



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

**MORFODINÁMICA Y VULNERABILIDAD COSTERA POR EROSIÓN
EN PLAYAS DE TABASCO, MÉXICO**

T E S I S

que para optar por el grado de

Maestra en Ciencias del Mar

(Geología Marina)

presenta

Hidrobióloga Martha Patricia Ayala Pérez

Director de Tesis:

Dr. Antonio Zoilo Márquez García
Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa

Comité Tutorial:

Dr. Arturo Carranza Edwards
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Dr. Javier Aldeco Ramírez
Universidad Autónoma Metropolitana- Xochimilco

Dr. John S. Armstrong Altrin
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

México, D.F., Octubre 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer al Dr. Toño Márquez, quien más que un director de tesis, ha sido para mí un gran amigo y ejemplo a seguir en el ámbito académico y como persona, quien ha estado no sólo para guiarme, sino también para apoyarme, tranquilizarme y animarme en esos momentos cuando inevitablemente entra la crisis del proyecto. Gracias por invitarme a formar parte del equipo desde hace tantos años, por creer en mí y por tu sentido práctico de todo.

Al Dr. Javier Aldeco, que por azares del destino terminé en su laboratorio sufriendo y aprendiendo que el secreto para que algo funcione es “picarle hasta que reviente” y “moverle a ver qué gestos hace”. Gracias por el apoyo y la confianza depositada en mí, gracias por darme asilo en ese laboratorio donde parece que todo tiene solución, y sobre todo por la enseñanza brindada como científico y como persona.

Gracias a todos los miembros de mi Comité Tutoral, por sus enseñanzas, pero sobre todo por el apoyo que me impulsó a seguir adelante. Al Dr. Miguel Ángel Alatorre, gracias por esas clases que me hicieron ver cómo una ecuación horrible puede describir algo tan bello como una ola rompiendo y por esa gran capacidad para maravillarse de cada pequeña o gran cosa en la Tierra.

Un agradecimiento especial a la Academia Nacional para la Investigación y Desarrollo, A.C., ANIDE, gracias a ella el trabajo en campo fue posible, así como gran parte del análisis de información. Gracias a todo el equipo de trabajo, especialmente a la Dra. Andrea Bolongaro y al M. en I. Vicente Torres por las facilidades brindadas.

Gracias al M. en C. Erik Márquez por las salidas a Tabasco para la obtención de muestras y perfiles, por su gran ayuda en el procesamiento de información topográfica y por ser un gran amigo, compañero y bailarín.

Quiero agradecer también al equipo de trabajo en campo, con quienes sobrevivimos a tormentas tropicales, nortes, inundaciones, piquetes de mosquitos mutantes, rozaduras de tercer grado, vientos huracanados y viajes por la cocopista para realizar los perfiles de playa y el muestreo de sedimento.

Gracias a mis amigos y compañeros de clases y de laboratorio por hacer que los momentos más difíciles tuvieran su encanto, es bueno contar con esas terapias grupales inolvidables, y gracias también a esos amigos que van apareciendo sólo para enseñar cosas buenas y malas, pero sobre todo para dejar importantes lecciones y vivencias.

Finalmente, pero no menos importante, quiero agradecer a mi hermosa familia. Gracias a mis padres por su apoyo incondicional, confianza, consejos, enseñanzas y por respetar mis decisiones aunque no estén de acuerdo con ellas. Mamá, simplemente gracias por ser el mayor ejemplo de bondad, paciencia, terquedad y calidad humana; papá, gracias por no correrme de la casa a pesar de tantos corajes que desde niña te hago pasar con mis berrinches, pero sobre todo por tu ejemplo de responsabilidad y fortaleza. Gracias a mis hermanas por sus consejos y por animarme siempre a seguir adelante, sobre todo a Gaby, por haber sido mi primer gurú en el asunto del mar. A Daniel, gracias por apoyarme en todas mis decisiones por imposibles que parezcan, por animarme siempre, por tu cariño, comprensión, paciencia y por estar conmigo cuando ni yo me soporto; y cómo olvidar a mis seis amores, a quienes les dedico este trabajo, espero que algún día lo lean y surja en ellos la curiosidad e interés por la ciencia.

CONTENIDO

Página

ÍNDICE DE FIGURAS-----	6
ÍNDICE DE TABLAS -----	9
RESUMEN-----	10
ABSTRACT -----	11
I. INTRODUCCIÓN -----	12
1.2. Antecedentes-----	17
1.3. Justificación-----	20
1.4. Objetivos-----	22
1.5. Área de estudio-----	23
II. METODOLOGÍA-----	29
2.1. Análisis histórico de la zona litoral-----	29
2.2. Levantamiento topográfico y análisis del comportamiento de playa-----	31
2.3. Muestreo y caracterización de sedimentos-----	33
2.4. Análisis de datos de Oceanografía Física y modelo de refracción de oleaje-----	36
2.5. Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por zona-----	38
III. RESULTADOS-----	46
3.1. Análisis histórico de la zona litoral-----	46
3.2. Levantamiento topográfico y análisis del comportamiento de playa-----	57
3.3. Caracterización de sedimentos de la zona litoral-----	67
3.4. Análisis de datos de Oceanografía Física y modelo de refracción de oleaje-----	104
3.5. Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo por zona-----	119
3.6. Análisis del impacto antropogénico-----	128
IV. CONCLUSIONES-----	132
4.1. Cinco Presidentes-----	132
4.2. Sánchez Magallanes-----	133
4.3. Tupilco-----	134
4.4. Campo Tajón-----	135
4.5. Laguna Mecoacán-----	136
4.6. Río Grijalva-----	138
4.7. Campo Costero-----	138
V. RECOMENDACIONES-----	140
5.1. Medidas de protección y adaptación de daños-----	140
5.2. Medidas de prevención-----	141

VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
VII.	ANEXOS	148
7.1.	Ubicación, tipo de sedimento y composición mineralógica de sedimentos.	148
7.3.	Modelo RED SEA en FORTRAN para refracción de oleaje	151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Área de estudio.....	24
Figura 2. Áreas de referencia para el cálculo de la tasas de erosión y acreción.....	31
Figura 3. Diagrama de división de la playa en supraplaya, mesoplaya e infraplaya.....	32
Figura 4. Triángulo de clasificación general de sedimentos marinos en tres componentes.....	35
Figura 5. Triángulo para la clasificación de arenita (Folk, 1984).....	36
Figura 6. Superposición de línea de costa de 1988 y 2010 en Río Grijalva margen oeste.....	48
Figura 7. Depositación en el margen este de Sánchez Magallanes y Grijalva.....	49
Figura 8. Proceso de erosión-acreción en la línea de costa al este del Río Tonalá.....	51
Figura 9. Balance histórico de los procesos de erosión y acreción.....	52
Figura 10. Balance de los procesos de erosión y acreción 2010-2011.....	54
Figura 11. Faro derrumbado a consecuencia de la erosión costera en Barra de Tupilco.....	55
Figura 12. Imagen satelital del canal La Elena.....	55
Figura 13. Variabilidad en los perfiles de playa en Cinco Presidentes.....	58
Figura 14. Variabilidad en los perfiles de playa en Boca Sánchez Magallanes, margen este.....	59
Figura 15. Variabilidad en los perfiles de playa en Boca Sánchez Magallanes, margen oeste.....	59
Figura 16. Variabilidad en los perfiles de playa en Barra de Tupilco.....	60
Figura 17. Variabilidad en los perfiles de playa en la Isla de la Laguna Mecoacán.....	61
Figura 18. Variabilidad en los perfiles de playa en Laguna de Mecoacán, margen este.....	62
Figura 19. Variabilidad en los perfiles de playa en Campo Tajón.....	63
Figura 20. Variabilidad en los perfiles de playa en la isla del Río Grijalva, margen oeste.....	64
Figura 21. Variabilidad en los perfiles de playa en Río Grijalva, margen este.....	65
Figura 22. Variabilidad en los perfiles de playa en Campo Costero.....	66
Figura 23. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Cinco Presidentes.....	67
Figura 24. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva en Cinco Presidentes.....	68
Figura 25. Variación del grado de asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Cinco Presidentes.....	69
Figura 26. Variación de la curtosis de sedimento en Cinco Presidentes.....	69
Figura 27. Tipo de sedimento en Cinco Presidentes.....	70
Figura 28. Grado de redondez de los sedimentos en Cinco Presidentes.....	71
Figura 29. Grado de esfericidad de los sedimentos en Cinco Presidentes.....	71
Figura 30. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Sánchez Magallanes.....	72
Figura 31. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva en Sánchez Magallanes.....	73
Figura 32. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Sánchez Magallanes.....	74
Figura 33. Variación de la curtosis de sedimento en Sánchez Magallanes.....	74
Figura 34. Tipo de sedimento según en Sánchez Magallanes.....	75
Figura 35. Grado de redondez de los sedimentos en Sánchez Magallanes.....	76
Figura 36. Grado de esfericidad de sedimentos en Sánchez Magallanes.....	76
Figura 37. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Tupilco.....	77
Figura 38. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Tupilco.....	78
Figura 39. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimentos en Tupilco.....	79
Figura 40. Variación de la curtosis de sedimentos en Tupilco.....	79
Figura 41. Tipo de sedimento en Tupilco.....	80
Figura 42. Grado de redondez de los sedimentos en Tupilco.....	81
Figura 43. Grado de esfericidad de sedimentos en Tupilco.....	81
Figura 44. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Tajón.....	82
Figura 45. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Tajón.....	83

Figura 46.	Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Tajón.....	84
Figura 47.	Variación de la curtosis de sedimento en Tajón.....	85
Figura 48.	Tipo de sedimento en Tajón.....	85
Figura 49.	Grado de redondez de los sedimentos en Tajón.....	86
Figura 50.	Grado de esfericidad de sedimentos en Tajón.....	87
Figura 51.	Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Mecoacán.....	88
Figura 52.	Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Mecoacán.....	88
Figura 53.	Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Mecoacán.....	89
Figura 54.	Variación de la curtosis de sedimento en Mecoacán.....	90
Figura 55.	Tipo de sedimento en Mecoacán.....	90
Figura 56.	Grado de redondez de los sedimentos en Mecoacán.....	91
Figura 57.	Grado de esfericidad de sedimentos en Mecoacán.....	91
Figura 58.	Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Grijalva.....	92
Figura 59.	Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Grijalva.....	93
Figura 60.	Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Grijalva.....	93
Figura 61.	Variación de la curtosis de sedimento en Grijalva.....	94
Figura 62.	Tipo de sedimento en Grijalva.....	95
Figura 63.	Grado de redondez de los sedimentos en Grijalva.....	95
Figura 64.	Grado de esfericidad de sedimentos en Grijalva.....	96
Figura 65.	Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Costero.....	97
Figura 66.	Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Costero.....	97
Figura 67.	Variación de la asimetría gráfica inclusiva de la zona litoral de Campo Costero.....	98
Figura 68.	Variación de la curtosis de sedimento en Costero.....	99
Figura 69.	Tipo de sedimento según en Costero.....	99
Figura 70.	Grado de redondez de los sedimentos de la zona litoral de Campo Costero.....	101
Figura 71.	Grado de esfericidad de sedimentos de la zona litoral de Campo Costero.....	101
Figura 72.	Provincias sedimentarias en el litoral de Tabasco.....	103
Figura 73.	Circulación de la superficie del mar relativa (Monreal et al., 2004).....	105
Figura 74.	Mareas semi-diurnas, diurnas y mixtas en México (Mareográfico, UNAM).....	105
Figura 75.	Rosa de oleaje correspondiente a septiembre de 2011 frente a Sánchez Magallanes.....	108
Figura 76.	Rosas de oleaje de septiembre y noviembre de 2011 frente a Tizón.....	108
Figura 77.	Batimetría de la zona.....	109
Figura 78.	Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 4 segundos.....	110
Figura 79.	Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 7 segundos.....	111
Figura 80.	Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 12 segundos.....	111
Figura 81.	Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 16 segundos.....	112
Figura 82.	Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 20 segundos.....	112
Figura 83.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noreste con periodo de 4 segundos.....	113
Figura 84.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noreste con periodo de 7 segundos.....	114
Figura 85.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noreste con periodo de 12 segundos.....	114
Figura 86.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noreste con periodo de 16 segundos.....	115
Figura 87.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noreste con periodo de 20 segundos.....	115
Figura 88.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 4 segundos.....	116
Figura 89.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 7 segundos.....	117
Figura 90.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 12 segundos.....	117
Figura 91.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 16 segundos.....	118
Figura 92.	Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 20 segundos.....	118
Figura 93.	Nivel de vulnerabilidad y riesgo en el litoral de Tabasco.....	127
Figura 94.	Imagen satelital de Sánchez Magallanes.....	129

Figura 95.	Imagen satelital de Mecoacán.....	130
Figura 96.	Imagen satelital de Grijalva.....	131
Figura 97.	Playa de Cinco Presidentes.....	132
Figura 98.	Sánchez Magallanes oeste y este.....	134
Figura 99.	Casas afectadas por la erosión en Barra de Tupilco.....	135
Figura 100.	Playa en Tajón.....	136
Figura 101.	Manglares en deterioro a causa de erosión e intrusión salina en Mecoacán.....	137
Figura 102.	Desembocadura del Río Grijalva, margen oeste.....	138
Figura 103.	Playa en Campo Costero.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
Tabla 1.	Límites de parámetros granulométricos.....	34
Tabla 2.	Ponderación de variable Geología-Geomorfología.....	40
Tabla 3.	Ponderación de variable Tasa de Erosión.....	40
Tabla 4.	Componentes del Índice Topográfico.....	41
Tabla 5.	Ponderación de Índice Topográfico (Itop).....	41
Tabla 6.	Ponderación de la variable Oleaje Significativo Medio.....	42
Tabla 7.	Ponderación de la variable tasa de cambio del nivel relativo del mar.....	42
Tabla 8.	Ponderación de la variable Rango Mareal Medio.....	43
Tabla 9.	Clasificación del CVI.....	43
Tabla 10.	Evaluación del riesgo en función del peligro y la vulnerabilidad.....	44
Tabla 11.	Clasificación del riesgo.....	45
Tabla 12.	Tasa de erosión de cada sitio a lo largo de la costa de Tabasco.....	47
Tabla 13.	Tasa de acumulación de cada sitio en la costa de Tabasco.....	49
Tabla 14.	Desplazamiento total promedio de cada sitio (m).....	50
Tabla 15.	Balance de los procesos de erosión y acreción 2010-2011.....	53
Tabla 16.	Proceso por sitio según los levantamientos topográficos 2010-2011.....	66
Tabla 17.	Nivel en geomorfología.....	120
Tabla 18.	Nivel en tasa de erosión.....	120
Tabla 19.	Nivel en índice topográfico.....	120
Tabla 20.	Nivel en oleaje significativo medio.....	121
Tabla 21.	Nivel en tasa de cambio del nivel del mar.....	121
Tabla 22.	Nivel en rango mareal.....	122
Tabla 23.	Resultados de la integración de los valores obtenidos.....	122
Tabla 24.	Clasificación del CVI.	122
Tabla 25.	Índice de vulnerabilidad por sitio.....	123
Tabla 26.	Nivel de peligro por erosión.....	124
Tabla 27.	Nivel de peligro por oleaje.....	124
Tabla 28.	Clasificación del riesgo.....	125
Tabla 29.	Nivel de riesgo.....	125

RESUMEN

Durante la temporada de secas, lluvias y nortes de los años 2010 y 2011 se realizó una serie de levantamientos topográficos y muestreo de sedimentos en siete playas del litoral de Tabasco, México, y se analizó la morfodinámica e hidrodinámica de cada sitio, así como la influencia de los fenómenos meteorológicos sobre la línea de costa. Mediante estos estudios se logró caracterizar los niveles de vulnerabilidad y riesgo en la zona.

Para el análisis morfológico se estimó la tasa de erosión y el desplazamiento de la línea de costa mediante el método de áreas de referencia y por levantamientos topográficos en cada playa; las muestras de sedimento se colectaron para analizar su composición mineralógica, granulometría y procedencia, y se realizó un análisis de refracción de oleaje para conocer las playas que presentan una mayor concentración de energía. Finalmente, con los datos obtenidos se calculó el Índice de Vulnerabilidad Costera, para conocer las playas que presentan una mayor vulnerabilidad por erosión.

Mediante el estudio de refracción de oleaje se determinó que frente a la Laguna Mecoacán, la playa recibe una mayor concentración de energía de oleaje de periodos altos, por lo que esta zona es más vulnerable a la erosión costera por eventos hidrometeorológicos extremos, principalmente por nortes. El oleaje con periodos bajos presentan concentraciones de energía en los demás sitios erosivos durante la mayor parte del año.

De acuerdo a la hipótesis propuesta, los resultados mostraron que en general en el litoral de Tabasco domina un proceso de erosión. Las áreas donde se presenta una mayor vulnerabilidad son la playa frente a la Laguna Mecoacán y el margen oeste de la desembocadura del Río Grijalva, mientras que los sitios que presentaron mayor riesgo a la pérdida de casas-habitación fueron el margen este de la boca Sánchez Magallanes y la Barra de Tupilco. En todos los sitios se propone aplicar medidas de adaptación y prevención debido a la tendencia erosiva de la zona, sobre todo en los sitios con mayor vulnerabilidad.

ABSTRACT

During the dry, rain and north wind seasons in 2010 and 2011, there was a series of topographic survey and sediment sampling in seven beaches along the coast of Tabasco, Mexico, and analyzed morphodynamics and hydrodynamics of each site, as well as the influence of weather events on the shoreline. Through these studies it was possible to characterize the levels of vulnerability and risk in the area.

For morphological analysis estimated the rate of erosion and the movement of the coastline by the method of reference areas and surveying at each beach, the sediment samples were collected to analyze its mineral composition, grain size and provenance, and analysis was performed for wave refraction beaches having a higher concentration of energy. Finally, the data was calculated Coastal Vulnerability Index, for the beaches that are more vulnerable to erosion.

By studying wave refraction was determined that given the Mecoacán Laguna, the beach gets a higher concentration of wave energy in peak periods, so that this area is more vulnerable to coastal erosion by extreme meteorological events, mainly for norths. The waves with periods presented low concentrations of energy in other places erosion during most of the year.

According to the proposed hypothesis, the results showed that in general on the coast of Tabasco dominates a process of erosion. The areas where it has a greater vulnerability are the beach facing the lagoon Mecoacán and the western edge of the mouth of the Rio Grijalva, while sites that higher risk to loss-bedroom houses were the eastern margin of the mouth Sánchez Toolbar Magallanes and Tupilco. In all proposed sites implement adaptation and prevention due to the erosive tendency of the area, especially in more vulnerable sites.

I. INTRODUCCIÓN

a) Procesos de erosión acumulación

La zona litoral se conoce como una de las áreas más dinámicas de la Tierra, debido a su constante modificación originada por procesos marinos y continentales que alteran el equilibrio de la línea de costa, ésta avanza o retrocede según predomine la acumulación de sedimentos o su erosión.

El marcado dinamismo que caracteriza a los espacios costeros como medios de transición encuentra su máxima expresión en las playas. Estas formaciones bajas y arenosas ponen en relación directa la zona continental con el medio marino y modifican constantemente su morfología de acuerdo a las condiciones hidrodinámicas y de energía con que se ven afectadas (Suárez, 1991). Este fenómeno se plasma en una veloz modificación de la línea de costa y de las formaciones arenosas intermareales, con cambios que en situaciones favorables derivan en direcciones claramente dominantes y con dimensiones del orden de las centenas a miles de metros, en periodos de tiempo relativamente cortos de decenas de años.

Los procesos costeros que afectan al litoral ocurren en escalas de tiempo que varían desde instantes (horas) hasta intervalos geológicos (miles o más años), y la comprensión de estos procesos requiere del estudio de la dinámica que domina y controla la zona litoral, por lo que es necesario considerar todas las escalas y variables que intervienen en el modelado de dicha zona (Krumbein y Sloss, 1963).

La detección de cambios en la morfología costera forma parte de la fase inicial del diagnóstico sobre el estado de un sistema costero y la causalidad de estos cambios es parte de un proceso más complejo que debe considerar los procesos costeros naturales e inducidos por el hombre, así como los que tienen que ver con el comportamiento hidrológico y sedimentológico de las cuencas que desembocan en las aguas litorales protegidas y la plataforma continental.

Se entiende por erosión costera la modificación (retroceso) de la línea de costa preexistente con la consiguiente pérdida de sedimentos. Constituye un tema clásico en la geomorfología costera (Pardo, 1991; Viciano, A. 1998) y en la literatura sobre riesgos naturales (Lechuga, 1995) y puede presentarse unida a los riesgos de inundación; por tales motivos posee características diferenciadoras en la perspectiva de las metodologías para evaluar el riesgo y en las estrategias y experiencias de su gestión y mitigación.

Los procesos de erosión costera de forma natural o inducidos antrópicamente, presentan una serie de características que permiten catalogarlos de riesgos naturales y, si a ello unimos la presión sobre la franja litoral por su antropización creciente y progresiva, además de la intensificación de estos procesos naturales por causas antrópicas de carácter local (retención de sedimentos en embalses, y obras de infraestructura costera) o global (la subida del nivel del mar), la magnitud de los daños que puedan causar exige un replanteamiento metodológico en los procedimientos de evaluación.

La actividad antropogénica tiene influencia en la modificación del ambiente costero, debido a la construcción de infraestructura en su parte continental (hoteles, centros urbanos, casas, restaurantes, etc.), y marina (muelles, escolleras, espigones y rompeolas), lo que provoca una alteración en el equilibrio de la costa y consecuentemente su morfología.

Al aumentar la temperatura del océano y con el consecuente aumento en el nivel del mar, los huracanes aumentarían en frecuencia e intensidad. La amenaza originada por huracanes de alta intensidad, promueve el diseño de metodologías preventivas para evaluar el conjunto de condiciones naturales que inhiban los cambios y efectos en los paisajes naturales y antrópicos.

En este sentido, México debería tener una gran tradición en el manejo de las emergencias generadas por estos meteoros, pero temporada tras temporada se ha comprobado que hay mucho por hacer al respecto (Rosengaus, 1998).

b) Procesos de erosión acumulación en Golfo de México-Tabasco

La línea de costa correspondiente al Golfo de México posee una longitud de 2775 km aproximadamente, a los que se adicionan 4900 km de márgenes de aguas interiores, resguardadas por barreras bajas arenosas en una planicie costera.

En el caso de las zonas costeras bajas acumulativas del Golfo de México, particularmente en el estado de Tabasco, los cambios ecogeográficos son muy dinámicos a nivel estacional y se pueden detectar cambios para fechas específicas, o bien, cambios graduales que incluyen fechas a lo largo de amplios periodos de tiempo, mostrando lo que pasa no sólo de una fecha a la otra, sino a lo largo de un periodo definido de estudio, lo que permite el monitoreo sistemático de las tendencias en la dinámica litoral y el mejor conocimiento del sistema costero (Palacio, 2001).

Las costas de Tabasco, desde el punto de vista morfodinámico, muestran una constante variación en su línea costera donde predomina el retroceso hacia el interior del continente. Por otra parte la extensa planicie costera de Tabasco presenta un relieve muy bajo con respecto al nivel del mar y su amplia superficie resulta vulnerable a los efectos de fenómenos hidrometeorológicos y marinos (Ortíz, 1991).

Los rasgos geomorfológicos a lo largo del litoral de Tabasco, permiten distinguir en algunos sitios la preponderancia de procesos acumulativos por la presencia de extensas playas de suave pendiente, sin embargo, para la mayor parte de este litoral predominan los procesos erosivos. Para la mayor parte del año prevalecen las olas de baja altura y energía provenientes del noreste y que son normalmente de naturaleza constructiva (Psuty, 1965, 1969), por lo que el arribo de este oleaje se traducirá en un depósito y extensión de la playa.

Por otra parte, los fenómenos naturales como los nortes han cambiado a lo largo de la historia la línea de costa. El oleaje erosivo que traen consigo los nortes transporta sedimentos hacia el este a lo largo de las costas de Tabasco, entonces la deriva litoral se dirige hacia el oriente mientras perdura el corto tiempo de la tormenta del Norte (Ortíz, 1991). De esta manera, la

variación estacional del oleaje marca las fluctuaciones de avance o retroceso de la línea de costa, caracterizado generalmente con procesos erosivos durante la época de nortes.

Esta situación adquiere importancia si se considera que el cambio climático global empieza a manifestar sus impactos en las tierras bajas de la zona costera (Palacio, 2001) y puede modificar notablemente la línea de costa de Tabasco. Las predicciones sobre el ascenso del nivel medio del mar para los mares intra-americanos son de 3.0 a 5.3 mm/año (Aparicio, 1993) y de 10 cm para el 2025 (Hanson y Maul, 1993). El aumento del nivel del mar produciría mareas más altas, tormentas y olas con resultados destructivos; en este contexto, las zonas costeras bajas, las áreas propensas a inundaciones y las pequeñas islas corren más riesgos de sufrir los efectos de este fenómeno.

Cada rasgo geomorfológico (erosivo, acumulativo, transitorio o permanente) que pueda ser estudiado y analizado es evidencia puntual de la intensidad de los fenómenos meteorológicos que ocurran en la zona y de las condiciones naturales del terreno; dichos rasgos predisponen la capacidad del paisaje costero para amortiguar y magnificar la incidencia de éstos, así como su capacidad de soportar y recuperarse ante desastres y perturbaciones (resiliencia).

c) Marco conceptual de la vulnerabilidad por erosión

La vulnerabilidad constituye el principal criterio seguido por la comunidad internacional para calificar la forma como la sociedad responde al cambio climático. Literalmente es la capacidad del sistema de ser afectado o alterado, aunque en realidad incluye dimensiones múltiples como factores físicos, biológicos, políticos y socioeconómicos. Es además, un concepto de difícil calificación y cuantificación, cambiante y exigente de información, que puede ser afectado por variables exógenas y endógenas, por esta misma razón, está sujeta a problemas que derivan de sus muchas interpretaciones (Escobar, 1999).

La vulnerabilidad costera es definida como el potencial que tiene un sistema costero a ser dañado (Jiménez et al., 2009); sin embargo, para entender a fondo el término “vulnerabilidad” se deben considerar los conceptos ligados a ésta: peligro o amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

La ocurrencia de un desastre depende del peligro o amenaza, que es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino, y la vulnerabilidad, que es el grado de pérdida resultado de la ocurrencia del fenómeno.

El riesgo se define como el grado esperado de pérdida debido a fenómenos naturales particulares; esto es la multiplicación de costos por la vulnerabilidad por el período de retorno del fenómeno natural que daña (Varnes, 1984). En base a esto, se considera la vulnerabilidad como el grado de pérdida de un conjunto dado de elementos resultando en el riesgo de ocurrencia del fenómeno.; los elementos en riesgo dentro de un área dada son la población, las propiedades, las actividades económicas, etc.

Los daños causados por los riesgos de erosión y su aceleración ligada al incremento de la peligrosidad natural (por alteración antrópica o por los efectos de la subida del nivel del mar) y al aumento de la vulnerabilidad por la ocupación antrópica de la zona litoral, exigen una reflexión científica sobre los procesos de evaluación.

Esta necesidad se justifica por las pérdidas ocasionadas y por la incorporación de los riesgos naturales en los procedimientos de planificación territorial y urbanística, así como en la práctica habitual de diferentes organismos de la administración (Protección Civil, Dirección General de Costas, etc.) e instituciones privadas.

La vulnerabilidad en zonas costeras y el riesgo natural en ellas han llevado a las naciones a definir metodológicamente los procedimientos para su evaluación (Ministry of Transport and Public Works, 1990, FEMA, 2000) y las técnicas empleadas para su proyección hacia el futuro, así como a establecer periódicamente la revisión de sus cálculos.

La comparación entre las condiciones actuales y las que potencialmente se presentarían bajo un cambio climático permite la identificación y la cuantificación del grado de vulnerabilidad de los lugares donde se tendrían efectos adversos.

1.2. Antecedentes

La dinámica costera en Tabasco ha sido estudiada con mayor interés desde la década de los sesentas. La explicación morfogenética de los cordones litorales y su dinámica, así como las causas de su distribución espacial, fue descrita por Psuty en 1965 y 1967, mientras que el análisis de la interacción entre el manglar y los procesos geomorfológicos fue desarrollado por Thom en 1967.

Los problemas de sedimentación y erosión, y las características geográficas de las llanuras de Tabasco fueron expuestos por West, Psuty y Thom en 1969; estos problemas sobre varias localidades de las planicies de cordones litorales fue estudiado también por Tanner y Stapor en 1971.

El fenómeno de erosión de cordones litorales resultó evidente a partir de la década de los 80's, mediante el registro con mayor calidad de fotografías aéreas analizadas en diferentes fechas para hacer el seguimiento sucesivo de los cambios significativos de la costa, esto sumado a las evidencias mostradas en el trabajo de campo; el examen de fotos aéreas señaló los efectos de la erosión costera del litoral de Tabasco (Ortíz, 1988).

Un análisis geomorfológico de los pantanos de Centla y zonas aledañas incluyó los efectos de la degradación del delta del Río San Pedro, realizado por Manzano en 1989. La erosión y el consecuente retroceso de la línea de costa en Tabasco y Campeche fue mostrado por este método por Ortíz en 1991.

Las tendencias morfodinámicas en el margen costero de Tabasco fueron estudiadas durante los años 2003 y 2004 por investigadores de la UNAM y UJAT, mediante el uso de información cartográfica y mediciones geomorfológicas de campo que dieron como resultado una tasa de erosión alta, entre -8 y -15 m/año, en la zona de Sánchez Magallanes y en la desembocadura del río San Pedro y San Pablo.

Estudios sobre dinámica costera realizados durante los años 2005-2008 en el litoral norte de la zona de Ciudad El Carmen, Región Marina Noreste (RMNE), han confirmado los resultados obtenidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC), ya que de acuerdo con los registros y estadísticas del nivel del mar durante los últimos 30 años, éste muestra un incremento de 19 cm y la intensificación de los procesos erosivos en dicha zona litoral.

Los procesos morfodinámicos a lo largo de la zona costera del estado de Tabasco fueron estudiados también por Hernández *et al.* en 2007, donde se reveló un predominio del retroceso de la línea de costa sobre los procesos de acreción. La importancia de la morfología costera como geoindicador directo de los efectos destructivos o modificadores de los huracanes y su relación con la intensidad del fenómeno fue analizada por Palacio en 2010.

En cuanto a la vulnerabilidad, este concepto en sus inicios fue planteado como la componente social de la configuración de situaciones de desastre, asociado principalmente a la pobreza como principal agente causal (Hewitt, 1983). Más adelante, este concepto fue ampliado, integrando a la cultura y los procesos políticos y sociales que determinan la distribución del poder en determinada sociedad (Blaikie et al., 1996; Mileti, 1998; Cardona, 2001; UN/ISDR, 2002).

Debido a este enfoque exclusivamente social, surgió la necesidad de considerar otros aspectos o modelos analíticos donde convergieran factores de tipo social y biofísicos. De este modo, el concepto actual de vulnerabilidad considera los diferentes elementos y procesos que aumentan la susceptibilidad al impacto de amenazas (Alcántara-Ayala, 2002; UN/ISDR, 2004).

El análisis de vulnerabilidad mediante el programa ILWIS es propuesto por Van Westen en 1993, ilustra claramente el significado de peligro, vulnerabilidad y riesgo, utiliza un conjunto muy sencillo de datos. En su trabajo, Westen describe que la ocurrencia de un desastre depende de la amenaza, el peligro y la vulnerabilidad. Mediante esta metodología se genera primero un mapa cualitativo de peligro, combinando varios mapas de factores, entonces se elabora un mapa de vulnerabilidad y al final ambos mapas son combinados y generan un mapa de riesgos.

La identificación de áreas vulnerables a las variaciones del nivel del mar en las costas bajas del Golfo de México y Mar Caribe fue desarrollada por Ortiz y Méndez en 1999, y a partir de esta zonificación se estimaron las áreas de impacto por inundación sobre el nivel del mar a 1 y 2 m, obteniendo como resultado el mapeo de distribución del fenómeno de impacto.

La vulnerabilidad costera también ha sido evaluada mediante el Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) desarrollado por el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos); este índice fue aplicado por Ojeda en 2008 para la costa Andaluza; por otra parte, el estudio de vulnerabilidad por impactos de tormentas en la zona costera Catalana fue presentada por Mendoza *et. al.* en el 2009. En el estado de Tabasco, la vulnerabilidad ha sido estudiada recientemente por Laverde *et. al.* en el 2012, quien evalúa la respuesta de la playa en términos de inundación.

Actualmente, no hay un consenso global sobre el significado de vulnerabilidad dentro del contexto del cambio climático y sobre la forma de medirla de manera que incluya la vulnerabilidad costera por erosión, inundación, tormentas y mareas, y tampoco existe una tipología aceptada de las costas relacionadas con los efectos del incremento del nivel del mar (Escobar, 1999). Faltan indicadores que permitan identificar todos los aspectos de la vulnerabilidad y que sean ampliamente aceptables, verificables, medibles, cuantificables-calificables y persistentes en el tiempo.

1.3. Justificación

En ciertos sectores del litoral, particularmente en las costas constituidas de playas bajas arenosas en llanuras costeras y deltaicas, se observa una degradación de las playas debido a la erosión costera y como consecuencia de ello se muestran cambios en su expresión morfológica o de configuración. Los efectos de tal alteración se traducen en un retroceso acelerado de la costa (Ortiz, 1991); sumado a esto, el ascenso en el nivel del mar también ha provocado problemas relacionados con cambios morfodinámicos en las costas, por lo que el análisis de los impactos y modificaciones en los ambientes costeros modernos constituye uno de los problemas de mayor importancia científica internacional y de especial interés gubernamental a nivel local (Hernández *et al*, 2006).

Se han apreciado drásticos cambios geomorfológicos en el litoral del estado de Tabasco durante los últimos 35 años; la detección de estos cambios y tendencias permite caracterizar la geodinámica costera predominante en estas zonas, sin embargo, la causa de estos cambios requiere de un mayor número de estudios precisos sobre el balance sedimentario, los procesos costeros, los eventos meteorológicos extraordinarios y la afectación humana al ambiente.

La erosión en esta zona ha provocado reducción de playas, avance de la línea de costa hacia el continente, intrusión salina, cambios en la batimetría y morfología costera, entre otros problemas, lo que causa un impacto en obras civiles como carreteras, líneas eléctricas, casas habitación, infraestructura petrolera y pérdida de ecosistemas como manglares. Por este motivo, las zonas costeras bajas han sido reconocidas como “supremamente vulnerables”, en especial al incremento acelerado en el nivel de mar y a un probable incremento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales, aunque aún no se ha efectuado una estimación cuantificada de “cuan altas resultan sus vulnerabilidades” (Escobar, 1999).

A partir de los estudios mencionados sobre morfodinámica y vulnerabilidad en las costas de Tabasco y al considerar que la topografía de esta zona litoral es prácticamente plana, cualquier cambio en las condiciones hidrometeorológicas involucra una amplia extensión de afectación al interior de la zona continental, lo que hace vulnerable a todas estas áreas ante los eventos climáticos, hidrológicos y marinos prevalecientes.

En base a lo anterior, se plantea la hipótesis de que el litoral de Tabasco presenta un alto grado de vulnerabilidad costera por erosión y algunas playas se encuentran en riesgo de perder su infraestructura costera a causa de este proceso, ya sea por fenómenos naturales hidrometeorológicos y por fenómenos antropogénicos.

Con el fin de evitar el avance de la erosión costera y proteger las playas e infraestructura existente, se construyeron una serie de obras de ingeniería litoral, tales como espigones, diques y rompeolas, cuyo resultado ha sido contraproducente en pequeña o gran medida, ya que incrementan la erosión en las zonas contiguas al interrumpir el transporte litoral de los sedimentos y alteran el equilibrio erosión-depósito a lo largo de todo el sistema.

Las playas de Tabasco presentan cambios morfológicos en respuesta a fenómenos meteorológicos naturales, sin embargo, la línea de costa se ve afectada en diferente medida según la intensidad, periodicidad y tipo de fenómeno natural.

El ángulo de incidencia del oleaje y el periodo de ola determinan los sitios donde existe una concentración mayor de energía; durante los nortes, el oleaje puede ser menos erosivo que el de un huracán dependiendo el ángulo de incidencia y de la batimetría de la zona principalmente. El oleaje más intenso no necesariamente es el más erosivo, pues las olas con periodos altos no siempre llegan a la línea de playa debido a la poca profundidad; sin embargo, los sitios que presenten pendientes más abruptas hacia mar adentro reciben el oleaje intenso de los periodos altos. En ocasiones, el oleaje más frecuente, aunque de menor energía, puede ser el causante de la erosión en muchos sitios debido a su ángulo de incidencia en la línea de costa.

La tendencia erosiva o acumulativa de cada sitio varía si se considera la morfología de las playas, la oceanografía de la zona, los fenómenos naturales y el impacto antropogénico presente en cada una de ellas. Para conocer esta tendencia es necesario monitorear los sitios de interés cada temporada durante uno o dos ciclos anuales y con estos resultados del monitoreo se puede tener una primera idea de la tendencia de la zona, sin embargo, las condiciones físicas, climatológicas y sociales cambian, de tal manera que un estudio no es suficiente para conocer realmente la tasa de cambio de cada sitio. Actualmente las modelaciones numéricas pueden proporcionar escenarios posibles de cambio, sin embargo, ningún modelo matemático puede ser completamente certero y completo.

Las playas de Tabasco presentan un grado alto o medio de vulnerabilidad y la mayoría presenta un elevado nivel de peligro por las características geomorfológicas de la zona, que multiplicado por la vulnerabilidad de cada sitio puede resultar en muchas playas en riesgo. Dependiendo el nivel de vulnerabilidad deben tomarse en cuenta medidas de adaptación, conservación, protección o restauración, sin embargo, cuando un sitio ya se encuentra en una situación de riesgo alto, la prioridad de acción cambia, así como las medidas a considerar.

1.4. Objetivos

Han ocurrido cambios topográficos importantes en la zona litoral de Tabasco, la cuantificación de los mismos es tarea que solo recientemente se ha empezado a realizar. En trabajos anteriores se expresan algunas estimaciones de procesos de erosión y acreción en playas de Tabasco; con el presente estudio se buscó cuantificar lo más exactamente posible la magnitud de los cambios en la morfología costera, por medio del análisis de imágenes satelitales, levantamientos topográficos, batimétricos, análisis granulométricos y del clima marítimo para identificar áreas vulnerables y de riesgo a la erosión.

a) Objetivo General

Evaluar los niveles de vulnerabilidad costera por erosión y riesgo en playas de Tabasco analizando su morfodinámica, hidrodinámica y la influencia de fenómenos meteorológicos sobre la línea de costa, y en base a lo anterior, proponer medidas de adaptación, conservación, protección o restauración en las áreas afectadas.

b) Objetivos específicos

- Realizar un balance de erosión- depósito en cada playa para determinar cambios morfológicos y distribución de sedimentos.
- Analizar la hidrodinámica de la zona para conocer la respuesta litoral.
- Evaluar la vulnerabilidad costera por erosión.
- Analizar la influencia de los procesos antropogénicos sobre la línea de costa.
- Proponer medidas de protección, prevención o mitigación para riesgos identificados.

1.5. Área de estudio

La zona costera del estado de Tabasco está comprendida entre los 92° 28' y los 94° 10' de longitud oeste aproximadamente, y los 17° 15' y los 18° 39' de latitud norte, localizada en la meso-región sur-sureste de México. Dicha área se encuentra en la zona costera del estado de Tabasco ubicada dentro de la provincia fisiográfica de la Bahía de Campeche, entre los ríos Tonalá al occidente y San Pedro y San Pablo al oriente (Figura 1).

Dentro del territorio estatal, comprende las franjas costera, litoral y marina con una longitud de 200 km; la zona litoral abarca el área de playa, entre la suprapalya y la infrapalya, con un ancho promedio de 30 metros, donde se evaluaron siete sitios considerados como estratégicos sus condiciones de erosión y depósito, éstos fueron:

- 1) Cinco Presidentes
- 2) Sánchez Magallanes
- 3) Tupilco
- 4) Tajón
- 5) Mecoacán
- 6) Grijalva
- 7) Costero

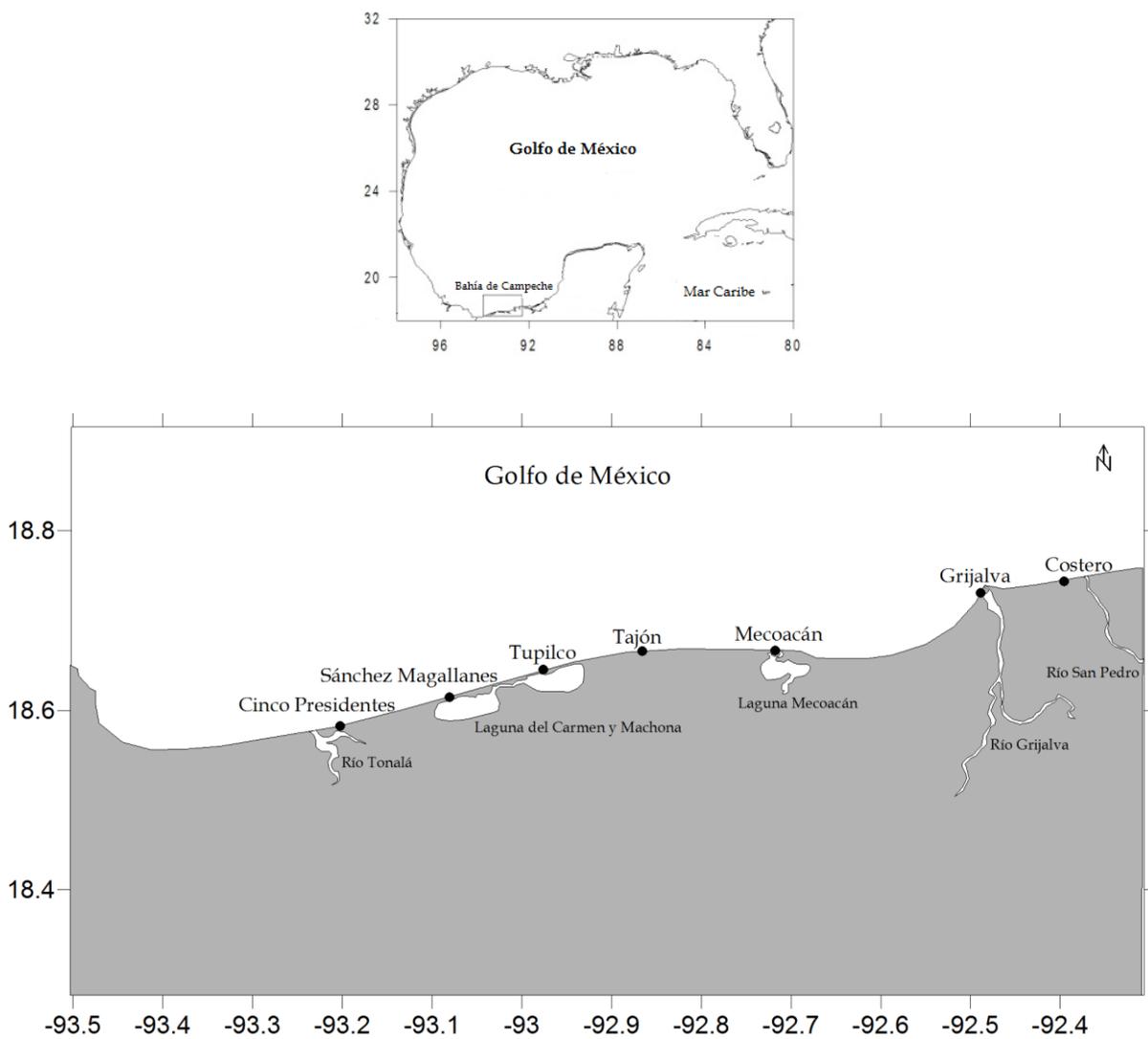


Figura 1. Área de estudio.

Según estudios anteriores, cuatro de estos sitios son considerados zonas críticas por su alto dinamismo (Sánchez Magallanes, Tupilco, Mecoacán y Grijalva), mientras que los tres puntos restantes (Cinco Presidentes, Tajón y Costero) son zonas “control” debido a su estabilidad morfológica en comparación a toda el área de estudio.

Tabasco cuenta con 184 km de litoral y su territorio costero ocupa extensas planicies planas, bajas y muy bajas, con pendientes inferiores a los 0.5° y de carácter acumulativo poligenético (fluvial, lacustre, palustre y marino) constituidas por depósitos cuaternarios recientes (arenas, arcillas y limos) sobre un zócalo de rocas calcáreas terciarias. La línea costera tabasqueña presenta un predominio morfológico de playas bajas y arenosas con presencia de islas barreras, que encierran una serie de lagunas litorales, entre las que se destacan: El Carmen, Pajonal, Machona, Tupilco, Tres Palmas, Arrastradero, Las Flores, Mecoacán, La Tinaja y otras de menor extensión (Ortíz, 1991).

Las playas arenosas junto con cordones de dunas, son las formas del relieve dominante en la zona, destacándose también una sucesión de numerosas lagunas costeras, donde existen pequeños lomeríos suaves con alturas no mayores de 10 m sobre el nivel medio del mar. Esta tipología propia, le confiere características morfológicas de una amplia planicie costera, formada principalmente por depósitos aluviales transportados por una red hidrológica muy compleja, integrada principalmente por los ríos más caudalosos del país, el Usumacinta y el Grijalva.

a) Geomorfología

En el extremo occidental de Tabasco, en la zona comprendida entre el río Tonalá y Sánchez Magallanes, se ubicaron dos topoformas principales:

1) Un campo de dunas que ocupa una franja entre 100 y 500 metros de ancho a partir de la línea de costa, el cual protege la estabilidad de la playa durante las tormentas. Por sus rasgos morfológicos, la duna costera muestra cierto desarrollo, ya que alcanza alturas que varían entre 5 y 7 metros y se encuentran integradas por depósitos arenosos no consolidados, cuya pendiente en general es ligeramente inclinada, aunque a barlovento puede ser relativamente empinada (25%).

También se observa la presencia de bermas semi-estables, es decir, existe vegetación rastrera sobre las mismas, lo que indican estabilidad de las dunas; sin embargo, la marea llega hasta el pie de la duna, generando escarpes de erosión con longitudes de 40 m y una altura que va de 50 cm a un metro. Cabe señalar que las dunas no sólo forman una barrera natural que sirve de protección respecto al oleaje y mareas, sino que a su vez obstruye el escurrimiento continental, formando los sistemas lagunares y humedales. Es por ello que durante eventos extraordinarios existe riesgo de inundación en la zona continental.

2) Una llanura costera con lomeríos bajos y suaves, con alturas no mayores a 3 metros sobre el nivel medio del mar y con una pendiente de 1 a 2%, formando crestas de playa que se encuentran protegidas a barlovento por las dunas adyacentes ya mencionadas. Las crestas de playa son bordos arenosos estrechos y alargados en dirección paralela a la playa y la distancia entre estas fluctúa entre 50 y 100 m. Su morfología corresponde con una sucesión de pulsos de acreción que se estima datan del Holoceno. Dentro de esta llanura costera se ubican los complejos petroleros Campo Cinco Presidentes y Campo San Ramón.

En la parte central y oriental del estado, la línea costera presenta una serie de dunas que encierran numerosas lagunas litorales que forman un sistema lagunar, entre las que destacan: Carmen, Machona, Tupilco y Mecoacán, originadas por la escasa pendiente de sus planicies y por los abundantes escurrimientos provenientes de la Sierra Norte de Chiapas. Dentro de esta zona, entre la costa y las lagunas señaladas, se encuentra un campo de dunas cuya elevación sobre el nivel del mar es de 3 a 5 metros, el cual funciona como una barrera entre el mar y el sistema lagunar.

La unidad morfológica mencionada tiene una amplitud de 100 metros junto a las lagunas Carmen y Machona, ampliándose hasta 2 000 metros en la laguna Mecoacán. La barrera que separa las lagunas Carmen, Pajonal y Machona son dunas semiestables con una amplitud promedio de 100 metros, encontrándose actualmente en proceso de erosión.

Las causas de la erosión en esta zona se atribuyen principalmente al aumento del oleaje, al decremento en el aporte de sedimentos, la ocurrencia de huracanes y tormentas estacionarias (nortes) de mayor magnitud. Las afectaciones provocadas por esta erosión van desde la pérdida de cultivos de palmera de coco, terrenos forrajeros y cambios en el ecosistema lagunar, hasta daños severos a la infraestructura carretera del estado.

Por otra parte, en el extremo oriental del litoral tabasqueño, se localiza la planicie de inundación de los ríos Grijalva, y San Pedro- San Pablo, ocupada en su parte continental por innumerables meandros abandonados, pantanos y una intrincada red fluvial, cuya elevación no sobrepasa los 3 metros sobre el nivel medio del mar y cuya pendiente es de 2% y conocida como Pantanos de Centla. Dentro de la zona costera, desde la desembocadura de los ríos Grijalva y San Pedro- San Pablo, se localiza el delta del Usumacinta-Grijalva, considerado el segundo más importante por su nivel de descarga en Norte y Centroamérica (Chávez y Trejo, 1994), el cual cubre una superficie de aproximadamente 4,850 km². Dentro de esta zona se han formado esteros, cordones litorales, playas, campos de dunas y planicies de acreción, bajo la influencia de los procesos marinos y el abundante aporte de sedimentos aluviales durante el Holoceno.

El delta Usumacinta-Grijalva presenta una morfología convexa, donde predomina el oleaje cuya turbulencia y vaivén impide el depósito de sedimentos finos, dispersándolos mar adentro y re trabajando continuamente los depósitos arenosos fluviales, los cuales son transportados lateralmente por la deriva litoral.

b) Características climáticas generales

El clima tabasqueño es cálido-húmedo, con un régimen hidrotérmico caracterizado por precipitaciones anuales entre 1500 y 2000 mm (Vidal, 1990) y temperaturas medias anuales superiores a los 26°C, con valores extremos mínimos entre 20-22°C, en enero, y máximos entre 30-34°C en mayo (García y Vidal, 1990). El régimen de vientos posee un fuerte predominio de la dirección este-noreste (ENE) (Pérez Villegas, 1990) con una velocidad promedio entre 4 y 6 m/seg. y en ocasiones superiores a 8 m/seg. (Pérez Villegas, 1990).

c) Suelo y vegetación

Los suelos son uniformes y representados por gleysoles con propiedades hidromórficas extremas (López, 1990) sobre los cuales se desarrolla una abundante vegetación acuática y subacuática, así como sectores aislados de bosques tropicales perennifolios (Rzedowski, 1990).

Dentro de los tipos de vegetación que se encuentran en la subprovincia de las "Llanuras y Pantanos Tabasqueños" sobresale la asociación de tular-popal, que abarca aproximadamente el 23% de la superficie total estatal. El desarrollo de esas comunidades vegetales está condicionado fundamentalmente por la presencia de zonas pantanosas y de inundación poco profundas, que han sido originadas por la abundante precipitación sobre planicies con suelos arcillosos y de drenaje lento, como los suelos Gleysoles, Solonchak gléyicos y Vertisoles pélicos.

La vegetación de manglar está distribuida en la parte posterior del cordón litoral bordeando las lagunas paralelas a la costa y conectadas con el mar; su presencia está condicionada a las situaciones de inundación y concentración de sales disueltas en agua (Moreno *et al.*, 2002) y las especies dominantes son mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle prieto (*Avicennia germinans*), (García y Palma, 19

II. METODOLOGÍA

Se realizó un monitoreo estacional en las playas mencionadas durante la temporada de secas en mayo del 2010; durante la temporada de lluvias en septiembre del 2010 y 2011, y durante la temporada de nortes en noviembre del 2011. El monitoreo consistió en levantamientos topográficos en las playas y toma de muestras de sedimento en estos sitios, así como la medición de corrientes en cada temporada para poder evaluar los cambios estacionales en el área de estudio.

El trabajo en campo consistió en levantamientos topográficos en playas de siete sitios y el muestreo de sedimentos en cada una de ellas en la zona de infraplaya, mesoplaya y supraplaya, así como la medición de corrientes marinas en la zona de estudio.

El trabajo en laboratorio consistió en el análisis granulométrico y de composición mineralógica de los sedimentos muestreados. El trabajo de gabinete desarrollado fue el análisis histórico de la zona litoral y del comportamiento de playa, análisis de los datos de oceanografía física, el modelo de refracción de oleaje incidente en la zona de estudio y la evaluación de la vulnerabilidad costera y riesgo en cada sitio.

2.1. Análisis histórico de la zona litoral

Con el fin de identificar el cambio morfológico de la línea de costa y poder calcular las tasas de erosión y acreción, se consideraron las imágenes del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) a escala 1:20,000 y una resolución de 2 metros, correspondientes al año de 1995.

La estimación de la tasa de erosión se realizó mediante el método de cálculo de áreas de referencia (Figura 2). Para cada imagen de un año determinado se marcó un polígono de referencia y se calcularon el área continental (m^2) y la longitud de la línea de costa (m^2). Con fines de homogenización del análisis, todos los polígonos tuvieron un ancho aproximado de 5km.

