



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

FACULTAD DE HISTORIA, GEOGRAFÍA Y CIENCIA
POLÍTICA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

MORFODINÁMICA Y MODELO DE PERFIL DE EQUILIBRIO EN PLAYAS BIOGÉNICAS ARENOSAS DEL LITORAL NORORIENTAL DE CUBA

Por

RIDEL RODRÍGUEZ PANEQUE

Tesis presentada al Instituto de Geografía de la Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política de la Pontificia Universidad Católica de Chile para optar por el grado académico de Doctor en Geografía

Profesor Guía:

Dr. Cristián Henríquez Ruiz

Profesora Co-Guía:

Dra. María Mardones Flores

Comité de Tesis:

Dr. Cristián Henríquez Ruiz

Dra. María Mardones Flores

Dr. Esteban Sagredo Tapia

Julio de 2019

Santiago-Chile

©2019, Ridel Rodríguez Paneque

©2019, Ridel Rodríguez Paneque

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y a su autor.

FECHA: 30 de julio de 2019

FIRMA: 

A mis hijas María Fernanda y María Karla, que siempre me vieron partir, pero
con la seguridad que volvería;

A Karenia, que ha sido testigo de los buenos y malos momentos, estando
siempre a mi lado con paciencia y cariño;

A mis padres por su apoyo y entrega, sin condiciones ni limitaciones, que
fomentaron en mí el deseo de superación.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile por haberme
brindado el apoyo y facilidades para la realización de esta Tesis,

A la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile
(CONICYT), que aportó los recursos financieros para el desarrollo de la investigación,
sin los cuales esta Tesis no sería posible,

A los profesores Dr. Cristián Henríquez, Dra. María Mardones y Dr. Esteban Sagredo,
por haberme acogido con confianza y cuya guía, comentarios y sugerencias, han
permitido que esta tesis sea una realidad,

Al Dr. José Manuel Cordobés por su ayuda en la programación y el desarrollo de las
ecuaciones matemáticas para el experimento de velocidad de caída de arena en agua,

Al Ing. Alexei Rueda por su entusiasmo al compartir el experimento de velocidad de
caída de arena en agua,

Al M.Sc. Elier Córdova, quien continuó a partir del año 2000 y hasta la actualidad con el
monitoreo de los perfiles de playa, algunos de los cuales han sido utilizado en la
presente investigación,

Al M.Sc. Ernesto Chang y otros colegas del Instituto de Meteorología de Cuba por la
ayuda prestada,

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, donde laboré durante
diecisiete años y donde pude cultivar mi interés en el estudio de las playas y los espacios
litorales,

A todas aquellas personas que me llenaron de aliento y me dieron fuerzas e inspiración
para el desarrollo de esta Tesis,

A todos, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problema.....	7
1.2. Hipótesis.....	7
1.3. Objetivos.....	8
II. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1. Morfodinámica de playa.....	10
2.2. Modelación morfoodinámica de playas.....	13
2.3. Modelos de perfil de equilibrio	14
2.4. Aplicación del modelo de perfil de equilibrio.....	22
III. METODOLOGÍA.....	24
3.1. Área de estudio.....	24
3.2. Materiales y métodos.....	27
3.2.1. Análisis de las particularidades morfológicas, dinámicas y sedimentarias de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.....	27
3.2.1.1. Geomorfología.....	27
3.2.1.2. Hidrodinámica.....	29
3.2.1.3. Sedimentos.....	31
3.2.1.4. Características de las playas.....	32
3.2.2. Evaluación de la magnitud y causas de los procesos de erosión-sedimentación.....	33
3.2.2.1. Identificación de la erosión en las playas.....	33
3.2.2.2. Magnitud de la erosión.....	35
3.2.2.3. Causas de la erosión.....	36
3.2.3. Perfil de equilibrio que mejor se ajustan a las características de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.....	39
3.2.3.1. Determinación del parámetro (A) en los modelos de perfil de equilibrio.....	39
3.2.3.1.1. Medición de la velocidad de caída de las arenas.....	40
3.2.3.2. Determinación del parámetro (m).....	44

