y la formación de la elevación de Nicaragua y del mar Caribe (Geister, 1992). El esquema tectónico regional del fondo marino se caracteriza por zonas de fractura, siendo la más conspicua la fractura de San Andrés. Todas las islas, atolones y bancos coralinos del archipiélago se originaron aparentemente a partir de volcanes dispuestos a lo largo de fracturas tectónicas de la corteza submarina, orientadas predominantemente hacia el NNE y el SW .

Los atolones y las islas altas permanentes del Archipiélago tienen una historia geológica larga, que se liga firmemente a la formación del mar Caribe. La historia de las pre-islas data probablemente por lo menos de las épocas cenozoicas tempranas. La historia geológica sabida del área más amplia se limita al tiempo mesozoico y cenozoico con la excepción posible de la Elevación Centroamericana superior, que se puede tener como base en parte por rocas pre-Mesozoicas .

Los Cayos visitados en el Archipiélago, se representan en la figura 6 y de cada uno de ellos se describe su morfología y dinámica oceánica.

## 2.2 CLIMA

El clima sobre el área de los Cayos de San Andrés, se encuentra dominado por la presencia de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT) que a su vez modula la dirección y la intensidad de los vientos alisios, los cuales se caracterizan por una gran uniformidad, con oscilaciones temporales que van desde las semanas con el paso de los frentes fríos que vienen del Oeste, o el paso de las ondas atmosféricas que vienen del Este, hasta la oscilación estacional. Durante la época de vientos predominan vientos del Noreste (NE) y principalmente del este (E), con vientos de tormenta poco frecuentes. La época es seca en los meses de febrero a marzo, y de agosto a octubre hay un aporte

importante de precipitación. De mayo a noviembre los vientos tienen dirección e intensidad variable y en los meses de mayo a julio se presenta la época de transición, con vientos débiles<sup>20</sup>.

En la estación seca y de vientos, la ZCIT se encuentra localizada más al sur (0°-5°S) y por eso en este periodo dominan los vientos del norte, con velocidades promedio de 8 m/s y máximos diarios de 15m/s<sup>21</sup>. Durante el Veranillo en el mes de julio los vientos alcanzan velocidades de hasta 12m/s, pero con un aumento de las condiciones de calma en el mar en esta época de transición, antes de iniciarse la temporada de lluvias, se incrementan los vientos del noreste, inhibiendo la precipitación.

Durante la época húmeda, de agosto a octubre, la intensidad de los vientos medios disminuye sustancialmente, pero los chubascos llamados “culo’epollos” son más frecuentes. El descenso en el viento hace que aumente la temperatura en toda la región.

## 2.3 CIRCULACION SUPERFICIAL

La característica principal de la circulación superficial en el área de los Cayos de San Andrés es la Corriente del Caribe en su viaje hacia el noroeste que en el sector presenta una variabilidad espacio-temporal importante a nivel de media escala relacionada con remolinos de Media escala y meandros, con tamaños entre 100-500 km que viajan a lo largo del eje de esta corriente<sup>22</sup>, con fluctuaciones tan fuertes como la corriente principal<sup>23</sup>. Nystuen y Andrade (1993) reportaron que estos giros anticiclónicos de aproximadamente 200km de diámetro viajando en dirección al occidente a 30cm/s en el Norte del Caribe. Los anticiclones se deforman en su paso a la cuenca Caimán a través de los pasos entre los Cayos y algunos se disipan entre ellos<sup>24</sup>. Estudios con boyas de

---

<sup>20</sup> Andrade y Barton, 2000).

<sup>21</sup> Citado por Andrade C., Barton E. 2000; p. 26,191.

<sup>22</sup> (Fu and Holt, 1983

<sup>23</sup> (Molinari et al, 1981)

<sup>24</sup> (Andrade y Barton, 2000).

deriva muestran que la parte de la Corriente del Caribe que sale hacia la Cuenca Caimán tiene un núcleo dominante en el Paso Chibcha al sur de Serranilla mientras que al sur de 14° N la corriente empieza un gran Giro ciclónico que rodea hacia el sur la costa centroamericana y la panameña hacia el Este hasta llegar a la costa colombiana donde se produce el giro hacia el Oeste a la altura de Bocas de Ceniza<sup>25</sup> cerrando así el llamado Giro Panamá-Colombia<sup>26</sup>

De esta forma, la corriente oceánica en el área de los Cayos del Sur (Bolívar y Albuquerque) tiene una dirección predominante hacia el suroeste. Mientras que en los Cayos del norte la dirección predominante es hacia el noroeste, con mucha variabilidad debido al paso de los remolinos que lleva la corriente.

## 2.4 EL OLEAJE EN LOS CAYOS DE SAN ANDRÉS

Para efectuar el análisis de la geomorfología costera de los Cayos de San Andrés se escogió la metodología desarrollada por el IH Cantabria (2000), en la cual, usando una topografía GEBCO 0.5' y la base de datos de presión y viento de 1948-2008 del Centro de Diagnostico del Clima de los Estados Unidos conocida como el retro-análisis de NCAR (NCEP-NCAR reanalysis 6h Global 1.9°) de los cuales generaron los campos de oleaje, los cuales fueron calibrados con las boyas de la NOAA más cercanas y con los datos de satélites ALyC. La marea meteorológica fue extraída de la base de datos de los mareógrafos del UHSLC. Para el nivel medio del mar se utilizaron varias bases de datos, disponibles como la de Nivel del Mar Regional de 1° de resolución, la de satélite 1993-2009 mensual de 1° y los datos de los altímetros de altura de nivel del mar del programa AVISO de 1993-2009, (IH Cantabria, 2010).

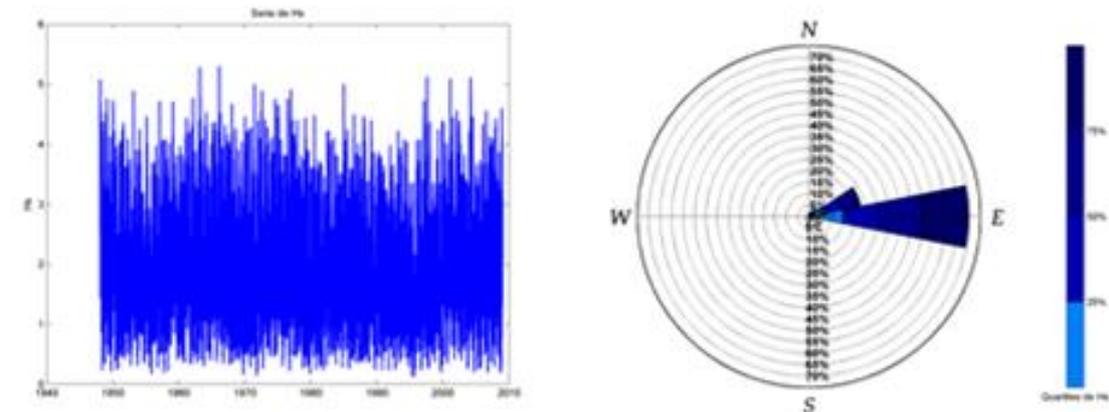
---

<sup>25</sup> (Andrade, 2003)

<sup>26</sup> (Mooers y Maul, 1999).

Los datos fueron calculados en una grilla de 1/3 de grado (cada 20 millas) y de dicha grilla se extrajeron los resultados para el área de los Cayos, cuyas características se observan en la Figura 2.4.1

Figura 2.4. 1 Características del oleaje para el área de los Cayos de San Andrés calculada con datos de 1948-2008 del retro-análisis de NCEP-NCAR.

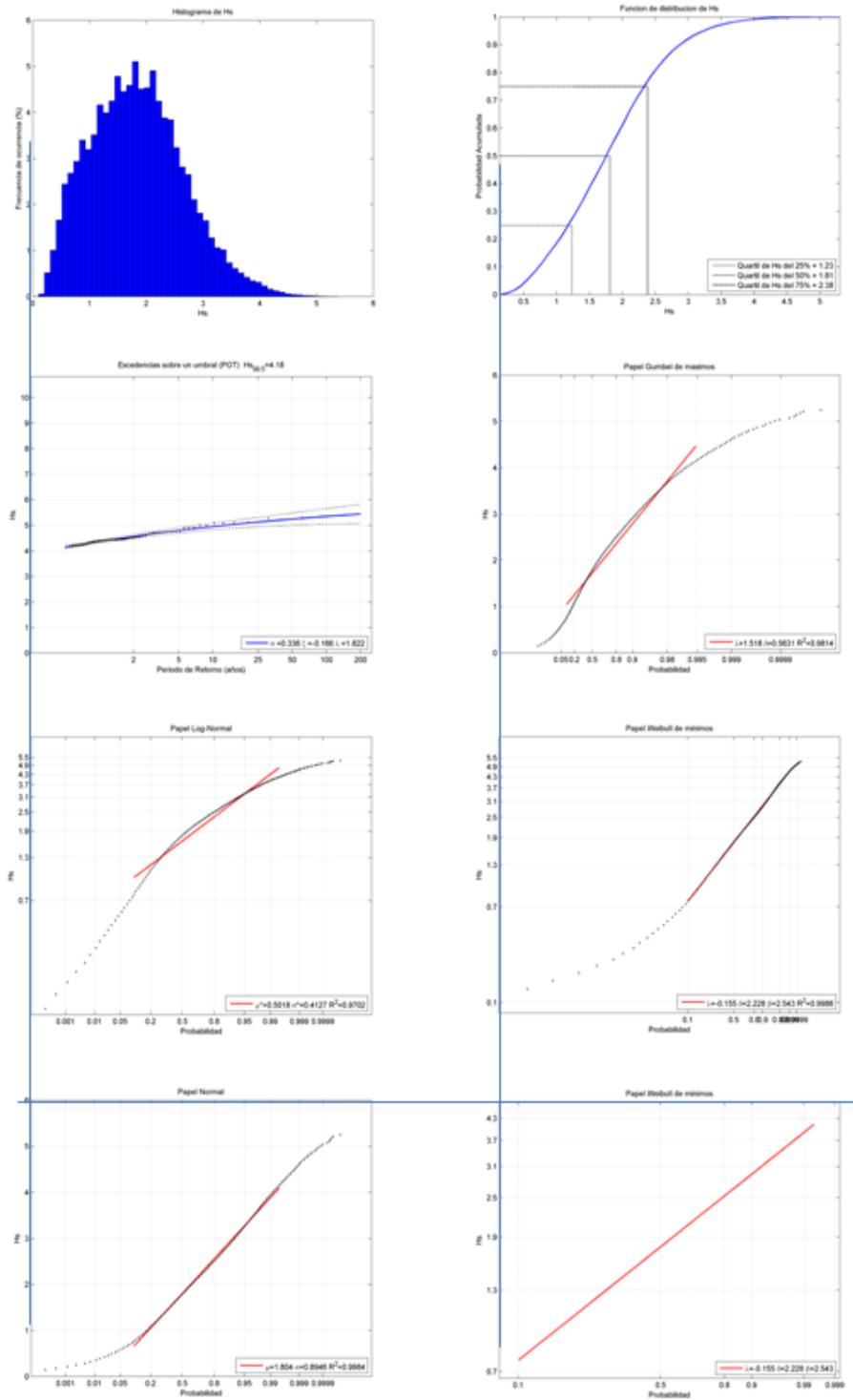


Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob. direccion	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>90%</sub>	Hs <sub>12</sub>
N	0.0100	1.4300	2.4700	3.6100	4.1118
NNE	0.0169	1.6000	2.6300	3.7700	4.3612
NE	0.0310	1.5000	2.5500	3.6100	4.1384
ENE	0.2300	1.6100	2.5500	3.4900	4.1600
E	0.6957	1.9300	3.0500	4.0500	4.6500
ESE	0.0031	0.8200	1.3400	2.0108	2.1425
SE	0.0019	0.8500	1.2400	1.6670	1.9271
SSE	0.0013	0.8300	1.2970	1.9064	2.0500
S	0.0013	1.0300	1.6930	2.0138	2.0700
SSW	0.0012	0.9800	1.7180	2.5097	2.8662
SW	0.0012	1.0600	1.5670	2.6760	2.8960
WSW	0.0004	1.0600	1.5940	1.9711	1.9900
W	0.0002	0.9650	1.2620	1.6844	1.7100
WNW	0.0003	1.0100	1.4640	1.7354	1.9100
NW	0.0006	1.1400	1.7200	2.3770	2.7900
NNW	0.0049	1.2100	2.3500	3.4052	3.6094

Fuente

Figura 2.4. 2 Características del oleaje significativo ( $H_s$ ) en los Cayos de San Andrés.



Fuente :

## 2.5 HURACANES EN EL CARIBE COLOMBIANO

Un huracán es un sistema tormentoso con una circulación cerrada alrededor de un centro de baja presión, alimentado por el calor producto del aire húmedo que se levanta y se condensa. El nombre tiene su origen en los trópicos y su naturaleza ciclónica, se distinguen de otras tormentas ciclónicas como las bajas Polares por el mismo mecanismo de calor que las alimenta, que las convierte en sistemas tormentosos del núcleo cálido<sup>27</sup>. La clasificación de los huracanes se realiza de acuerdo a la velocidad del viento experimentada durante la vida del fenómeno, de esta manera, la escala de clasificación Saffir-Simpson, categoriza los huracanes en una escala de 1 a 5 (tabla 1.1).

La temporada de huracanes en el área inicia en junio y termina en noviembre, siendo septiembre y octubre los meses más activos estadísticamente. Los factores que determinan la formación y trayectoria del huracán son diversos y complejos. No existe un modelo teórico contundente que puedan predecir su comportamiento, pero se ha establecido que la presencia de un disturbio atmosférico de baja presión, sumado a vientos débiles en los niveles altos de la atmósfera, la temperatura de la superficie del mar y la fuerza de Coriolis tienen un papel importante en la dinámica de un huracán.

TIPO DE TORMENTA	VIENTOS (Km/h)	VIENTOS (m/s)
Huracán Categoría 1	118-153	33.7-42.5
Huracán Categoría 2	154-177	42.7-49.16
Huracán Categoría 3	178-209	49.44-58.05
Huracán Categoría 4	210-250	58.33-69.44
Huracán Categoría 5	>250	>69.44

Tabla 1. 1 Categoría Saffir-Simpson de tormentas tropicales.

---

<sup>27</sup> Ortiz, J. Huracanes y Tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1990. Boletín Científico CIOH, 2007.

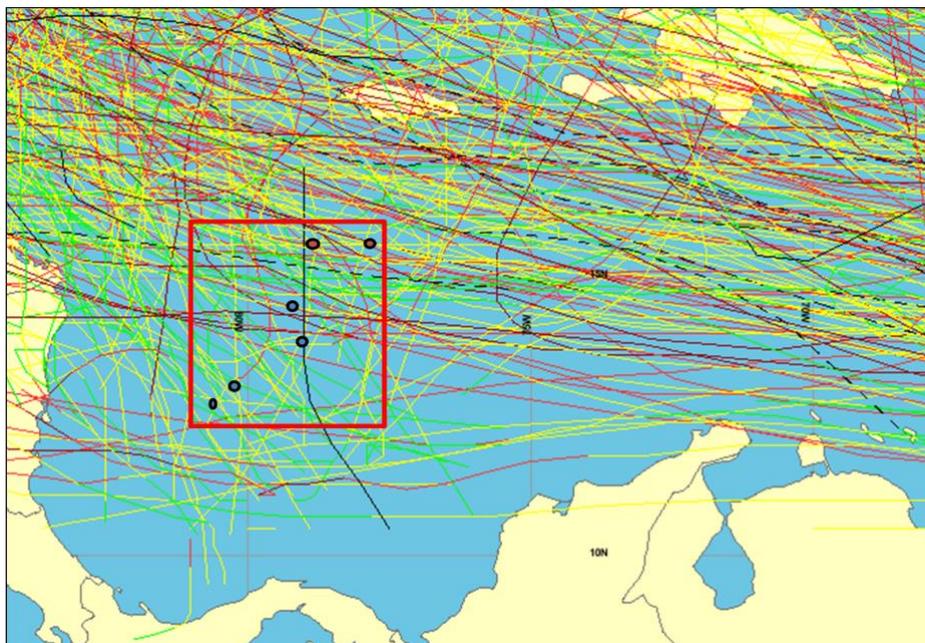
Los huracanes en el Océano Atlántico son fenómenos que ocurren comúnmente sobre las aguas cálidas del trópico entre los meses de junio y noviembre. Los huracanes que se forman en el Atlántico lo hacen por la convergencia de los vientos del este, en la costa oeste africana. Los porcentajes de distribución histórica ubica la zona del Atlántico, incluyendo el mar Caribe con un 11%.

La base de datos oficial de registro histórico de las tormentas y huracanes en el Océano Atlántico, incluyendo el golfo de México y el mar Caribe es la HURDAT, y pertenece a la Agencia Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA).

Ortiz (2007), en su documento “Huracanes y Tormentas Tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1900”, analizó la base de datos HURDAT y concluye que:

- Un total de 57 tormentas han cruzado las aguas territoriales colombianas en los últimos cien años, algunas cercanas a la península de la Guajira y otras tocando tierra (Figura 1.2).
- A partir de los años 90 ha habido un marcado incremento en las actividades ciclónicas, atribuido posiblemente al calentamiento global.
- Al menos 12 tormentas y huracanes han afectado la isla de San Andrés y a Providencia, siendo “Hattie” en 1961 una de las más peligrosas y la tormenta “Beta” de 2005 que causó daños menores a la infraestructura costera.
- Aunque un huracán no pase cerca de la línea de costa, éste puede generar oleaje de fondo, fenómeno asociado a olas de tormenta que son originadas en lugares remotos y viajan cientos de kilómetros hasta llegar a las playas. Se caracterizan por aparecer sin previo aviso, con períodos entre 12 y 18 segundos y alturas de 2 a 4 m, de acuerdo a la dinámica misma desde su formación hasta su arribo.

Figura 2.5 1 Historial de eventos de tormenta en el Caribe y la posición de los cayos de San Andrés en el recuadro.



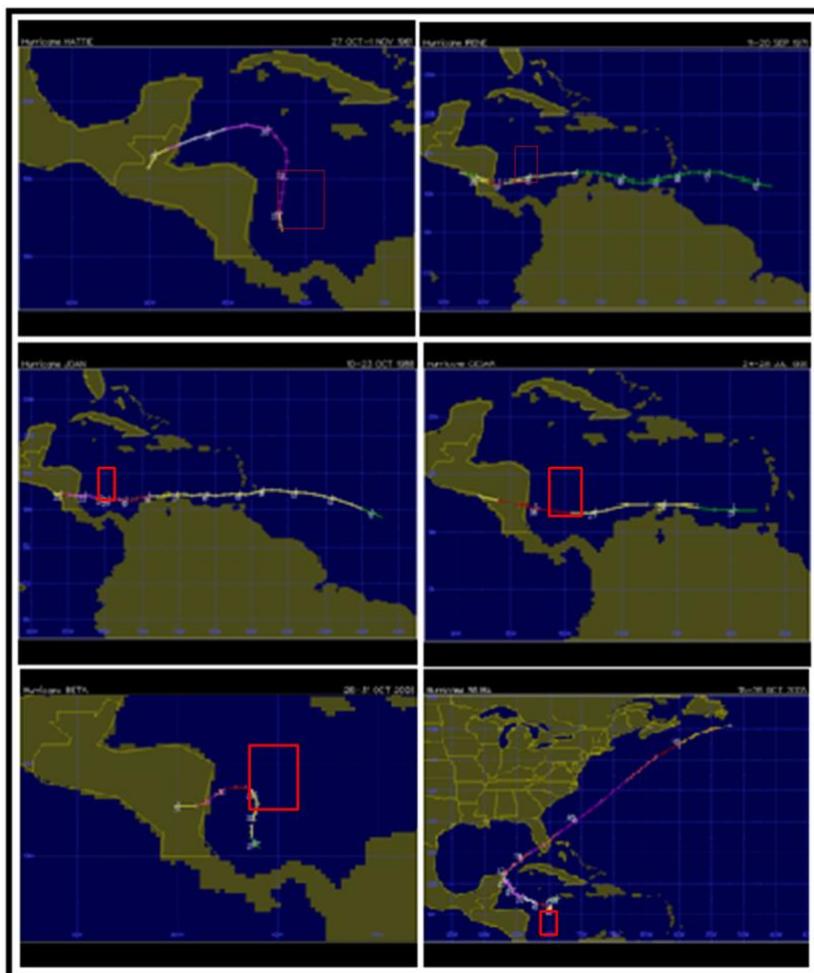
Tomado y modificado de Ortiz (2007).

El Archipiélago de San Andrés y Providencia está situado dentro del cinturón de huracanes del Caribe y el paso de huracanes por sus aguas han sido registrado en 1818, 1876, 1877, 1906, 1940, 1961 (Hattie), 1971 (Irene), 1988 (Joan), César (1996), Wilma y Beta (2005)<sup>28</sup> (figura 1.3). A pesar de esto no existe mucha información sobre estos fenómenos en su paso por las aguas de los Cayos.

---

<sup>28</sup> Collazos, G., Ospina, H., Muñoz, A. Estudio descriptivo de la influencia del huracán Beta en las islas de Providencia y Santa Catalina. Boletín Científico CIOH N0. 25, ISSN 0120-0542, 61-70 (2007)

Figura 2.5 2 Huracanes y Tormentas que históricamente han influenciado las aguas cercanas al Archipiélago de San Andrés y Providencia. a. Hattie., b. Irene., c. Joan., d. Cesar., e. Beta., f. Wilma.



Fuente: Hurricane Data Center

Los gradientes anormales de temperatura superficial son una causa determinante para establecer las posibles rutas de los huracanes. Cuando éstos se forman en la región oceánica común a Panamá, Nicaragua y Colombia, la dirección de mayor probabilidad de ocurrencia es hacia el Archipiélago de San Andrés y Providencia, considerando la dinámica superficial de la corriente del Golfo de México<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> Collazos et al.,

## 2.6 MAREAS EN EL MAR CARIBE

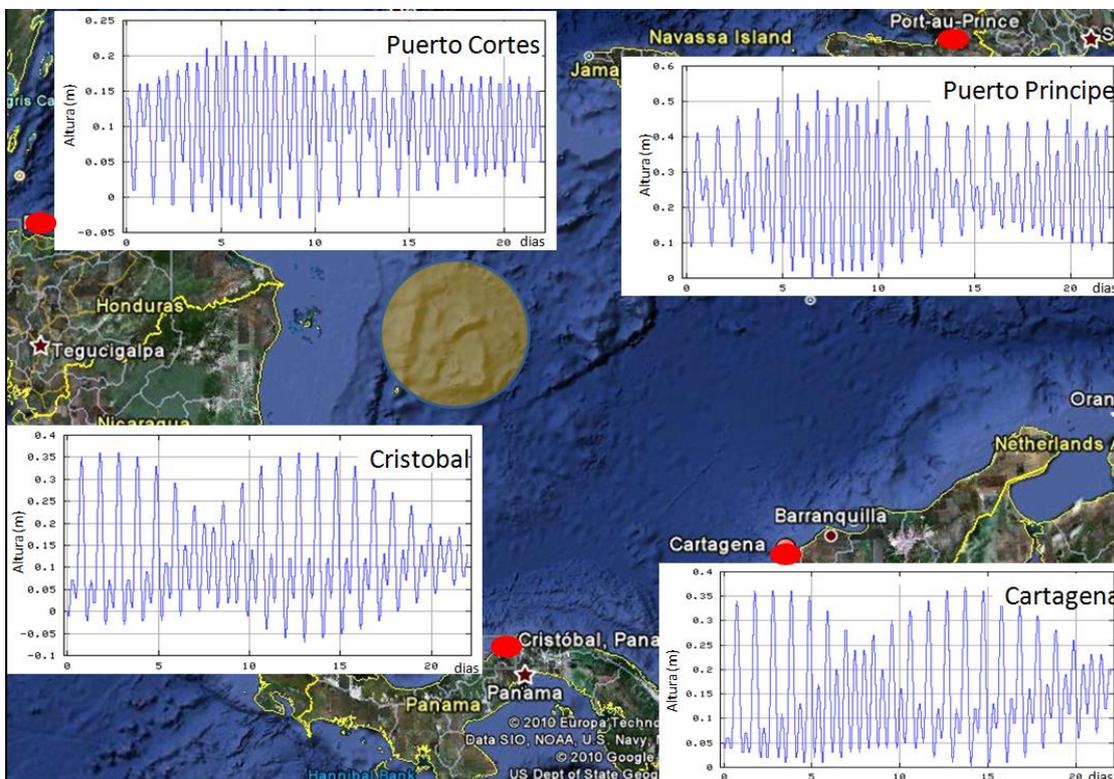
La primera referencia significativa que se conoce con relación a la marea del Caribe colombiano, fue descrita por Wiedemann (1973), quien determinó que las mareas del Caribe son débiles, con un rango mareal que varía de 20 a 30 cm y rara vez excede los 50 cm, por lo cual, fue catalogada como micromareal (rango < 2 m). La marea fue caracterizada como mixta, de tipo diurno y semidiurno, con cierta irregularidad. Otra referencia conocida se encuentra en Kjerfve, (1983) el cual empleando información de varias estaciones de marea del Caribe, construyó cartas de marea empleando las componentes M2, S2, K1, N2, O1 y P1<sup>30</sup>. Un análisis de los datos horarios en la Bahía de Cartagena, permitió una estimación más precisa de la marea astronómica encontrando una marea mixta, principalmente diurna Molares (2004). Actualmente se encuentran en los primeros estadios de medición los sensores de nivel del mar en el área de San Andrés, dentro del proyecto de Adaptación al Cambio Climático (INAP) (e.g. Marrugo et al., 2010), pero la serie es todavía muy corta para realizar un análisis de ese tipo.

Entonces, con base en los datos encontrados en el Sistema Hidrográfico de Francia, se extrajeron los datos de un ciclo lunar (28 días) de la marea astronómica de los cuatro puertos alrededor de los Cayos de San Andrés disponibles en la base de datos (Puerto Cortés - Honduras, Puerto Príncipe – Haití, Cristóbal – Panamá y Cartagena – Colombia, para apreciar el rango de la marea en el área de los Cayos (Figura 1.4). Se puede apreciar que los cuatro registros presentan una variación mixta semi-diurna (dos pleamares y dos bajamares en un día) cuya amplitud varia, siendo la máxima en Puerto Príncipe de alrededor de 0.5 m y las más pequeñas en Cristóbal de alrededor de 0.3 m.

---

<sup>30</sup> Molares, R. Clasificación e identificación de las componentes de marea en el Caribe colombiano. Bol. Cient. No....., 200...

Figura 2.6. 1 La marea astronómica en los Cayos de San Andrés inferida desde la observación de la modelación realizada en el Servicio Francés de Hidrografía para los Puertos de Cartagena, Cristóbal, Puerto Príncipe y Puerto Cortés.



Fuente: [www.shom.fr](http://www.shom.fr)

En el área la marea astronómica es mixta semidiurna con una amplitud de alrededor de 30 centímetros. Se debe tener en cuenta que, además de la marea astronómica, existen desviaciones del nivel del mar ocasionadas por la presión atmosférica, el desnivel estérico y las conocidas como ondas de tormenta (storm surge) que tienen tanta o más amplitud que la componente astronómica.

Al ser entonces el resultado de esfuerzos de desnivel tan parecidos, se deben tener en cuenta todos los agentes para encontrar la tendencia climática. Por esa razón, la cota de inundación que será tenida en cuenta para los cálculos de erosión debido al aumento del nivel del mar que se trata en el último capítulo, tuvo en cuenta todos los valores observados por el mayor tiempo posible.

## 2.7 ASPECTOS BIOLÓGICOS

El contexto biológico de los Cayos de San Andrés es extenso y abarca lo propio de los ecosistemas coralinos, de los cuales el Archipiélago es de los mayores representantes en el Caribe. En ese sentido el presente estudio no atiende ningún aspecto relacionado con la diversidad la sistemática o la ecología de los atolones de coral y se mencionaran brevemente las especies que son relativas a la arena y que sean de interés dentro del contexto del proceso costero.

Se hace referencia a algunas especies de plantas que habitan los cayos como de interés para la oceanografía costera tales como la *Euphorbia characias* y el alga calcárea del genero *Halimmeda sp.*

### 3. ASPECTOS DE OCEANOGRAFIA COSTERA – EL SISTEMA DE MODELADO COSTERO (SMC)

El SMC es un software aplicado al campo de la ingeniería costera, que consta de una interfaz gráfica que forma parte del proyecto “Modelo de Ayuda a la Gestión Litoral” realizado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C) de la Universidad de Cantabria, para la dirección General de del Ministerio de Medio Ambiente español y que recientemente ha venido siendo implementado en todo el mundo.

El software integra una serie de modelos numéricos en el campo de la ingeniería de costas, que permiten, mediante la creación de un proyecto de trabajo asociado a una zona de estudio, analizar los cambios morfológicos en el corto, mediano y largo plazo. De esta manera proporciona la base teórica para la toma de medidas de protección costera en las áreas vulnerables identificadas.

Los proyectos se pueden realizar a partir de archivos de batimetría y/o imágenes de una zona de estudio que, enfocados según sus características, generan diferentes alternativas o situaciones de estudio. Los datos son arreglados de manera jerárquica de acuerdo con las escalas temporales y espaciales y representan las condiciones de entrada en los diferentes modelos numéricos que el SMC contempla para analizar a corto, mediano y largo plazo la morfodinámica de un sistema costero. Además de permitir realizar modificaciones de los contornos de fondo (batimetría) y laterales (acantilados, diques naturales y artificiales, etc.), para estudiar diferentes escenarios.

El SMC está estructurado en cinco módulos: Pre proceso, corto plazo, medio y largo plazo, modelado de terreno y tutor (TIC).

### 3.1 MÓDULO DE PRE-PROCESO

Este módulo proporciona los datos de entrada para los diferentes programas y modelos del SMC. El módulo está compuesto por tres programas (1) Programa de batimetría costera, (2) Programa procesador de datos costeros y oleaje (OLAS para el caso colombiano) y (3) programa de evaluación litoral. Si bien el módulo contiene información que sólo cubre las costas españolas, ha sido estructurado de manera genérica e incluye también datos de países como Colombia, México, Taiwán y Túnez.

El módulo permite la incorporación de batimetría en sus planos de trabajo y las cartas náuticas digitales que el país permita acceder para facilitar, dentro del SMC, la labor de combinar información batimétrica proveniente de diversas fuentes.

#### 3.1.1 Programa De Caracterización De Oleajes Y Dinámicas

Para la caracterización del oleaje, en lugar de utilizar el módulo de oleaje desarrollado hasta la fecha en Colombia por la Dirección General Marítima, llamado OLAS, se utilizó el retroanálisis realizado de 60 años con los datos de presión a nivel global almacenados en el Servicio Nacional de los Estados Unidos para el Clima NCAR, desde los cuales se recalcularon los campos de oleajes, los cuales fueron calibrados con los datos de boyas y de los altímetros en órbita, (ver la metodología completa en el capítulo 5).

### 3.2 MÓDULO DE CORTO PLAZO

Este módulo incluye métodos numéricos para analizar los sistemas costeros a una escala temporal corta (horas-días). Está compuesto por modelos de evolución morfodinámica en perfil (cross-profile) 2DV (PETRA) y planta (beach

plan) 2DH (MOPLA). Permite analizar los cambios que experimentaría una playa en respuesta a eventos extremos y verificar la estabilidad y requerimientos funcionales para los proyectos de restauración de playa. El módulo también provee información de procesos costeros como el sistema de corrientes y el transporte potencial, que permiten entender la morfodinámica de playa para diagnosticar y proponer alternativas de solución a problemas específicos.

### 3.2.1 Programa De Evolución Del Perfil Transversal En Playas (PETRA)

Este programa modela la evolución en el tiempo de un perfil de playa. El modelo simula los distintos procesos involucrados (propagación del oleaje monocromático y espectral, incluyendo rotura y post-rotura, sobre-elevación e inundación en la zona de playa seca, cálculo del sistema inducido de corrientes, transporte de sedimentos por fondo y suspensión, etc.), permitiendo obtener la evolución del perfil después de la acción dinámica de un oleaje sobre un nivel de marea en el tiempo.

### 3.2.2 PROGRAMA DE MORFODINAMICA DE PLAYAS (MOPLA)<sup>31</sup>

Este programa modela la evolución morfodinámica de playas a corto plazo. Se compone de seis modelos numéricos, los cuales simulan la propagación del oleaje, el sistema de corrientes inducido por la rotura del oleaje, cálculo del transporte de sedimentos y la evolución de la batimetría. Los modelos se han organizado en dos grupos, por un lado aquellos que modelan los procesos asociados a la propagación de un tren de ondas monocromáticas, y por otro, los que modelan la propagación de un estado de mar, representado mediante un espectro de energía de oleaje. Los primeros modelos se aplican,

---

<sup>31</sup> GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). Universidad de Cantabria. España. Manual de Usuario MOPLA-3.0

fundamentalmente, para caracterizar la morfodinámica media en un tramo de costa. Y se compone de los siguientes programas:

- OLUCA MC: Modelo parabólico de propagación de oleaje monocromático<sup>32</sup>.
- COPLA-MC: modelo de corrientes en playa inducidas por la rotura de ondas<sup>33</sup>.
- EROS-MC: Modelo de Erosión - sedimentación y evolución de batimetrías en playas<sup>34</sup>.

En cuanto a los segundos (oleaje espectral), se aplican fundamentalmente en el modelado de eventos extraordinarios o en casos donde se desea una mayor precisión en el cálculo de alturas de ola (diseños de diques u obras en general). Este grupo se compone de los siguientes modelos:

- OLUCA-SP: Modelo parabólico de propagación de oleaje espectral.
- COPLA-SP: Modelo de Corrientes en playas inducidas por la rotura del oleaje espectral.
- EROS-SP: Modelo de Erosión – sedimentación y evolución de la batimetría

Por el interés para el documento, se hará énfasis en los modelos de propagación del oleaje monocromático OLUCA-MC, PETRA-MC y EROS-MC. Estos modelos numéricos se basan en modelos teóricos que tienen una serie de restricciones. En este apartado se hace un resumen de las hipótesis en las cuales se basan estos modelos.

---

<sup>32</sup> GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. España. MANUAL DE REFERENCIA, OLUCA-MC 3.0.

<sup>33</sup> GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). UNIVERSIDAD DE CANTABRIA España., MANUAL DE REFERENCIA COPLA-MC/SP 3.0

<sup>34</sup> GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). UNIVERSIDAD DE CANTABRIA España., MANUAL DE REFERENCIA EROS 3.0

### 3.2.2.1 Hipótesis del modelo parabólico de “Propagación de ondas” (Olucá-MC/SP)<sup>35</sup>

- El modelo asume un **fluido**: No viscoso, incompresible, de densidad constante. Flujo irrotacional y estacionario. Dinámicas: Presión constante en la superficie libre, no se considera la acción del viento, no se considera la acción de la aceleración de Coriolis.
- **Contornos**: Se asume un 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.
- **Propagación**: Asume una No linealidad débil: Dependencia débil de la ecuación de la dispersión con la amplitud de la onda (monocromático) o la altura de olas significativa (espectral); modelo no lineal Stokes-Hedges.
- **Aproximación parabólica**: Se asume que las ondas se propagan en una dirección principal (x), con lo cual se desprecian términos  $\frac{\partial^2(\ )}{\partial x^2}$ . La solución es tanto más aproximada cuanto menor variación haya respecto a la dirección x.
- **Limitaciones por propagación**: Se asume que las pendientes del fondo deben ser menores que 1:3 (18o), para garantizar la condición de pendiente suave. Que 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.

---

<sup>35</sup> Modelo OLUCA(MC)

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.

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.

### 3.2.2.2 Limitaciones Por Contornos Y Condiciones Iniciales

Evitar cambios bruscos de profundidad en la batimetría (pendientes mayores a 1:3), principalmente en la zona de estudio.

En la primera fila en ( $x = 0$ ) se definen las condiciones iniciales del oleaje. En esta primera 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.

Como en todos los modelos numéricos, es necesario imponer unas condiciones de contorno laterales, estas condiciones nunca son perfectas e involucran ruidos numéricos en el sistema. El modelo Mopla 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).

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

Debido a limitaciones del modelo numérico en los contornos, el modelo propaga las ondas en profundidades mayores a 0.30 m. Intentar modelar ensayos de laboratorio con profundidades menores a ésta, da lugar a errores numéricos.

### 3.2.2.3 Hipótesis del modelo bidimensional de “Corrientes en playas” (Coplá-MC/SP)<sup>36</sup>

- Fluido: Fluido homogéneo, incompresible, densidad constante
- Flujo: La variación 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 contenidas 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.

---

<sup>36</sup> GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). Universidad de Cantabria. España. Manual de Usuario MOPLA-3.0

- Dinámicas:
  - Presión constante en la superficie libre
  - No se considera la acción del viento
  - No se considera la acción de la aceleración de Coriolis

Contornos: Dado que los modelos Copla-(MC/SP) se ejecutan a partir de los resultados del modelo Oluca-(MC/SP), éste emplea como contornos los mismos definidos en la malla de propagación.

#### 3.2.2.4 Hipótesis del modelo de “Evolución morfológica de una playa” (Eros-MC/SP)

Este modelo evalúa el transporte de sedimentos a partir de formulaciones del oleaje-corriente. Este es un modelo de “Análisis a corto plazo” cuyos tiempos máximos de simulación no deben superar las 72 horas.

### 3.3 MÓDULO DE LARGO PLAZO

El objetivo del análisis a largo plazo, es determinar la forma final de una playa o la exposición temporal de esta forma a una escala de años en orden de asegurar que la funcionalidad de la playa continúe a lo largo de su periodo de vida útil. Las formulaciones existentes para el análisis a largo plazo no se concentran sobre los procesos (el transporte de sedimentos onda-onda wave-to-wave) pero están agregados a ellos en magnitud. Los dos modelos comúnmente empleados para el análisis de playa son aquellos basados sobre las hipótesis de equilibrio (Capobianco et al., 2002; Kraus, 2001) y aquellos basados en la ecuación de difusión (Hanson, 1999).

## 4. METODOLOGIA

La metodología de trabajo relacionada con los objetivos del documento, involucra tanto fase de campo como de análisis posterior:

### 4.1 FASE DE CAMPO

Las actividades realizadas en la fase da campo sobre cada Cayo fueron:

- Levantamiento Batimétrico
- Medición de parámetros hidrodinámicos
- Sedimentología y levantamiento de perfiles
- Levantamiento Taquimétrico

Para esto se utilizaron los siguientes equipos:

- Receptor GPS en tiempo real marca TOPCON ref. gms-100.
- Sondas de nivel marca Keller, modelo DCX-22/80672.21
- DGPS marca Garmin
- Nivel óptico marca Pentax Referencia AP 281 con trípode ATS-3.
- Miras milimétricas South y Teodolito Digital FOIF DT 202.
- Cámara fotográfica digital.

La fase de campo involucró la toma de medidas de topografía, fotografías y parámetros de oleaje en cada uno de los Cayos. En esta fase se realizó el diagnóstico de las condiciones de la línea de costa en cuanto estado erosivo, así como una descripción general de la flora y fauna presente.

En el levantamiento taquimétrico se efectuó la medición de la línea de costa empleando el DGPS TopCon, programado para obtener valores de posición cada cinco metros siguiendo el contorno de la formación sobre la interfase arena/agua; y la toma de los perfiles de playa y de elevación sobre el nivel del mar empleando conjuntamente un GPS Garmin, miras y teodolitos. De esta manera sobre cada punto en que se ubicó la mira, se obtuvo un dato de posición con el GPS y la altura de la lectura en la mira.

Se tomaron muestras de arena en todos los costados de los Cayos con el motivo de identificar la composición granulométrica. Además de realizar registros fotográficos de los sedimentos.

En cuanto al levantamiento batimétrico, se realizaron estimaciones de la profundidad somera en las áreas donde sea el acceso posible, siempre y cuando las condiciones climáticas y de logística lo permitieron.

#### 4.2 FASE DE LABORATORIO

El análisis de los datos tomados en campo, así como los correspondientes con el análisis del oleaje se realizaron empleando los programas, ArcGis 9.0, Surfer®, Grapher®, y el Sistema de Modelado Costero.

En la fase de laboratorio, se compiló toda la información de topografía, batimetría e imágenes adquiridas. Los puntos de coordenadas correspondientes a los datos topográficos fueron plasmados en hojas de cálculo para hacer los modelos de terreno incorporando los valores de altura registrados de las observaciones y hacer las interpretaciones de altura y perfiles de los Cayos.

Posteriormente se modelaron los campos de oleaje mediante una serie de propagaciones de oleaje monocromático, sobre la representación digital de los Cayos utilizando el SMC. Las condiciones del oleaje fue inferida desde los resultados del retro-análisis de NCAR a partir de la base de datos disponible

para la determinación del régimen medio y del régimen extremal del oleaje mediante el cálculo del régimen de oleaje que no supera las 12 horas al año (Hs12) es decir el oleaje de tormenta que se producen aunque un huracán no pase cerca de la línea de costa, pero puede generar oleaje de fondo con fenómeno asociado a las olas de tormenta que son generadas en lugares remotos y que viajan cientos de kilómetros hasta llegar a las playas. Los datos corregidos de Hs y Tp, serán los parámetros de entrada para ejecutar los modelos numéricos que se emplean en el SMC con el fin evaluar el proceso costero en los Cayos.

Posteriormente, apoyado en información de las proyecciones esperadas en el incremento del nivel medio del mar ( $\Delta^n$ ) y la altura de ola significativa (Hs12) para los años 2025, 2055 y 2085 por los efectos del calentamiento global, se hizo una estimación de la migración de la línea de costa.

El estudio de cada Cayo se realizó a partir de la digitalización la carta batimétrica de cada Cayo disponible creando un archivo con coordenadas x, y e z de cada uno de los Cayos, referenciadas en coordenadas planas UTM zona 17N y se creó un proyecto SMC. Sobre la representación gráfica geo-referenciada se introdujo la línea de costa y los datos de topografía obtenidos en el muestreo de campo. Con la caracterización del clima marítimo en cuanto Hs y Tp, así como la dirección del oleaje, se procedió a la aplicación de los modelos OLUCA-MC, COPLA-MC y EROS-MC del SMC, y obtener los planos de deformación de oleaje y dinámica litoral del área.