Para conocer la tasa de erosión costera (tec) se calculó el desplazamiento de la línea de costa (dlc) durante los periodos de observación de dos imágenes digitales de dos fechas diferentes (Año 1 y Año 2, i.e 1988, 2008). Se utilizaron las siguientes ecuaciones (Anide, 2005):

$$dlc(m) = \frac{AreaCont2 - AreaCont1}{LongCosta2}$$

$$tec(m/año) = \frac{dlc}{Año2 - Año1}$$

Para conocer la tasa de erosión y acreción costera neta (tecn y tacn) se utilizó el álgebra de mapas con la herramienta Erase del software ArcGis 9.3.1®. Esta herramienta permite borrar el área común entre dos años diferentes y sólo deja el área de diferencia. El cálculo de dichas tasas se realizó utilizando una variante de las fórmulas anteriormente descritas como se explica a continuación:

Erosión:

$$dlce(m) = \frac{AreaCont2 - AreaCont1}{LongCosta2}$$

Acreción:

$$dlca(m) = \frac{AreaCont1 - AreaCont2}{LongCosta2}$$

Para el cálculo del desplazamiento de la línea de costa, tanto para erosión como para acreción ($dlca, e$) durante los periodos de observación, se utilizó la siguiente ecuación (Anide, 2005):

$$tec, tac(m/año) = \frac{dlc(a, e)}{Año2 - Año1}$$

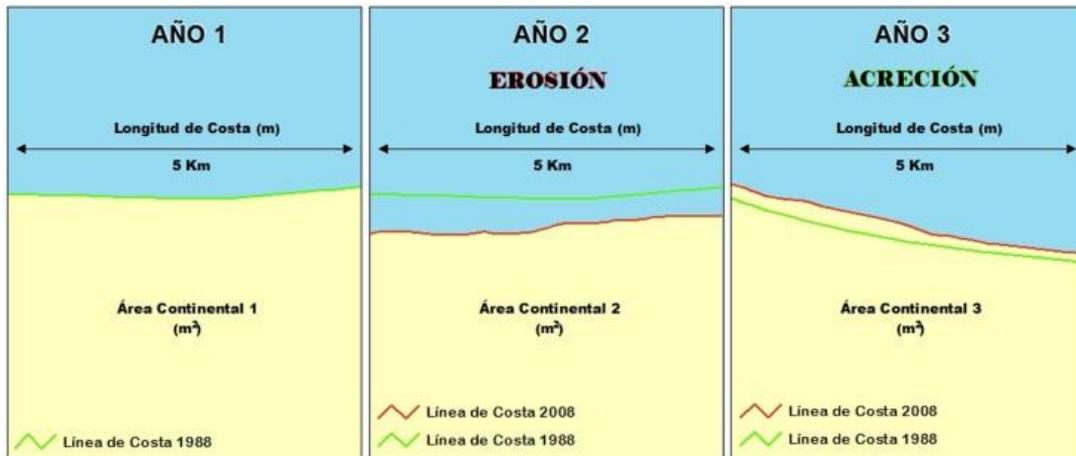


Figura 2. Áreas de referencia para el cálculo de la tasas de erosión y acreción.

2.2. Levantamiento topográfico y análisis del comportamiento de playa

La morfología de la zona costera se obtuvo a través del trazo de un polígono abierto, cuyos vértices se monumentaron a lo largo del litoral, en coincidencia con las playas sujetas a estudio. Estos bancos de nivel fueron referidos al Nivel Medio del Mar (NMM), a partir del traslado de las cotas de los vértices Geodésicos (Banco de Nivel Topográfico) BNT 209, 683 8 y 522 6, (pertenecientes a la Red Geodésica Nacional), por medio de una nivelación espacial con GPS diferencial; la cual consiste en la ubicación de un receptor base sobre la placa de la red geodésica y otro receptor en el vértice a ubicar.

El levantamiento topográfico de cada playa se realizó por el método de radiaciones a partir de los vértices establecidos, comprendiendo el trazo de perfiles de playa normales a la línea de costa. Estos levantamientos se realizaron en una franja de terreno que varía entre 500 m y 1000 m de longitud, paralela a la línea de costa y su amplitud fue establecida a partir de la presencia de dunas o el límite de vegetación existente hasta la zona de infraplaya. Los puntos a lo largo de los perfiles fueron obtenidos con una estación topográfica Sokkia SET630, a través de los se generaron las curvas de nivel por el método de triangulación lineal contenidos en los programas Autocad ®3 y Surfer 8.0 ®4.

La descripción de las playas se realizó en términos de su pendiente, amplitud y longitud. La amplitud se determinó como la perpendicular a la línea de costa, mientras que la longitud se ha definido como paralela a ésta. Así mismo, se describe la playa por las zonas de supraplaya, mesoplaya e infraplaya (Figura 3).

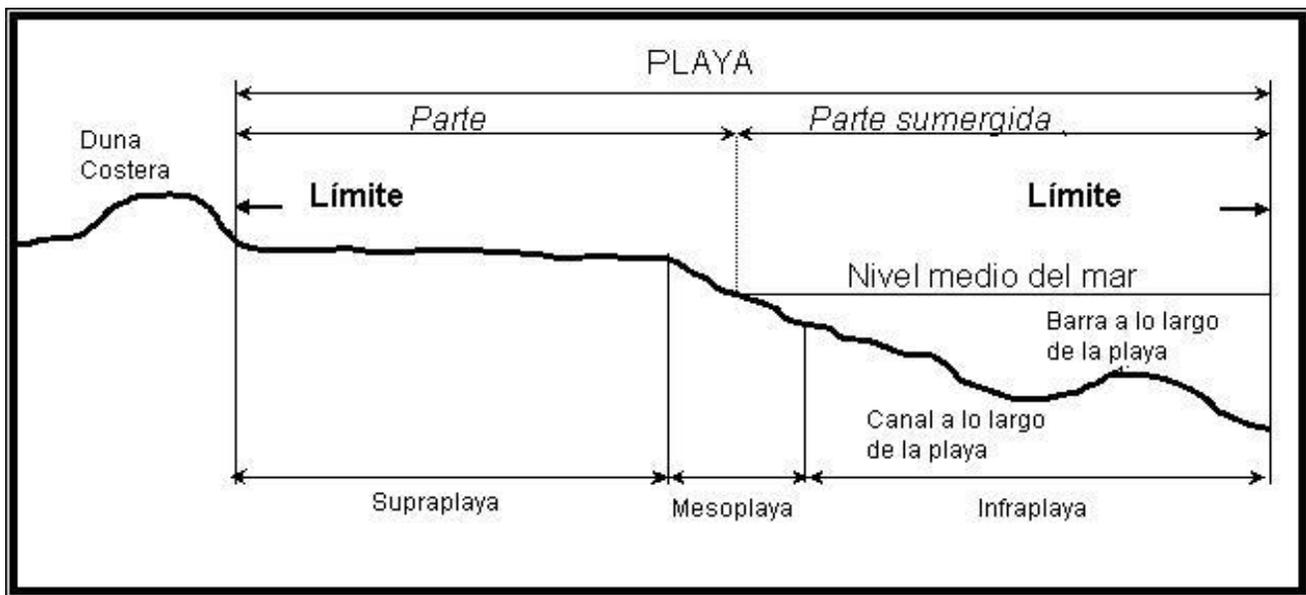


Figura 3. Diagrama de división de la playa en supraplaya, mesoplaya e infraplaya.

En cada sitio se realizaron cuatro levantamientos topográficos, cubriendo el largo de la playa, por el ancho comprendido entre infraplaya y supraplaya. En las desembocaduras de los ríos y bocas lagunares los levantamientos se realizaron en ambos lados de los mismos.

El cálculo del volumen se realizó mediante la determinación de las curvas de nivel de playa. La medición continua de los cambios morfológicos del perfil de playa y de los volúmenes de arena correspondientes durante un periodo de muestreo constituye la información más precisa para el cálculo de su evaluación a lo largo del tiempo.

Debido a que los BN se refirieron a la red geodésica en valores de altitud, no fue necesario corregir elevaciones por marea, ya que los BN están referidos al nivel medio del mar. La marea solo se consideró para determinar la amplitud de playa.

2.3. Muestreo y caracterización de sedimentos

En los sitios donde se llevaron a cabo los levantamientos topográficos de playa se realizó un muestreo de sedimentos en las tres zonas ya establecidas: la parte expuesta (supraplaya), la zona de lavado o de rompiente (mesoplaya) y de la zona sumergida (infraplaya). Cada una de estas tres muestras brinda información sobre el efecto de procesos litorales de erosión y acreción en cada uno de los sitios de estudio.

a) Análisis granulométrico

El análisis de tamaños o textura de sedimentos se realizó de acuerdo a la escala de tamaños de Wentworth (1922), utilizando los criterios propuestos por Folk (1974), Carver (1971) y MaC Manus (1988).

Para los sedimentos arenosos el análisis granulométrico se realizó por el método de tamizado a cada $1/4$ de phi (Φ) y se calcularon los parámetros granulométricos (Tabla 1, modificada de Folk, 1974) tamaño gráfico promedio, desviación estándar gráfica inclusiva, grado de asimetría gráfica inclusiva y curtosis.

Tabla 1. Límites de parámetros granulométricos.

Parámetros y Fórmulas	Límites
<p>Tamaño gráfico promedio</p> $Mz = (\emptyset_{16} + \emptyset_{50} + \emptyset_{84})/3$	<p>Arena muy gruesa: -1 \emptyset a 0 \emptyset (2 a 1 mm) Arena gruesa: 0 \emptyset a 1 \emptyset i (1 a 0.5 mm) Arena media: 1 \emptyset a 2 \emptyset (0.5 a 0.25 mm) Arena fina: 2 \emptyset a 3 \emptyset (0.25 a 0.125 mm) Arena muy fina: 3 \emptyset a 4 \emptyset (0.125 a 0.625 mm) Limo muy grueso: 4 \emptyset a 5 \emptyset Limo grueso: 5 \emptyset a 6 \emptyset Limo medio: 6 \emptyset a 7 \emptyset Limo fino: 7 \emptyset a 8 \emptyset Arcilla: > 8 \emptyset</p>
<p>Desviación estándar gráfica inclusiva</p> $\sigma_1 = \frac{\emptyset_{84} - \emptyset_{16}}{4} + \frac{\emptyset_{95} - \emptyset_5}{6.6}$	<p>Muy bien clasificado: menor de 0.35 \emptyset Bien clasificado: 0.35 \emptyset a 0.50 \emptyset Moderadamente bien clasificado: 0.50 \emptyset a 0.71 \emptyset Moderadamente clasificado: 0.71 \emptyset a 1.00 \emptyset Mal clasificado: 1.00 \emptyset a 2.00 \emptyset Muy mal clasificado: 2.00 \emptyset a 4.00 \emptyset Extremadamente mal clasificado: mayor de 4.00 \emptyset</p>
<p>Grado de asimetría gráfica inclusiva</p> $SKi = \frac{\emptyset_{16} + \emptyset_{84} - 2\emptyset_{50}}{2(\emptyset_{84} - \emptyset_{16})} + \frac{\emptyset_5 + \emptyset_{95} - 2\emptyset_{50}}{2(\emptyset_{95} - \emptyset_5)}$	<p>Muy asimétrico hacia finos: +1.00 a +0.30 Asimétrico hacia finos: +0.30 a +0.10 Simétrico: +0.10 a -0.10 Asimétrico hacia gruesos: -0.10 a -0.30 Muy asimétrico hacia gruesos: -0.30 a -1.00</p>
<p>Curtosis</p> $KG = \frac{\emptyset_{95} - \emptyset_5}{2.44(\emptyset_{75} - \emptyset_{25})}$	<p>Muy platicúrtico: menor de 0.67 Platicúrtico: 0.67 a 0.90 Mesocúrtico: 0.90 a 1.11 Leptocúrtico: 1.11 a 1.50 Muy leptocúrtico: 1.50 a 3.00 Extremadamente leptocúrtico: mayor de 3.00</p>

b) Composición mineralógica de los sedimentos

La composición mineralógica se obtiene mediante estudios petrográficos utilizando microscopios estereoscópicos y petrográficos. Los estudios mineralógicos consisten en la identificación de minerales terrígenos (silicatos, filosilicatos, óxidos, entre otros) y carbonatados (biogénicos, calizas, etc.). El análisis se realizó por el método de "frotis" (Rothwell, 1989) con microscopio estereoscópico para la fracción arenosa y con microscopio petrográfico para la fracción lodosa, esto último a partir de las propiedades físicas y ópticas de los minerales. El porcentaje de los minerales se hizo de acuerdo a la Carta de Comparación de Porcentaje para Estimar Proporciones de Componentes Sedimentarios (Rothwell, 1989).

Los sedimentos fueron clasificados en calcáreos o terrígenos de acuerdo al triángulo de clasificación de sedimentos marinos propuesto por el Deep Sea Drilling Project (DSDP)/ Ocean Drilling Program Scientist (Rothwell, 1989) (Figura 4).

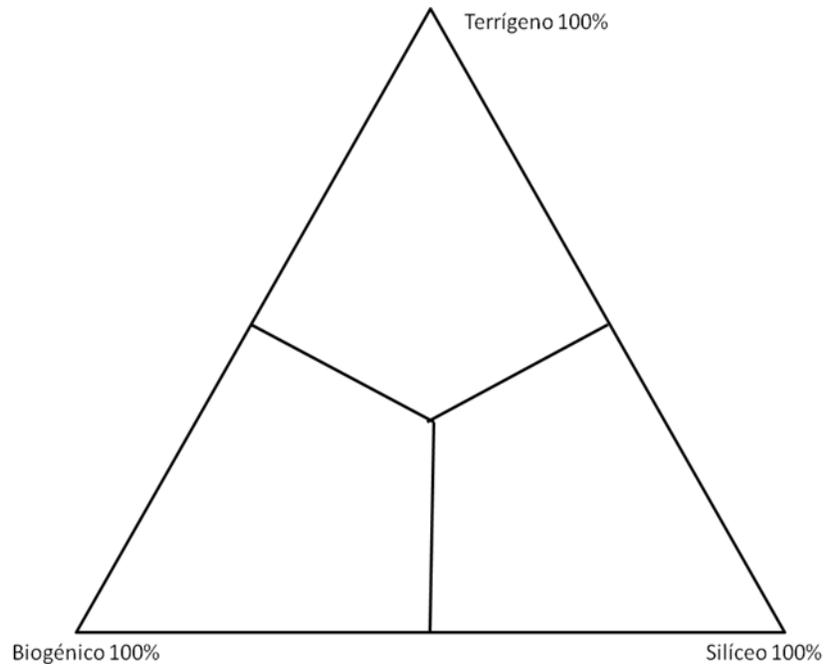


Figura 4. Triángulo de clasificación general de sedimentos marinos en tres componentes.

En los sedimentos arenosos terrígenos se determinó el contenido de las fases minerales y líticas de acuerdo con los porcentajes de silicatos (minerales oscuros, feldespato), sílice (cuarzo), carbonatos (rocas calcáreas), filosilicatos (mica), óxidos y biogénicos (calcáreos y silicios) y los fragmentos de roca; de acuerdo con el Diagrama de Flujo para la Identificación de Minerales en Grano, Observados en Frotis (Rothwell, 1989).

Para la clasificación de los sedimentos terrígenos se utilizó el triángulo de Folk, 1974 (Figura 5). La esfericidad y redondez se determinó de acuerdo a la tabla de Comparación Visual para estimación de redondez y esfericidad (Powers, 1982), esta estimación se hizo principalmente en cuarzo.

A partir de los resultados de la composición mineralógica se determinó la proveniencia.

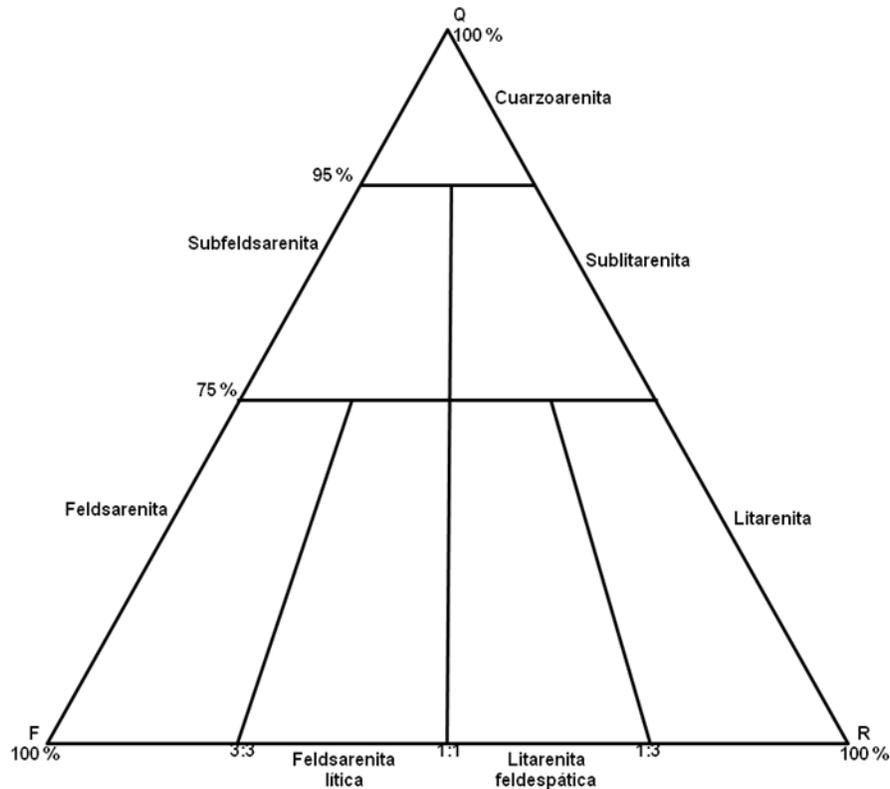


Figura 5. Triángulo para la clasificación de arenita, después de Folk, Andrews y Lewis, 1970, (Folk, 1984).

2.4. Análisis de datos de Oceanografía Física y modelo de refracción de oleaje

Se analizaron los datos obtenidos del "Estudio sobre la dinámica costera en la zona litoral de tabasco y su impacto en la infraestructura petrolera" para determinar las características de la circulación oceánica. Para este estudio se utilizaron Perfiladores de Corriente Acústico Doppler (ADCP) Aquadop Profiler de 1000 kHz, instalados en la desembocadura del Río Grijalva y en la Boca Sánchez Magallanes, a una distancia aproximada de la costa de 1,200 m y a una profundidad de 7 m, del 12 de octubre al 7 de noviembre de 2010, del 3 al 20 de septiembre y del 10 al 20 de noviembre 2011.

Se realizó un modelo de refracción de oleaje para determinar los sitios donde existe una mayor concentración de energía, ya que las olas son distorsionadas por cambios en la profundidad (campo de velocidad) en aguas relativamente someras, es decir, la velocidad de la ola decrece con la profundidad y la longitud de onda decrece proporcionalmente (U.S. Army Corps of Engineers, 1984).

La importancia del análisis de refracción según la U.S. Army Corps of Engineers (1984) es:

- La refracción y el someramiento determinan la altura del oleaje a determinada profundidad y bajo determinadas condiciones de periodo y dirección de propagación.
- El cambio en la dirección del oleaje de diferentes partes de la ola resulta en la convergencia o divergencia de energía y afectaciones por oleaje en estructuras.
- La refracción contribuye a la alteración de la topografía por erosión y deposición de sedimentos.

El método de ortogonales es el más adecuado para el análisis de refracción de oleaje, por ser más rápido que el método gráfico de frentes de ola y que el método de refracción por espectro.

El programa que se utilizó fue REDSEA (Refraction and diffraction simultaneous effects approximation) de Worthington y Herbich, desarrollado por la "Texas A&M University", adaptado por Montaña y Aldeco (1985). Este programa FORTRAN calcula las coordenadas de avance de ortogonales sobre una malla de datos (campo de velocidad).

Para utilizar éste método se deben considerar lo siguiente:

- El análisis de refracción está basado en la Ley de Snell y en la Teoría Lineal de ondas oceánicas.
- La energía de las olas entre ortogonales permanece constante.
- La dirección de avance de las olas es en dirección de las ortogonales.

- La velocidad de una ola en un período dado depende solamente de la profundidad a la que se encuentra.
- Los cambios en la topografía del fondo son graduales.
- Las olas son suaves (no picudas), de periodo constante, de pequeña amplitud y monocromáticas.
- El efecto de corrientes, vientos, difracción y reflexión por playas o estructuras es considerado despreciable.

Debido a que la refracción del oleaje depende esencialmente de la profundidad en la que viajan las olas, en la modelación numérica de ortogonales que atraviesan una zona de transición de agua profunda a agua somera se utiliza el campo de velocidad. En la misma tónica de un haz luminoso que atraviesa un medio de diferentes densidades (velocidades), el programa de refracción genera un campo de velocidad a partir de los datos batimétricos.

2.5. Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por zona

Uno de los factores ambientales más importantes a considerar para evaluar la vulnerabilidad es el análisis del cambio climático, así como la revisión de sus diferentes escenarios a diferentes escalas de tiempo, principalmente los que implican las amenazas hidrometeorológicas para la región, como los huracanes. Éstos constituyen uno de los problemas más graves que se ha tomado en cuenta, pues están relacionados directamente con inundaciones en la zona, y por tanto con los procesos erosivos característicos que en sí mismos ya representan un riesgo en algunos sitios.

Generalmente, los métodos para evaluar el grado de vulnerabilidad se basan en el uso de indicadores, los cuales están determinados por la amenaza de interés, la escala de análisis, la información disponible y las características específicas de cada lugar.

El índice CVI (Coastal Vulnerability Index), desarrollado por el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) en 1992, es el método escogido para el análisis de vulnerabilidad. Este método permite evaluar en una primera aproximación la sensibilidad de cada sector costero.

El CVI se compone de seis variables cuantitativas, considerando un potencial aumento del nivel del mar. Esta metodología establece una escala de 1 (muy baja vulnerabilidad) a 5 (muy alta vulnerabilidad). Las variables consideradas son:

- 1) Variables geológicas-geomorfológicas.
 - a) resistencia que ofrece el medio geomorfológico a la erosión
 - b) tasa de erosión
 - c) pendiente costera
- 2) Variables físicas
 - d) altura del oleaje
 - e) tasa de cambio del nivel relativo del mar
 - f) rango mareal medio

Una vez ponderadas las diferentes variables se sustituyen sus valores en la siguiente ecuación:

$$CVI = \sqrt{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}{6}}$$

- a) **Geología-geomorfología (GG)**. Para esta variable se consideraron los datos disponibles sobre la geomorfología del área de estudio obtenida por estudios previos (Tabla 2).

Tabla 2. Ponderación de variable Geología-Geomorfología.

VARIABLE	MUY BAJO 1	BAJO 2	MODERADO 3	ALTO 4	MUY ALTO 5
Geología - Geomorfología (GG)	Acantilados altos sobre rocas coherentes	Acantilados medios sobre rocas de resistencia media	Acantilados medios/bajos sobre formaciones sedimentarias de alta erosionabilidad	Playas extensas adosadas a planicies sedimentarias litorales poco elevadas	Playas adosadas a formaciones de islas-barrera, tómbolas, flechas, deltas, etc. También zonas que protegen formaciones de marismas mareales o fluvio-mareales.

b) Tasa de erosión (m/año) (Tero). La estimación de tasas de cambio en la línea de costa se ha obtenido a partir del desplazamiento total promedio en cada uno de los sectores seleccionados, de acuerdo al análisis comparativo histórico entre el año 1988 y la observada en 2010 (22 años). A las tasas calculadas se les aplicó la siguiente clasificación y asignación de valores entre 1 y 5, utilizando los rangos establecidos para el CVI por el USGS (Tabla 3).

Tabla 3. Ponderación de variable Tasa de Erosión.

VARIABLE	MUY BAJO 1	BAJO 2	MODERADO 3	ALTO 4	MUY ALTO 5
Tasa de erosión Tero (m/año)	(2, máx.]	(1, 2]	(-1, 1]	(-2, -1]	[mín. -2]

c) Índice topográfico (Itop). Este índice se integra por tres variables que han sido determinadas a través de los levantamientos topográficos de playa, realizados en cada uno de los sitios mencionados y consiste de los siguientes datos:

- Distancia “D”, indicador del alcance tierra adentro de un potencial incremento en el nivel del mar, que en el presente estudio se estimó en 5 metros como caso más extremo, y que se proyecta a partir de la configuración de la curva de nivel o cota referida.
- Pendiente media “P”, estimada en cada sitio de estudio a partir del perfil topográfico de la playa.
- Altura media “A”, calculada por el mismo procedimiento anterior, en cada punto.

Los datos se clasificaron de acuerdo a los intervalos mostrados en la Tabla 4 y su ponderación en la Tabla 5.

Tabla 4. Componentes del Índice Topográfico.

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	1	2	3	4	5
Distancia del alcance tierra adentro de una potencial subida del nivel del mar* del área en estudio, D (m)	[0 - 250]	(250 - 500]	(500 - 1000]	(1000 - 3 000]	(3 000, máx.]
Pendiente media del área en estudio, P (%)	(8, máx.]	(4 - 8]	(2 - 4]	(1 - 2]	[0 - 1]
Altura media del área en estudio, A (m)	(8, máx.]	(6 - 8]	(4 - 6]	(2 - 4]	[0 -2]

Finalmente se evalúa un índice topográfico como la media aritmética de los tres valores anteriores.

$$I_{top} = \frac{D + P + A}{3}$$

Tabla 5. Ponderación de Índice Topográfico (I_{top}).

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	1	2	3	4	5
I _{top}	(0, 1]	(1, 2]	(2, 3]	(3, 4]	(4, 5]

d) **Cálculo y clasificación de la altura de oleaje significativo medio (HS).** Los datos considerados para este parámetro derivan de las mediciones realizadas por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), cuya finalidad fue obtener información sobre las características del oleaje en la Sonda de Campeche, seleccionando la plataforma de producción Nohoch "A", donde se instaló de forma permanente un equipo de medición y registro de oleaje desarrollado por el IMP. Su calificación se obtiene de la Tabla 6.

Tabla 6. Ponderación de la variable Oleaje Significativo Medio.

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	1	2	3	4	5
Oleaje significativo medio, HS (m)	(0, 0.75]	(0.75, 0.85]	(0.85, 0.95]	(0.95, 1.05]	(1.05, 1.15]

e) **Cálculo y clasificación de la tasa de cambio del nivel relativo del mar (LEV).** Se consideraron valores que oscilan entre 2.9 y 3.4 mm/año según lo reportado por Zavaleta-Hidalgo (2010) del análisis de los datos de la estación mareográfica de Coatzacoalcos. La Tabla 7 muestra la ponderación de esta variable.

Tabla 7. Ponderación de la variable tasa de cambio del nivel relativo del mar.

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	1	2	3	4	5
Tasa de cambio del nivel relativo del mar LEV (mm/año)	(0, 1.8]	(1.8, 2.5]	(2.5, 3.0]	(3.0, 3.5]	(3.5, máx.]

f) **Rango mareal medio (TID).** Las amplitudes de las mareas en el Golfo de México presentan pequeñas variaciones, sin embargo éstas generan el transporte de masas de agua significativas; siendo de tipo diurno a lo largo del litoral, desde el Noreste de Yucatán hasta Coatzacoalcos. Por lo anterior se consideró el valor de 0.149 m como constante para la zona en estudio y su calificación como muy alta, de acuerdo con la Tabla 8.

Tabla 8. Ponderación de la variable Rango Mareal Medio.

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	1	2	3	4	5
Rango mareal medio, TID (m)	> 6	4 - 6	2 - 4	1 - 2	0 - 1

Cálculo y clasificación del CVI

El valor CVI se divide en cinco clases con el fin de identificar los tramos según su vulnerabilidad relativa sin que el valor en sí mismo del CVI se asocie a cambios específicos de tipo físico, y considerando que los resultados del CVI consideran valores originales entre 10.95 y 35.36, los rangos para la clasificación de vulnerabilidad total calculada se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación del CVI.

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
Vulnerabilidad clasificada	1	2	3	4	5
Valor del CVI	(10.95, 15.49]	(15.49, 20]	(20, 26.34]	(26.35, 35.36]	(mayor a 35.36)

Evaluación de riesgo

Los valores de ponderación utilizados están basados en la importancia de cada uno de los elementos de riesgo respecto al daño causado por un desastre. El riesgo se puede definir como el grado esperado de pérdida debido a fenómenos naturales particulares (Varnes, 1984), esto es la multiplicación de costos por la vulnerabilidad por el período de retorno del fenómeno natural que causa daño (Van Westen, 1993).

Al no disponer de datos de costo ni de periodo de retorno, el riesgo se calcula como la multiplicación del peligro natural por la vulnerabilidad; esto da como resultado un mapa cualitativo y cuantitativo de riesgo; la combinación se realizó con una tabla de dos dimensiones (Tabla 10).

Tabla 10. Evaluación del riesgo en función del peligro y la vulnerabilidad

RIESGO		Vulnerabilidad				
		Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
		1	2	3	4	5
Peligro	Muy bajo 1	1	2	3	4	5
	Bajo 2	2	4	6	8	10
	Moderado 3	3	6	9	12	15
	Alto 4	4	8	12	16	20
	Muy alto 5	5	10	15	20	25

Cuando el peligro es muy bajo, no importa si la vulnerabilidad es baja o alta; el riesgo será bajo en todos los casos. Cuando la vulnerabilidad es muy baja, significa que el área no contiene ningún elemento importante en el riesgo, entonces el riesgo es siempre bajo. Para el nivel cualitativo de riesgo se consideró la clasificación de la Tabla 11.

Tabla 11. Clasificación del riesgo

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
Riesgo clasificado	1	2	3	4	5
Valor del riesgo calculado	1-5	6-10	11-15	16-20	20-25

III. RESULTADOS

Los resultados se presentan en dos escalas de tiempo, la primera de ellas en décadas (análisis histórico de la línea de costa) y la segunda, con los resultados obtenidos en las estaciones climáticas (secas, lluvias y nortes) sobre la erosión y acreción en los sitios seleccionados en la zona litoral.

En primer lugar se presentan los resultados de la morfodinámica del sitio, donde se observa el análisis histórico de la zona litoral, el levantamiento topográfico y comportamiento de playa, seguido por el muestreo y caracterización de sedimentos. Después aparece el análisis de datos de Oceanografía Física y el modelo de refracción de oleaje para la zona de estudio, y finalmente la evaluación de la vulnerabilidad por zona.

Estos resultados se generaron a partir de dos campañas de campo realizadas durante las temporadas de lluvias y nortes del año 2011, durante los meses de septiembre y noviembre, respectivamente, más la integración de los resultados para los mismos puntos realizado en los períodos de en secas y lluvias del año 2010 como parte del “Estudio sobre la dinámica costera en la zona litoral de tabasco y su impacto en la infraestructura petrolera”.

3.1. Análisis histórico de la zona litoral

A partir del análisis comparativo entre la línea de costa existente en el año de 1988 y la observada en 2010, se observó que existe un retroceso generalizado de las playas de 52.6 metros, como promedio para toda el área de estudio; lo cual significa una tasa promedio anual de 2.6 m de erosión en el borde costero.

De acuerdo con las mismas mediciones, existen áreas donde predominó el depósito o acreción de sedimentos de hasta 10.6 m de acumulación total; el resultado es un promedio anual de 0.5 metros de crecimiento en la línea de playa.

A partir de estos resultados, se identificaron principalmente tres fenómenos:

- a) erosión continua
- b) acreción o progradación
- c) fluctuación erosión-depósito (equilibrio relativo)

a) Erosión continua

El proceso más importante y común observado a lo largo de la zona de estudio es el de erosión continua (Tabla 12).

Tabla 12. Tasa de erosión de cada sitio a lo largo de la costa de Tabasco.

SITIO	AÑOS	INTERVALO (años)	DEZPLAZAMIENTO	DESPLAZAMIENTO
			TOTAL PROMEDIO (m)	ANUAL PROMEDIO (m)
Cinco Presidentes	88-10	22	-9.2	-0.4
Sánchez Magallanes	88-10	22	-13	-0.6
Barra Tupilco	88-10	22	-83.9	-3.8
Tajón	88-10	22	-96.6	-4.4
Dos Bocas-Mecoacán	88-10	22	-70.7	-3.2
Río Grijalva-Tizón	88-10	22	-214.8	-9.8
Campo Costero	88-10	22	-87.2	-4

En términos geológicos y oceanográficos, este proceso pudiera estar asociado a la transgresión marina, caracterizada por el avance de la línea de costa hacia el continente debido a la elevación del nivel del mar, lo cual a su vez puede originarse por la subsidencia del terreno (tectónica regional) y/o el deshielo en las zonas polares. La erosión continua también puede deberse a los fenómenos meteorológicos extremos que impactan en la zona, tales como huracanes y nortes, así como a la construcción de obras civiles en la zona costera.

Este proceso se extiende a todo lo largo del área de estudio y en algunos sitios muy localizados, como en la desembocadura del Río Grijalva en su margen oeste, donde la pérdida de playa sobrepasa los 500 metros (Figura 6).



Figura 6. Superposición de línea de costa de 1988 y 2010 en el área de la desembocadura del Río Grijalva margen oeste.

b) Acreción o progradación

Este proceso da como resultado el crecimiento de la playa más allá del límite cartografiado para el año más antiguo, que corresponde a 1988, tal es el caso de la boca Sánchez Magallanes margen este y Grijalva margen este (Tabla 13).

Tabla 13. Tasa de acumulación de cada sitio en la costa de Tabasco

SITIO	AÑOS	INTERVALO (años)	DEZPLAZAMIENTO	DESPLAZAMIENTO
			TOTAL PROMEDIO (m)	ANUAL PROMEDIO (m)
Cinco Presidentes	88-10	22	8.9	0.4
Sánchez Magallanes	88-10	22	17.5	0.8
Barra Tupilco	88-10	22	0.2	0
Tajón	88-10	22	0	0
Dos Bocas-Mecoacán	88-10	22	3.7	0.2
Río Grijalva-Tizón	88-10	22	19.6	0.9
Campo Costero	88-10	22	0.5	0

La Figura 7 muestra, de izquierda a derecha, la acreción en el margen este de la boca Sánchez Magallanes y en el margen este de la desembocadura del Río Grijalva.

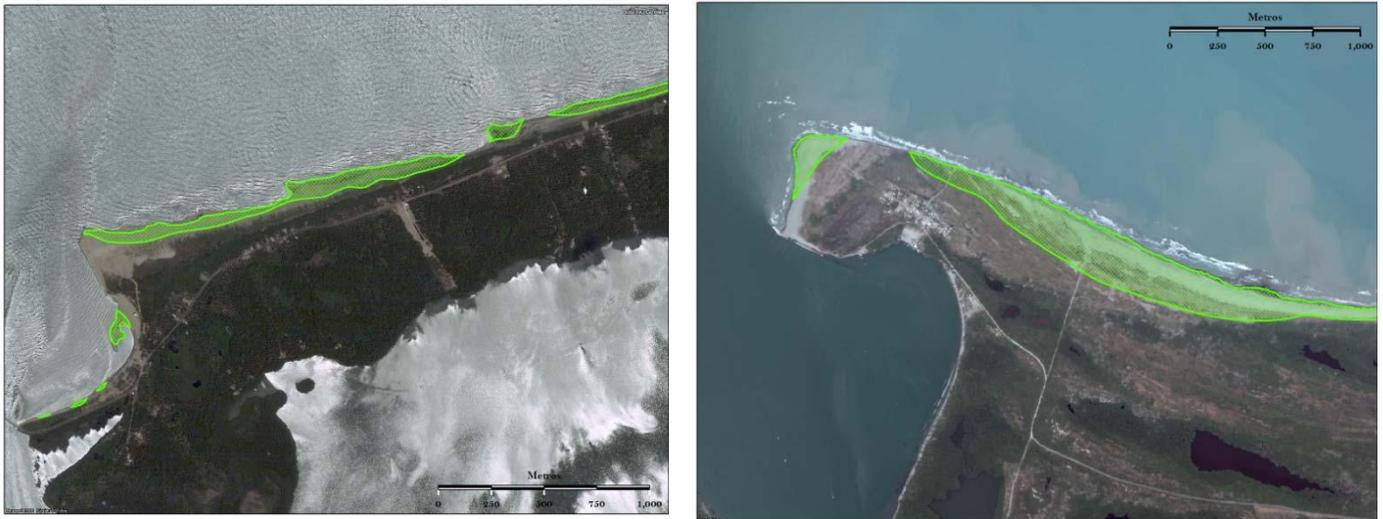


Figura 7. Depositación en el margen este de Sánchez Magallanes y Grijalva.

c) Fluctuación erosión – depósito

El tercer proceso identificado dentro del área de estudio es el de la fluctuación entre la erosión y el depósito de los sedimentos, donde se observa una tendencia a cierto equilibrio de la línea de costa, aun cuando finalmente predomina el factor erosivo, de acuerdo con el análisis comparativo que cubre las últimas dos décadas.

Estas fluctuaciones en el límite costero presentan el siguiente comportamiento: de los años 80s a los 90s el retroceso de la línea hacia el continente fue aproximadamente de 40 metros, mientras que entre los 90s y 2000 hubo una recuperación de material de aproximadamente 35 metros, y del año 2000 al 2003 hubo una pérdida de aproximadamente 30 m en promedio. Para el año 2006 se presentó una acumulación de material de 55 m, sin embargo para los años 2008 y 2010 el proceso de erosión se presenta una vez más en la línea de costa con 70 y 15 m. En la Tabla 14 se observa el desplazamiento promedio desde el año 1988; los valores con signo positivo representan acumulación y los negativos representan erosión.

Tabla 14. Desplazamiento total promedio de cada sitio (m).

Sitio	Año						Balance neto (m)	Proceso histórico
	88-95	95-00	00-03	03-06	06-08	08-10		
Cinco Presidentes	-27.8	8	-1.8	23.8	-1.6	-0.7	-0.1	Estable
*Sánchez Magallanes	-1.2	12.9	-10	21.4	-13.6	-2.9	*6.6	*Acreción
Barra de Tupilco	-81.6	-20.9	-2.8	23.8	0	0	-81.5	Erosión
Tajón	-84.2	3.5	-9.2	4.2	-4.6	-6.5	-96.8	Erosión
Dos Bocas-Mecoacán	-39	-4	-19.8	0.9	-12.6	-0.6	-75.1	Erosión
Grijalva-Tizón	-102.3	-7.9	-41.3	-3.2	-39.1	-4.3	-198.1	Erosión
Campo Costero	-68	17.3	-40.6	17.5	-3.1	-5.6	-82.5	Erosión

*Es importante recalcar que el análisis de procesos históricos en Sánchez Magallanes es el promedio del margen este y oeste; el margen este presenta un proceso notable de acreción, gracias a la escollera construida, mientras que el margen oeste está dominado por la erosión.

En el balance neto del análisis histórico, la boca Sánchez Magallanes presenta un proceso de acreción, aunque en el análisis a detalle de cada margen de esta zona, los procesos son diferentes: margen este acreción, margen oeste erosión.

En la Figura 8 se observa que la pérdida de costa en las décadas ochenta y noventa alcanza una recuperación parcial en 2006, sin embargo prevalece la tendencia a la erosión para el año 2010.

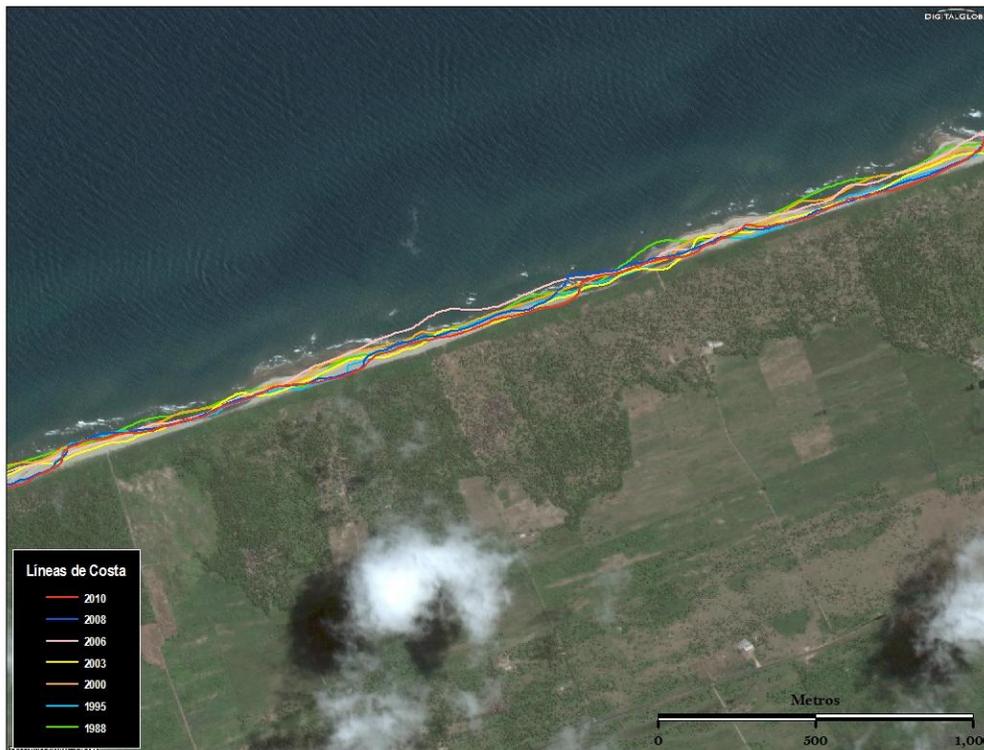


Figura 8. Proceso de erosión–acreción en la línea de costa al este del Río Tonalá.

Balance histórico de erosión-acreción

El proceso predominante en la zona de estudio es el de erosión. El análisis histórico contempla información de 22 años, desde 1988 al 2010, donde se muestra que los sitios con mayor erosión son la franja comprendida entre la desembocadura del Río Grijalva - Tizón, seguida de Campo Tajón, Campo Costero y Barra de Tupilco (Figura 9).

El sitio que mostró una erosión media fue Dos Bocas-Mecoacán, y Campo Cinco Presidentes presentó menor erosión. En el balance histórico neto, el sitio de mayor acreción es Boca Sánchez Magallanes en su margen este.

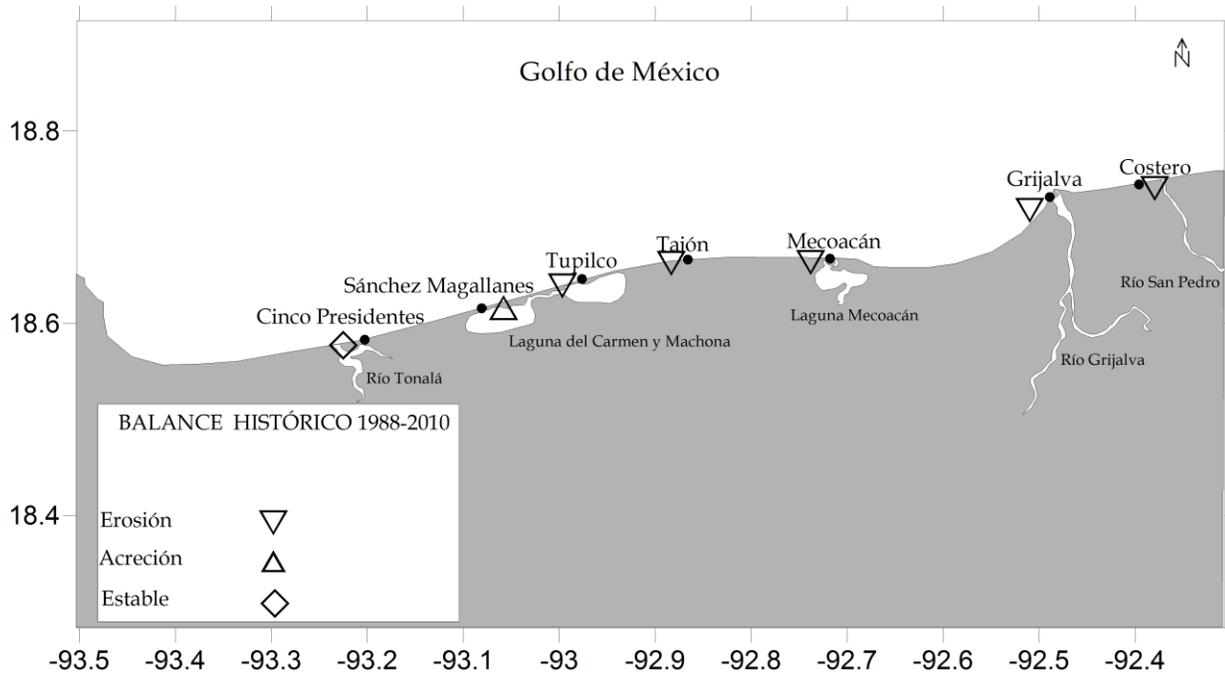


Figura 9. Balance histórico de los procesos de erosión y acreción

Para la interpretación de los resultados del análisis histórico se deben tomar en cuenta dos puntos importantes:

1. El análisis realizado es resultado de calcular las tasas de de erosión y acumulación durante 22 años, por tal motivo, los resultados pueden variar con el análisis topográfico realizado con datos de campo durante 2010 y 2011.
2. Debido a los registros históricos, existen sitios donde que se consideró una sola zona, por ejemplo, en Sánchez Magallanes, donde los datos disponibles consideraron el promedio de los dos márgenes. Este promedio afecta el balance real, pues el margen este presenta un aumento considerable en la amplitud de playa, mientras que el margen oeste cada vez se erosiona más; al ser mayor la acreción del margen este que la erosión del oeste, el proceso dominante por zona (incluyendo margen este y oeste) es el de acreción.

En síntesis, del análisis histórico comparativo descrito y al considerar los estudios realizados sobre las costas de Tabasco y Campeche por Hernández et al. (2008), se evidencia una dinámica costera muy activa que muestra movimientos de retroceso y acreción en esta región del Golfo de México y que indican una marcada tendencia erosiva sobre el depósito de sedimentos, tanto en extensión geográfica como en magnitud.

Balance de erosión-acreción 2010-2011

Los cálculos y el análisis comparativo permitieron identificar los procesos de estabilidad, erosión o acreción de los sectores costeros presentes durante un ciclo anual (Tabla 15). Sin embargo los de estabilidad y acreción no son concluyentes, ya que pueden corresponder a un proceso cíclico estacional y su evolución depende de la época del año y del año mismo que puede ser típico o sea un año excepcional. No obstante, se pudieron distinguir las playas en proceso erosión, acreción y estables dentro de la zona de estudio (Figura 10).

Tabla 15. Balance de los procesos de erosión y acreción 2010-2011.

SITIO	BALANCE (m)	PROCESO
Cinco Presidentes	-3.5	Erosión
Sánchez Magallanes	-7	Erosión
Barra Tupilco	-4	Erosión
Tajón	1.5	Acreción
Laguna Mecoacán oeste	-22	Erosión
Río Grijalva	Oeste -14 Este 1.5	Oeste erosión Este estable
Campo Costero	-5	Erosión

Aunque las playas de Campo Cinco Presidentes y Campo Costero presentan un proceso de erosión, ésta no se encuentra en un nivel crítico y no se han observado daños tan severos similares a los ocasionados en playas con una pérdida de sedimentos menor, como en Barra de Tupilco. Sin embargo, en algunos sitios puede presentarse un comportamiento cíclico de erosión-acreción, por lo que este balance podría modificarse en una escala de tiempo mayor.

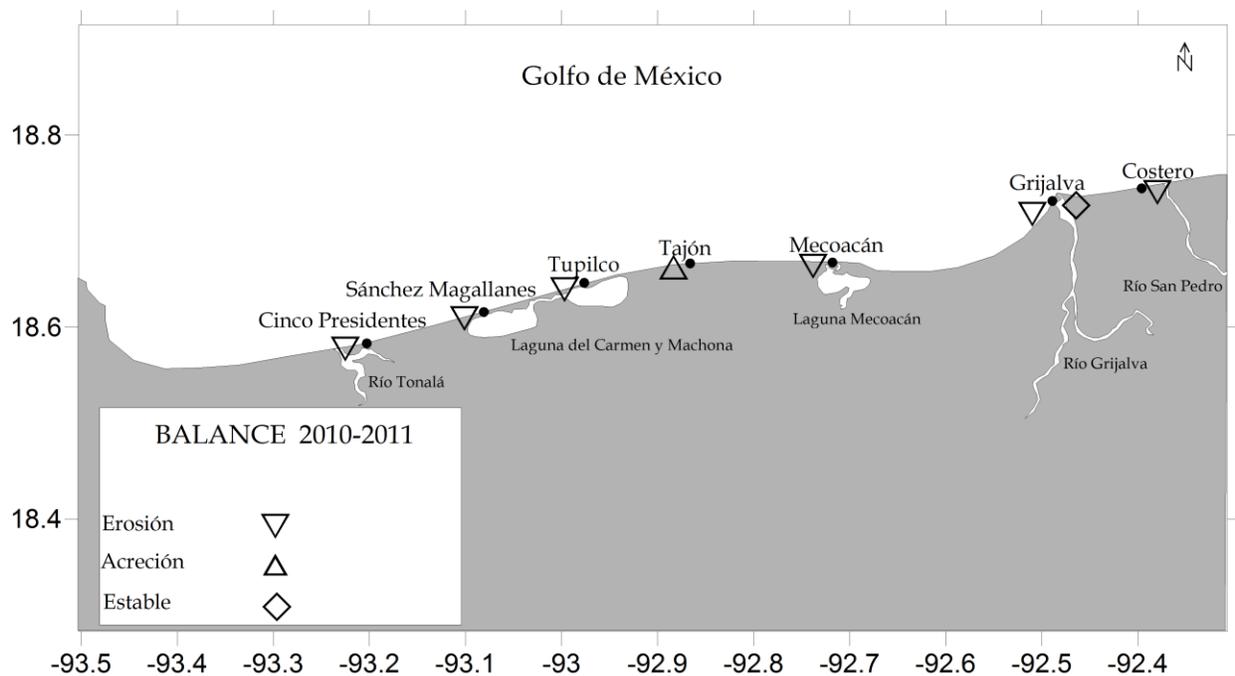


Figura 10. Balance de los procesos de erosión y acreción 2010-2011

Los resultados de las interpretaciones por cartografía comparativa, entre los años 1943-1958 y 1972-1984 realizados por Ortiz y Benítez desde 1996, muestran que el retroceso de la costa es un evento común en todo el frente deltaico de Tabasco, y los cálculos realizados en este trabajo sobre la morfodinámica de la línea costera tabasqueña revelan cifras alarmantes de retroceso costero en diversos sectores.

Estudios anteriores muestran que Mecoacán, Sánchez Magallanes y Tupilco revelan retrocesos alarmantes de la línea de costa y tasas de erosión de alrededor de -1.5 m/año (Ortíz y Benítez, 1996), mientras que entrevistas realizadas a los habitantes de esta localidad denotan un retroceso intenso de -25 m en cinco años aproximadamente. Esto se refleja en las construcciones derribadas y ocupadas por el mar, así como por el deterioro de los oleoductos de PEMEX, localizados a lo largo de la costa, que han sido exhumados por la morfodinámica litoral en la porción occidental del poblado de Sánchez Magallanes, y por la ruptura por sectores de la carretera costera en el poblado El Alacrán, además de la destrucción de casas y el faro de la zona; en la Figura 11 se muestra el faro derrumbado, la primera fotografía tomada en agosto del 2011 y la segunda en noviembre del mismo año.



Figura 11. Faro derrumbado a consecuencia de la erosión costera en Barra de Tupilco.

Sin embargo, los resultados de Ortíz y Benites no presentaron coincidencias para la zona de la desembocadura del Grijalva, donde mostraban un proceso de acreción en casi toda su totalidad, con valores entre +36 y +44 m; cabe señalar que sus estudios fueron realizados antes de la construcción de una escollera en el margen este del Canal La Elena (Figura 12). La construcción de esta obra provocó una acreción en el margen este de la desembocadura y una erosión constante en el margen oeste.

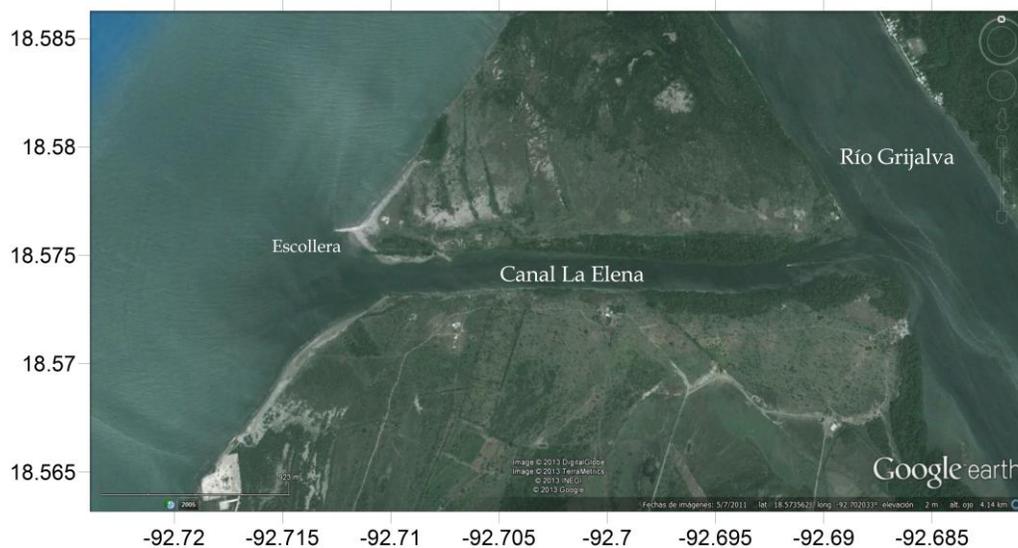


Figura 12. Imagen satelital del canal La Elena

Es importante considerar que debido al control de los ríos para regular avenidas y generar energía eléctrica mediante grandes presas situadas en las cuencas altas, el volumen de sedimentos ha decrecido notablemente por la cantidad de azolves retenidos en sus vasos de captación. En una primera etapa, se propuso el control y la regulación del sistema del Río Grijalva, por lo cual se construyeron cuatro grandes presas: La Angostura (la más grande del país), Chicoasén, Malpaso (la segunda más grande) y Peñitas. De estas presas sólo La Angostura y Malpaso fueron diseñadas para regular avenidas y la capacidad de ambas es de 11,400 Mm³.