3.2.3.3.	Ajuste de los modelos del perfil de equilibrio para las playas del litoral nororiental.....	46
3.2.4.	Determinación del estado morfodinámico modal de las playas biogénicas	48
3.2.5.	Ajuste de los modelos matemáticos de perfil de equilibrio para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playa.....	50
3.2.5.1.	Consideraciones tenidas en cuenta en el diseño de las playas.....	53
3.2.5.2.	Efectividad de los trabajos de regeneración de playa.....	57
IV.	RESULTADOS.....	60
4.1.	Particularidades morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias del litoral nororiental de Cuba.....	60
4.1.1.	Geomorfología.....	60
4.1.2.	Hidrodinámica.....	66
4.1.3.	Sedimentos.....	70
4.1.4.	Características generales de las playas	72
4.2.	La erosión en las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.....	77
4.2.1.	Identificación de la erosión en las playas.....	77
4.2.2.	Magnitud de la erosión.....	79
4.2.3.	Causas de la erosión.....	81
4.2.3.1.	Régimen hidrodinámico.....	82
4.2.3.3.	Los eventos ENOS.....	84
4.2.3.2.	Eventos hidrometeorológicos extremos.....	85
4.2.3.4.	El aumento del nivel del mar.....	88
4.3.	Perfil de equilibrio de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba	90
4.3.1.	Experimento de velocidad de caída.....	90
4.3.2.	Determinación del parámetro (A).....	96
4.3.3.	Determinación del parámetro (m).....	97
4.3.4.	Modelo de perfil de equilibrio propuesto.....	100
4.3.5.	Ajuste de las ecuaciones de cálculo para proyectos de regeneración de playa.....	101
4.4.	Estado morfodinámico modal en playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.....	103
4.4.1.	Características de los estados morfológicos de las playas del litoral nororiental.....	104
4.5.	Validación de las ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena en los proyectos de regeneración de playas.....	107
4.5.1.	Playa Estero Ciego.....	107
4.5.2.	Playa Don Lino.....	110

V.	DISCUSIÓN.....	114
5.1.	Particularidades morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias del litoral nororiental de Cuba.....	114
5.2.	La erosión en las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.....	115
5.3.	Perfil de equilibrio de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.....	120
5.4.	Estado morfodinámico modal en playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.....	123
5.5.	Validación de las ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena en los proyectos de regeneración de playas	126
5.6.	Limitaciones materiales, teóricas y metodológicas de la investigación	129
VI.	CONCLUSIONES.....	132
VII.	RECOMENDACIONES.....	137
VIII.	BIBLIOGRAFÍA.....	139
IX.	ANEXOS.....	162
	Anexo 1. Listado de las playas del litoral nororiental de Cuba referidas en el estudio.....	162
	Anexo 2. Ficha técnica de las 12 playas representativas del litoral nororiental de Cuba.....	164
	Anexo 3. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de verano de 2016.....	176
	Anexo 4. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de invierno de 2018.....	182
	Anexo 5. Identificación de geo formas de estados geomorfológicos en playas del litoral nororiental para la etapa de verano (agosto de 2017).....	188
	Anexo 6. Identificación de geo formas de estados geomorfológicos en playas del litoral nororiental para la etapa de invierno (enero-febrero/2018).....	190
	Anexo 7A. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión Este (Guantánamo).....	192
	Anexo 7B. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión central (Holguín).....	193
	Anexo 7C. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión Oeste (Las Tunas).....	196

Anexo 8. Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth Pro y error de ajuste.....	197
Anexo 9A. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión Este, Guantánamo).....	198
Anexo 9B. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión central, Holguín).....	198
Anexo 9C. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión Oeste, Las Tunas).....	202
Anexo 10. Estado modal de las playas por rumbo de incidencia del oleaje.....	203
Anexo 11. Evaluación de procesos costeros a través de perfiles de playas..	208
Anexo 12. Datos de entrada y resultados del experimento de velocidad de caída de arenas biogénicas.....	213
Anexo 13. Curvas de los cinco modelos de ajuste del perfil de equilibrio....	229