## 5. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL CAYO SERRANILLA

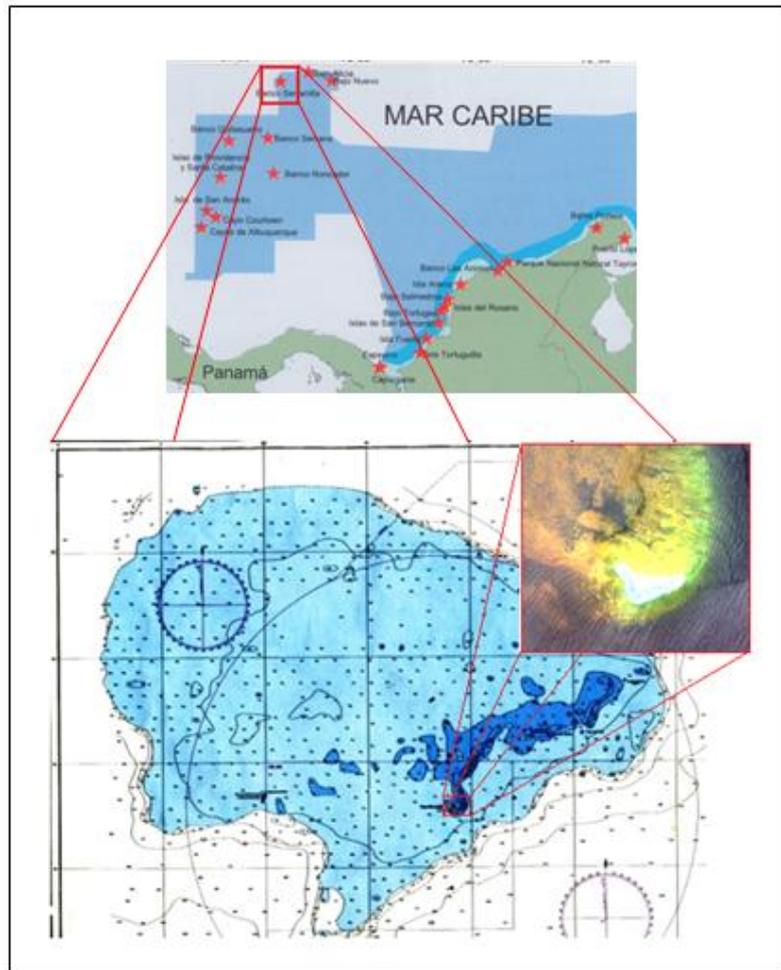
Imagen 5.1 Cayo Serranilla. Zona de rompiente y vista aérea.



Fotografía aérea tomada el Agosto 17 de 2009

El Banco Serranilla está localizado 130 km al Norte del Banco Serrana, tiene forma ovalada y un diámetro máximo de 50 km (Figura 6). Presenta porciones de tierra que afloran en superficie como lo son el Cayo del Medio, Cayo del este y Cayo Serranilla, todos ubicados en el sector este del Banco. Cayo Serranilla es la porción de tierra habitada por el personal de Infantería de Marina de Colombia y el objeto de este estudio (Figura 5.1.1).

Figura 5.1 Localización espacial en la carta náutica e imagen satelital del cayo Serranilla.



Fuente: INVEMAR (2000), CIOH Carta náutica 634 fragmento de imagen aérea IGAC.

Este banco es relativamente profundo (la mayoría entre 10 y 40m) y está bordeado por riscos empinados. El perímetro de la plataforma se caracteriza por tener bahías redondeadas, las cuales son particularmente comunes en el margen Sur. Solamente los márgenes Este y Sur-Este están ocupados por una estructura arrecifal periférica que emerge localmente durante las bajas mareas. La geomorfología general de este rasgo corresponde a la de medio atolón, pero no tiene un desarrollo activo de coral (Triffleman, 1992).

Por otra parte, en Hallock et al., (1988) se afirma que el banco no parece estar acrecionado, sino por el contrario creciendo en la condiciones ambientales actuales. Los recursos tróficos en el área, aparentemente exceden los niveles suficientes para mantener poblaciones coralinas, pero en cambio favorece comunidades algales y esponjas.

## 5.1 GEOMORFOLOGIA DEL CAYO SERRANILLA

La línea de costa del Cayo Serranilla describe una formación triangular, con esquinas pronunciadas hacia el Noreste, Noroeste y Sur, abarcando un área aproximada de 126,896.955041 m<sup>2</sup> (Figura 5.1.1). El Cayo consiste en una plataforma rocosa que sostiene zonas de playa de arena hacia todos los frentes, a excepción del costado Este, dominado por un sustrato rocoso y proyecciones de la plataforma calcárea que conforma la parte final del arrecife (Imagen 5.1.1)

La zona de rompiente se encuentra hacia el costado Este del Cayo y lo protege de la acción directa de la energía del oleaje. De esta manera el costado Este de Serranilla se caracteriza por presentar playas de arena de grano medio hacia la zona litoral de alta marea (seco), y se convierte gradualmente en sustrato rocoso a medida que la acción del oleaje disipado por la presencia de la corriente incide sobre él. La zona norte del Cayo, está conformado por playas de arena de grano fino que se han acumulado gracias a la presencia de

la zona de rompiente al este, que disipa la energía del oleaje proveniente del NE y cuya corriente dispersa el grano por los contornos del Cayo.

Figura 5.1.1 Línea de costa del Cayo Serranilla

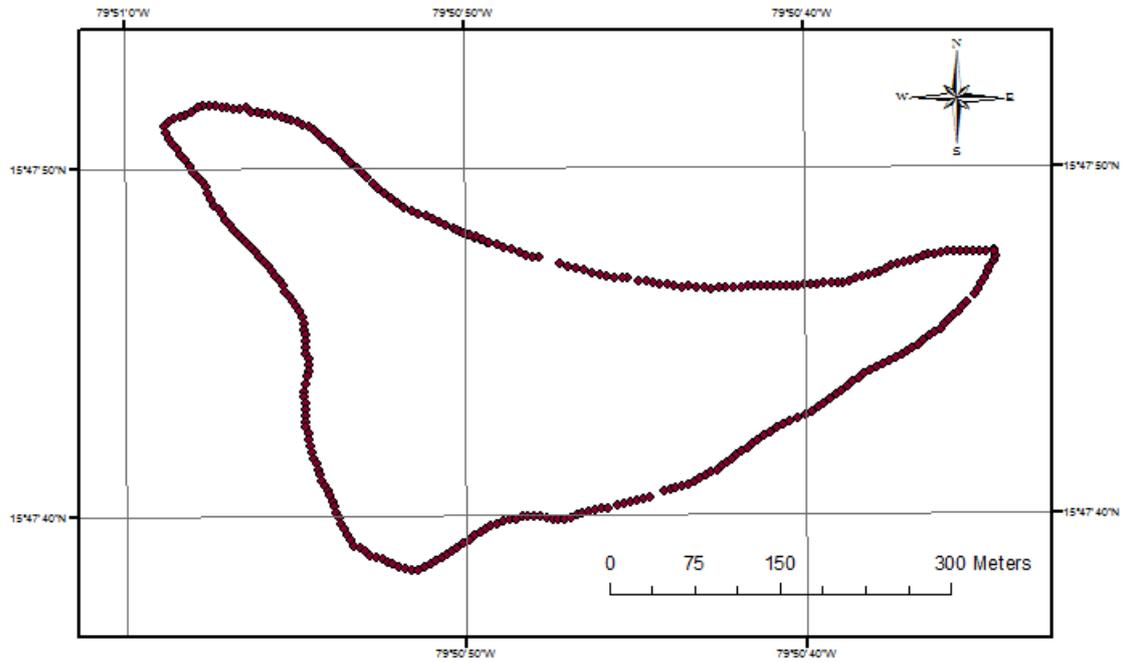
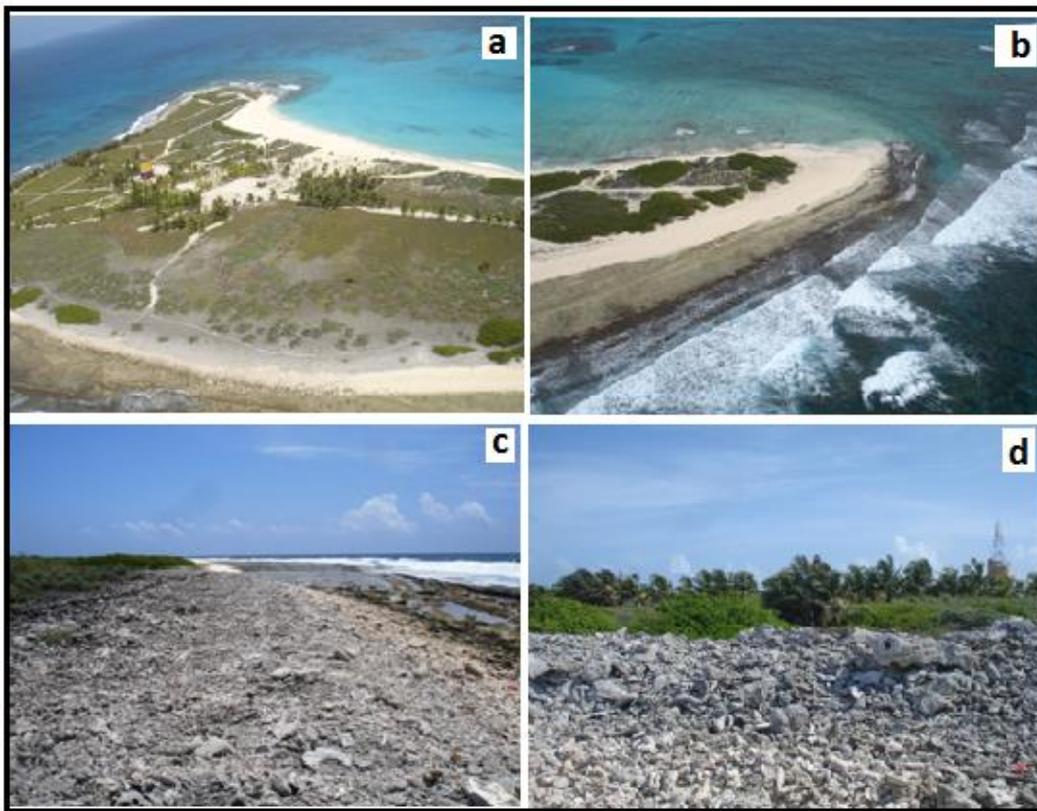


Imagen 5.1. 1 Fotografías aéreas; a) Panorámica; b) Punta NE del cayo. Fotografías oblicuas; c y d) Costado Este del cayo.

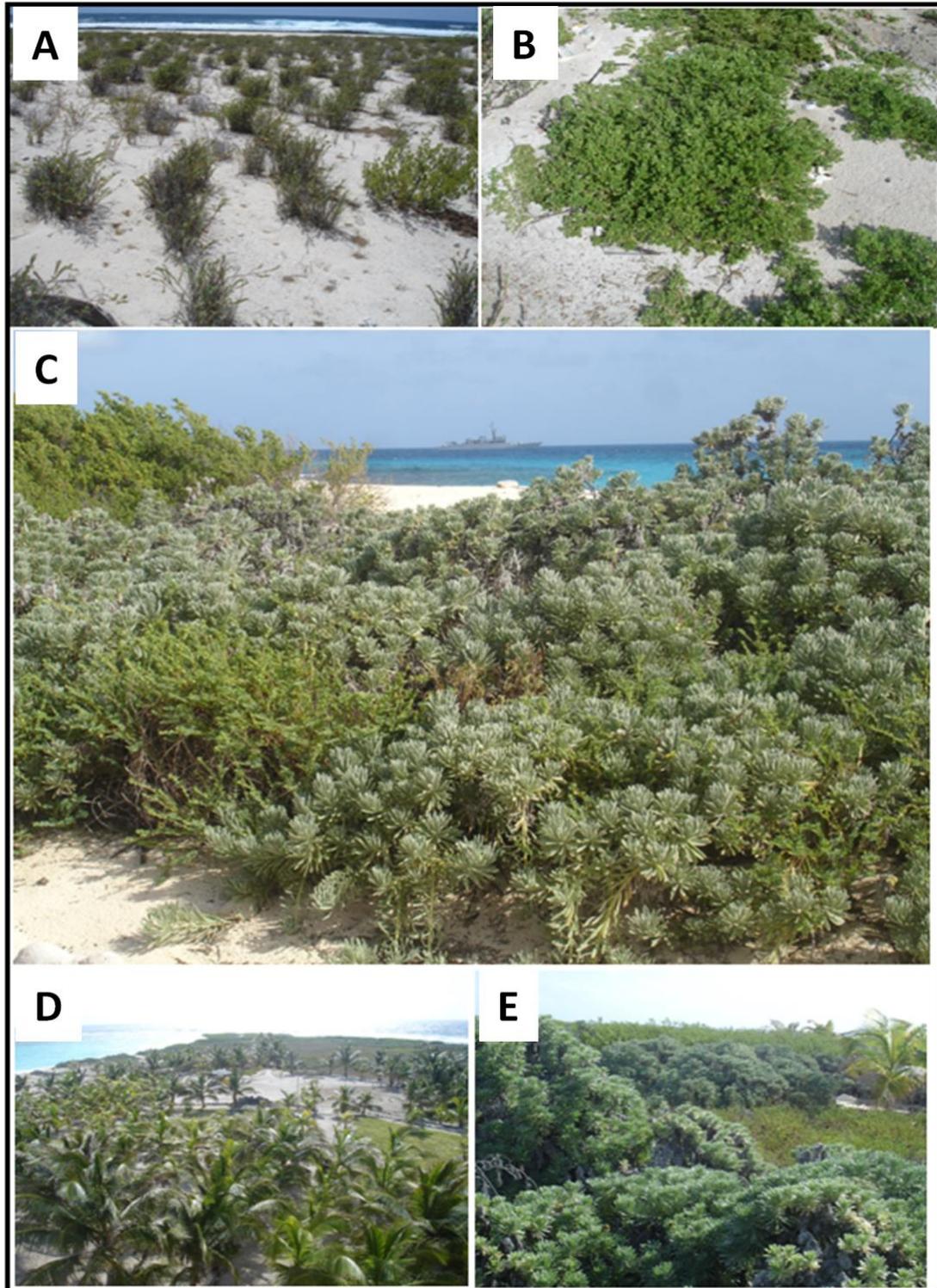


Tomado: Agosto 17 de 2009

La vegetación en Serranilla es relativamente pobre, sin embargo se identifican algunas zonas con vegetación arbustiva (*Tournefortia sp*) asociadas a las dunas de arena (figura 5.1.2). También hay mangle lavanda y otras plantas autóctonas. Los infantes de marina han sembrado algunas palmeras aisladas dispuestas a lo largo de una serie de senderos que comunican todos los costados de la formación. Las mayores elevaciones observadas en el Cayo se encuentran hacia el costado sur central con alturas de hasta 3m sobre el nivel del mar.

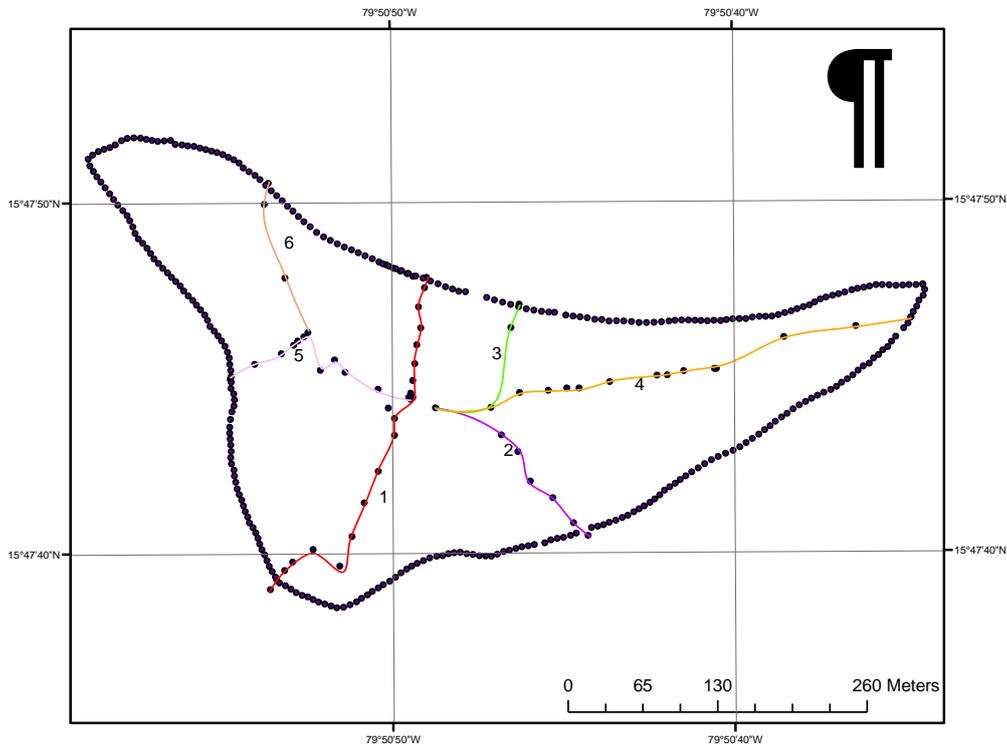
La elevación del cayo ha sido motivo de interés particular del presente estudio y por esa razón se tomaron varios perfiles topográficos en la esperanza de tener un primer modelo digital de elevación del Cayo, para lo cual se realizaron los perfiles que aparecen en la figura 6.1.1.2

Imagen 5.1. 2 Fotografía de distintas formas de vegetación que tiene el Cayo Serranilla.(A) En el Este (B) al sur (C) al norte y al (E) al oeste. Una vista de las palmeras sembradas (D).



Tomado: Agosto 17 de 2009

Figura 5.1. 2 Los transeptos de topografía realizados en Agosto de 2009.



Los resultados de las mediciones de altura en Serranilla (figura 5.1.3) muestran que el Cayo tiene una mayor altura al oeste con alturas de alrededor de 3m en la zona donde se construyó el faro. La esquina que apunta al noroeste también es relativamente alta y su parte plana aloja el helipuerto actual. Una depresión que divide el montículo del oeste de otra elevación más al este. La depresión central tiene una zona muy baja hacia el sur que se encuentra inundada. La punta oriental de Serranilla sostiene una duna y se encuentra separada del montículo más grande por una depresión que es muy baja que se descubre, se rellena y recibe arena esporádicamente. Las depresiones se observan en los perfiles (figura 5.1.4) donde se observan también las empinadas bermas de la parte oeste que contrastan con las más suaves del Este.

Figura 5.1. 3 Modelo del terreno, en Cayo Serranilla. Las alturas aparecen con valores negativos.

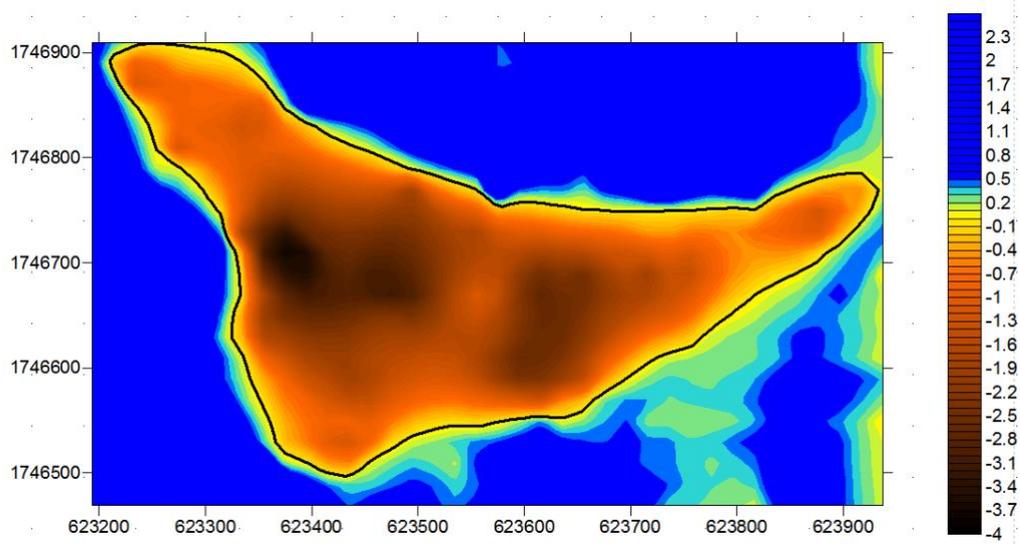
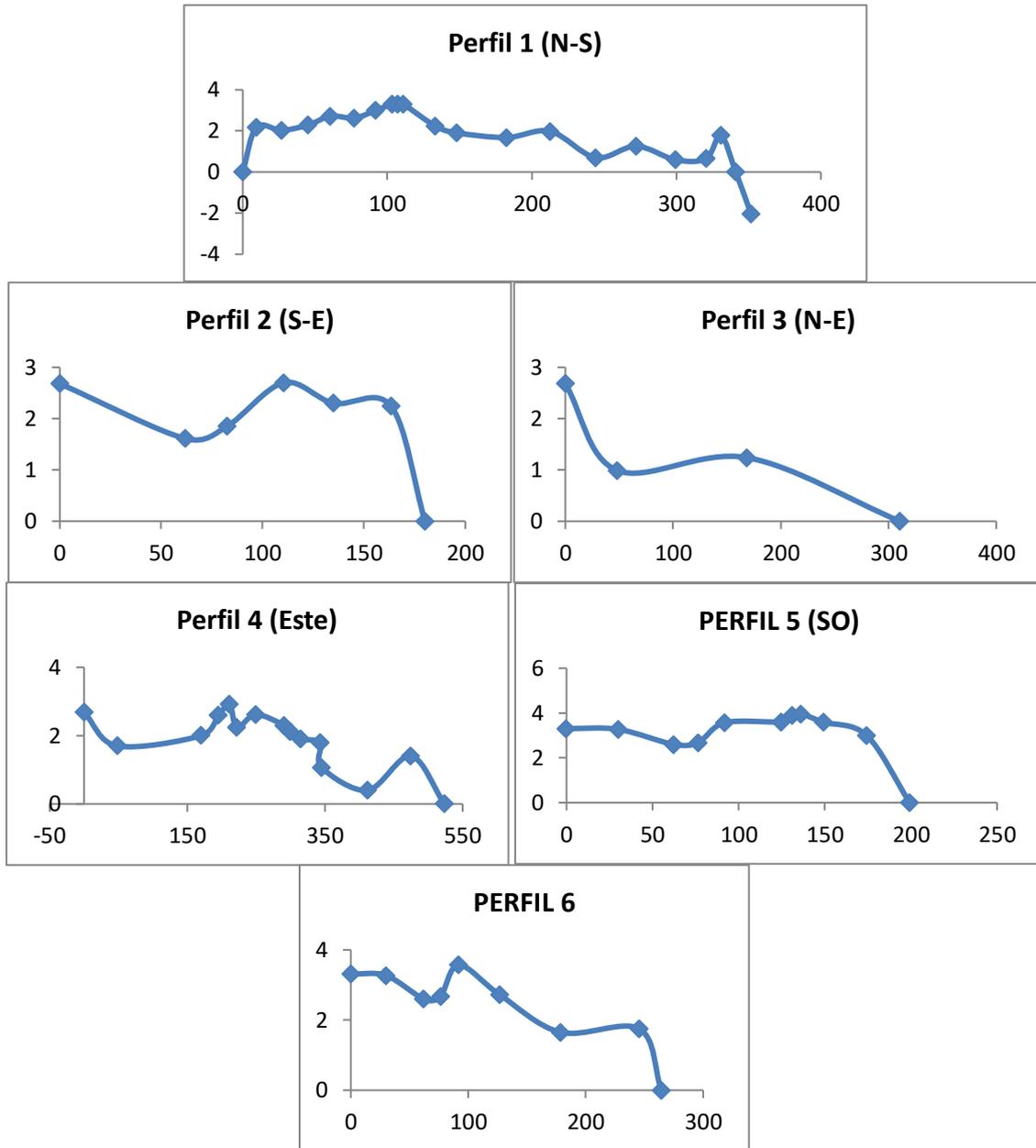


Figura 5.1. 4 Perfiles de topografía en Cayo Serranilla (ver direcciones en Fig. 5.1.2).



En cuanto a la forma de las playas en planta, se presenta una comparación de imágenes históricas del Cayo, confirman cambio experimentado por el Cayo con el paso del tiempo que parece ser erosivo (figura 5.1.5). La imagen de 1944



El retroceso de la línea de costa en el costado sureste que se encuentra sobre la rompiente es evidente en las imágenes recientes (Imagen 6.1.3) mientras que el costado suroeste se mantiene igual. En balance, Serranilla parece haber perdido arena significativamente especialmente de su costado sureste contra la rompiente donde grandes terrazas calcáreas hoy se encuentran desnudas de arena. La península del noroeste ha cambiado poco en el tiempo, tiene las bermas más altas y enfrenta la mayor y más vegetada duna del Cayo.

Imagen 5.1.3 . La terraza sur de Serranilla descubierta de arena.



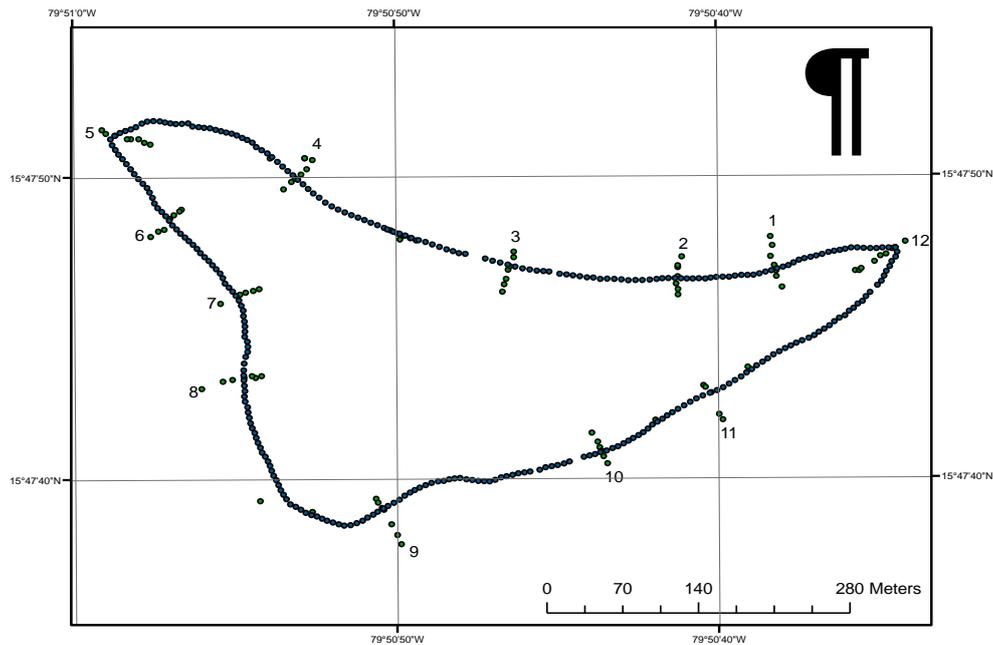
Tomado: Agosto 17 de 2009

### 5.1.1 PERFILES DE PLAYA

El levantamiento de las playas de Serranilla se realizó con miras y GPS diferencial a lo largo de varios perfiles representativos de cada costado del Cayo de tal forma que permitieran identificar las bermas de las playas y el perfil sumergido para buscar las respectivas profundidades de cierre.

La figura 5.1.1.1, representa el Cayo Serranilla en coordenadas geográficas WGS84, donde se reconoce la línea de costa obtenida y los perfiles de topografía muestreados.

Figura 5.1.1. 1 . Perfiles de topografía extraídos en Cayo Serranilla.

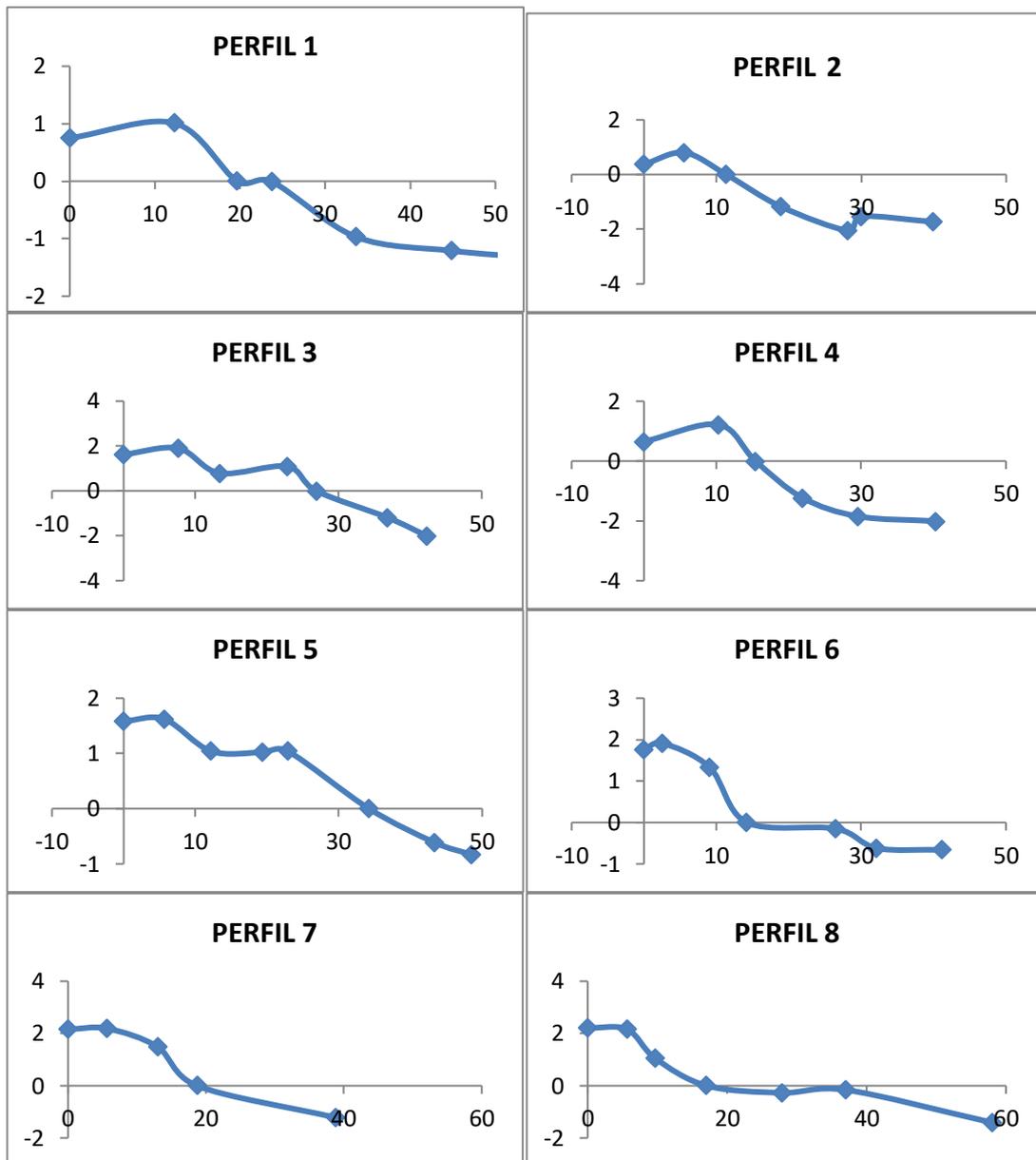


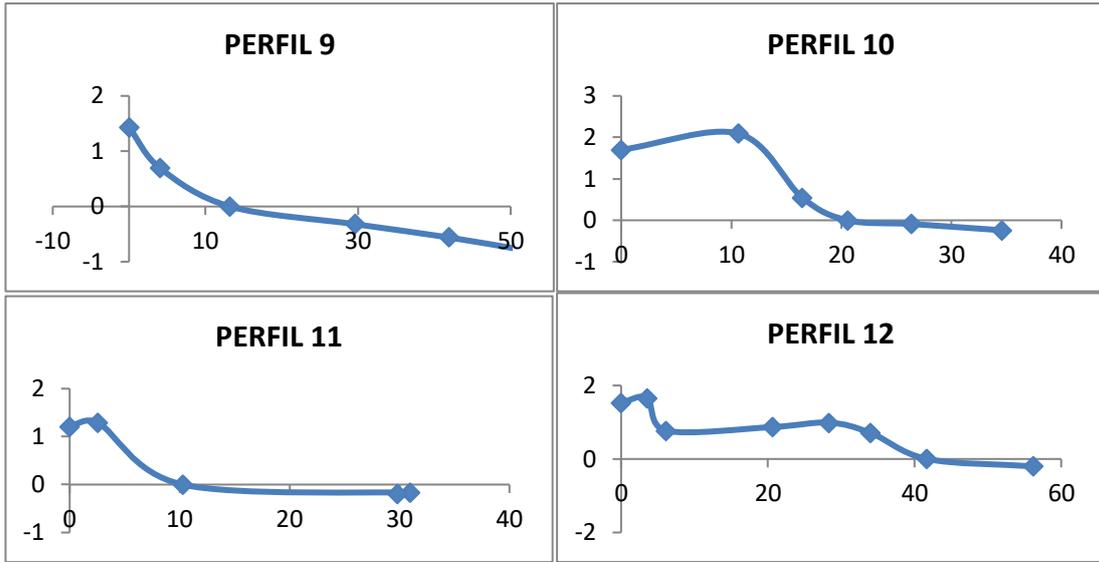
Los perfiles del costado norte muestran una playa amplia y empinada debido al oleaje que recibe por ese costado, que aunque tratándose del costado “protegido”, es significativo. Los perfiles del costado suroriental fueron hechos sobre las bermas de la cinta de arena que es angosta y se apoya sobre la laja de piedra que hace parte de la rompiente del Banco. Los perfiles del costado suroeste son cortos debido a lo agudo del perfil, reciben el oleaje más fuerte en la medida que refracta al final del Banco.

Los perfiles 1 a 4 corresponden a la zona de playa norte, mientras que los perfiles 5 a 8 se levantaron en el costado Sur-Occidental, que se ha considerado como una zona “protegida” ante el oleaje incidente del NE en

condiciones normales. Los perfiles 9 a 12 reflejan su cercanía a la zona de rompiente del Banco (figura 5.1.1.2).

Figura 5.1.1. 2 Perfiles de playa del Cayo Serranilla.





## 5.2 CARACTERISTICAS DEL OLEAJE CAYO SERRANILLA

El oleaje fue medido en dos puntos consecutivos, uno en el sector “protegido” del cayo y el siguiente en la región “expuesta” (figura 5.2.1)

Figura 5.2. 1 Posición de los sensores de nivel en cayo Serranilla.

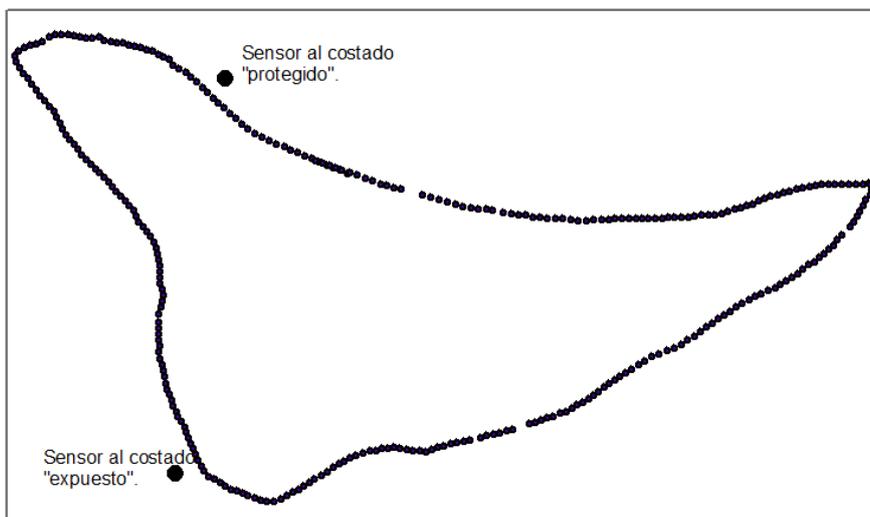


Figura 5.2. 2 Registro del sensor de nivel al costado "expuesto".

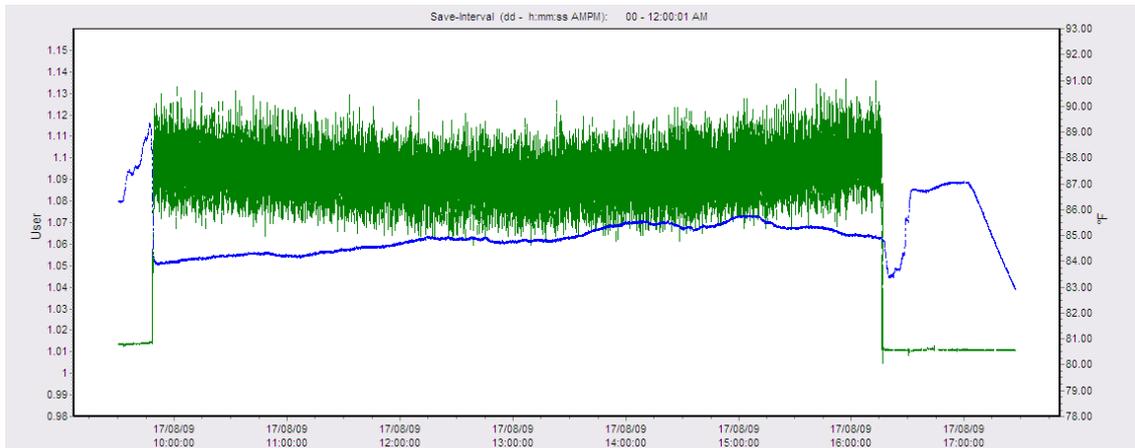
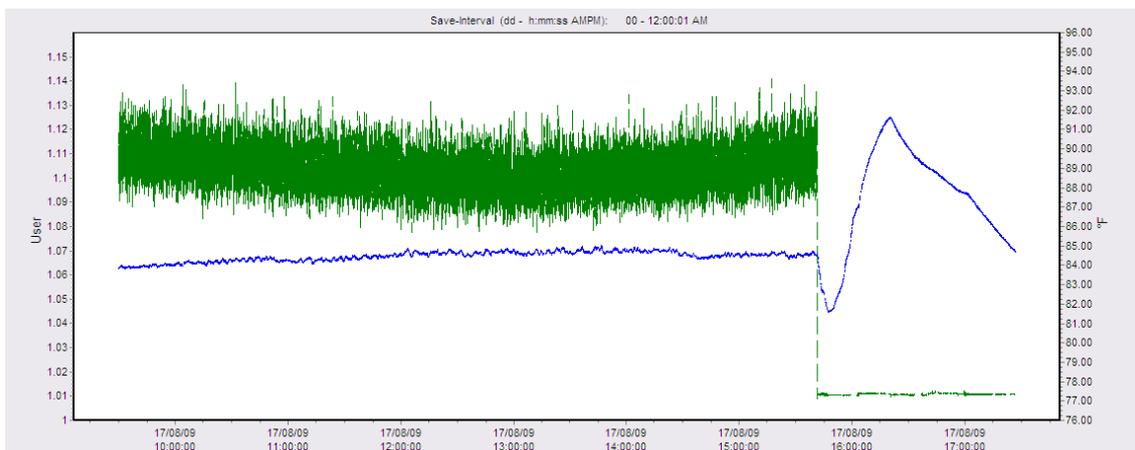


Figura 5.2. 3 Registro del sensor de nivel al costado "protegida".



Como se puede observar , el oleaje que llega a los cayos es de una altura de alrededor de ... los periodos de los trenes de oleaje eran de ...

Figura 5.2. 4 Espectro de oleaje obtenido para el sector protegido de Serranilla.

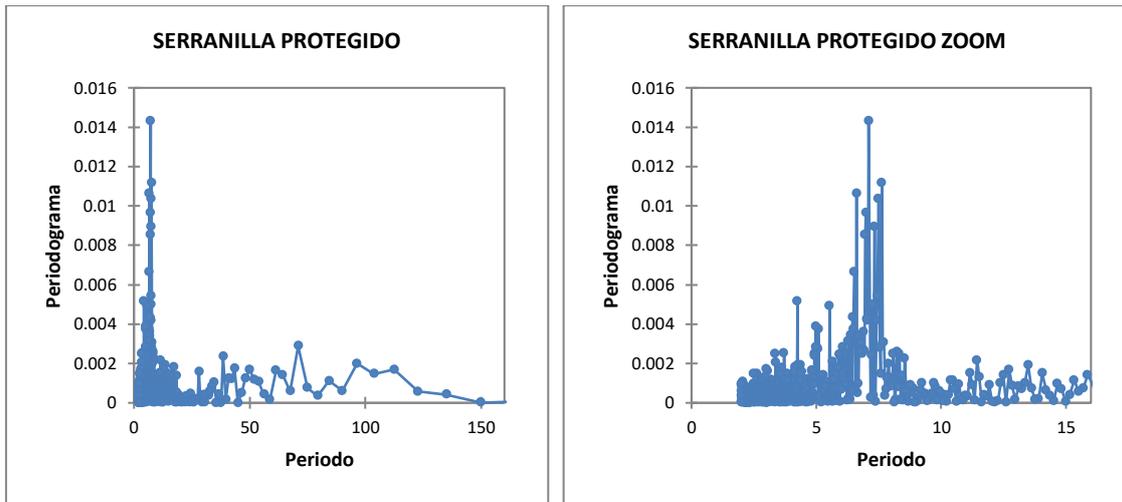
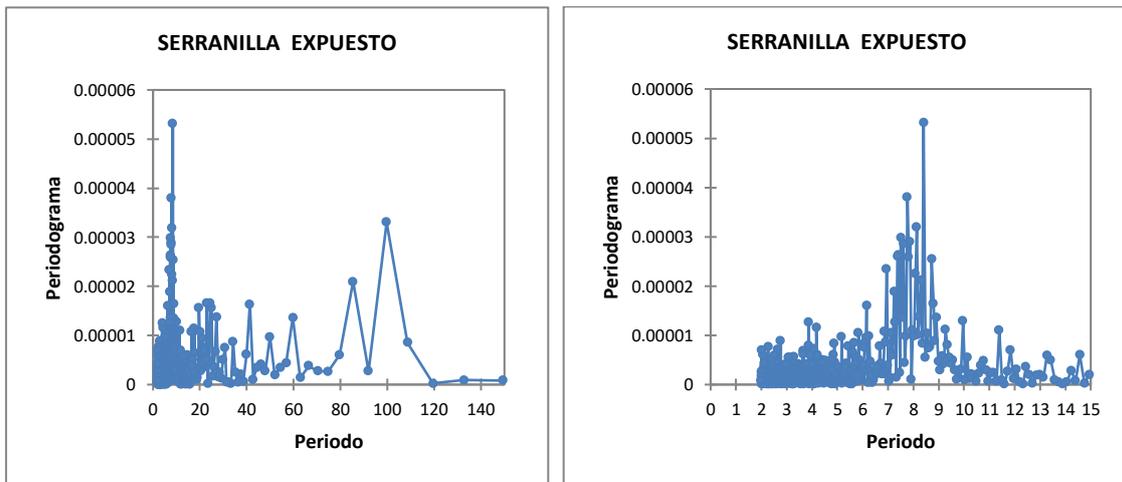


Figura 5.2. 5 Espectro de oleaje obtenido para el sector expuesto de Serranilla.



### 5.3 SIMULACIONES DEL EFECTO DEL OLAJE EN LA COSTA

Se obtuvieron las figuras correspondientes a las propagaciones del oleaje en condiciones media y extremas para el Cayo Serranilla (figura 5.3.1) mediante la propagación de los valores obtenidos en el retro-análisis, desde profundidades indefinidas hasta la costa del Cayo como aparece en la Sección 3.3.

Figura 5.3.1 Altura de ola significativa ( $H_s$ ). Régimen medio, Cayo Serranilla.