De un estudio realizado sobre “Sedimentación potencial de presas” se indica que más del 13% de las cuencas en México presentan un muy alto a alto potencial de sedimentación, entre las que se encuentra la cuenca Grijalva-Usumacinta. Bajo el contexto de cuencas, la captura de sedimentos en estas obras hidráulicas reduce la carga de sedimentos que transportan los ríos, alterando sus hábitat y disminuyendo el aporte y enriquecimiento de los deltas.

En los registros del flujo de descarga realizados por el proyecto “Estudio sobre la dinámica costera en la zona litoral de tabasco y su impacto en la infraestructura petrolera”, la Laguna Mecoacán mantuvo un valor de caudal promedio similar durante las temporadas, sin embargo se presentó una diferencia significativa durante el periodo de 24 horas respecto de una temporada a otra, esto es, que mientras en la temporada de secas tuvo un comportamiento en el cual la mitad del ciclo salía agua hacia el mar (valores positivos) y la otra mitad entraba agua hacia la laguna (valores negativos), para la temporada de lluvias la mayor parte del periodo estuvo saliendo agua hacia el mar. Considerando la batimetría abrupta frente a este sitio, el sedimento acarreado por este fenómeno puede perderse hacia mar adentro provocando un aumento en la erosión de esta zona así como un alto grado de vulnerabilidad y riesgo.

En la Boca Sánchez Magallanes sucede algo parecido a lo que se observa en la Laguna Mecoacán, en la temporada seca el flujo circula hacia la laguna, mientras que para la temporada de lluvias la mayor parte del tiempo descarga hacia el mar.

Del balance neto que se obtiene a partir de los resultados de erosión vs. depósito de sedimentos, calculado para cada sitio, se observa claramente que el proceso predominante en la zona de estudio es el de erosión.

3.2. Levantamiento topográfico y análisis del comportamiento de playa

Se describieron las características morfológicas de los perfiles topográficos de playa considerando su amplitud (distancia perpendicular a la línea de costa, desde infraplaya a supraplaya), desnivel y la pendiente del ajuste lineal. La descripción de las playas se hace de oeste a este de acuerdo a la zona de estudio, por lo que la playa inicial se encuentra en Cinco Presidentes (extremo oeste) y la última se localiza en Costero (extremo este).

a) Cinco Presidentes

Durante el año 2010, este sitio conservó en general su morfología en el periodo estiaje-lluvias; la amplitud de la playa fue aproximadamente 35 metros y debido a efectos de la marea se observó un escalón de 1.2 metros en el límite de mesoplaya y supraplaya que sirve de frontera entre la playa y zona de vegetación. La pendiente entre infraplaya y mesoplaya fue de 10%.

Para el 2011, esta playa presentó una amplitud en promedio de 45 m, y se observó el mismo escalón de 1.2 m en el límite de supraplaya. La pendiente entre infraplaya y supraplaya fue de 5%. No se observaron cambios relevantes entre cada uno de los periodos levantados (Figura 13) por lo que se pueden considerar como una playa estable.

CAMPO CINCO PRESIDENTES

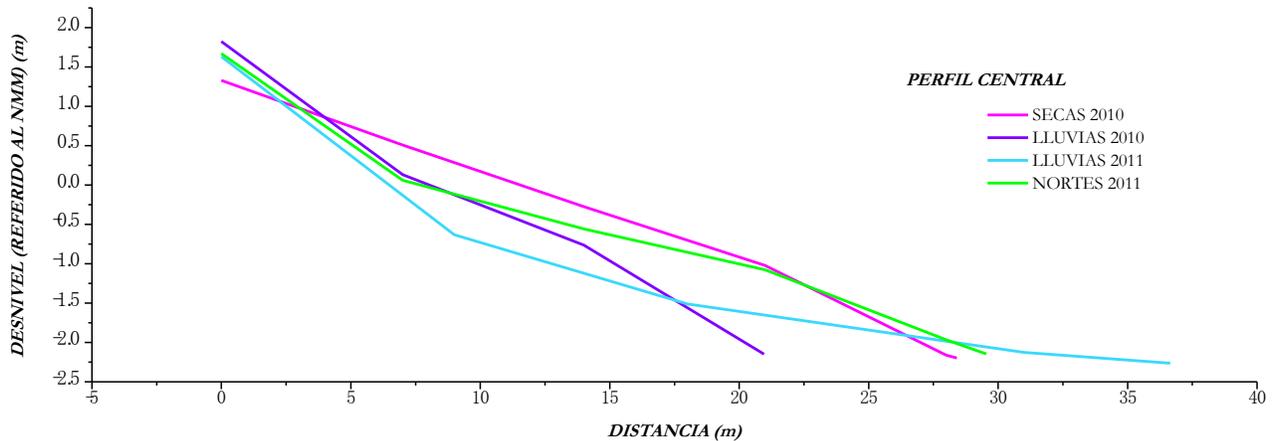


Figura 13. Variabilidad en los perfiles de playa en Cinco Presidentes.

b) Sánchez Magallanes

Durante el 2010 se observó una amplitud de la playa de 70 metros del lado este, así como una pendiente de 3% (Figura 14). En el lado oeste, la amplitud de playa es de 35 m y se observan escalones con un desnivel de 0.90 m en la zona de mesoplaya y supraplaya, siendo su pendiente promedio de 11% (Figura 15).

Para el año 2011 en el margen oeste, la amplitud de playa es de 40 m en promedio y se observan escalones con un desnivel de 0.90 m en la zona de mesoplaya y supraplaya en los cuatro periodos, y una pendiente de 8% (Figura 15). En la comparación espacial se observó pérdida de sedimentos en supraplaya y acumulación en infraplaya.

El margen este presentó una amplitud de 60 m y una pendiente de 3%. Esta amplitud de playa se debe en gran medida a que existe una barrera de costales que retiene el sedimento.

BOCA SANCHEZ MAGALLANES, MARGEN ESTE

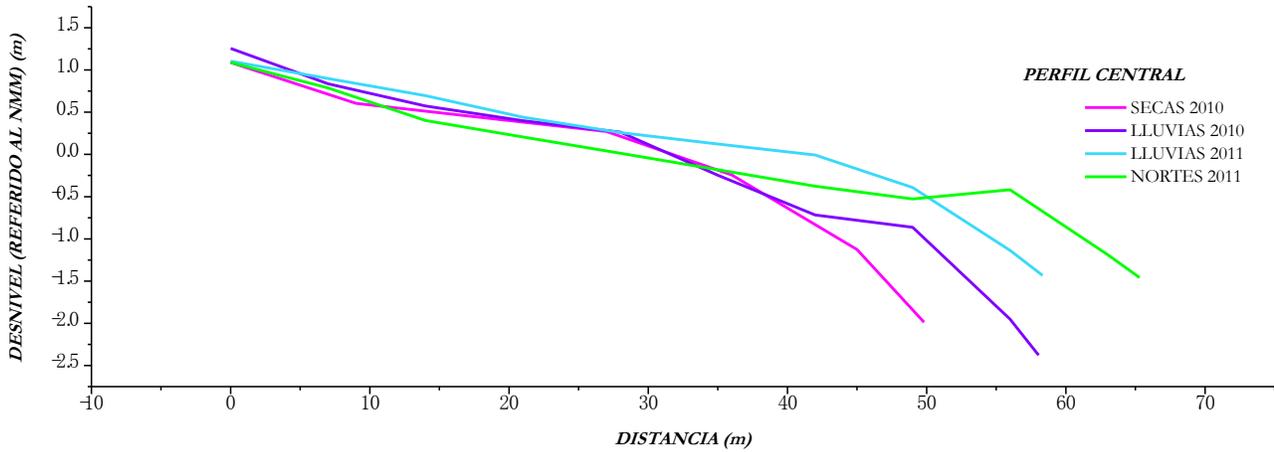


Figura 14. Variabilidad en los perfiles de playa en Boca Sánchez Magallanes, margen este.

BOCA SANCHEZ MAGALLANES, MARGEN OESTE

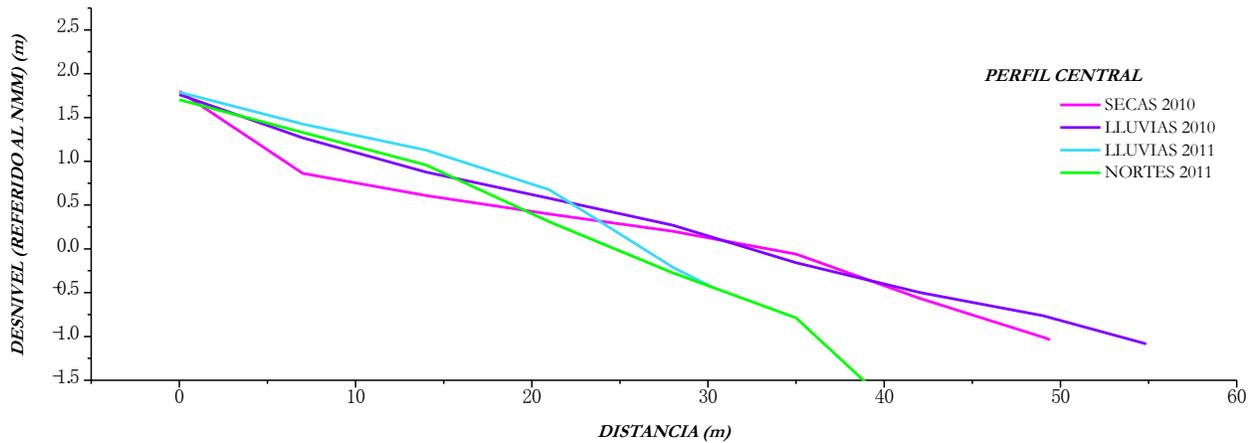


Figura 15. Variabilidad en los perfiles de playa en Boca Sánchez Magallanes, margen oeste.

c) Tupilco

Para el periodo de secas de 2010 a nortes 2011 se observó un retroceso de la línea de costa de aproximadamente un metro lineal en la zona de mesoplaya e infraplaya, ya que la amplitud de la misma es de 40 m con una pendiente del 7%, observándose daños considerables en la infraestructura carretera y en el faro que en algún tiempo fue utilizado por los pescadores, por lo que esta playa puede ser considerada como crítica debido a este proceso (Figura 16).

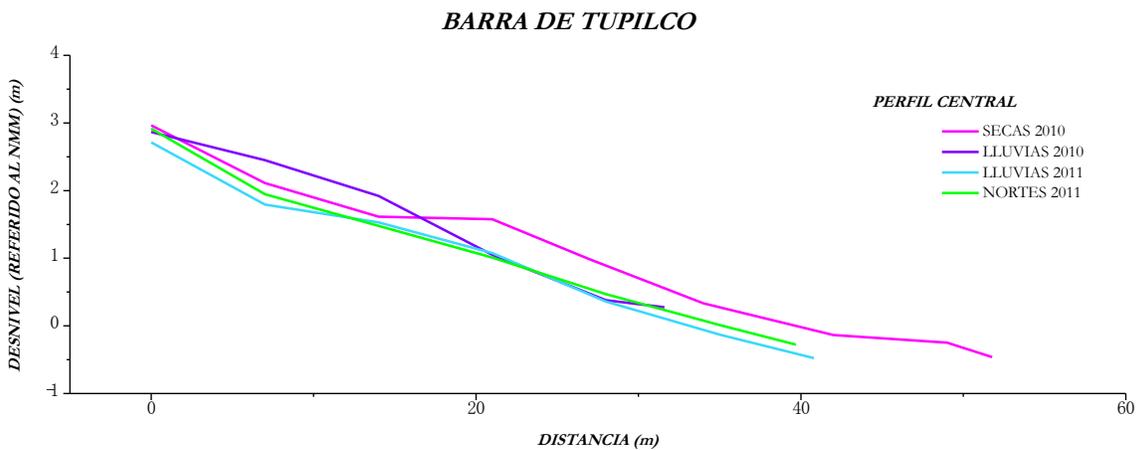


Figura 16. Variabilidad en los perfiles de playa en Barra de Tupilco.

d) Mecoacán

Los datos obtenidos muestran que frente al Complejo Petrolero Dos Bocas, se observa un proceso de erosión en supraplaya, sin embargo, estos sedimentos son depositados en mesoplaya e infraplaya.

En la parte este de las instalaciones, el oleaje está socavando la estructura de cimentación de la barda. Por otra parte, entre zonas de mesoplaya a infraplaya, se observan pendientes de 5% con una amplitud de 17 metros, no observándose la presencia de supraplaya, que en este caso estaría conformada por la cimentación del complejo.

Para el año 2011, en la boca oeste se observó una acumulación de sedimentos, lo que ha provocado el cierre de la boca formando playas que tienen una pendiente de 4 % y una amplitud de 50 m. En la boca este se tiene una amplitud de playa de 20 m y una pendiente del 5%, cabe mencionar que se observó que en marea alta las olas rompen en los plataneros ubicados en el sitio, lo que hace suponer que existe un proceso de erosión. Sin embargo, los levantamientos topográficos indican que es una playa estable.

Por otra parte, en la Isla de la Laguna de Mecoacán se presentó un proceso de erosión progresiva para cada época de muestreo (Figura 17).

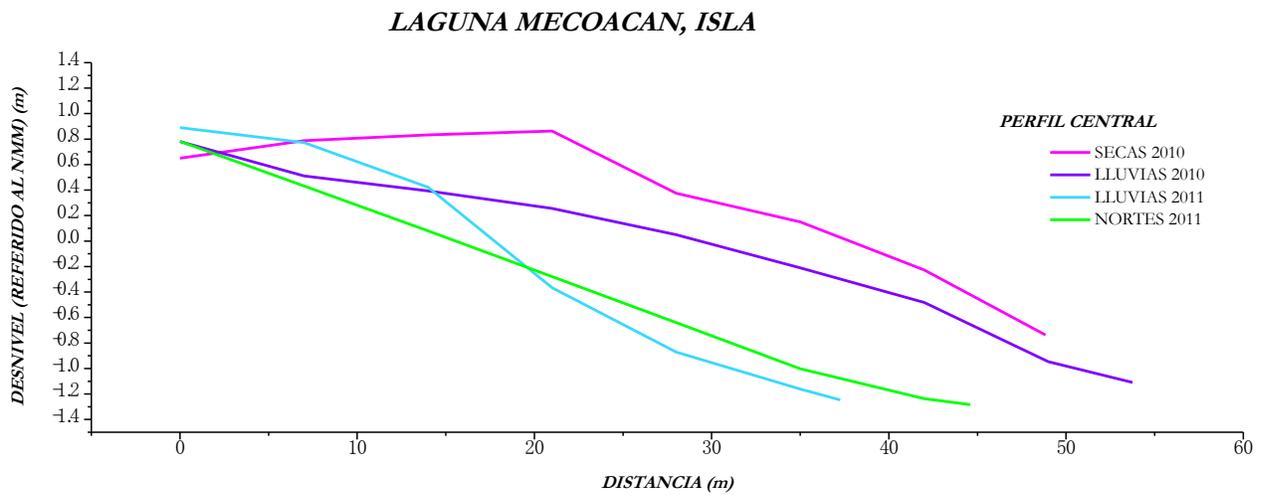


Figura 17. Variabilidad en los perfiles de playa en la Isla de la Laguna Mecoacán.

LAGUNA DE MECOACAN MARGEN ESTE

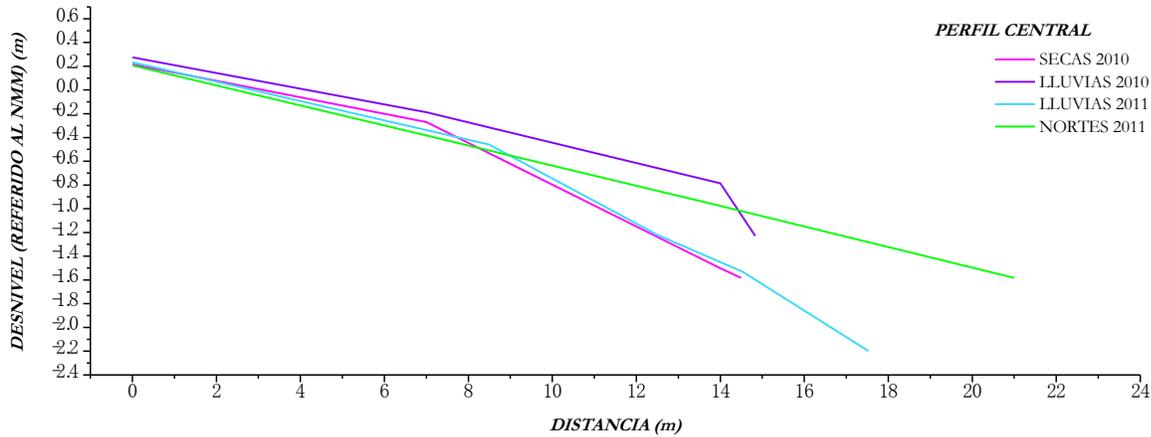


Figura 18. Variabilidad en los perfiles de playa en Laguna de Mecoaacán, margen este.

e) Tajón

En el 2010, se observó que la playa ubicada frente al Campo Tajón tenía una amplitud de 24 a 17 metros con una pendiente de 12%. Entre las zonas de infraplaya y supraplaya no se observan estructuras relevantes. El no observar cambios en la pendiente indica que probablemente ésta playa responde a un ciclo estacional de erosión-acreción. En su configuración espacial se observa erosión en el lado este y un proceso de estabilidad del lado oeste.

Para el 2011, la playa ubicada frente al Campo Tajón tenía una amplitud de 41m con una pendiente de 6%. Se observó un escalón en los límites de mesoplaya y supraplaya, formado por efectos de marea, por lo que esta playa puede considerarse como estable para ambos años (Figura 19).

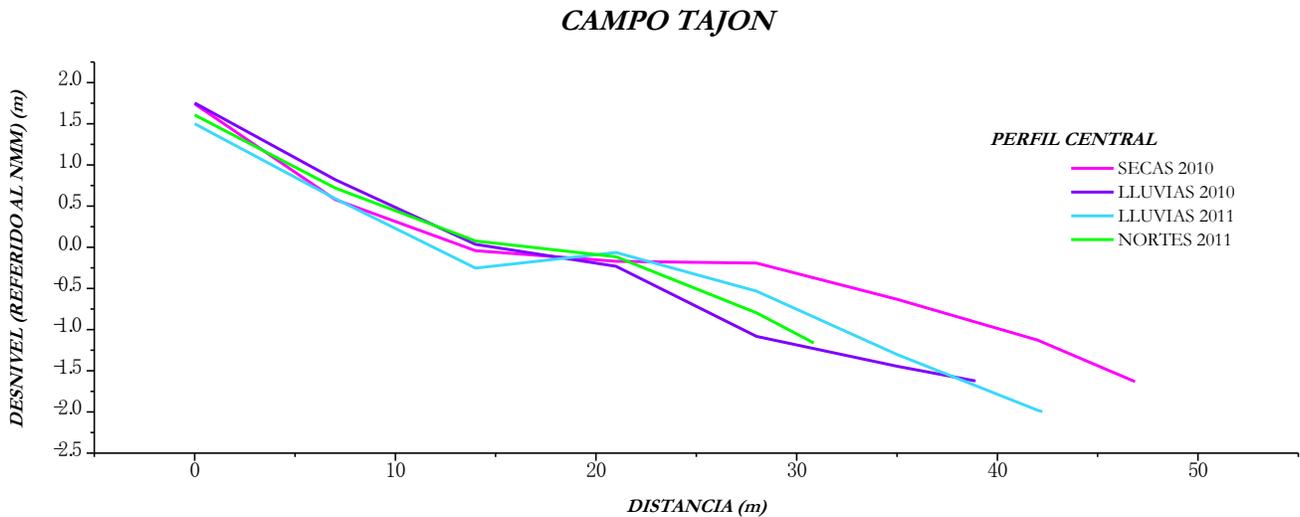


Figura 19. Variabilidad en los perfiles de playa en Campo Tajón.

f) Grijalva

Se levantó en su totalidad la playa que se ubica en el extremo este de Campo Tizón hasta la desembocadura del Río Grijalva, observándose un incremento de la misma hasta 50 m producto de un relleno artificial, destacándose la presencia de restos de vegetación y otros sólidos arrastrados por el río o depositados por el mar, lo que pone en evidencia que en períodos de fuertes avenidas todo el sedimento de la berma se pierde y el mar penetra hasta el límite de la vegetación costera.

La segunda playa que se levantó en este sitio, es la que se forma en la desembocadura secundaria en su lado oeste, es decir, en el canal La Elena. En esta zona se observó un retroceso de la línea de costa, pero conserva una pendiente del 10% y montículos de acumulación en la zona de supraplaya (Figura 20). Lo anterior sugiere que esta playa tiene cambios temporales de acuerdo a la estación climática correspondiente.

En la isla formada por las dos desembocaduras del Río Grijalva, en su lado oeste, no se observó cambio en la pendiente de la playa (3.5%). Sin embargo, se observa pérdida de sedimentos en supraplaya y acumulación en infraplaya, ya que los sedimentos son retenidos por la escollera.

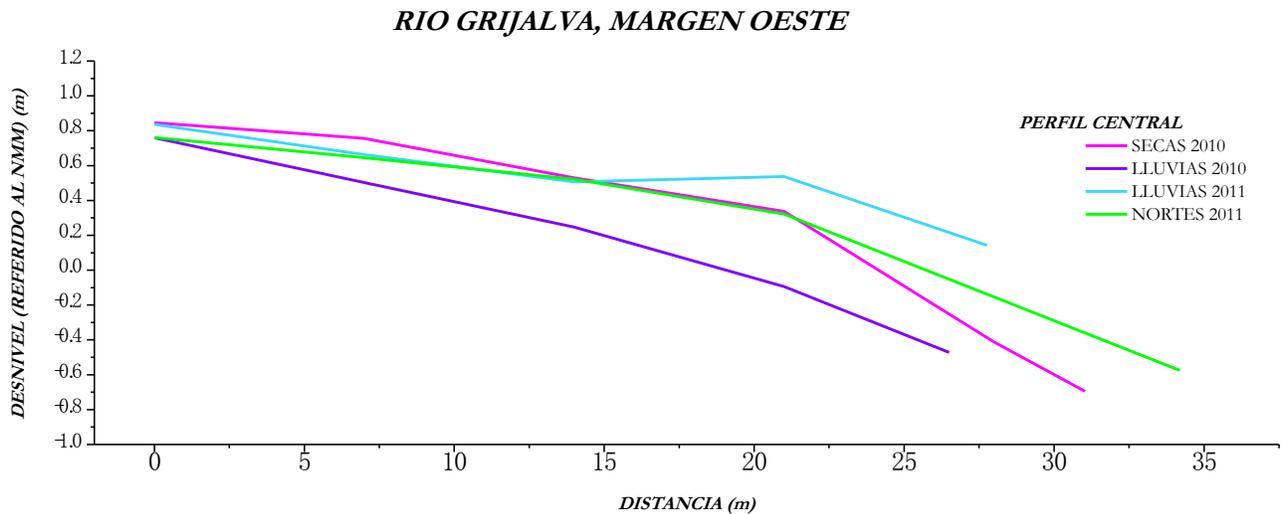


Figura 20. Variabilidad en los perfiles de playa en la isla del Río Grijalva, margen oeste.

Para el 2010, en la margen este del Río Grijalva no se observaron cambios relevantes; se apreciaron dunas con vegetación al final de supraplaya, debido al muelle ubicado en este sitio que funciona como una escollera frenando el transporte de sedimento. En el extremo oriental de esta misma playa, se observó un escalón en mesoplaya que indica un proceso de erosión activo, además de restos de vegetación y otros sólidos arrastrados por el río o depositados por el mar, lo que pone en evidencia que en períodos de fuertes avenidas todo el sedimento de la berma se pierde y el mar penetra hasta el límite de la vegetación costera.

En el 2011, en el margen oeste se observó un proceso de erosión (Figura 20), mientras que en el extremo este del Río Grijalva no se observaron cambios relevantes (Figura 21).

RIO GRIJALVA, MARGEN ESTE

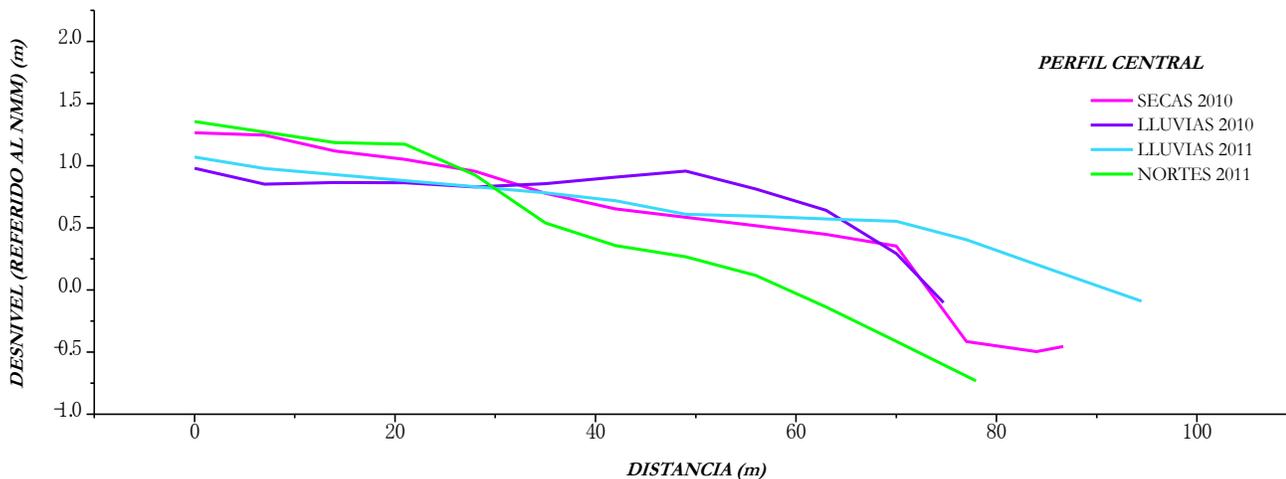


Figura 21. Variabilidad en los perfiles de playa en Río Grijalva, margen este.

g) Costero

En la playa frente a Campo Costero, durante el 2010 se observó una playa con una pendiente entre 7% y 9%. En términos espaciales se observó la pérdida de arena en su extremo este y una acumulación en su extremo oeste. La superficie perdida de arena es mayor que la acumulación, por lo que en esta playa prevalece un proceso de erosión. Para el 2011 se observó una playa con una pendiente de entre 4% y 6% y una amplitud de 35 m, por lo que se puede considerar como estable (Figura 22).

El resultado de los levantamientos topográficos para cada sitio mostró una tendencia del proceso costero en una escala de tiempo estacional (Tabla 16), donde los procesos se clasificaron como:

- 1) Erosión crítica. Aquellas zonas donde existe el daño a infraestructuras.
- 2) Erosión. Donde existe este proceso sin daños a la infraestructura.
- 3) Acreción. Donde se observó acumulación de sedimento.
- 4) Estable. Responde a un equilibrio dinámico como respuesta a un ciclo estacional donde se presenta un periodo de erosión y otro de acreción.

CAMPO COSTERO

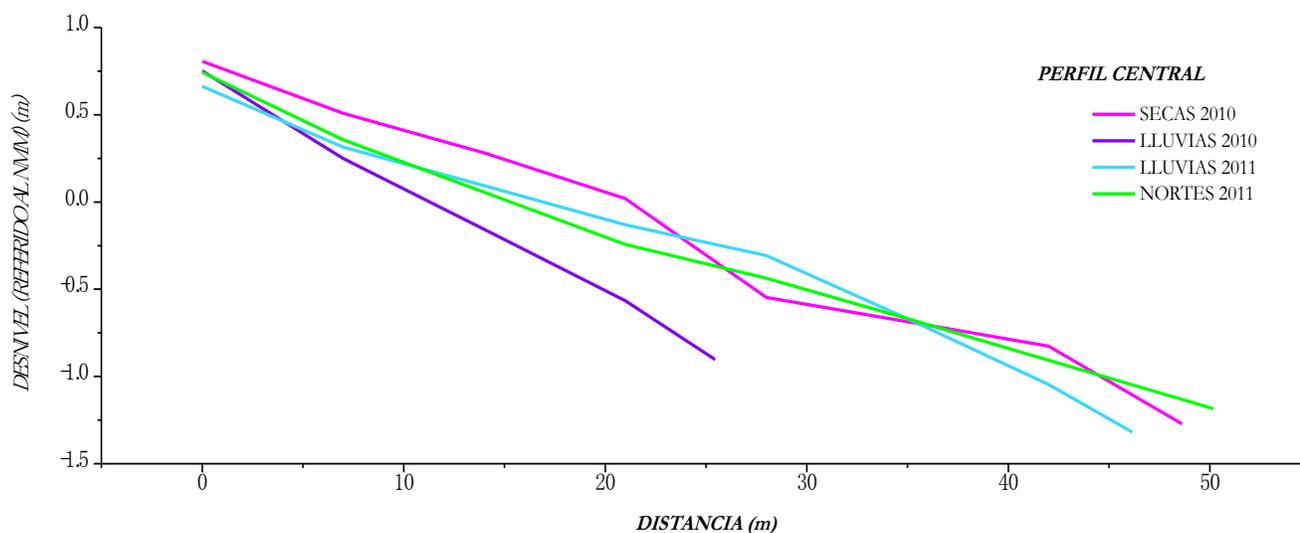


Figura 22. Variabilidad en los perfiles de playa en Campo Costero.

Tabla 16. Proceso por sitio según los levantamientos topográficos 2010-2011

SITIO	PROCESO
Cinco Presidentes	Estable
Sánchez Magallanes oeste Sánchez Magallanes este	Erosión crítica Acreción
Barra Tupilco	Erosión crítica
Tajón	Estable
Laguna Mecoacán oeste Isla de la Laguna Mecoacán Laguna Mecoacán este	Acumulación Erosión crítica Erosión
Río Grijalva oeste- Tizón Río Grijalva este	Erosión crítica Estable
Campo Costero	Estable

3.3. Caracterización de sedimentos de la zona litoral

1. Campo Cinco Presidentes

a) Granulometría

Tamaño gráfico promedio (Mz). El tamaño de los sedimentos en la zona de infraplaya fue principalmente arenas medias, aunque en secas y lluvias del 2010 se observaron arenas gruesas. En mesoplaya y supraplaya las arenas medias predominaron en todas las épocas, en la época de secas del 2010 se observaron arenas gruesas en supraplaya (Figura 23). La época en que se presenta la mayor variación energética es en secas del 2010 con la presencia de arenas gruesas.

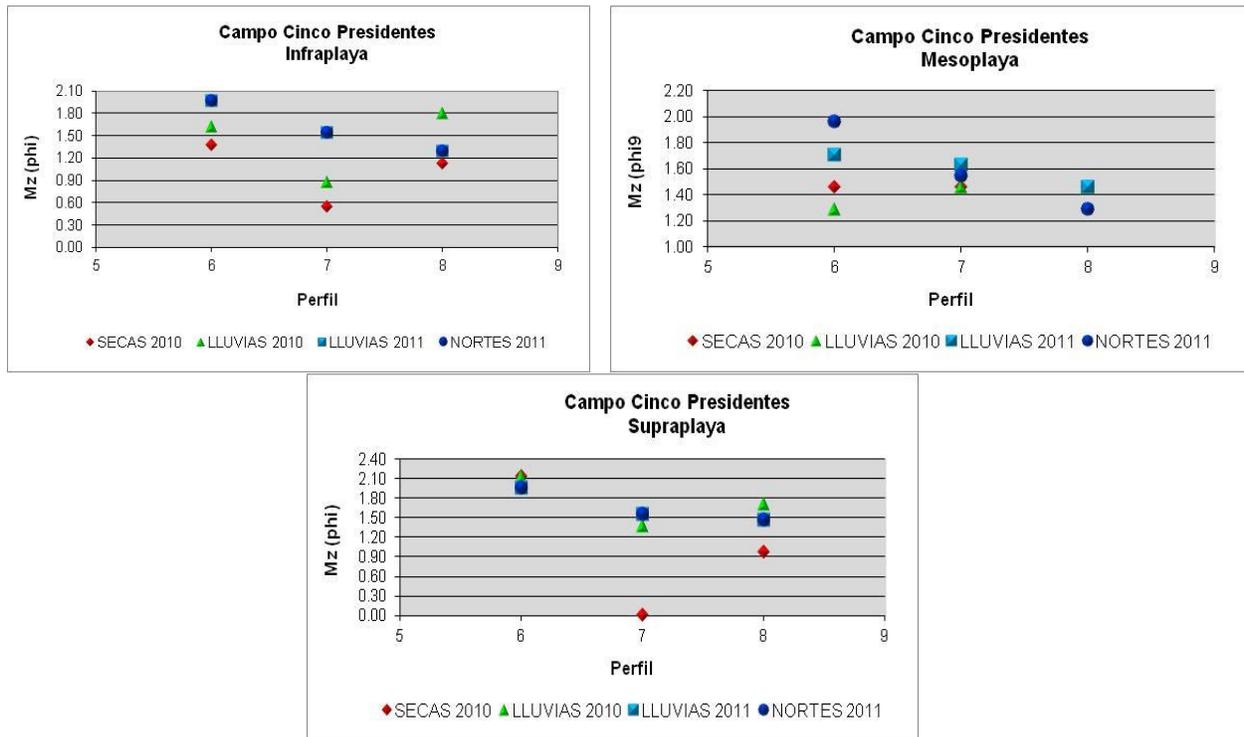


Figura 23. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Cinco Presidentes.

Desviación estándar gráfica inclusiva. Los sedimentos de infraplaya fueron moderadamente clasificados y moderadamente bien clasificados, aunque en secas del 2010 se observaron sedimentos mal clasificados. En mesoplaya y supraplaya los sedimentos fueron moderadamente bien clasificados (Figura 24). La zona de mayor variación energética es la infraplaya por el oleaje, y las zonas más estables fueron la meso y supraplaya.

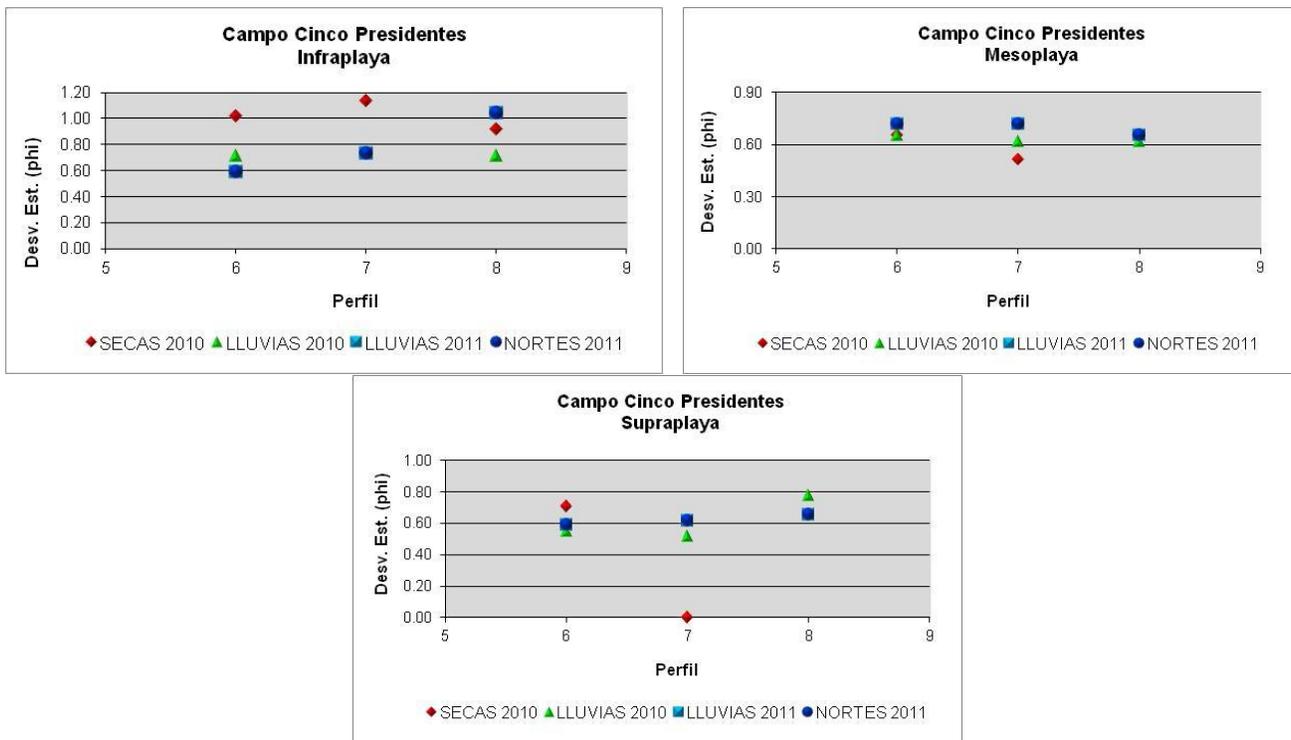


Figura 24. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Cinco Presidentes.

Grado de asimetría gráfica inclusiva. En la zona de infraplaya y mesoplaya se observaron sedimentos asimétricos hacia gruesos excepto en nortes 2011 donde predominaron los sedimentos asimétricos hacia finos. En supraplaya se observaron sedimentos con las dos tendencias, hacia finos y hacia gruesos (Figura 25).

Curtosis. Los sedimentos en infraplaya y mesoplaya fueron platicúrticos excepto en secas 2010 donde se observaron leptocúrticos. En la supraplaya presentaron una curtosis cambiante (Figura 26). Las condiciones platicúrticas indican mucha inconsistencia de tamaños, resultado de la variación de la energía presente y los leptocúrticos son resultado de una energía muy constante.

b) Composición mineralógica

El tipo de sedimentos en las tres zonas y en las diferentes épocas fue arena feldespática, sin embargo, infraplaya y mesoplaya presentaron además un bajo porcentaje (15%) de subfeldsarenitas en 2010 (Figura 27).

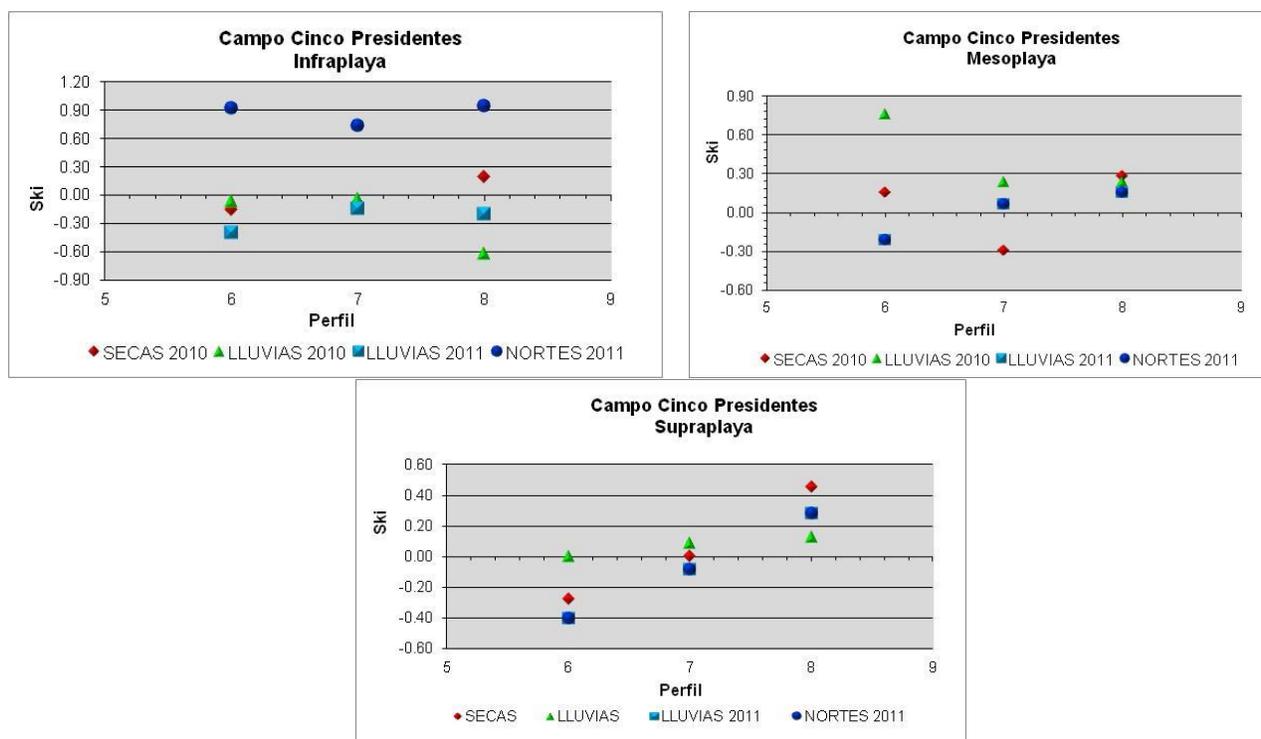


Figura 25. Variación del grado de asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Cinco Presidentes.

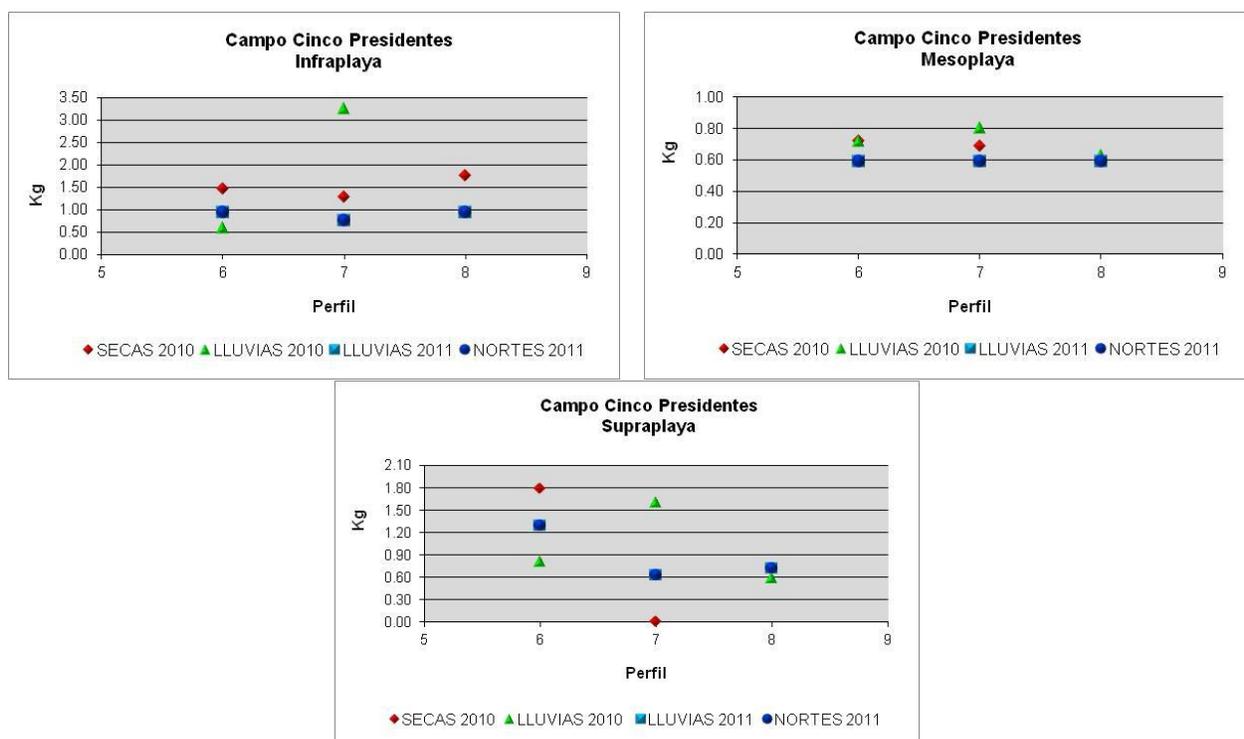


Figura 26. Variación de la curtosis de sedimento en Cinco Presidentes.

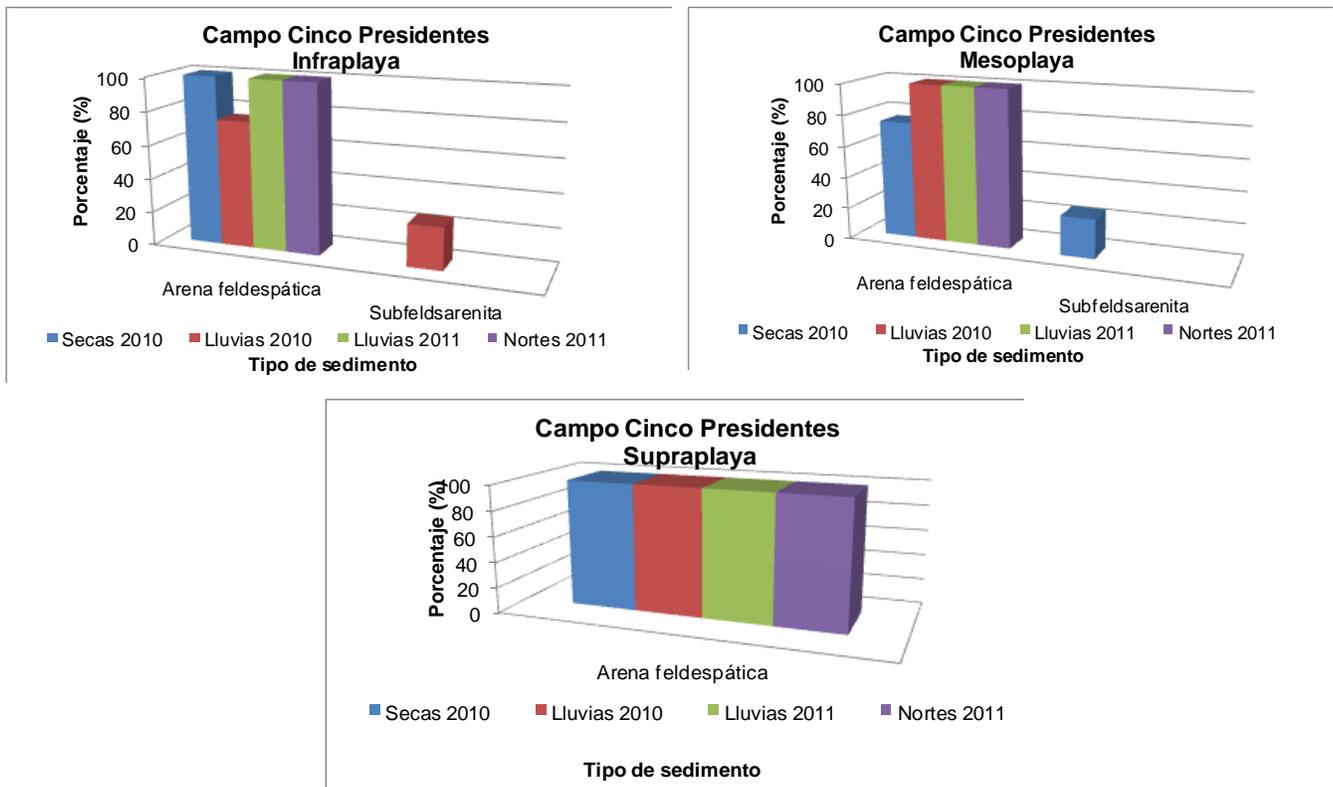


Figura 27. Tipo de sedimento en Cinco Presidentes.

Los sedimentos fueron subangulosos y angulosos y en menor porcentaje subredondeados para las tres épocas y tres zonas (Figura 28); del dominio de los subangulosos son indicadores de una continua exposición a fuerte oleaje y corrientes que rompen las partículas de sedimentos. En cuanto a la esfericidad, los sedimentos más comunes fueron cilíndricos cuya forma puede ser resultado del desgaste por el flujo y reflujo del oleaje en la zona litoral (Figura 29).

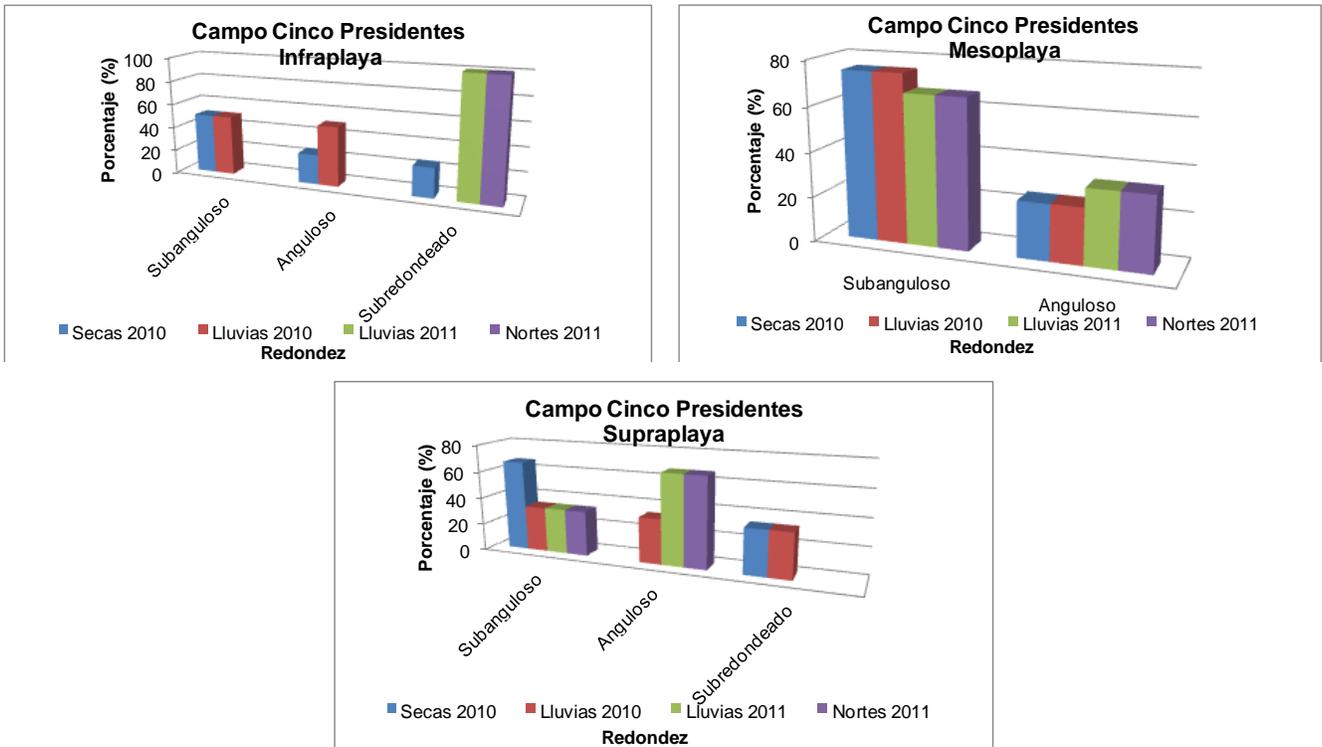


Figura 28. Grado de redondez de los sedimentos en Cinco Presidentes.