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 3.1.	Ecuaciones utilizadas para el cálculo del parámetro (A).....	40
Tabla 3.2.	Parámetros medios de los perfiles de playa en Estero Ciego.....	53
Tabla 3.3.	Parámetros medios del perfil de playa en la caleta Minint.....	55
Tabla 3.4.	Variación del volumen de arena en Estero Ciego teniendo en cuenta el factor Ra	57
Tabla 3.5.	Comportamiento del volumen de arena en playa Don Lino.....	58
Tabla 4.1.	Porcentaje de tipos de costa en el litoral nororiental de Cuba.....	62
Tabla 4.2.	Altura media ponderada del oleaje significativo en el litoral nororiental de Cuba.....	68
Tabla 4.3.	Diámetro medio y coeficiente de selección de las arenas de las playas del litoral nororiental	71
Tabla 4.4.	Valores promedio de los elementos morfológicos de las playas del litoral nororiental	73
Tabla 4.5.	Categorías de los procesos costeros en el litoral nororiental de Cuba.....	77
Tabla 4.6.	Variación de la línea litoral a través de perfiles de playas.....	78
Tabla 4.7.	Relación de los procesos de erosión - acumulación con presencia o no de elementos morfológicos del perfil de playa.....	82
Tabla 4.8.	Retroceso esperado de la línea litoral para playas del litoral nororiental...	88
Tabla 4.9.	Pronóstico de las playas que se perderían por el retroceso de la línea litoral.	89
Tabla 4.10.	Resumen de cantidad de ensayos válidos según fracciones granulométricas.....	90
Tabla 4.11.	Resumen de velocidad de caída por fracciones granulométricas.....	91
Tabla 4.12.	Determinación del parámetro (A) para ajuste de perfil de equilibrio de playa.....	96
Tabla 4.13.	Parámetro (m) de mejor ajuste obtenido para las playas consideradas en el estudio.....	98
Tabla 4.14.	Error de ajuste de modelos de perfil de equilibrio.....	99
Tabla 4.15.	Estado morfodinámico de las playas del litoral nororiental de Cuba.....	102
Tabla 4.16.	Parámetros (A) y (m) según los diferentes modelos para Estero Ciego.....	108
Tabla 4.17.	Volumen de arena necesario en Estero Ciego según tres modelos.....	109

Tabla 4.18.	Parámetros (A) y (m) según los diferentes modelos para Don Lino.....	110
Tabla 4.19.	Volúmenes necesarios en Don Lino según los modelos.....	112
Tabla 5.1.	Ecuaciones para el cálculo del volumen de arena requerido en los proyectos de regeneración de playa en el litoral nororiental de Cuba	128

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1.	Configuración en planta y perfil de los seis estados de las playas.....	12
Figura 2.2.	Esquema de un perfil de playa.....	15
Figure 2.3.	Representación dimensional del perfil de equilibrio en playas, dependiendo del exponente (m).....	17
Figura 3.1.	Contexto geográfico del área de estudio.....	25
Figura 3.2.	Localización de las estaciones meteorológicas, oceanográfica y de mareas en el litoral nororiental de Cuba.....	30
Figura 3.3.	Equipamiento utilizado en el levantamiento de los perfiles de playa.....	35
Figura 3.4.	Instrumental de laboratorio utilizado para análisis de velocidad de caída.....	41
Figura 3.5.	Tipos básicos de perfiles de alimentación de arena en playas.....	46
Figura 3.6.	Trabajos de regeneración de playas.	52
Figura 4.1.	Formas del relieve costero característico del litoral nororiental.....	64
Figura 4.2.	Esquema de perfiles característicos en la plataforma marina del litoral nororiental de Cuba.....	65
Figura 4.3.	Distribución de las playas terrígenas por provincia.....	66
Figura 4.4.	Distribución porcentual del oleaje por rumbos.....	67
Figura 4.5.	Comportamiento del oleaje habitual en el litoral cubano.....	68
Figura 4.6.	Amplitud media de la marea en el archipiélago cubano y litoral nororiental de Cuba.....	69
Figura 4.7.	Composición genética de las arenas de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba y otras playas del archipiélago cubano.....	70
Figura 4.8.	Génesis de los sedimentos de las playas del litoral nororiental de Cuba..	73
Figura 4.9.	Perfil típico de las playas del litoral nororiental de Cuba.....	75
Figura 4.10.	Tipos de costa y procesos litorales en el litoral nororiental de Cuba.....	76
Figura 4.11.	Evidencias erosivas más recurrentes encontradas en las playas.....	78
Figura 4.12.	Magnitud de los procesos de erosión en playas de la subregión central del litoral nororiental.....	80
Figura 4.13.	Procesos acumulativos o estabilidad en playas de la subregión Oeste del litoral nororiental.....	80
Figura 4.14.	Fuerte erosión en el extremo noreste de playa Punta Tomate.....	81