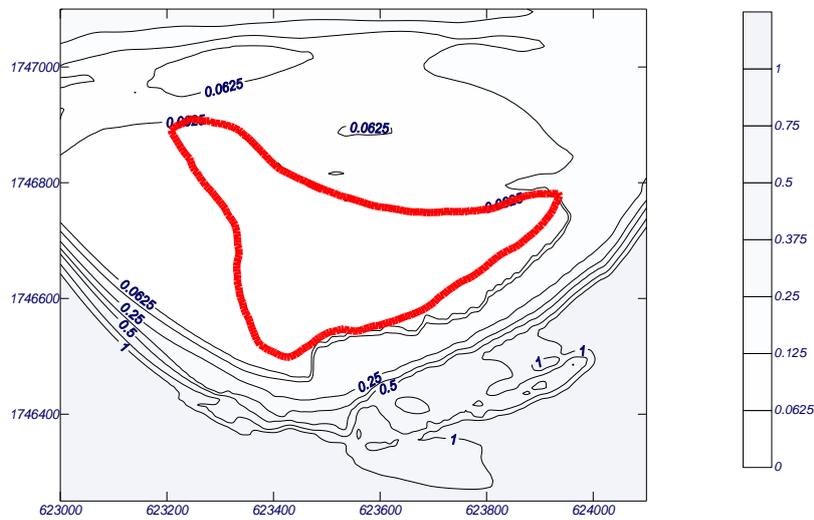
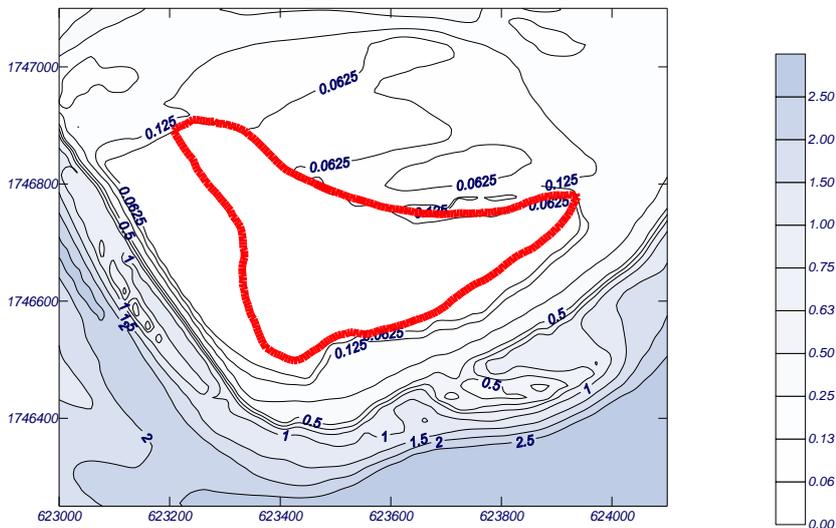


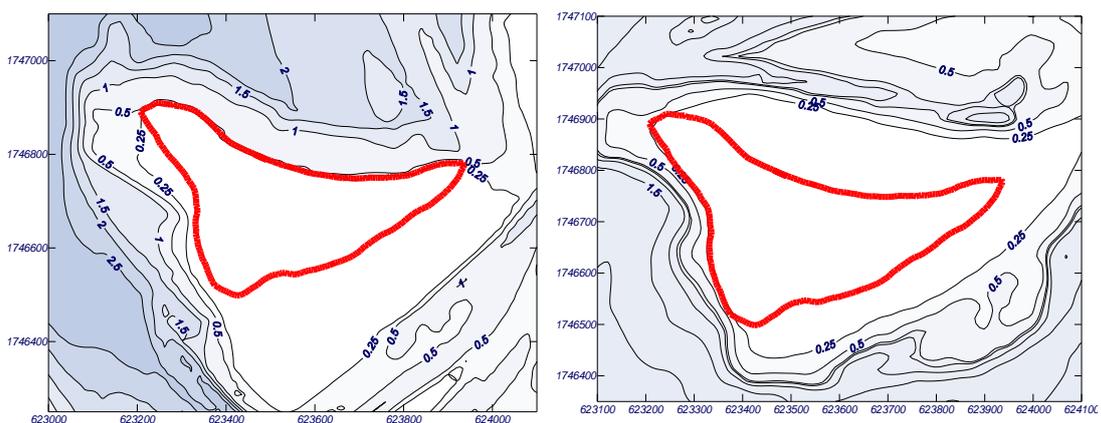
Figura 5.3. 2 La altura de la ola como llega durante el régimen extremal ( $H_{x12}$ ) para el cayo Serranilla.



El régimen extremal, es decir, el mayor oleaje de tormenta, conocido como Hs 12 hace referencia a la altura de ola significativa que es excedida 12 horas al año.

De manera regular, Cayo Serranilla recibe el oleaje del Este y lo “filtra” en la rompiente de manera importante generando chorros de arena entre las cabezas de coral. Como el costado suroriental del Cayo hace parte de la rompiente, este recibe el oleaje de manera muy cercana haciendo que la costa se encuentre muy expuesta de manera permanente en ese costado. La fotografía aérea antigua (ver anexo) muestra que hay ocasiones en las que el oleaje extremal ha retirado la arena en el corredor bajo que separa la duna de la punta oriental. Así mismo, el costado suroeste recibe el oleaje mas alto al enfrentar aguas mas profundas al final de la rompiente que termina en el vértice inferior del Cayo. La playa al norte de Serranilla esta relativamente bien protegida, se encuentra apoyada en la península occidental y es muy sensible a los oleajes del norte.

Figura 5.3. 3 Resultado de la simulación de la altura de la ola que llaga al Cayo en caso de un huracán que produce oleaje que viene del norte (izquierda) y del suroeste (derecha).



Las simulaciones muestran que el Cayo es muy vulnerable a un oleaje del norte, con olas llegando a la playa con alturas mayores de 1m, lo que producirá una erosión muy importante en esas playas. Si el huracán genera oleaje que llegue del suroeste la barrera arrecifal va a filtrar mucho del oleaje incidente, sin embargo el oleaje va a llegar muy alto a la península occidental y se refractará alcanzando a afectar la playa noroeste. La playa norte se protege de este tipo de oleaje extremo.

#### 5.4 REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA

Las corrientes de rotura se obtuvieron mediante la utilización del modelo OLUCA del SMC, a partir de la propagación del oleaje monocromático considerado para el análisis (medio y extremo). La descripción de las hipótesis y restricciones del modelo se encuentra en el aparte de la metodología. Las condiciones de cada modelación se encuentran en el anexo "C".

Las corrientes que se producen por la rotura del oleaje alrededor del Cayo Serranilla debido al régimen medio del oleaje se encuentran en la figura 5.4.1. En ella se observa una corriente hacia el oeste de ~30 cm/s a lo largo del costado sureste del Cayo producida por el oleaje incidente sobre la rompiente. También se hace evidente que la corriente se intensifica en la punta oriental del Cayo y que es mucho menor en los demás costados.

La simulación de las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura... en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero las corrientes se intensifican al interior de la laguna y alrededor de la punta sur del Cayo con valores cercanos a 0.5 m/s.

Figura 5.4. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Serranilla. Periodo 5.3s, Hs=0.98m, dirección=N82E.

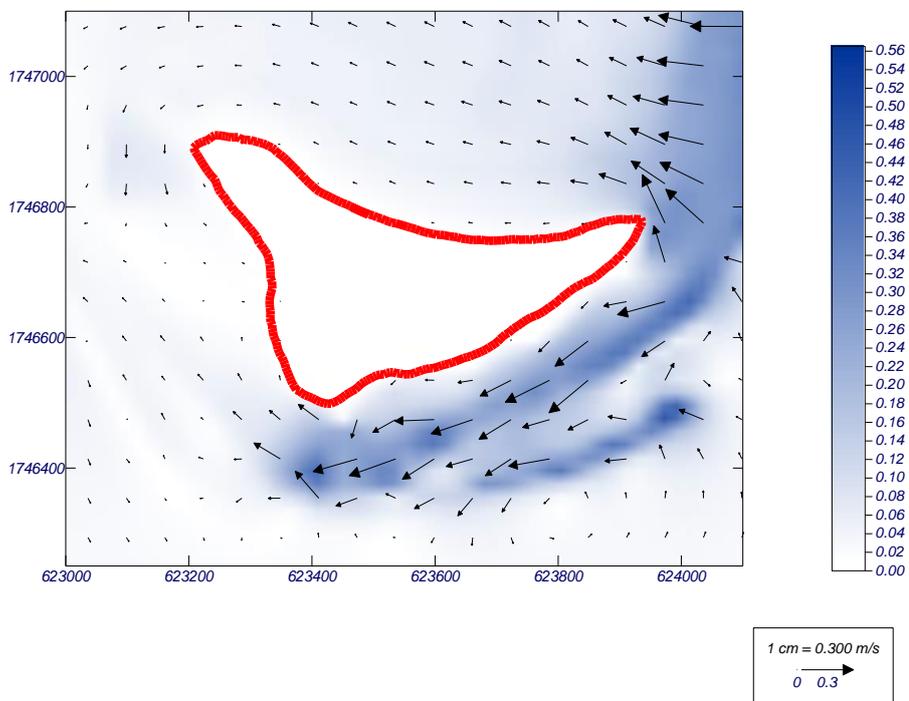
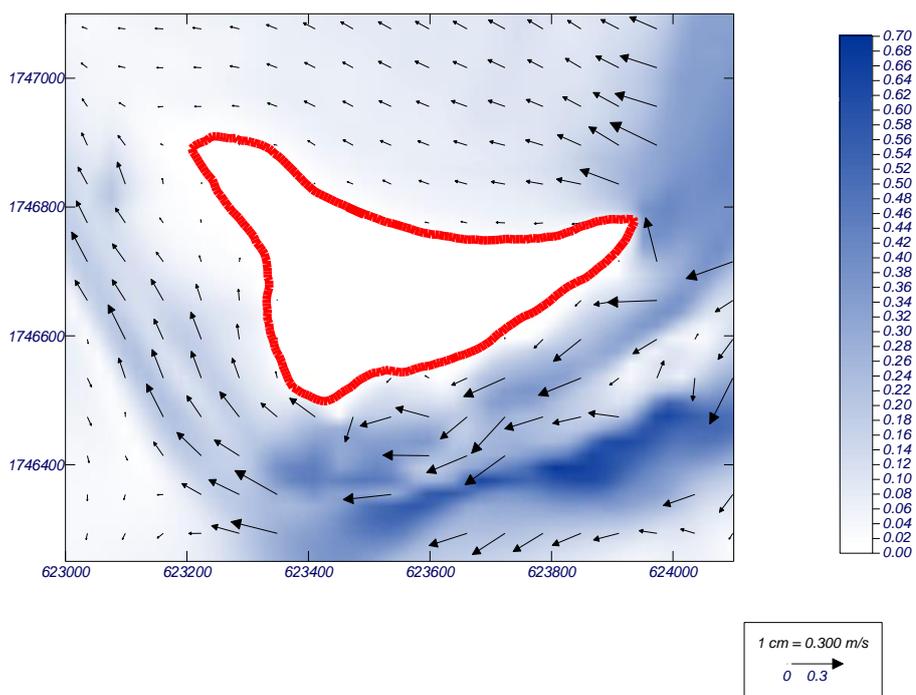
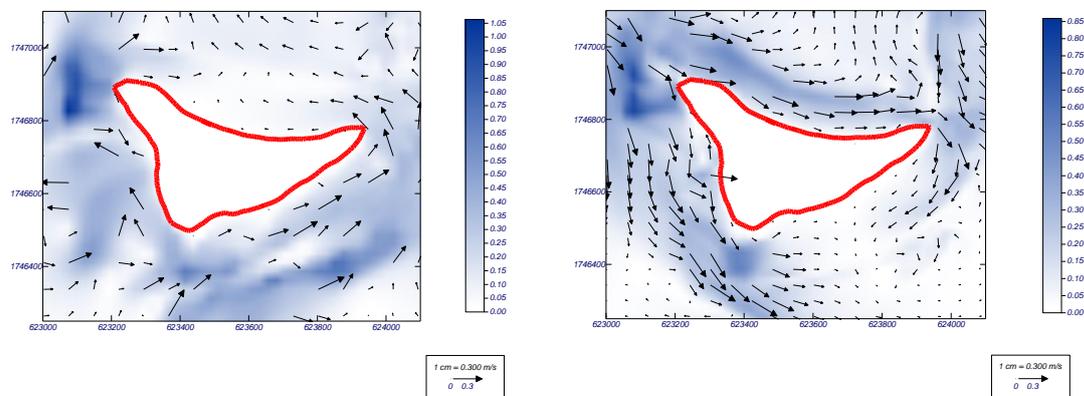


Figura 5.4. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Serranilla producidas por el régimen extremal del oleaje (Hs12).



Con el objeto de estudiar los efectos a corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento Categoría III en la escala Saffir-Simpson y cuyos resultados se encuentran en la figura.... Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que las corrientes se inviertan a lo largo de la rompiente hacia el Este. En la punta sur se divide y produce corrientes de alrededor de medio metro por segundo cerca de la punta oeste del Cayo. Cuando el oleaje producido por un huracán viene del Norte (Figura... ) las corrientes son muy intensas en el interior de la laguna arrecifal y se invierte todo el sistema de corrientes medias. Para esta condición el Cayo no tiene protección natural quedando muy expuesto a perder grandes extensiones de arena de sus playas en el norte.

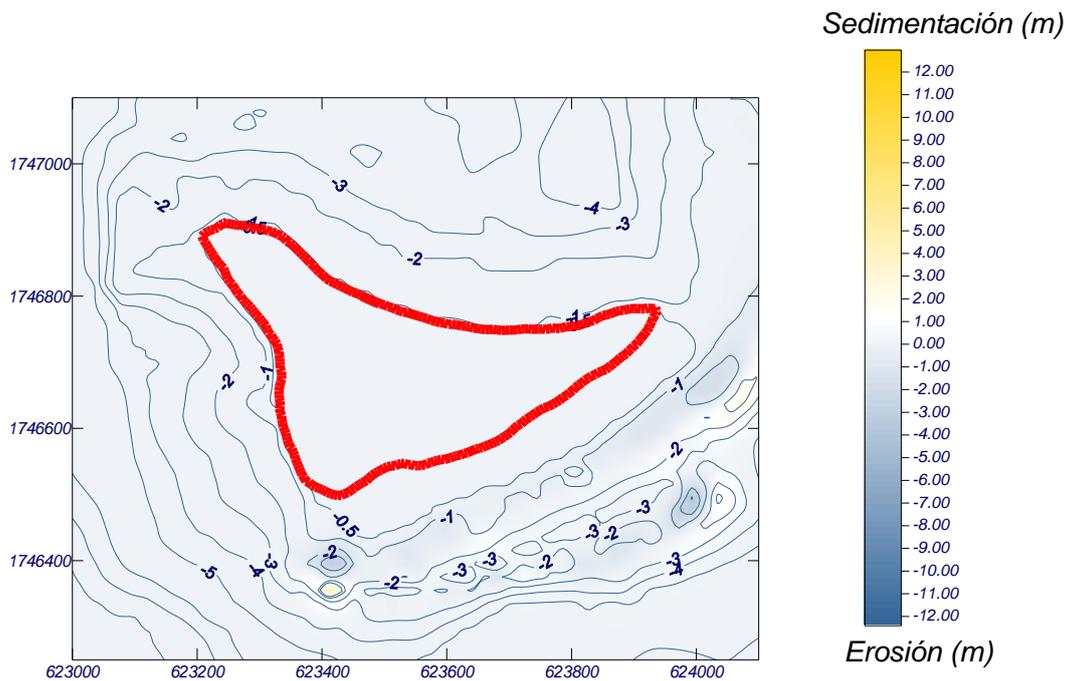
Figura 5.4. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).



## 5.5 BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN.

El análisis de erosión y sedimentación producto de las variaciones de las corrientes de deriva litoral, producidas por las roturas del oleaje se muestra en las figuras 5.5.1 y 5.5.2. El diagrama muestra que las condiciones de oleaje alrededor del Cayo son tales que, en la media, la condición generalizada en todas las playas es hacia la erosión. Al entender que el retroceso en el Cayo no ha hecho cambiar el área de este en las últimas décadas de manera sustancial, se atribuye entonces esta tendencia al aumento del oleaje ya sea porque la barrera arrecifal esta más profunda, al cambio de dirección del mismo, a la disminución de la cantidad de arena que llega.

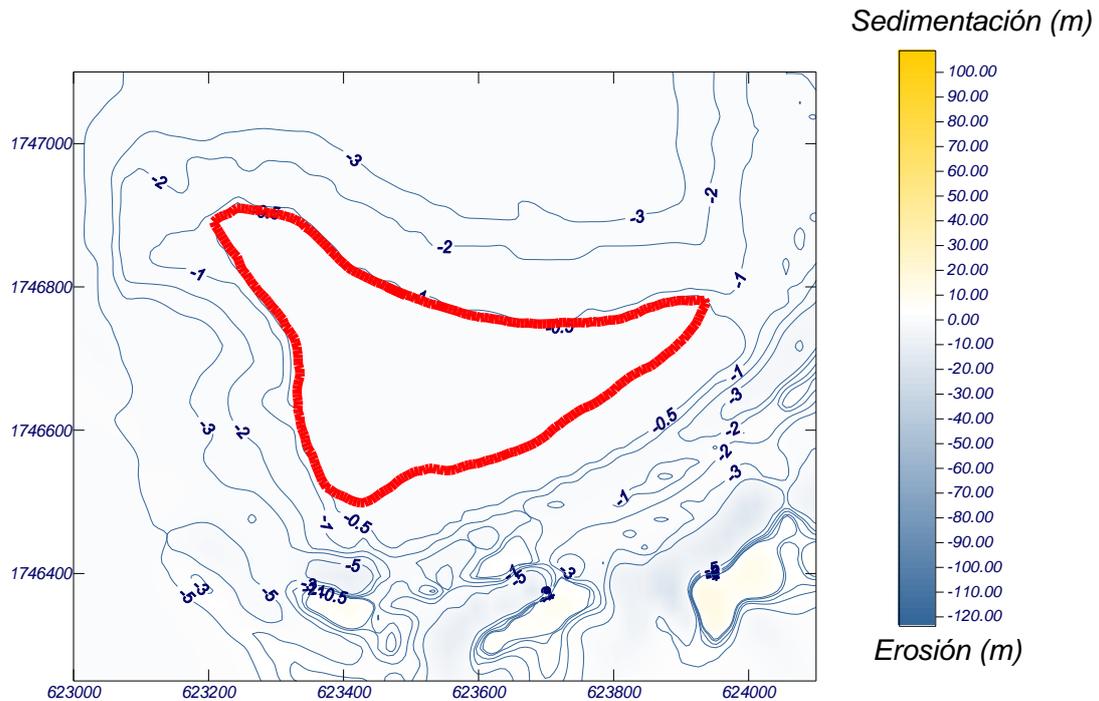
Figura 5.5. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual.



La simulación del balance de erosión/sedimentación debido a las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 5.5.2, en ella se observa un

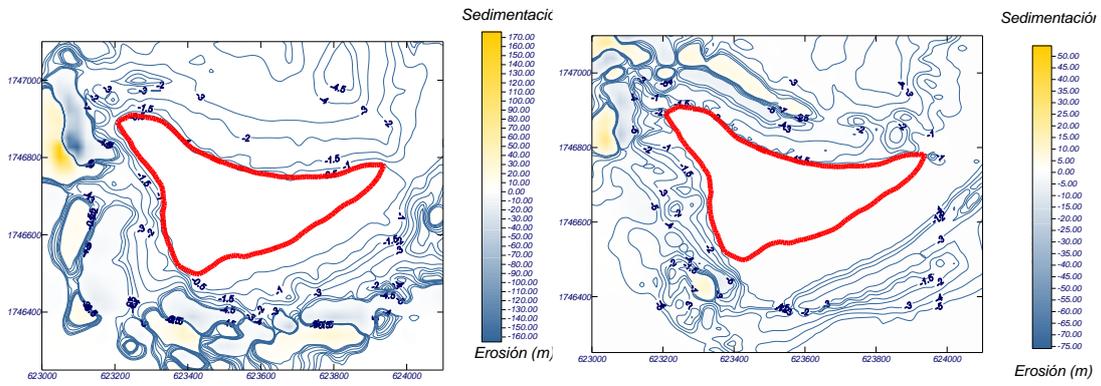
comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero el efecto es más acentuado.

Figura 5.5.2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento Categoría III en la escala Saffir.Simpson y cuyos resultados se encuentran en la figura 6.1.5.3. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que la erosión sea mayor en ese costado del Cayo pero el norte esta protegido mientras que cuando el oleaje viene del norte, el proceso erosivo de la playa del norte es tal que produce la perdida de varios metros de playa.

Figura 5.5. 3 Resultado de la simulación de la variación de la topografía en el Cayo Serranilla en caso de un huracán que produce oleaje que viene del norte (izquierda) y del suroeste (derecha).



## 6. CARACTERIZACION MORFOLOGICA DEL CAYO SERRANA

Imagen 6. 1 Fotografía aérea Cayo Serrana y fotografía aérea del arrecife periférico al Este



Imágenes tomadas 16 de Agosto de 2009.

El Banco Serrana (14° 23'N, 80° 14'W) está localizado a 143 Km al noreste de Providencia y 70 Km al Este del Banco Quitasueño, tiene forma triangular-ameboide, originado a partir de un atolón anular, el cual fue disectado parcialmente a sotavento por un nivel marino más bajo que el actual. Mide aproximadamente 15,5 kilómetros en dirección SW-NE y 33,4 kilómetros en sentido W-N, hasta la isobata de 30 metros. Banco Serrana hace memoria a Pedro Serrana, único sobreviviente de un galeón español que naufragó allí hacía 1520, y permanecido por espacio de siete años en el Cayo antes de ser rescatado por un navío inglés (Parsons, 1964).

El Cayo Serrana, ubicado en (14° 16'N, 80° 23' W) es el único de los siete porciones de tierra emergidas en el Banco que presenta vegetación arbustiva y dimensiones considerables (más de un kilómetro de largo y medio de ancho). Está formado por dunas de arena que alcanzan alturas importantes a ser determinadas en este estudio. El Cayo Serrana tiene un faro y un puesto de infantería de marina (figura 6.1)

Figura 6. 1 Banco Serrana: a) Imagen satelital (Oceandots, 2002) b) Fragmento de la carta náutica COL 045 (CIOH, 2000). Abajo, Fotografía aérea de los corales de Banco Serrana antes de la rompiente.

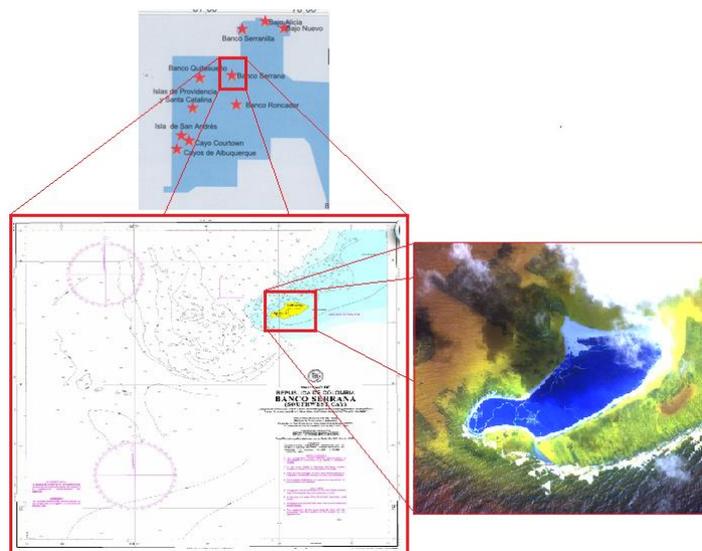


Los otros Cayos presentes en el Banco son pequeños, Cayo Norte, cerca del extremo NW del arrecife periférico, está formado principalmente por escombros coralinos sobre los que crece una vegetación rastrera poco densa y un sitio de

anidamiento de pájaros bobos (*Sula spp*) y fragatas (*Fregata magnificens*) que han permanecido desde la época de la explotación del guano en todo el Cayo.

Bond y De Schuensee (1944) reportaron ocho especies de aves en Cayo Serrana. En la fecha en que la expedición de Milliman llegó al Cayo (Milliman, 1969) estimaron unos cien mil especímenes de pájaros bobos se encontraban anidando en el Cayo. Esto concuerda con el registro de Parsons (1956) quien reportó que los Jamaíquinos recogían manualmente unos 300.000 huevos de pájaro y también se entiende porque el guano se había acumulado en tantas cantidades que resultó suficientemente interesante para su extracción como fertilizante durante su reclamación por los Estados Unidos. Actualmente el Cayo se encuentra habitado por el personal de Infantería de Marina de Colombia de manera permanente. Se trata del Cayo más grande de los estudiados, tiene alrededor de un kilómetro y medio de largo por ochocientos metros de ancho, con vegetación arbustiva densa especialmente del genero *Euphorbia* y *Tournefortia*, apenas penetrado por senderos en el centro y sobre las dunas costeras principalmente (Figura 5.2.2).

Figura 6.1. 1 Localización espacial, carta náutica e imagen satelital del Cayo Serrana en el Caribe colombiano. La posición del Cayo en la Carta Náutica COL 213 e imagen de satélite de 2008 utilizada para la interpretación.

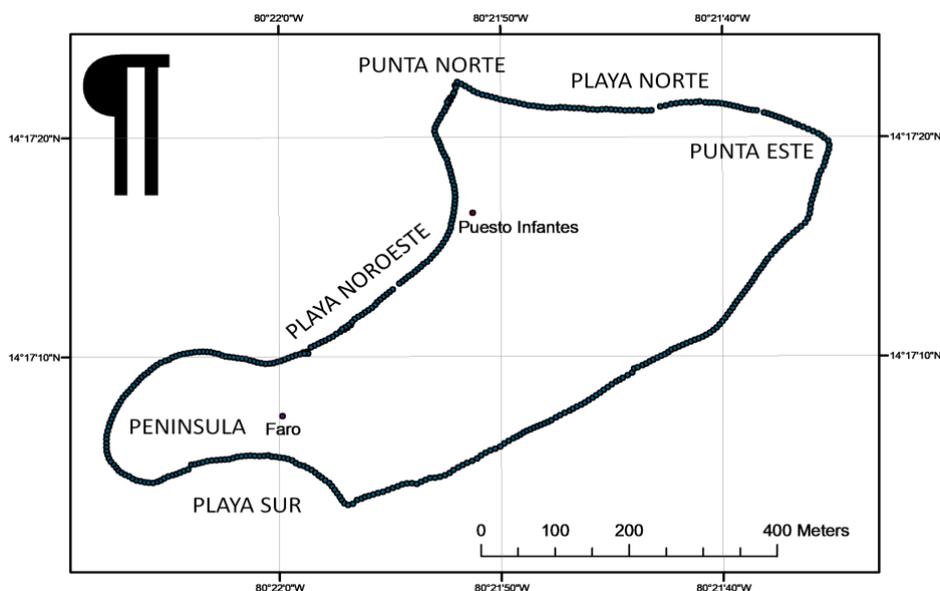


## 6.1 MORFOLOGIA PLANTA Y PERFIL

La línea de costa del Cayo Serrana tiene forma ovalada, orientada en sentido NE-SW. Hacia el margen sureste se encuentra enfrentado a la zona de rompientes del Banco, dejando un espacio de varias decenas de metros, que lo hace diferente a Serranilla, cuyo costado sureste hace prácticamente parte de la rompiente. Por esa razón Serrana consiste en una plataforma rocosa que sostiene zonas de playa de arena de grano fino y mixto en todos los frentes, cuyo perímetro fue recorrido con GPS diferencial (figura 6.1.2) encerrando un área aproximada de 271,121.69 m<sup>2</sup>

Es notable que la Expedición de John Milliman en 1968 haya medido la extensión de la isla en 500m de largo por 200m de ancho (Milliman, 1969) y hoy la longitud del cayo es de más de un kilómetro. Sus medidas de los otros cayos corresponden muy bien por lo que al no ser aparentemente una equivocación, el Cayo Serrana ha venido creciendo a un paso acelerado.

Figura 6.1. 2 Línea de costa del Cayo Serrana medida en Agosto de 2009 con GPS diferencial.



Serrana como Serranilla posee una península alta en su extremo oeste la cual remata la rompiente del Banco arrecifal conformando una playa cóncava es la parte sur, una playa corta y redondeada por el oleaje que se refracta hacia el noroeste. La parte noreste de la península apoya la playa del noroeste del Cayo, la cual se encuentra enfrentando un foco de difracción en la punta norte. El puesto de Infantería de Marina se encuentra al frente de esta playa, la cual se encontró muy erosionada por un evento reciente, que según los Infantes ocurrió un mes antes cuando hubo oleaje del norte, que empezaba a comprometer la infraestructura en ese litoral (figura 6.1.3) reflejado en la pérdida de arena y caída de palmeras.

Figura 6.1. 3 Mosaico de fotografías de la playa noroeste que muestra la infraestructura habitacional y la línea de costa afectada por la erosión en el momento de la visita.



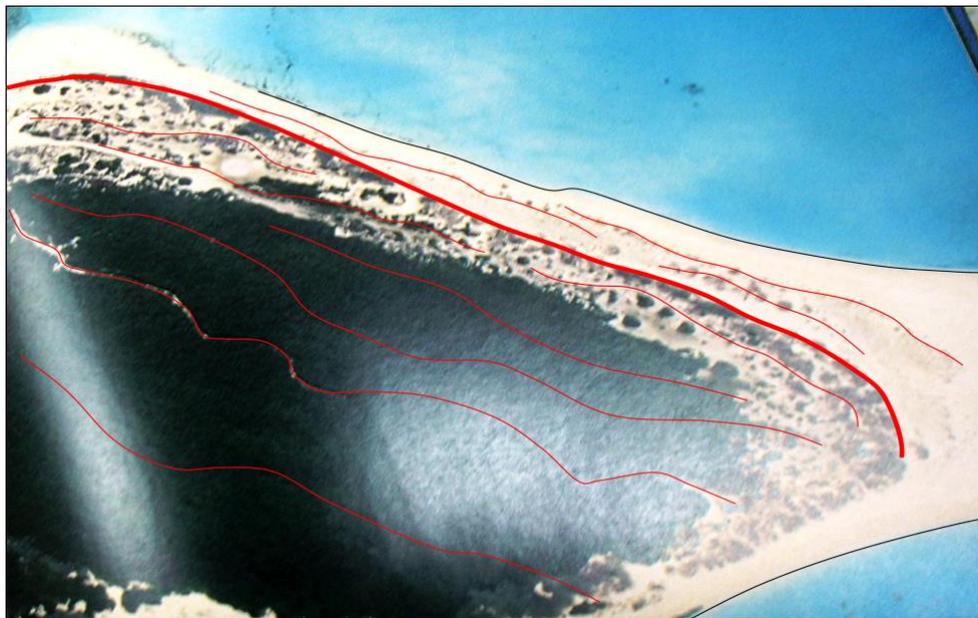
Imagen 6.1. 1 Fotografías de la zona noroeste del cayo, se observa la acción del oleaje causando erosión



Imágenes tomadas 16 de Agosto de 2009.

Serrana es el Cayo que presentó mayores alturas de las formaciones visitadas. En la topografía hecha sobre los caminos de la isla y sobre las dunas, se encontraron alturas de hasta 4m. Las dunas del oeste se encuentran totalmente ocupadas por vegetación muy tupida y solo puede ser recorrida por los senderos que comunican los distintos puntos del Cayo. Hacia el costado oriental se hace evidente que el Cayo Serrana ha venido creciendo mediante la acumulación de arena en dunas que han venido siendo ocupada por vegetación que las ha venido fijando (Figura 5.2.5).

Figura 6.1. 4 Vista aérea del Cayo Serrana señalando las huellas de las distintas dunas en su crecimiento hacia el noreste.



En agosto de 2009 Serrana presenta una duna costera casi recta que enfrenta la playa de ese sector y que empieza a ser ocupada por *Teunefortia*. A su espalda se encuentra todo un complejo de viejas dunas, huella del crecimiento del Cayo en ese sentido (Imagen 5.2.6).

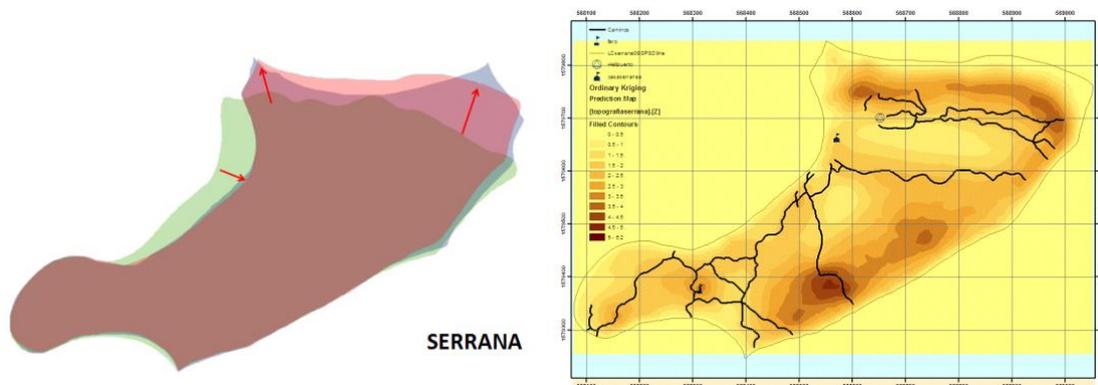
Imagen 6.1. 2 Fotografías de la duna más reciente en el costado noreste de Cayo Serrana vista desde el aire desde la playa y por detrás en agosto de 2009.



Imágenes tomadas 16 de Agosto de 2009.

Una comparación de las líneas de costa de 1984, 2007 y la medida en agosto de 2009 permite mostrar como el Cayo ha venido cambiando con el tiempo. En 1985 la playa noroeste era significativamente más amplia, con respecto a las medidas en los siguientes años (figura 6.1.5). La superposición muestra que el Cayo ha venido creciendo hacia el norte, atrapando arena mediante la creación de dunas que se van fijando con la vegetación. Las arenas suben por el perfil del norte de manera sistemática en este momento, asunto que será tratado en el ultimo capítulo. La metodología para la superposición se encuentra en el anexo “...”.

Figura 6.1. 5 A la izquierda, la superposición de distintas líneas de costa del 2004 (verde), 2007 (azul) y 2009 (roja) de Cayo Serrana. A la derecha, la topografía del Cayo levantada en agosto de 2009.



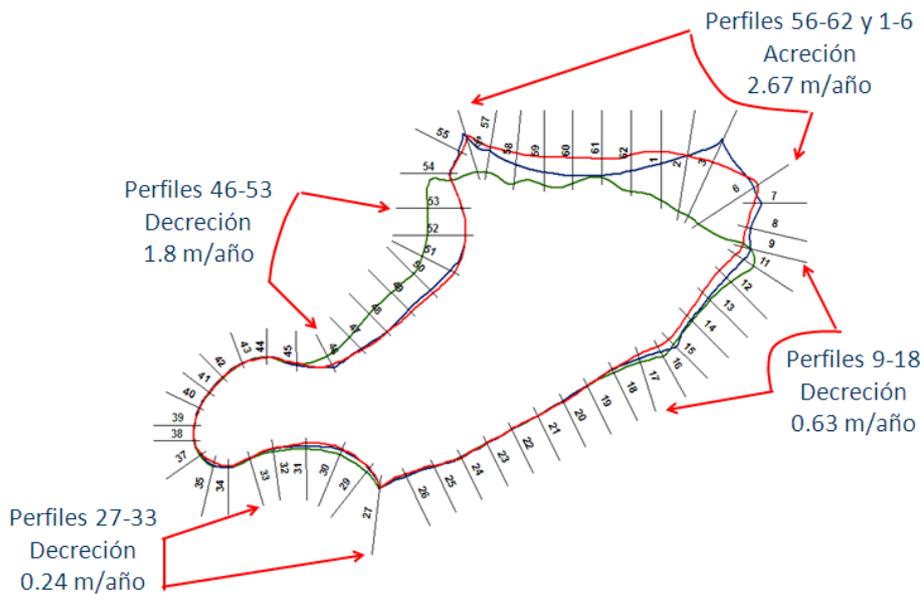
Fuente. Díaz, A., 2010

Cayo Serrana posee las mayores alturas de todos los Cayos que hacen parte del Archipiélago de San Andrés y Providencia. Se encontraron alturas sobre el nivel medio del mar ligeramente menores a 6m.. Algunos autores manifiestan que es el único Cayo con dunas costeras (e.g. Díaz et, al 1996) pero el relieve del Este de Cayo Serranilla pareciera ser dunas fijas de hace tiempo; con alturas hasta 10m (CORALINA, 2003) pero seguramente esta observación incluye la altura de la vegetación; y otros que poseen más (INVEMAR, 2003) . No obstante (Cano y Valderrama, 1996) hablan de valores entre 1 - 6 metros de altura en los Cayos, que se ajustan mucho más a los resultados del presente trabajo en este sentido. La metodología para el levantamiento topográfico y la interpretación de los sensores remotos se encuentra en el anexo “??..”.

Durante el desarrollo del estudio se efectuaron automáticamente un total de 62 perfiles de acreción y erosión alrededor del Cayo, con una distancia media de 50 metros entre cada uno, en la extensión del software de ArcGIS 9.2 (Figura 5.2.8), conocida como DSAS por sus siglas en ingles (Digital Shorelines Analisis System) [7], La cual claramente muestra las zonas más vulnerables a

la erosión con valores promedio, así como también el acrecimiento en la playa Norte y la costa poco variable en el Cayo.

Figura 6.1. 6 Perfiles de acreción y decreción. La línea de color verde corresponde a la línea de costa del año 1984, la de color azul al año 2007 y la de rojo a la obtenida del año 2009.

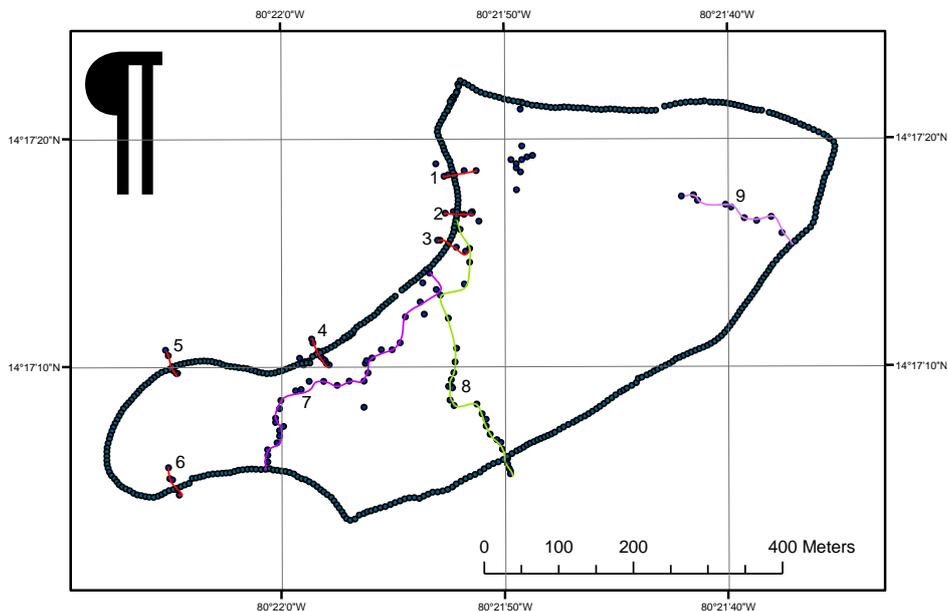


Fuente. Díaz, A., 2010

## 6.2 PERFILES TOPOGRAFICOS Y DE PLAYA

Con el propósito de examinar las alturas de las dunas y de las bermas de todos los cayos se efectuaron medidas de altura con referencia al nivel del mar, con las miras niveladas usando los caminos entre la isla y sobre perfiles perpendiculares a la línea de costa en puntos representativos alrededor del Cayo. Los perfiles están divididos en dos grupos de los cuales el primero está representado en la siguiente figura junto con los perfiles topográficos realizados entre el Cayo.

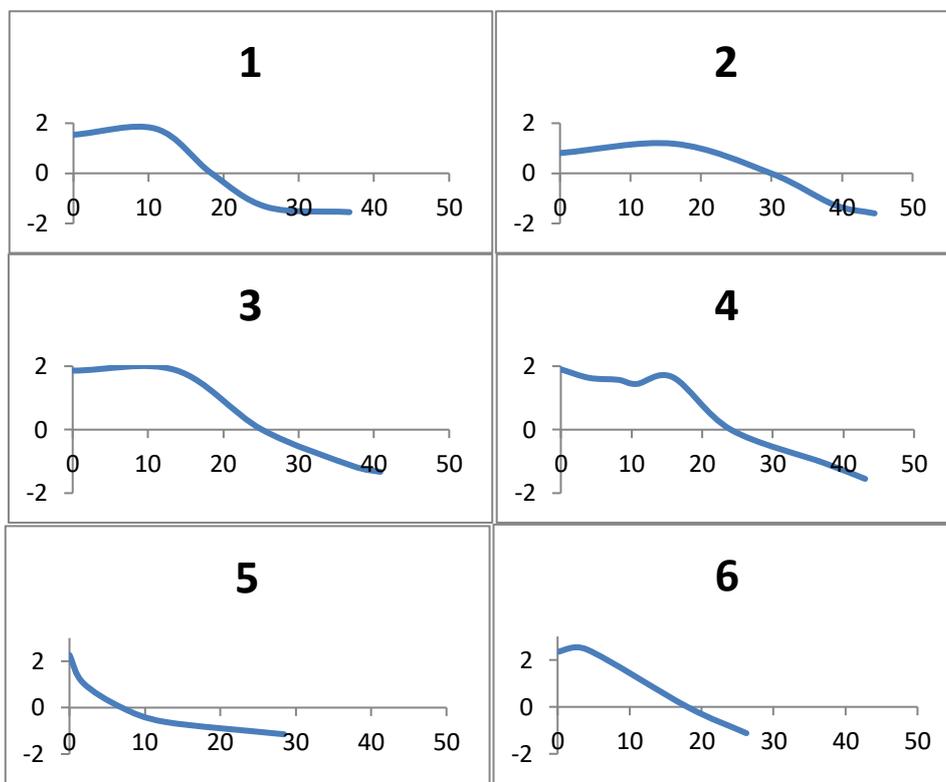
Figura 6.1. 7 Perfiles de playa y de topografía levantados en Cayo Serrana.



Se presentan los resultados del trabajo de campo hasta la profundidad a la que el estado del mar permitió entrar caminando. La figura 6.1.7 expone una sección de los perfiles de playa y topográficos que se levantaron en Cayo Serrana, los perfiles se encuentran en la figura 6.1.8.

Los perfiles 1-4 medidos en esta sección corresponden a la playa noroeste donde se asienta el puesto de Infantería de Marina corresponden todos a una berma relativamente alta ligeramente menor de 2m que se encontró con una pendiente muy alta, que se sumerge a casi 2m de profundidad en menos de 20m desde la orilla, (pendiente 1/10) Estas pendientes contrastan con los perfiles tomados en las playas de la península al norte (5) y al sur (6) que son muy cortos descendiendo 2 m de altura en solo 7 m de distancia. La diferencia existe en que al norte la pendiente dentro del agua es muy suave y el fondo es muy duro, compuesto por caracolejo mientras que al sur la playa alcanza los 2m de profundidad en los primeros 7m de distancia siendo de arena y casi siempre recibiendo oleaje importante.

Figura 6.1. 8 Primera sección de perfiles batimétricos y topográficos.