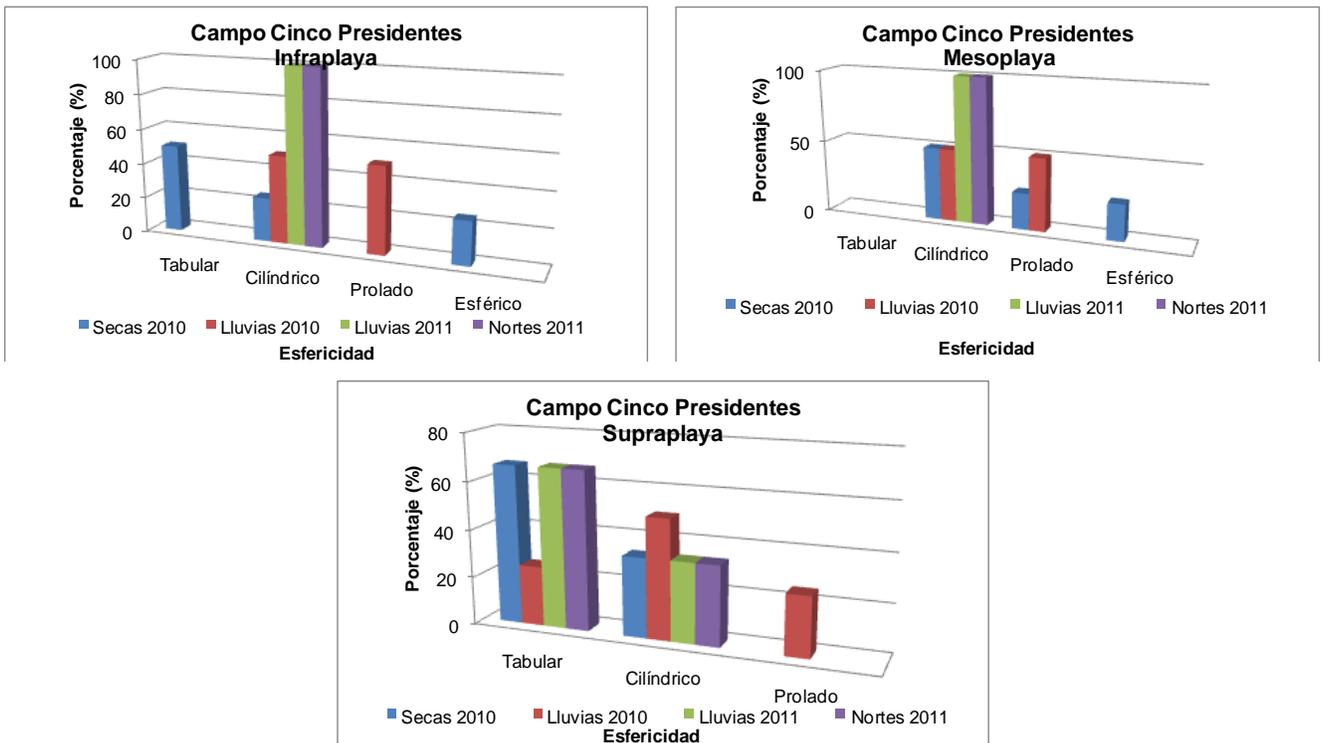


Figura 29. Grado de esfericidad de los sedimentos en Cinco Presidentes.

2. Boca Sánchez Magallanes

a) Granulometría

Tamaño gráfico promedio (Mz). En la zona de infraplaya se observaron diversos tamaños de sedimentos, predominaron las arenas gruesas y en la época de lluvias 2010 y 2011 arenas medias y finas. En la mesoplaya su comportamiento fue muy parecido a la de infraplaya con predominio de arenas gruesas. Para la supraplaya prevalecieron las arenas medias (Figura 30). La presencia de arenas gruesas indica una fuerte energía por oleaje y corrientes en la zona de infraplaya e inclusive en la zona de mesoplaya.

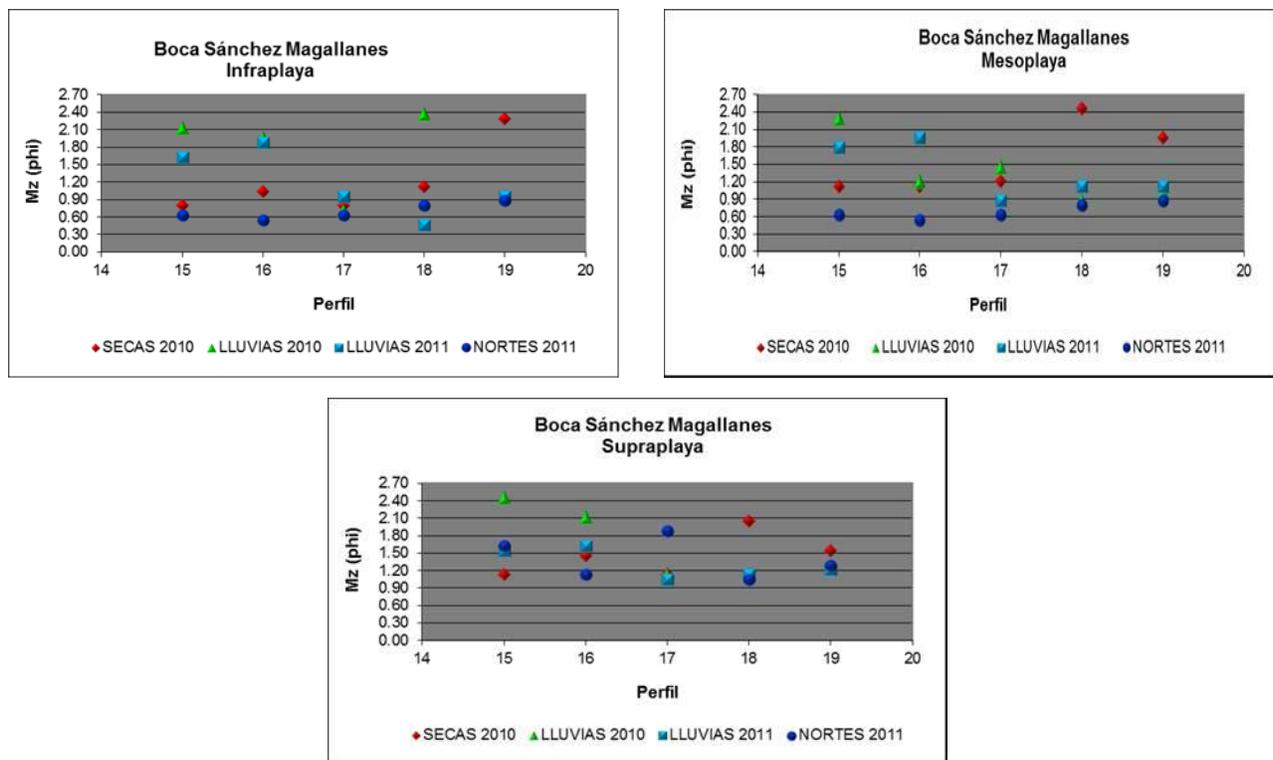


Figura 30. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Sánchez Magallanes.

Desviación estándar gráfica inclusiva. En la zona de mesoplaya fueron moderadamente clasificados a bien clasificados y en supraplaya moderadamente bien clasificados a bien clasificados. Se observó una energía más homogénea conforme cambia de la mesoplaya a la supraplaya. (Figura 31).

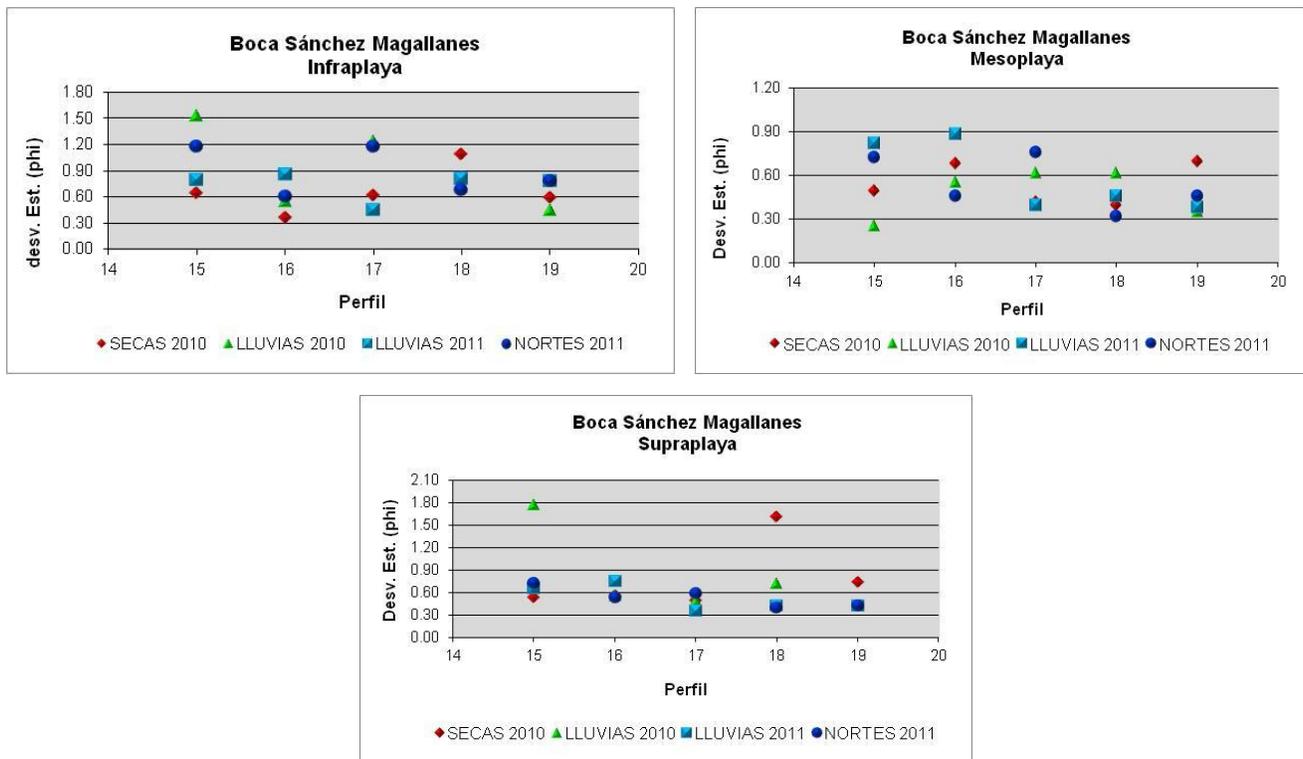


Figura 31. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Sánchez Magallanes.

Asimetría gráfica inclusiva. En la zona de infraplaza dominaron los sedimentos asimétricos hacia gruesos excepto en nortes del 2011 donde se observaron sedimentos asimétricos hacia finos. En la zona de mesoplaza y supraplaza la asimetría fue muy variable (Figura 32), lo que marca una zona litoral muy inestable energéticamente.

Curtosis. En la infraplaza la curtosis fue muy cambiante (Figura 33). La mesoplaza y supraplaza estuvo formada por sedimentos de diferentes tamaños que indican diferente procedencia y condiciones de energía en la zona de depósito (platicúrticos).

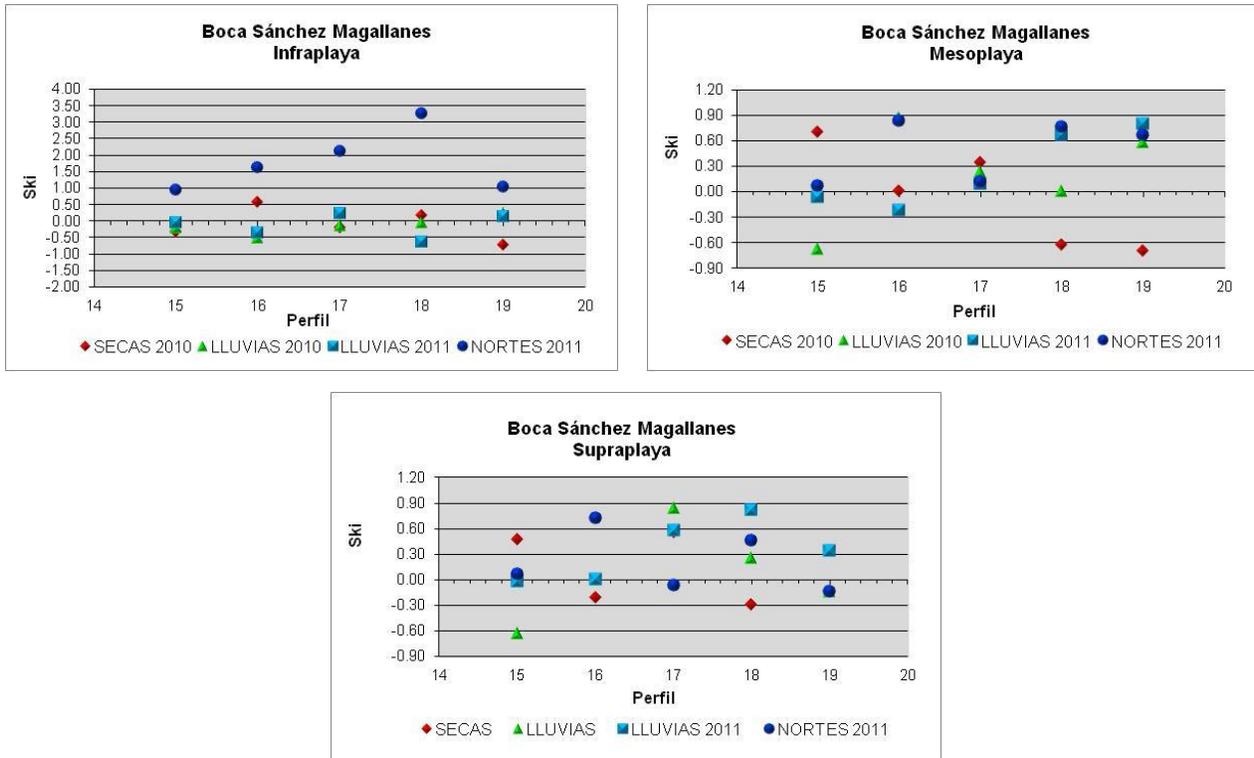


Figura 32. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Sánchez Magallanes.

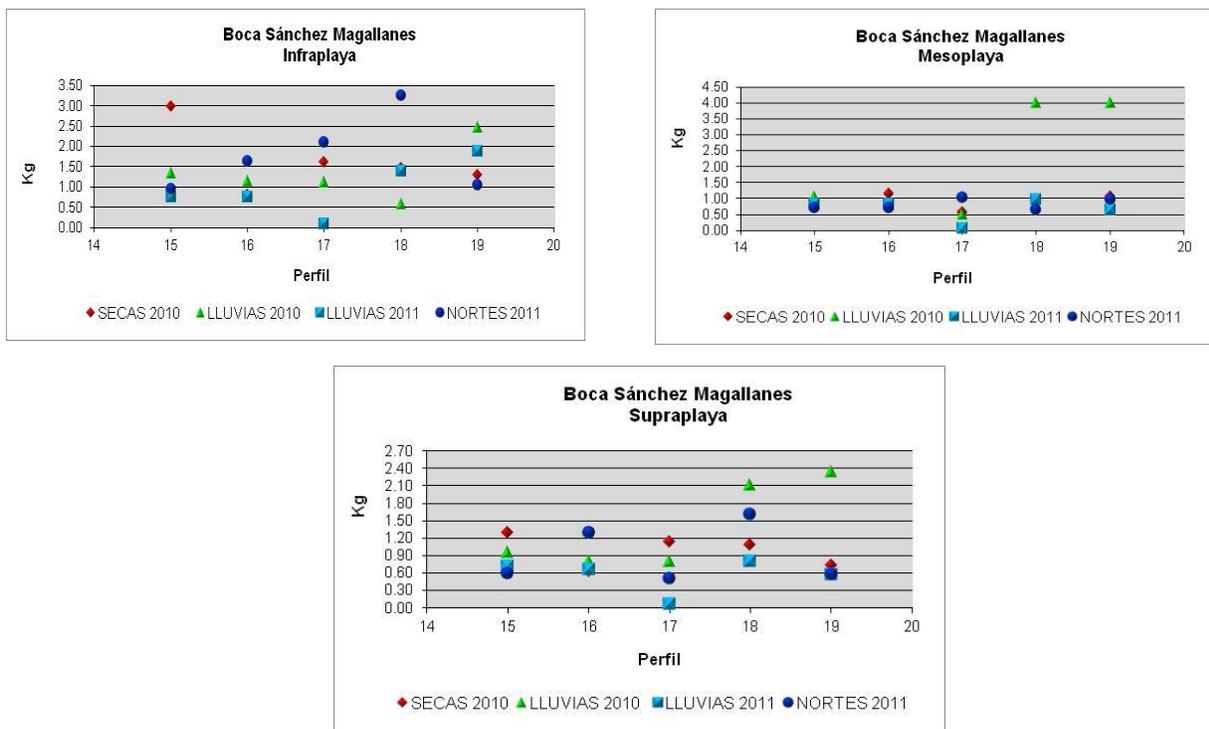


Figura 33. Variación de la curtosis de sedimento en Sánchez Magallanes.

b) Composición mineralógica

El tipo de sedimento fue arena feldespática para las tres zonas y diferentes épocas monitoreadas (Figura 34). La forma de los minerales fue muy variable para las tres zonas y épocas (Figura 35) esto indica que en un solo sitio existe diferente procedencia y con diferentes grados de desgaste, esto lo hace un sitio muy heterogéneo en su energía y fuente de materiales.

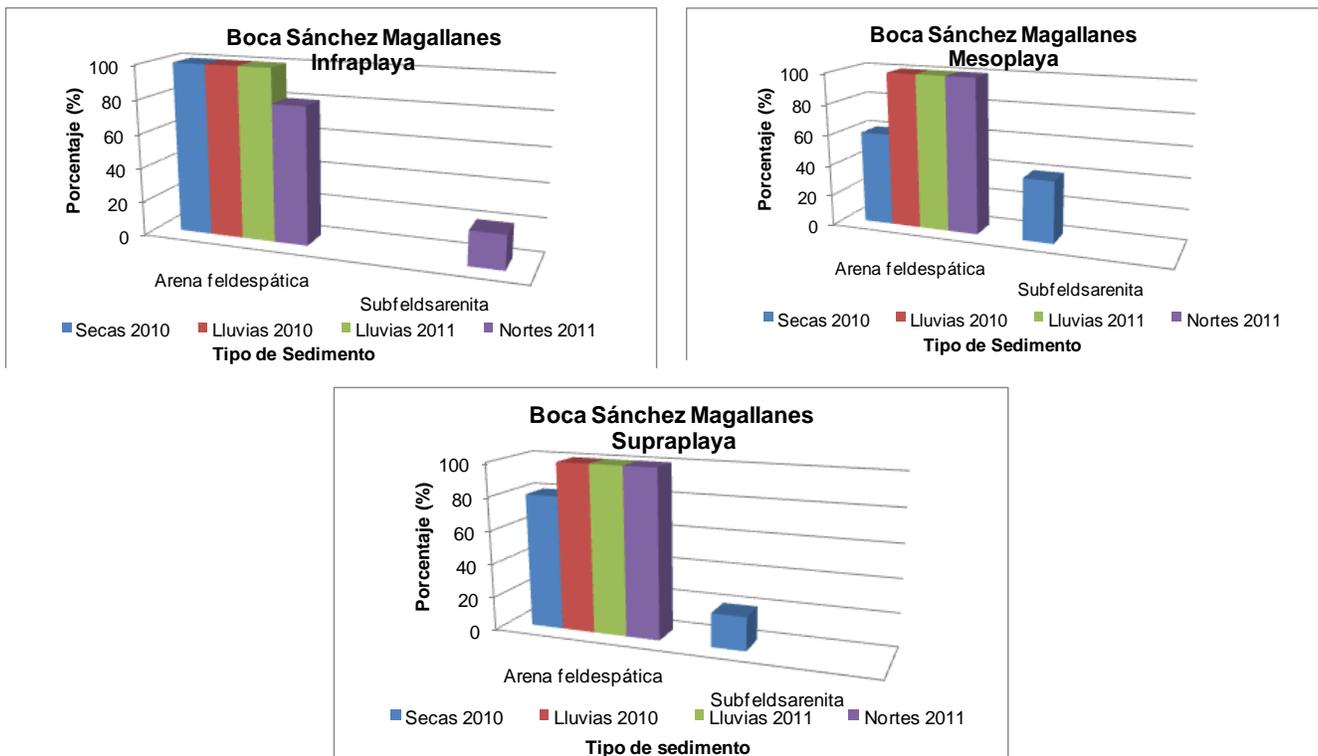


Figura 34. Tipo de sedimento según en Sánchez Magallanes.

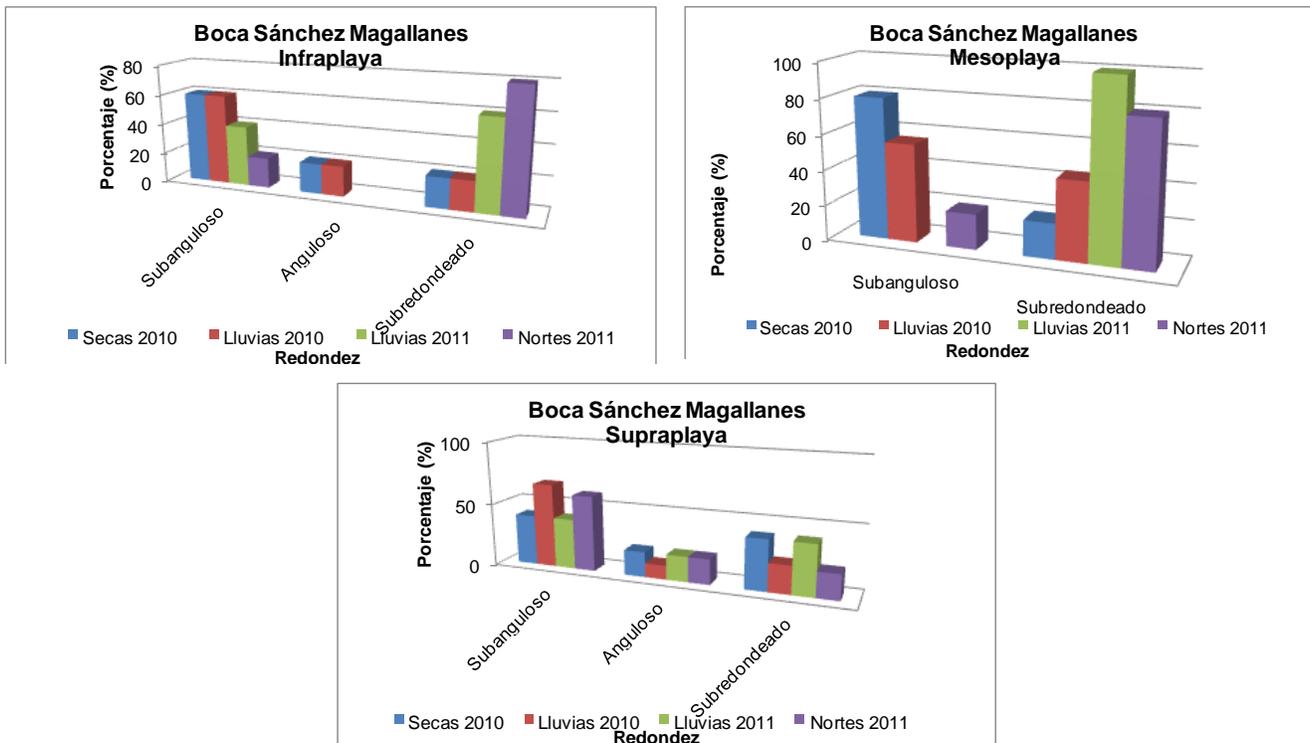


Figura 35. Grado de redondez de los sedimentos en Sánchez Magallanes.

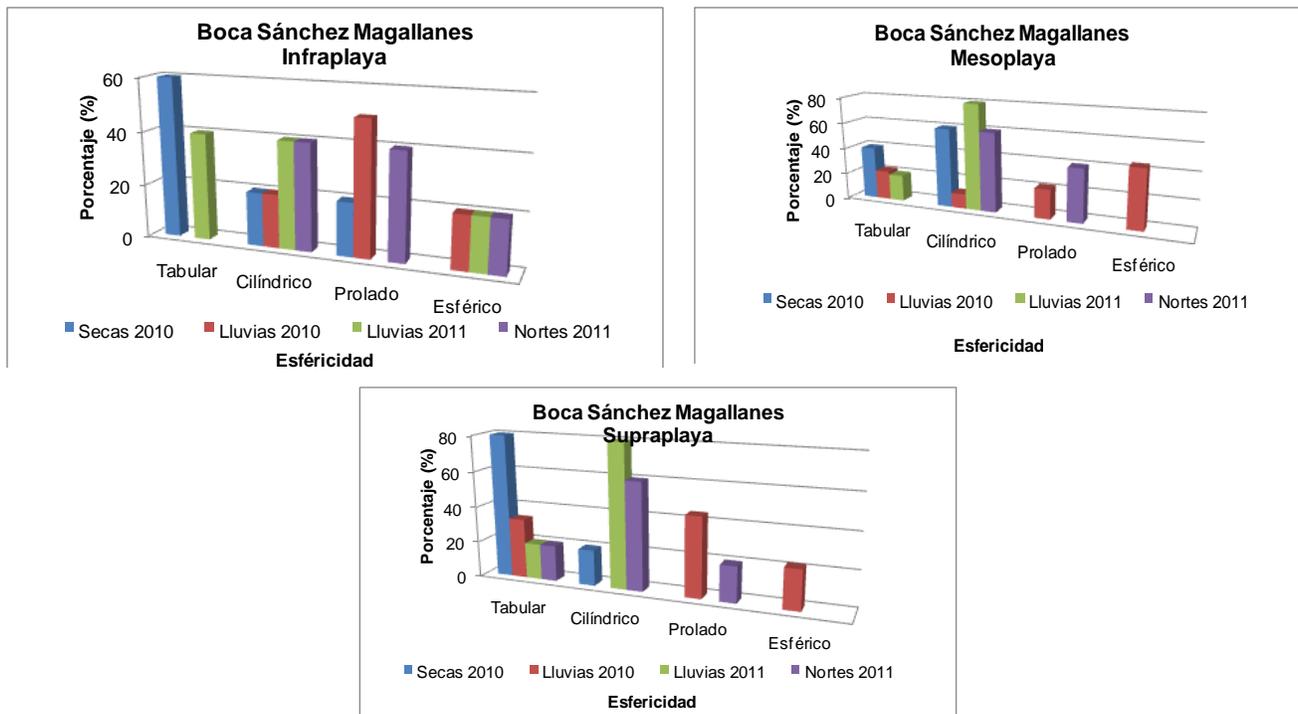


Figura 36. Grado de esfericidad de sedimentos en Sánchez Magallanes.

3. Barra de Tupilco

a) Granulometría

Tamaño gráfico Promedio (Mz). Los sedimentos de Barra de Tupilco para las cuatro épocas en la zona de infraplaya fueron arenas medias, excepto en secas del 2010 donde se observaron arenas gruesas hacia la parte este de la barra. Para la zona de mesoplaya fueron arenas medias, mientras que en la zona de supraplaya arenas medias y finas en lluvias 2011 y nortes 2011 (Figura 37). Las arenas gruesas denotan generalmente mayor energía en la zona de infraplaya y las arenas finas muestran condiciones de baja energía.

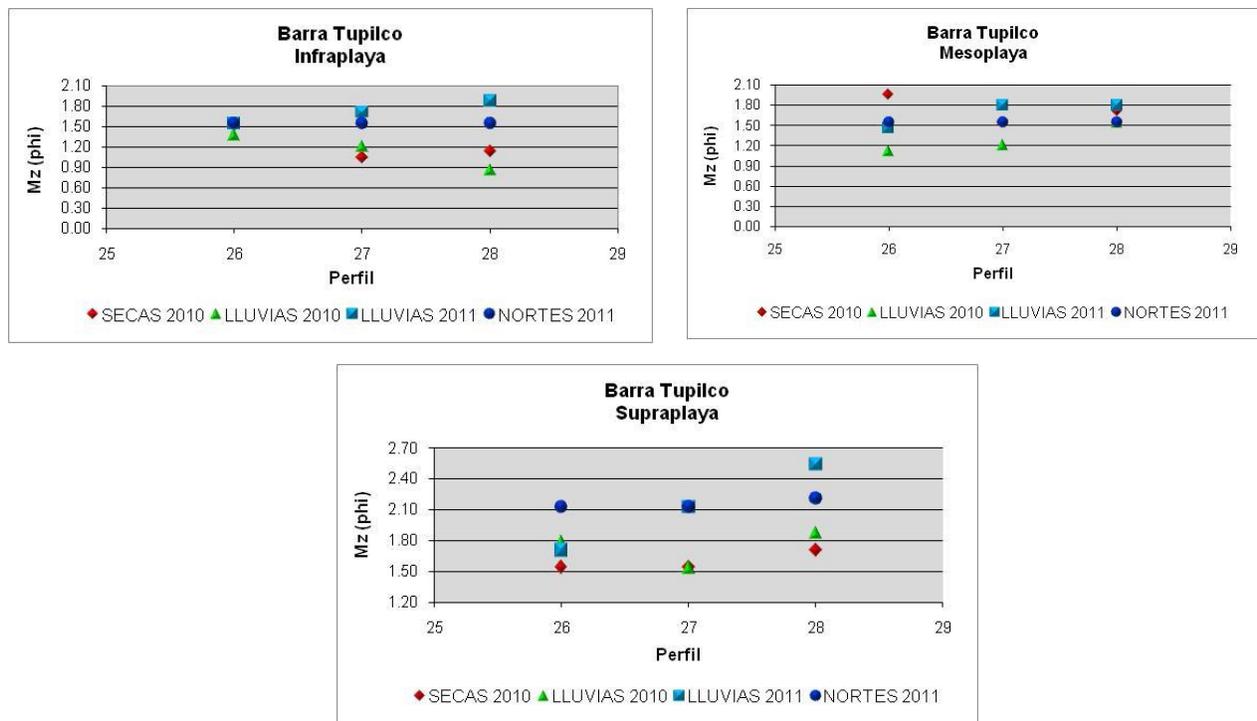


Figura 37. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Tupilco.

Desviación estándar gráfica inclusiva. La clasificación de los sedimentos en la zona de infraplaya varía de sedimentos moderadamente clasificados a bien clasificados, en la zona de mesoplaya y supraplaya fue de moderadamente bien clasificados a bien clasificados; para la época de secas del 2010 se tuvieron sedimentos mal clasificados en la supraplaya (Figura 38). La buena clasificación se produce cuando existe una constancia en los procesos clasificadores como el oleaje.

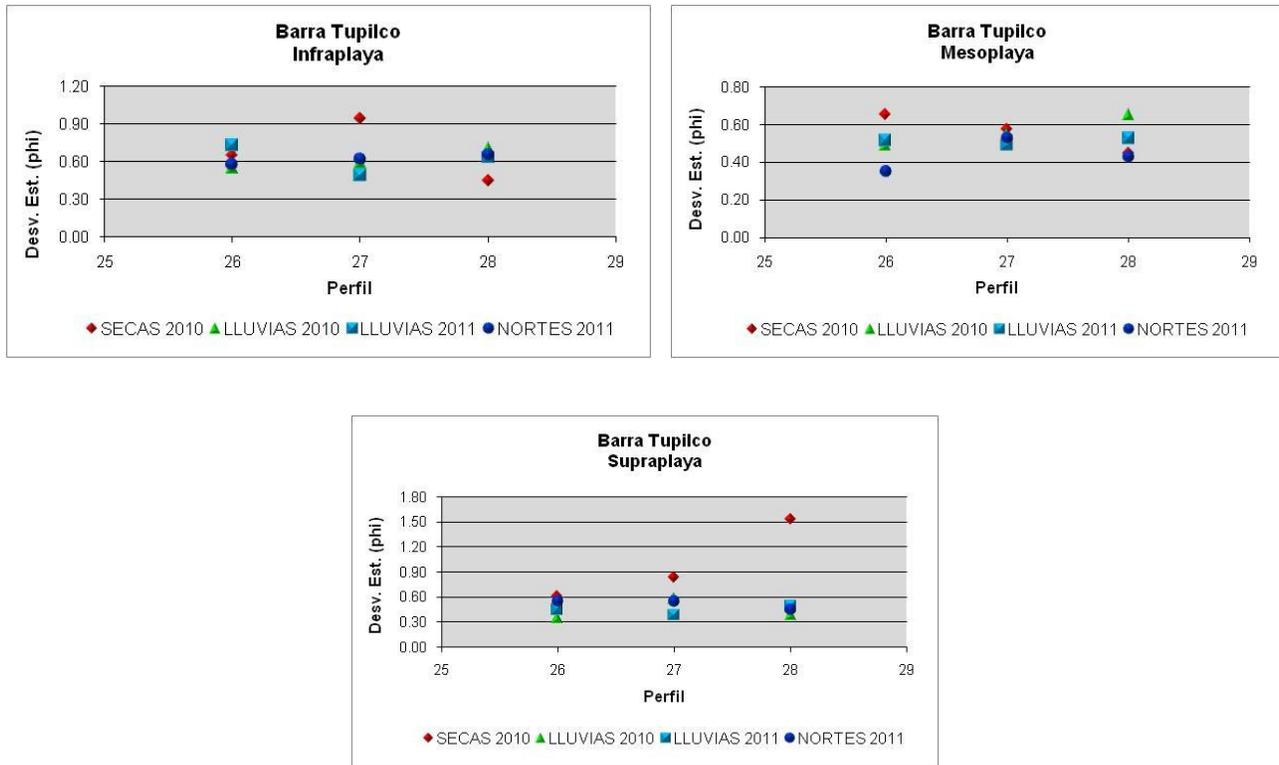


Figura 38. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Tupilco.

Asimetría gráfica inclusiva. De acuerdo a la asimetría, los sedimentos de la zona de infraplaya tienden a los tamaños finos (valores positivos). En la mesoplaya dominaron los sedimentos asimétricos hacia gruesos, excepto en lluvias del 2010 donde fueron asimétricos hacia finos. En supraplaya fueron de simétricos a asimétricos hacia gruesos (Figura 39). Los asimétricos hacia finos se presentan en condiciones de menor energía, en cambio, la tendencia hacia los gruesos indica un aumento de energía en el oleaje.

Curtois. La curtois en las tres zonas y en las diferentes épocas analizadas fue muy variable, desde sedimentos con predominancia de algunos tamaños (leptocúrticos) o sedimentos con varios tamaños (platicúrticos) (Figura 40).

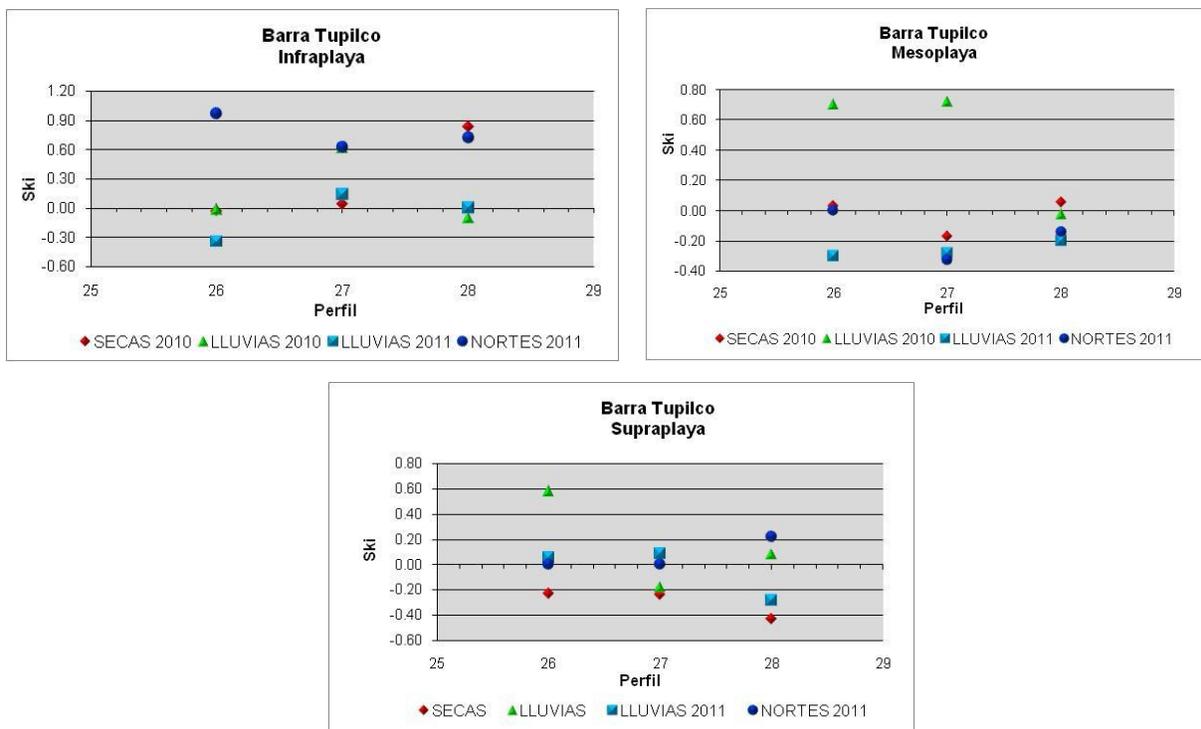


Figura 39. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimentos en Tupilco.

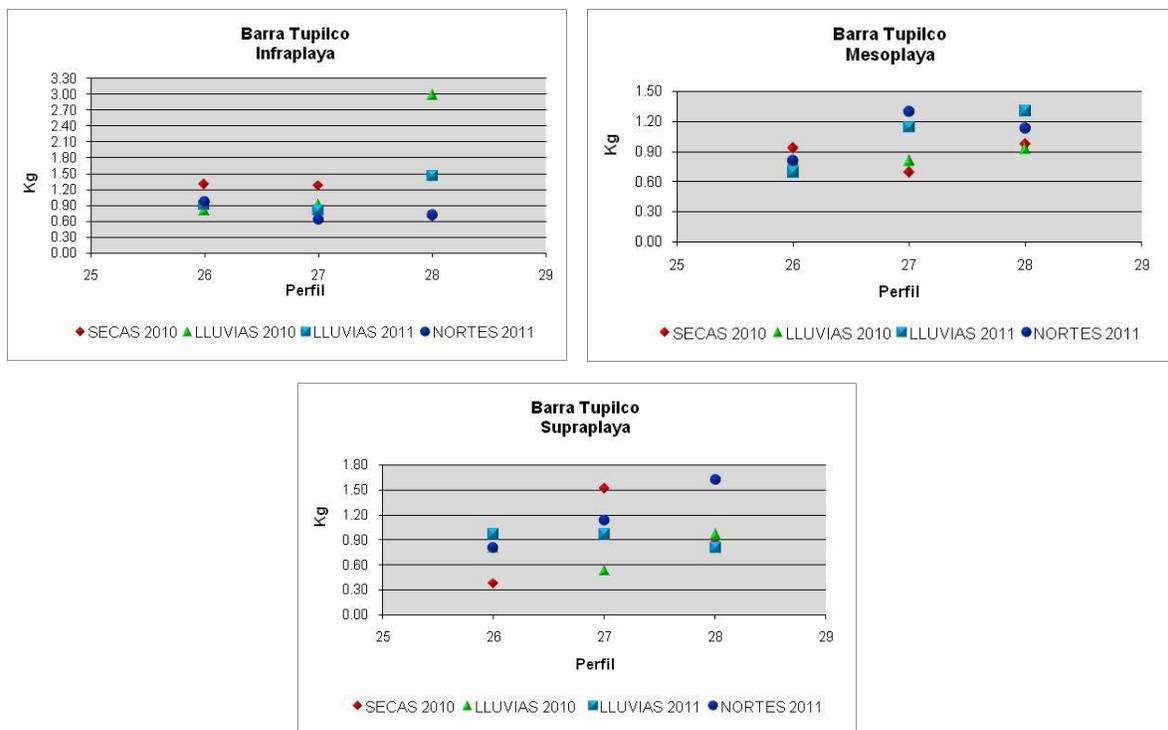


Figura 40. Variación de la curtosis de sedimentos en Tupilco.

b) Composición mineralógica

La composición de los sedimentos en barra de Tupilco fue de arenas feldespáticas para las tres zonas del litoral y las cuatro épocas muestreadas (Figura 41).

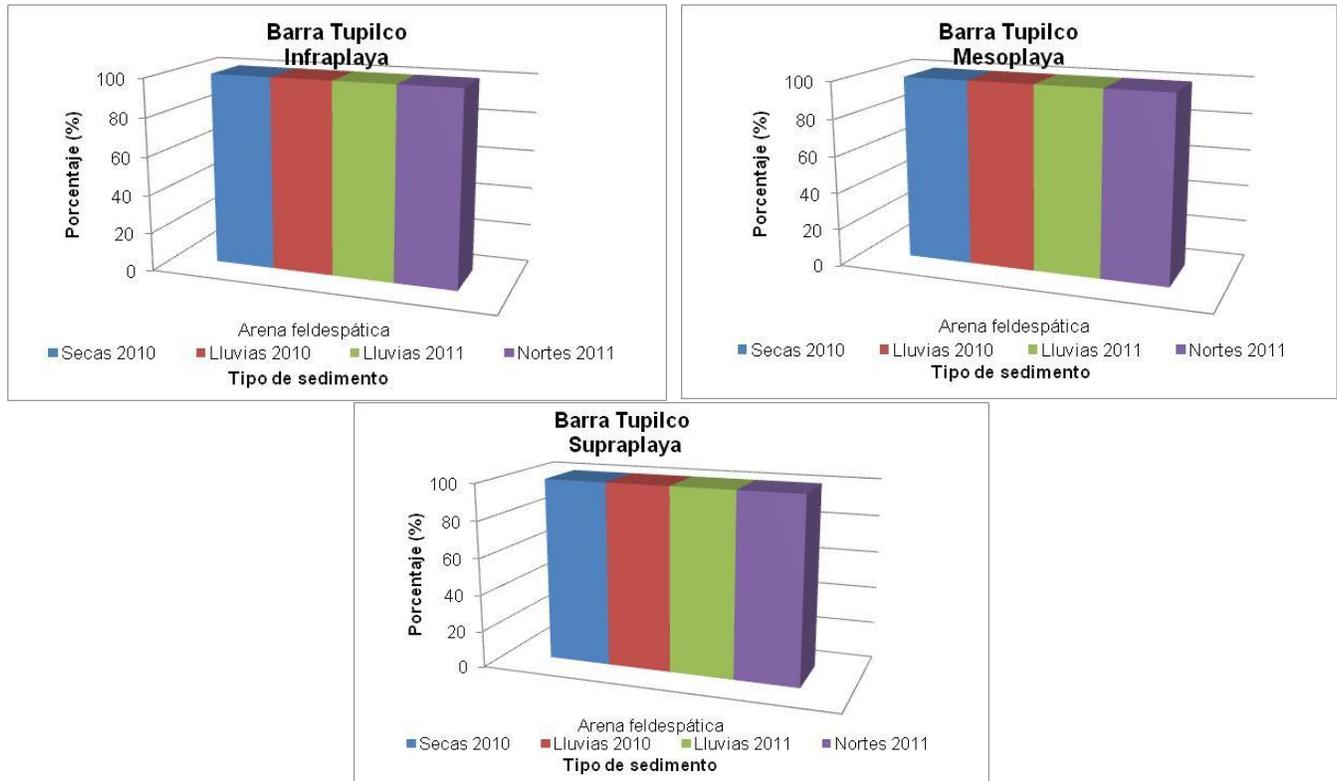


Figura 41. Tipo de sedimento en Tupilco.

En las tres zonas los sedimentos fueron angulosos y subredondeados, aunque los subredondeados fueron más notorios para las épocas de lluvias 2011 y nortes 2011. La redondez es mayor cuando se tiene constancia en la energía del oleaje por un largo período, mientras que lo subanguloso lo adquiere por la ruptura del cuarzo al choque de las partículas con oleaje fuerte (Figura 42).

Las partículas presentaron formas tabulares o cilíndricas para todas las épocas, en lluvias y nortes 2011 prevalecen las formas cilíndricas, resultado de la forma original del mineral o por el desgaste que sufre la partícula en la zona litoral (Figura 43).

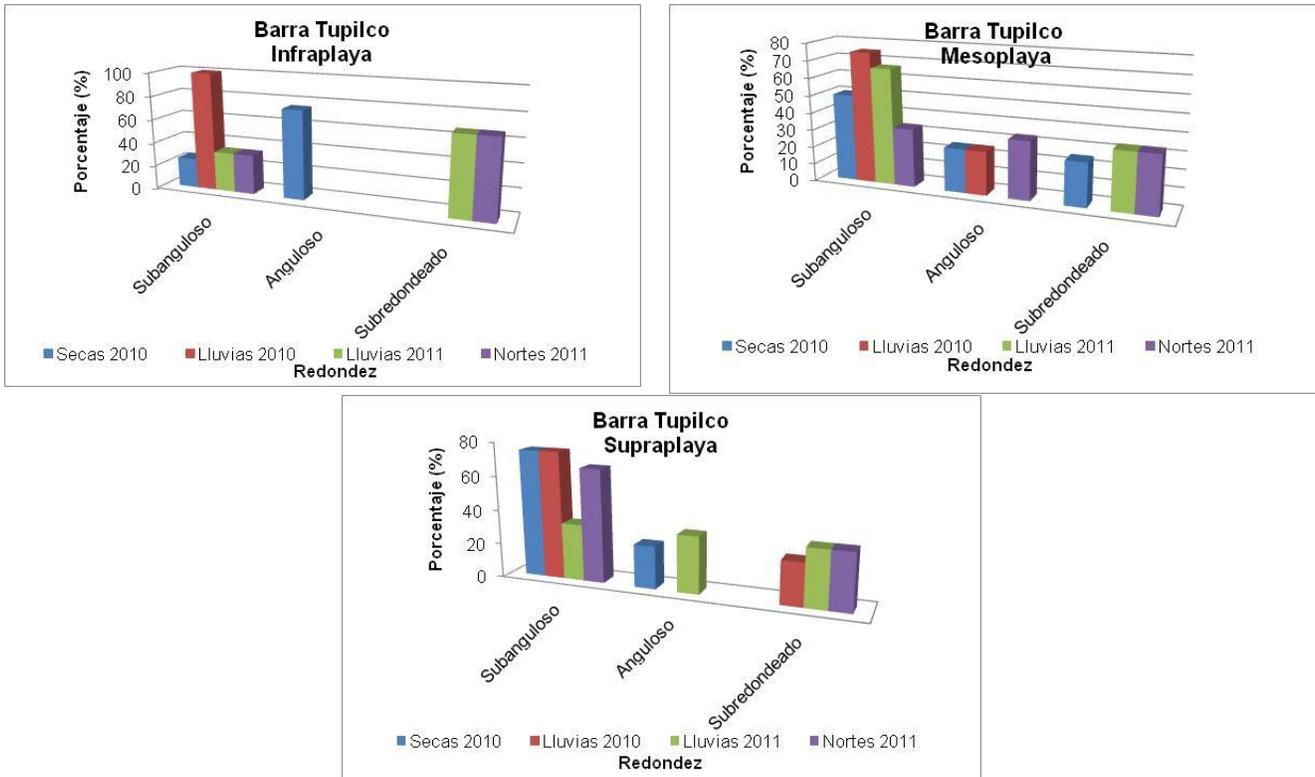


Figura 42. Grado de redondez de los sedimentos en Tupilco.

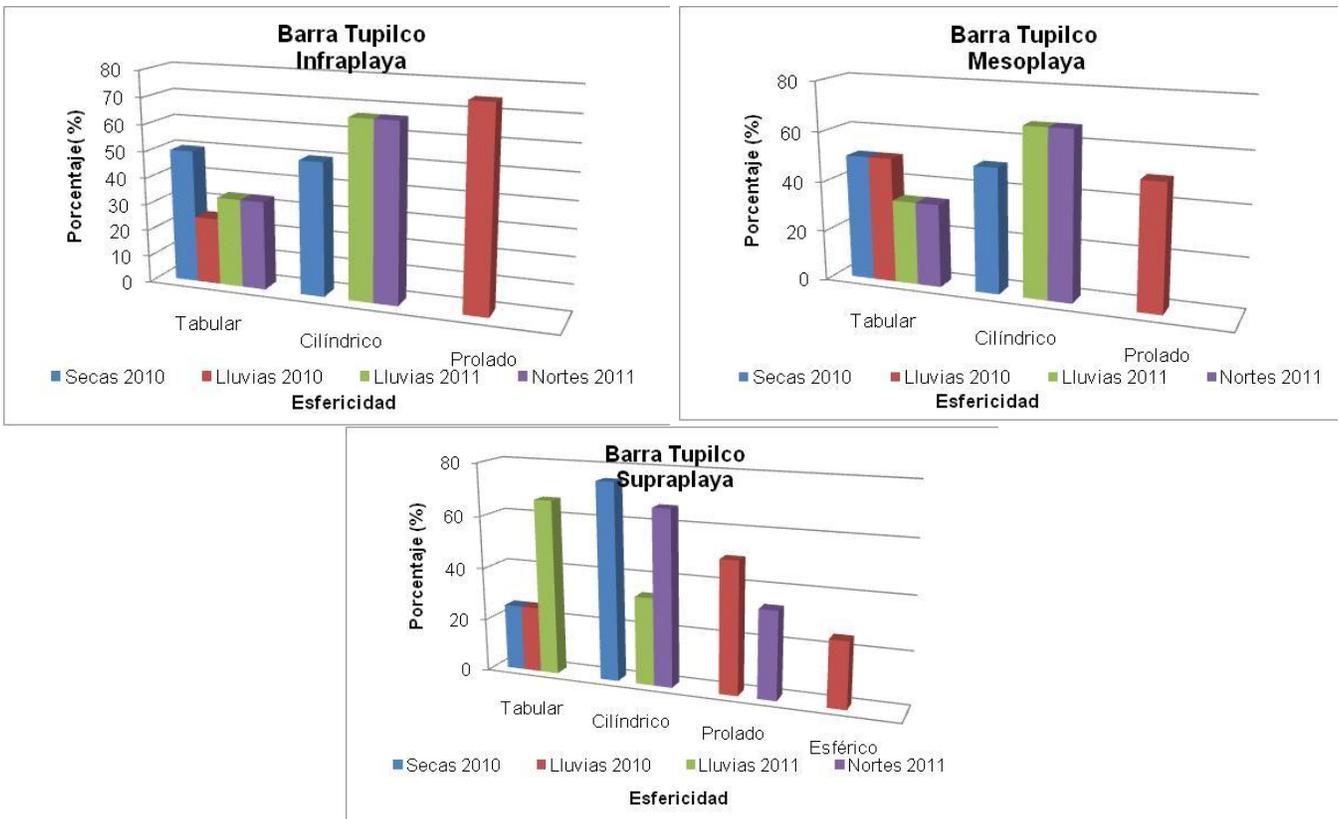


Figura 43. Grado de esfericidad de sedimentos en Tupilco.

4. Campo Tajón

a) Granulometría

Tamaño gráfico Promedio (Mz). Se observó la presencia de arenas medias (1 a 2 phi) en la época de secas 2010 y lluvias 2010, mientras que para la época de lluvias y nortes 2011 predominaron las arenas finas (2 y 3 phi). En la mesoplaya se detectaron arenas finas y medias para las diferentes épocas excepto en secas 2010 donde predominaron arenas medias. En la supraplaya predominaron las arenas finas aunque también se encontraron arenas medias sobre todo en lluvias 2011 (Figura 44).

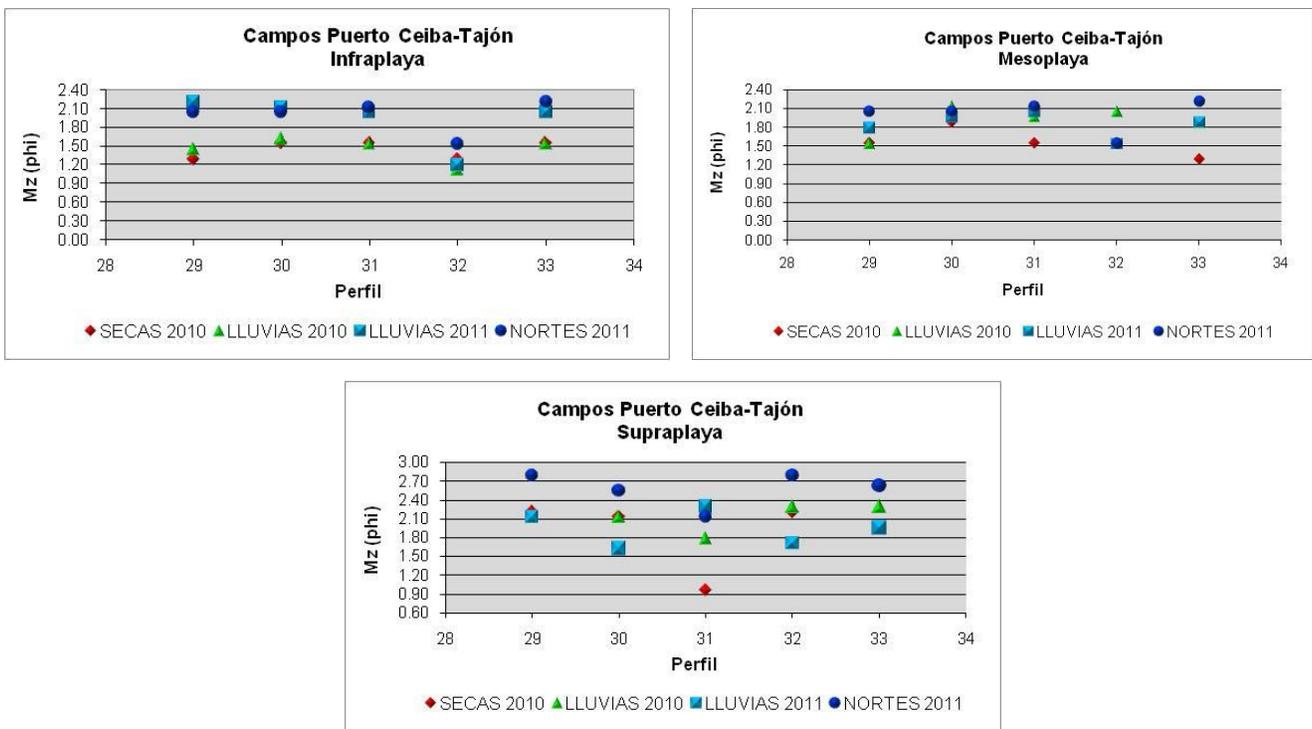


Figura 44. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Tajón.