Figura 4.15.	Estacionalidad de los procesos de erosión y acumulación en las playas en caleta.....	83
Figura 4.16.	Récord de incidencia de frentes fríos por temporada y su relación con El Niño.....	84
Figura 4.17.	Frecuencia de ocurrencia de inundaciones costeras en el litoral nororiental de Cuba por eventos hidrometeorológicos extremos.....	86
Figura 4.18.	Procesos erosivos en la porción central de playa Maguana.....	87
Figura 4.19.	Curva de velocidad de caída obtenida en el experimento y su comparación con otras curvas.....	92
Figura 4.20.	Composición genética de las arenas consideradas en el experimento contrastadas con la arena de playa Varadero.....	93
Figura 4.21.	Vista ampliada de los granos de arena por fracción granulométrica.....	94
Figura 4.22.	Granulometría media de la arena de las playas del litoral nororiental de Cuba.....	95
Figura 4.23.	Curva de velocidad de caída obtenida en el experimento eliminando los valores para las fracciones gruesas.....	95
Figura 4.24.	Principales rasgos morfológicos de las playas del litoral nororiental....	105
Figura 5.1.	Variabilidad de la línea litoral en playa Maguana.....	117
Figure A1.	Perfiles de playa en las subregiones litoral Este.....	208
Figure A2.	Perfiles de playas en la subregión central.....	209
Figure A3.	Perfiles de playa en las subregiones litoral Oeste	212
Figura A4.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Maguana.....	229
Figura A5.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Guardalavaca.....	229
Figura A6.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Estero Ciego.....	230
Figura A7.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Yuraguanal.....	230
Figura A8.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Pesquero.....	231
Figura A9.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Don Lino.....	231
Figura A10.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Minint.....	232
Figura A11.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Blanca.....	232

Figura A12.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Los Bajos.....	233
Figura A13.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Corella.....	233
Figura A14.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Punta Tomate.....	234
Figura A15.	Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa La Llanita.....	234

RESUMEN

La erosión en las playas y en consecuencia la pérdida del recurso, a largo plazo, es uno de los principales problemas ambientales que afecta al litoral nororiental de Cuba. Esta situación se agrava en la actualidad por el aumento del nivel medio del mar provocado por el cambio climático. La necesidad de modelos numéricos predictivos de perfil de equilibrio que permitan describir, de forma adecuada, el funcionamiento morfodinámico de las playas del litoral nororiental de Cuba, como sustento teórico de los trabajos para el control de la erosión en dichas playas, fue identificado como el principal problema. El principal objetivo de la investigación es definir un modelo de perfil de equilibrio que describa adecuadamente las características geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias y el estado morfodinámico modal de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, como sustento teórico de los trabajos para el control de la erosión en dichas playas. Se toman como referencia 12 playas, que fueron caracterizadas a partir de información levantada en terreno en las etapas de invierno (2017, 2018) y verano (2016, 2017). Para la definición del perfil de equilibrio que mejor se ajusta a las características de las playas, se compararon varios modelos, algunos de uso para playas cubanas y otros de amplio uso universal. Tomándose como referencia dos proyectos de regeneración de playas, se evalúa la conveniencia de utilizar los nuevos coeficientes obtenidos (parámetros A y m), en el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playa. El nuevo modelo propuesto permitió el ajuste de las ecuaciones de cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playa, en función de las características y particularidades geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental. El análisis del comportamiento de los volúmenes de arena vertidos en dos playas (Estero Ciego y Don Lino), mostró que las ecuaciones de cálculo ajustadas en su parámetro (A), (dependiente de la velocidad de caída de la arena) y el parámetro (m), (relacionado con la hidrodinámica de la zona de rompiente), reflejan con mayor precisión y objetividad el comportamiento experimentado por ambas playas, validando la utilización del parámetro $m=0,58$ y un valor de $A=0,67\omega_s^{0,56}$, para representar el perfil de equilibrio en las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, con estados morfodinámicos reflectivo e intermedio. Las condiciones geográficas, la geomorfología y las condiciones climáticas del litoral nororiental de Cuba, inciden directamente en el comportamiento morfodinámico de las playas, debido a los efectos que generan las tormentas tropicales, los huracanes, los eventos ENOS y el incremento del nivel del mar en estas playas.