Los perfiles topográficos que se pudieron realizar entre el Cayo sobre los caminos permitieron tener una visión longitudinal (perfil 7) una transversal (perfiles 8 y 9) al lo largo de distancias de unos cientos de metros. El perfil 7 empieza en la playa sur con una muy alta pendiente de la berma mayor de 2m y alcanza alturas de casi 4m en la península donde se encuentra el faro. Esta elevación tiene unos 150m de extensión y el Cayo es plano en el sector noroeste hasta la parte meridional del cayo donde se empiezan a advertir las dunas y el perfil remata de manera muy abrupta en la playa noroeste donde se advierte una erosión importante.

El perfil topográfico 8 es casi N-S muestra la berma alta y un descenso paulatino hacia el centro del Cayo luego del cual se sube a una elevación de casi 6m de altura en el costado sureste, la cual baja de manera muy rápida directamente a la playa que se encuentra en ese costado. EL perfil 9 muestra

que la morfología en el sector mas oriental es semejante, siendo la duna menos elevada pero hay que tener en cuenta que la medición fue realizada sobre los caminos determinados por los valles entre dunas y no sobre las crestas de ellas. La imagen en la figura 6.1.9.

Figura 6.1. 9 Perfiles de topografía extraídos en Cayo Serrana (ver orientación en la figura 6.1.7).

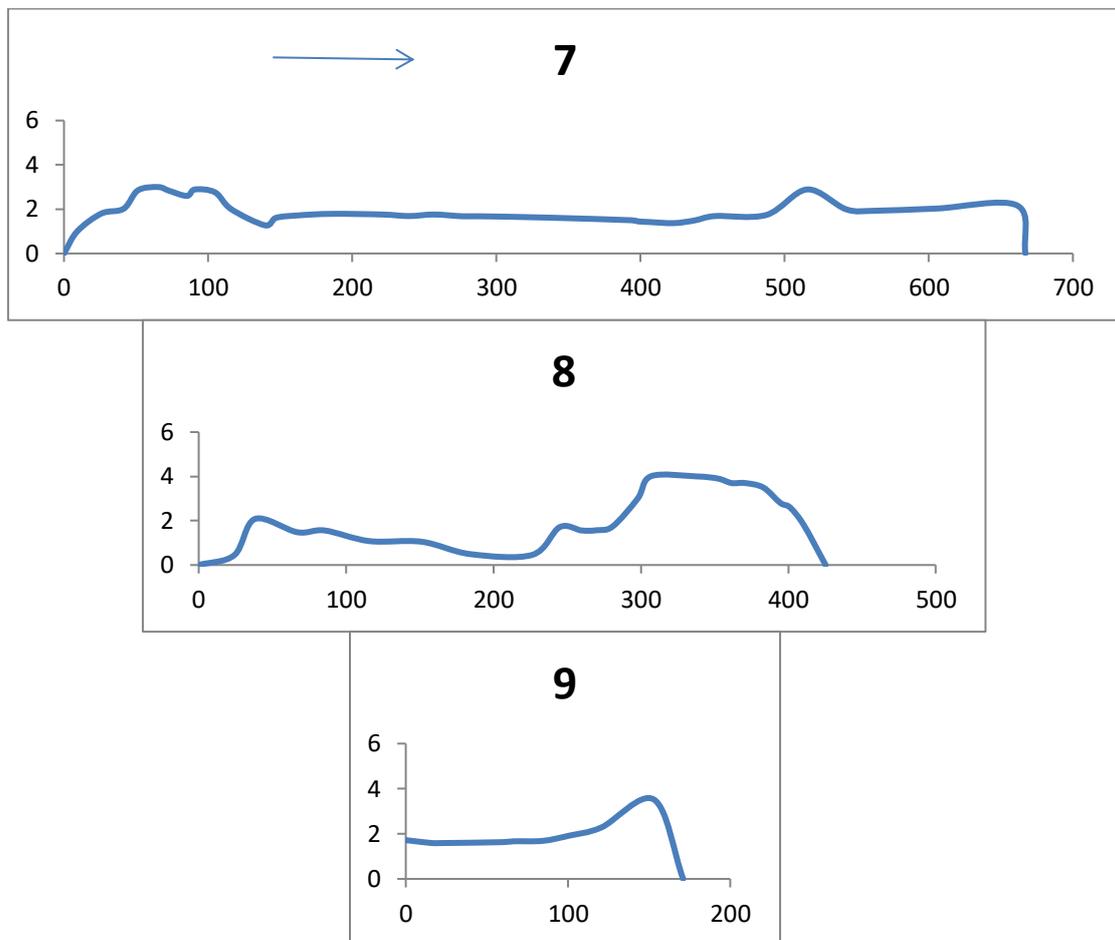
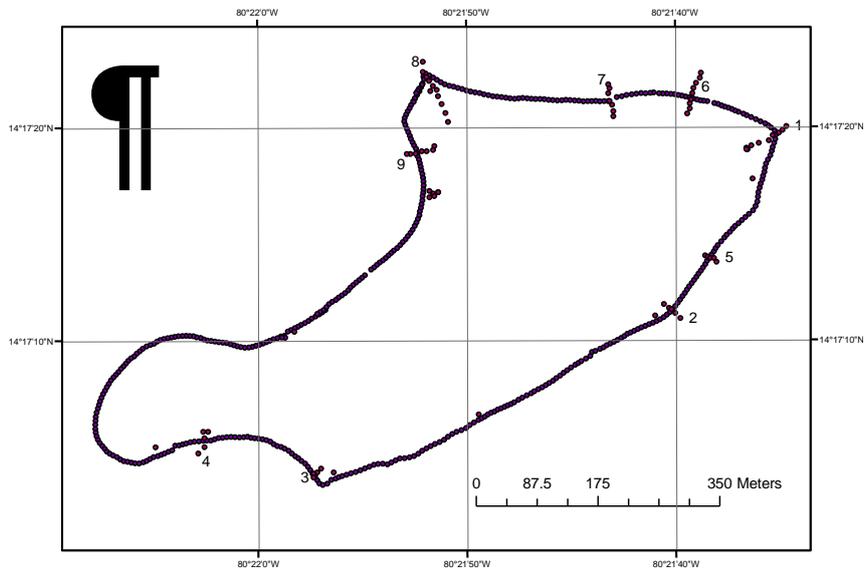


Figura 6.1. 10 La ruta del perfil 9 vista hacia el oeste (en sentido opuesto a la presentación de la figura anterior), muestra la orientación de las dunas con respecto de la dirección de la observación



El segundo grupo de levantamiento evaluó las playas del norte y el este mediante los perfiles de playa que aparecen en la figura 5.2.13.

Figura 6.1.11 La posición de los perfiles de playa del sector norte y este.

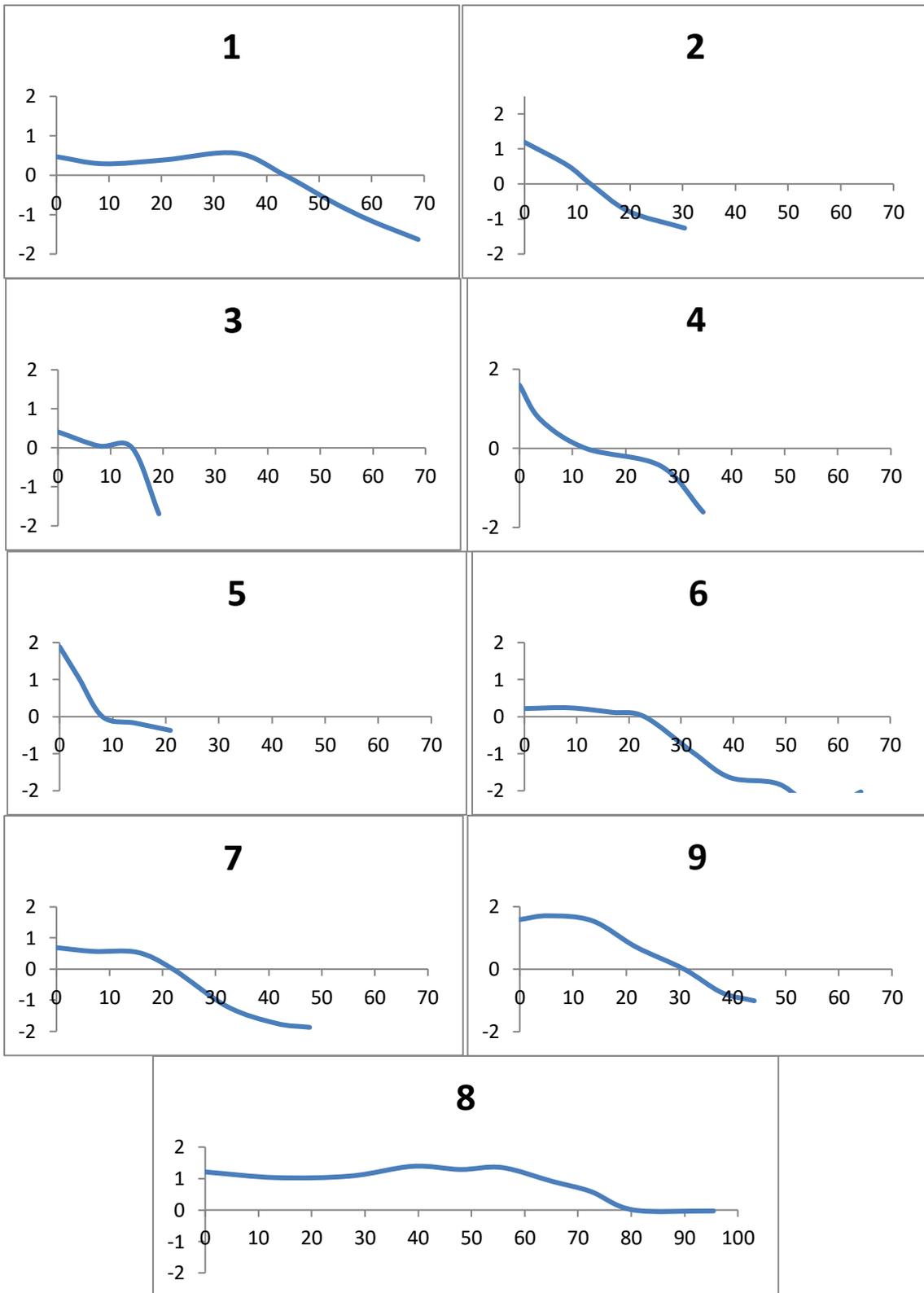


El perfil 1 de este grupo corresponde a la punta Este del Cayo. La playa en ese sector tiene 45m de ancho con una berma de casi un metro y un perfil

submarino suave que alcanzaba 1.5m a los 25m de la playa. .El perfil 2 y el perfil 5 son representativos de la playa sureste, las cuales tienen bermas muy altas debido a que son formados por oleajes de tormenta que las ha subido a casi dos metros de altura, el perfil es más suave dentro del agua alcanzando 1.5m en 18m de distancia.

El perfil 3 se hizo en la punta donde termina la rompiente del banco y empieza la playa. Como es de esperar tiene un perfil muy agudo con playa corta. El perfil 4 es similar al perfil 6 del otro grupo de levantamiento y tiene las mismas características de una berma relativamente alta y mucha pendiente. Los perfiles 6 y 7 muestran la pendiente de la playa Norte la cual es la más suave de todas las medidas con bermas muy pequeñas y mucha extensión. El perfil 8 se hizo sobre la playa que conforma la punta norte del Cayo Serrana. En este se puede observar una playa de alrededor de 70 m muy plana y de un metro de altura, que cae suavemente por una distancia de 20m más en una zona plana prácticamente en la interface. El perfil 9 de este grupo corresponde al mismo del perfil 1 del anterior grupo y se hizo con fines de calibración.

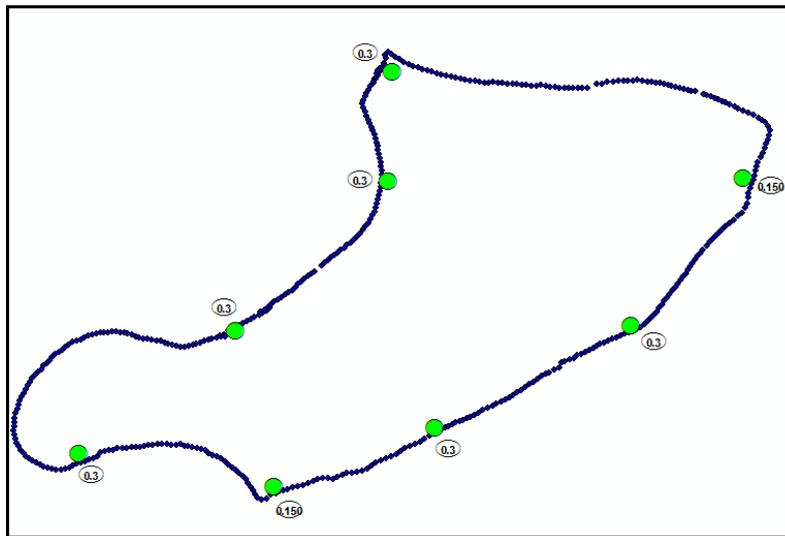
Figura 6.1.12 Complemento de perfiles de playa, extraídos en Cayo Serrana.



### 6.3 GRANULOMETRIA

La siguiente imagen y tabla, representan los puntos de muestreo y las características granulométricas de las muestras de arena tomadas de las playas de Cayo Serrana en agosto de 2009. A dichas muestras se les efectuó análisis granulométrico para encontrar principalmente el parámetro D50 (figura 6.3.1), la media correspondiente para los cálculos de la oceanografía costera.

Figura 6.3. 1 Puntos de muestreo de arena en cayo Serrana



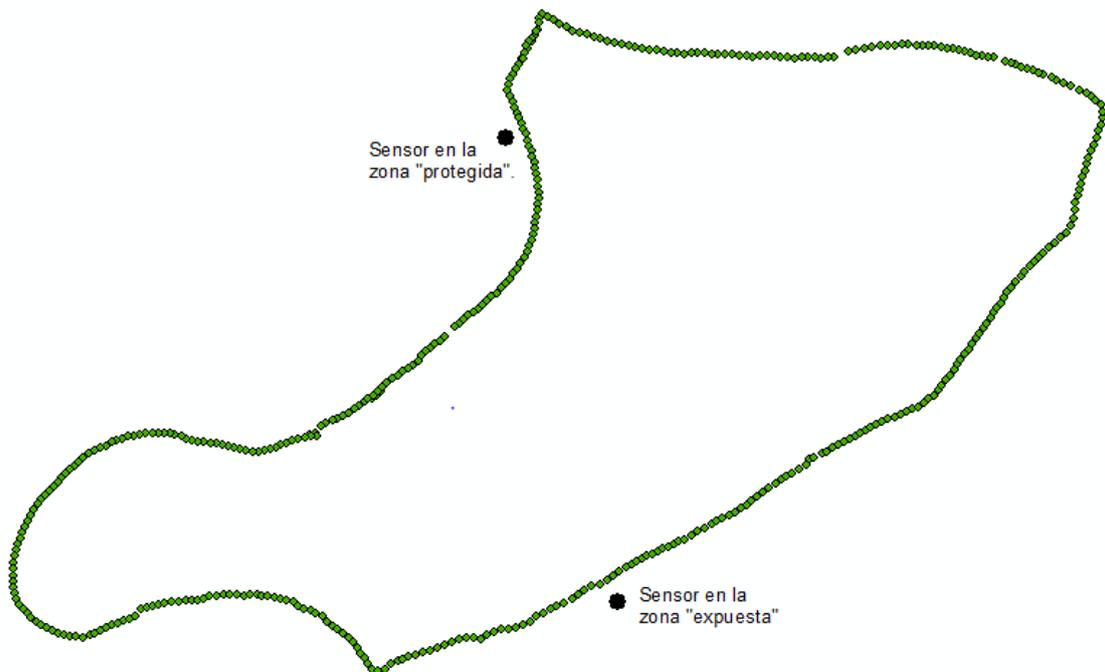
Coordenadas		Peso Original	Post Secado en horno	Post Secado al aire	Peso Final	Observaciones
14°17'283"	80°21'863"	50	47.2	47.13	46.6	Grano Fino
14°17'173"	80°21'971"	50	47.96	47.89	47	Grano Fino
14°17'083"	80°22'082"	50	47.36	47.32	47.31	Grano Fino
14°17'063"	80°21'940"	50	48.27	48.23	48.14	Grano Fino
14°17'108"	80°21'824"	50	49.04	49	48.53	Grano Fino
14°17'185"	80°21'683"	50	47.53	47.51	47.48	Grano Fino
14°17'292"	80°21'605"	50	45.89	45.86	45.84	Grano Fino
14°17'361"	80°21'682"	50	49	48.98	48.93	Grano Fino

Tabla 6.3. 1 Las características de las muestras de arena de las playas de Cayo Serrana.

## 6.4 MEDICION DEL OLAJE EN CAYO SERRANA

Para la determinación del oleaje que llega al Cayo se dispusieron dos medidores de nivel sumergibles en los costados noroeste y sureste del Cayo (Figura 6.4.1), que midieron el nivel del mar cada segundo y cuyo resultado se muestra en las figuras 6.4.2 y 6.4.3.

Figura 6.4. 1 Posición de los sensores de nivel en cayo Serrana



En la figura 6.4.2 se puede apreciar los espectros de oleaje extraídos de los datos de los sensores, se observan cuatro picos característicos de mayores frecuencias de energía, distribuidos en diferentes bandas de frecuencia del espectro. El primero de estos constituye un pico con un rango de frecuencias más altas que los otros tres; este pico se ubica en la banda de ondas de gravedad, en el cual se evidencia un tipo de ondas generadas por el viento

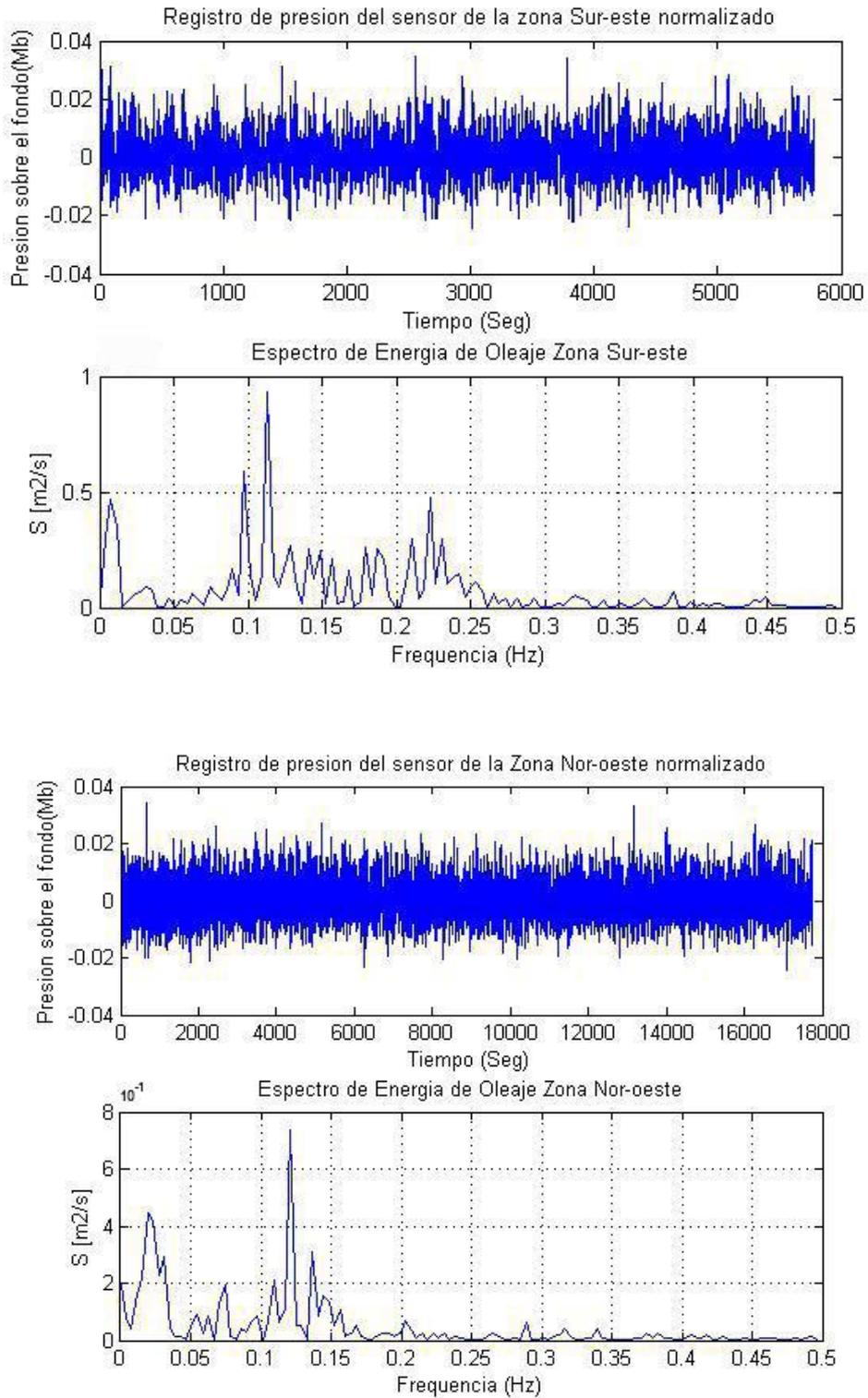
predominante del Este-noreste, con un periodo de pico de 4.49 segundos. El segundo pico y el más energético, se asocia también a la banda de las ondas de gravedad y corresponde específicamente al tipo de onda corta que representa el oleaje característico de la zona en condiciones normales, con un periodo de 8.82 segundos

El tercer pico corresponde en orden, al segundo más energético, y al igual que los otros dos, se ubica también en la banda de frecuencias asociadas a las ondas de gravedad con un periodo de 10.23 segundos. Este pico puede obedecer al comportamiento de onda corta de oleaje característico, que presenta un desfase asociado a la difracción del tren de olas.

El cuarto pico significativo, corresponde al rango de frecuencia más bajo de este espectro y representa la banda de frecuencia asociado a ondas infragravitatorias con un periodo de 127.9 segundos. “El origen de esta oscilación es la modulación del oleaje de viento en paquetes de olas grandes y olas pequeñas producidas por la propagación del mismo en la plataforma continental. Esta modulación del tren de oleaje incidente, origina perturbaciones en el equilibrio de fuerzas dinámicas de la masa de agua, generándose variaciones en el nivel del mar que tienden a equilibrar el sistema. El espectro de oleaje correspondiente a los datos procesados por el segundo sensor de presión ubicado en la zona Nor-oeste del Cayo (Figura 5.2.16), muestra únicamente dos picos más significativos con respecto al primer espectro.

El primero y más energético pico de energía de oleaje, corresponde, al igual que el espectro anterior, a la onda corta de oleaje en la banda de las ondas de gravedad, con un periodo de 8.25 segundos. Se observa una gran similitud entre los picos más altos de la onda de gravedad en ambas zonas, conservando prácticamente, el mismo periodo; esto se podría explicar en términos de que la onda corta permanece estable, ya sea porque las condiciones de este tipo son estacionarias o, por el contrario, porque las series de tiempo son muy cortas y no permiten observar cambios en la estacionalidad de las mismas.

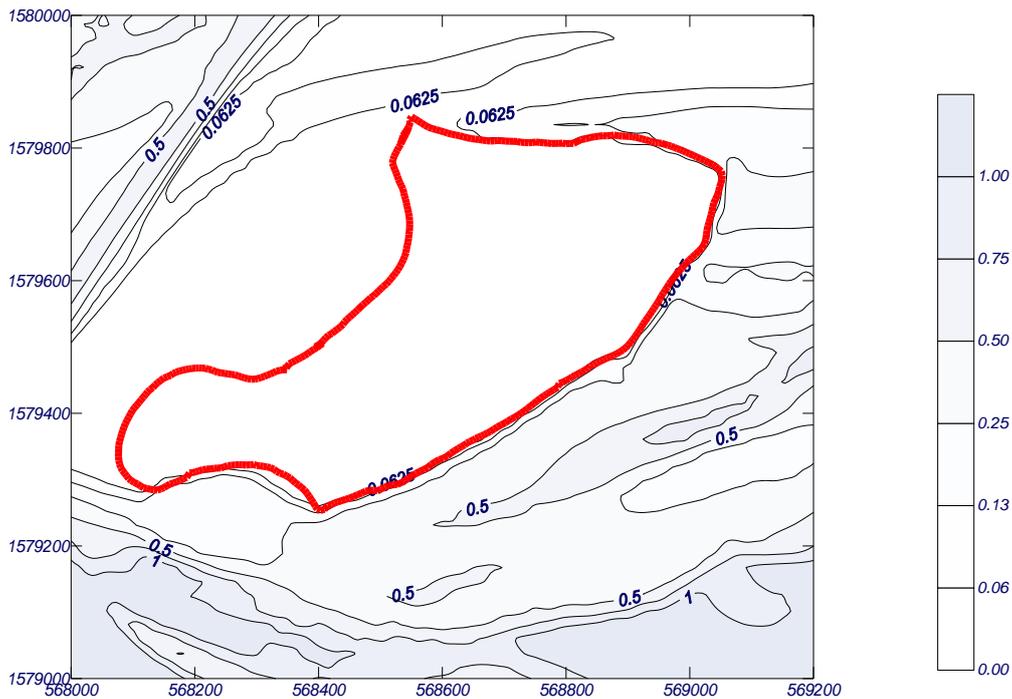
Figura 6.4. 2 Medidas de oleaje en el Cayo Serrana y su respectivo espectro al suroeste.



## 6.5 REGIMEN MEDIO DEL OLAJE

La base de datos empelada para la obtención del régimen medio del oleaje en el Cayo Serrana, se infirió a partir de los valores reportados de los parámetros del clima marítimo correspondientes con el retro-análisis descrito en el apartado de la metodología 3.3. Con base en esos datos se entregaron las condiciones de contorno a los modelos numéricos con el propósito de propagar el oleaje desde las aguas con profundidad indefinida hasta las playas de los Cayos. En el presente capítulo se presenta el resultado.

Figura 6.5.1 Altura de ola significativa ( $H_s$ ) en la propagación del oleaje monocromático en cayo Serrana para el régimen medio. ( $H_s = 1.85$ ,  $T_p = 6.05$ )



## 6.6 REGIMEN EXTREMAL

El Hs 12 hace referencia a la altura de ola significativa (Hs) que es excedida 12 horas al año. La propagación del oleaje con estos datos se presenta como una aproximación al clima extremal en el área (Figura 6.6.1).

En el caso de un huracán se quiso evaluar la condición en caso de un huracán categoría III, para lo cual se simularon condiciones extremas de oleaje viendo del norte y del sureste (figura 6.6.2).

Figura 6.6. 1 Altura de ola significativa (Hs). Régimen extremal, Cayo Serrana.

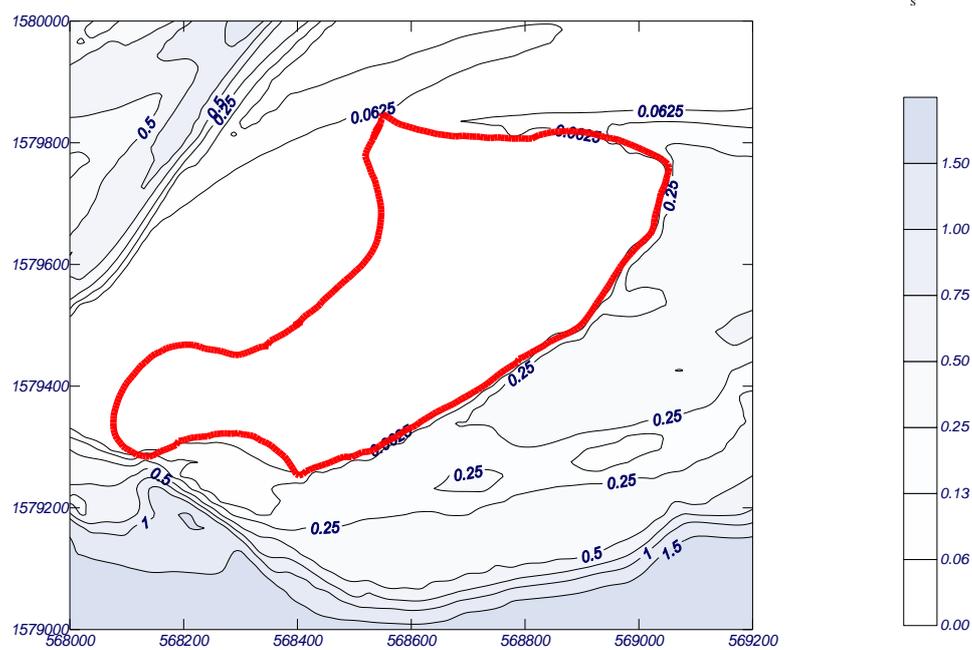
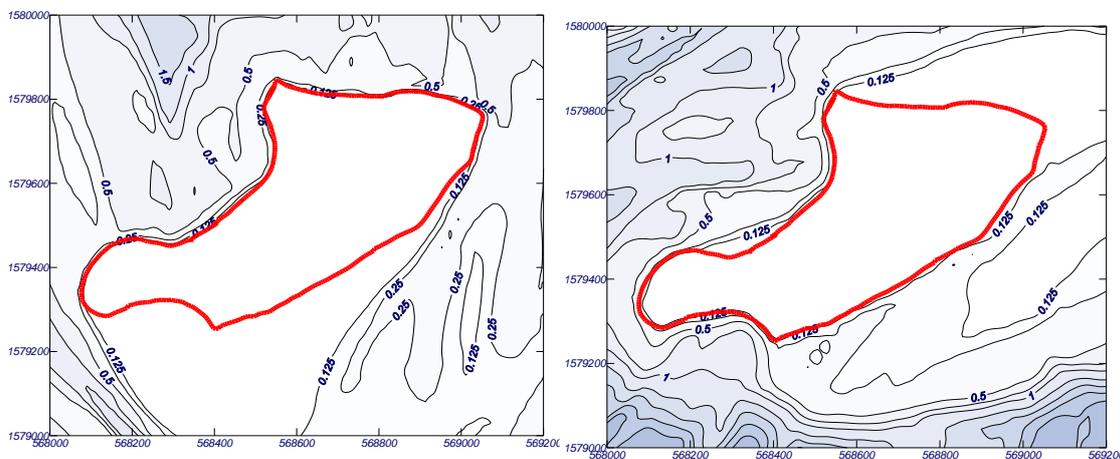


Figura 6.6. 2 El oleaje alrededor de Cayo Serrana en caso de un huracán que genera oleaje del norte (izquierda) y del sureste (derecha).



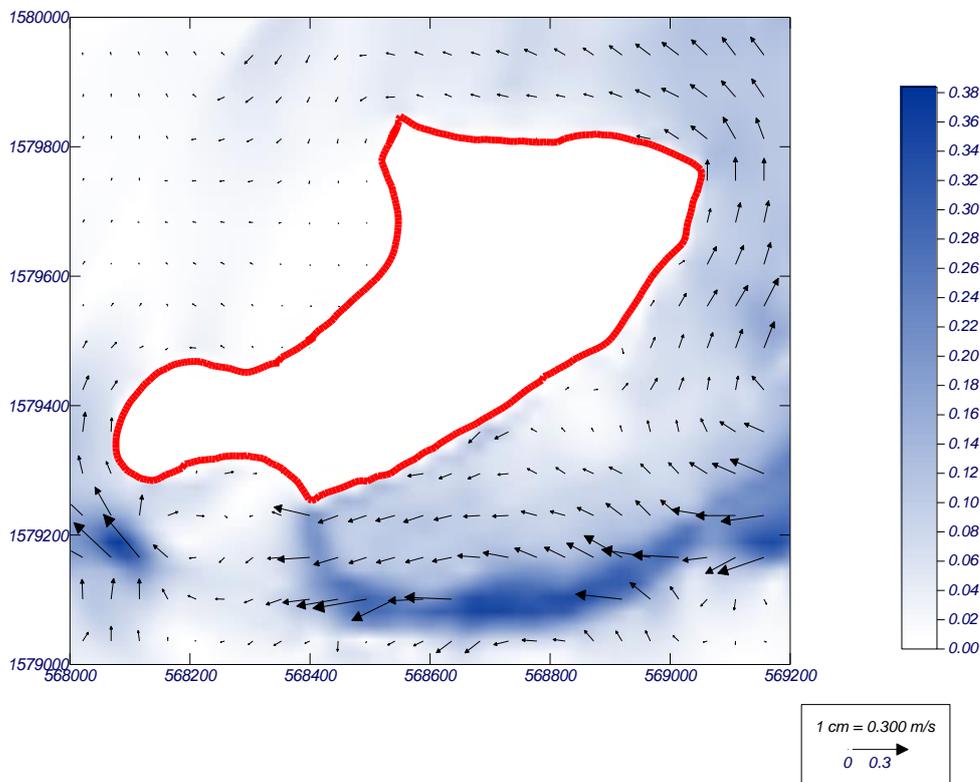
Las simulaciones muestran que el Cayo es muy vulnerable a un oleaje del norte, con olas llegando a la playa con alturas mayores de 1m, lo que producirá una erosión muy importante en esas playas. Si el huracán genera oleaje que llegue del suroeste la barrera arrecifal va a filtrar mucho del oleaje incidente, sin embargo el oleaje va a llegar muy alto a la península occidental y se refractará alcanzando a afectar la playa noroeste. La playa norte se protege de este tipo de oleaje extremo.

## 6.7 REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA

Las corrientes de rotura se obtuvieron mediante la utilización del modelo OLUCA en modo monocromático con el objeto de propagar el efecto de la rotura del oleaje característico de cada circunstancia modelada. La explicación del modelo se encuentra en el anexo "...". Las condiciones de cada modelación se encuentra en el anexo ".." Resultados modelación de corrientes costeras.

Las corrientes que se producen por la rotura del oleaje alrededor del Cayo Serranilla debido al régimen medio del oleaje se encuentran en la figura 6.7.1, En ella se observa una corriente hacia el oeste de ~30 cm/s a lo largo del costado sureste del Cayo producida por el oleaje incidente sobre la rompiente. También se hace evidente que la corriente se intensifica en la punta oriental del Cayo y que es mucho menor en los demás costados.

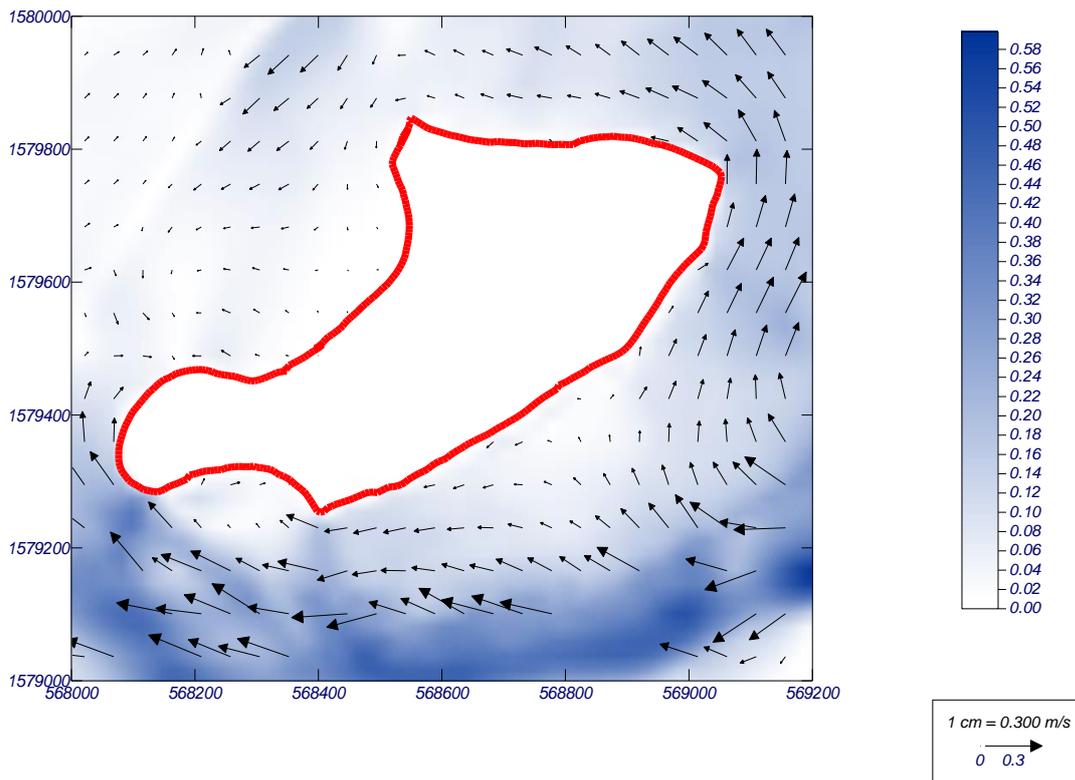
Figura 6.7. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Serrana. Periodo 5.3s, Hs=0.98m, dirección= N82E.



La simulación de las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 6.7.2, en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el

régimen medio pero las corrientes se intensifican al interior de la laguna y alrededor de la punta sur del Cayo con valores cercanos a 0.5 m/s.

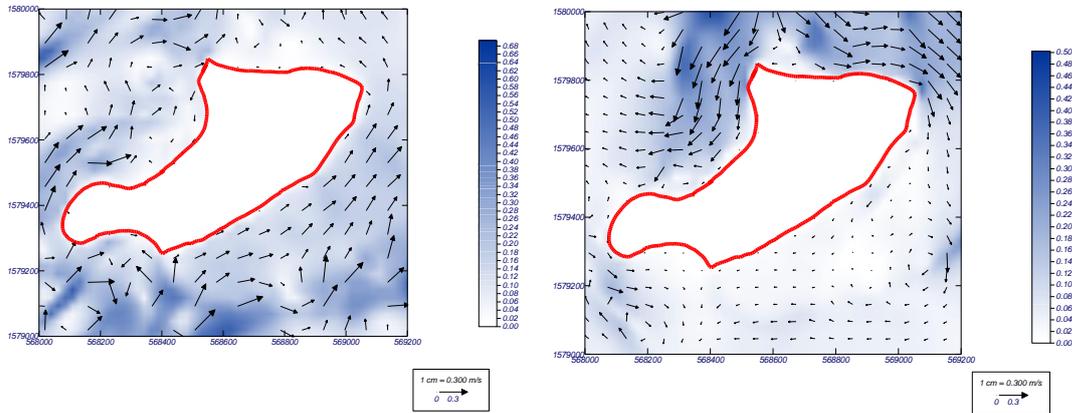
Figura 6.7. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Serrana producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12) las condiciones de la simulación se encuentran en el anexo "C".



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento categoría III, de esta naturaleza y cuyos resultados se encuentran en la figura 6.7.3. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que las corrientes se inviertan a lo largo de la rompiente hacia el Este. En la punta sur se divide y produce corrientes de alrededor de medio metro por segundo cerca de la punta oeste del Cayo. Cuando el oleaje producido por un huracán viene del Norte (Figura 6.7.3) las corrientes son muy intensas en el interior de la laguna arrecifal y se invierte todo el sistema de corrientes medias. Para esta condición el Cayo no tiene protección natural

quedando muy expuesto a perder grandes extensiones de arena de sus playas en el norte.

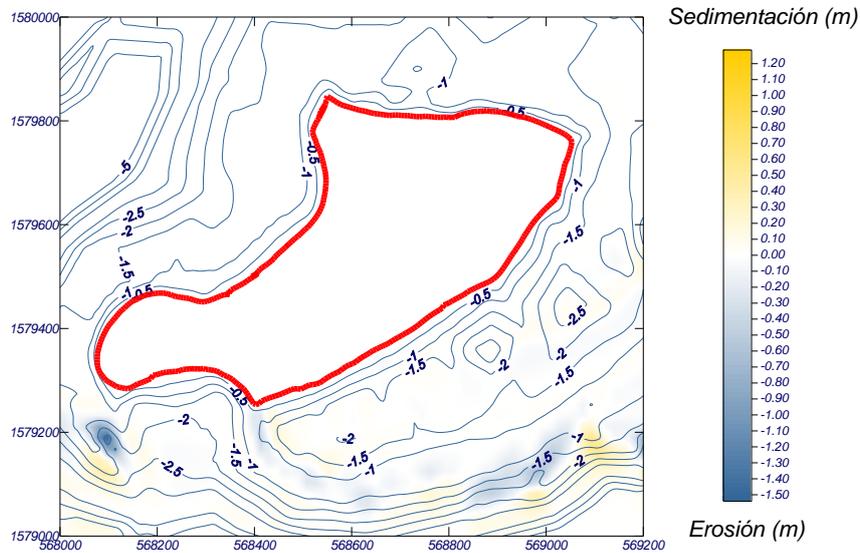
Figura 6.7. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha). Las condiciones de las simulaciones se encuentran en el anexo "C"



## 6.8 BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE SERRANA

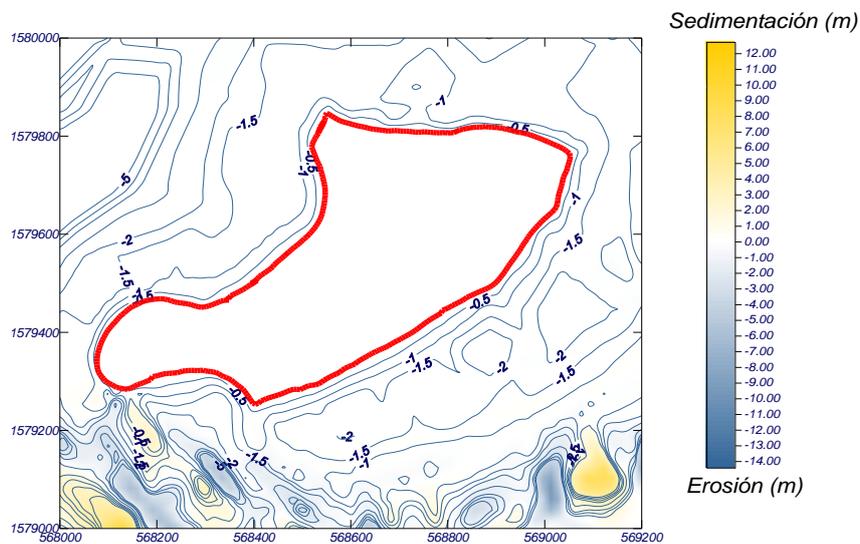
El análisis de erosión y sedimentación producto de las variaciones de las corrientes de deriva litoral, producidas por las roturas del oleaje se muestra en las figuras 6.8.1 y 6.8.2. El diagrama muestra que las condiciones de oleaje alrededor del Cayo son tales que, en la media, la condición generalizada en todas las playas es hacia la erosión. Al entender que el retroceso en el Cayo no ha hecho cambiar el área de este en las últimas décadas de manera sustancial, se atribuye entonces esta tendencia al aumento del oleaje ya sea porque la barrera arrecifal está más profunda, al cambio de dirección del mismo, a la disminución de la cantidad de arena que llega.

Figura 6.8. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual.