Desviación estándar gráfica inclusiva. La clasificación de los sedimentos en este sitio presentó muy poca variación para las tres zonas y en las diferentes épocas muestreadas, predominaron los sedimentos moderadamente bien clasificados y bien clasificados (Figura 45); esto significa que los factores de oleaje, corrientes marinas y viento, actúan de igual forma en las tres zonas.

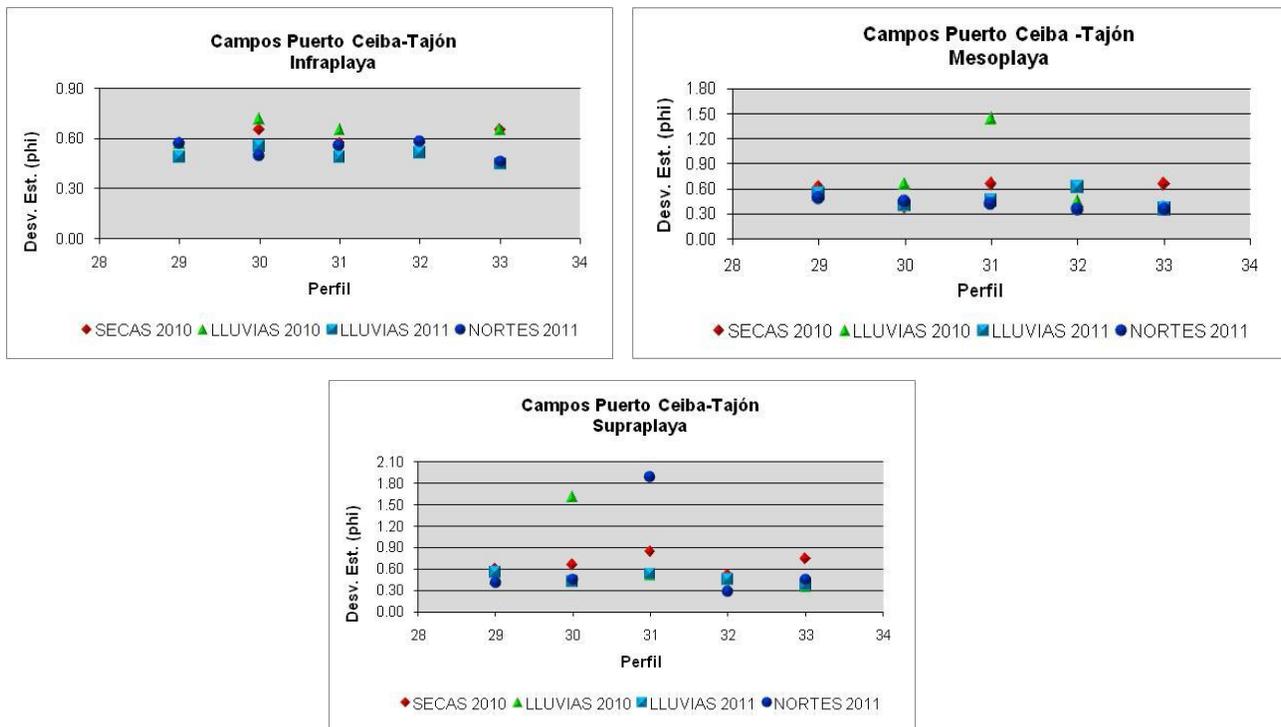


Figura 45. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Tajón.

Asimetría gráfica inclusiva. Los sedimentos en la zona de infraplaya fueron asimétricos hacia gruesos excepto en nortes del 2011 donde es muy notorio su simetría hacia tamaños finos. Para la zona de mesoplaya fueron principalmente simétricos y asimétricos hacia gruesos de igual forma que en la zona de supraplaya (Figura 46). La presencia de materiales gruesos en todas las épocas indica que este sitio está sujeto a condiciones constantes de alta energía.

Curtosis. La curtosis fue muy variable, desde platicúrticos a leptocúrticos para las dos zonas de infraplaya y mesoplaya en las diferentes épocas estacionales monitoreadas pero sólo en la zona de supraplaya se tuvo una tendencia de sedimentos hacia los leptocúrticos, es decir, que en los sedimentos predomina un solo tamaño de partículas, lo que hace suponer que la energía es muy constante en la zona de supraplaya (Figura 47).

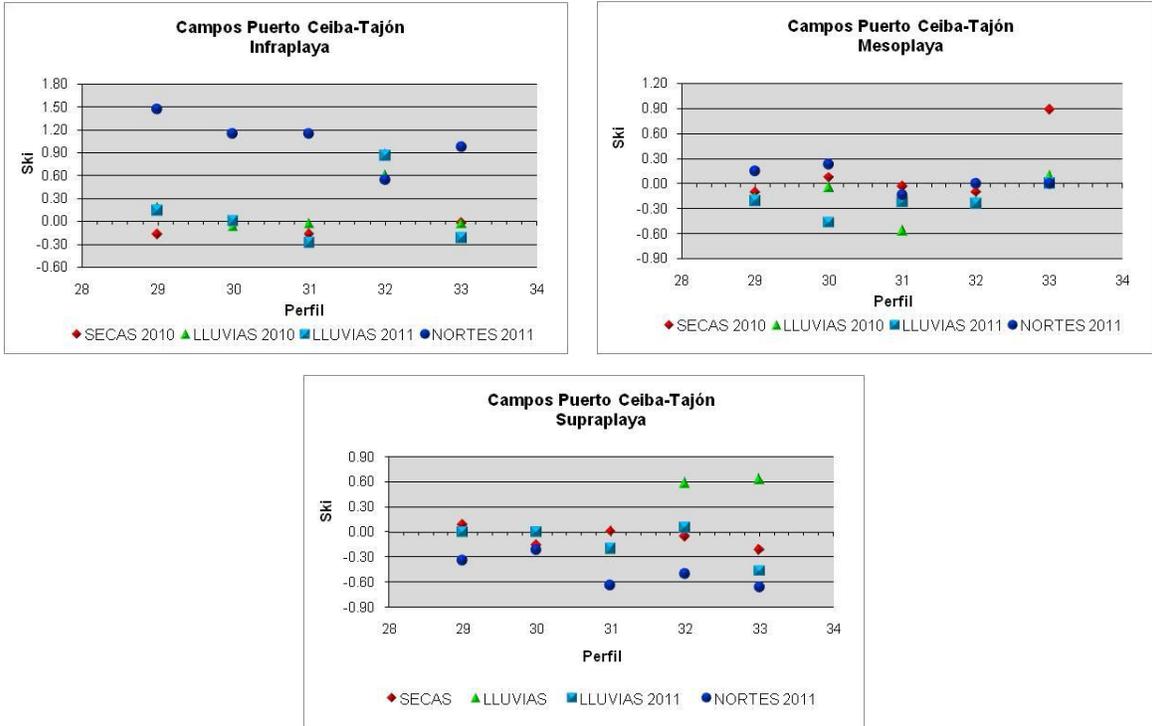


Figura 46. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de la zona litoral de los Campos Puerto Ceiba-Tajón

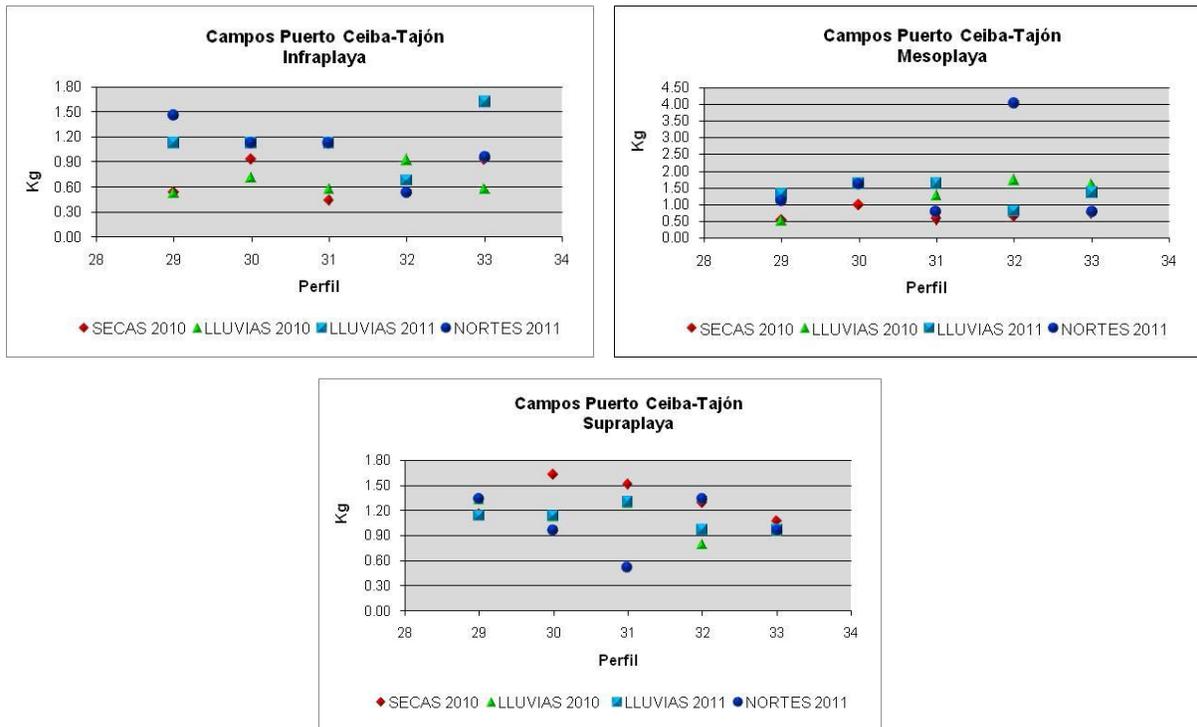


Figura 47. Variación de la curtosis de sedimento en Tajón.

b) Composición mineralógica

Los sedimentos estuvieron compuestos principalmente de arenas feldespáticas en las tres zonas para las diferentes épocas, aunque se tienen subfeldsarenitas en menor proporción para la época de seca y lluvias del 2010, esto significa que los sedimentos incrementan su contenido de cuarzo quizás a una mayor permanencia de los sedimentos al oleaje y corrientes que los clasifican en la zona litoral (Figura 48).

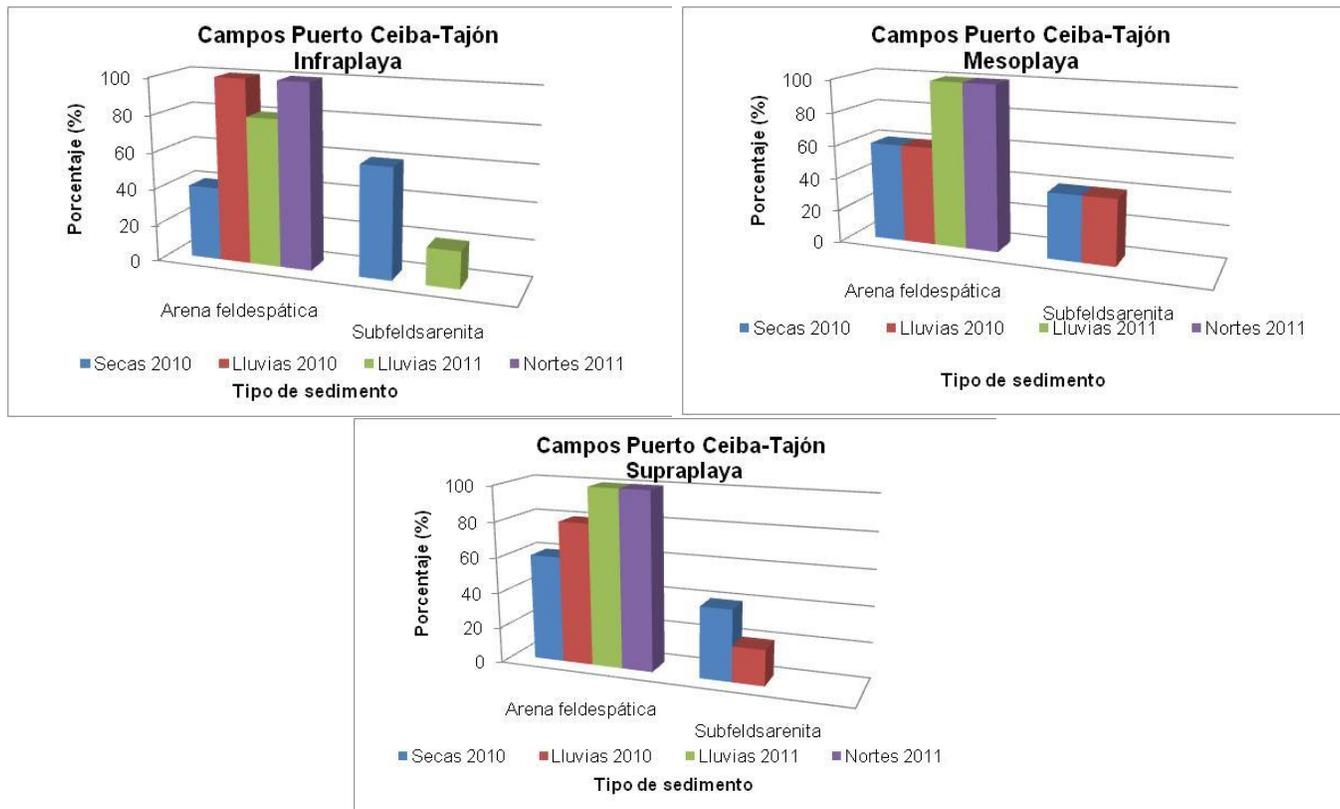


Figura 48. Tipo de sedimento en Tajón.

En la zona de infraplaya y supraplaya predominaron los sedimentos subredondeados para las cuatro épocas y los que destacan en la mesoplaya fueron subangulosos. Cabe mencionar, que los sedimentos subredondeados muestran una mayor exposición a los agentes de transporte (oleaje, corrientes y viento) o que han viajado enormes distancias para irse redondeando durante el proceso de transporte donde aparentemente son sedimentos que han llegado a la zona litoral con esa redondez y que los agentes de transporte no han tenido la

energía para colisionar las partículas e incrementar su angulosidad (Figura 49).

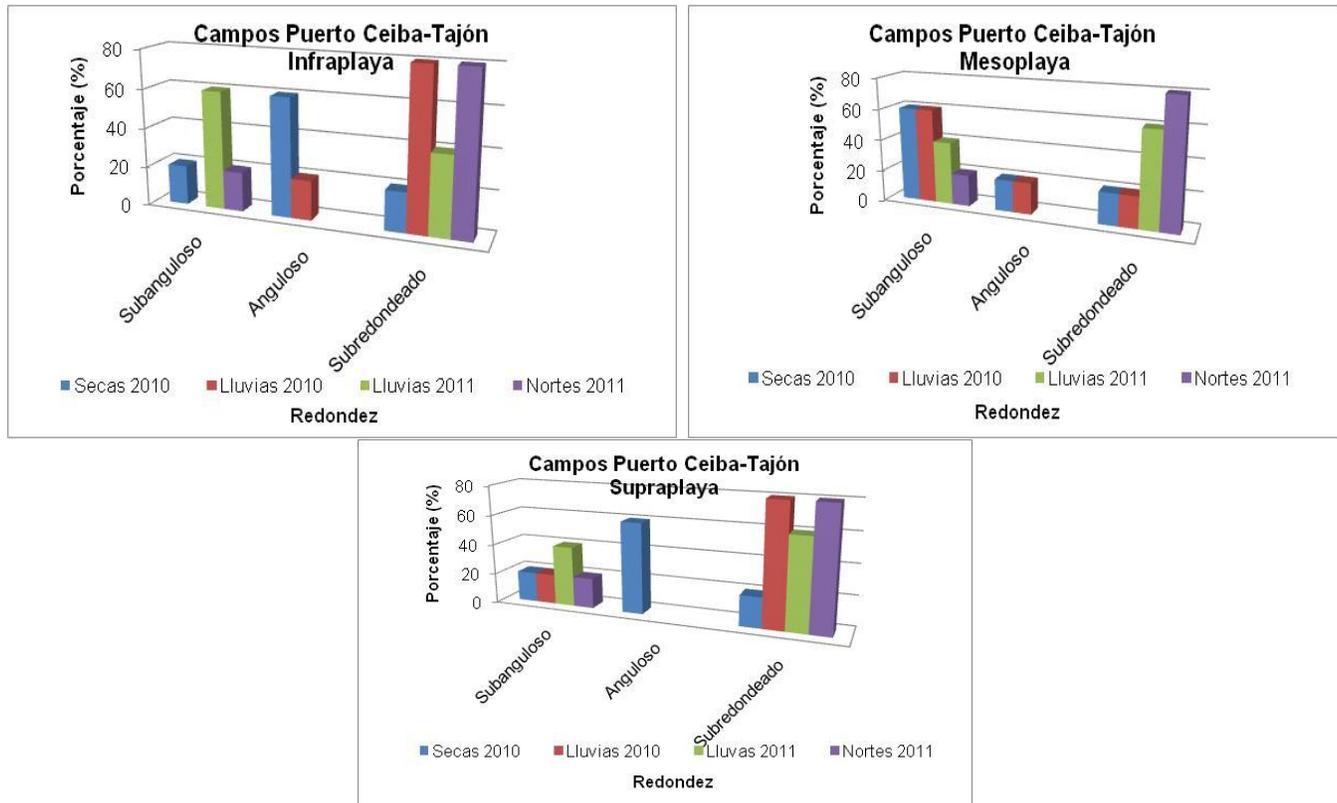


Figura 49. Grado de redondez de los sedimentos en Tajón.

En cuanto a la esfericidad de los sedimentos, en las tres zonas para las diferentes épocas se observaron sedimentos tabulares, cilíndricos, prolados y esféricos en diferentes porcentajes cuyas formas están asociadas a la estructura original al formarse el mineral de cuarzo y al desgaste y forma de transporte del mineral hasta depositarse en la playa (Figura 50).

5. Mecoacán

a) Granulometría

Tamaño gráfico Promedio (Mz). El tamaño de los sedimentos en la zona de infraplaya son arenas medias con arenas finas en secas del 2010 y arenas gruesas en lluvias del 2010. Para las arenas de mesoplaya son muy similares a la zona de infraplaya, sin embargo en la supraplaya son más dominantes las arenas finas (Figura 51). Los sedimentos gruesos son indicadores de

mayor energía para la zona de infra y supraplaya.

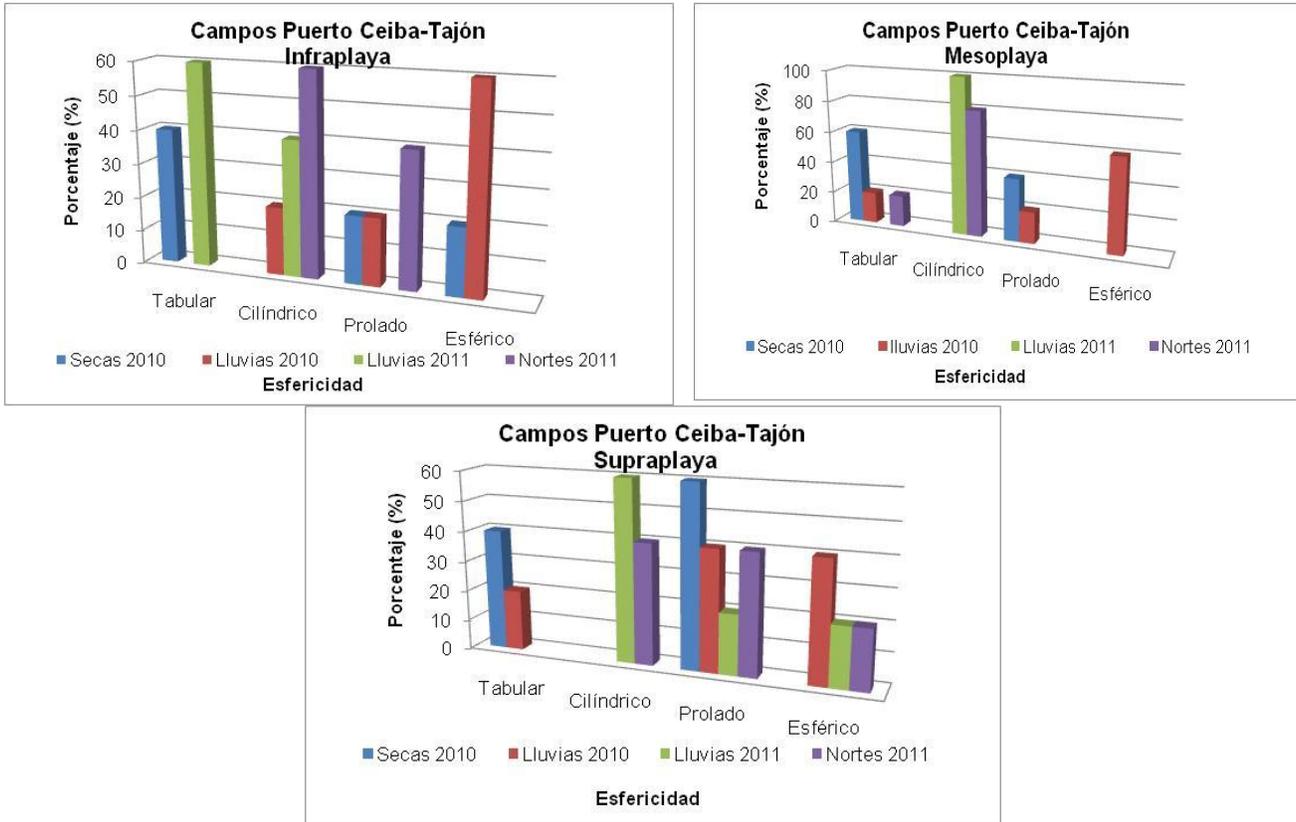


Figura 50. Grado de esfericidad de sedimentos en Tajón.

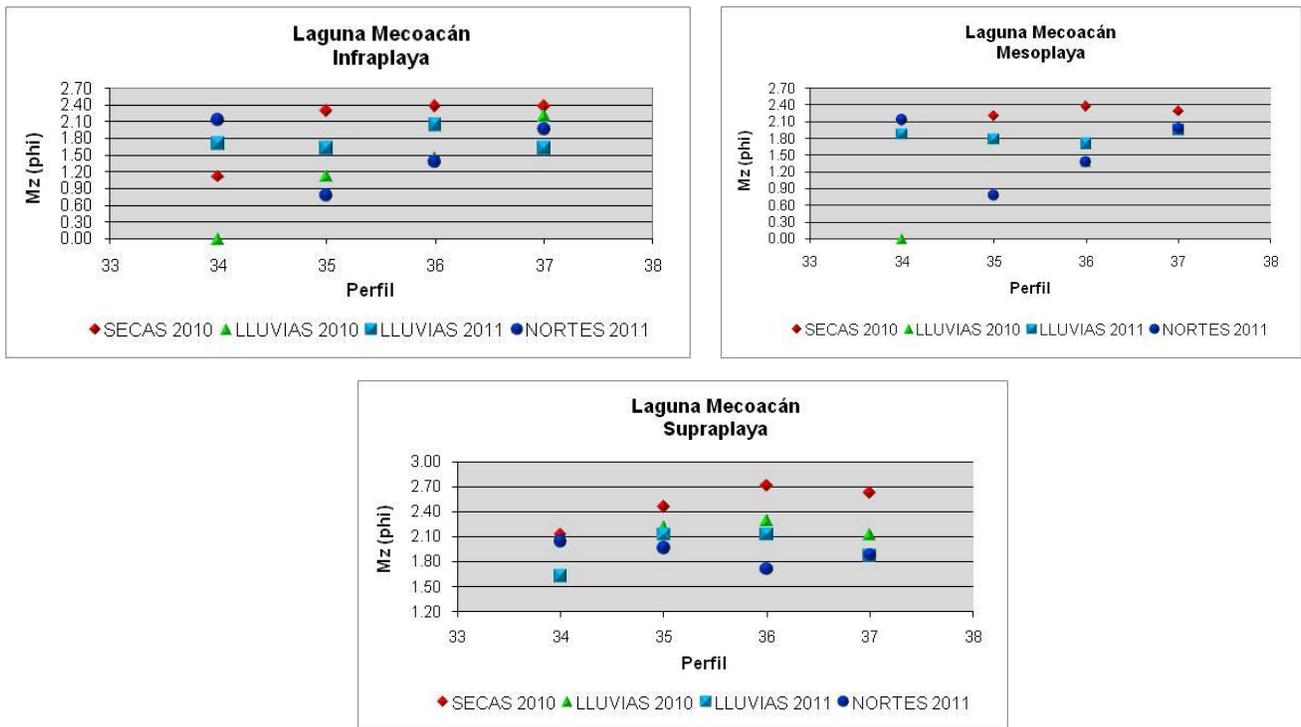


Figura 51. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Mecoacán.

Desviación estándar gráfica inclusiva. La clasificación de los sedimentos en la zona de infraplaya y mesoplaya fue muy variable, con moderadamente clasificados hasta bien clasificados. En la supraplaya predominaron los moderadamente bien clasificados (Figura 52). Esto marca una mayor variación de energía en la zona de infraplaya y mesoplaya con una mayor estabilidad en la supraplaya.

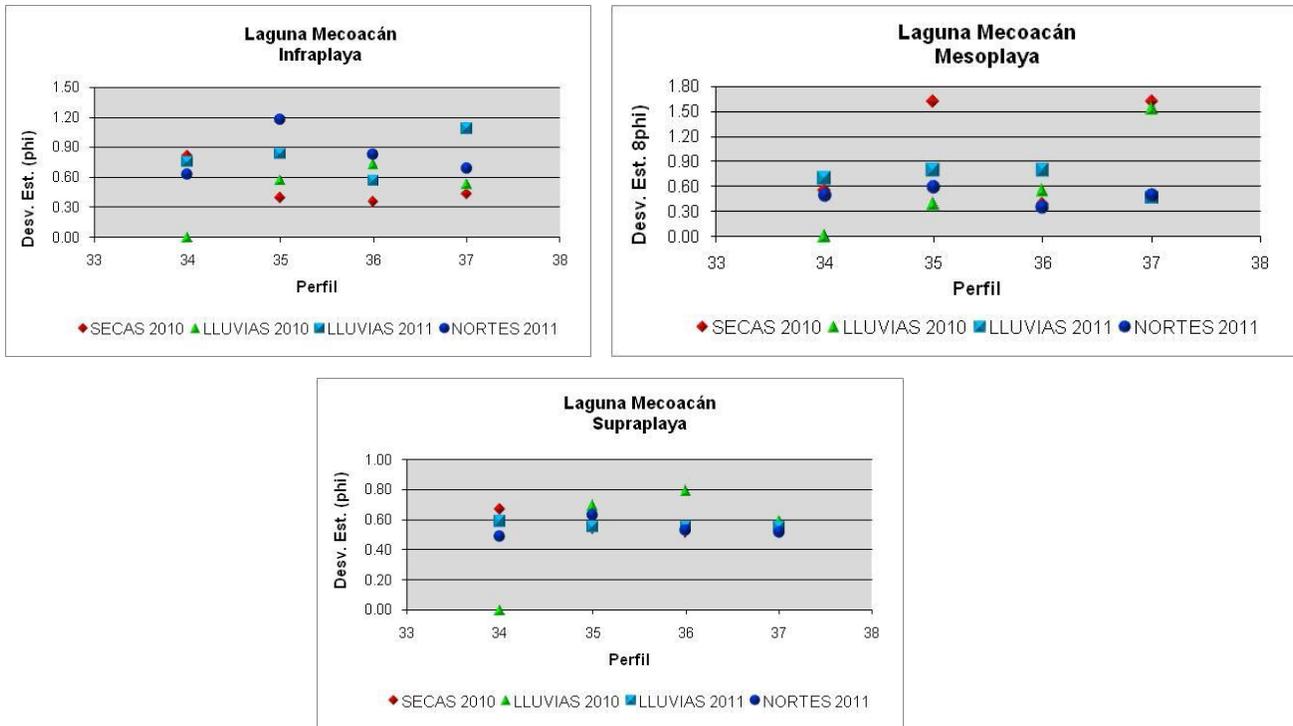


Figura 52. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Mecoacán.

Asimetría gráfica inclusiva. En lluvias 2011 prevalecieron los sedimentos asimétricos hacia los gruesos, el resto de las temporadas para la zona de infraplaya fueron sedimentos asimétricos hacia finos. En la mesoplaya dominaron los sedimentos gruesos y en la supraplaya simétricos (Figura 53). Los sedimentos finos están presentes en áreas de menor energía, caso contrario a los materiales gruesos.

Curtois. La curtois fue muy variable para las diferentes épocas y zonas sin un patrón definido, lo que marca que la zona está expuesta a cambios constantes de energía (Figura 54).

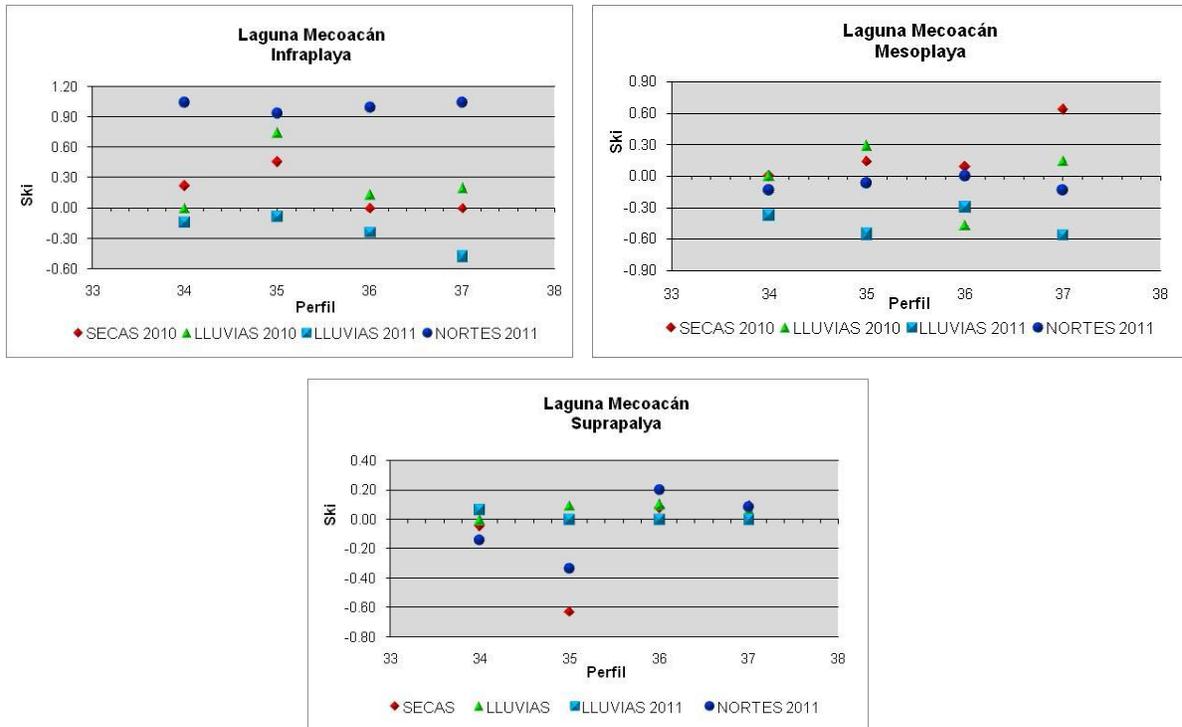


Figura 53. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Mecoacán.

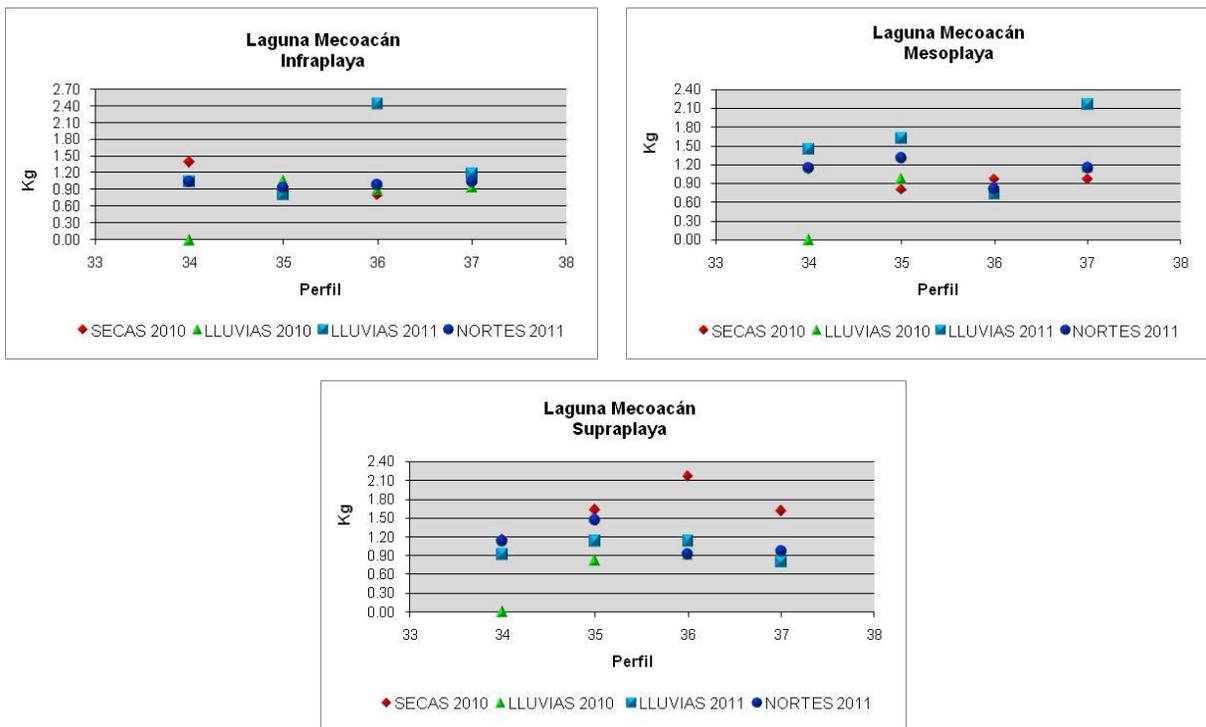


Figura 54. Variación de la curtosis de sedimento en Mecoacán.

b) Composición mineralógica

El tipo de sedimentos para las tres zonas y diferentes épocas fue arena feldespática, lo que señala un origen terrestre (Figura 55).

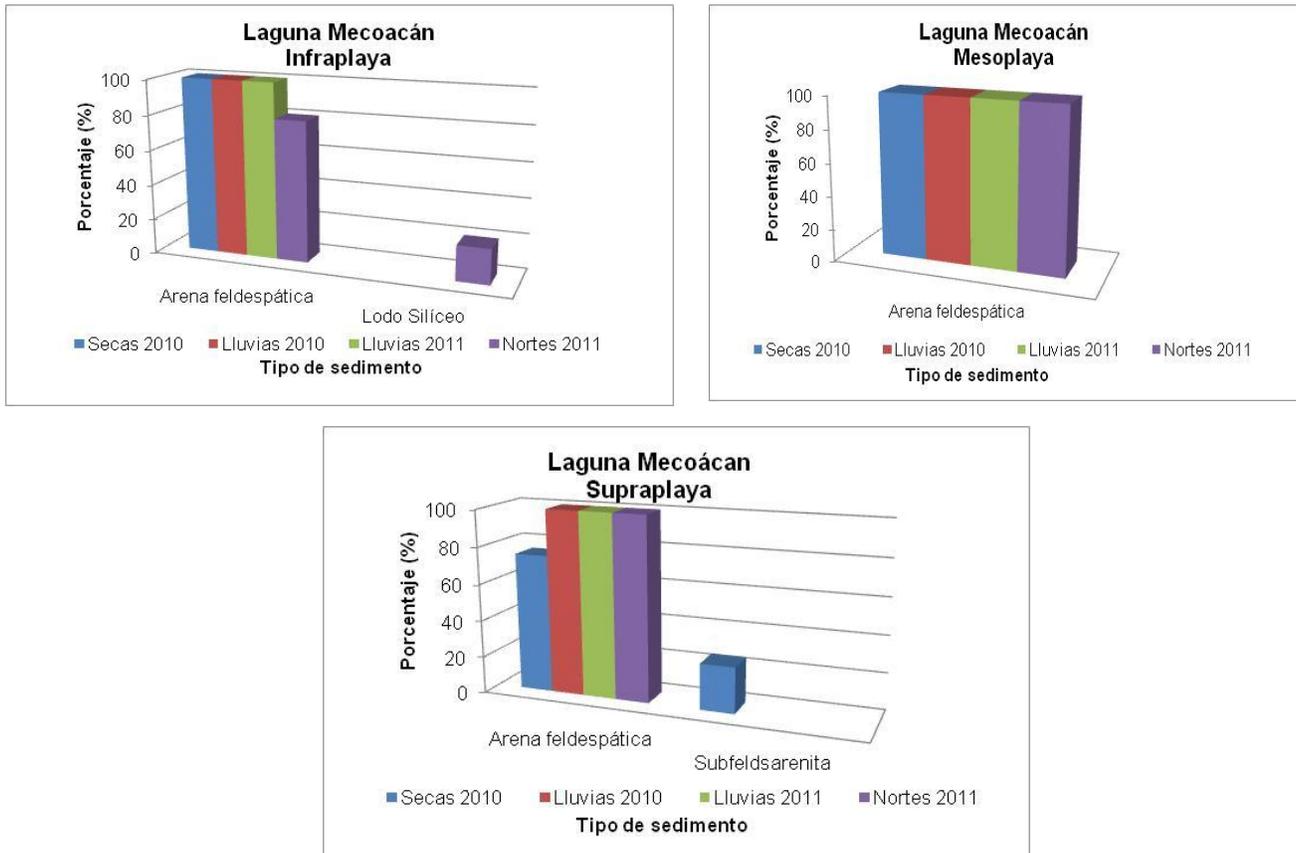


Figura 55. Tipo de sedimento en Mecoacán.

Los sedimentos presentaron partículas subangulosas que pueden ser causados por el rompimiento de las partículas por el oleaje, y subredondeadas por el desgaste durante el transporte litoral; sus formas fueron muy variables para las tres zonas y diferentes épocas, lo que denota diferentes grados de desgaste y transporte. (Figuras 56 y 57).

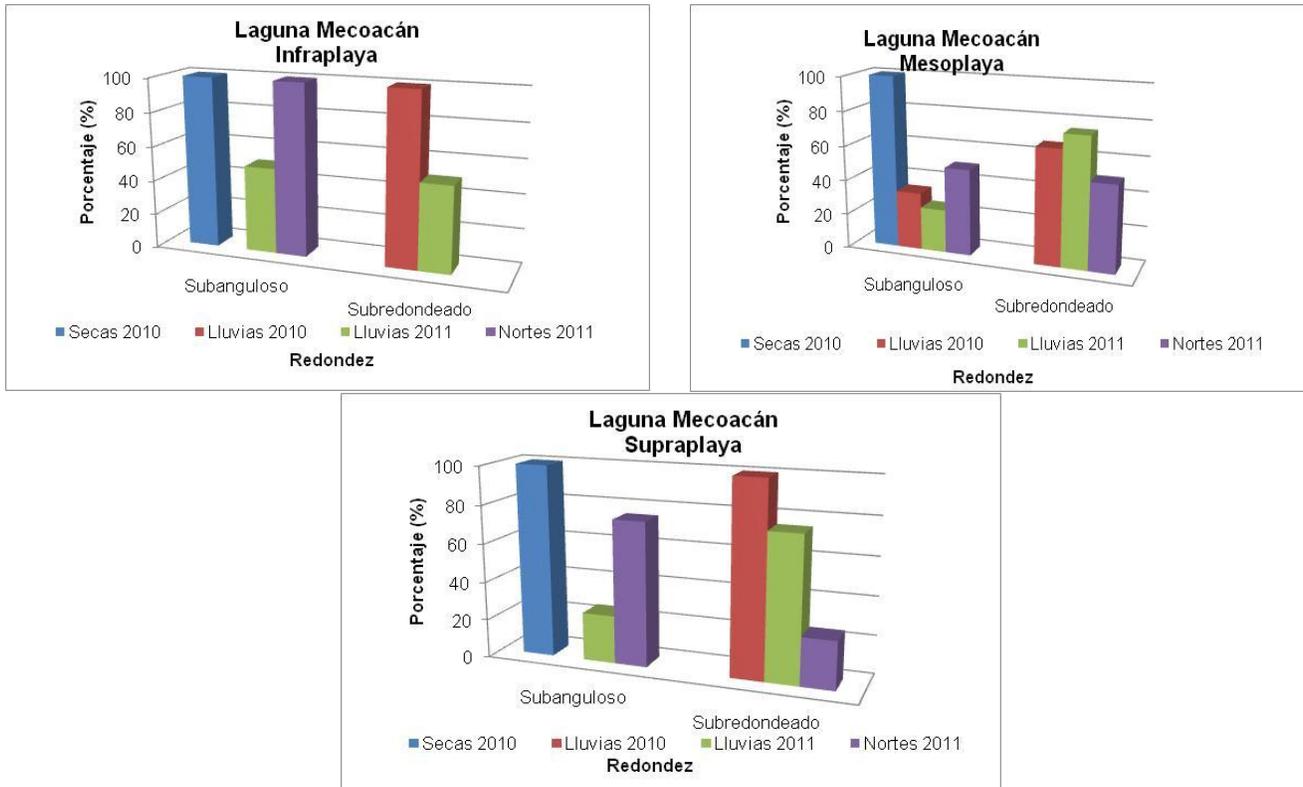


Figura 56. Grado de redondez de los sedimentos en Mecoacán.

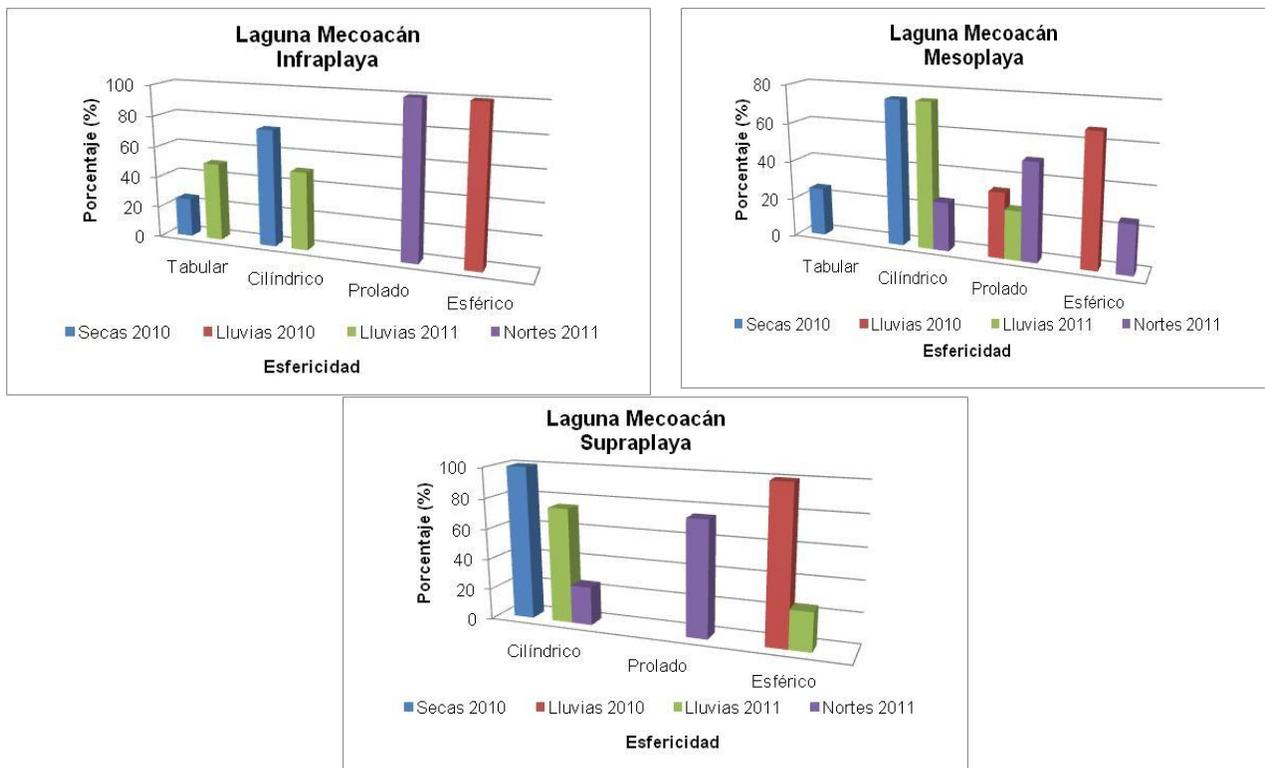


Figura 57. Grado de esfericidad de sedimentos en Mecoacán.

6. Grijalva

a) Granulometría

Tamaño gráfico Promedio (Mz). Para las tres zonas del litoral y en todas las épocas, se observaron arenas finas (Figura 58). Estos sedimentos marcan un aporte fluvial de arenas finas, sin cambiar en las diferentes épocas del año.

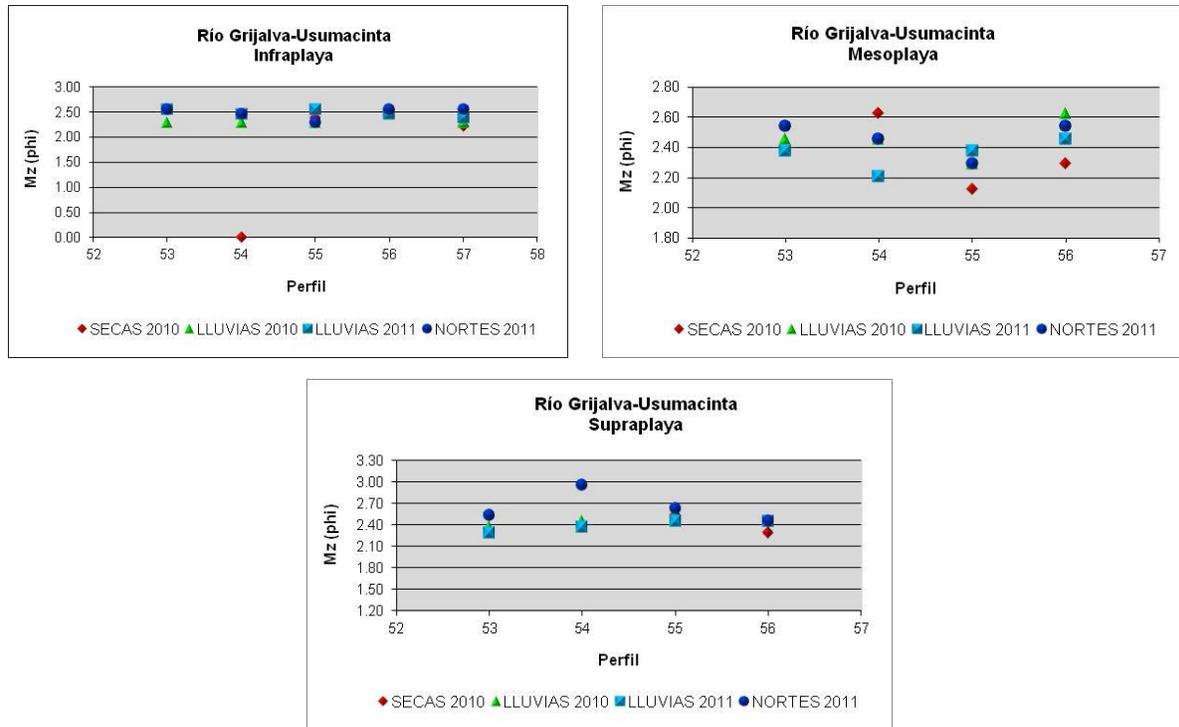


Figura 58. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Grijalva.

Desviación estándar gráfica inclusiva. Con excepción de la época de secas del 2010, se observaron sedimentos mal clasificados sobretodo en mesoplaya y supraplaya, todas las demás épocas mostraron sedimentos bien clasificados para las tres zonas (Figura 59).

Asimetría gráfica inclusiva. En la infraplaya los sedimentos tienden a los tamaños finos, excepto en secas del 2010 que tienden a los tamaños gruesos. En la mesoplaya prevalecieron los sedimentos hacia los tamaños finos, aunque en secas y lluvias 2011 existieron sedimentos hacia los tamaños gruesos, al igual que la zona de supraplaya (Figura 60). En secas y lluvias del 2010 hubo una mayor variación de energía en la meso y supraplaya.

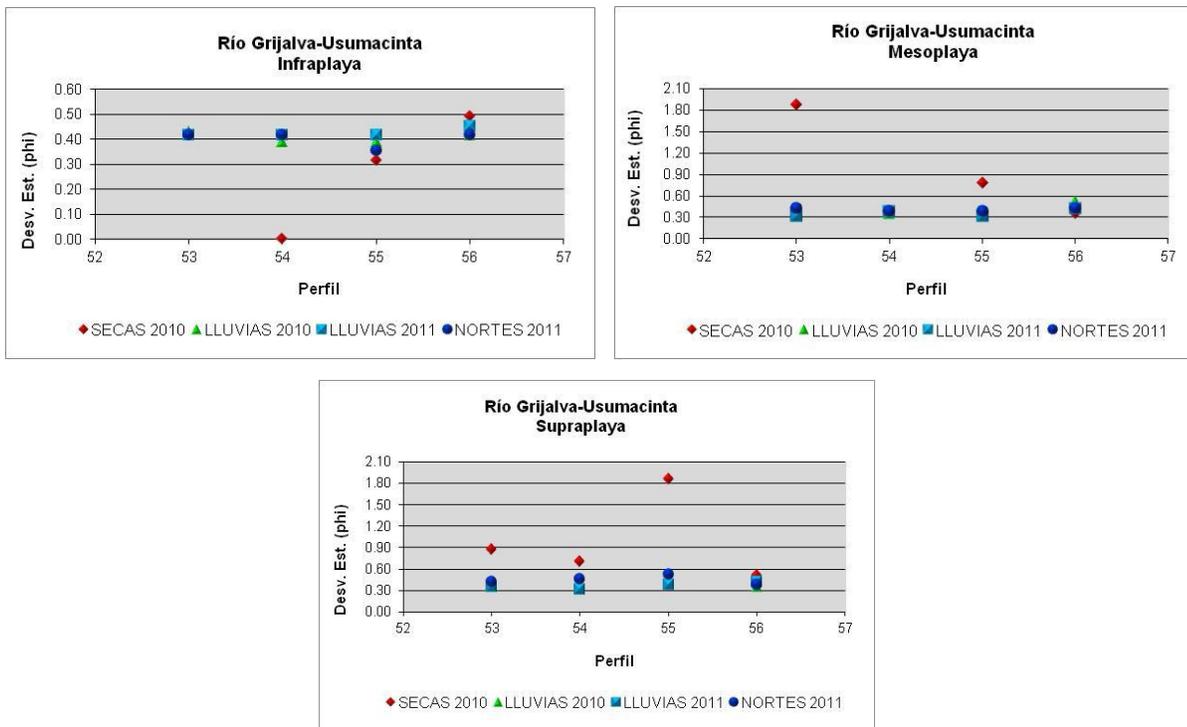


Figura 59. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Grijalva.