I. INTRODUCCIÓN

En Cuba, el turismo internacional aporta aproximadamente el 11 % de los ingresos en divisas (Ministerio de Turismo, 2015). A la vez constituye una importante fuente de empleo, aumentando sustancialmente los ingresos y elevando la calidad de vida de los pobladores de los territorios donde se desarrolla. Dentro de éste, el turismo de sol y playa, representa más del 70 %, condicionado por las excelentes playas que se encuentran a lo largo de todo el archipiélago cubano y las favorables condiciones del clima durante todo el año.

La política de desarrollo del turismo de sol y playa en Cuba, se ha conceptualizado, desde los inicios, con un enfoque de conservación y mantenimiento de las condiciones naturales de las playas, así como la recuperación ambiental de los espacios impactados negativamente, tanto por el turismo como por otras actividades económicas.

La erosión en las playas es uno de los problemas que afecta el desarrollo de la actividad turística en Cuba. Con el retroceso de la línea de costa, se reduce el área de la playa y aparecen escarpes y afloramientos rocosos en la zona intermareal. Con ello disminuye la calidad de la playa de acuerdo al estándar de calidad¹ que se ha establecido para el desarrollo del turismo en Cuba. Ello genera pérdidas de ingresos en las instalaciones hoteleras, al disminuir los niveles de ocupación a la vez que se requieren mayores gastos de promoción.

La erosión en las playas cubanas no es un problema reciente. Rodríguez y Córdova (2006) reportaron que el 58,6% de las playas del litoral nororiental de Cuba estaban afectadas por procesos erosivos, con retrocesos de la línea litoral inferiores a 1,2 m/año. Posteriormente, Rodríguez et al. (2009) determinó que el 63,8% de las playas del litoral de Holguín tenían una tendencia erosiva, también con magnitudes inferiores a 1,2 m/año, debido fundamentalmente a la combinación de factores naturales y antropógenos.

¹ NC 93-06-201/1988. Sistema de normas para la protección del medio ambiente. Paisaje. Áreas de playa. Reglas generales de explotación y conservación.

Con anterioridad, Juanes (1996) había reportado que el 86% de las playas cubanas estaban afectadas por la erosión, debido a causas relacionadas con el abastecimiento sedimentario. También Tristá (2003) estima que el 100 % de las playas interiores del centro y occidente de Cuba, estaban afectadas por procesos erosivos, debido fundamentalmente a factores antrópicos.

Diversos estudios evidencian que la erosión es un fenómeno generalizado en la mayoría de las playas del mundo. Estos son los casos de la costa del Reino Unido e Irlanda (Masselink y Russell, 2013); Cancún y la Riviera Maya (Guido et al., 2009); El Salvador (Rodríguez y Beltrán, 2012); Cartagena de Indias (Rangel y Posada, 2013); las playas del Japón (Yoshida et al., 2013); la costa Este de la Florida (Houston y Dean, 2016); la costa de Perú (Rodríguez et al., 2016); la costa de Chile Central (Martínez et al., 2018), entre muchos otros sectores de costas del mundo.

Se ha probado que la tasa de erosión en las playas aumenta significativamente en áreas urbanizadas, debido principalmente a la ocupación y consiguiente destrucción de las dunas y la vegetación costera (Camacho, 2003; Sommer, 2005; Masselink y Russell, 2013), la reducción de los aportes de sedimentos fluviales inducida por la construcción de infraestructuras (Bird y Lewis, 2015), la existencia de espigones que alteran las corrientes de deriva litoral y extrapolan los procesos erosivos a áreas vecinas (Morang y Melton, 2001), el aumento de la reflexión del oleaje debido a la interacción con estructuras artificiales (Morang y Melton, 2001; Schwartz, 2005) y las actividades extractivas en dunas, bermas y plataforma marina para la obtención de arena y material para la industria en general (Rodríguez et al., 2009).

Además de las causas señaladas, la erosión en las playas es causada por los efectos de los fuertes oleajes provocados por tormentas tropicales y huracanes (UNEP/GPA, 2003; Aldana et al., 2009; Carranza-Edwards, 2010; Mahabot et al., 2017). A ello se suma los efectos del cambio climático, relacionados con el ascenso del nivel del mar y el aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes (Harley y Hughes, 2006; Nicholls y Cazenave, 2010; Merlotto et al., 2013; IPCC, 2014). Por ejemplo, la temporada

ciclónica del 2005, constituyó récord de tormentas tropicales en la cuenca del océano Atlántico, el mar Caribe y el golfo de México, siendo Katrina el huracán más recordado en dicha temporada. Además, la temporada ciclónica del 2017, ha sido la séptima más activa registrada desde 1851, y la temporada más activa desde el año 2005 (NOAA, 2017).