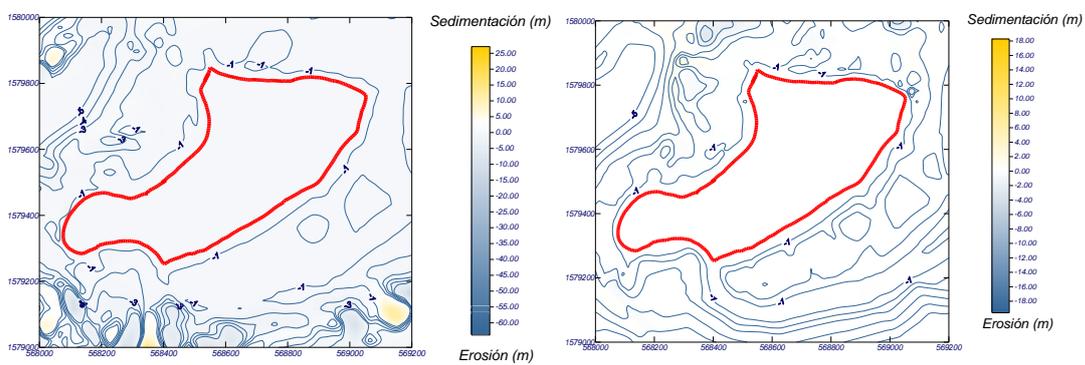


La simulación del balance de erosión/sedimentación debido a las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 6.8.2, en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero el efecto es más acentuado.

Figura 6.8. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento categoría III y cuyos resultados se encuentran en la figura 6.8.3. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que la erosión sea mayor en ese costado del Cayo pero el norte esta protegido mientras que cuando el oleaje viene del norte, el proceso erosivo de la playa del norte es tal que produce la perdida de varios metros de playa.



## 7. CARACTERIZACION MORFOLOGICA DEL CAYO RONCADOR

Imagen 7. 1 Cayo Roncador. Fotografía aérea del cayo y vista satelital del atolon



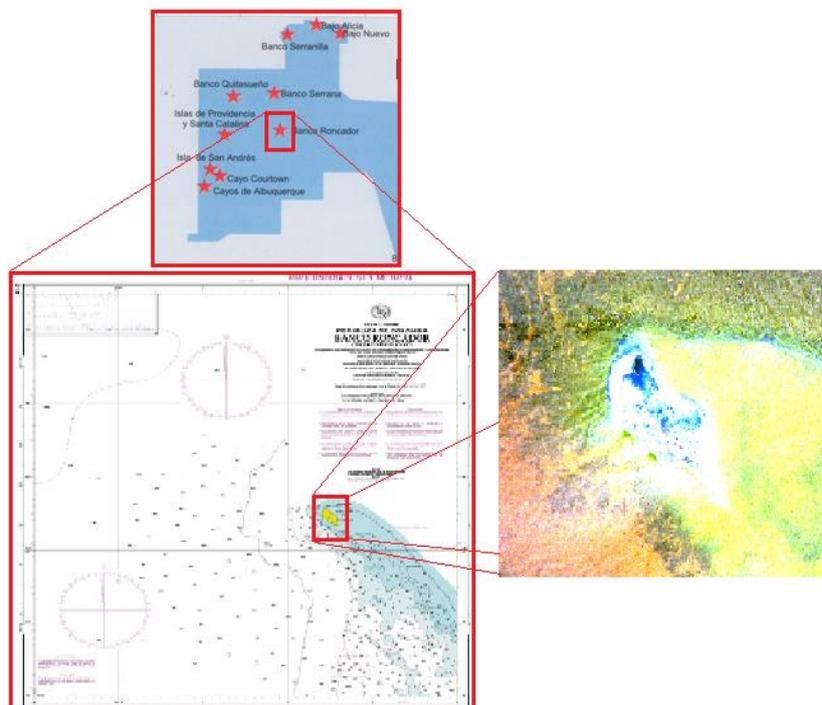
Imagen de OCEANDOTS, 2010

## 7.1 DESCRIPCION GENERAL

Banco Roncador se encuentra localizado en  $13^{\circ}48' - 13^{\circ}58' N$ , y  $80^{\circ}02' - 80^{\circ}06' W$  140 Km al Este de la Isla de Providencia. Se prolonga en dirección Suroeste hasta una profundidad de 3600 m y constituye la base del Cayo Roncador el cual se encuentra en el extremo Norte del banco (CIOH, 1999). Es un atolón alargado cuyo arrecife periférico describe la figura de un anzuelo (Imagen 7.1).

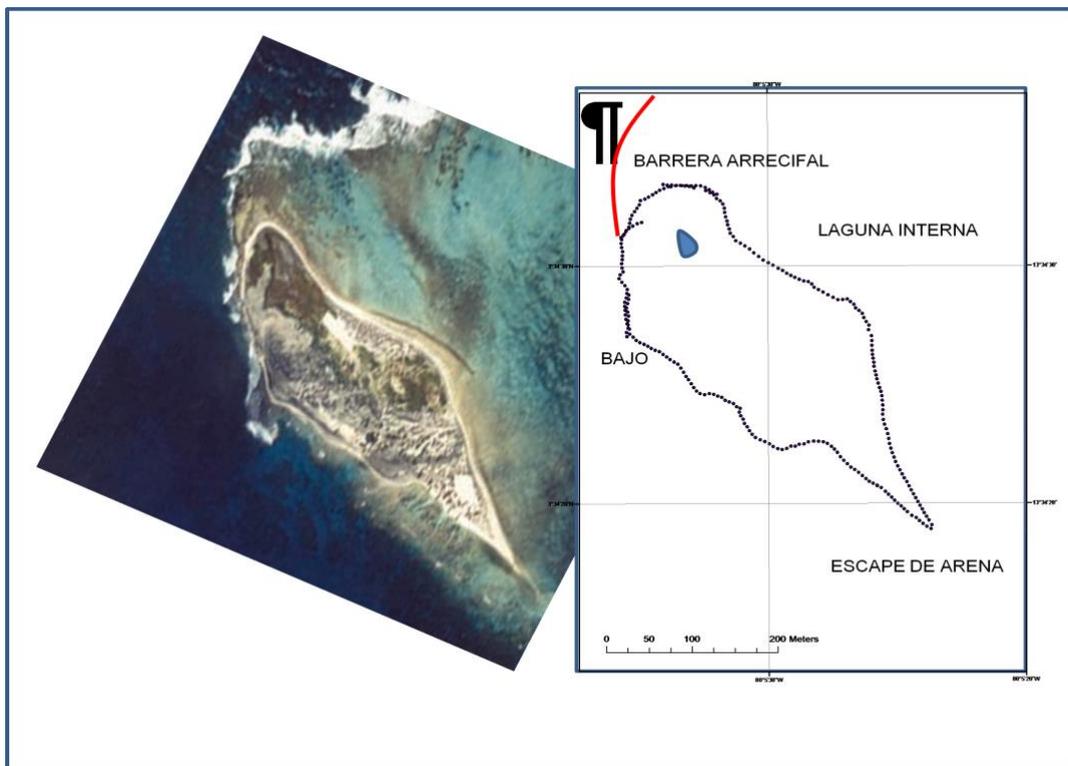
El atolón mide unos 13 km en sentido NW-SE y 6.5 km en su porción más ancha, hasta la isobata de 40 metros. En el extremo norte del arrecife periférico, resultado de la acumulación de escombros coralinos y sedimentos, se encuentra el único Cayo de dimensiones considerables (Geister y Díaz, 2010).

Figura 7. 1 Localización espacial, carta náutica e imagen satelital del Cayo Roncador en la Carta Náutica y en la imagen del satélite de esta área del Caribe colombiano.



La línea de costa del Cayo Roncador, describe una formación ovalada, con una proyección en punta dirección al Sur-Este (Figura 7.1.1). Sobre el sector Este del Cayo se encuentra la zona de rompiente y protege al Cayo de la acción directa del oleaje proveniente del Este y del NE. El sector es ocupado por bandadas de pájaros bobos de manera casi permanente, alrededor de un pozo que se forma naturalmente allí con las lluvias. El litoral del costado norte es rocoso y alto, aparentemente hecho por los habitantes del Cayo con los años donde se han depositado grandes cantidades de la concha del caracol pala *Strombus Gigas* como defensa del talud. Hay una barrera submarina en la punta noroeste que rompe la mayoría del oleaje que viene refractando la costa por el norte, dejando una zona media tranquila en el costado oeste donde llegan los botes. La punta sur es de arena, resultado de la modelación del oleaje que llega en ambas direcciones, el regenerado en la terraza desde el Este y el que queda como remanente de la retractación que viene del norte. Al tener alturas similares, el resultado es la punta aguda que termina en un chorro de eyección de arena a mayores profundidades

Figura 7.1. 1 Fotografía aérea y la Línea de costa del Cayo Roncador medida en agosto de 2009. Obsérvense los rasgos principales del proceso litoral.



Roncador consiste en una plataforma rocosa que sostiene zonas de playa de arena de grano fino a mixto hacia todos los frentes, a excepción de la zona Norte, donde predomina el depósito de restos de corales de gran tamaño. Tiene un área aproximada de 66,963.593035 m<sup>2</sup>. Este Cayo no presenta alturas superiores a los 3 metros en dos elevaciones pero en general es más alto al occidente, cuenta con una laguna interior hacia el costado Norte (imagen 7.2) y vegetación principalmente de enredaderas baja, típicas de este Cayo.

El puesto de Infantería de Marina y el Faro se encuentra hacia el centro en el costado occidental donde recientemente se han estado sembrando palmeras, especialmente en la zona arenosa del sur.

El levantamiento topográfico se realizó con GPS diferencial y miras de elevación a lo largo de transeptos representativos de los sectores del Cayo como aparece en la figura (5.3.5). Las elevaciones de Roncador son

significativamente más bajas que las de los cayos Serranilla y Serrana con una altura de tan solo ....m sobre el nivel del mar actual.

Imagen 7. 2 Fotografías de la parte norte de Cayo Roncador donde se aprecia la laguna y la gran cantidad de restos de coral que componen el sustrato del Cayo en ese sector.



## 7.2 TOPOGRAFIA Y PERFILES DE PLAYAS EN RONCADOR\

En Cayo Roncador se levantó la línea de costa (figura 7.2.1.), quince perfiles de playa y 8 perfiles topográficos, para un total de 23 levantamientos. Se tomaron 8 muestras de arena, y se registraron 25 fotografías en tierra (Figura 30).

Figura 7.2. 1 Levantamiento con GPS diferencial y los perfiles y puntos topográficos levantados en Cayo Roncador el agosto de 2009.

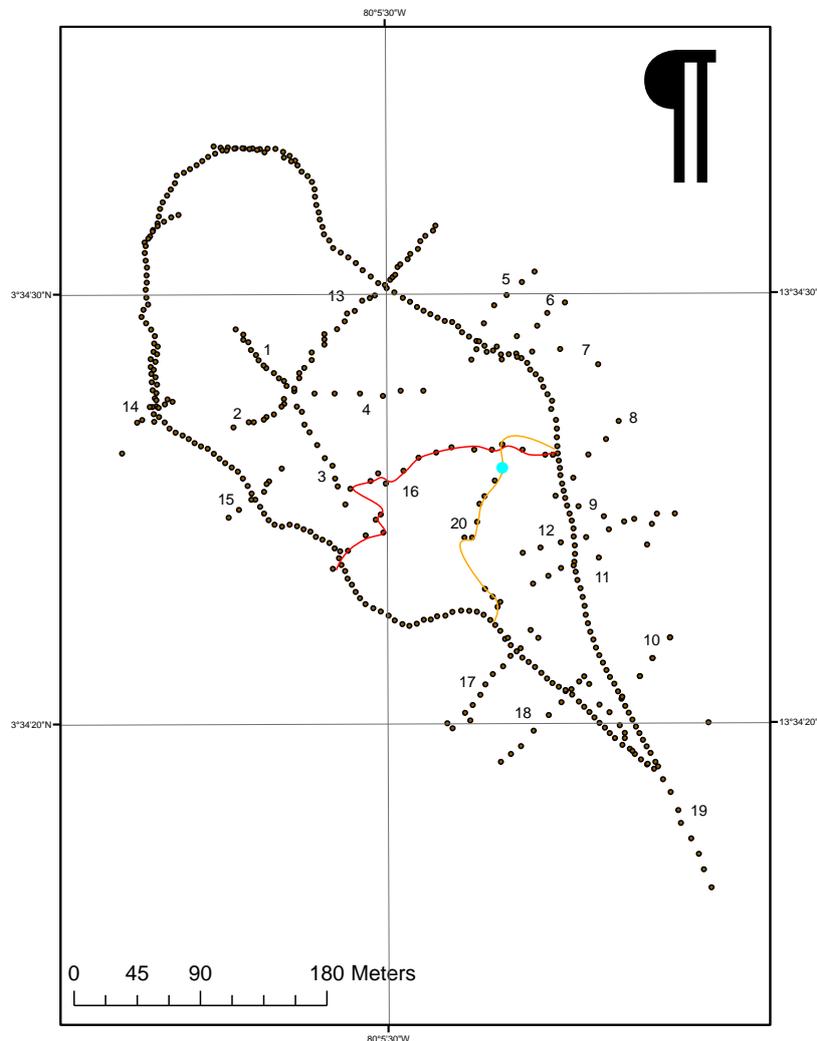
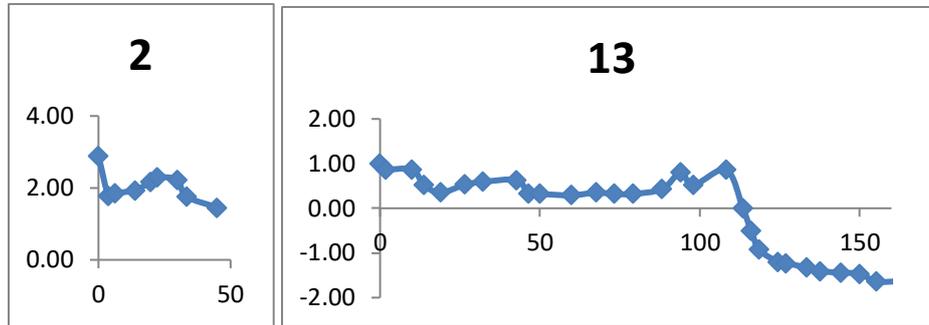
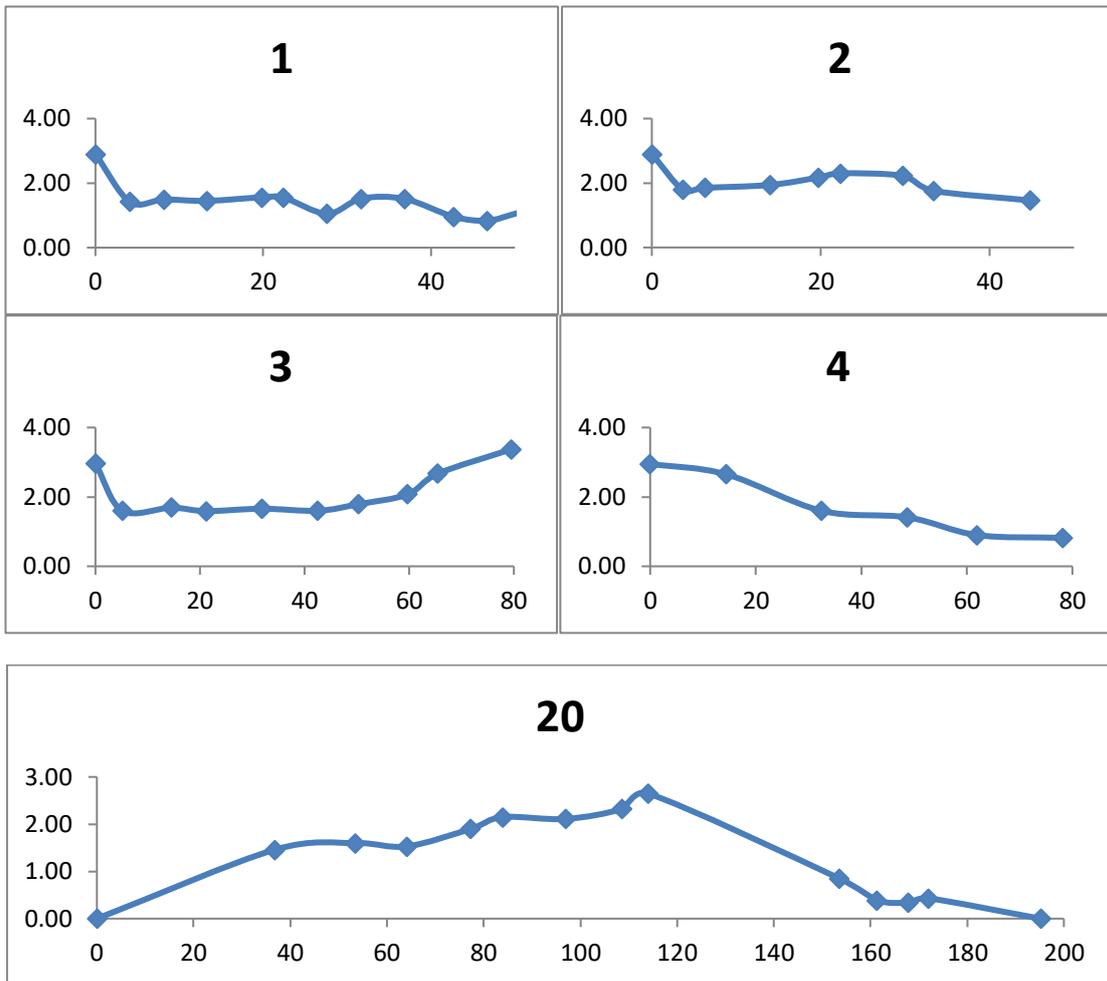


Figura 7.2. 2 Perfil transversal del Cayo Roncador en el área norte en agosto de 2009.



Distintos perfiles realizados en los sectores del Cayo muestran una naturaliza diferente entre la parte rocosa del norte y la parte arenosa del sur. La parte rocosa tiene bermas altas y la línea de costa se encuentra aparentemente delineada en varias partes por la acumulación de pedazos de coral dispuestos para la protección con una berma de alrededor de un metro de altura, seguida por una depresión en la parte norte. El cayo esta ligeramente más inclinado a un costa occidental y sus mayores alturas se encuentran donde están construidos el faro y la instalación militar.

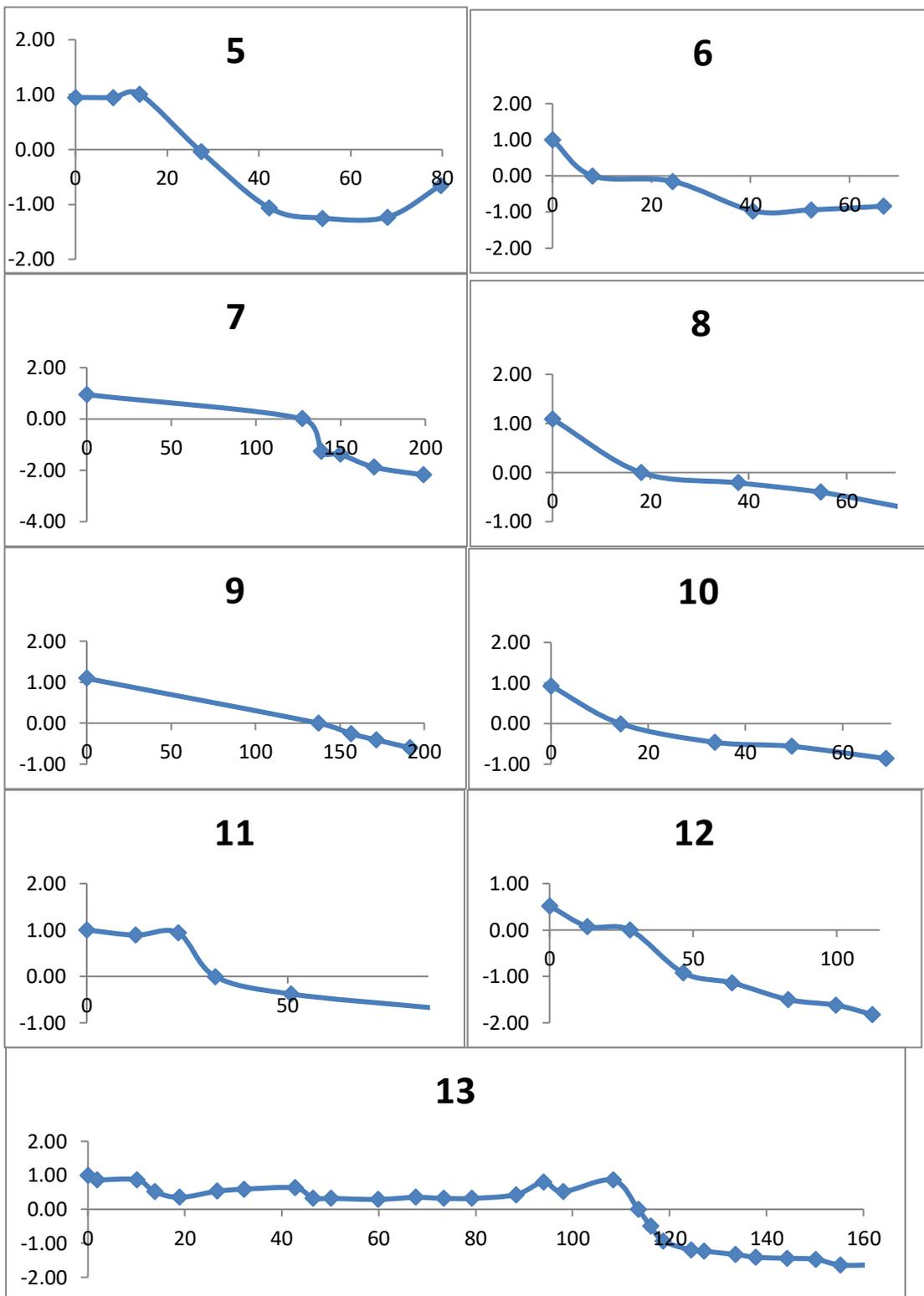
Figura 7.2. 3 Perfiles de topografía, zona central de Cayo Roncador.



Los perfiles 1 a 4 y el 20, representan la zona central del Cayo, mostrando las mayores alturas de la formación alrededor del punto de primer orden del IGAV con el cual se referenció el levantamiento.. La mayor altura registrada en el cayo en este sector fue de 2.32 m.

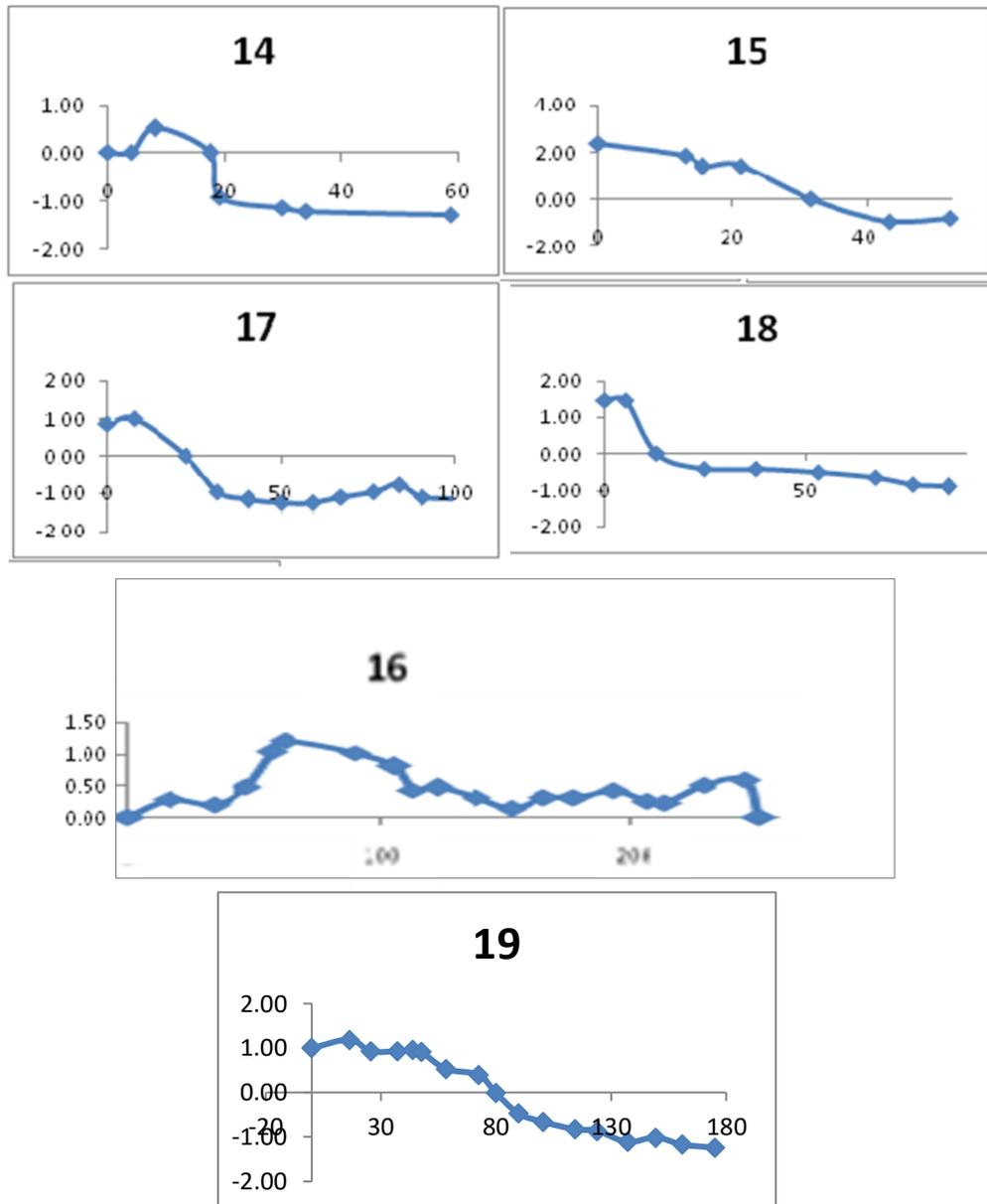
La forma del contacto entre el cayo y la laguna arrecifal se esquematiza los perfiles de playa 5 a 13, que fueron levantados sobre el costado Este del Cayo se encuentra en la figura 7.2.4.

Figura 7.2. 4 Perfiles de playa levantados sobre el costado Este del Cayo Roncador.



Los perfiles correspondientes con los números 14 a 18, fueron levantados sobre el costado Sur- Oeste del Cayo, ubicados hacia el costado “protegido” se esquematizan en la figura 7.2.5

Figura 7.2. 5 Perfiles de playa levantados hacia el costado Sur-Oeste del Cayo Roncador.

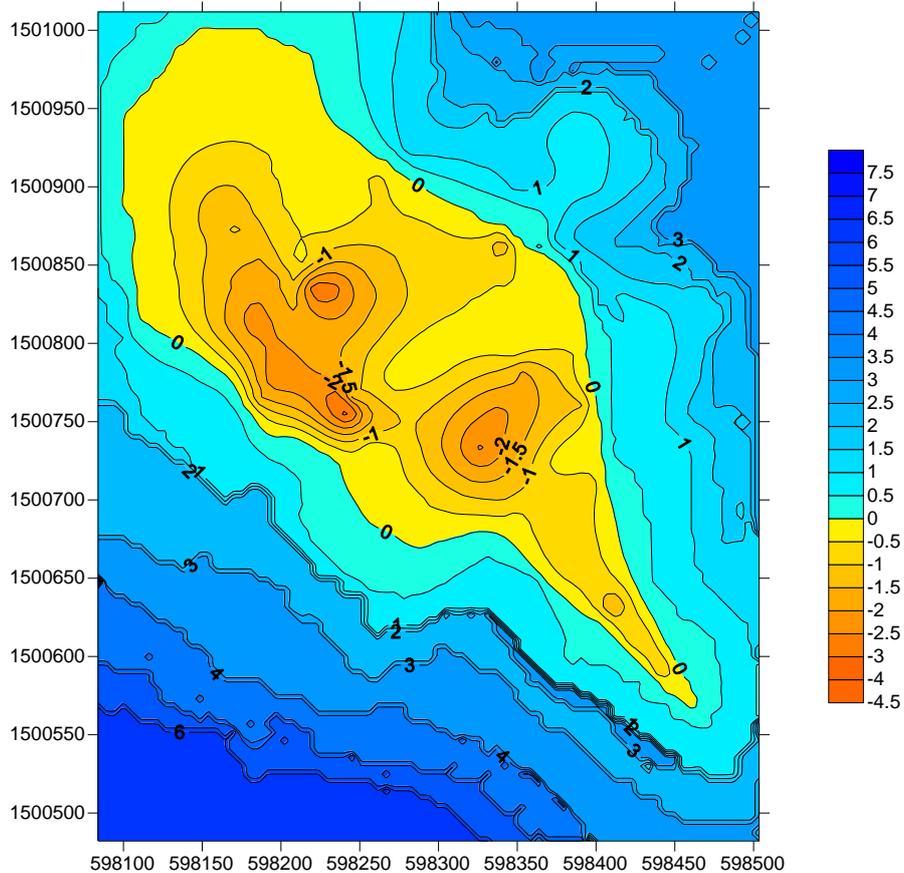


El Perfil 19 (figura 7.2.5), fue levantado hacia la punta que se extiende al Sur-Este del Cayo Roncador (ver figura 7.2.1). Esta punta final del Cayo Roncador

es arena suave y se extiende a lo largo de una suave pendiente la cual continua entre el coral hasta alcanzar un gran depósito más profundo. Esta circunstancia hace que sea del mayor interés el atrapar dicha arena en ese sector para preservarla.

A manera de resumen de todos los puntos topográficos medidos en el cayo se realizó un modelo digital del terreno en el cual se puede apreciar los rasgos principales anteriormente descritos. La topografía presentada no refleja el “camino” artificialmente hecho alrededor de la berma exterior de la parte norte que rodea el cayo en ese sector. Dicha barrera delinea y protege el sector de vegetación natural que compone el sistema de un pantano habitado por pájaros bobos que anidan allí.

Figura 7.2. 6 Modelado del terreno en Cayo Roncador.



El sector central es más árido y desprovisto de vegetación arbustiva, con algunas especies de enredaderas rastreras, tiene una elevación hacia el occidente que cae suavemente al oriente. En la elevación de mas al sur se encuentra la instalación del puesto de Infantería de Marina en la cual se han sembrado una especie de bosque de palmeras que avanza hacia la punta sur.

Dicha punta forma un “chorro” de eyección de arena fruto de la deriva litoral que se aleja del cayo de manera permanente alimentando un depósito profundo más al sur.

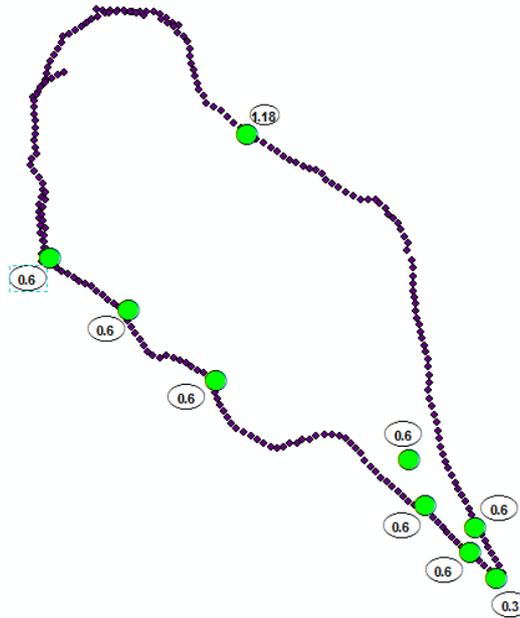
Figura 7.2. 7. Mosaico de fotografías aérea del costado occidental de Roncador. Obsérvese el arrecife rompeolas al noroeste y la punta de arena al sur.



### 7.3 GRANULOMETRIA

El diámetro medio de la arena en los perfiles tomados en Roncador muestra una arena relativamente gruesa (0.6mm), muy especialmente en la parte que enfrenta la barrera arrecifal, en la cual el D50 es mayor a 1mm y en la única parte donde se encontró arena mediana es el punta sur del Cayo, donde el D50 es de 0.3mm.

Figura 7.3. 1 La posición de las muestras sedimentológicas tomadas en Cayo Roncador. El diámetro promedio de los perfiles se encuentra señalado en la gráfica.



Coordenadas		Peso Original	Post Secado en horno	Post Secado al aire	Peso Final	OBSERVACIONES
13° 34' 504"	80°05'504"	50	48.58	48.5	48.32	Grano grueso.
13° 34' 337"	80°05'407"	50	45.7	45.57	43.82	Grano Fino
13° 34' 316"	80°05'398"	50	48.52	48.47	48.25	Grano Fino
13° 34' 327"	80°05'409"	50	47.4	47.42	44.37	Grano Grueso.
13° 34' 347"	80°05'428"	50	46.88	46.81	46.55	Grano Fino
13° 34' 400"	80°05'518"	50	49.27	49.23	49.05	Grano Fino
13° 34' 430"	80°05'555"	50	46.27	46.13	45.93	Grano Mixto
13° 34' 452"	80°05'589"	50	48.95	48.5	48.25	Grano Mixto

Tabla 7.3. 1 Posicion y datos de las muestras de arena tomadas en Roncador.

## 7.4 EL OLAJE EN CAYO RONCADOR

Con el objeto de calibrar los modelos de oleaje, se hicieron mediciones de este parámetro con sensores de oleaje cada segundo durante siete horas. La serie obtenida se encuentra en la figura 7.4.1 donde se observa que pese al régimen tan fuerte del mar Caribe el oleaje es absorbido por la rompiente dejando un suave oleaje de menos de diez centímetros de altura y periodo de alrededor de 4 segundos.

Figura 7.4. 1 Ubicación de los sensores de nivel en cayo Roncador.



Figura 7.4. 2 El oleaje medido en el costado expuesto de Cayo Roncador

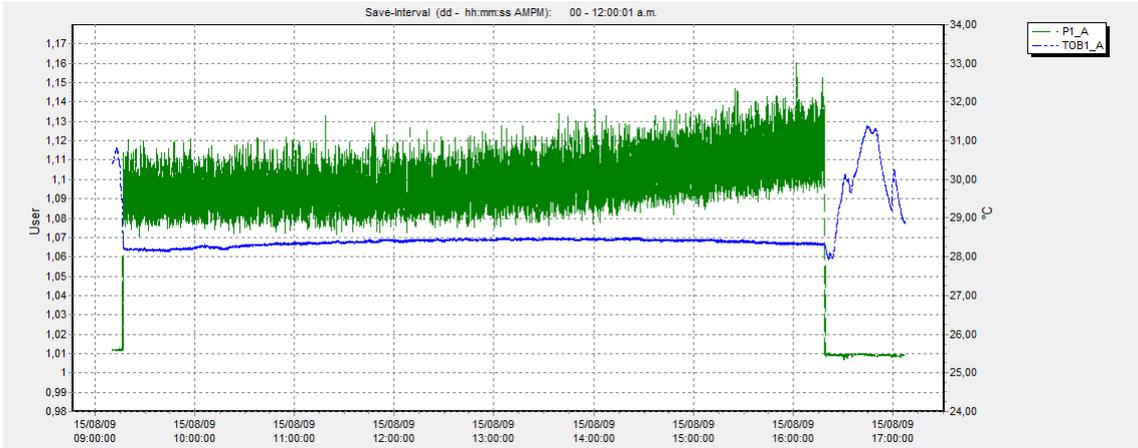


Figura 7.4. 3 Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado expuesto de cayo Roncador.

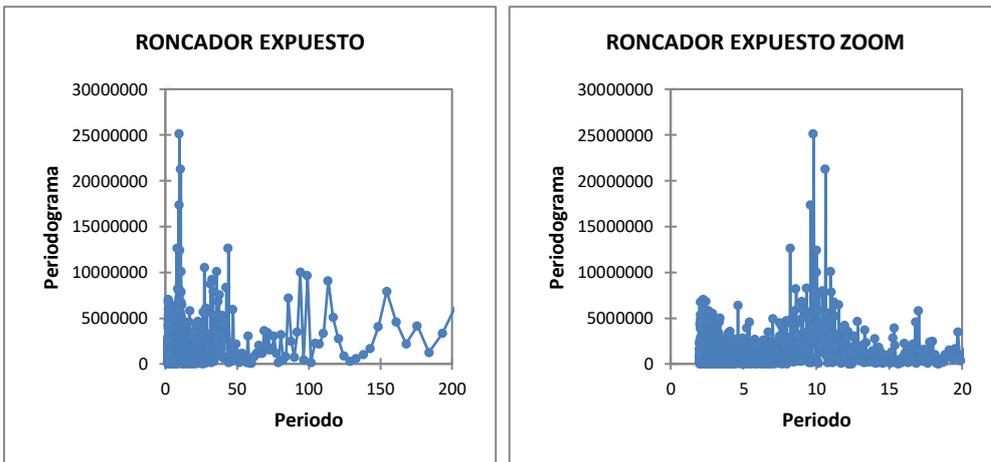
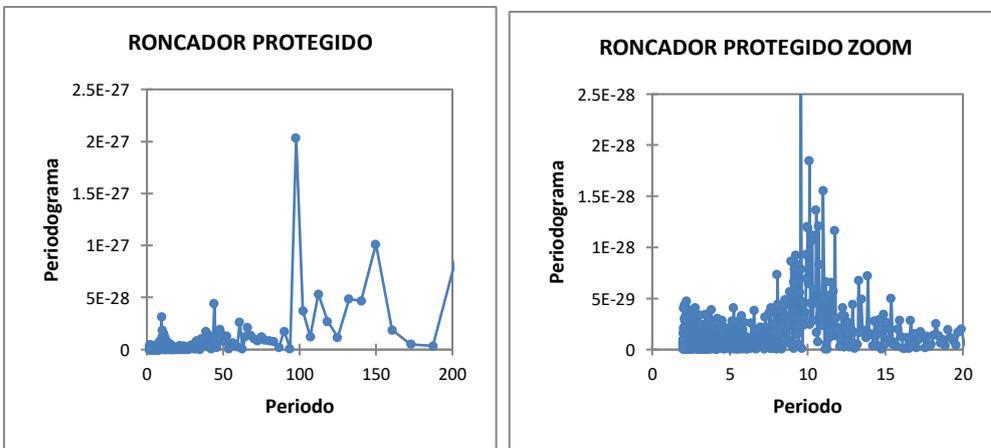
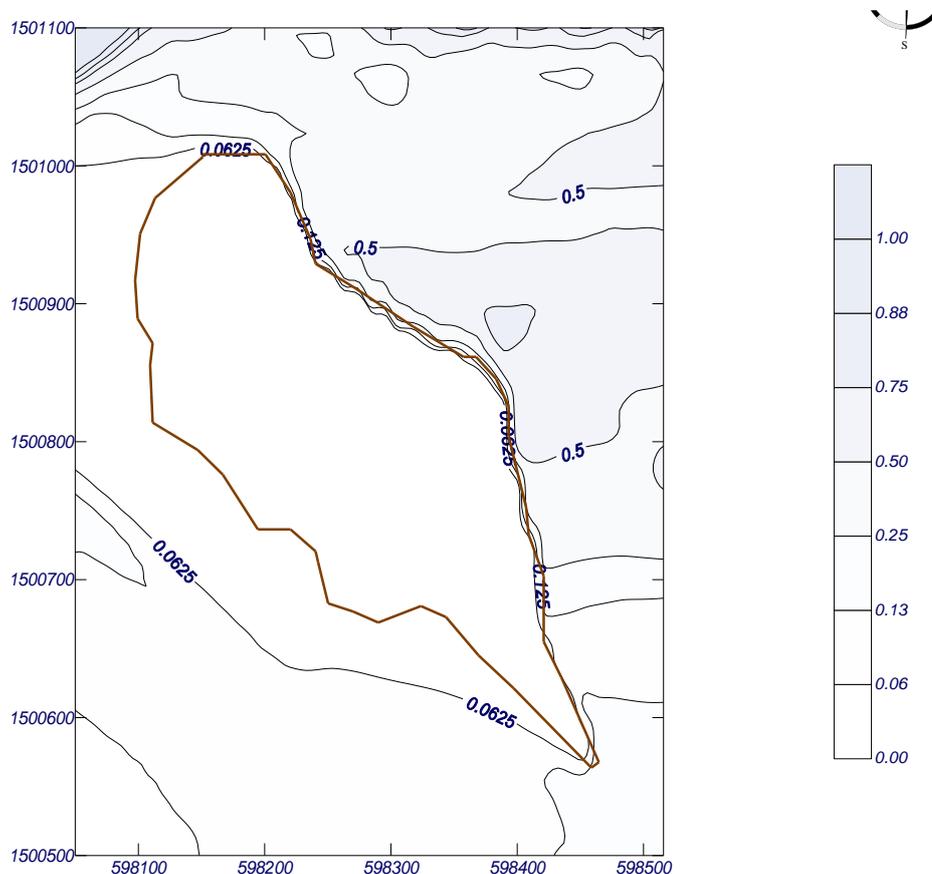


Figura 7.4. 4 Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado protegido de cayo Roncador.



La base de datos empleada para la obtención del régimen medio del oleaje en el Cayo Roncador, se desprendió a partir de los valores reportados de los parámetros del clima marítimo correspondientes con el retro-análisis descrito en el acápite 4. Con base en esos datos se entregaron las condiciones de contorno a los modelos numéricos con el propósito de propagar el oleaje desde las aguas con profundidad indefinida hasta las playas de los Cayos. En el presente capítulo se presenta el resultado de la modelación para la condición media del clima del área, y para el oleaje extremo que se produce con las tormentas en el año conocido como Hs12. Así mismo, se quiso estudiar dos condiciones diferentes de corto plazo cuando un huracán puede pasar por los costados norte y sur del Cayo, produciendo oleajes en esos sentidos. Por tal motivo se modelaron las condiciones de oleaje del norte y del sureste en condiciones huracanadas.

. Figura 7.4. 5 Altura de ola significativa (Hs). Régimen medio, Cayo Roncador.



## 7.5 REGIMEN EXTEMAL.

El Hs 12 hace referencia a la altura de ola significante que es excedida 12 horas al año. La propagación del oleaje con estos datos se presenta como una aproximación al clima extremal en el área

Figura 7.5. 1 Parámetros de oleaje empleados en la propagación extremal del oleaje eb Cayo Roncador.