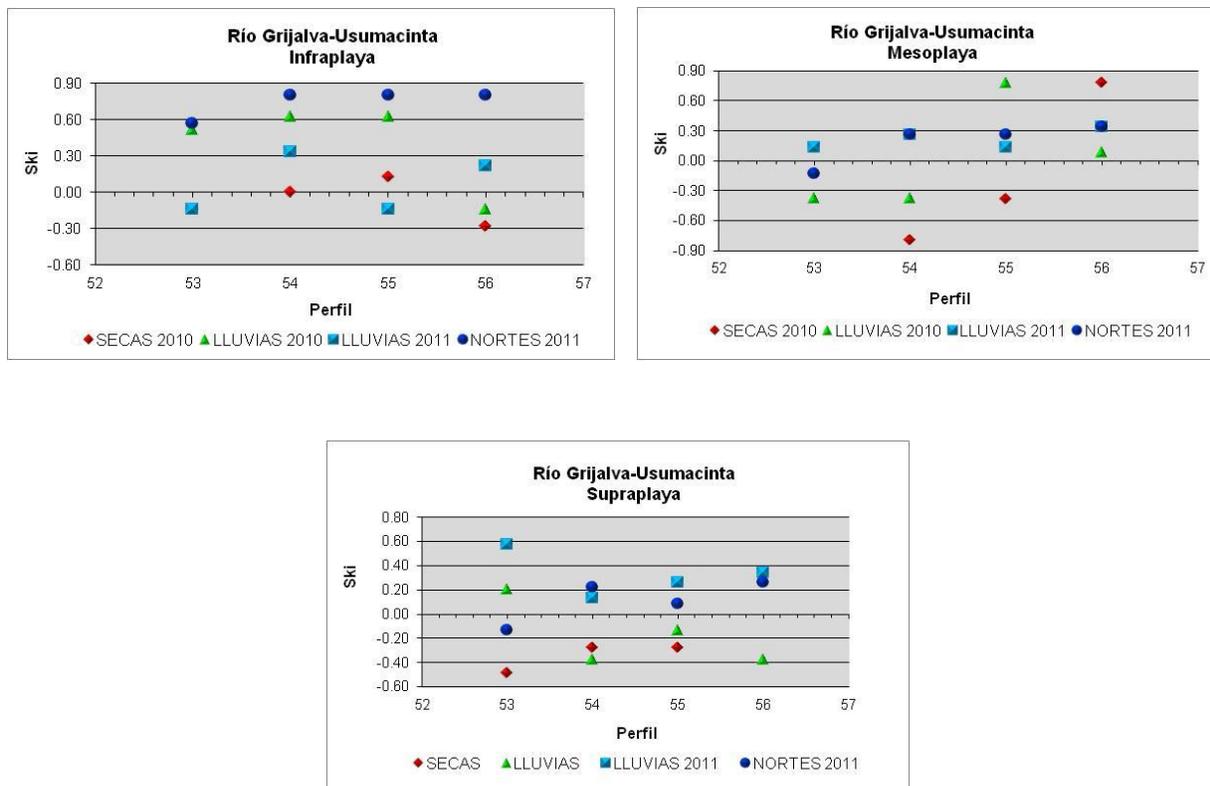


Figura 60. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de sedimento en Grijalva.

Curtosis. La curtosis en infraplaya fue principalmente platicúrtica, sólo en lluvias 2010 se registraron sedimentos leptocúrticos. En mesoplaya y supraplaya fueron también platicúrticos, excepto en secas del 2010 que son leptocúrticos (Figura 61). Esto hace suponer un cambio de condiciones de energía del 2010 al 2011 en los materiales presentes en este río.

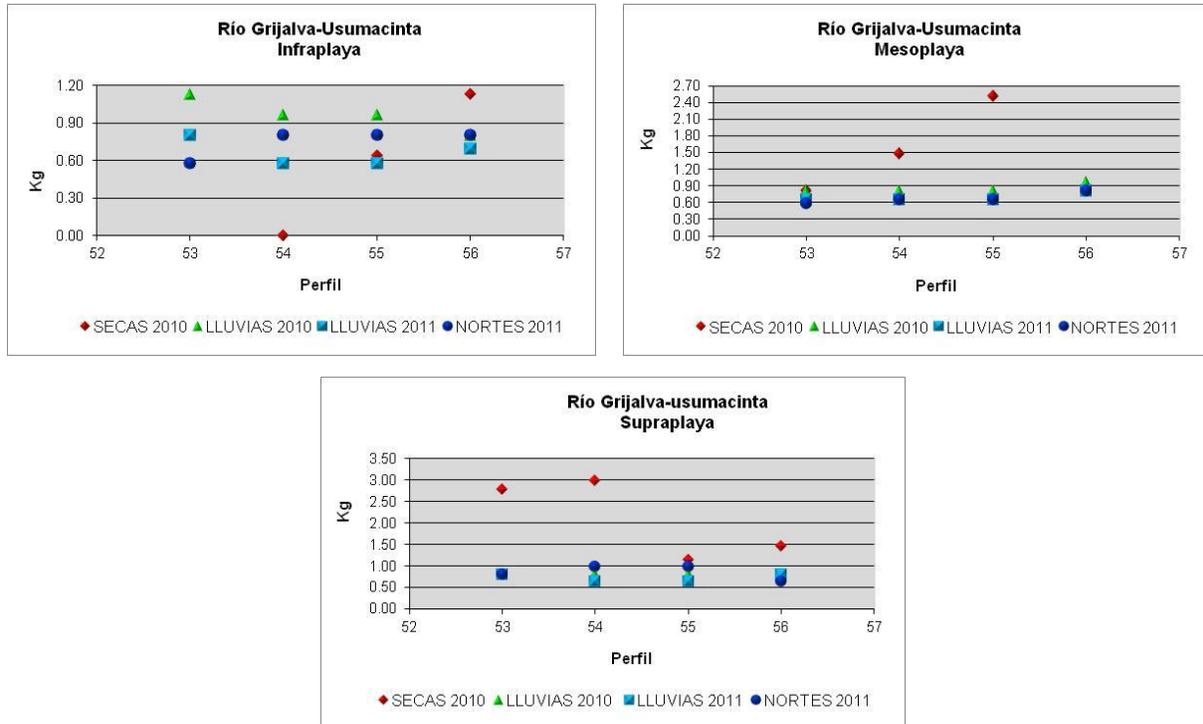


Figura 61. Variación de la curtosis de sedimento en Grijalva.

b) Composición mineralógica

En las tres zona para las diferentes épocas, el tipo de sedimento fue arena feldespática, en menor cantidad se observaron subfeldsarenitas (Figura 62). Estas arenas totalmente terrígenas son procedentes del río de las partes altas de la Sierra de Chiapas, transportadas hasta la zona litoral por el río Grijalva.

Los sedimentos en la infraplaya fueron angulosos y subredondeados, mientras que en la mesoplaya y supraplaya angulosos principalmente. Se observaron sedimentos subredondeados por acción del transporte y subangulosos por la acción del oleaje, sobre todo durante nortes (Figura 63).

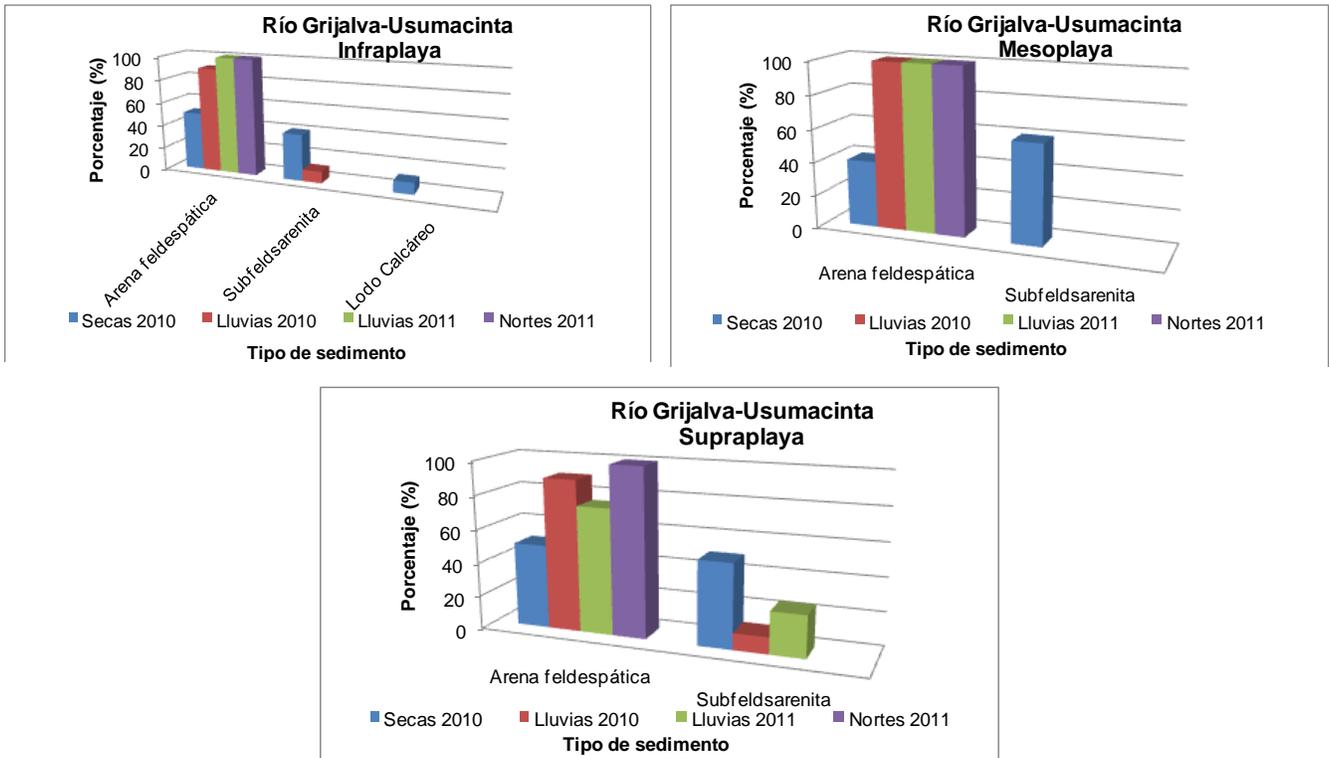


Figura 62. Tipo de sedimento en Grijalva.

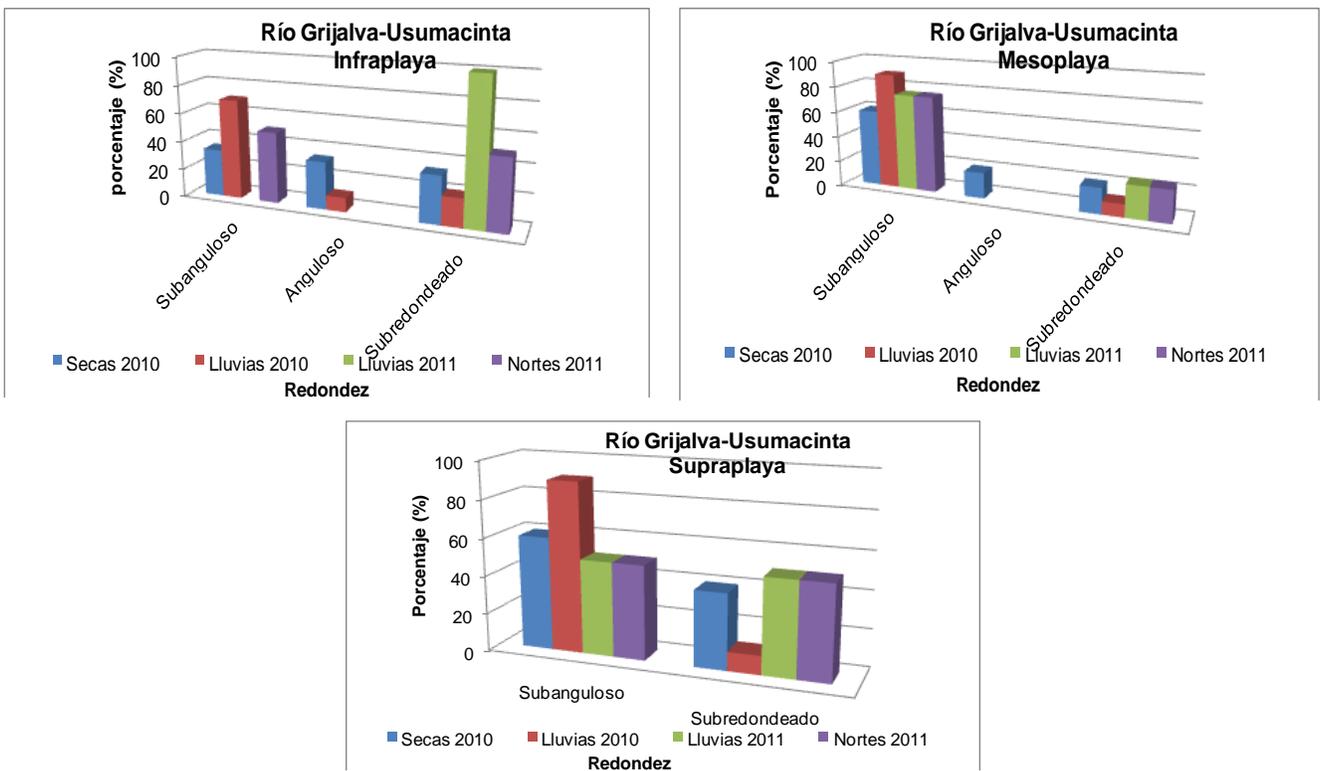


Figura 63. Grado de redondez de los sedimentos en Grijalva.

Los sedimentos fueron cilíndricos, tabulares y prolados para las tres zonas y diferentes épocas siendo resultado del desgaste sufrido en el transporte a la misma playa (Figura 64).

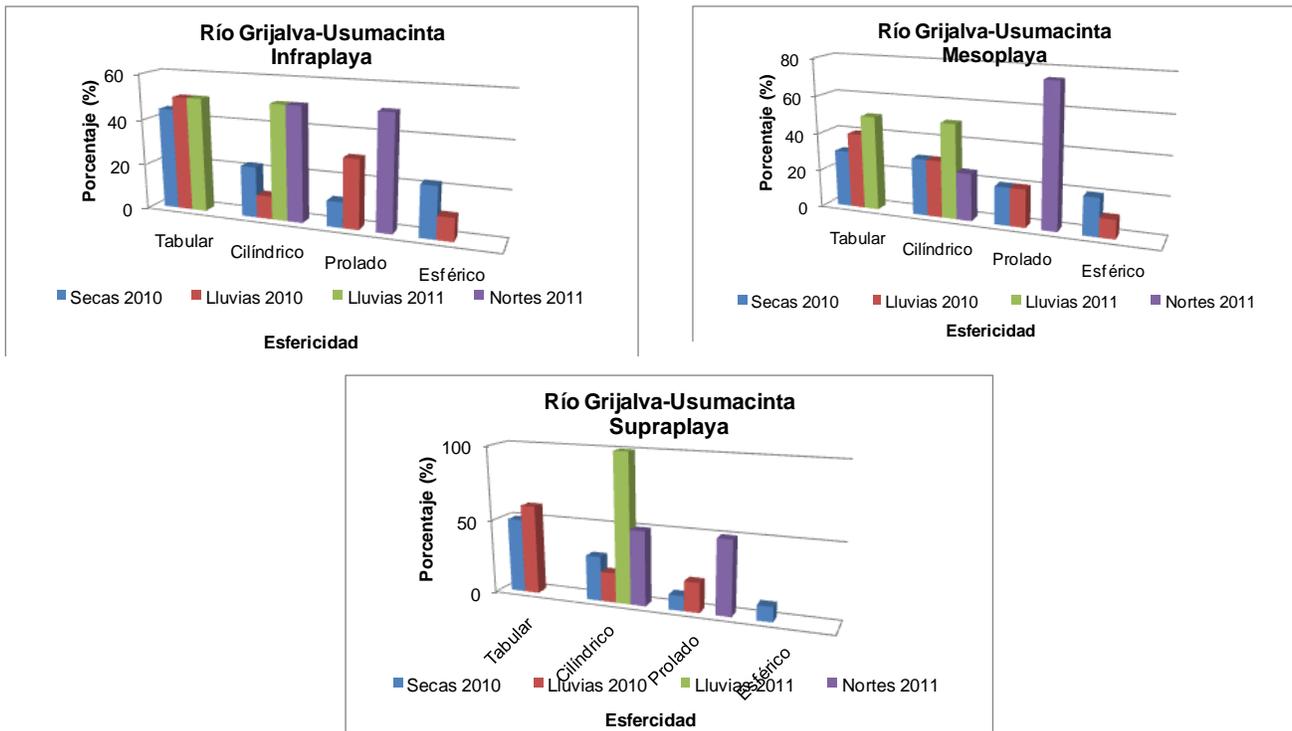


Figura 64. Grado de esfericidad de sedimentos en Grijalva.

7. Campo Costero

a) Granulometría

Tamaño gráfico Promedio (Mz). En la zona de infraplaya y supraplaya fueron principalmente arenas finas para todas las épocas. En la mesoplaya también hubo arenas finas, excepto en la época de secas del 2010 donde se encontraron arenas medias (Figura 65). Los sedimentos finos provienen del Río San Pedro- San Pablo.

Desviación estándar gráfica inclusiva. El grado de clasificación en la zona de infraplaya y mesoplaya indicó sedimentos bien clasificados, excepto en la época de secas del 2010, donde se observaron sedimentos mal clasificados. En la supraplaya se mostraron bien clasificados, aunque en secas del 2010 fueron moderadamente clasificados (Figura 66).

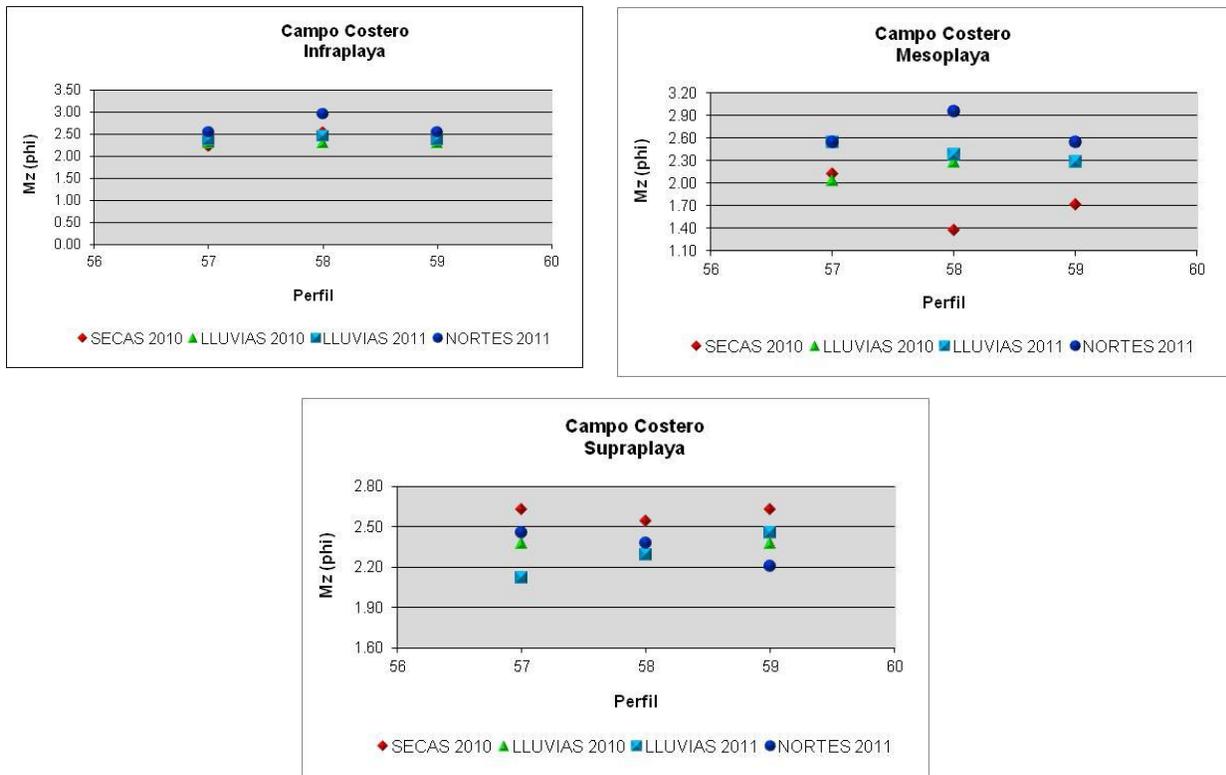


Figura 65. Variación del tamaño gráfico promedio de sedimento en Costero.

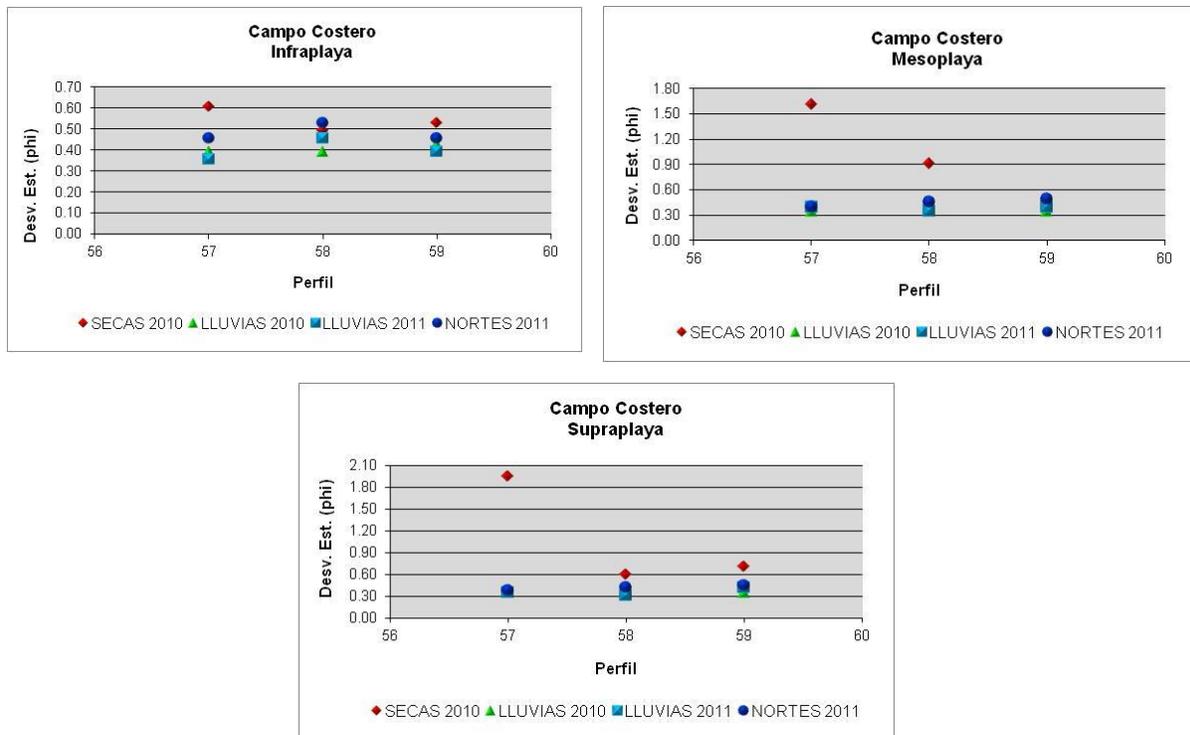


Figura 66. Variación de la desviación estándar gráfica inclusiva de sedimento en Costero.

Asimetría gráfica inclusiva. En la zona de infraplaya los sedimentos fueron simétricos y asimétricos hacia finos excepto en secas 2010 donde tienden hacia los tamaños gruesos. En la mesoplaya y supraplaya también hubo sedimentos inclinados hacia las arenas finas, solo que en la época de secas 2010 fueron sedimentos asimétricos hacia gruesos (Figura 67). Es una zona con sedimentos finos de baja energía.

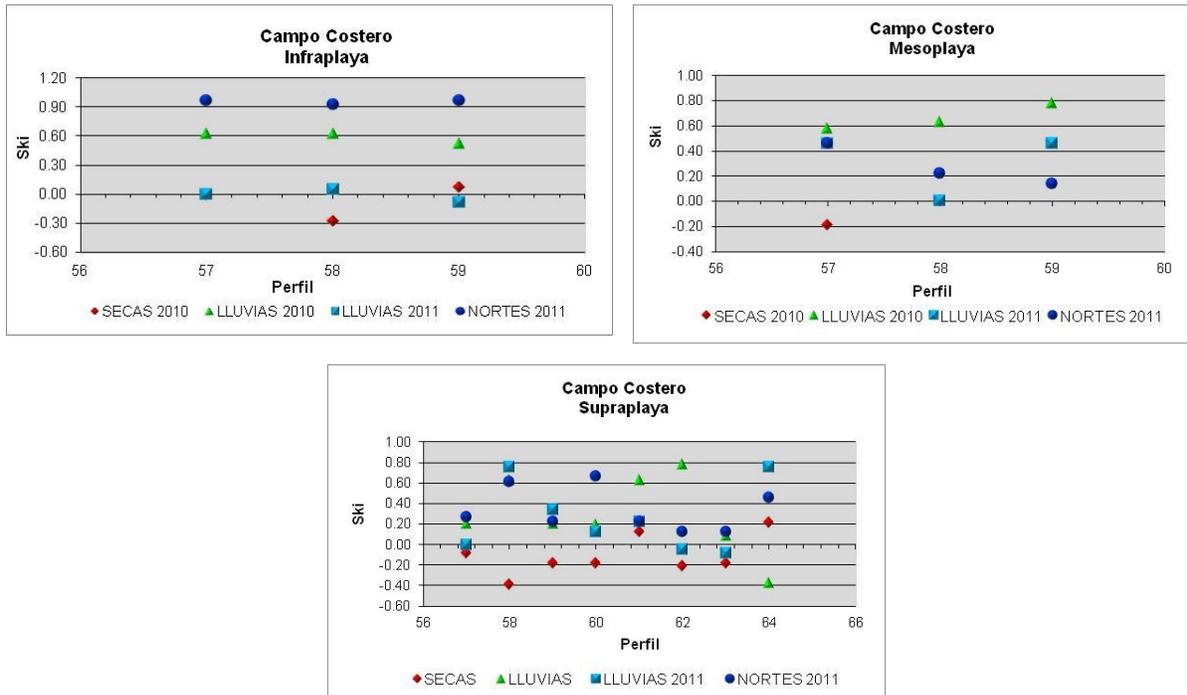


Figura 67. Variación de la asimetría gráfica inclusiva de la zona litoral de Campo Costero

Curtosis. La curtosis presentó una tendencia hacia los sedimentos leptocúrticos en la infraplaya y mesoplaya. En la supraplaya se observaron sedimentos desde leptocúrticos hasta platicúrticos (Figura 68). La predominancia de leptocúrticos significa que ha habido una buena selección de sedimentos e indica condiciones muy homogéneas.

b) Composición mineralógica

Los sedimentos son arenas feldespáticas para las tres zonas y épocas muestreadas, siendo muy homogéneas (Figura 69). Se define muy claramente su origen terrestre cuya procedencia es del río San Pedro y San Pablo.

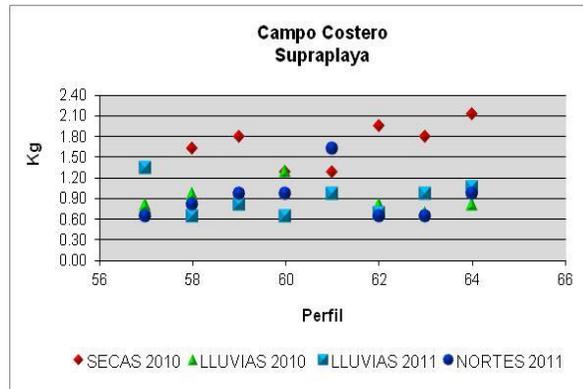
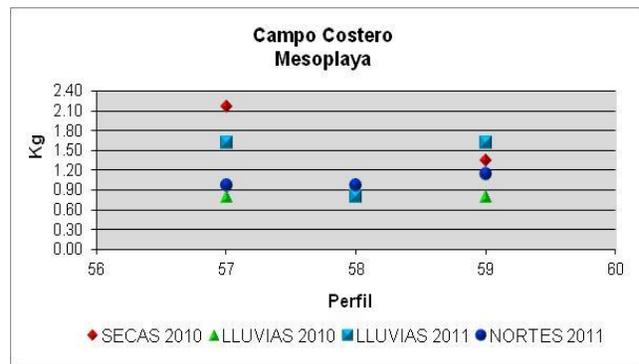
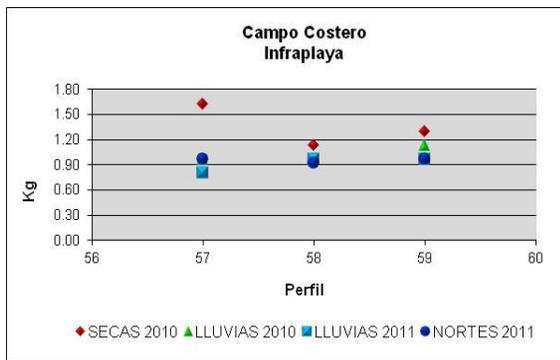


Figura 68. Variación de la curtosis de sedimento en Costero.

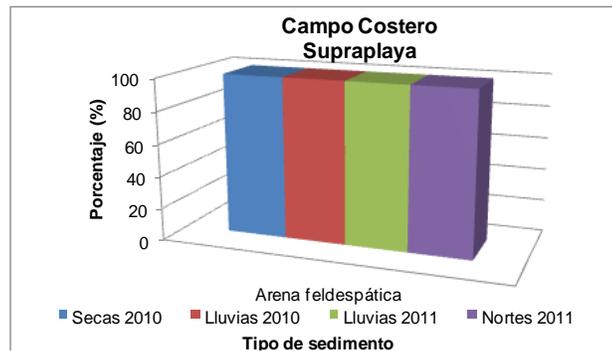
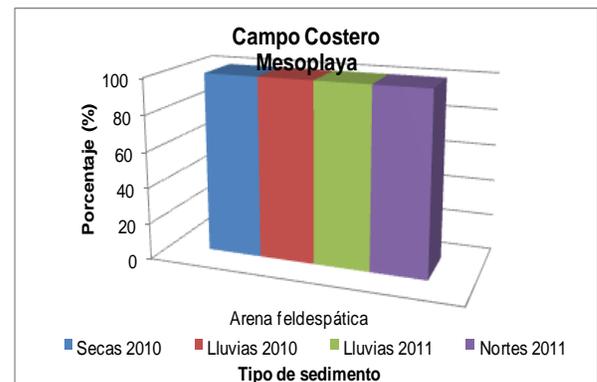
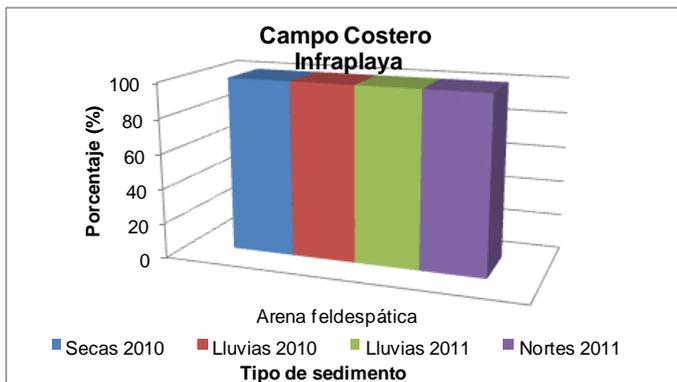


Figura 69. Tipo de sedimento según en Costero.

En la zona de infraplaya se observaron sedimentos cilíndricos principalmente, y en la zona de mesoplaya tabulares y prolados, mientras que en supraplaya se observaron las tres formas, aparentemente de las formas cilíndricas que aparecen en infraplaya pasa a formas tabulares y prolada (Figura 71).

Análisis de sedimentos por su zona de playa

En cuanto al tamaño de sedimentos de la zona de infraplaya se observó que las arenas medias dominan la parte correspondiente a Cinco Presidentes y arenas gruesas en boca de Sánchez Magallanes. Hacia el este las arenas van siendo más finas; en Barra de Tupilco y Tajón se encontraron arenas medias y finas, mientras que en Grijalva y Campo Costero predominaron arenas finas aportadas por el Río Grijalva y San Pedro- San Pablo.

En la mesoplaya, prevalecieron arena medias y finas en la región de Cinco Presidentes, pero conforme se desplaza hacia el este los materiales cambian de arenas medias a arenas finas en Grijalva. En la supraplaya, fue muy semejante la distribución de los tamaños de grano que en mesoplaya.

De lo anterior, la zona más dinámica como lo indica el tamaño grueso de las partículas de sedimentos es la Boca de Sánchez-Magallanes.

Procedencia

De manera general, en la zona litoral predominaron las arenas finas aportadas por el sistema Grijalva-Usumacinta y de los otros sistemas y bocas lagunares; bien clasificadas y moderadamente bien clasificadas causados por el flujo y reflujo del oleaje y por los procesos de transporte; asimétricas hacia los tamaños gruesos lo que indica que prevalecieron condiciones de energía altas, y de mesocúrticos a platicúrticos causados por la diversidad de tamaños de los sedimentos por la procedencia y dinámica costera variable.

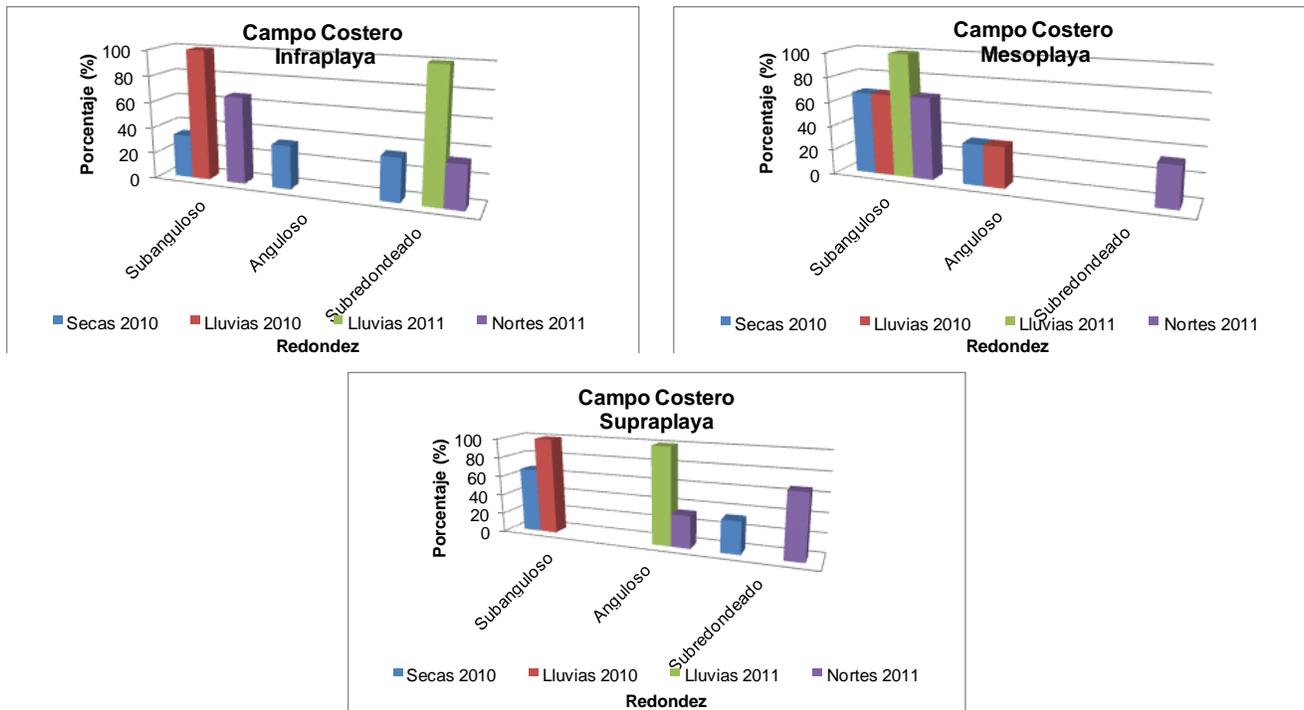


Figura 70. Grado de redondez de los sedimentos de la zona litoral de Campo Costero.

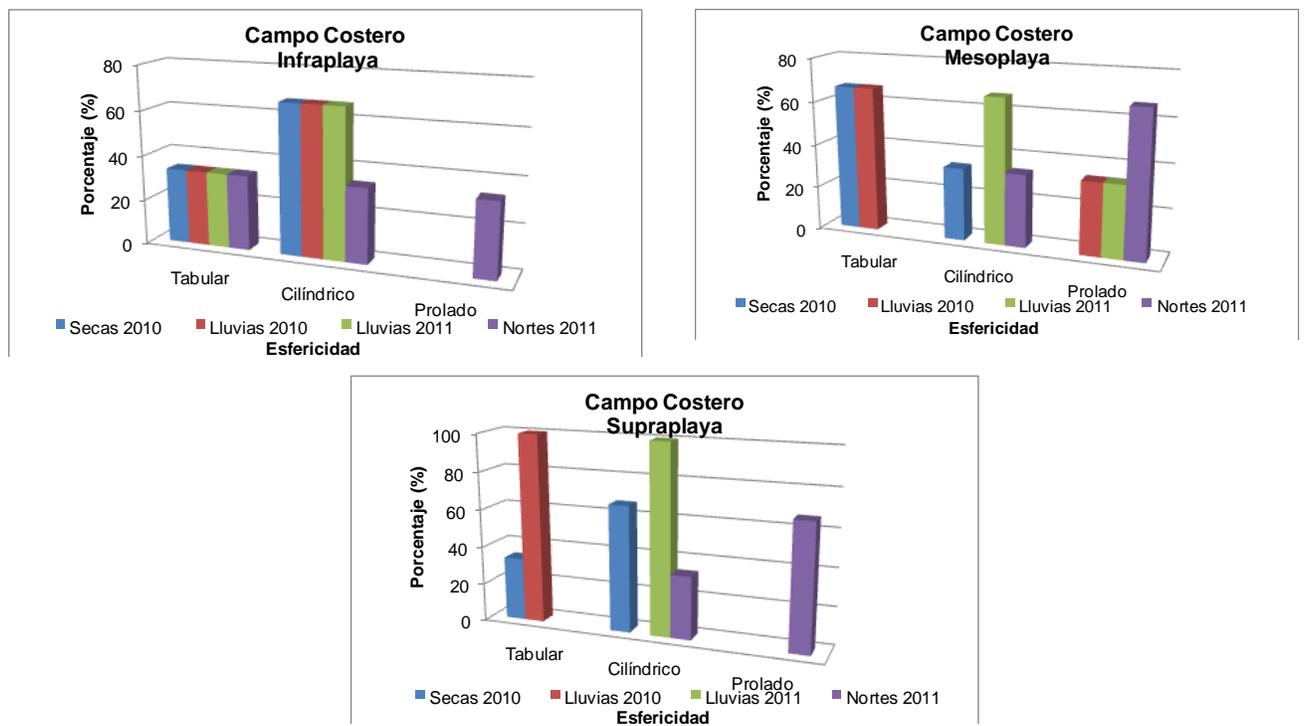


Figura 71. Grado de esfericidad de sedimentos de la zona litoral de Campo Costero.

El sedimento de toda la zona consiste en arena feldespática netamente terrígena aportada por los sistemas fluviales presentes en el área desde el Tonalá hasta San Pedro y San Pablo, subangulosos y de formas variables.

Identificación de provincias sedimentarias en Playa

A partir del análisis granulométrico de las zonas de infraplaya, mesoplaya y supraplaya se determinaron cinco provincias sedimentarias (Figura 72), estas son:

- 1) Cinco Presidentes. Arenas medias y gruesas, cuya procedencia son materiales terrígenos del Río Tonalá.
- 2) Sánchez Magallanes. Arenas gruesas, medias y finas procedentes de las bocas de Sánchez Magallanes y de Panteones.
- 3) Barra de Tupilco. Arenas gruesas y medias posiblemente aportadas por la misma barra de Tupilco, al estar cerrada la laguna de Tupilco.
- 4) Tajón y Mecoacán. Arenas medias y finas procedentes de la laguna de Mecoacán y Río González.
- 5) Grijalva y Costero. Arenas finas procedentes del Río Grijalva y San Pedro- San Pablo.

Variación estacional de los sedimentos

Para secas 2010 se observó la predominancia de arenas medias desde el Río Tonalá hasta Río González y arenas medias a finas hasta Río San Pedro- San Pablo; en lluvias 2010 fueron igualmente arenas medias desde el Río Tonalá al Río González con arenas gruesas en Boca Panteones y laguna Mecoacán, de este último sitio al Grijalva fueron arenas finas.

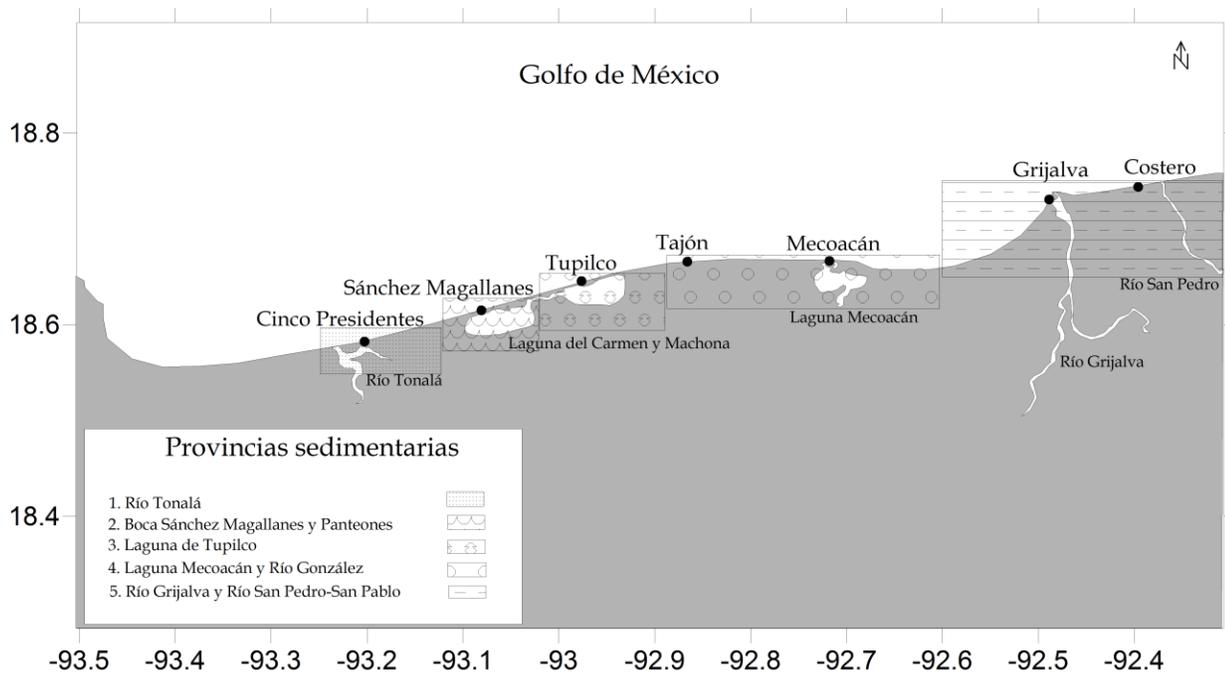


Figura 72. Provincias sedimentarias en el litoral de Tabasco

Durante las épocas de lluvias 2011 y nortes 2011 se presentaron arenas medias con tendencia hacia los tamaños finos del Río Tonalá al Río González con arenas gruesas en la Boca de Sánchez Magallanes para nortes 2011. En ambas épocas, en Grijalva y Costero hubo predominancia de arenas finas.

A excepción de secas 2010 donde predominaron arenas medias y gruesas en la zona Grijalva, el resto de las temporadas son arenas finas aportadas por este río. El río San Pedro- San Pablo aportó arena media a fina en el 2010 y lluvias del 2011, mientras que en nortes aportó arenas finas. El resto del litoral desde el Río Tonalá hasta el Río González fueron principalmente arenas medias con presencia de gruesas que marca una mayor energía o bien arena fina que indica menores energías.

La composición de los sedimentos es totalmente terrígena, notándose un mayor aporte de sedimentos ricos en feldespatos (arenas feldespáticas) para todas las épocas, procedentes de la zona continental a través de los ríos y lagunas.

3.4. Análisis de datos de Oceanografía Física y modelo de refracción de oleaje

a) Circulación oceánica

La circulación en la Bahía de Campeche está influenciada por la circulación de gran escala del Golfo de México, dominada por la Corriente de Lazo y un gran giro anticiclónico (Behringer *et al.*, 1977), los cuales se localizan en la parte oriental y occidental del golfo, respectivamente (Figura 73). A su vez esta circulación está condicionada por el viento y transporte de masas que entra por el Canal de Yucatán, y por la presencia de surgencias en la plataforma de Yucatán (Cochrane, 1972; Nowlin, 1972; Merrell y Morrison, 1981; Padilla-Pilotze *et al.*, 1985; Salas de León y Monreal Gómez, 1986; Vidal *et al.*, 1988; Velasco Mendoza, 1989; Padilla Pilotze *et al.*, 1990).

En la dinámica del Golfo de México también se distinguen giros fríos o ciclónicos, los que se presentan generalmente en la periferia de la Corriente de Lazo y del gran giro anticiclónico; este tipo de circulación es la que se encuentra en la Bahía de Campeche durante el otoño, originándose al este de la bahía para luego comenzar a trasladarse en dirección oeste. Estos giros son más pequeños que el anticiclónico del Oeste del golfo, alcanzando diámetros máximos de 150 km (Salas de León y Monreal Gómez, 1997).

La presencia de los giros ciclónicos está asociada con el desprendimiento del gran giro anticiclónico, pues antes de desprenderse el giro anticiclónico, se forman giros ciclónicos en la zona entre el Banco de Campeche y la plataforma de Florida (Vukovich y Maul, 1985). El giro ciclónico de la Bahía de Campeche no solo está asociado al desprendimiento del giro anticiclónico, pues también se atribuye su existencia al movimiento del agua en la surgencia de Yucatán, ya que esta corriente debe de conservar su momento angular (Cochrane, 1963). También los giros ciclónicos pueden ser producidos por los anticiclónicos, al encontrarse estos últimos con la costa (Smith, 1986; Hurlburt y Thompson, 1980).

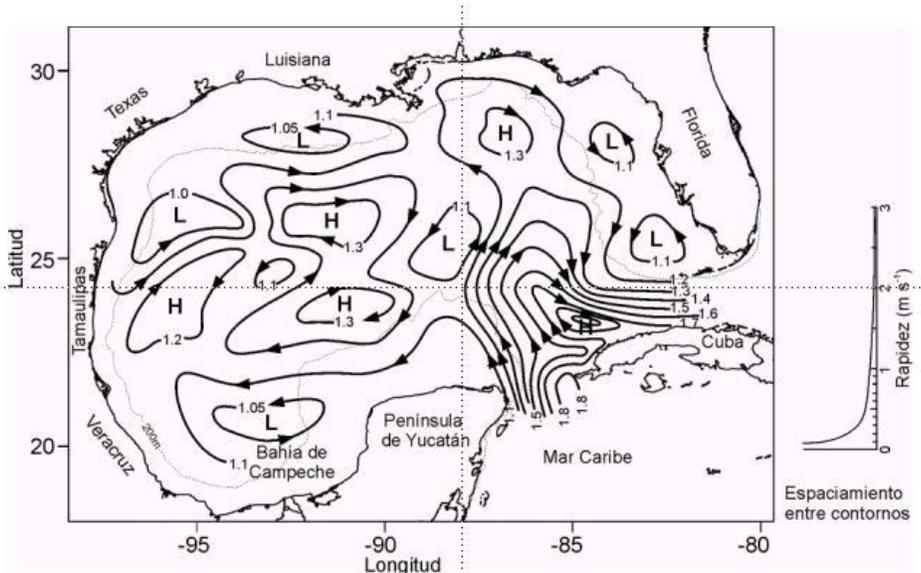


Figura 73. Circulación inferida de la topografía dinámica de la superficie del mar relativa a 1000 db (Monreal-Gómez et al., 2004).

b) Marea

En el Golfo de México las mareas son generalmente del tipo diurno (Figura 74), encontrándose básicamente tres tipos, una con características diurnas, otra del tipo mixta con dominancia diurna y la última de tipo mixta con dominancia semi-diurna.

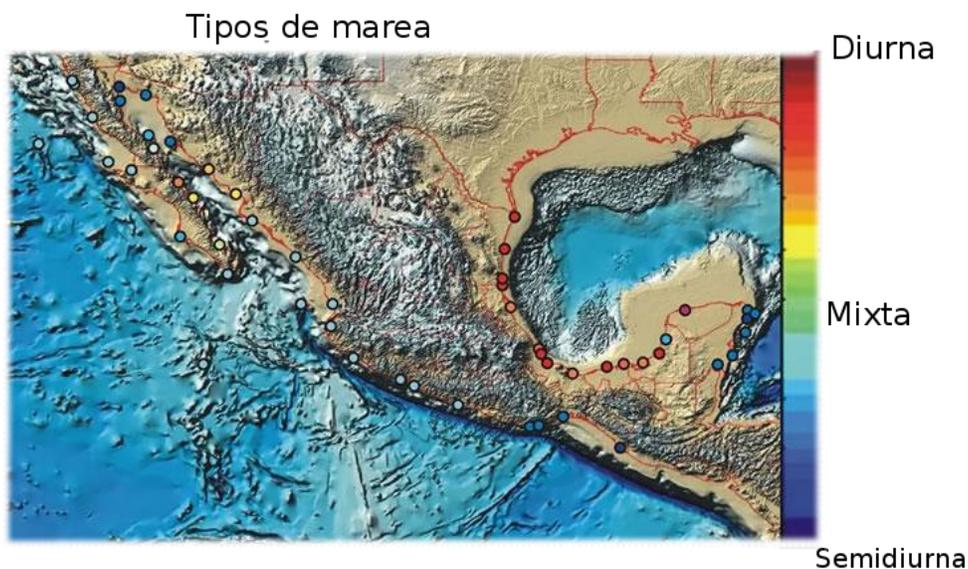


Figura 74. Mareas semi-diurnas, diurnas y mixtas en México (Mareográfico, UNAM).

En la Bahía de Campeche se presentan dos tipos de marea, la marea diurna que se localiza desde el noreste de Yucatán hasta Coatzacoalcos y marea mixta con dominancia diurna que se encuentra desde el noroeste de Coatzacoalcos hasta un poco al norte de Matamoros. Existen algunas áreas donde la marea es semi-diurna, como por ejemplo frente a Campeche (Salas de León y Monreal Gómez, 1997). Las mareas en el Golfo de México presentan amplitudes pequeñas. Sin embargo, el desnivel de la superficie del mar genera transportes de masa relativamente fuertes, los cuales juegan un papel importante en el transporte de material en suspensión (Salas de León, Monreal Gómez, 1997).

En términos generales, se puede definir al ascenso máximo del oleaje como la extensión vertical máxima a la que llegan las olas sobre la playa, por encima del nivel medio del mar (NMM). Los valores de ascenso máximo dependen de la pendiente de una playa, rugosidad, porosidad y la existencia o no de una berma o duna, además de la geometría del oleaje incidente (Shore Protection Manual, 1984).

Se define a la marea de tormenta, como el incremento en el nivel medio del mar cerca de la línea de costa que es resultado del gradiente de presiones generado por el viento (ej. huracanes o frentes fríos) sobre la costa.

A pesar de que en el Golfo de México, el rango de marea es micro-mareal, es importante señalar que el fenómeno asociado a la marea de tormenta en Tabasco, puede producir inundación severa en zonas bajas cerca de la costa, tal y como se ha observado en la isla de Andres García en la boca lagunar de Mecoacán.

c) Registros del ADCP

El patrón de corrientes frente a campo Tizón, desde la costa hasta aproximadamente los 400m, mostró direcciones paralelas a la costa en dirección noreste. Aproximadamente, 1 km al noreste de las instalaciones de campo Tizón se genera una zona de convergencia entre las corrientes litorales y las corrientes producto de la descarga del río por el canal la Elena.

El flujo del río, al ser más intenso, domina el patrón de circulación en esta zona, lo que hace que las corrientes litorales cambien la dirección hacia el oeste- suroeste. Este patrón mantuvo el mismo comportamiento en marea y en marea baja, sólo que durante marea baja la zona de convergencia se traslada ligeramente hacia el suroeste.

Uno de los factores causantes del continuo retroceso de la línea de costa es el esfuerzo cortante o de cizalla de las corrientes en esta zona, los cuales conjuntamente con los procesos de remoción causados por el oleaje provocan que el sedimento emigre y sea acarreado hacia la zona marina por el flujo del río.

Las corrientes generadas por el oleaje de tormenta muestran una tendencia dominante de circulación hacia el noroeste (Figura 75 y 76) con zonas de convergencia próximas a la costa, causantes del acarreo de material hacia la zona marina. Este oleaje es el responsable de la mayor cantidad de transporte de sedimentos y de la erosión de la parte “alta” de la playa con depósito del sedimento en la parte más sumergida. Esto significa que si no existe un aporte de sedimentos capaz de retenerse, la parte alta de la playa continuará sufriendo la erosión. Por otro lado, en presencia de una secuencia de fuertes tormentas y la ausencia de períodos de calma, se generaría una pérdida de sedimento que puede necesitar muchos años para ser recuperado.

Con la presencia de eventos climáticos extraordinarios las condiciones de las variables oceanográficas son alteradas, incrementando su magnitud y cambiando su dirección. Durante el muestreo correspondiente a septiembre de 2011 las condiciones oceanográficas fueron afectadas en ambos sitios por el paso de la tormenta tropical “Nate”, con ocurrencia entre los días 6 y 12 de septiembre.

Las corrientes durante la ocurrencia de este evento cambiaron el sentido hacia el noreste alcanzando velocidades máximas de 1 ms⁻¹, mientras que el oleaje registrado tuvo una dirección hacia el sureste en los dos sitios, con una altura significativa de 3 m para Campo Tizón y de 4.5 m en Sánchez Magallanes.

En el muestreo correspondiente a noviembre estas condiciones oceanográficas también fueron afectadas por la presencia de dos nortes, el primero entre los días 10 y 12 y el segundo entre el 17 y 18 de noviembre. En este periodo la altura significativa del oleaje cuando ocurrió el primer evento fue de 3.5 m para vientos de 15 ms-1 y para el segundo evento alcanzó valores de 2 m con vientos de 7 ms-1; la dirección del oleaje fue hacia el sureste, coincidente con la dirección del viento. Las corrientes alcanzaron velocidades de 1 ms-1 y de 0.1 y 0.25 ms-1, para el primero y segundo norte, respectivamente, con dirección suroeste.