La regeneración de playas mediante el aporte externo de arena, se ha convertido en la principal solución para mitigar los procesos erosivos que se aprecian en las playas cubanas. Ello se debe a que los resultados se obtienen de manera inmediata y no se introducen elementos ajenos al medio. Esta solución además de proteger la línea litoral contra la erosión, proporciona un mayor atractivo estético y uso recreativo de las playas, en comparación con las soluciones tradicionales de ingeniería costera tales como rompeolas, espigones y muros (Hanson et al., 2002; Dean, 2003; Aragonés et al., 2016; Karasu et al., 2016; Ludka et al., 2018; Pranzini, et al., 2018). También es considerada como una importante alternativa para la prevención de desastres, incluyendo el aumento del nivel medio del mar, así como en la conservación de los ecosistemas (Yoshida et al., 2014; Karasu et al., 2016; Chiva et al., 2018).

Sin embargo, para llevar a cabo dichas actuaciones es necesario contar con antecedentes de carácter científico y prácticos que justifiquen y validen la conveniencia de llevar a cabo las mismas, así como modelos numéricos predictivos que permitan estimar los volúmenes de arena necesarios a verter en las playas para contrarrestar los efectos de la erosión, así como para evaluar la permanencia de la arena en las playas. Por otro lado, el enfrentamiento de la erosión mediante la aportación exclusiva de arena, depende de la existencia de arena con características similares a las presentes en la playa a regenerar, con posibilidades técnicas de extracción a un costo razonable. También está condicionado a los daños ecológicos que las extracciones del material del fondo, podrían provocar a los ecosistemas marinos, incluyendo las playas vecinas.

Como fundamentos teóricos de los trabajos de regeneración de playas, en Cuba se han estado utilizando modelos y ecuaciones matemáticas que han sido desarrollados para las

costas continentales (fundamentalmente de los Estados Unidos) (ej. Tristá, 2003 y García, 2005), los cuales fueron desarrollados en función de las características de las playas allí existentes: playas con estado morfodinámico disipativo y constituidas fundamentalmente por los sedimentos acarreados por los ríos y la destrucción de la costa (arenas de granos redondeados, constituidos fundamentalmente por cuarzos y feldespatos). Estos modelos y ecuaciones tomadas de la literatura anglosajona, contienen un grupo de parámetros, entre ellos la velocidad de caída de las arenas, la cual es diferente en las playas cubanas.

En el caso de las playas cubanas, éstas son fundamentalmente de génesis biogénica y están constituidas, principalmente, por restos esqueléticos de moluscos, foraminíferos, corales y algas calcáreas que habitan en la laguna arrecifal o el propio arrecife. Por ello, el uso de cualquier modelo, como sustento teórico de los trabajos de regeneración de las playas, requiere considerar estas diferencias.

El tema adquiere mayor relevancia si tenemos en cuenta que el litoral nororiental de Cuba tiene además características hidrodinámicas (oleajes, corrientes y mareas) diferentes al resto del archipiélago cubano y las playas están constituidas por sedimentos con una composición genética distinta al resto de las playas de Cuba. Adoptar cualquier modelo sin tener en cuenta estas diferencias, podría tener consecuencias tanto técnicas y ambientales, como de efectividad de las soluciones propuestas y no contribuirían a la solución de los problemas de erosión que se aprecian en algunas playas.

En los estudios sobre la velocidad de caída de las partículas de arena de origen biogénico realizados por Komar y Reimers (1978), Komar y Baba (1984), Komar y Clemens (1986) y Cheng (1997), se demuestra que los granos calcáreos (arenas biogénicas), propios de los ambientes tropicales, tienen un rango mucho más amplio de tamaños y formas, en comparación con los granos de cuarzo, que están presente en el 70 % de las playas continentales.

Aunque existen estudios en Cuba para la determinación de la velocidad de caída de las partículas y la modelación de los perfiles de equilibrio, realizados por especialistas

soviéticos, referidos por García (2005), las expresiones obtenidas son restringidas a la playa de Varadero y no tienen en cuenta las distintas variables que las afectan, incluyendo los efectos combinados del tamaño, densidad, porosidad y forma de las partículas.