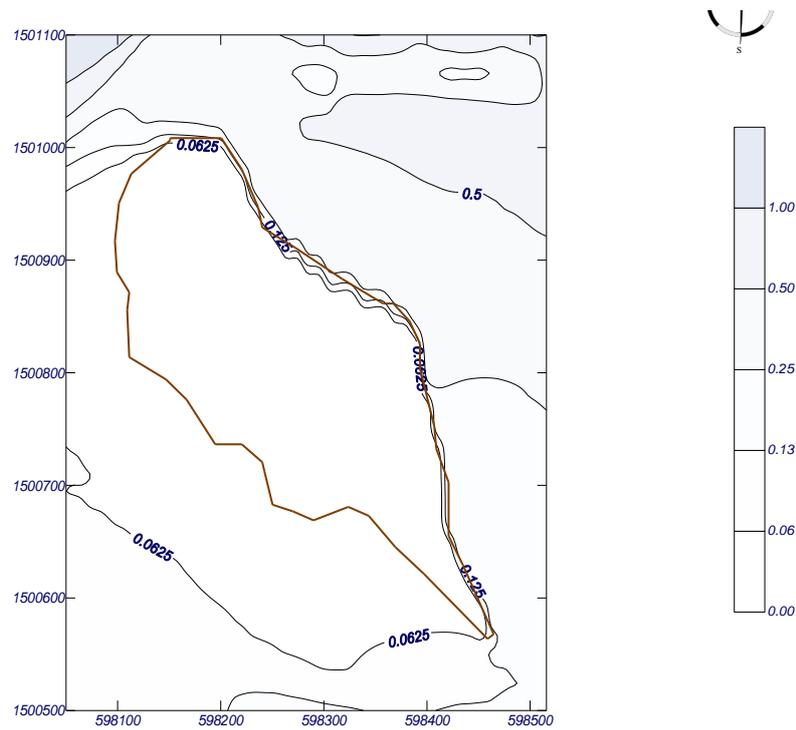
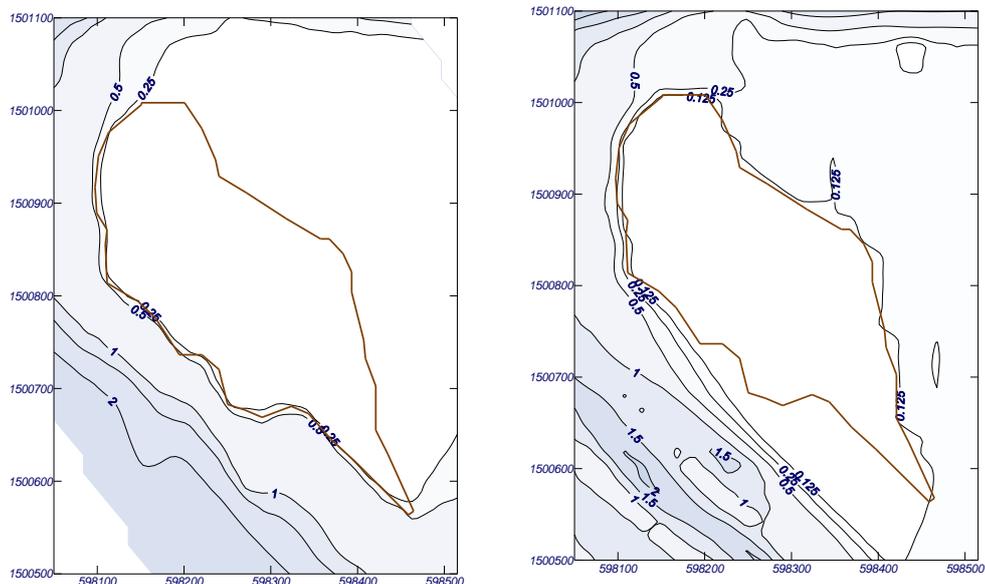


Figura 7.5. 2 Altura de ola significativa (Hs). Durante un huracán que produce oleaje desde el SW izquierda y desde el Norte (derecha)



Las simulaciones muestran que el Cayo es muy afectado por un huracán que produzca oleaje del sureste mientras que será menos vulnerable a un oleaje del norte, con olas llegando a la playa con alturas menores de 1m, lo que producirá poca erosión en esas playas. Si el huracán genera oleaje que llegue del suroeste la barrera arrecifal no va a filtrar mucho del oleaje incidente, el oleaje va a llegar muy alto al costado occidental y afectar[a la playa de ese costado. La playa norte y el de la laguna se protegen de este tipo de oleaje extremo.

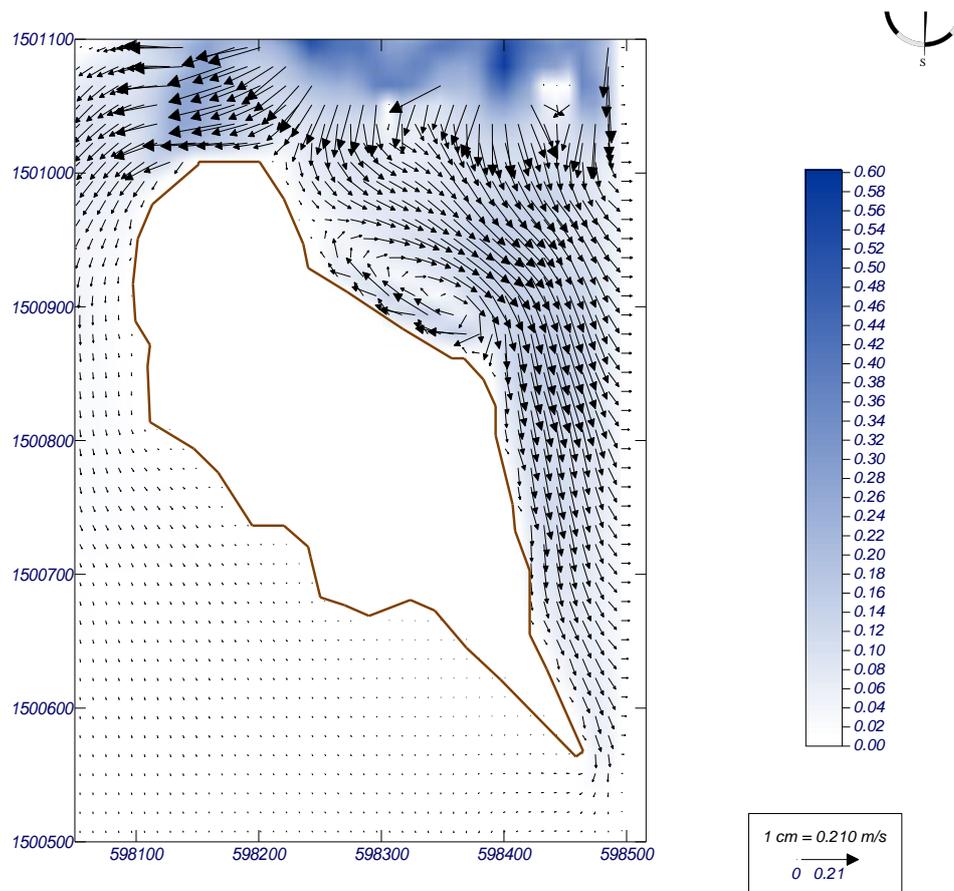
## 7.6 REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA

Las corrientes de rotura se obtuvieron mediante la utilización del modelo OLUCA en modo monocromático con el objeto de propagar el efecto de la rotura del oleaje característico de cada circunstancia modelada. La explicación del modelo se encuentra en el capítulo 4 del documento. Las condiciones de entrada cada modelación se encuentra en el anexo "C."

Las corrientes que se producen por la rotura del oleaje alrededor del Cayo Roncador debido al régimen medio del oleaje se representan en la figura 7.6.1.

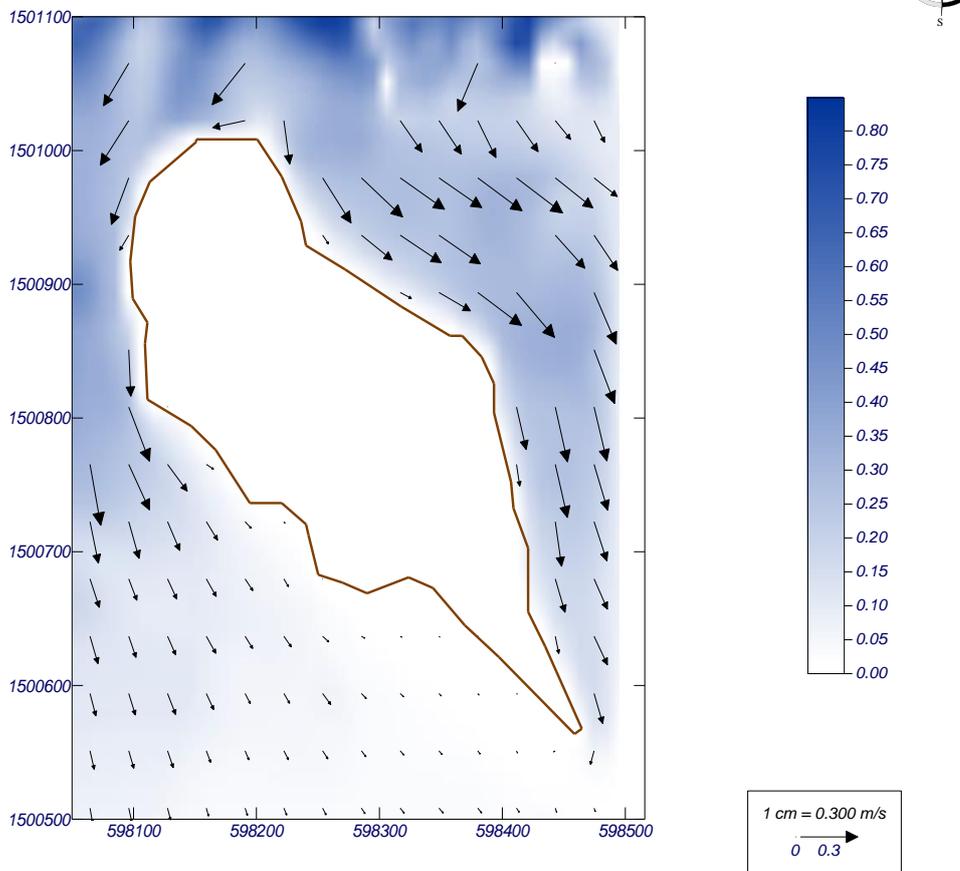
En ella se observa una corriente hacia el sur de ~40 cm/s a lo largo del costado noreste del Cayo producida por el oleaje incidente sobre la rompiente. También se hace evidente que la corriente se intensifica en la punta oriental del Cayo y que es mucho menor en el otro costado.

Figura 7.6. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Roncador.



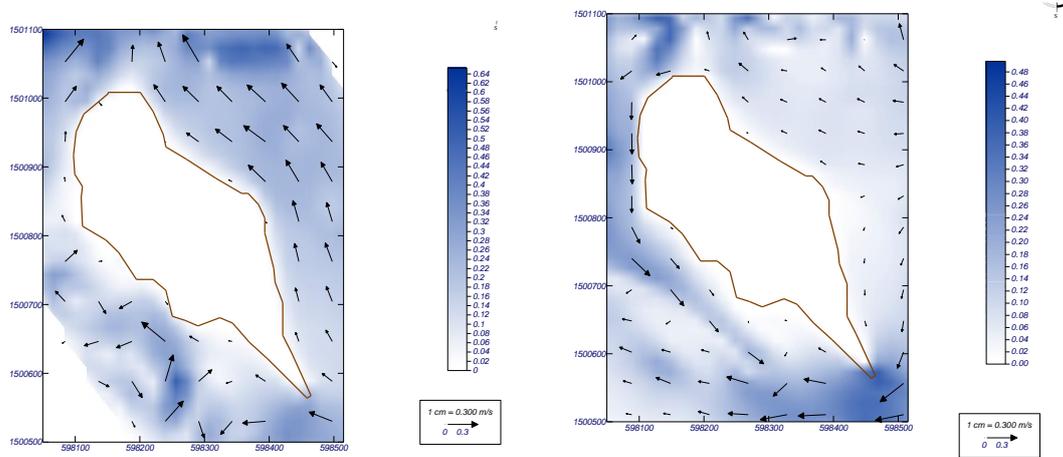
La simulación de las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 7.6.2 en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero las corrientes se intensifican al interior de la laguna y alrededor de la punta sur del Cayo con valores cercanos a 0.5 m/s.

Figura 7.6. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Roncador producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12).



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento de esta naturaleza y cuyos resultados se encuentran en la figura 7.6.3. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que las corrientes se inviertan a lo largo de la rompiente hacia el Norte dejándolo expuesto a perder grandes extensiones de arena de sus playas en la punta sur. Cuando el oleaje producido por un huracán viene del Norte (Figura... ) las corrientes son mas intensas en el exterior de la laguna arrecifal y el sistema se parece al de corrientes medias. Para esta condición el Cayo tiene protección natural quedando muy protegido.

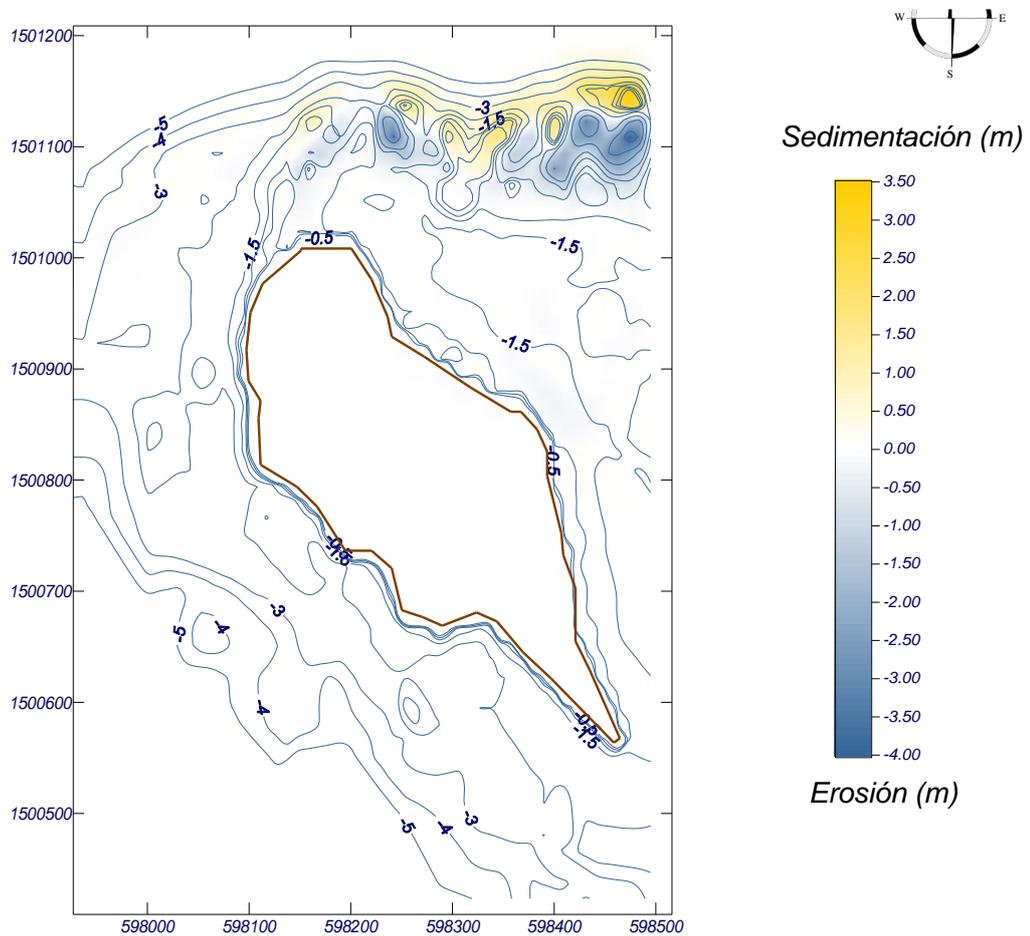
Figura 7.6. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).



## 7.7 BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE RONCADOR

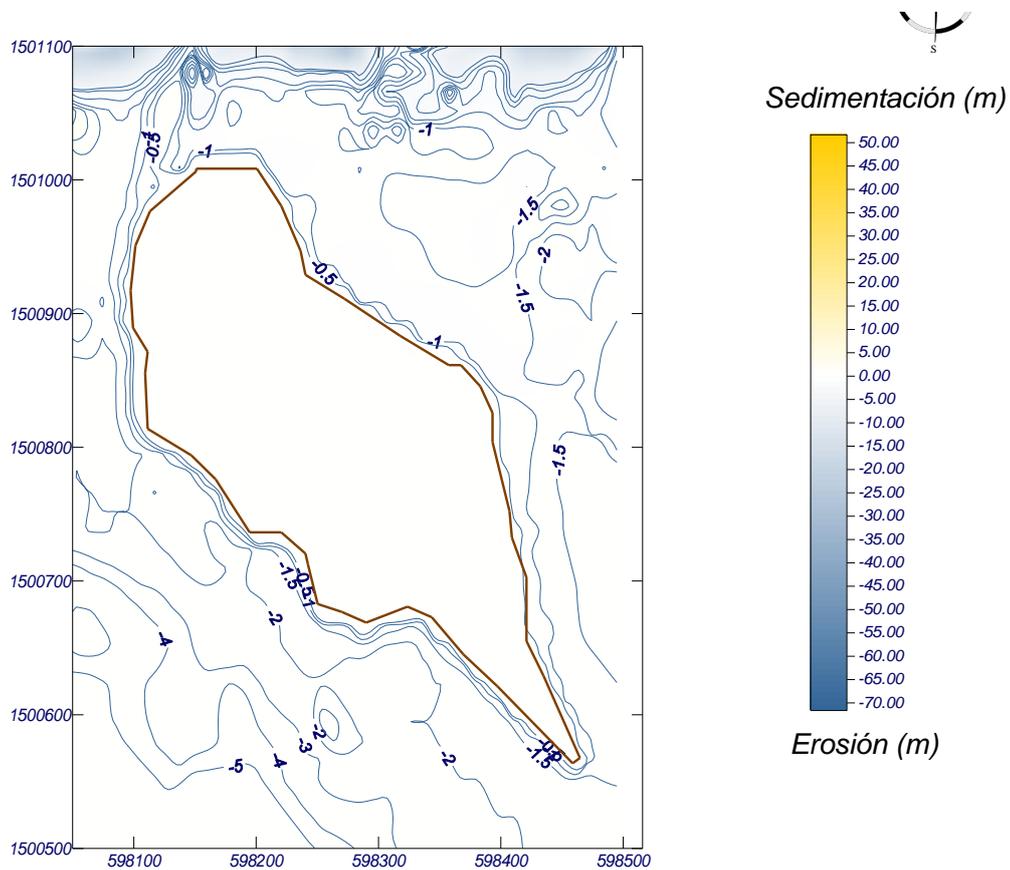
El análisis de erosión y sedimentación producto de las variaciones de las corrientes de deriva litoral, producidas por las roturas del oleaje se muestra en las figuras.. El diagrama muestra que las condiciones de oleaje alrededor del Cayo son tales que, en la media, la condición generalizada en todas las playas es hacia la erosión con algunas zonas que se sedimentan en la medida que la arena se filtra hacia la laguna arrecifal y hacia el Cayo. Al entender que el retroceso en el Cayo no ha hecho cambiar el área de este en las últimas décadas de manera sustancial, se atribuye entonces esta tendencia al aumento del oleaje ya sea porque la barrera arrecifal está más profunda, al cambio de dirección del mismo, a la disminución de la cantidad de arena que llega.

Figura 7.7. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual.



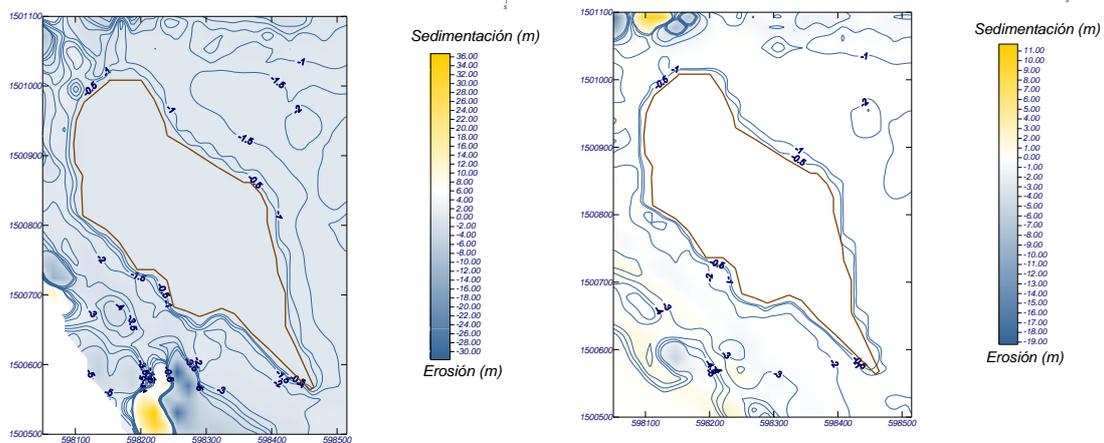
La simulación del balance de erosión/sedimentación debido a las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 7.7.2, en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero el efecto es más acentuado.

Figura 7.7. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo.



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento de esta naturaleza y cuyos resultados se encuentran en la figura 7.7.3. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que la erosión sea mayor en ese costado del Cayo pero el norte está protegido mientras que cuando el oleaje viene del sur, el proceso erosivo de la playa es tal que produce la pérdida de varios metros de playa.

Figura 7.7. 3 Mapas de erosión/sedimentación, producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).



## 8. CARACTERIZACION GEOMORFOLOGICA DE CAYO BOLIVAR

Imagen 8. 1 Fotografías aéreas de los cayos del atolón Bolívar.

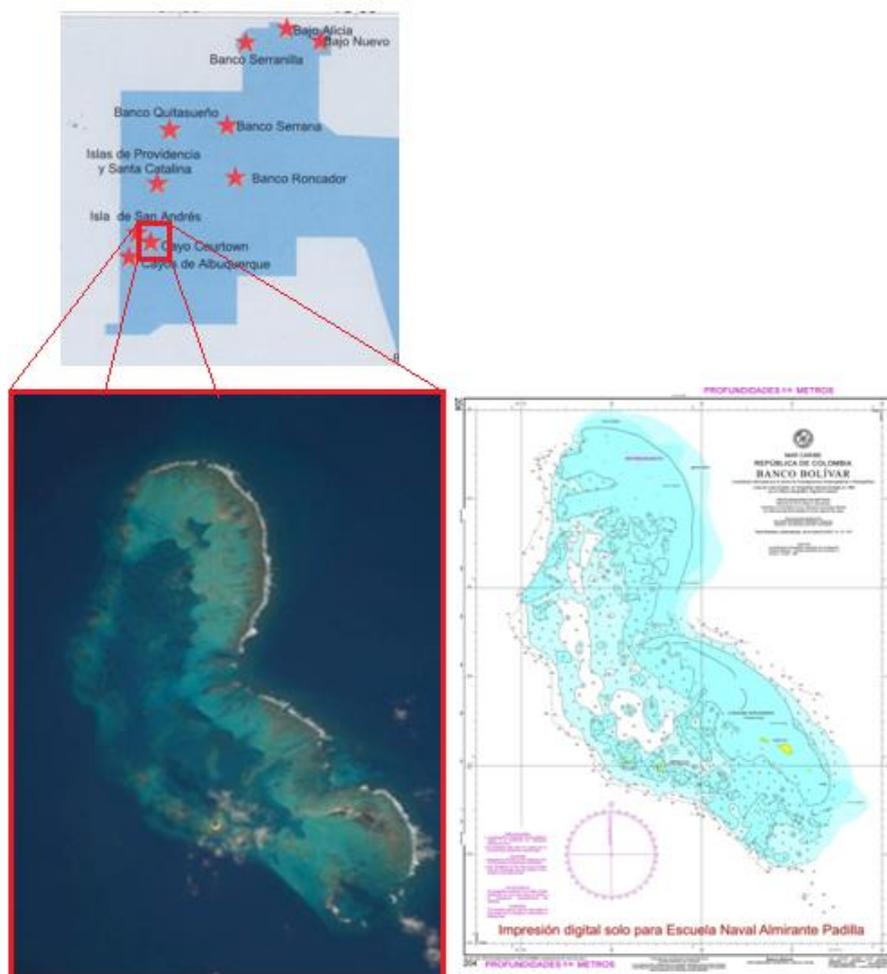


Fuente. Guardacostas de la Armada

## 8.1 CARACTERISTICAS GENERALES

Este Banco es conocido originalmente como Courtown Cays o Cayos del Noreste., Está localizado en los 12°-22' -12°28' N, 81°25' – 81° 31' W. a unos 25 kilómetros en al SE de San Andrés, tiene forma de riñón, con una longitud máxima (en dirección SE-NW) de 11,7 km y un ancho de 5,1 km, hasta la isobata de 45 m (Geister y Dlaz, 2010), (Figura 8.1).

Figura 8.1. 1 Localización espacial, carta náutica COL 204 y una imagen satelital (Oceandots, 2010) del Cayo Bolívar en el Caribe colombiano.



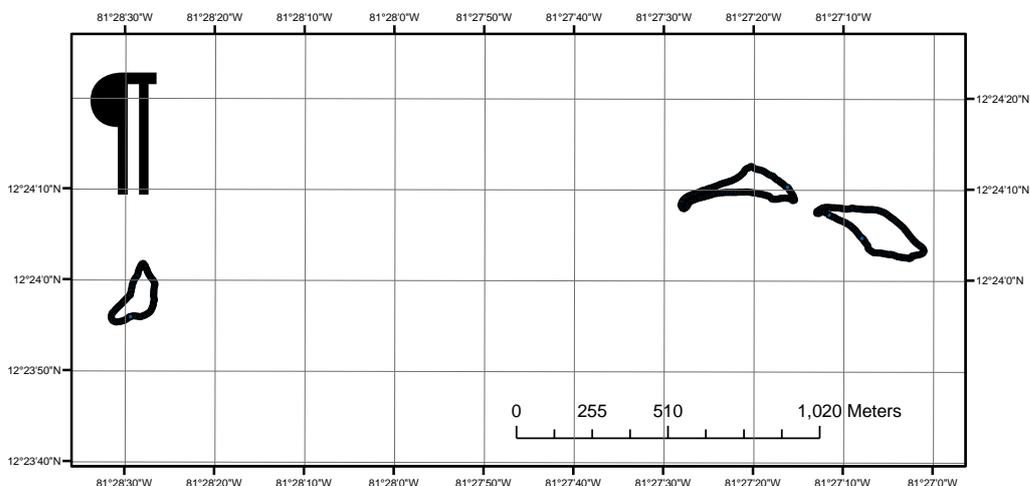
El esquema es adaptado de Invemar, (2010)

La mitad sur de la estructura del atolón está orientada en sentido en SE-NW mientras que la mitad norte lo está en dirección en NNW-SEE. Según Geister y Diaz, 2010) ambas son direcciones tectónicas características de esta región del Caribe, lo que podría estar indicando la presencia y una importante interacción de dos zonas de fractura con tendencias direccionales diferentes que subyacen el cono volcánico sumergido del atolón. El arrecife periférico no circunscribe al atolón completamente. La laguna es más bien abierta hacia el W y SW, ya que está delimitada a sotavento por accidentes topográficos, excepto por segmentos muy aislados de arrecife periférico.

En este atolón existen tres Cayos emergidos con vegetación permanente, un pequeño promontorio emergido y otro formado por acumulación de escombros coralinos. A decir por los informes anteriores los tamaños, formas y número de Cayos ha variado considerablemente en las últimas décadas.

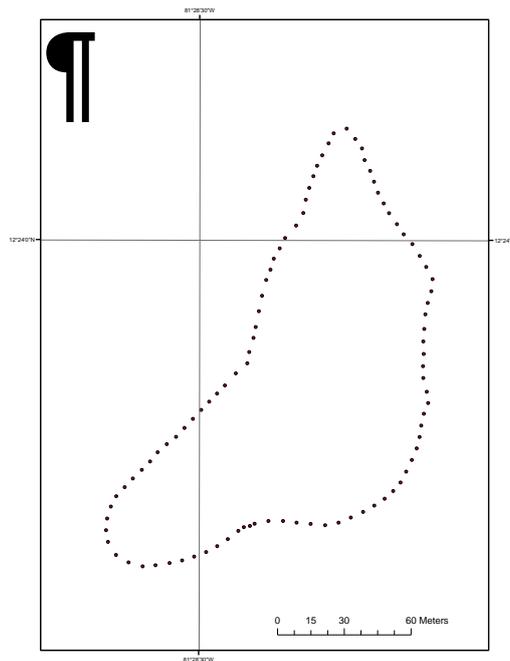
El Cayo de interés es el Cayo Bolívar, cuya línea de costa describe una formación triangular (Figura 8.1), con la vegetación típica de la costa Caribe insular, y alturas que no superan los tres metros; con playas de arena de grano fino a mixto que rodean el contorno del Cayo. Los otros dos cayos tienen grandes depósitos de arena anexos y se juntan y separan por una cinta de

Figura 8.1. 2 Línea de costa de los Cayos en el atolón Bolívar levantadas en Febrero de 2010.



arena que el oleaje rompe durante las tormentas como ocurría en el momento de la observación ya que se encontró un pequeño canal entre los dos,

Figura 8.1. 3 La línea de costa de Cayo Bolívar levantada en febrero de 2010.



Del levantamiento realizado, resulta importante notar que el alargamiento redondeado del suroeste del Cayo corresponde a un gran playón de arena recientemente formado por una tormenta reciente que trajo el oleaje del noroeste, el cual erosionó las playas del costado oriental, arena que se alcanzó a retener en el costado opuesto. El montículo de arena (Figura....) que ahora tiene un monumento a la Virgen se encontraba muy erosionado en el momento de la visita.

Imagen 8.1 1 El montículo de arena cercano a Cayo Bolívar.

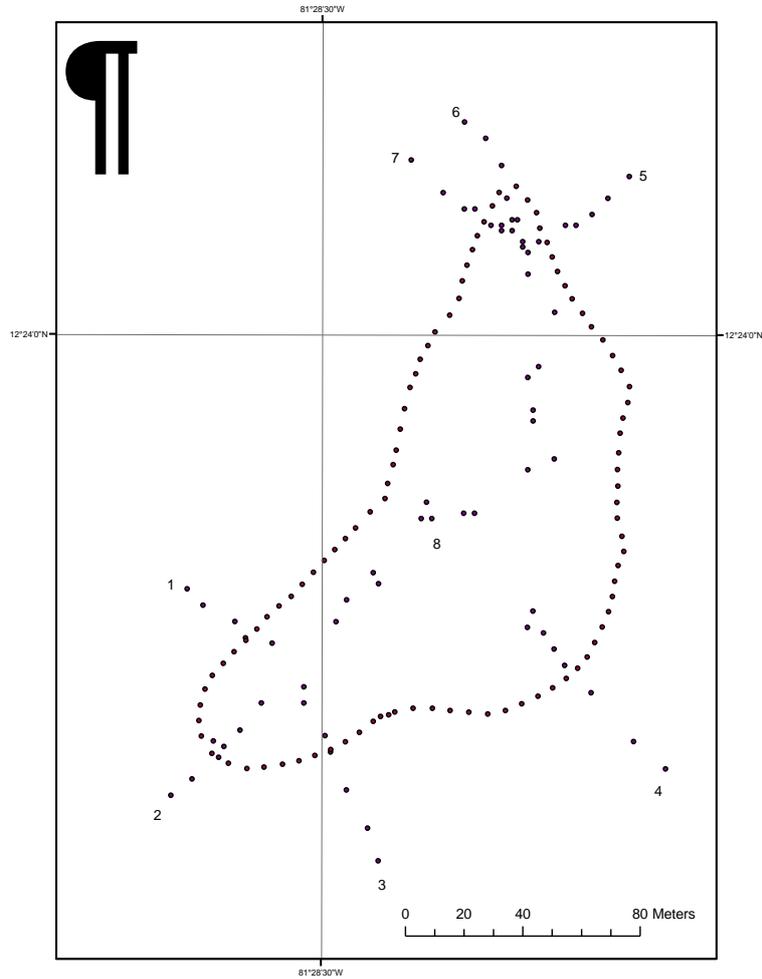


Tomado ¿?

## 8.2 PERFILES TOPOGRAFICOS Y DE PLAYAS

Sobre Cayo Bolívar, se levantaron 8 perfiles de topografía (Figura 8.2.1), cada uno de los cuales está numerado para facilitar su ubicación y representación.

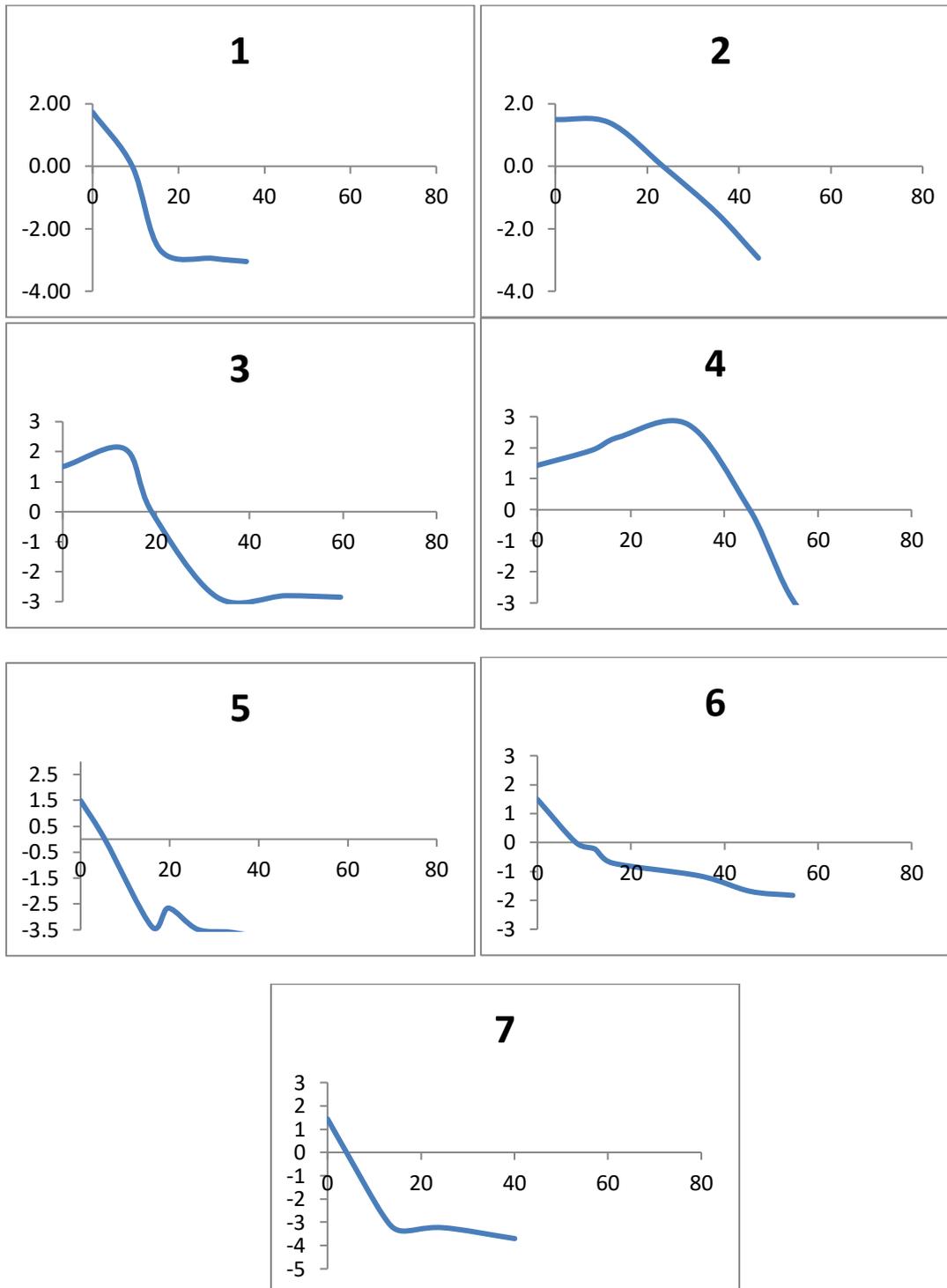
Figura 8.2. 1. Perfiles levantados en Cayo Bolívar.

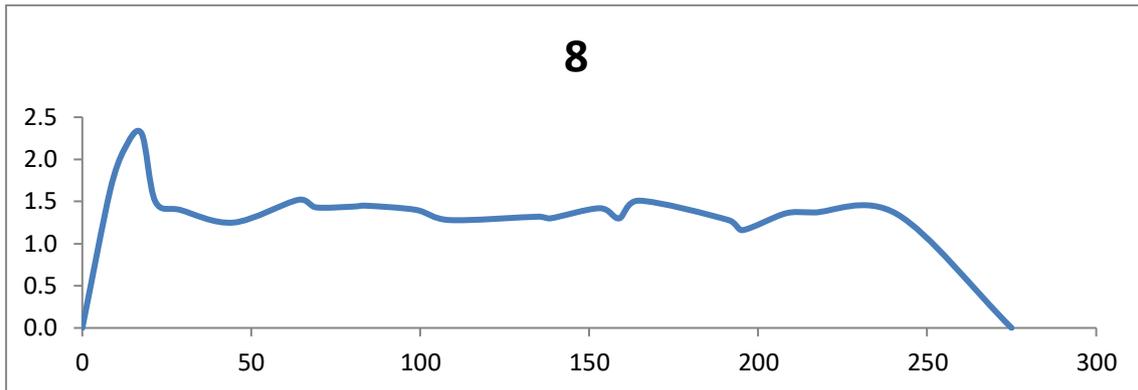


Los perfiles 1 a 7, representan perfiles de playa que se orientan rodeando el Cayo, como se indica en la figura 8.2.1. La figura 8.2.2, esquematiza los perfiles extraídos, se observa que las alturas de Cayo bolívar no superan 2.5 metros. La topografía de Cayo Bolívar se puede generalizar como en los demás cayos visitados aunque es mucho más pequeño que los anteriores. Posee bermas relativamente altas pero las playas se encontraban visiblemente afectadas por una tormenta reciente que había llegado del norte con motivo del paso de un frente frío y que erosionó las playas del norte y el oeste, produciendo un abultamiento de arena en el sector sur de la isla. Los perfiles

de playa medidos entonces, reflejan esta condición que no es la condición media, sino más bien una respuesta a una condición extrema.

Figura 8.2. 2 Perfiles de playa (1-7) y perfil topográfico (8) de Cayo Bolívar.





### 8.3 OLEAJE EN CAYO BOLIVAR

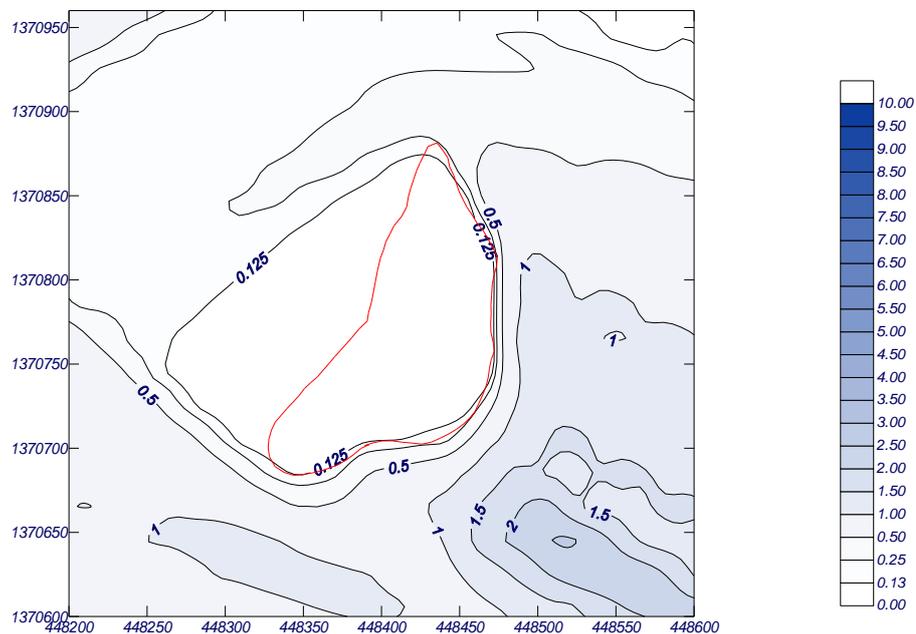
El oleaje medido en el Cayo.

Figura 54. oleaje en Cayo Bolívar, medido con sensor de presión en febrero de 2010

La base de datos empleada para la obtención del régimen medio del oleaje en el Cayo Bolívar se desprendió a partir de los valores reportados de los parámetros del clima marítimo correspondientes con el retro-análisis descrito en la metodología (Capítulo 4). Con base en esos datos se entregaron las condiciones de contorno a los modelos numéricos con el propósito de propagar el oleaje desde las aguas con profundidad indefinida hasta las playas de los Cayos. En el presente capítulo se presenta el resultado de la modelación para la condición media del clima del área, y para el oleaje extremo que se produce con las tormentas en el año conocido como Hs12. Así mismo, se quiso estudiar dos condiciones diferentes de corto plazo cuando un huracán puede pasar por los costados norte y sur del Cayo, produciendo oleajes en esos sentidos. Por tal motivo se modelaron las condiciones de oleaje del norte y del sureste en condiciones huracanadas.

El régimen climático medio muestra que Cayo Bolívar recibe el oleaje del Este-noreste y que su costado oeste y suroeste son los más abrigados (figura 8.3.1). Las alturas del oleaje medio no superan los 0.5m antes de romper y llegan del sureste principalmente.

Figura 8.3. 1 Cayo Bolívar. Altura de ola significativa (Hs). Régimen medio.



El Hs 12 hace referencia a la altura de ola significativa que es excedida 12 horas al año. La propagación del oleaje con estos datos se presenta como una aproximación al clima extremal en el área que se asemeja al clima medio pero con alturas de alrededor de un metro antes de romper, el doble del anterior. El oleaje tiende a romper la punta norte, lo que se advirtió en la visita.

Figura 8.3. 2 Resultados de la modelación de oleaje extremal de Cayo Bolívar.

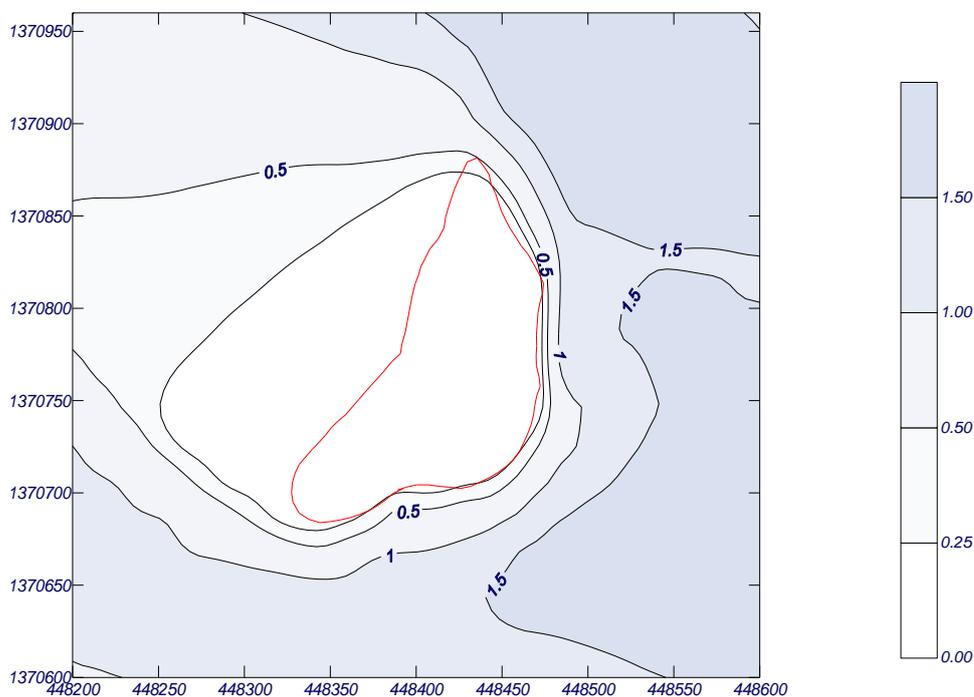
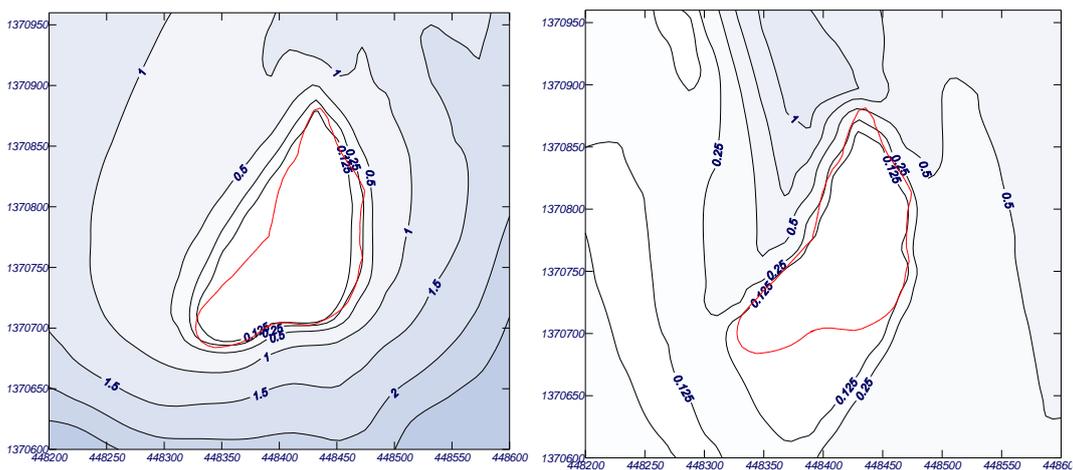


Figura 8.3. 3 Cayo Bolívar. Altura de ola significativa (Hs). Régimen en caso de huracán del Suroeste (izquierda) y del norte (derecha)



Las simulaciones muestran que el Cayo es muy afectado por un huracán que produzca oleaje del suroeste cuando el oleaje se advierte mayor en toda la

zona ya que no se ha dispersado en las rompientes, y que será menos vulnerable a un oleaje del norte, con olas llegando a la playa con alturas menores de 1m, lo que producirá erosión especialmente en las playas de la punta norte. Si el huracán genera oleaje que llegue del suroeste la barrera arrecifal no va a filtrar mucho del oleaje incidente, el oleaje va a llegar muy alto al costado occidental y afectará todo el cayo.