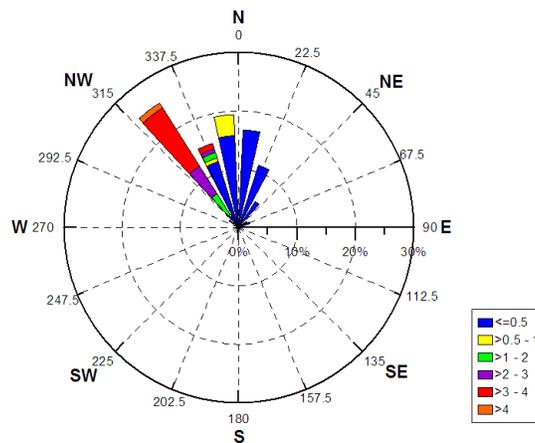


Figura 75. Rosa de oleaje correspondiente al mes de septiembre de 2011 frente a Sánchez Magallanes.

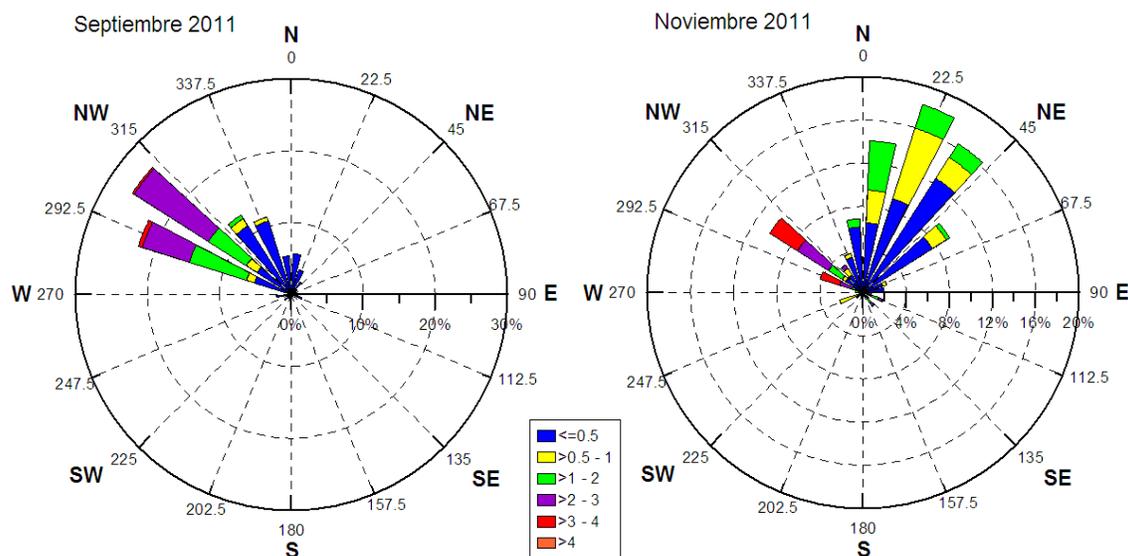


Figura 76. Rosas de oleaje correspondientes al mes de septiembre y noviembre de 2011 frente a Tizón.

En condiciones de calma, generalmente, en ambos sitios las velocidades de corriente presentaron valores entre 0.1 y 0.25 ms⁻¹, con un flujo neto paralelo a la costa hacia el sur y sureste.

d) Análisis de refracción de oleaje

Para el análisis de refracción se tomaron en cuenta las direcciones de oleaje del norte (N), nor-noreste (NNE) y nor-noroeste (NNW), debido a que son las más frecuentes y que llegan de manera directa a la línea de costa.

Se consideraron periodos de oleaje bajos de 4 y 7 segundos, que son los más frecuentes en el área de estudio; sin embargo, también se consideraron periodos de mediana y alta energía de 12 y 16 segundos, que se presentan durante la temporada de tormentas tropicales, huracanes de baja y mediana intensidad, y nortes. Finalmente se consideró el periodo de 20 segundos que podría presentarse durante los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

La batimetría considerada para el programa RED SEA se obtuvo de la información satelital generada por Smith y Sandwell, 1997, que se muestra en la Figura 77, donde se observa una mayor profundidad en la zona frente a Mecoacán.

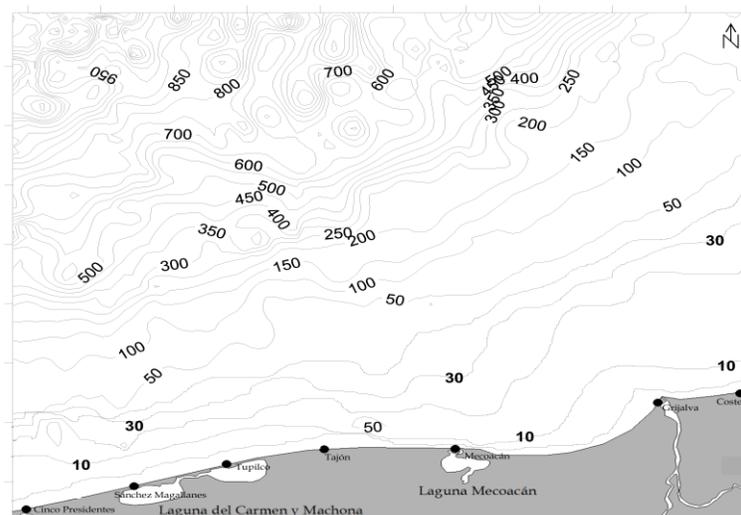


Figura 77. Batimetría de la zona.

Las ortogonales mostradas en las siguientes figuras (Figura 78 a 92) son líneas perpendiculares a la cresta de la ola y extendidas en dirección que avanza la ola. Para el oleaje proveniente del norte con el periodo más bajo (Figura 78), se observó una mayor concentración de energía para los sitios de Grijalva, Tupilco y Sánchez Magallanes.

Conforme aumenta el periodo, el oleaje presentó mayor concentración de energía frente a la Laguna Mecoacán. Este sitio presenta una batimetría muy diferente a la de los demás sitios, caracterizado por una pendiente abrupta. Por esta razón, el oleaje de 4 segundos llega a la costa sin cambios en su dirección; sin embargo, conforme aumenta el periodo se presenta el fenómeno de refracción de tal manera que se produce un punto de concentración de alta energía frente a Mecoacán, además de otros sitios como Campo Tajón (Figuras 79 a 82).

Contrario a lo observado frente a Laguna Mecoacán y Campo Tajón, el oleaje del norte con periodos mayores a 7 segundos no incide a la costa de los demás sitios debido a la poca profundidad de éstos. Sin embargo, se observan concentraciones de energía en Sánchez Magallanes, Tupilco y Grijalva pero no en la línea de costa, sino hacia mar adentro (Figuras 79 a 82). Existen puntos que presentan una dispersión de energía, como Cinco Presidentes y Campo Costero, así como en la zona comprendida entre cada uno de los sitios.

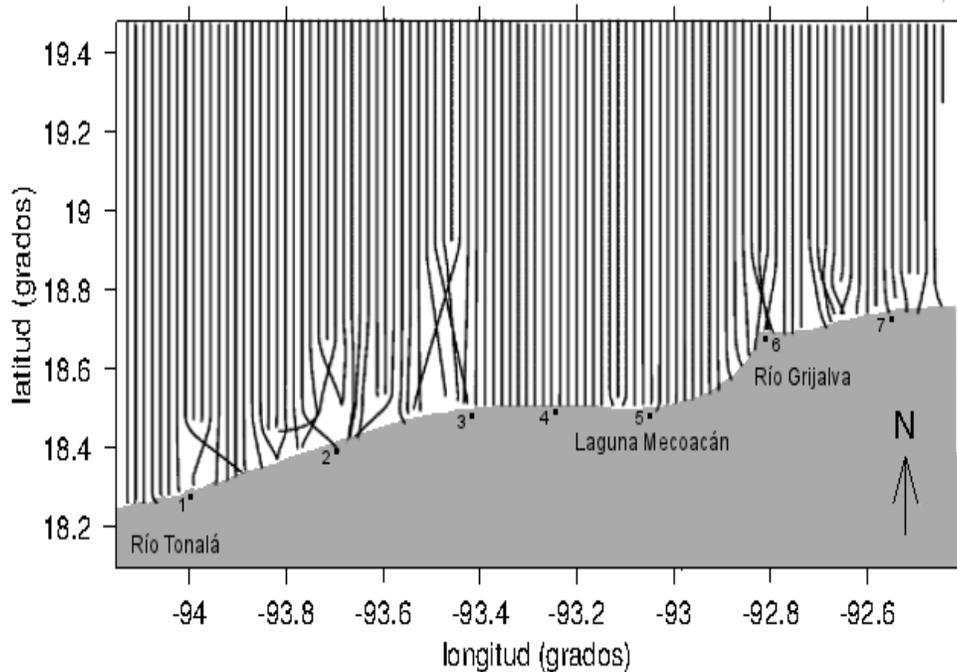


Figura 78. Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 4 segundos.

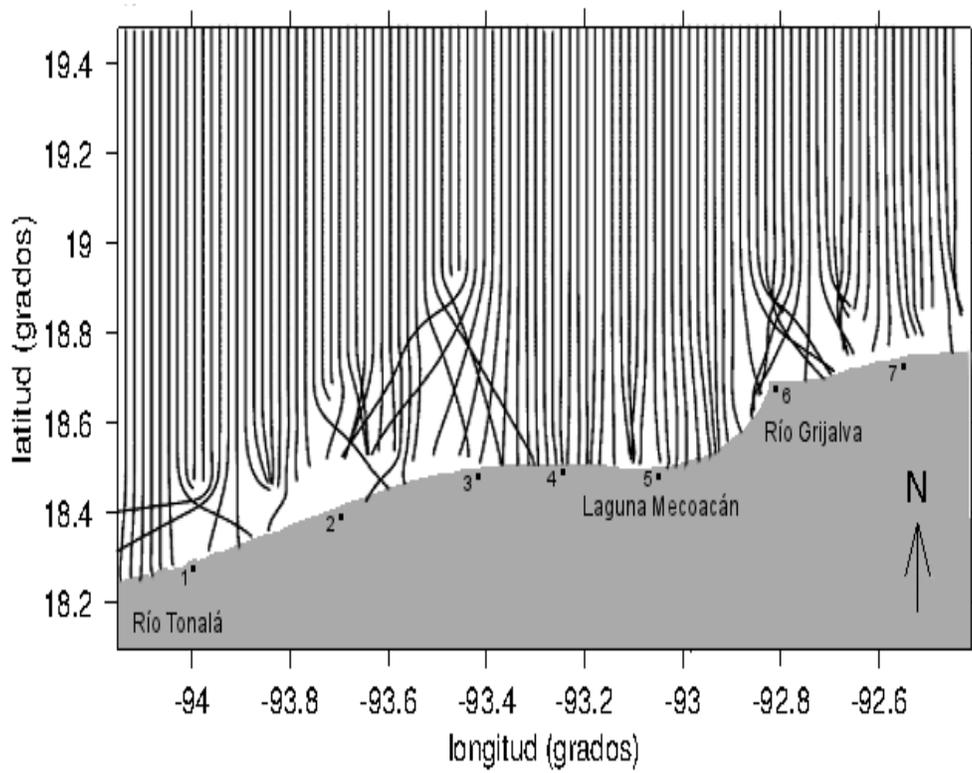


Figura 79. Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 7 segundos.

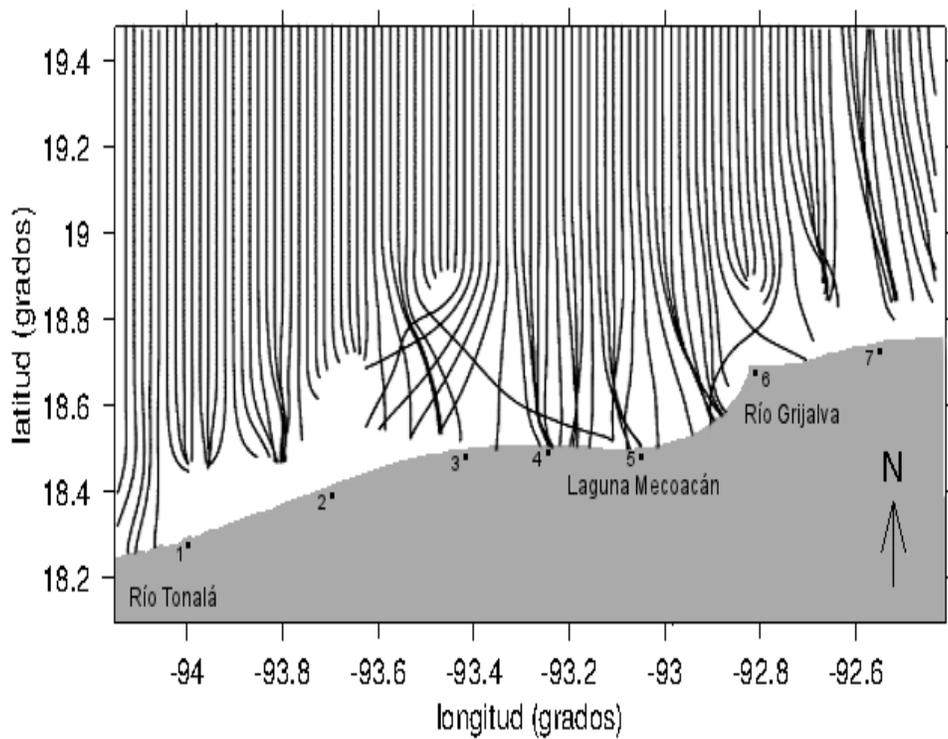


Figura 80. Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 12 segundos.

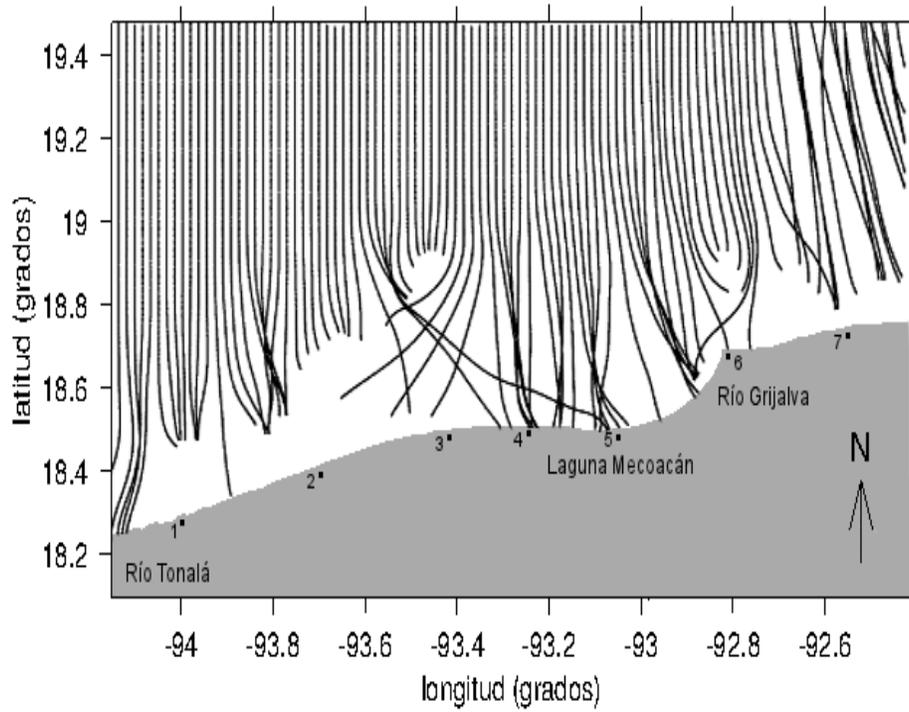


Figura 81. Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 16 segundos.

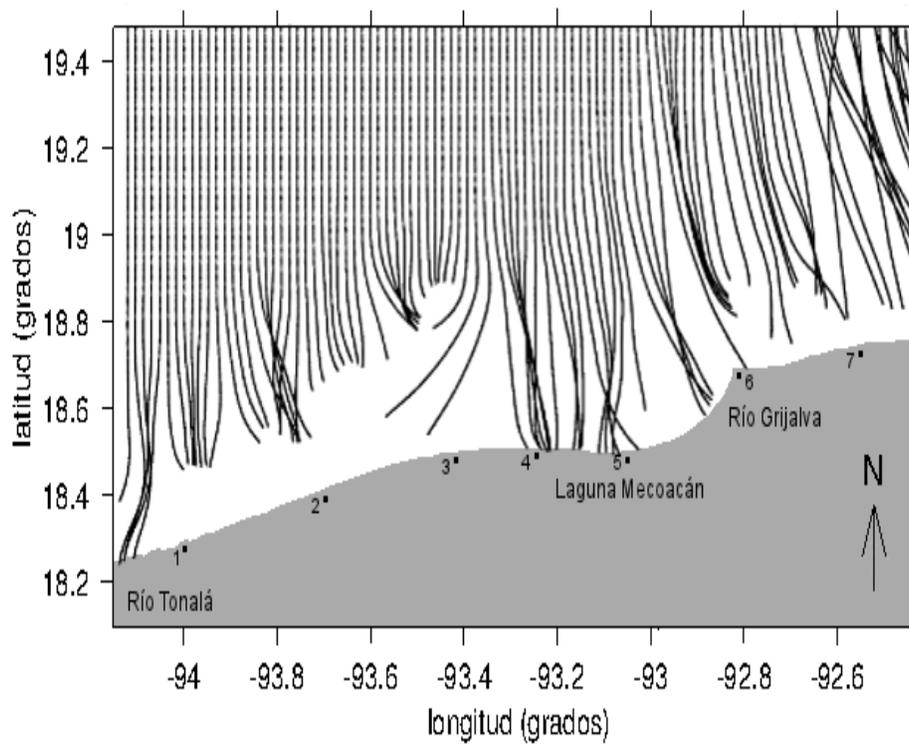


Figura 82. Ortogonales de oleaje proveniente del norte con periodo de 20 segundos

Para el periodo de 4 segundos del nor-noreste existe una concentración de energía en los sitios de Cinco Presidentes, Sánchez Magallanes y Barra de Tupilco (Figura 82), al igual que para el periodo de 7 segundos, que presenta además concentración en el sitio de Grijalva (Figura 83).

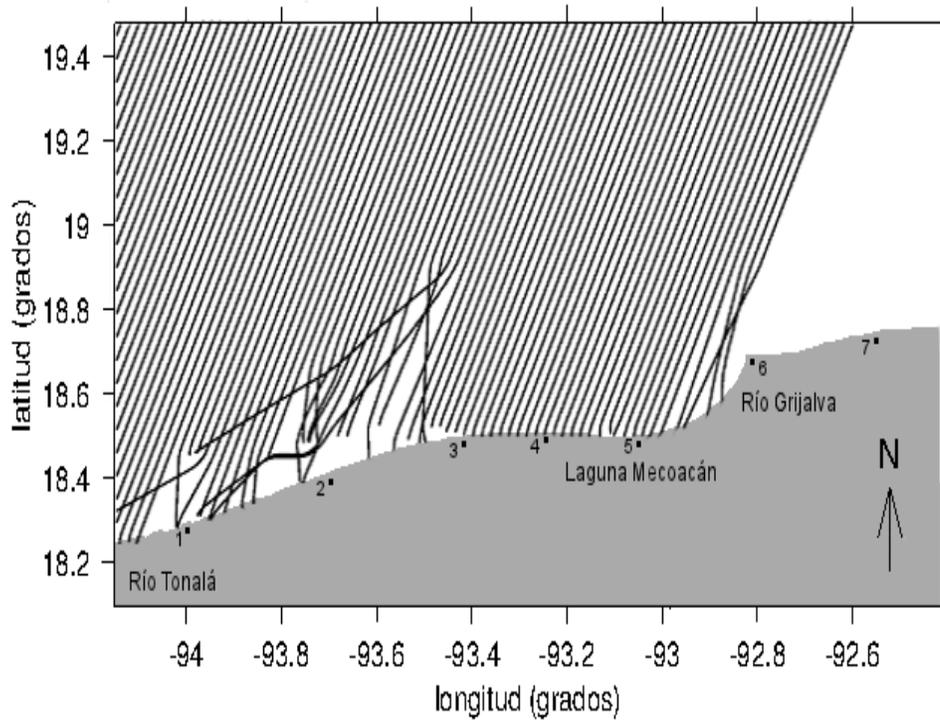


Figura 83. Ortogonales de proveniente del nor-noreste con periodo de 4 segundos.

El oleaje con periodos de 12, 16 y 20 segundos no llega a la costa de Río Tonalá y Sánchez Magallanes, donde la batimetría presenta una menor profundidad (Figuras 85 a 87). Se observó que el sitio frente a la Laguna de Mecoacán recibe la mayor concentración de energía con oleaje de periodos medios y altos.

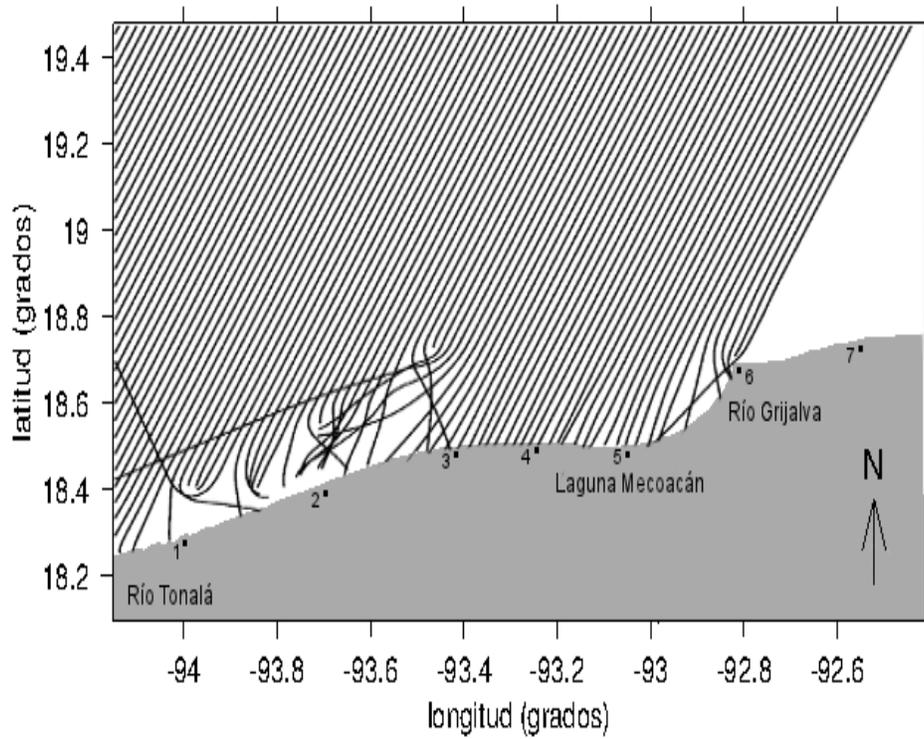


Figura 84. Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noreste con periodo de 7 segundos.

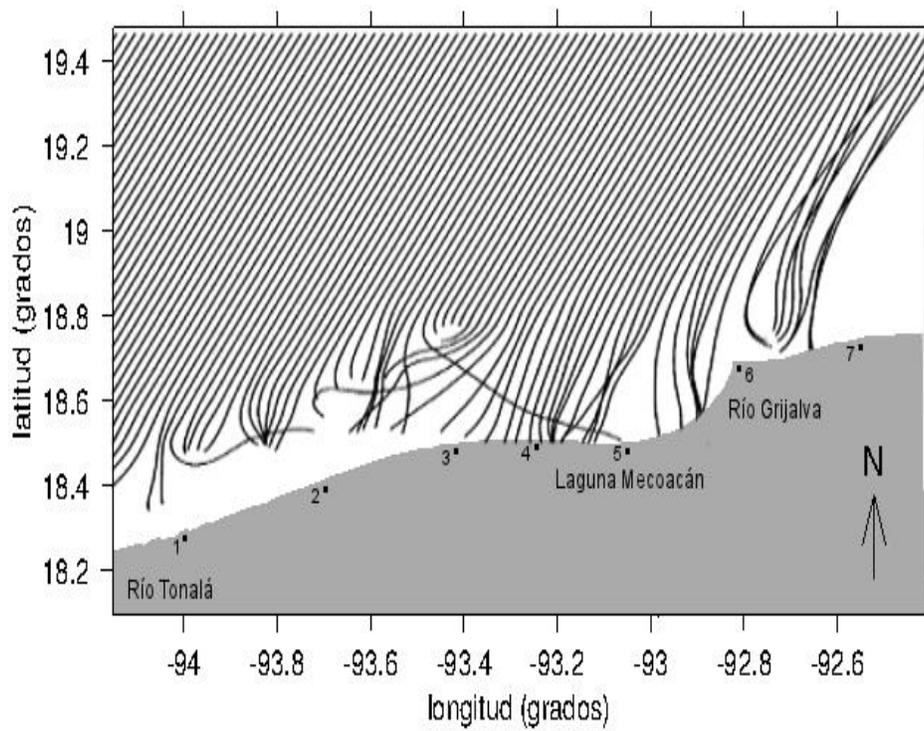


Figura 85. Ortogonales de oleaje en proveniente del nor-noreste con periodo de 12 segundos.

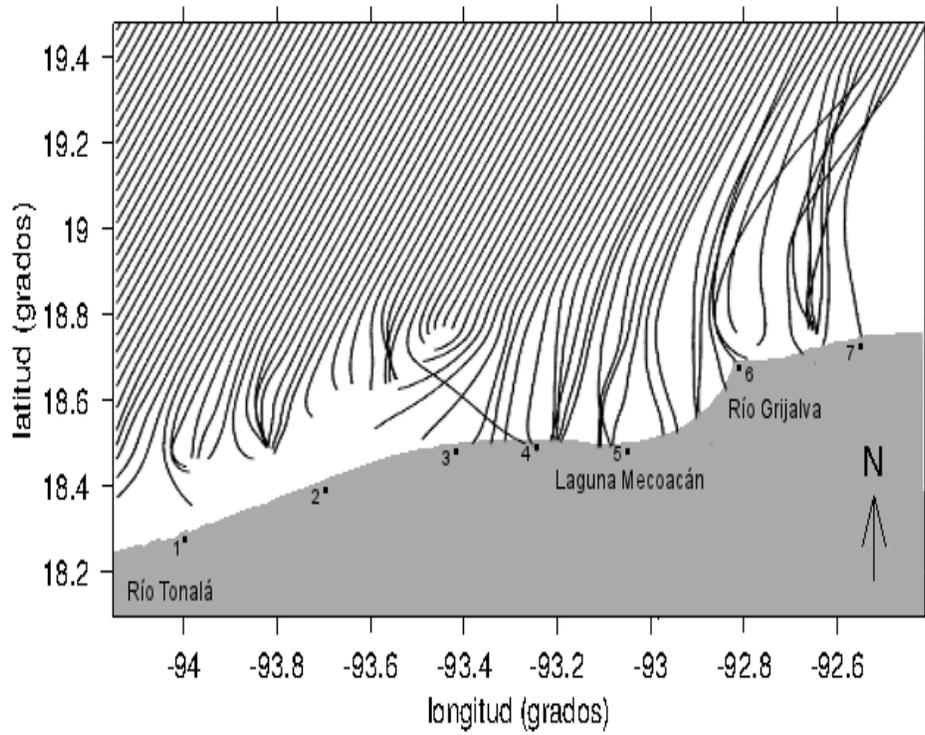


Figura 86. Ortogonales de proveniente del nor-noreste con periodo de 16 segundos.

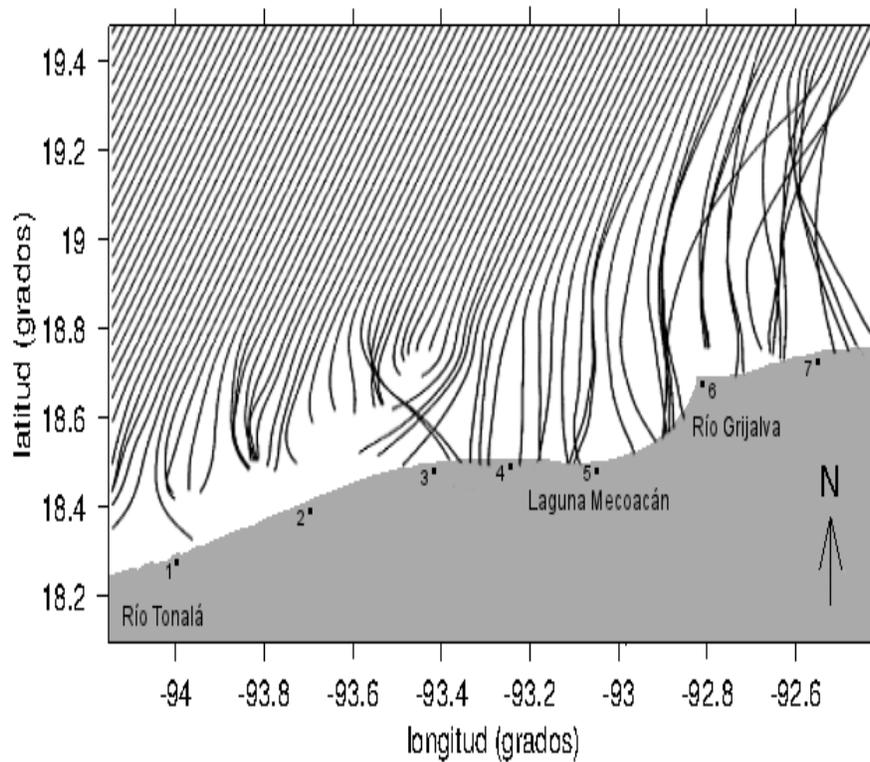


Figura 87. Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noreste con periodo de 20 segundos.

El oleaje del nor-noroeste de 4 segundos afecta principalmente a Barra de Tupilco y Río Grijalva, observándose una mayor concentración de energía para estos sitios (Figura 88).

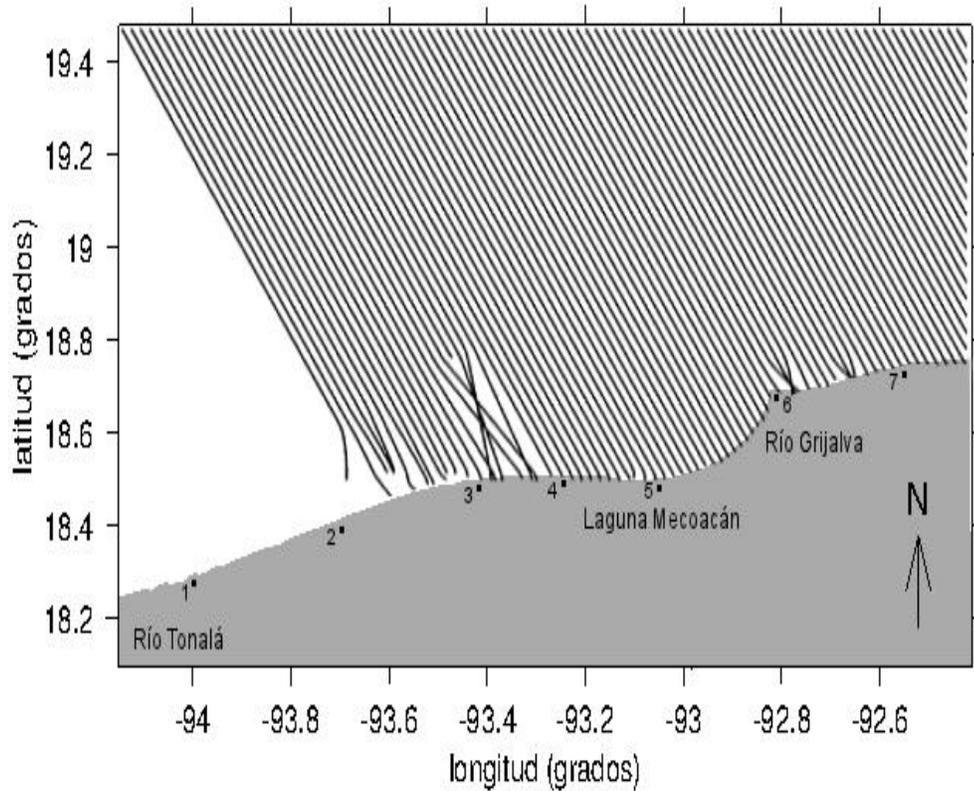


Figura 88. Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 4 segundos.

Al aumentar el periodo del oleaje de incidencia, se observó una elevada concentración de energía principalmente frente a la Laguna Mecoacán y en la playa de Campo Costero (Figuras 89 a 92).

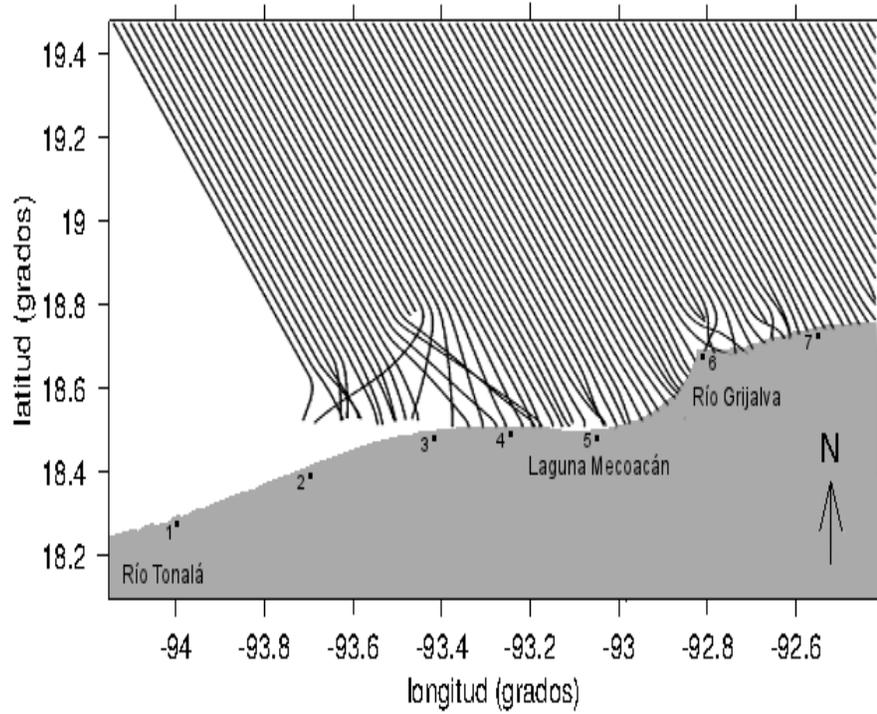


Figura 89. Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 7 segundos.

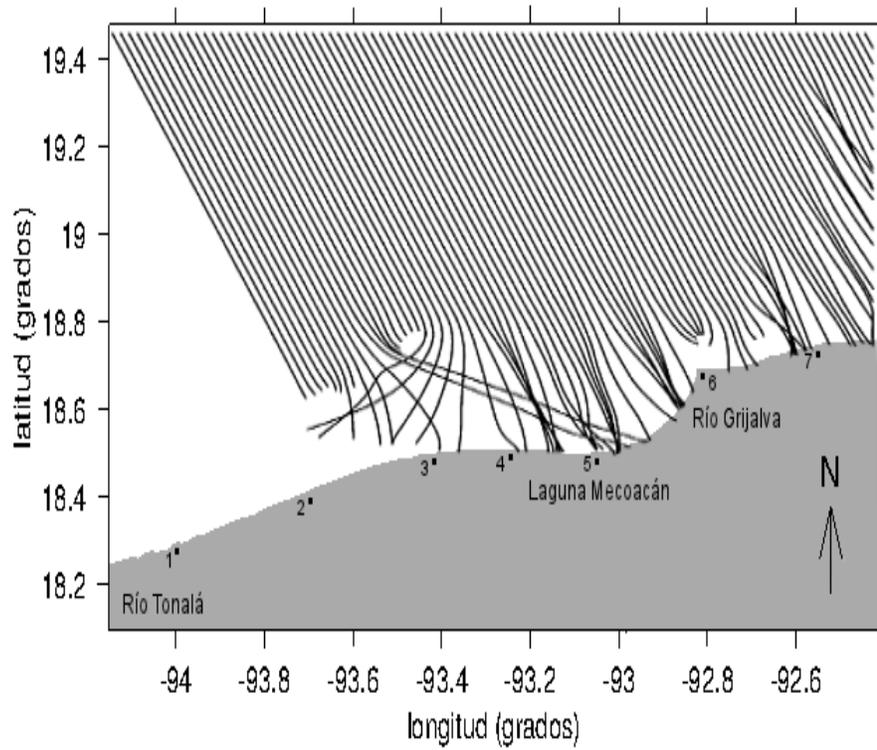


Figura 90. Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 12 segundos.

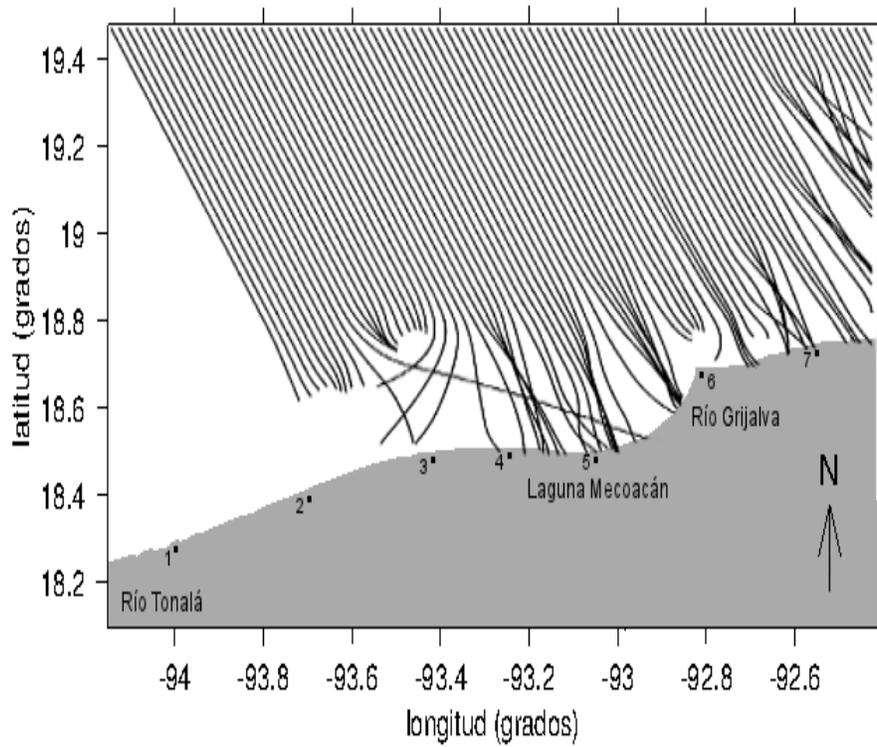


Figura 91. Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 16 segundos.

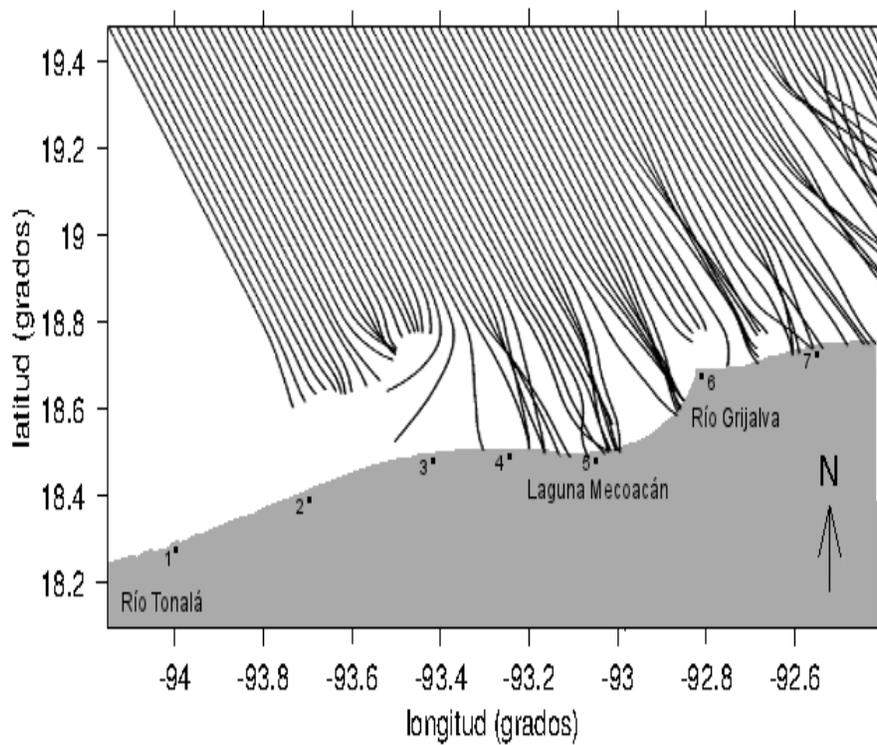


Figura 92. Ortogonales de oleaje proveniente del nor-noroeste con periodo de 20 segundos.

Los diagramas de refracción de oleaje mostraron una mayor concentración de energía en los sitios que se han considerados como críticos por su dinámica y por su tasa de erosión. En los sitios considerados estables como Campo Tajón, se observó que con algunos periodos de oleaje, sobre todo con los periodos de energía media, presentan una concentración de energía.

El oleaje frente a la Laguna Mecoacán presenta una concentración de energía alta para periodos de 7 segundos en adelante. Esto significa que en caso de nortes y huracanes este sitio es el que más puede resultar vulnerable en cuanto a oleaje.

De manera contraria, en el punto de Cinco Presidentes se encuentra una zona de dispersión de energía, además de que la batimetría presenta profundidades someras y con pendiente suave de tal modo que el oleaje de periodos altos no llega a la línea de costa.

La zona de Sánchez Magallanes presenta una mayor concentración de energía con oleaje incidente del norte y del nor-noroeste de periodos cortos, debido a la batimetría de la zona, al igual que Barra de Tupilco y la desembocadura del Grijalva.

Al comparar los diagramas de refracción con los distintos periodos y direcciones de oleaje, se observó que el oleaje que presenta una alta concentración de energía en más sitios es el proveniente del norte, el cual, con periodos cortos puede afectar las zonas de Sánchez Magallanes, Tupilco y Grijalva, y con periodos largos afecta la zona de Laguna Mecoacán y Campo Tajón.

3.5. Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo por zona

a) Geología-geomorfología (GG)

Cinco Presidentes, Sánchez Magallanes, Tajón, Grijalva y Campo Costero presentaron un nivel de peligro de 4 (Tabla 17), que corresponde a playas extensas adosadas a planicies sedimentarias litorales poco elevadas. Tupilco y Mecoacán mostraron un nivel 5, por ser formaciones de islas-barrera y zonas que protegen formaciones de marismas fluvio-mareales.

Tabla 17. Nivel en geomorfología.

Variables	Cinco Presidentes	Sánchez Magallanes	Tupilco	Tajón	Mecoacán	Grijalva	Campo Costero
a. Geomorfología	4	4	5	4	5	4	4

b) Tasa de erosión (m/año) (Tero)

Según los resultados sobre de tasa de erosión de los sitios en el análisis histórico, Cinco Presidentes presenta una tasa de erosión moderada de -0.4 m/año, mientras que los demás sitios mostraron una tasa de erosión muy alta, de más de -4 m/año (Tabla 18). Para el caso de Sánchez Magallanes se consideró la tasa de erosión calculada durante el 2010 y 2011, debido a que los datos del análisis histórico corresponden al promedio de los dos márgenes, en este análisis se considera únicamente el margen oeste.

Tabla 18. Nivel en tasa de erosión.

Variables	Cinco Presidentes	Sánchez Magallanes oeste	Tupilco	Tajón	Mecoacán	Grijalva oeste	Campo Costero
b. Tasa de erosión	3	5	5	5	5	5	5

c) Índice topográfico (Itop)

Cinco Presidentes, Sánchez Magallanes y Tajón presentaron un índice topográfico de 2, mientras que Tupilco, Mecoacán, Grijalva y Costero presentaron un índice topográfico de 3 (Tabla 19), por lo que para todos los sitios esta variable presenta un peligro moderado.

Tabla 19. Nivel en índice topográfico.

Variables	Cinco Presidentes	Sánchez Magallanes oeste	Tupilco	Tajón	Mecoacán	Grijalva oeste	Campo Costero
c. Índice topográfico	2	2	3	2	3	3	3

d) Cálculo y clasificación de la altura de oleaje significativo medio (HS)

Cinco Presidentes, Barra de Tupilco, Tajón y Costero presentaron una altura de oleaje entre 0.95 y 1.15 m, lo que los pone en un nivel 4 por oleaje significativo medio (Tabla 20), mientras que Sánchez Magallanes, Mecoacán y Grijalva presentaron un oleaje de entre de más de 1.05 metros, por lo que estas zonas son que corren un nivel de peligro muy alto por oleaje.

Tabla 20. Nivel en oleaje significativo medio.

Variables	Cinco Presidentes	Sánchez Magallanes oeste	Tupilco	Tajón	Mecoacán	Grijalva oeste	Campo Costero
d. Oleaje medio	4	5	4	4	5	5	4

e) Cálculo y clasificación de la Tasa de cambio del nivel relativo del mar (LEV)

Cinco Presidentes, Tupilco, Tajón, Grijalva y Campo Costero presentaron una moderada tasa de cambio con un nivel de 3, entre los 2.5 y 3 mm/año (Tabla 21). Sánchez Magallanes y Mecoacán presentaron un nivel 4, que es alto, con una tasa de cambio de entre 3.1 y 3.5 mm/año.

Tabla 21. Nivel en tasa de cambio del nivel del mar.

Variables	Cinco Presidentes	Sánchez Magallanes oeste	Tupilco	Tajón	Mecoacán	Grijalva oeste	Campo Costero
e. Tasa de cambio del nivel del mar	3	4	3	3	4	3	3

f) Rango mareal medio (TID).

Se consideró el valor de 0.149 m como constante para la zona en estudio (Tabla 22) y su calificación como muy alta para todos los sitios.

Tabla 22. Nivel en rango mareal.

Variables	Cinco Presidentes	Sánchez Magallanes oeste	Tupilco	Tajón	Mecoacán	Grijalva oeste	Campo Costero
f. Rango mareal medio	5	5	5	5	5	5	5

Al aplicar la fórmula para obtener el CVI se obtuvieron los resultados de la Tabla 23. Los rangos para la clasificación de vulnerabilidad total calculada se muestran en la Tabla 24.

Tabla 23. Resultados de la integración de los valores obtenidos

Variables	Cinco Presidentes	Sánchez Magallanes oeste	Tupilco	Tajón	Mecoacán	Grijalva oeste	Campo Costero
a. Geomorfología	4	4	5	4	5	4	4
b. Tasa de erosión	3	5	5	5	5	5	5
c. Índice topográfico	2	2	3	2	3	3	3
d. Oleaje medio	4	5	4	4	5	5	4
e. Tasa de cambio del nivel del mar	3	4	3	3	4	3	3
g. Rango mareal medio	5	5	5	5	5	5	5
CVI	15.49	25.81	27.39	20.00	35.36	27.39	24.49

Tabla 24. Clasificación del CVI.

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
Vulnerabilidad clasificada	1	2	3	4	5
Valor del CVI	(10.95, 15.49]	(15.49, 20]	(20, 26.34]	(26.35, 35.36]	(mayor a 35.36)

De acuerdo con esta clasificación se tiene el índice de vulnerabilidad en cada sitio, según la clasificación de vulnerabilidad relativa de la tabla anterior, cuyo resultado se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Índice de vulnerabilidad por sitio.

SITIO	CVI	VULNERABILIDAD
Cinco Presidentes	15.49	1
Sánchez Magallanes	25.81	4
Tupilco	27.39	4
Tajón	20	2
Mecoacán	35.36	5
Grijalva	27.39	4
Campo Costero	24.49	3

El sitio que presenta una mayor vulnerabilidad es Mecoacán, que se encuentra en el límite entre una vulnerabilidad alta y muy alta, sin embargo para términos prácticos y por seguridad debe considerarse en un nivel muy alto de vulnerabilidad. Los sitios que se han identificado con vulnerabilidad alta son Sánchez Magallanes, Tupilco y Grijalva; Campo Costero se encuentra con vulnerabilidad moderada, Campo Tajón y Sánchez Magallanes con vulnerabilidad baja, y Campo Cinco Presidentes con una vulnerabilidad muy baja.

El concepto de vulnerabilidad utilizado en este índice no corresponde con el asociado a la evaluación de riesgos, ya que estos conllevan el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno (peligrosidad natural) multiplicado por su “vulnerabilidad” (exposición X evaluación de daños). Con este índice se intenta evaluar, en una primera aproximación, la sensibilidad de cada sector costero ante una potencial subida del nivel del mar y su capacidad de adaptación.

Evaluación de riesgo

El riesgo se calculó como la multiplicación del peligro natural y la vulnerabilidad.

El peligro natural o amenaza, es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno determinado; en este caso se considera que la mayor amenaza de la zona es la erosión y el oleaje. Para el peligro a la erosión (Tabla 26), se consideró la ponderación de la tasa de erosión anual como indicador de esta amenaza. Para la amenaza por oleaje (Tabla 27), se consideró la ponderación de la altura media de oleaje.

Tabla 26. Nivel de peligro por erosión.

SITIO	VULNERABILIDAD	AMENAZA DE EROSIÓN	RIESGO POR EROSIÓN
Cinco Presidentes	1	3	3
Sánchez Magallanes oeste	4	5	20
Tupilco	4	5	20
Tajón	2	5	10
Mecoacán	5	5	25
Grijalva oeste	4	5	20
Campo Costero	3	5	15

Tabla 27. Nivel de peligro por oleaje.

SITIO	VULNERABILIDAD	AMENAZA DE OLEAJE	RIESGO POR OLEAJE
Cinco Presidentes	1	4	4
Sánchez Magallanes oeste	4	5	20
Tupilco	4	4	16
Tajón	2	4	8
Mecoacán	5	5	25
Grijalva oeste	4	5	20
Campo Costero	3	4	12

Los sitios más amenazados por la erosión y al oleaje incidente son Mecoacán, Sánchez Magallanes, Grijalva y Tupilco. Las zonas con menor riesgo son Campo Costero, Tajón y Cinco Presidentes.

Tabla 28. Clasificación del riesgo.

VARIABLE	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
Riesgo clasificado	1	2	3	4	5
Valor del riesgo calculado	1-5	6-10	11-15	16-20	20-25

Se observó que la zona con mayor riesgo es Mecoacán (Tabla 29). Esta zona se encuentra prácticamente expuesta al oleaje de alta energía de los nortes, lo que provoca que también sea amenazada por la erosión causada por este fenómeno, además de tormentas tropicales y huracanes.

Tabla 29. Nivel de riesgo.

SITIO	RIESGO POR EROSIÓN	RIESGO POR OLEAJE	CATEGORÍA
Cinco Presidentes	1	1	Muy bajo
Sánchez Magallanes	4	4	Alto
Tupilco	4	4	Alto
Tajón	2	2	Bajo
Mecoacán	5	5	Muy alto
Grijalva	4	4	Alto
Campo Costero	3	3	Moderado

Sánchez Magallanes, Tupilco y Grijalva mostraron un alto nivel de riesgo debido a la alta tasa de erosión característica de estos sitios, así como al ángulo de la incidencia de oleaje que prevalece la mayor parte del año. Campo Costero, Tajón y Cinco Presidentes presentan un riesgo moderado, bajo, y muy bajo, respectivamente.

Al considerar las condiciones morfológicas descritas en el área de estudio, la zona litoral del estado de Tabasco está expuesta por un lado a condiciones adversas por las tendencias en el ascenso del nivel medio del mar, y por otro, a los escurrimientos fluviales y el bajo relieve de la planicie de inundación. Al respecto, se considera que los sitios que presentan mayor vulnerabilidad y riesgo son (Figura 92):

a) Mecoacán, debido a la batimetría abrupta de la zona, este sitio presenta un oleaje con mayor concentración de energía durante los nortes así como una alta tasa de erosión, por un lado, y podría presentar inundaciones por parte de la Laguna Mecoacán, además de que en su extremo este, la ubicación de las instalaciones sobre las antiguas dunas es sumamente desfavorable causando alteraciones a la dinámica costera. En este caso la ruptura del oleaje se produce sobre las estructuras causando movimientos reflectivos similares a los que se presentan en los acantilados, aumentando los procesos de erosión aledaños a las instalaciones.

b) Sánchez Magallanes y Tupilco, donde la barrera arenosa que separa las lagunas del océano está siendo afectada por la erosión de la dinámica costera.

c) El margen oeste del Grijalva, donde la interrupción y desvío del transporte de sedimentos se debe a la construcción de la escollera ubicada al norte del canal La Elena, además cabe considerar la textura fina de los sedimentos que aporta el Río Grijalva, no son propicios para la generación de playas por su fácil remoción.

d) Campo Costero se ve afectado por un fuerte proceso erosivo que es causado de forma natural por el flujo del río San Pedro San Pablo, ya que este interrumpe la circulación de los sedimentos litorales evitando su posterior depósito en la margen contraria (oeste). Al interrumpirse el aporte de sedimentos en dicha margen, el oleaje ha venido cambiando la pendiente del fondo marino y como consecuencia se incrementa su energía en la zona de rompiente. Uno de los factores más importantes para que se presente este fenómeno es la disminución en el tamaño de los sedimentos aportados por el río, los cuales son dispersados y depositados en otras zonas de menor energía.

e) Tajón y Cinco Presidentes se consideran dentro de las categorías de vulnerabilidad media y muy baja.