#### 8.4 REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA

Las corrientes de rotura se obtuvieron mediante la utilización del modelo OLUCA en modo monocromático con el objeto de propagar el efecto de la rotura del oleaje característico de cada circunstancia modelada. La explicación del modelo se encuentra en el anexo "C".

Las corrientes que se producen por la rotura del oleaje alrededor del Cayo Bolívar debido al régimen medio del oleaje se encuentran en la figura 8.4.1. En ella se observa una corriente hacia el oeste de ~10 cm/s a lo largo del costado sureste del Cayo producida por el oleaje incidente sobre la rompiente. También se hace evidente que la corriente se intensifica en la punta oriental del Cayo y que es mucho menor en los demás costados.

La simulación de las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 8.3.5, en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero las corrientes se intensifican al interior de la laguna y alrededor de la punta sur del Cayo con valores cercanos a 0.5 m/s.

Figura 8.4. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Bolivar.

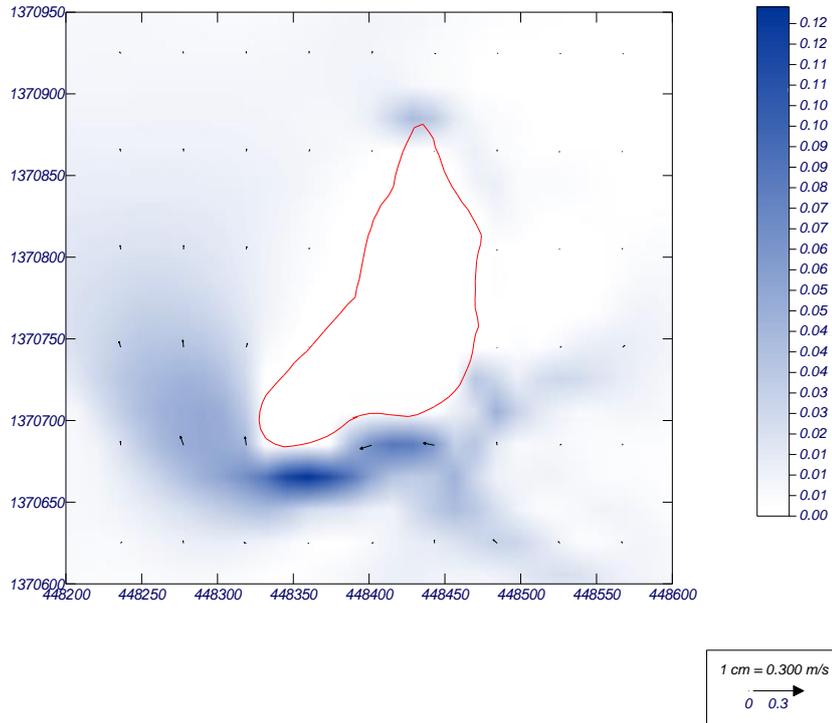
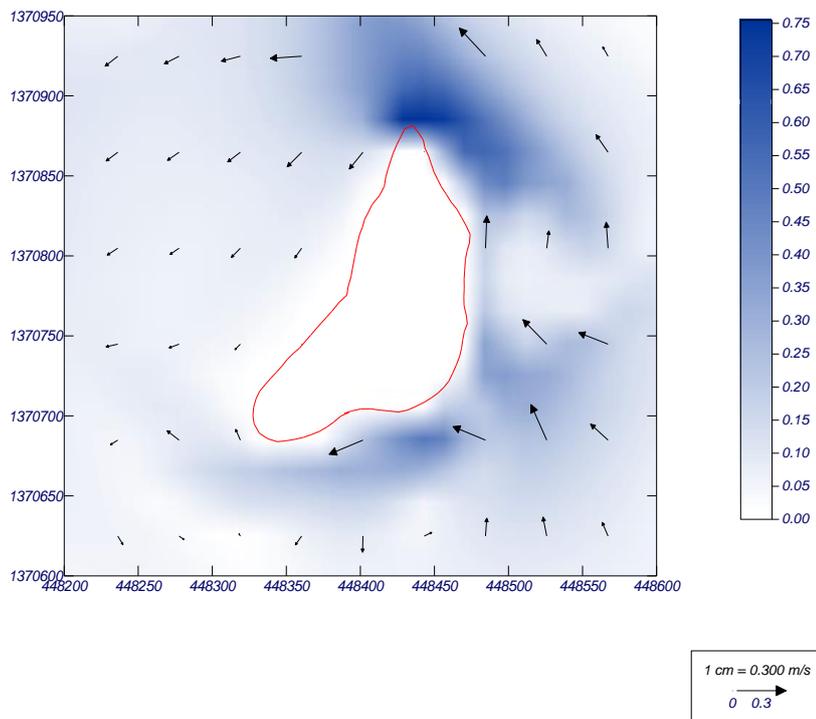
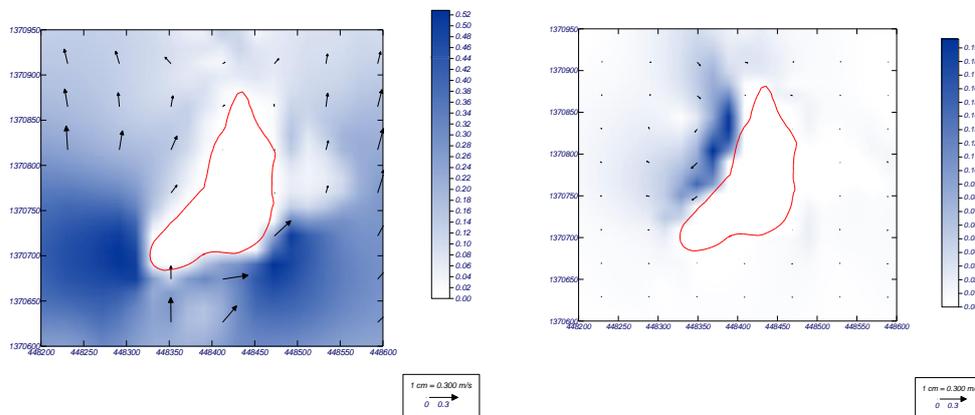


Figura 8.4. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Bolivar producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12).



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento de esta naturaleza y cuyos resultados se encuentran en la figura 8.3.6. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que las corrientes se inviertan a lo largo de la rompiente hacia el norte. En la punta sur se divide y produce corrientes de alrededor de medio metro por segundo cerca de la punta sur del Cayo. Cuando el oleaje producido por un huracán viene del Norte (figura 8.3.6) las corrientes no son muy intensas en el interior de la laguna arrecifal y se invierte todo el sistema de corrientes medias. Para esta condición el Cayo no tiene protección natural quedando muy expuesto a perder grandes extensiones de arena de sus playas en el norte.

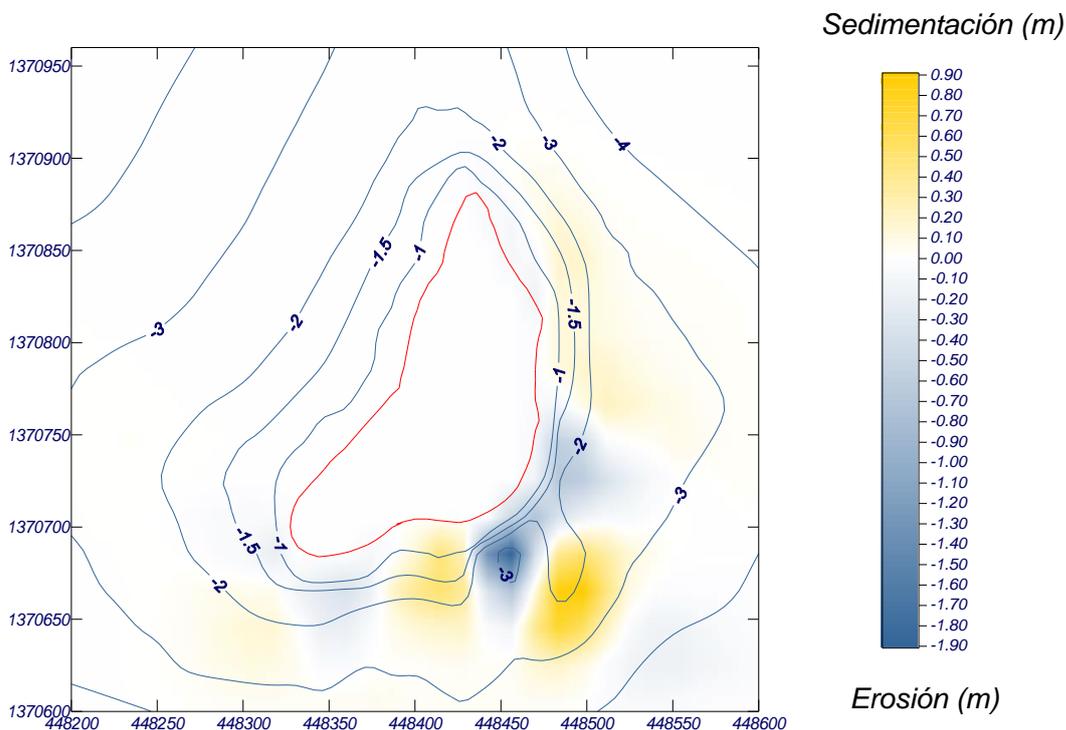
Figura 8.4. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).



## 8.5 BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE CAYO BOLIVAR

El análisis de erosión y sedimentación producto de las variaciones de las corrientes de deriva litoral, producidas por las roturas del oleaje se muestra en las figuras.. El diagrama muestra que las condiciones de oleaje alrededor del Cayo son tales que, en la media, la condición generalizada en todas las playas es hacia la erosión. Al entender que el retroceso en el Cayo no ha hecho cambiar el área de este en las últimas décadas de manera sustancial, se atribuye entonces esta tendencia al aumento del oleaje ya sea porque la barrera arrecifal está más profunda, al cambio de dirección del mismo, a la disminución de la cantidad de arena que llega.

Figura 8.5. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual.



La simulación del balance de erosión/sedimentación debido a las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura... en ella se observa un

comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero el efecto es más acentuado erosionando la punta sureste del cayo..

Figura 8.5. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo

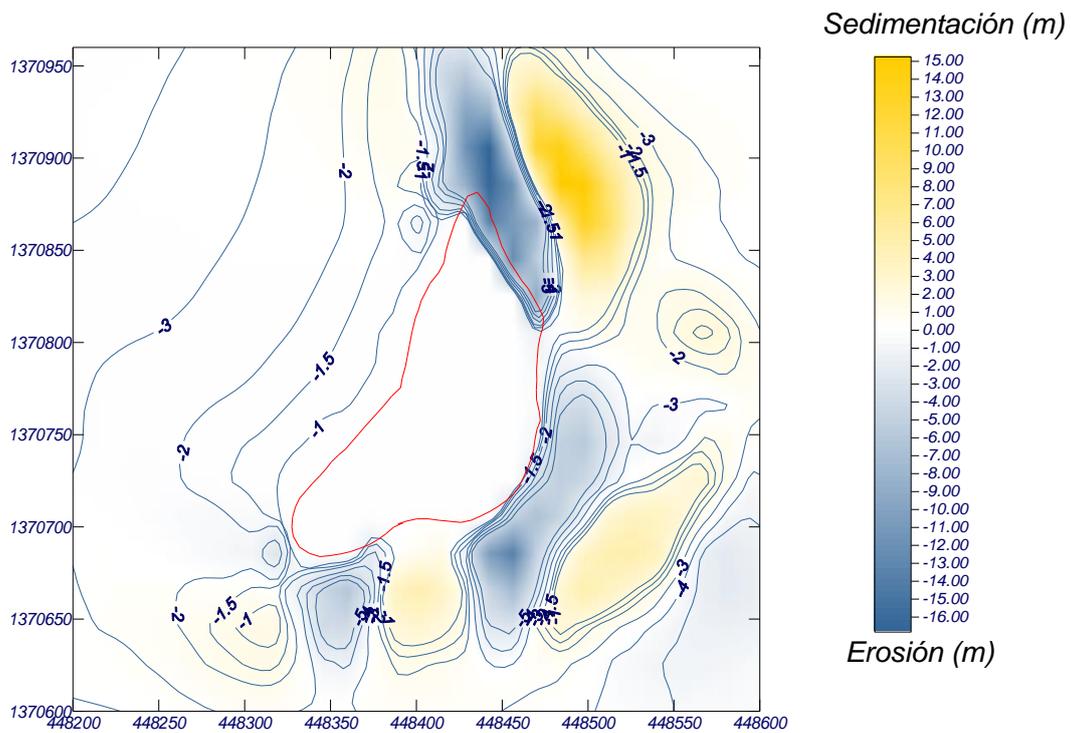
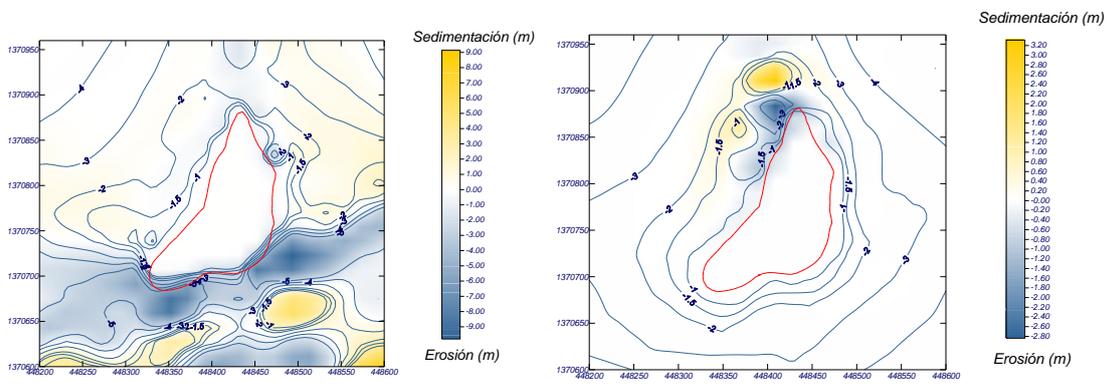


Figura 8.5. 3 Mapas de erosión/sedimentación, producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).



## 9. CAYO ALBUQUERQUE

Imagen 9. 1 Fotografía aérea de cayo Albuquerque.



Tomado en enero de 2010

## 9.1 DESCRIPCION GENERAL

El Banco Albuquerque se localiza entre los 12°08'-12°12' N y 81°49'-81°54' W, área total de 63,8 km<sup>2</sup>, a unos 35 Km al SW de San Andrés, presenta una forma circular, incluyendo la terraza pre-arrecifal, el diámetro dirección E-W excede los 8 km. El atolón presenta dos Cayos (Cayo del norte y Cayo del sur o de los Pescadores) con un área emergida de 0.1 km<sup>2</sup>.

Figura 9.1 1 Localización espacial, en la carta náutica COL 203 y la imagen satelital (Oceandots, 2010) del Cayo Albuquerque en el Caribe colombiano.

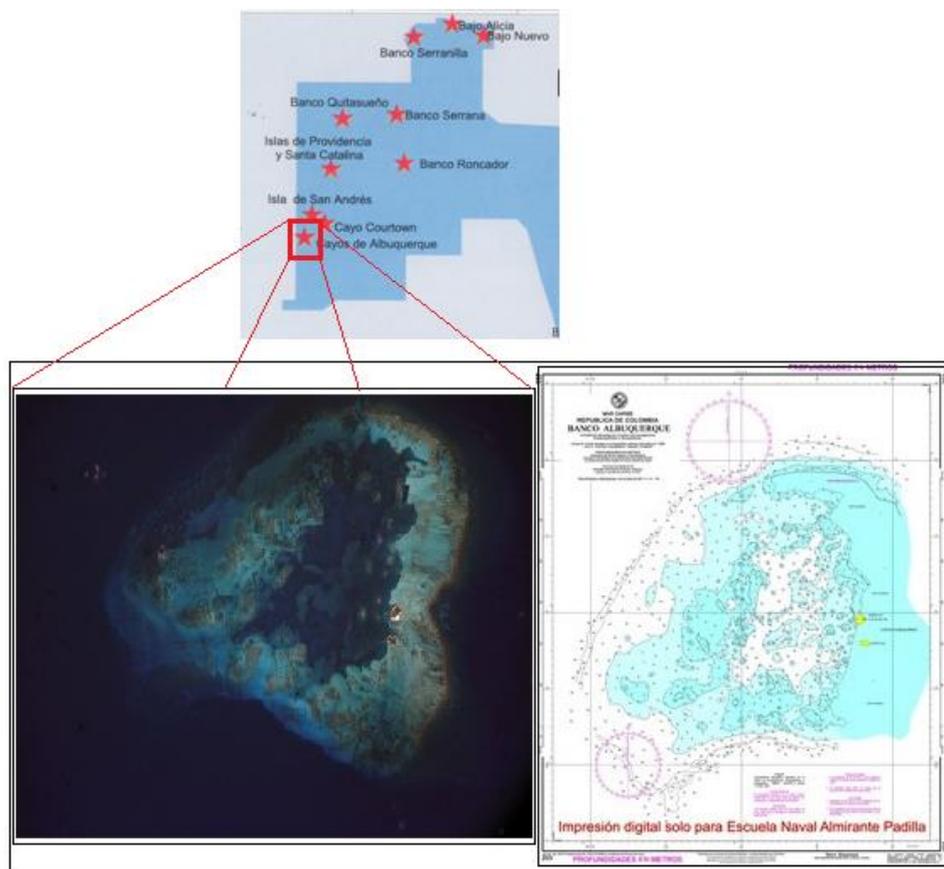
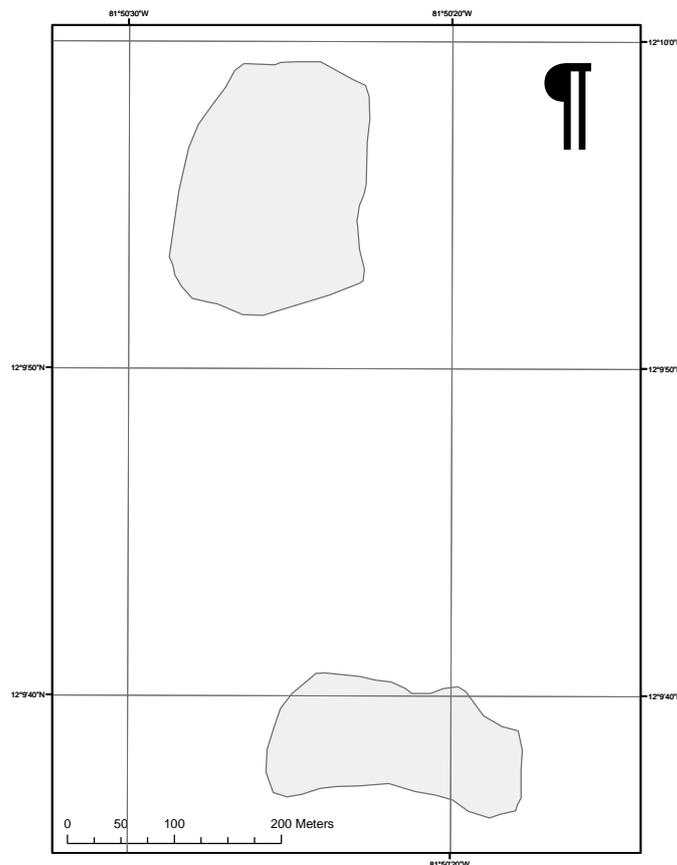


Figura esquema adaptada de INVEMAR (2009)

El margen de barlovento (N, E, y SE) del Banco está caracterizado por una terraza suavemente inclinada que súbitamente cambia su ángulo y da lugar a un cantado o talud exterior muy pronunciado. El borde del talud se encuentra a 24-30m de profundidad. Un escalón casi horizontal, de 8-35m de ancho y cubierto en su mayoría por sedimentos calcáreos, se presenta a unos 40 m de profundidad y representa casi toda la periferia del atolón (Geister y Díaz, 2010).

Las dos islas existentes en el atolón son acumulaciones de sedimentos arrastrados por tormentas sobre la terraza lagunar. El Cayo del Norte, la mayor de ellas, sirve actualmente como puesto militar de la Armada de Colombia y tiene un faro. El Cayo del Sur es más pequeño y es ocupado esporádicamente por pescadores.

Figura 9.1 2 Línea de costa de los Cayos en el Banco Albuquerque.



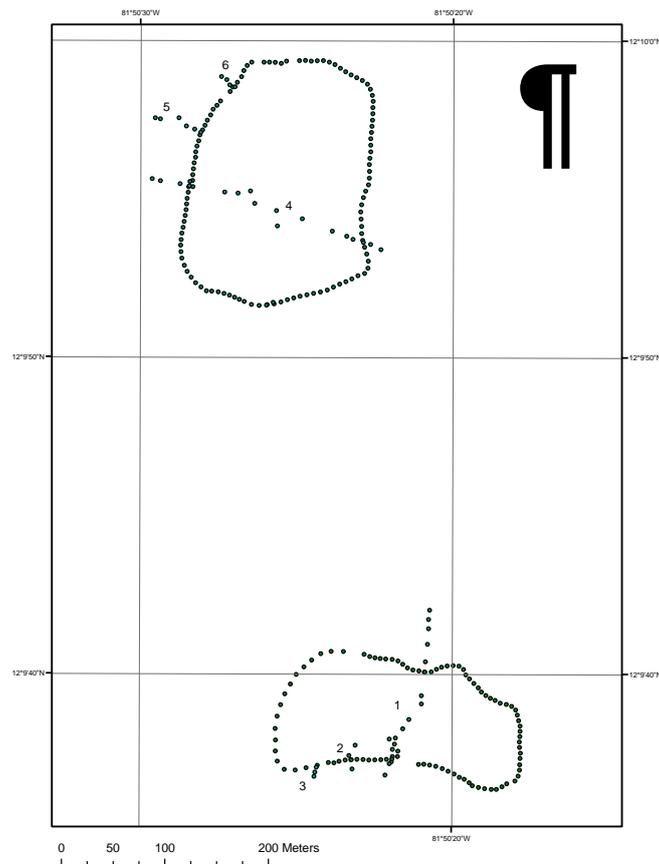
Como los otros Cayos visitados, estas partes emergidas tienen una base en piedra caliza que emerge en varios puntos y que se ven con orientaciones definidas y que por su condición de casi emerger, sirven como trampa del caracolejo y la arena que llega de la rompiente.

Tanto Cayo Albuquerque como Cayo Bolívar se diferencian de los Cayos del Norte en que no se encuentran en un extremo del semi-atolon que se ha formado si no que están enfrentando una zona de la rompiente que pareciera que se ha derrumbado, de tal forma que al haber más profundidad, el oleaje genera un gradiente que conduce la arena un poco más adentro de la laguna arrecifal. La dinámica del movimiento de la arena en los bancos es muy activa y se puede observar con pocas horas de permanencia en ellos.

## 9.2 PLANTA Y PERIL

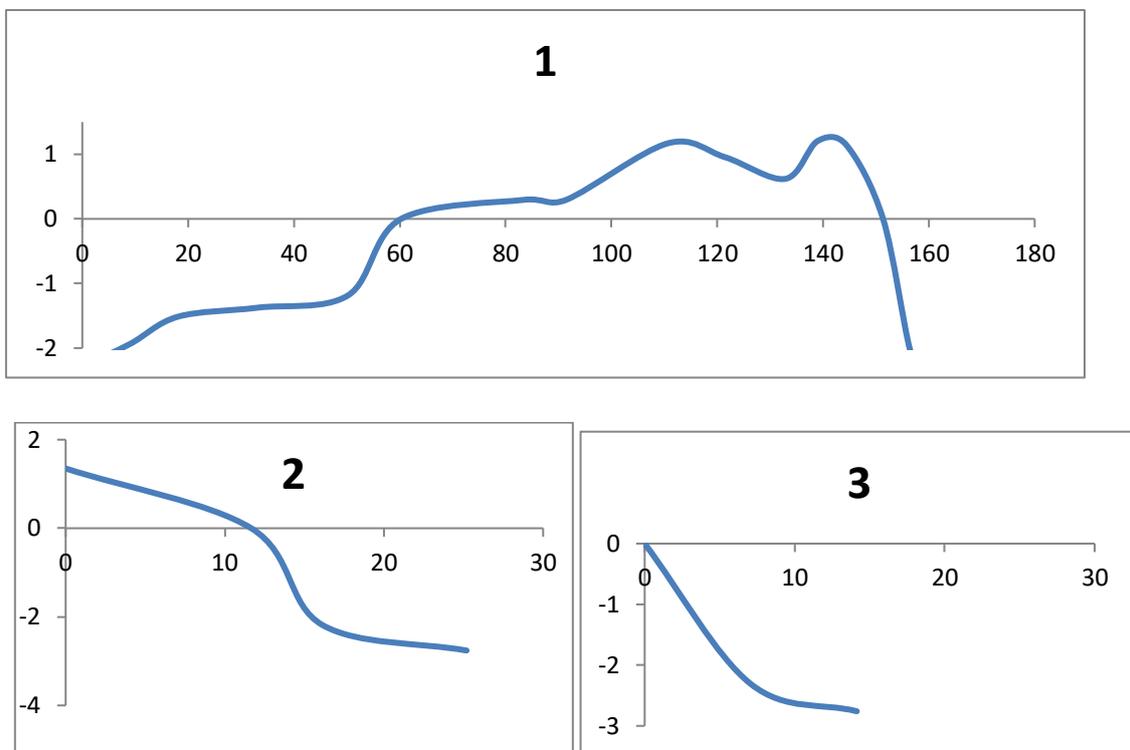
La figura 9.2.1, esquematiza los perfiles de playa y topográficos tomados en los cayos del atolón de Albuquerque.

Figura 9.2. 1 Puntos de perfiles de playa y topográficos tomados en Albuquerque.



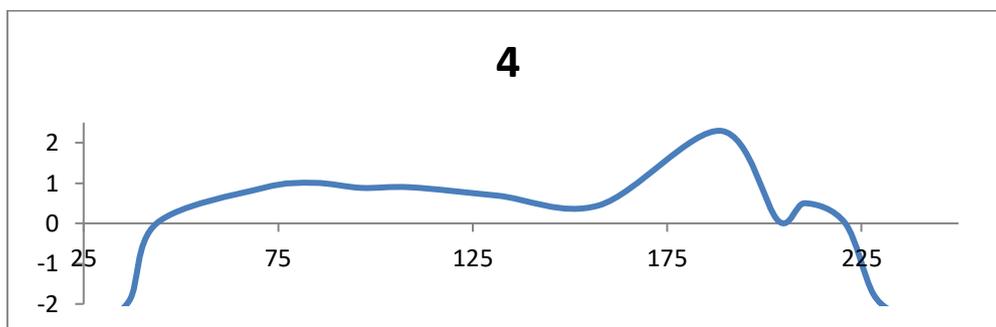
Los perfiles 1 a 3 graficados en la figura 37, representan las alturas observadas en el Cayo adyacente al Cayo habitado en el atolón de Albuquerque.

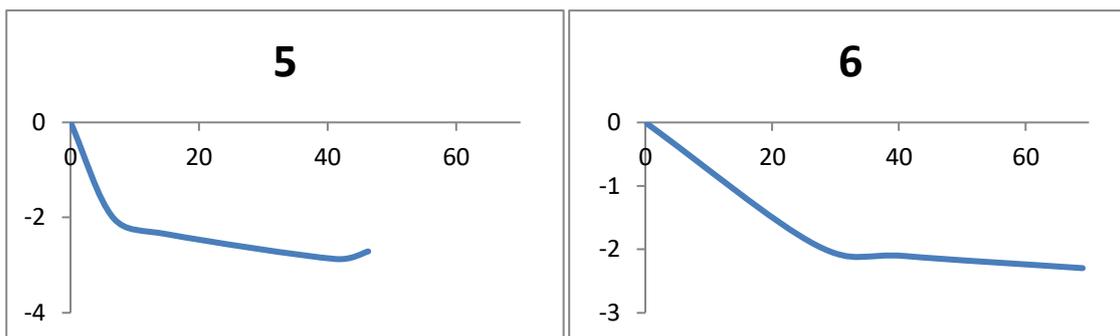
Figura 9.2. 2 Perfiles de playa y topográfico del Cayo con vegetación adyacente a Cayo Albuquerque



Los perfiles 4 a 6, son los característicos de las alturas en el Cayo habitado por personal de infantería de marina (Figura 9.2.3).

Figura 9.2. 3 Perfiles de playa y topográfico del Cayo Albuquerque

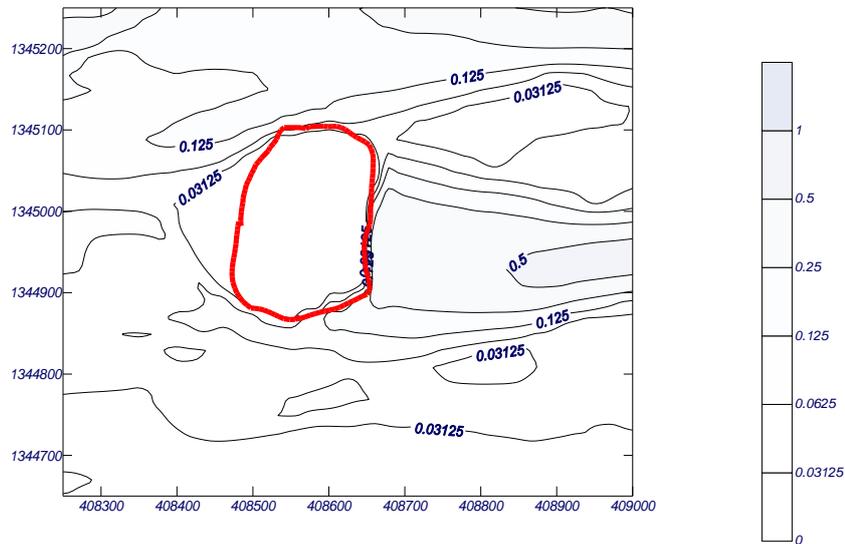




### 9.3 REGIMEN DE OLAJE EN CAYO ALBUQUERQUE

La base de datos empleada para la obtención del régimen medio del oleaje en el Cayo Albuquerque se desprendió a partir de los valores reportados de los parámetros del clima marítimo correspondientes con el retro-análisis descrito en el capítulo 4. Con base en esos datos se entregaron las condiciones de contorno a los modelos numéricos con el propósito de propagar el oleaje desde las aguas con profundidad indefinida hasta las playas de los Cayos. En el presente capítulo se presenta el resultado de la modelación para la condición media del clima del área (figura 9.3.1), y para el oleaje extremo que se produce con las tormentas en el año conocido como Hs12 (figura 9.3.2). Así mismo, se quiso estudiar dos condiciones diferentes de corto plazo cuando un huracán puede pasar por los costados norte y sur del Cayo, produciendo oleajes en esos sentidos. Por tal motivo se modelaron las condiciones de oleaje del norte y del sureste en condiciones huracanadas (figura 9.3.3).

Figura 9.3. 1 Cayo Albuquerque. Altura de ola significativa (Hs). Régimen medio.



El Hs 12 hace referencia a la altura de ola significante que es excedida 12 horas al año. La propagación del oleaje con estos datos se presenta como una aproximación al clima extremal en el área

Figura 9.3. 2 Parámetros de oleaje empleados en la propagación extremal del oleaje en Cayo Albuquerque.

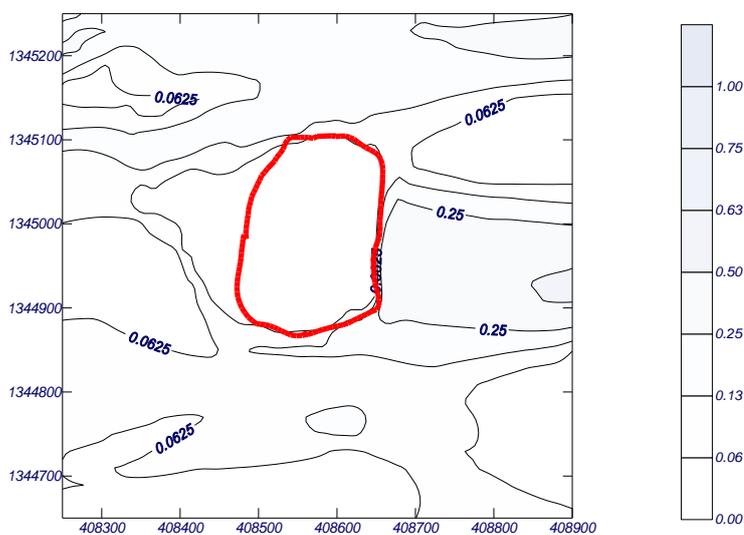
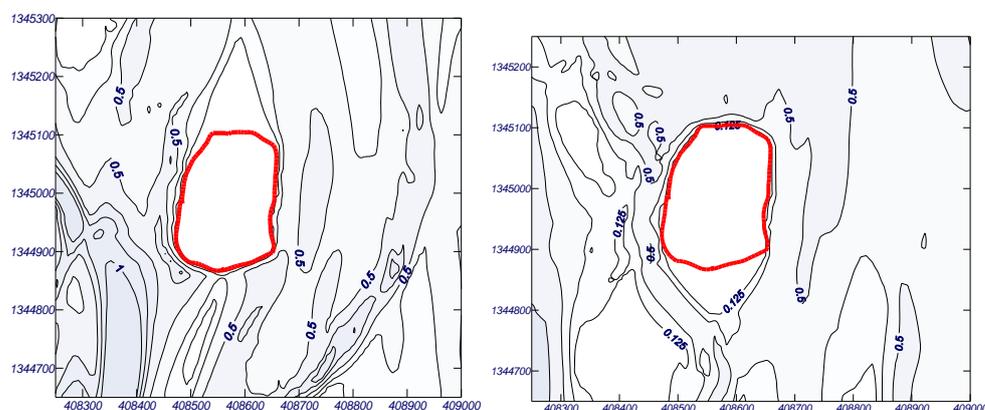


Figura 9.3. 3 Cayo Albuquerque. Altura de ola significativa (Hs). Régimen extremal.



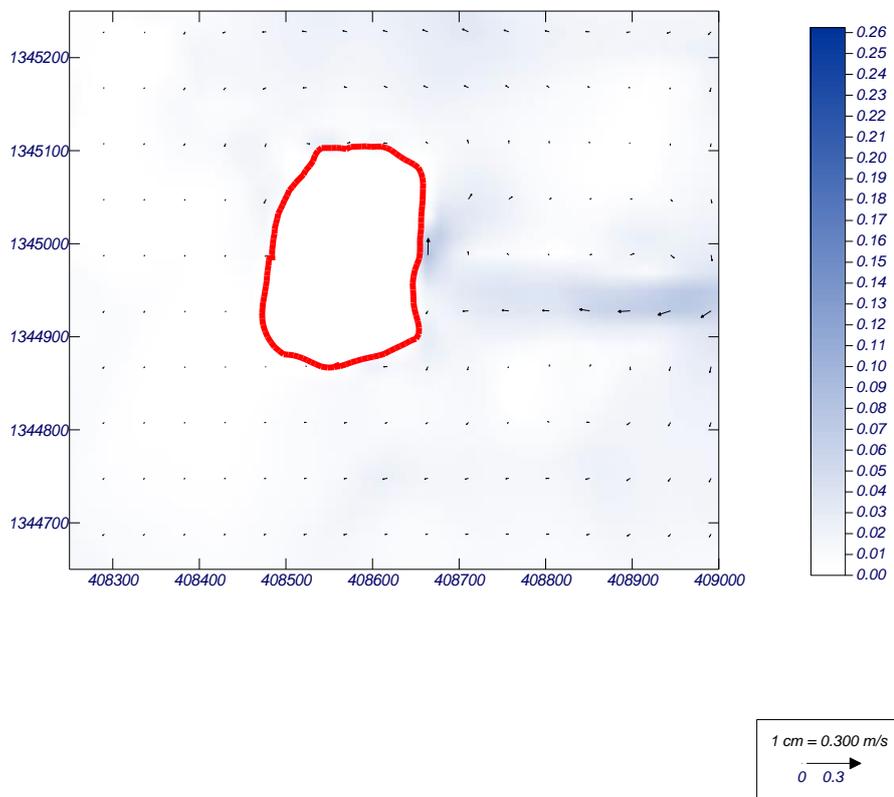
Las simulaciones muestran que el Cayo es muy afectado por un huracán que produzca oleaje del suroeste mientras que será menos vulnerable a un oleaje del norte, con olas llegando a la playa con alturas menores de 1m, lo que producirá poca erosión en esas playas. Si el huracán genera oleaje que llegue del suroeste la barrera arrecifal no va a filtrar mucho del oleaje incidente, el oleaje va a llegar muy alto al costado occidental y afectará la playa de ese costado. La playa norte y el de la laguna se protegen de este tipo de oleaje extremo.

#### 9.4 REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA

Las corrientes de rotura se obtuvieron mediante la utilización del modelo OLUCA en modo monocromático con el objeto de propagar el efecto de la rotura del oleaje característico de cada circunstancia modelada. La explicación del modelo se encuentra en el anexo "C" .

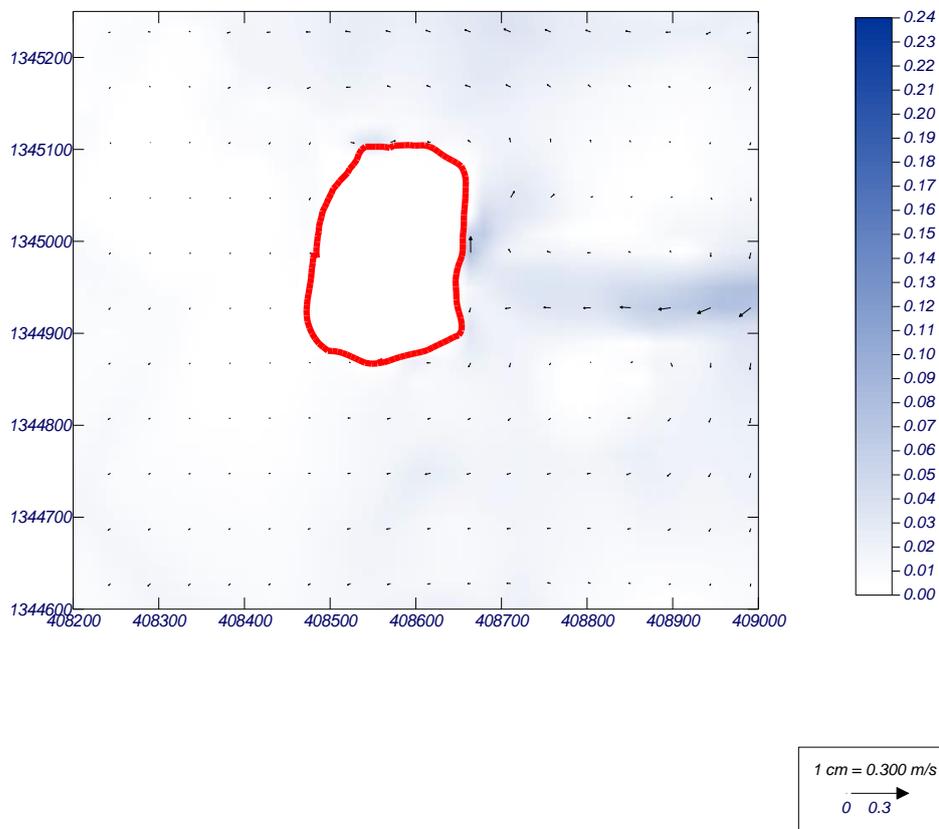
Las corrientes que se producen por la rotura del oleaje alrededor del Cayo Albuquerque debido al régimen medio del oleaje se encuentran en la Figura 9.4.1. En ella se observa una corriente hacia el oeste de ~30 cm/s a lo largo del costado sureste del Cayo producida por el oleaje incidente sobre la rompiente. También se hace evidente que la corriente se intensifica en la punta oriental del Cayo y que es mucho menor en los demás costados.

Figura 9.4. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Albuquerque.



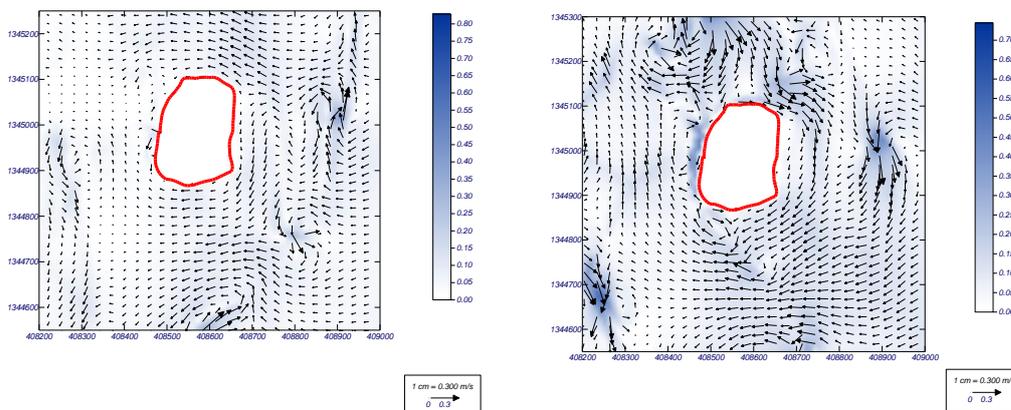
La simulación de las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 9.4.2, en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero las corrientes se intensifican al interior de la laguna y alrededor de la punta sur del Cayo con valores cercanos a 0.5 m/s.

Figura 9.4. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Albuquerque producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12)



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento categoría III en la escala Saffir-Simpson y cuyos resultados se encuentran en la figura 9.4.3. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que las corrientes se inviertan a lo largo de la rompiente hacia el Este. En la punta sur se divide y produce corrientes de alrededor de medio metro por segundo cerca de la punta oeste del Cayo. Cuando el oleaje producido por un huracán viene del Norte (figura 9.4.3) las corrientes son muy intensas en el interior de la laguna arrecifal y se invierte todo el sistema de corrientes medias. Para esta condición el Cayo no tiene protección natural quedando muy expuesto a perder grandes extensiones de arena de sus playas en el norte.

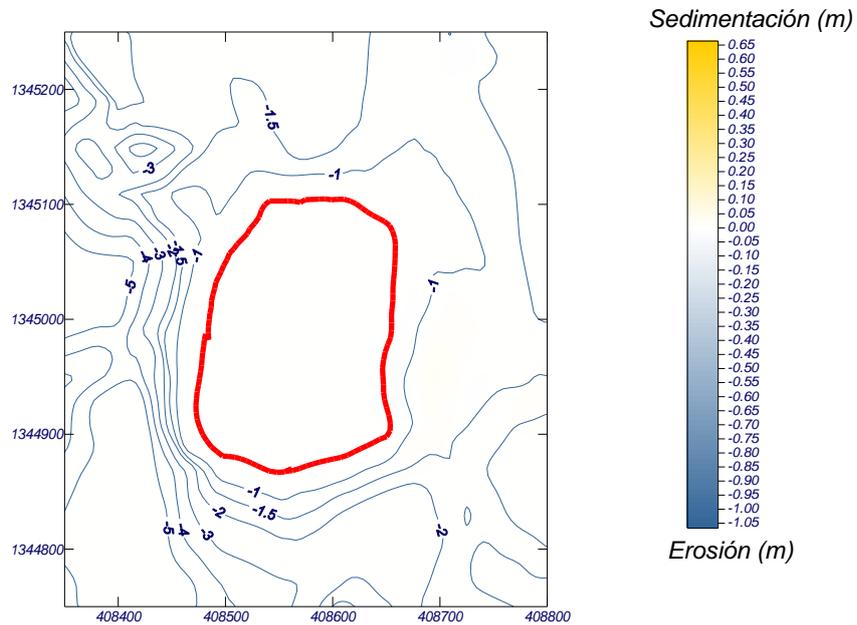
Figura 9.4. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).



## 9.5 BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE ALBUQUERQUE

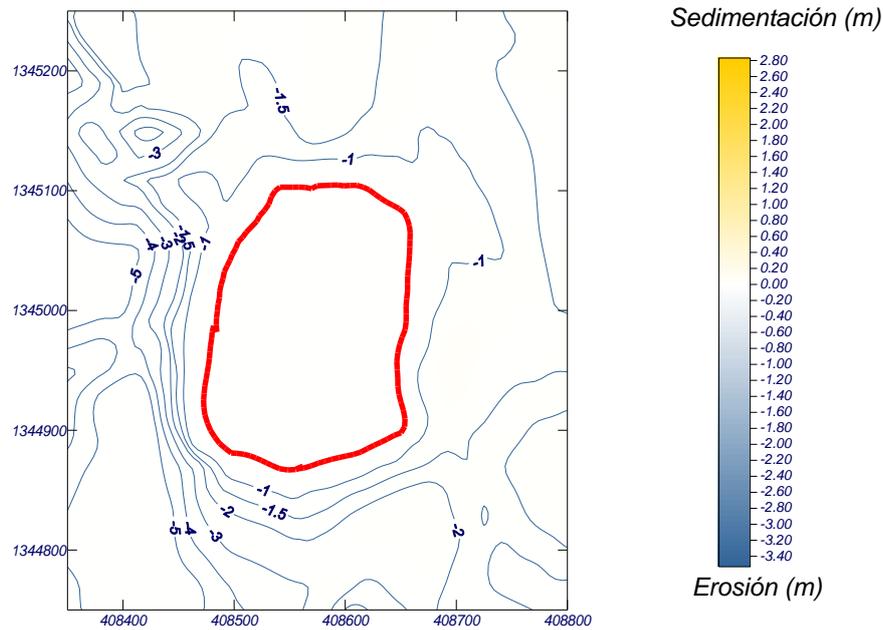
El análisis de erosión y sedimentación producto de las variaciones de las corrientes de deriva litoral, producidas por las roturas del oleaje se muestra en las figuras 9.5.1 y 9.5.2. El diagrama muestra que las condiciones de oleaje alrededor del Cayo son tales que, en la media, la condición generalizada en todas las playas es hacia la erosión. Al entender que el retroceso en el Cayo no ha hecho cambiar el área de este en las últimas décadas de manera sustancial, se atribuye entonces esta tendencia al aumento del oleaje ya sea porque la barrera arrecifal está más profunda, al cambio de dirección del mismo, a la disminución de la cantidad de arena que llega.

Figura 9.5. 1 Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual.



La simulación del balance de erosión/sedimentación debido a las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 9.5.2, en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero el efecto es más acentuado.

Figura 9.5. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo



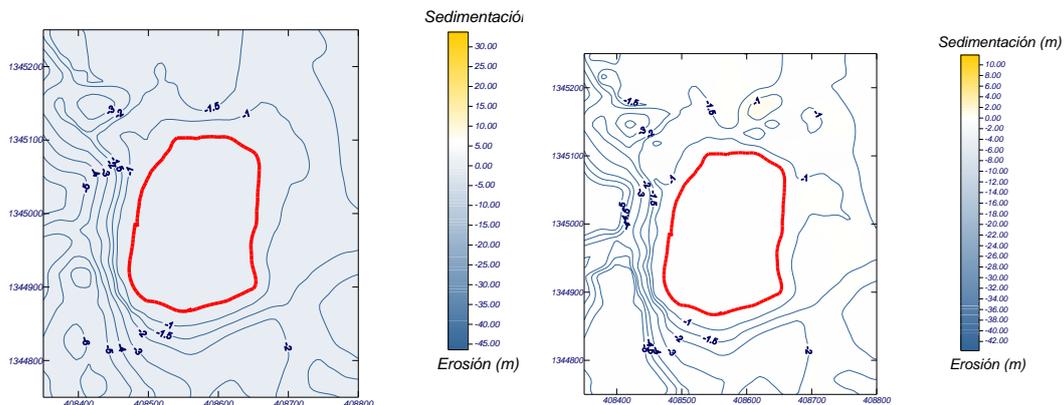
MOPLA 2.0: Victor Pinzon

Programa desarrollado por



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento de esta naturaleza y cuyos resultados se encuentran en la figura.... Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que la erosión sea mayor en ese costado del Cayo pero el norte está protegido mientras que cuando el oleaje viene del norte, el proceso erosivo de la playa del Oeste es tal que también produce la pérdida de varios metros de playa.

Figura 9.5. 3 Mapas de erosión/sedimentación, producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha).

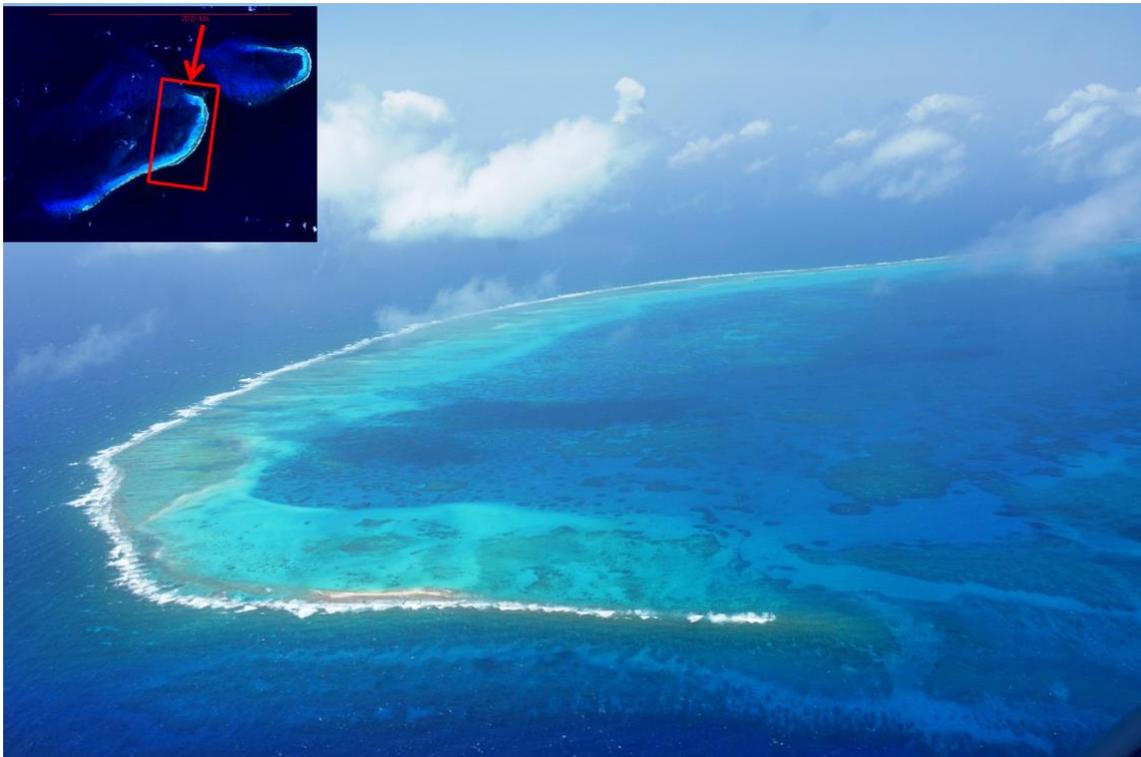


## 10. EL CAYO DEL ATOLON BAJO NUEVO

### 10.1 DESCRIPCION GENERAL

Bajo Nuevo se localiza a 60 km al E del Banco Serranilla y a 240 km al NE del Banco Serrana; es el bajo coralino más oriental de la parte inferior de la elevación centroamericana. El banco, de forma alargada hacia el NE, tiene un área de 9 por 26 km. (fig. 7.1). El cayo de Bajo Nuevo está protegido del oleaje oceánico por arrecifes discontinuos de barlovento. Según Geister y Díaz (2009) hoy por hoy no se sabe si estos arrecifes están vivos o son solamente rasgos morfológicos.

Figura 10.1. 1 Imagen de satélite de Bajo Nuevo. Obsérvese el canal profundo que divide las dos rompientes y la posición del cayo emergido es señalada



Como muchos de los arrecifes Bajo Nuevo crece sobre una topografía calcárea heredada del pleistoceno, pero en el Norte del Archipiélago (Serranilla, Bajo Alicia y Bajo Nuevo) la producción de carbonatos de plataforma, particularmente el crecimiento de arrecifes, parece estar limitada. (Geister y Diaz, 2009). Por esta razón, el presupuesto de arena que pueda captarse en estos bajos del norte se convierte en prioridad con relación a los del sur donde aparentemente la producción es mayor o se mantiene.

El Cayo de Bajo Nuevo es un banco que tiene unas decenas de metros de longitud y que apenas emerge (Imagen 10.1). Es un lugar muy apartado de Colombia pero posee gran importancia desde el punto de vista geopolítico porque en él se ha instalado un faro desde el cual Colombia ha determinado soberanía y produce mar territorial en límites con Jamaica y Haití. La parte emergida es muy pequeña y baja, con poca defensa natural (Imagen 10.2). Se recomienda que se efectúe una campaña oceanográfica que permita evaluar la posibilidad de elevar dicho arrecife de tal forma que la playa adquiriera un nuevo perfil de equilibrio en planta y en perfil.

Imagen 10. 1 Vista aérea de la plataforma calcárea desnuda y la poca arena que tiene Bajo Nuevo, como se escurre en el centro hacia la plataforma. Esta pérdida de arena es común con vientos del norte cuando hay pasos de frentes fríos.



Tomado ¿?

Imagen 10. 2 Vista de Bajo Nuevo (arriba) desde sotavento hacia el Este, (abajo) desde el Este. Se aprecia la plataforma sobre donde se construyó el faro, una pequeña planicie de caracolejo.

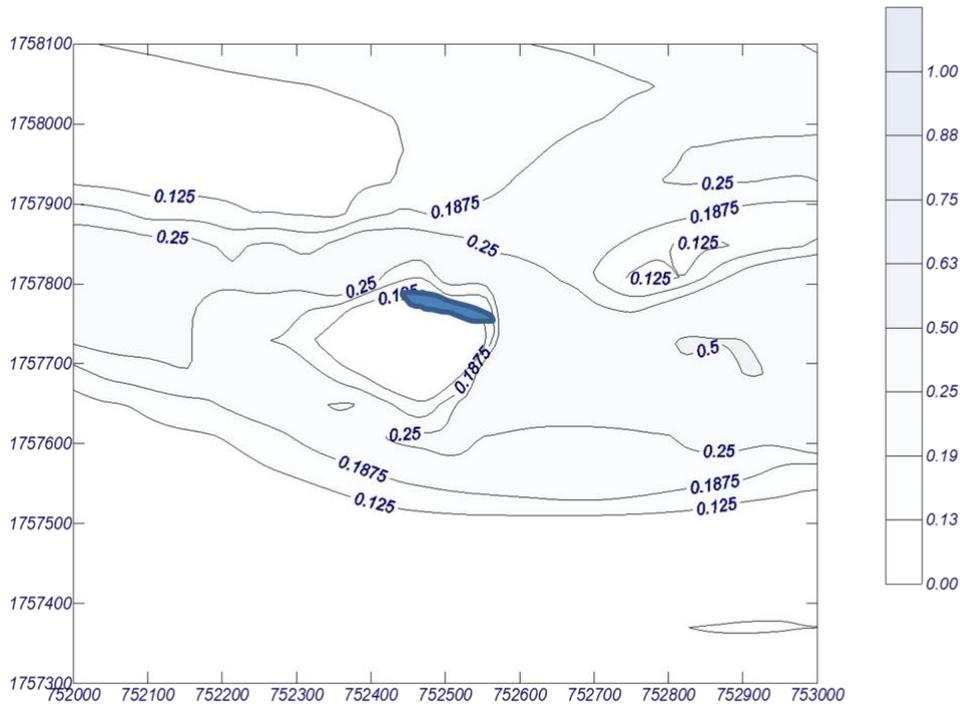


## 10.2 MORFODINÁMICA DE PLAYAS

La base de datos empleada para la obtención del régimen medio del oleaje en Bajo Nuevo se desprendió a partir de los valores reportados de los parámetros del clima marítimo correspondientes con el retro-análisis descrito en el capítulo 4. Con base en esos datos se entregaron las condiciones de contorno a los modelos numéricos con el propósito de propagar el oleaje desde las aguas con profundidad indefinida hasta las playas de los Cayos. En el presente capítulo se presenta el resultado de la modelación para la condición media del clima del área, y para el oleaje extremo que se produce con las tormentas en el año conocido como Hs12. Así mismo, se quiso estudiar dos condiciones diferentes de corto plazo cuando un huracán puede pasar por los costados norte y sur del

Cayo, produciendo oleajes en esos sentidos. Por tal motivo se modelaron las condiciones de oleaje del norte y del sureste en condiciones huracanadas.

Figura 10.2. 1 Altura de ola significativa en Bajo Nuevo en condiciones medias de oleaje.



El Hs 12 hace referencia a la altura de ola significativa que es excedida 12 horas al año. La propagación del oleaje con estos datos se presenta como una aproximación al clima extremal en el área como se puede observar, el sistema se parece mucho al régimen climático debido a que son niveles similares. Sin embargo muestra cómo al Cayo le llega un oleaje muy alto y no tiene mayor defensa frente a él para romperlo.

Figura 10.2. 2 Parámetros de oleaje empleados en la propagación extremal del oleaje. en Cayo Bajo Nuevo

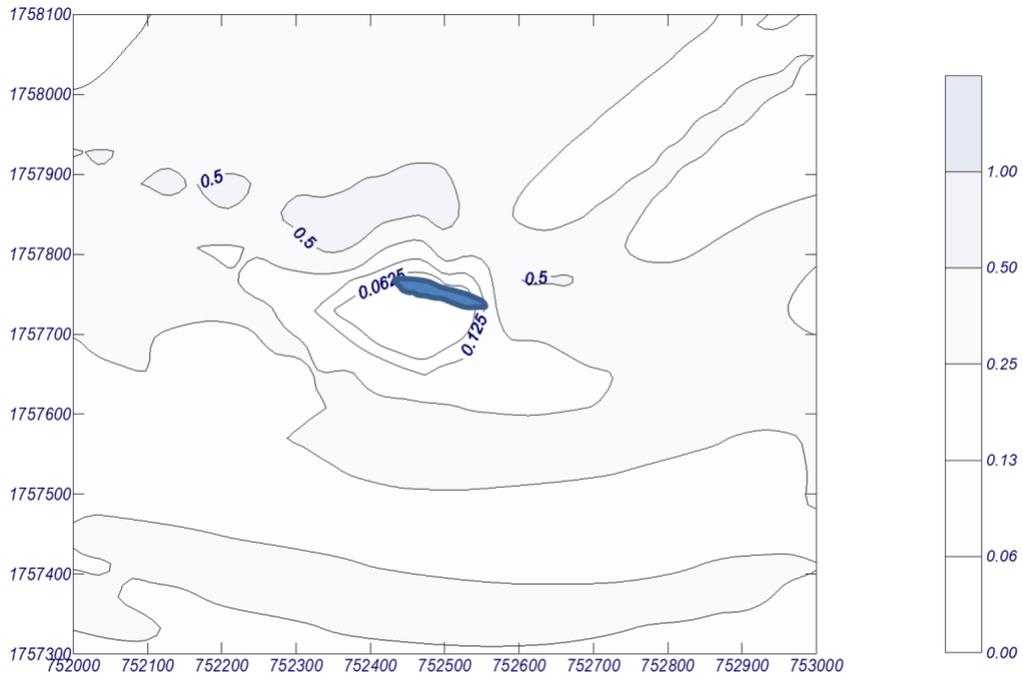
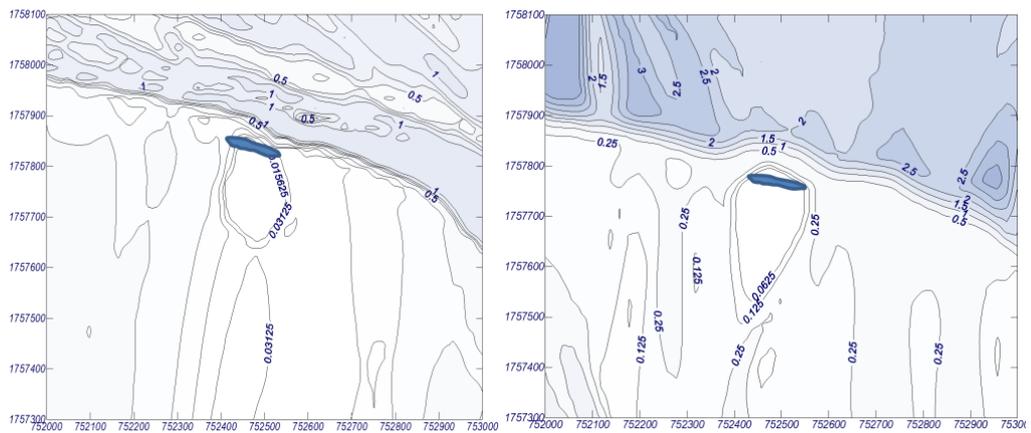


Figura 10.2. 3 Cayo de Bajo Nuevo. Altura de ola significativa (Hs). Régimen extremal.



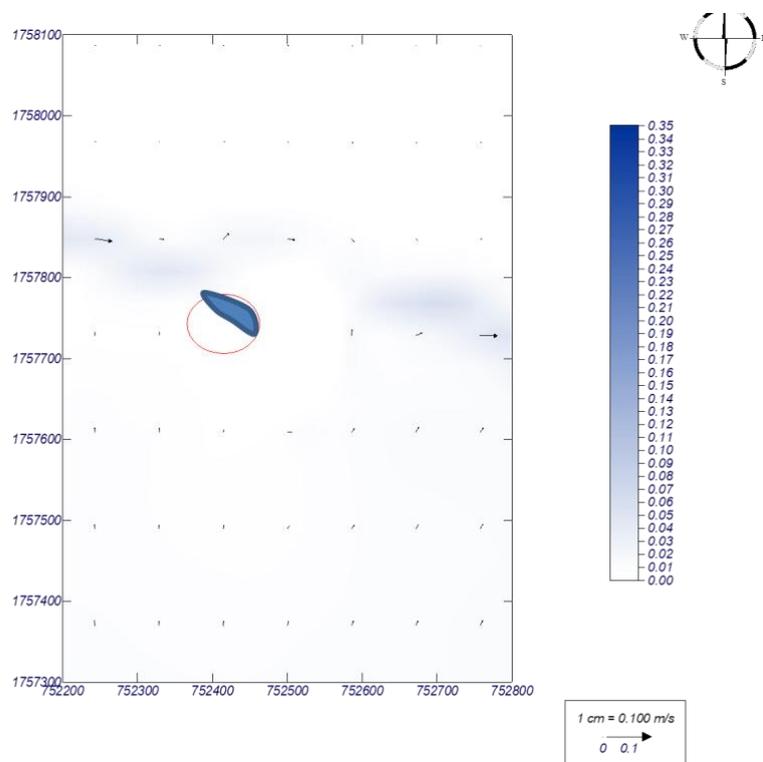
Las simulaciones muestran que el Cayo es muy afectado por un huracán que produzca oleaje del suroeste mientras que será menos vulnerable a un oleaje del norte, con olas llegando a la playa con alturas menores de 1m, lo que producirá poca erosión en esas playas. Si el huracán genera oleaje que llegue del suroeste la barrera arrecifal no va a filtrar mucho del oleaje incidente, el oleaje va a llegar muy alto al costado occidental y afectará la playa de ese costado. La playa norte y el de la laguna se protegen de este tipo de oleaje extremo.

### 10.3 REGIMEN DE CORRIENTES DE ROTURA

Las corrientes de rotura se obtuvieron mediante la utilización del modelo OLUCA en modo monocromático con el objeto de propagar el efecto de la rotura del oleaje característico de cada circunstancia modelada. La explicación del modelo se encuentra en el anexo "C".

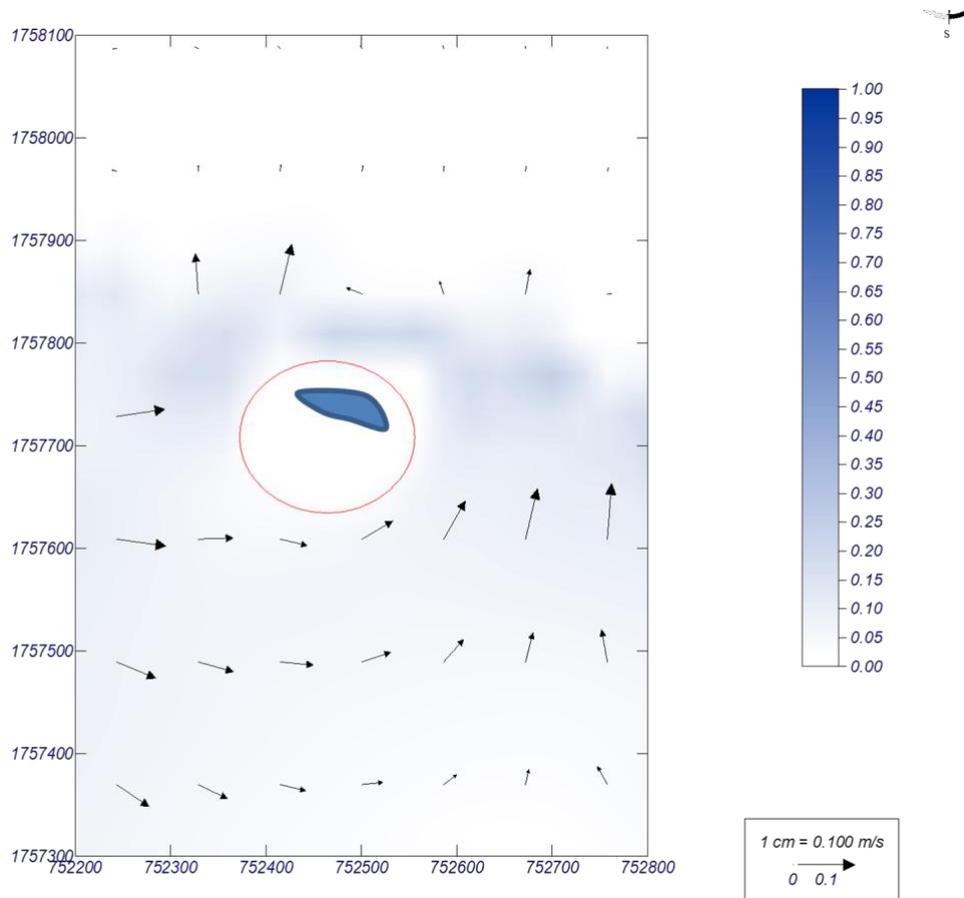
Las corrientes que se producen por la rotura del oleaje alrededor del Cayo de Bajo Nuevo debido al régimen medio del oleaje se encuentran en la Figura 10.3.1. En ella se observa una corriente hacia el oeste de ~30 cm/s a lo largo del costado sureste del Cayo producida por el oleaje incidente sobre la rompiente. También se hace evidente que la corriente se intensifica en la punta oriental del Cayo y que es mucho menor en los demás costados.

Figura 10.3. 1 Vectores de corriente. Régimen medio, Cayo Bajo Nuevo. Periodo 5.3s, Hs=0.98m, dirección= N82E.



La simulación de las corrientes alrededor del Cayo cuando ocurre oleaje extremal que viene en la dirección del flujo medio de energía se encuentra en la figura 10.3.2, en ella se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio pero las corrientes se intensifican al interior de la laguna y alrededor de la punta sur del Cayo con valores cercanos a 0.5 m/s.

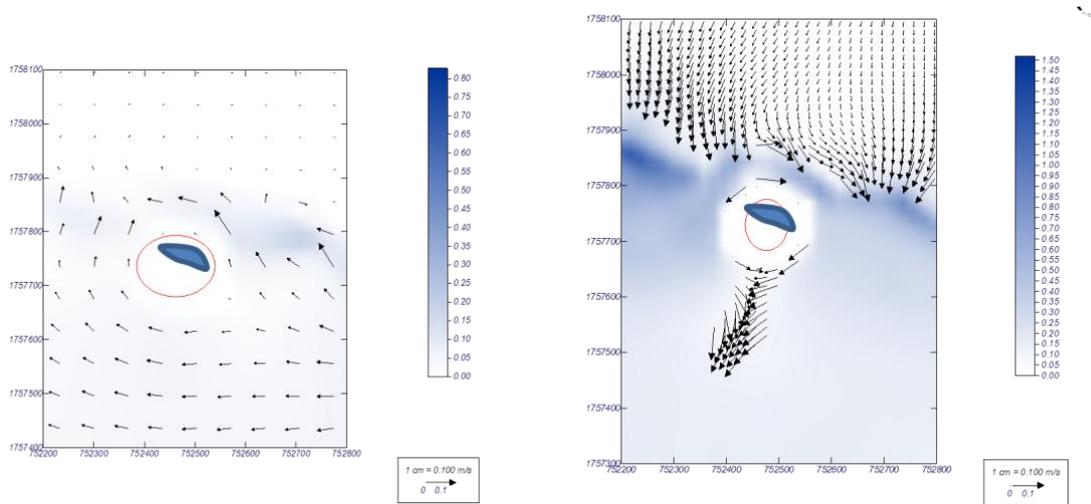
Figura 10.3. 2 Las corrientes costeras alrededor del Cayo Bajo Nuevo producidas por el régimen extremal del oleaje sobre el Cayo (Hs12).



Con el objeto de estudiar los efectos corto plazo como los que puede desarrollar el paso de un huracán por los Cayos, la cual es una situación común, se desarrollaron simulaciones con las direcciones y las intensidades típicas de un evento de esta naturaleza y cuyos resultados se encuentran en la figura 10.3.3. Cuando el oleaje de un huracán viene del suroeste hace que las corrientes se inviertan a lo largo de la rompiente hacia el Este. En la punta sur se divide y produce corrientes de alrededor de medio metro por segundo cerca de la punta oeste del Cayo. Cuando el oleaje producido por un huracán viene del Norte (figura 10.3.3) las corrientes son muy intensas en el interior de la laguna arrecifal y se invierte todo el sistema de corrientes medias. Para esta

condición el Cayo no tiene protección natural quedando muy expuesto a perder grandes extensiones de arena de sus playas en el norte.

Figura 10.3. 3 Vectores de corriente. producido por un huracán cuyo oleaje llega de dirección SW (izquierda) y de dirección Norte (derecha)



#### 10.4 BALANCE DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE BAJO NUEVO

El análisis de erosión y sedimentación producto de las variaciones de las corrientes de deriva litoral, producidas por las roturas del oleaje se muestra en las figuras 10.4.1 y 10.4.2. El diagrama muestra que las condiciones de oleaje alrededor del Cayo son tales que, en la media, la condición generalizada en todas las playas es hacia la erosión. Al entender que el retroceso en el Cayo no ha hecho cambiar el área de este en las últimas décadas de manera sustancial, se atribuye entonces esta tendencia al aumento del oleaje ya sea porque la barrera arrecifal está más profunda, al cambio de dirección del mismo, a la disminución de la cantidad de arena que llega.



Figura 10.4. 2 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo

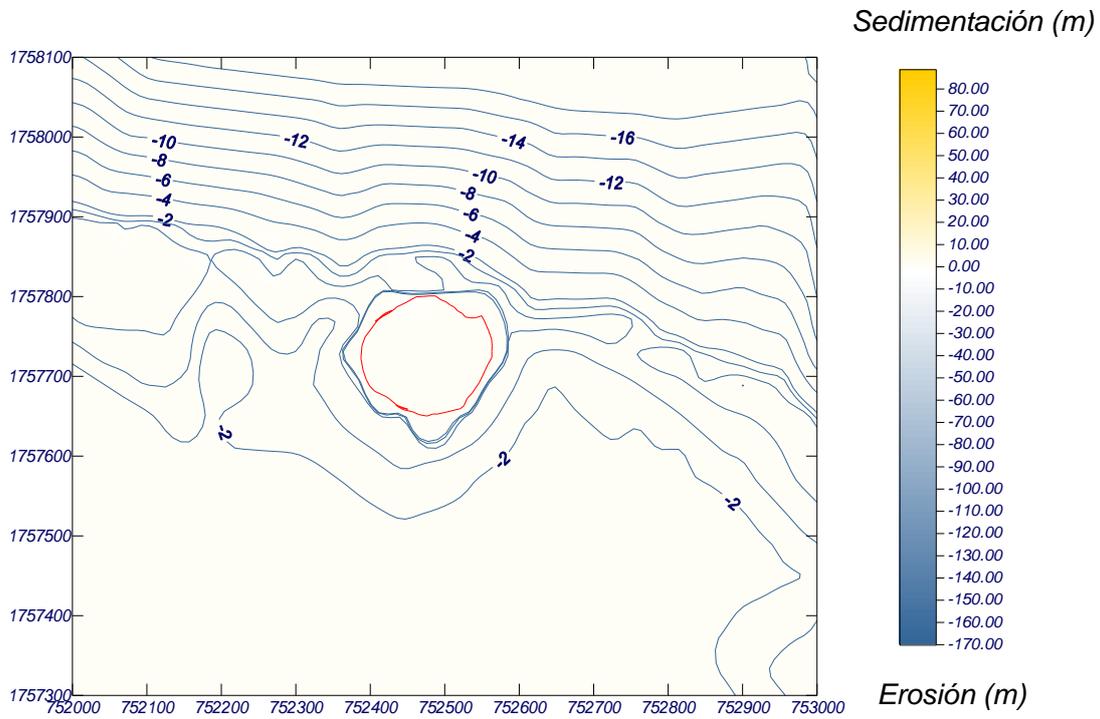
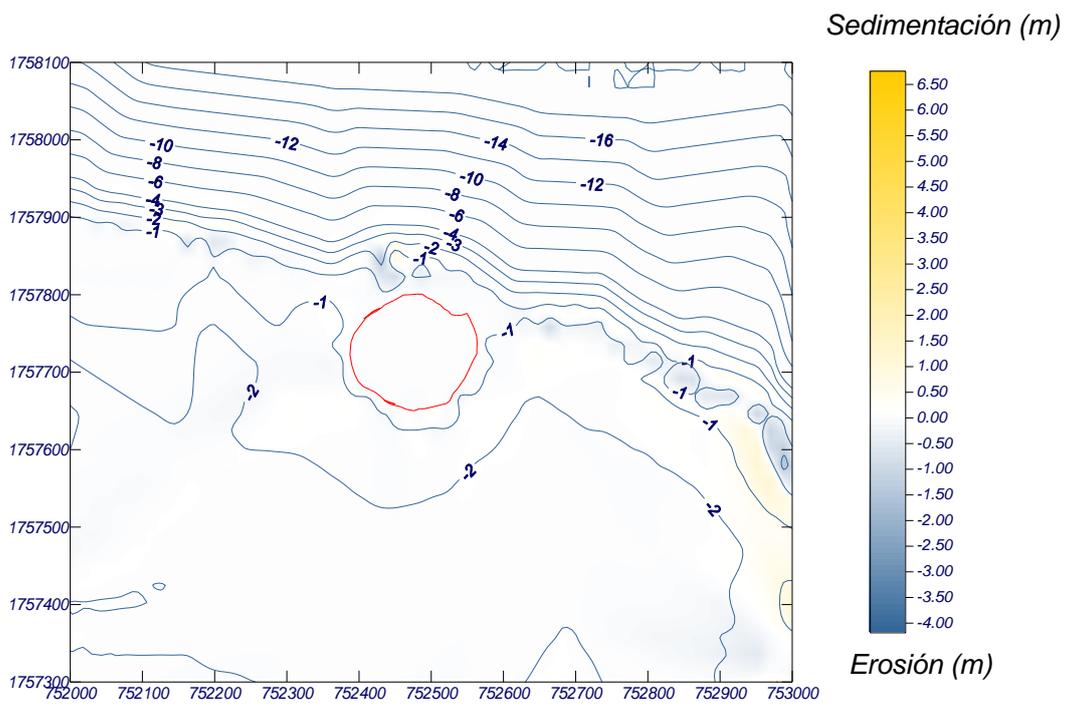


Figura 10.4. 3 El balance erosión/sedimentación para el régimen extremal en el Cayo Dirección Norte.



## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AGUDELO, P., A. RESTREPO, R. MOLARES, C. TEJADA, R. TORRES, A. OSORIO, Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe Colombiano. En: Boletín Científico CIOH No. 23, ISSN 0120-0542, 33-45, 2005.
- ANDRADE, C.A. y V.M. PINZON, Efectos de la sobre-elevación del nivel del mar por el cambio climático en las playas de los Cayos del Archipiélago de San Andrés, mar Caribe Colombia, *Bol. Cient. CIOH*, 29, 60-72. 2011.
- ZAMBRANO, J.A. y C.A. ANDRADE, Cambios en la línea de costa del Cayo Serranilla entre 1944 y 2009, Archipiélago de San Andrés, Colombia, *Bol. Cient. CIOH*, 29, 87-103, 2011.
- DÍAZ, J.A. y C.A. ANDRADE, Variaciones de la línea de costa en Cayo Serrana y estrategias para su conservación ante las amenazas de origen natural, *Bol. Cient. CIOH*, 29, 72-86, 2011.
- ANDRADE, C. A., El cambio relativo del nivel del mar. En: INVEMAR (Ed.). *Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geo-físicos y socio-económicos debido a un cambio en el nivel del mar en las zonas costeras colombianas (Caribe y Pacífico) y medidas para su adaptación.* Informe final y Atlas digital. Informe Técnico 1, 62-77 [CD ROM], 2003.
- ANDRADE, C.A. Las corrientes superficiales en la Cuenca de Colombia observadas con boyas de deriva. En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Vol. 25, No.96, pp. 321-335, Septiembre, 2001.
- ANDRADE, C.A. y BARTON, E.D. Eddy development and motion in the Caribbean Sea (Desarrollo y movimiento de remolinos en el mar Caribe) En: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, (C11.), 26,191-26,201, November, 2000.

- ANDRADE, C.A., Cambios recientes del nivel del mar en Colombia, en: Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global, J.D. Restrepo (editor), ISBN 978-958-720-020-1, Fondo Editorial Universidad EAFIT, COLCIENCIAS, pp. 101-121, 2008.
- ANDRADE, C.A., E.D. Barton and C.N.K. Mooers, Evidence for an Eastward Flow along the Central and South American Caribbean Coast. En: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, C6-3185, June, 2003.
- ARIAS, F. GIRALDO, L. PINEDA, R. LUNA, G. Monitoreo de las condiciones Oceanográficas del Caribe colombiano región III – Zonas 1 y 2. Informe final. Ministerio de Defensa Nacional. Dirección General Marítima. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH. Cartagena de Indias. Diciembre. 1993.
- BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z.W., WU, S. and PALUTIKOF, J.P. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat. Geneva, 2008. 210 pp.
- BIRKEMEIER, W.A., (1985). Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engr.* Vol 111 No. 3.
- BOND, J. y De SCHUENSEE, R. Results of the fifth George Vanderbilt expedition (1941). The birds. *Acad. Nat. Sci. Philadelphia Monogr.* 6:7-56, 1944.
- BRUUN, P., (1962). Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 88, N° 117.
- BRUUN, P., (1966). Tidal inlets and littoral drift. *Stability of tidal inlets*, Vol. 2. Noruega, 1966.
- CAPOBIANCO, M., LARSON, M., KRAUS, N.C., and NICHOLLS, R.J. (1997). Depth of Closure: A Contribution to the Reconciliation of Theory, Practice, and Evidence, *Coastal Dynamics*. American, 1997.
- COLLAZOS, G., OSPINA, H., MUÑOZ, A. Estudio descriptivo de la influencia del huracán Beta en las islas de Providencia y Santa Catalina. *Boletín Científico CIOH* N0. 25, ISSN 0120-0542, 61-70 (2007)

- COLLINS M., The CMIP Modelling Groups, El Niño or La Niña-like climate change. Climate Dynamics, 2005.
- DEAN, R. G. (1977). Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts. Dept. of Civil Eng., Ocean Eng. Tech. Rep. 12, Uni4. of Delaware.
- DEAN, R. G. (1987). Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions. Proceedings, Coastal Sediments, ASCE. Pages 1 to 24.
- FU, L.L and HOLT, B. Some examples of oceanic mesoscale eddies by the SEASAT Synthetic-Aperture Radar. En: Journal of Geophysical. Research, 88(C3), 1844-1852, 1983.
- GAVIRIA, Enrique. Colombia Insular y San Andrés Como Archipiélago Oceánico. En: Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas.
- GEISTER, J. y DIAZ, J.M. Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andres, Providencia y Santa Catalina (mar Caribe, Colombia), con guía de campo. Instituto Colombiano de Geología y Minas INGEOMINAS. (2009), 114pp.
- GONZÁLEZ, M., MEDINA, R., GONZALEZ-ONDINA., J. OSORIO, A., F.J. MÉNDEZ., GARCÍA, E., An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC, Computers & Geosciences 33 (2007) 916–931.
- GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRAFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.
- GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRAFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Documento de referencia. Dinámica. Mecánica de ondas. Universidad de Cantabria.
- GRUPO DE INGENIERIA OCEANOGRAFICA Y DE COSTAS (GIOC). Documento Temático. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.
- IH Cantabria, Proyecto C3A, Estudio Regional de los Efectos del Cambio Climático en la Costa de América Latina 2010 y el Caribe, Comisión Económica para América Latina (CEPAL), en revisión, 2010.
- INAP Piloto Nacional Integrado de Adaptación: Ecosistemas de Alta Montaña, Islas del Caribe colombiano y Salud Humana. INVEMAR, C.I. 2007

- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS “JOSE BENITO VIVES DE ANDREIS”, INVEMAR. Areas coralinas de Colombia. Serie de publicaciones especiales No 5. Santa Marta, noviembre de 2000. p 175.
- INVEMAR (Ed.). Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas biogeofisicos y socioeconomicos debido a un cambio en el nivel del mar en las zonas costeras colombianas (Caribe y Pacifico) y medidas para su adaptación. Informe final y Atlas digital. Informe Técnico 1, 62-77 [CD ROM], 2003.
- MAUL, G.A., Climatic Change in the Intra-Americas Sea. © United Nations Environment Program, Edward Arnold Publishers, London. 1993. pp 389.
- MILLIMAN, J.D. Four Southwestern Caribbean Atolls: Courtown Cays, Albuquerque Cays, Roncador Bank and Serrana Bank, Atoll Research Bulletin, No. 129, The Smithsonian Institution, Washington, D. C., U. S. A., Agosto 15, 1969
- MOLARES, R. Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. En: Boletín Científico, CIOH No. 22, ISSN 0120-0542, Cartagena de Indias, Colombia. Diciembre de 2004. p 105-114.
- MOLINARI, R., SPILLANE, M., BOOKS, I. ATWOOD, D. and DUCKETT, C. Surface currents in the Caribbean Sea as deduced from Lagrangian observations. En: Journal of .Geophysical Research., 86, 6537-6542, 1981.
- MOOERS, C.N.K. and MAUL, G.A. Intra-Americas Sea Circulation, in: The Sea, editors. K. H. Brink and A. R. Robinson, 1062 pp., Wiley, New York, 1998.
- ORTIZ, J. Huracanes y Tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1990. En: Boletín Científico CIOH No. 25. ISSN 0120-0542. 2007. P 54-60.
- PARSONS, J.J. San Andrés and Providencia, English-speaking islands in the western Caribbean. Univ. California, Publ. in Geogr., v. 12, 84 p., 1956.
- Society of Civil Engineers, 506-515.
- SUTHERLAND, M., DARE, P and MILLER, K. “Monitoring Sea Level Change in the Caribbean”. Geomatica, 62 (4). 2008. pp. 428-436.
- TAYLOR, E. HERNANDES, D. HOWARD, F. PEÑALOZA, G. POSADA, S. HOWARD, N. ROBINSON, R. PRADA, M. Impactos en los arrecifes de coral

ocasionados por el huracán Beta en la plataforma insular de Old Providence y Santa Catalina. En: Boletín Científico CIOH No. 25, ISSN 0120-0542, 71-77. 2007

- TEJADA, C., GONZÁLEZ, M. OTERO, L. Desarrollo de un módulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las Aguas Jurisdiccionales colombianas. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Pedro (Brasil).2004.
- TORRES R., GÓMEZ J, y AFANADOR F. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. Mean Sea Level Variation at the Colombian Caribbean. Boletín Científico CIOH No. 24, ISSN 0120-0542, Cartagena de Indias, Colombia, pp. 64-72, diciembre de 2006.
- TRIFFLEMAN, N., HALLOCK, P., HINE, A. Morphology, sediments and depositional environments of a small carbonate plataform: Serranilla bank, Nicaraguan rise, southwest Caribbean sea. En: Journal of Sedimentary Petrology, 1993, Vol. 62, No 4, Julio, p. 591-606. 1992.
- ZHANG, K., DOUGLAS, C., and LEATHERMAN, S. Global warming and coastal erosion. En: *Climatic Change* 64: Holanda, 2004. P 41-58