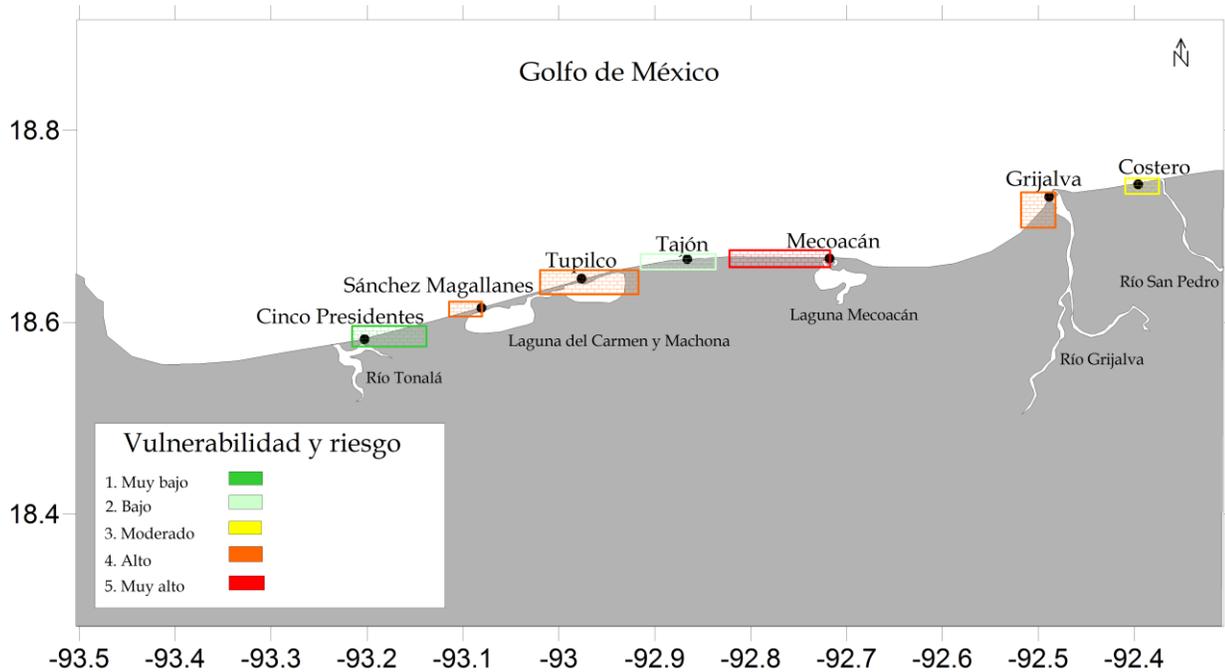


Figura 93. Nivel de vulnerabilidad y riesgo en el litoral de Tabasco.

En lo que respecta a los asentamientos humanos, los sitios considerados con mayor riesgo son Tupilco y Sánchez Magallanes, así como algunas construcciones aisladas. Dentro de las obras civiles con mayor afectación por los procesos erosivos se considera la carretera federal Paraíso-Sánchez Magallanes, la cual se encuentra interrumpida en el tramo que va de Barra Tupilco a Sánchez Magallanes, y el faro localizado en la misma zona. Por otra parte, los ecosistemas que pueden sufrir un mayor impacto, son los manglares localizados en las inmediaciones del río San Pedro San Pablo y la barra de Carmen y Machona.

De acuerdo con los índices obtenidos se tienen las siguientes categorías:

Categoría muy baja. Caracterizada por sitios acumulativos o estables, con pendientes de aproximadamente 2% y presencia de dunas y arenas medias, y con oleaje menor a 1 m.

Categoría baja. Comprende los sitios con menor tasa de erosión, con pendientes de 4% y con presencia de dunas. Presentan arenas medias a gruesas y con oleajes de 1 m. Los valores de marea media son iguales en todo el litoral estudiado y la tasa de cambio en el nivel relativo del mar para esta categoría varía de 2.5 a 3 mm al año.

Categoría media. Contempla los sitios en donde predomina actualmente una tasa de erosión moderada, existen pendientes entre 4 y 8% y predominan oleajes moderados de 1 m y su tasa de cambio del nivel del mar varía entre 3 y 3.5 mm al año.

Categoría alta. Los sitios contemplados dentro de esta categoría presentan erosión que va de moderada a alta, presentando pendientes comprendidas entre 4 y 8%. Con respecto al oleaje y la tasa de cambio del nivel del mar son similares a las categorías anteriores.

Categoría muy alta. En este caso se encuentran las áreas que presentan una tasa de erosión histórica muy significativa, de manera que se observa un retroceso evidente en la línea de costa. La pendiente en estos sitios es similar a la categoría anterior. En general el oleaje es mayor a un metro y la tasa de cambio en el nivel del mar se conserva igual que en las otras categorías.

3.6. Análisis del impacto antropogénico

A partir de las imágenes de satélite y de recorridos de campo se observaron numerosas construcciones de defensa improvisadas por sus habitantes (frentes de palizadas y de sacos de arena) para amortiguar los efectos del oleaje y reducir la erosión de las playas, al igual que espigones construidos para frenar la erosión en algunos de los sitios tales como Sánchez Magallanes, Mecoacán y Grijalva; sin embargo estas construcciones no han sido suficientes para proteger las playas y las poblaciones en ellas y contrariamente han sido responsables de una alteración importante en la dinámica costera.

En cuanto a los espigones y escolleras observados debe considerarse que la construcción de obras civiles en la costa produce cambios que afectan las tasas de suministro o de pérdida del transporte litoral y generan modificaciones en la línea costera hasta cuando se alcanza una nueva configuración estable. Debido a que estos cambios no se observan de inmediato porque se ocultan entre las fluctuaciones a corto plazo, siempre tomará un tiempo largo el poder demostrar que los cambios hechos por el hombre son nocivos para la costa.

En el caso de Sánchez Magallanes, en la Figura 94 se observa cómo se ha construido una escollera en ambos márgenes de la boca; se puede apreciar cómo en el margen este domina un proceso de acreción, notable por la amplitud de su playa protegida por dicha escollera, mientras que en el margen oeste se construyó otra escollera, posiblemente para evitar la erosión causada por el flujo de agua de la boca.

El resultado es la interrupción del transporte de sedimentos que puede haber influido considerablemente en la erosión del margen oeste, donde se encuentra el poblado de Sánchez Magallanes, y en donde también se construyó lo que parecen ser rompeolas sumergidos.



Figura 94. Imagen satelital de Sánchez Magallanes.

Para el caso de Mecoacán se observó también una escollera en la boca oeste (Figura 95), que parece haber provocado una acumulación de material en el extremo oeste de la isla y el consecuente cierre de la boca. Es importante señalar la infraestructura ubicada en la zona oeste construida sobre antiguas dunas, donde el oleaje intenso ha socavado parte de ésta, por lo que estas construcciones se encuentran también en riesgo de ser afectadas por el oleaje y la consecuente erosión.

En el margen este de la boca oriental, se observó un proceso de erosión caracterizado por la destrucción del manglar de la zona. La zona de Mecoacán presenta distintos niveles de vulnerabilidad, pues en la isla se observó una dominancia de procesos acumulativos en los extremos, mientras que en los márgenes de la boca este y en la parte central de la isla, se puede apreciar un proceso de erosión.

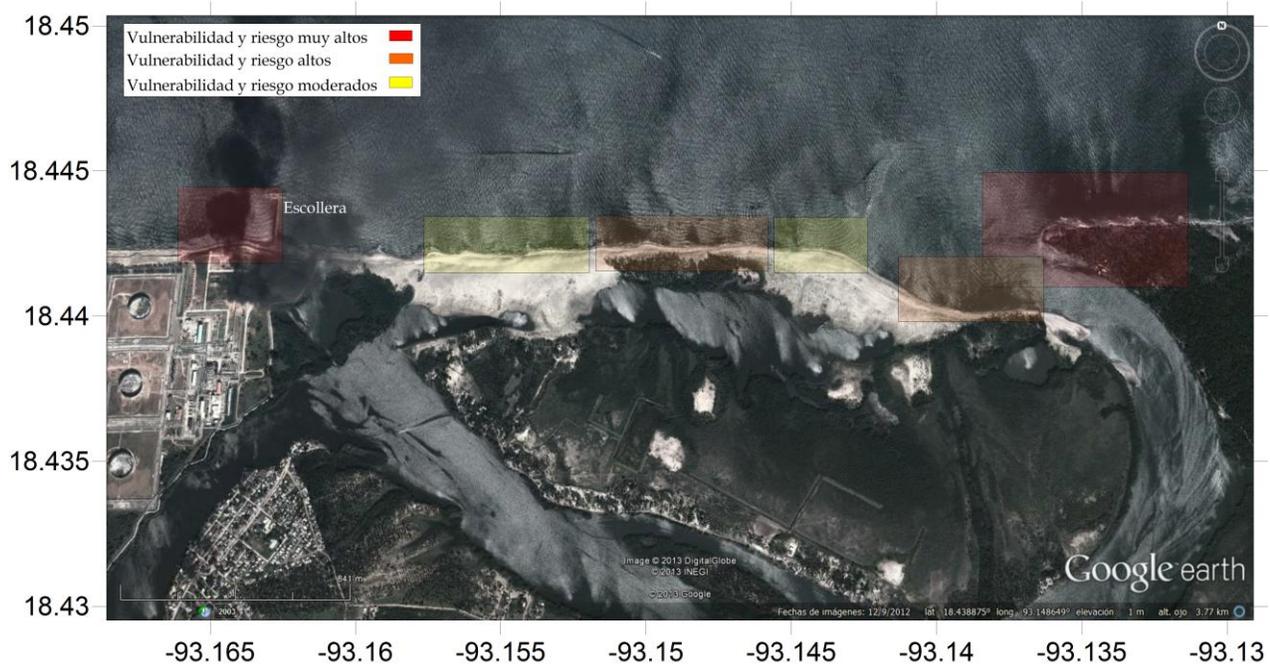


Figura 95. Imagen satelital de Mecoacán.

Como se mencionó en el análisis histórico de la zona litoral, se construyó una escollera en el margen este del canal La Elena (Figura 96), ubicada al oeste de la desembocadura del Río Grijalva.

Esta obra interrumpe el transporte natural de sedimentos en la zona litoral de tal manera que la boca, que antes podía llegar a cerrarse, ahora permanece abierta y no sólo eso, sino que la erosión continuó en el margen oeste hasta poner el sitio en un nivel alto de riesgo, incluso para la infraestructura petrolera aledaña. Por otra parte, en el margen este del canal se observó un proceso de acreción de material retenido por la escollera mencionada.

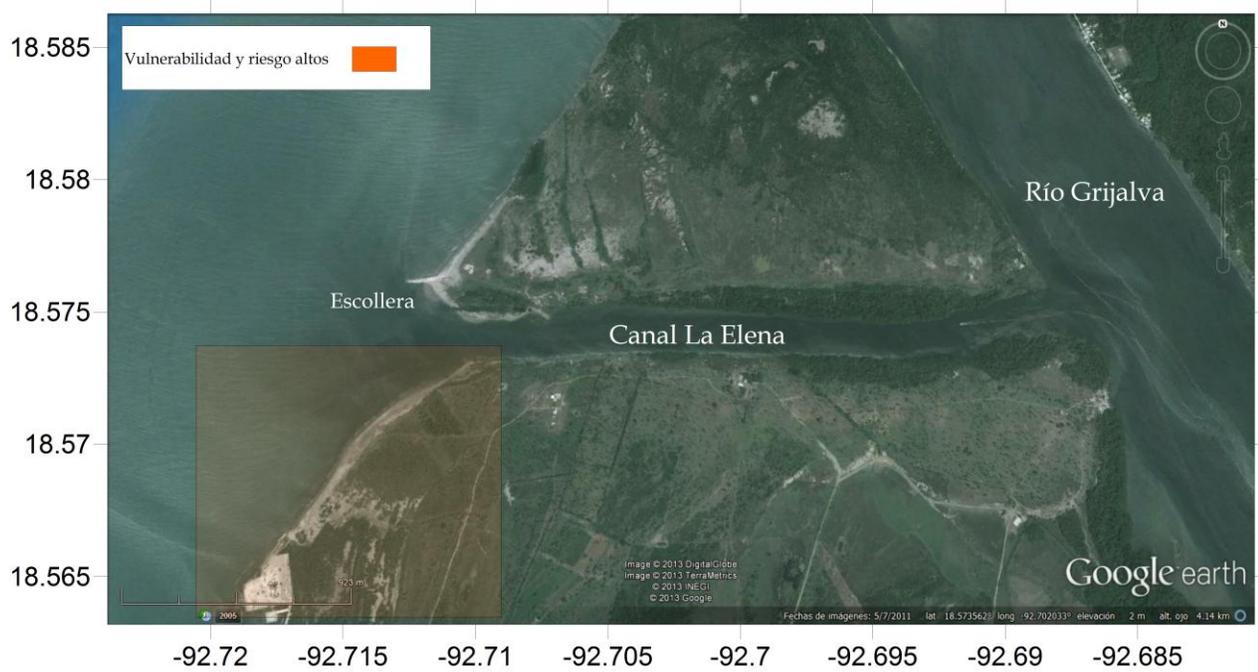


Figura 96. Imagen satelital de Grijalva.

IV. CONCLUSIONES

Por la complejidad de los factores que intervienen en la dinámica costera, se hace una conclusión por sitio para tener un mejor conocimiento de la problemática y vulnerabilidad por erosión, y finalmente se mencionan tres conclusiones generales.

4.1. Cinco Presidentes

De acuerdo al análisis histórico en esta playa es estable como lo comprueban el levantamiento topográfico y los resultados de la zona marina (Figura 97). Dicha playa se integra por sedimentos arenosos de grano medio en la zona litoral y arenas finas a medias en la parte marina, lo cual muestra la influencia evidente del río Tonalá.

La zona de dunas de 5.61 m de altura representa una barrera para la erosión costera, sin embargo puede provocar inundaciones al contener los escurrimientos de la parte continental, sobre todo por la presencia de un área que se encuentra por debajo del nivel de mar (-0.91 m) en las cercanías del campo Cinco Presidentes.



Figura 97. Playa de Cinco Presidentes.

El oleaje que más afecta esta zona es el del nor-noreste de periodos bajos, observándose una mayor concentración de energía con oleaje de 4 segundos, sin embargo, el oleaje de huracanes y nortes no afecta tanto este punto debido a la poca profundidad de la zona.

La vulnerabilidad por erosión y el riesgo son muy bajos, esto es en gran medida gracias a la batimetría de la zona marina que se caracteriza por una extensa planicie con pendientes poco abruptas que protegen la costa del oleaje, además del aporte de sedimentos del Río Tonalá.

4.2. Sánchez Magallanes

En este sitio se observó un fuerte proceso erosivo en la margen oeste, donde se encuentra asentada la población de Sánchez Magallanes que está sujeta a serias afectaciones en casa-habitación cercanas a la playa. Por otro lado, existe una estabilidad en la parte este por la presencia de una escollera, dicha obra influye en los procesos de erosión-acumulación que se observan en cada uno de los márgenes. En la Figura 98 se observan ambos márgenes de esta zona; de izquierda a derecha, el margen oeste con las casas construidas sobre la antigua duna ahora destrozadas por la erosión, y en el margen este la escollera que interrumpe el transporte de sedimento.

Los sedimentos que componen la zona litoral son arenas medias en el 2010 y lluvias del 2011, cambiando a arenas gruesas en nortes del 2011, lo que indica una acción energética mayor para esta época.



Figura 98. Sánchez Magallanes oeste y este.

El oleaje que más afecta este sitio es el procedente del norte y nor-noreste de periodos bajos, y al igual que en Cinco Presidentes, la poca profundidad del sitio protege hasta cierto punto del oleaje de alta energía de los nortes y huracanes; sin embargo, la fuerte erosión de la zona puede deberse al mismo oleaje de periodos bajos, pues aunque es de baja energía, llega a la línea de costa con un ángulo de incidencia de 45° aproximadamente, que provoca una mayor erosión, además de que en este sitio también se presentan concentraciones de alta energía con el oleaje de 7 segundos, y si se suma el efecto de la escollera que frena el transporte de sedimentos del este al oeste causado por el oleaje del nor-noreste, pues el resultado es un margen oeste altamente erosivo y con una alta vulnerabilidad y riesgo, principalmente a la pérdida de casas-habitación que fueron construidas sobre la antigua duna que ahora ya forma parte de la playa.

4.3. Tupilco

En el periodo registrado a partir de las imágenes de satélite se observó una erosión continua entre el 1988 y el 2003, con una tasa de aproximadamente 7 m/año. Del 2003 al 2010 el sitio se comportó estable, sin recuperarse totalmente, pues se observan casas-habitación en ruinas a causa de la erosión de años anteriores (Figura 99). El levantamiento topográfico mostró un predominio de erosión.

Los sedimentos que componen este sitio, lo conforman arenas medias en la playa y arenas finas a muy finas en la zona marina, en ambos años, marcando una estabilidad de condiciones energéticas para ambos años. Aparentemente no se nota una interrupción del transporte del sedimento, por lo que la erosión registrada puede derivar de factores tales como la acción del oleaje y la corriente litoral sobre todo en época de huracanes y nortes.

El oleaje que llega con una mayor concentración de energía es el proveniente del norte de 4, 7 y 12 segundos, así como el del nor-noreste de 7 y 20 segundos y del nor-noroeste de 7 segundos; en base a esto, se observa que el oleaje de energía media, de 7 segundos es el que más afecta la zona y probablemente el que llega con más frecuencia, lo que causa una tasa de erosión elevada y consecuentemente una vulnerabilidad y riesgo alto en la zona, según los resultados de dichos análisis y lo observado en campo, notándose casas destruidas, un faro derrumbado y la carretera interrumpida por la erosión.



Figura 99. Casas afectadas por la erosión en Barra de Tupilco.

4.4. Campo Tajón

En los últimos 22 años se ha registrado una erosión con una tasa de 4.4 m/año en la zona litoral, el levantamiento topográfico mostró un proceso de erosión hacia la parte este y acumulación al oeste; para el 2011 recupera casi su forma comportándose como un ciclo estacional por lo que la playa se considera estable (Figura 100).

Los sedimentos presentes en la playa varían de arenas medias en el 2010 a arenas medias y finas en el 2011 indicando una relativa baja energía, permitiendo la acumulación de materiales finos.

El oleaje que llega a la zona es de baja energía, sin embargo, hacia el este se observan sitios donde aumenta la concentración de energía por oleaje de periodos medios y altos, principalmente de 7 y 16 segundos. La vulnerabilidad y riesgo en este sitio son bajos, aunque puede haber cierto riesgo de inundación que no se ha evaluado, debido a la presencia de la laguna Las Flores.



Figura 100. Playa en Tajón.

4.5. Laguna Mecoacán

El análisis histórico mostró que la desembocadura oeste de la laguna Mecoacán es objeto de acumulación de sedimentos en ambas márgenes con tendencia al cierre de la boca. En la boca este se presenta acumulación del lado de la isla Andrés, mientras que del lado contrario se presentan procesos de erosión, con la desaparición de la playa. Los levantamientos topográficos mostraron acumulación y erosión. Para la época de secas, se encontraron arenas finas y medias, mientras que en lluvias predominaron las arenas gruesas y medias. En el 2011 dominaron las arenas medias.

El oleaje que más afecta en este sitio es el de periodos altos del norte, nor-noreste y nor-noroeste, de tal manera que cualquier fenómeno meteorológico, ya sea tormenta tropical, huracán o norte generará concentraciones de energía de oleaje muy altas en esta zona, resultando en procesos de erosión y depósito más intensos. Esto es preocupante en el caso de la erosión, pues debido a la abrupta pendiente el sedimento erosionado de la playa o las dunas se pierde hacia el fondo.

La zona frente a la Laguna Mecoacán presenta los niveles más elevados de vulnerabilidad y riesgo debido a la pendiente abrupta de sitio que permite la entrada del oleaje de mayor energía a la zona, es decir, los de periodos largos. Esta zona también se encuentra sujeta al peligro de inundación por parte del conjunto lagunar en toda la zona, formado por las lagunas de Tupilco, Carmen, Machona, de las Flores, Mecoacán, Santa Anita, y demás cuerpos de agua más pequeños. De tal manera que podemos decir que esa zona presenta un riesgo tanto a la erosión por oleaje, como por la erosión que puedan causar la inundaciones, de tal manera que se observan afectaciones no sólo a las obras civiles, sino a los manglares que existen en la zona (Figura 101).



Figura 101. Manglares en deterioro a causa de erosión e intrusión salina en Mecoacán.

4.6. Río Grijalva

El margen oeste de la desembocadura del río Grijalva en el canal La Elena es objeto de procesos erosivos continuos desde el año 1988 al 2010 (Figura 102), el margen este presenta una península formada por la acumulación de sedimentos. La composición sedimentológica consistió en arenas finas y medias en el 2011 y en el 2010 fueron mayormente arenas finas y lodos.

El oleaje que llega con mayor intensidad es el del norte y éste podría generar una mayor erosión en la zona, al igual que el de mediana y alta energía del nor-noreste, por lo que este sitio se encuentra vulnerable tanto a tormentas tropicales y huracanes como a nortes, y presenta un riesgo alto, principalmente al daño de la infraestructura petrolera cercana al margen oeste por erosión.



Figura 102. Desembocadura del Río Grijalva, margen oeste.

4.7. Campo Costero

Para el 2011 se observó una playa con una pendiente de entre 4% y 6%. En el período comprendido entre 1988 y 2010, se observó una tasa de erosión de aproximadamente 3.75 m/año.

El resultado neto de las mediciones topográficas durante el período 2010-2011 fue de una pérdida de 5 metros, valor cercano a la tasa de erosión promedio. Los sedimentos en la zona litoral fueron arenas finas para las cuatro épocas, aportadas por el Río San Pedro- San Pablo, incrementándose en época de lluvias.

Este sitio es el menos afectado por el oleaje del norte, sin embargo, el oleaje del nor-noroeste llega con altas concentraciones de energía en este punto para todos los periodos de oleaje, además del proveniente de nor-noreste de periodos de alta energía, por lo que esta zona es vulnerable sobre todo a huracanes, aunque en general su vulnerabilidad y riesgo es moderado.



Figura 103. Playa en Campo Costero.

1) Los resultados obtenidos en el presente trabajo concuerdan con los encontrados en diferentes estudios realizados en el Golfo de México, los que también reflejan un predominio de los procesos erosivos.

2) Debido a la diferencia de escalas temporal y espacial de trabajo, los resultados de erosión-acreción medidos en campo a partir de la topografía de playa pueden no ser coincidentes en algunos sitios, dado que los muestreos de campo se llevaron a cabo solamente en el año 2010 y 2011 completando un ciclo estacional.

3) Como conclusión final, mediante la serie de estudios realizados en el área se logró determinar que la mayor parte del litoral tabasqueño presenta niveles altos de vulnerabilidad y riesgo, ya sea de manera natural o incrementada por el impacto antropogénico. Todos los sitios de estudio presentaron una peligrosidad natural a la ocurrencia de fenómenos tales como erosión y oleaje intenso en mayor o menor medida, sin embargo, se observó que las zonas de mayor riesgo son las asociadas a los cuerpos de agua más grandes e importantes: Sánchez Magallanes, Tupilco, Mecoacán y Grijalva.

V. RECOMENDACIONES

5.1. Medidas de protección y adaptación de daños

Estas medidas se consideran para los sitios más vulnerables que son Mecoacán, la desembocadura del Grijalva en su margen oeste, Sánchez Magallanes oeste y Tupilco, que son objeto de una fuerte dinámica costera y factores que impiden la recuperación de estos sitios bajo condiciones naturales.

- a) Construir obras ingenieriles encaminadas a la recuperación y estabilidad de la playa que aún se conserva.
- b) El impacto de las obras de protección, deberá ser evaluado integralmente simulando su comportamiento mediante modelos matemáticos que permitan comprobar su efectividad a corto y largo plazo. El diseño de la obra debe considerar características de bajo impacto costero conocidas como “obras blandas o combinadas” que permitan la recuperación de la zona de playa.
- c) Considerar los rompeolas aislados, ya que estos son estructuras concebidas para ofrecer protección de las olas, a las áreas costeras ubicadas en el lado de sotavento de la estructura.

- d) Considerar simultáneamente con las obras de protección el vertimiento de arena.
- e) En el caso de las obras civiles construidas tiempo atrás, se recomienda realizar modelos a corto y largo plazo para determinar los posibles resultados de dichas obras, y considerar en su momento si es mejor que continúe en el sitio o quitarla.

5.2. Medidas de prevención

Se recomienda que estas medidas se tomen en cuenta en sitios con vulnerabilidad media y baja.

- a) Es necesario llevar a cabo acciones preventivas como ordenamientos costeros y obras civiles encaminados a la protección y estabilidad de la playa.
- b) Establecimiento de programas regionales y locales de ordenamiento territorial, con vistas a la reducción de los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos y a la planificación adecuada.
- c) Considerar la geodesia aplicada u otros métodos cuantitativos para determinar fenómenos como la subsidencia y su impacto en la pérdida de playas y zonas bajas.
- d) Aplicar modelos matemáticos para complementar la información existente, de tal manera que el sistema pueda conocerse con mayor detalle y así poder determinar cuál es la mejor estrategia a seguir.
- e) Es conveniente llevar a cabo un monitoreo mínimo de dos muestreos por año para poder evaluar los cambios que se presenten en cada sitio, ya sea de baja o alta vulnerabilidad, y así poder tener una mayor seguridad de la tendencia morfodinámica de cada zona a largo plazo.
- f) Las medidas de prevención deben aplicarse no sólo en Tabasco, la erosión costera es un fenómeno que se presenta en gran parte de las playas mexicanas, convirtiéndose en un problema grave cuando afecta obras civiles, casas habitación y zonas turísticas.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antoine, J.W. 1972. Structure of the Gulf of Mexico. In: Rezak R and V. J. Henry (eds.) Contributions on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico. Vol. 3 Texas A. & M. University Oceanographic Studies pp. 1-34.

Behringer, D. W., R. L. MolinarI And J. F. Festa, 1977. The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. Journal of Geophysical Research, 82(34): 5469-5476. of Mexico. Marine Geology, 112: 257-269.

Carver, R. E., 1971. Procedures in Sedimentary Petrology. Athens, Georgia. 49-135 pp.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL. 99-10-692 LC/R. 1935.

Cotler H. y D. I. González, 2010 Las Cuencas Hidrográficas de México, Diagnóstico y Priorización. Sedimentación Potencial de Presas. 124 - 127 pp.

Cowell, P.J., B.G. Thom, R.A. Jones, C.H. Everts y D. Simanovic, 2006. Management of Uncertainty in Predicting Climate-Change Impacts on Beaches, J. Coastal Research 22(1): 232-245.

Day, J., J.F. Martin, L. Cordoch y P.H. Temple, 1997. System functioning as a basis for sustainable management of deltaic ecosystems. Coastal Management 25:115-153.

Escobar R., Jairo (1999), Fenómenos Climáticos y Vulnerabilidad: La Ecuación Determinante de los Desastres. El caso de los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo. Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL. 99-10-692 LC/R. 1935.

Eyre, B. D. 1998. Transport, retention and transformation of material in Australian estuaries. Estuaries, 21(4A): 540-551.

Folk, R. L., 1974. Petrology of sedimentary rocks, Hemphills, Austin, Texas, 170 pp.

Gay, C. 2000. Cambio Climático en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W., y Birdwell, K.R. (1994): The development of a coastal vulnerability assessment database; vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research*, SI 12: 327-338.

Gutiérrez-Estrada, M. y A. Galaviz-Solís. 1983. Morfología y sedimentos recientes de las lagunas El Carmen, Pajonal y La Machona, Tabasco. México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar*. 10 (1): 249-270.

Hammar-Klose, E.S., y Thieler, E.R. (2001): Coastal vulnerability to sea-level rise, a preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts. U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-68

Hernández-Santana J. R., M. A. Ortiz Pérez, A. P. Méndez Linares y L. Gama Campillo. 2008.

Jiménez, O. (1979), Análisis Granulométrico de los Sedimentos Superficiales de la Boca de Puerto Real, en la Laguna de Términos, Estado de Campeche. *Bol. Soc. Mexicana Instituto Mexicano del Petróleo Tomo XL (1,2)*

Logan, B.W., Harding, J.L., Ahr, W.M., Williams, J.D., and Snead, R. G. 1996. Carbonate sediments and reefs, Yucatan Shelf, México. *Amer. Assoc. Petroleum Geologists, Memoir* 11:1-198.

Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O. y Gay, C. (1998), Evaluación de Escenarios Regionales de Clima Actual y de Cambio Climático Futuro para México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP.

Mendoza, T., Jiménez, J., 2009, Regional vulnerability analysis of Catalan beaches to storms. *Maritime Engineering* 162. 10.1680/maen.2009.162 .3.127

Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Núm. 65, pp. 7-21*

Hurlburt, H. E. and J. D., Thompson, 1980. A numerical study of loop current intrusions and eddy shedding. *Journal of Physical Oceanography*, 10, 1611-1651.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1996. "Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla", [en línea]. 2010, [10 de julio de 2011.]

IPCC 2007. Cambio Climático 2007. Informe de Síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM, PNUMA. 114pp

Krumbein, W.C. and Sloss, L.C., 1963. *Stratigraphy and Sedimentation*, W.H. Freeman. Company, San Francisco, 660p.

Laverde, M., Pedrozo, A., González, F., 2012, Estimación del índice de vulnerabilidad por inundación costera en el estado de Tabasco, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Lewis, D.W., 1984. "Practical Sedimentology", Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 229 pp.

Martínez, J. Y Fernández, A. 2004. *Cambio Climático: una visión desde México*. 523.

Monreal-Gómez, M. A., D. A. Salas DE León Y H. Velazco Mendosa. 2004. La hidrodinámica del Golfo de México. En. *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. (comp.). M. Caso, I. Pisanty y E. Ezcurra. 47-68 pp.

Montaño, Y., Aldeco, J., 1985, Estudio de refracción de oleaje frente a la zona Centro-Sur de Mazatlán, Sin., México: *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología*, UNAM. Vol 12 (no. 3): 23-36.

Narbona, C. y Gallego, H. (2008), *Cambio Climático en las Ciudades Costeras*. Red Española de Ciudades por el Clima. Ministerio del Medio Ambiente. FEMP. Madrid

Ojeda Zújar, J.; Álvarez Francoso, J.I.; Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2008): El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel de mar en la costa andaluza. En: Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria. Pp. 660-671. ISBN: 978-84-96971-53-0.

Ordoñez, E. 1936. Principal physiographie provinces of Mexico. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.* 20: 1277-1307.

Oropeza, O. y Enrique C., 2007. Zonas susceptibles a inundaciones. En Coll, A. (Coordinadora), *Nuevo atlas Nacional de México, Sección Naturaleza*. Instituto de Geografía, UNAM, México

Ortíz, Pérez, M. A. (1992), "Retrosceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche, Tabasco", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 25, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-23. Ortiz, M. (1991), *Retrosceso Reciente de la Línea de Costa del Frente Deltaico del Río San Pedro, Campeche-Tabasco*. Instituto de Geografía, UNAM.

Ortiz, M. y Méndez, A. (1999), *Escenarios de Vulnerabilidad por Ascenso del Nivel del Mar en la Costa Mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe*. *Investigaciones Geográficas*, UNAM (39)

Ortíz Pérez, M. A. y J. Benítez (1996), "Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en las planicies delticas: la región de Tabasco y Campeche", en Botello, A. V., J. L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lomelí (eds.), *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*, EPOMEX, Serie científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 483-503.

Padilla Pilotze, A. R., F. G. Ruiz-Rentería Y M. A. Alatorre-Mendieta, 1985. Datos oceanográficos de la Bahía de Campeche. Campaña CIBAC-2, 7-22 de junio de 1978. Informe CONACYT.

Pinilla, C. 1995 "Elementos de teledetección", RAMA, Madrid. "Teleobservación Satelital de ambientes costeros: conceptos básicos y sus aplicaciones", Karszenbaum, H.; Gagliardini, A.; Dogliotti A. y Bava, J. Universidad Nacional de la República, Agosto.

Palacio, A. (2001), Detección de Cambios en la Morfología Litoral de Punta Zacatal y Parte Occidental de Isla del Carmen, Campeche, Mediante el Análisis Multitemporal de Imágenes de Satélite. *Investigaciones Geográficas*, UNAM (046):7-14

Palacio, A. (2010), La Morfología Costera Posthuracán como Indicador de la Intensidad de la Amenaza por Huracanes. *Interciencia*, vol. 35 (6):400-406

Palacio, J., Ortiz, M. y Garrido, A. (1999), Cambios Morfológicos Costeros en la Isla del Carmen, Campeche, por el paso del Huracán "Roxanne". *Investigaciones Geográficas*, UNAM (040): 48-57

Pedrozo, A., 2011, Procesos costeros y morfodinámica de playas: Serie Docencia, Instituto de Ingeniería, UNAM. 180p. ISBN: 970-32-0710-3 ISBN: 970-32-0710-3

Psuty, N. (1965), Beach - Ridge Development in Tabasco, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 55: 112-124

Psuty, N. (1967), The Geomorphology of Beach Ridges in Tabasco, México, *Coastal Studies Series* (18)

Rosengaus, M. (1998), Efectos destructivos de los ciclones tropicales. ITSEMAP, Servicios Tecnológicos MAPFRE, México. pp. 3-125

Rothwell, R.G., 1989. "Minerals and Mineraloids in Marine Sediments", Elsevier Applied Science, London, 278pp.

Sherpard, F.P. 1973. F. P., *Submarine Geology*, 3rd ed. Harper & Row, New York.

Smith, W. , Sandwell, D., 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, v. 277, 1957-1962 pp.

Thom, B. (1967), Mangrove Ecology and Deltaic Geomorphology. Tabasco, México, *Journal of Ecology*, vol. 55: 301-343

Uchupi, E. 1967. Bathymetry of the Gulf of Mexico, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans. Vol. 17 pp 161-177.

U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984, Shore Protection Manual U.S. Army C.E.R.C. Department of the Army. Waterways Experiment Station, Corps. of Engineers. Vol. 1.

Van Westen, C.J. (1993), Análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo. Manual

Wentworth, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. Jour. Geol. 30(5): 377-392.

West, R., Psuty, N. y Thom, B. (1969), The Tabasco Lowlands of Southeastern Mexico, Coastal Studies Series No. 27, Louisiana State University Press, Baton Rouge.

Worthington, H., Herbich, J., 1971, Computer prediction of wave heights in coastal areas: Offshore Technology Conference, Houston, Texas. 4 de mayo de 1971. 8p.

Zavaleta-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Fernández Maguey, 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 249-268. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 pp.

VII. ANEXOS

7.1. Ubicación, tipo de sedimento y composición mineralógica de sedimentos.

Sitio	Perfil	Zona	Coordenadas		Tipo de sedimentos	Composición mineralógica
			X	Y		
Campo Cinco Presidentes	1	Infraplaya	390619.94	2017337.62	Arena media	Arena Feldespática
		Mesoplaya	390622.264	2017329.19	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	390624.085	2017321.18	Arena media	Arena Feldespática
	2	Infraplaya	390892.312	2017412.88	Arena media	Arena Feldespática
		Mesoplaya	390894.111	2017402.1	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	390896.76	2017392.35	Arena media	Arena Feldespática
	3	Infraplaya	391140.036	2017502.09	Arena media	Arena Feldespática
		Mesoplaya	391144.072	2017489.02	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	391145.202	2017483.35	Arena media	Arena Feldespática
Boca Sánchez Magallanes	4	Infraplaya	409448.348	2023452.6	Arena gruesa	Subfeldsarenita
		Mesoplaya	409450.419	2023442.1	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	409453.587	2023434.23	Arena media	Arena Feldespática
	5	Infraplaya	409784.341	2023531.1	Arena gruesa	Arena Feldespática
		Mesoplaya	409787.714	2023523.6	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	409793.771	2023515.21	Arena media	Arena Feldespática
	6	Infraplaya	409968.074	2023588.63	Arena gruesa	Arena Feldespática
		Mesoplaya	409970.516	2023580.69	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	409971.776	2023573.93	Arena media	Arena Feldespática
	7	Infraplaya	410655.759	2024249.12	Arena gruesa	Arena Feldespática
		Mesoplaya	410661.542	2024244.62	Arena gruesa	Subfeldsarenita
		Supraplaya	410665.443	2024237.39	Arena media	Arena Feldespática
	8	Infraplaya	410902.004	2024295.95	Arena gruesa	Arena Feldespática
		Mesoplaya	410910.079	2024292.16	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	410917.207	2024277.35	Arena media	Arena Feldespática
Barra Tupilco	9	Infraplaya	453999.949	2037551.38	Arena media	Arena Feldespática
		Mesoplaya	454009.477	2037528.99	Arena media	Arena Feldespática
		Supraplaya	454011.702	2037518.99	Arena fina	Arena Feldespática
	10	Infraplaya	454316.762	2037600.6	Arena media	Arena Feldespática
		Mesoplaya	454320.115	2037586.45	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	454322.331	2037580.23	Arena fina	Arena Feldespática
11	Infraplaya	454589.555	2037670.78	Arena media	Arena Feldespática	

		Mesoplaya	454596.199	2037647.69	Arena media	Arena Feldeespática
		Supraplaya	454597.834	2037640.11	Arena fina	Arena Feldeespática
		Coordenadas		Tipo de sedimentos		Composición mineralógica
Sitio	Perfil	Zona	X	Y		
Campo Puerto Ceiba-Tajón	12	Infraplaya	469911.477	2038796.53	Arena fina	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	469910.341	2038769.57	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	469911.465	2038760.46	Arena fina	Arena Feldeespática
	13	Infraplaya	470180.107	2038789.73	Arena fina	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	470180.896	2038767.92	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	470181.801	2038762.29	Arena fina	Arena Feldeespática
	14	Infraplaya	470387.555	2038780.53	Arena fina	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	470388.673	2038772.22	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	470388.701	2038765.4	Arena fina	Arena Feldeespática
	15	Infraplaya	470484.546	2038789.53	Arena media	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	470482.927	2038769.83	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	470483.023	2038762.83	Arena fina	Arena Feldeespática
16	Infraplaya	470842.446	2038787.18	Arena fina	Arena Feldeespática	
	Mesoplaya	470842.934	2038769.42	Arena fina	Arena Feldeespática	
	Supraplaya	470843.204	2038762.28	Arena fina	Arena Feldeespática	
Laguna Mecoacán	17	Infraplaya	483614.636	2039017.31	Arena fina	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	483616.697	2039000.17	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	483617.382	2038987.26	Arena fina	Arena Feldeespática
	18	Infraplaya	483984.494	2039029.63	Arena gruesa	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	483993.764	2039016.63	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	484003.636	2039002.8	Arena media	Arena Feldeespática
	19	Infraplaya	485716.09	2039057.26	Arena media	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	485728.439	2039054.06	Arena media	Arena Feldeespática
		Supraplaya	485733.003	2039052.92	Arena media	Arena Feldeespática
20	Infraplaya	486091.94	2039120	Arena media	Arena Feldeespática	
	Mesoplaya	486094.261	2039111.95	Arena fina	Arena Feldeespática	
	Supraplaya	486094.256	2039107.13	Arena media	Arena Feldeespática	
Campo Tizón	21	Infraplaya	529816.674	2052915.11	Arena fina	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	529874.344	2052876.93	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	529884.13	2052866	Arena fina	Arena Feldeespática
	22	Infraplaya	529966.067	2053133.81	Arena fina	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	529985.952	2053119.7	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	529997.683	2053111.91	Arena fina	Arena Feldeespática
	23	Infraplaya	530167.609	2053309.87	Arena muy fina	Arena Feldeespática
		Mesoplaya	530183.366	2053295.17	Arena fina	Arena Feldeespática
		Supraplaya	530193.276	2053283.82	Arena fina	Arena Feldeespática
24	Infraplaya	530444.64	2053518.79	Arena fina	Arena Feldeespática	

		Mesoplaya	530457.957	2053510.41	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	530459.198	2053488.67	Arena fina	Arena Feldespática
Sitio		Perfil	Coordenadas		Tipo de sedimentos	Composición mineralógica
		Zona	X	Y		
Campo Tizón	25	Infraplaya	530529.557	2053519.64	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	530536.235	2053515.25	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	530537.248	2053506.04	Arena fina	Arena Feldespática
Río Grijalva-Usumacinta	26	Infraplaya	530315.697	2053763.91	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	530333.323	2053770.57	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	530346.221	2053777.02	Arena fina	Arena Feldespática
	27	Infraplaya	530545.748	2054119.22	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	530557.812	2054104.13	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	530586.803	2054075.32	Arena fina	Arena Feldespática
	28	Infraplaya	532460.071	2058320.72	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	532474.402	2058311.39	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	532486.729	2058305.24	Arena fina	Arena Feldespática
	29	Infraplaya	532846.935	2058561.49	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	532838.481	2058545.43	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	532830.208	2058529.49	Arena fina	Arena Feldespática
Campo costero	30	Infraplaya	550921.848	2060720.67	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	550928.799	2060698.01	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	550932.798	2060682.67	Arena fina	Arena Feldespática
	31	Infraplaya	551405.828	2060852.08	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	551410.882	2060832.88	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	551413.187	2060818.19	Arena fina	Arena Feldespática
	32	Infraplaya	551819.179	2060964.82	Arena fina	Arena Feldespática
		Mesoplaya	551824.205	2060947.56	Arena fina	Arena Feldespática
		Supraplaya	551826.297	2060936.3	Arena fina	Arena Feldespática Lítica

7.3. Modelo RED SEA en FORTRAN para refracción de oleaje

```

!C* * SPECIFICATION STATEMENTS
real D(200,200),C(200,200),CX(200,200),CY(200,200)
real C2X(200,200),C2Y(200,200),C2XY(200,200)
real ALPH(3500),X(3500),Y(3500),F(3500),E(3500)
real CXL(3500),CYL(3500),C2XL(3500),C2YL(3500),C2XYL(3500),GAMA(3500)
real PP(3500),Q(3500),BETA(3500),T(3500),V(3500),W(3500)
integer JT, NOP,IGO,IX(3500),IY(3500)
!C* * READ DATA AND CONDITIONS
open(15,file='tabascoespejo.dat',status='old',action='read')
open(16,file='reftabaNNW20.dat',status='replace',action='write')
open(17,file='reftaba2NNW20.dat',status='replace',action='write')
M=102
N=86
NOP=1
SP=260.0
17 continue
do i=1,M
  read(15,*)(D(i,j),j=1,N)
!   write(6,500)(D(i,j),i=1,M)
end do
! 500 format(61f8.2)
! define problem
  IGO=1 !problem number counter
44 continue
  ALPH(2)=112.5; TH=20.0 ; DELT=2.6666
  X(1)=2.0 ; Y(1)=2.0 ; QM=101.0 ; UK= 1.0
  close(unit=15)
!C* * DEFINE VARIABLES
  G=9.80665
  PI=3.141592654
  A=(G*TH)/(6.28*SP)
  B=6.28/TH
!C* * PRINT DATA, CONDITIONS AND DEADINGS
  WRITE(16,38)M,N,NOP,SP
38  FORMAT(/,1H1,2X,'WATER DEPTH DATA',/,3X,20HNUMBER OF HORIZONTAL&
,11H GRID LINES,I6/,3X,'NUMBER OF VERTICAL GRID LINES',2X,I6,/&
,3X,'NUMBERS OF PROBLEMS',13X,I5/,3X,'GRID INTERVAL',16X&
,F8.1,1X,'MTS',/,30X,'D E P T H S O U N D I N G S',/)
!***** write the depth data for revision
!   write(6,29)((D(i,j),j=1,N),i=1,M)
29  format(1H ,3x,25F7.2)
  write(16,33)IGO, ALPH(2),TH,DELT,X(1),Y(1),QM,UK
33  FORMAT(/,1H1,2X,'PROBLEM DATA',/,2X,'PROBLEM NUMBER',16X,I5&
/,2X,18HANGLE OF INCIDENCE,12X,F7.2,1X,7HDEGREES,/,2X&
,11HWAVE PERIOD,19X,F7.2,1X,7HSECONDS,/,2X,14HTIME INCREMENT&
,16X,F7.2,1X,7HSECONDS,/,2X,25HINITIAL ORTHOGONAL ORIGIN,5X,2F7.1&
,1X,13H (HORIZ,VERT)&
/,2X,27HMAX HORIZ ORTHOGONAL ORIGIN,3X,F7.1,/,2X&
,26HORTHOGONAL ORIGIN INTERVAL,4X,F7.1)
!   now the computations
  ALPH(2)=(PI*ALPH(2))/180.0
!C* * CALCULATE CELERITY
  WRITE(6,*)'CALCULO CELERIDADES'
  I=1

```

```

15 J=1
   P0=A
47 IF(IGO.EQ.1) GO TO 14
!C* * RECORD DEPTH IN GRID SPACING UNITS
   D(I,J)=D(I,J)*SP
14 IF(D(I,J)-(0.003*SP))11,11,922
922 D(I,J)=D(I,J)/SP
13 P1=A*TANH((B*D(I,J))/P0)
   IF(ABS(P1-P0)-(0.001*P0).LE.0.0) GO TO 12
   P0=P1
   GO TO 13
12 C(I,J)=P1
   P0=P1
   GO TO 34
11 C(I,J)=0.0
   D(I,J)=D(I,J)/SP
34 J=J+1
   IF ((N-J).GE.0) GO TO 47
   I=I+1
   IF ((M-I).GE.0) GO TO 15
! WRITE(6,*)'CALCULE CELERIDADES'
!C* * CALCULATE CELERITY DERIVITIVES
   I=2
19 J=2
18 CX(I,J)=(C(I+1,J)-C(I-1,J))/2.0
   CY(I,J)=(C(I,J+1)-C(I,J-1))/ 2.0
   C2X(I,J)=(C(I+1,J)-2*C(I,J)+C(I-1,J))
   C2Y(I,J)=(C(I,J+1)-2*C(I,J)+C(I,J-1))
   C2XY(I,J)=(C(I+1,J+1)-C(I-1,J+1)-C(I+1,J-1)+C(I-1,J-1))/4.
   J=J+1
   IF((N-J).GT.0) GO TO 18
   I=I+1
   IF((M-I).GT.0) GO TO 19
!C* * TRACE OF ORTHOGONALS
   WRITE (16,63)
63 FORMAT (1H ,/,4X,'ORTHGNL',3X,'POINT',6X,'TIME',2X&
,'COORDINATES', 2X, 'DEPTH ',2X,'REFRACTION',2X,'SHOALING'&
,2X,'HEIGHT',4X,'WAVE',/,4X,'NUMBER',4X,'NUMBER',5X,'(SEC)'&
,4X,'X',4X,'Y',4X,'(MTS)',6X,'COEF',6X,'COEF'&
,6X,'COEF',2X,'DIRECTION',/,6X,'1')
   X(2)=X(1)
   Y(2)=Y(1)
   K=1
28 CONTINUE
   L=2
   NC=1
   T(2)=0.0
   JT=0
   WRITE (16,909) X(2),Y(2)
909 FORMAT (1H ,//,12X,5H 1,2X,10H 0.00,2X,2F5.1,2X&
,'ORTHOGONAL ORIGIN')
   BETA(1)=1.0
   BETA(2)=1.0
!C* * INTERPOLATE F(L), E(L) AND DERIVATIVES
25 IX(L)=X(L)
   IY(L)=Y(L)
   G0=X(L)-IX(L)
   G5=Y(L)-IY(L)
   G1=G0*G5

```

```

G2=G1-G0
G3=G1-G5
G4=G2-G5+1
!C* * TERMINATE ORTHGNL REACHING EDGE OF THE GRID
I=IX(L)
IF(I.GE.(M-1).OR.I.LT.2)GO TO 21
J=IY(L)
IF(J.GE.(N-2).OR.J.LT.2)GO TO 21
F(L)=G4*D(I,J)-G3*D(I,J+1)+G1*D(I+1,J+1)-G2*D(I+1,J)
!C* TERMINATE ORTHGNL REACHING SHORE
IF(F(L)-(0.4*A).LE.0.0) GO TO 21
E(L)=G4*C(I,J)-G3*C(I,J+1)+G1*C(I+1,J+1)-G2*C(I+1,J)
CXL(L)=G4*CX(I,J)-G3*CX(I,J+1)+G1*CX(I+1,J+1)-G2*CX(I+1,J)
CYL(L)=G4*CY(I,J)-G3*CY(I,J+1)+G1*CY(I+1,J+1)-G2*CY(I+1,J)
C2XL(L)=G4*C2X(I,J)-G3*C2X(I,J+1)+G1*C2X(I+1,J+1)-G2*C2X(I+1,J)
C2YL(L)=G4*C2Y(I,J)-G3*C2Y(I,J+1)+G1*C2Y(I+1,J+1)-G2*C2Y(I+1,J)
C2XYL(L)=G4*C2XY(I,J)-G3*C2XY(I,J+1)+G1*C2XY(I+1,J+1)-&
G2*C2XY(I+1,J)
GAMA(L)=(CXL(L)*SIN(ALPH(L)))-(CYL(L)*COS(ALPH(L)))
27 IF(JT.EQ.1) GO TO 22
IF(JT.GT.1) GO TO 23
DEL=GAMA(L)
TAU=E(L)
GO TO 24
22 DEL=(GAMA(L-1)+GAMA(L))/2.0
TAU=(E(L-1)+E(L))/2.0
L=L-1
24 DALPH=DEL*DELT
GOOS=ALPH(L)+(DALPH/2.0)
ALPH(L+1)=ALPH(L)+DALPH
!C* * DETERMINE COORD OF THE NEXT POINT ON ORTHGNL
X(L+1)=X(L)+(TAU*DELT*COS(GOOS))
Y(L+1)=Y(L)+(TAU*DELT*SIN(GOOS))
L=L+1
JT=JT+1
GO TO 25
23 CONTINUE
921 T(L)=T(L-1)+DELT
!C* * CALCULATE COEFFICIENTS OF REFRACTION AND SHOALING
L=L-1
PP(L)=-CXL(L)*COS(ALPH(L))+CYL(L)*SIN(ALPH(L))
Q(L)=E(L)*((C2XL(L)*SIN(ALPH(L))**2.0)-2.0*C2XYL(L)*SIN(ALPH(L))&
*COS(ALPH(L))+C2YL(L)*(COS(ALPH(L))*COS(ALPH(L))))
BETA(L+1)=((PP(L)*DELT-2.0)*BETA(L-1)+(4.0-2.0*Q(L))*(DELT**2.0))&
*BETA(L))/(PP(L)*DELT+2.0)
L=L+1
BAFFLE=(B*F(L))/E(L)
RACK=EXP(BAFFLE)
RACKX=1.0/RACK
COSHX=(RACK+RACKX)/2.0
SINHx=(RACK-RACKX)/2.0
!C* * CALCULATE SHOALING COEFFICIENT
W(L)=(COSHx)/(SQRT(SINHx*COSHx+BAFFLE))
!C* * CALCULATE REFRACTION COEFFICIENT
CR=1.0/SQRT(ABS(BETA(L)))
!C* * CONVERT ORTHGN ANGLE TO DEGREES FOR PRINTOUT
ALPHLD=ALPH(L)*180.0/PI
!C* RECOMPUTE ACTUAL DEPTH FOR PRINTOUT
DEP=F(L)*SP

```

```

NC=NC+1
!C* WAVE HEIGHT OF PRIMARY ORTHOGONALS
950 V(L)=W(L)*CR
! 960 WRITE(16,26)NC,X(L),Y(L),DEP,CR,W(L),V(L),ALPHLD
960 WRITE(16,26)NC,X(L),Y(L)
write(17,*)K,X(L),Y(L)
26 FORMAT(1H ,11X,I5,2X,F10.2,2X,2F5.1,F8.2,4F10.2)
961 CONTINUE
JT=0
GO TO 27
21 K=K+1
WRITE(16,37) K
write(6,37)K
37 FORMAT (1H ./,4X,I3)
!C* * MOVE TO THE NEXT ORTHGNL ORIGIN
X(2)=X(2)+ABS(UK/SIN(ALPH(2)))
IF (QM-X(2).GE.0.0) GO TO 28
940 CONTINUE
!C* * TERMINATE COMPUTER RUN IF THIS IS THE LAST PROBLEM
! WRITE(6,999) QM
! 999 FORMAT(2X,2HQM,3X,F5.1)
930 IF(NOP-IGO.EQ.0) GO TO 46
IGO=IGO+1
GO TO 44
46 CONTINUE
close(unit=16)
close(unit=17)
WRITE (6,1)
1 FORMAT ( 'TERMINE LA CORRIDA', 10A3)
STOP
END

```