Basado en la función $h(y)=Ay^{(m)}$, donde (y) es la distancia en metros perpendicular a la dirección de la orilla, (h) la profundidad del agua en metros, (A) el factor de escala dependiente del diámetro medio (D_{50}) de la arena nativa y el exponente (m) un valor teórico dependiente de la energía del oleaje, el modelo de Dean (1987, 1991), se ha convertido en el modelo más utilizado en los trabajos de regeneración de playas en Cuba y el mundo. Ello se debe a que ha sido ajustado con un número muy grande de perfiles y describe de manera aceptable las características principales de los perfiles de equilibrio con un número mínimo de parámetros, simplificando el problema real. Sin embargo, este modelo fue desarrollado considerando una dispersión uniforme de la energía del oleaje, por lo que es aplicable a playas con estado morfodinámico disipativo.

Por ello, las investigaciones en el campo de los perfiles de equilibrio en playa, se han enfocado en la definición de los parámetros (A) y (m), relacionados con las características del sedimento y la hidrodinámica litoral, y en la aplicabilidad del modelo de perfil de equilibrio de Dean (1987, 1991), y las ecuaciones derivadas de él, en los proyectos de regeneración de playa, incluyendo playas de estados morfodinámicos diferentes al del estudio original.

Una de las técnicas de análisis de la morfodinámica de playas, en la escala de largo-plazo (años a décadas), es la búsqueda de la posición de equilibrio, o posición media multianual que adopta una playa en su forma en planta y perfil, teniendo en cuenta que los agentes dinámicos (oleajes, corrientes y mareas), geomorfológicos (morfología litoral, sedimentos) y biológicos (abundancia y distribución de organismos formadores de arena), están acotadas en una playa (Zenkovich, 1967; Short, 1999; Medina et al., 2001; González et al., 2010; Ruggiero et al., 2016).

A largo plazo, la playa tenderá a presentar un perfil determinado por las características del sedimento, las condiciones del oleaje y del estado previo de la playa (Short, 2006; Merlotto et al., 2013), sobre el cual se han establecido las bases teóricas sobre los modelos de equilibrio de perfil y en planta de una playa y su aplicación para los trabajos de regeneración de playas, entre otras aplicaciones.

Se entiende como perfil de equilibrio, el perfil que se establece bajo condiciones particulares, a largo plazo, del clima marítimo y de los sedimentos y que no muestra cambios significativos en el tiempo (Dean, 1977; Schwartz, 2005). Asimismo, a los efectos de la presente investigación se entiende por regeneración de playas, las actuaciones dirigidas a restituir las condiciones naturales de las playas mediante el vertimiento artificial de arena.

Además del análisis del comportamiento dinámico, respuesta y efectividad de los proyectos de regeneración de playas, las aplicaciones de la morfodinámica y perfil de equilibrio de playa son diversos. Entre las aplicaciones se señalan, el dimensionamiento de las longitudes y cotas de obras de protección del litoral tales como espigones de contención de arenas, diques exentos y rompeolas y múltiples modelos numéricos y conceptuales (González y Medina, 2001; Ozkan-Haller y Brundidge, 2004; Sabela y Sánchez, 2013; Yoshida et al., 2014; Ludka et al., 2018).

Estos elementos de repercusiones económicas, estéticas y sociales confieren, por sí sólo, una gran importancia a las formulaciones de equilibrio de playa, pues de su precisión y capacidad de representar la realidad, depende el éxito de gran número de actuaciones en la costa, incluyendo la gestión del riesgo, la planificación y el ordenamiento (González y Medina, 2001; Ozkan-Haller y Brundidge, 2004; Sabela y Sánchez, 2013; Yoshida et al., 2014; Pranzini et al., 2018).

1.1. Problema

Como problema se identifica la necesidad de modelos numéricos predictivos de perfil de equilibrio que permitan describir, de forma adecuada, el funcionamiento morfodinámico de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba como sustento teórico de los trabajos para el control de la erosión en dichas playas.

Se toma como caso de estudio el litoral nororiental de Cuba teniendo en cuenta los siguientes elementos:

- Tiene un grupo de singularidades geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias que lo distinguen respecto a otros sectores del archipiélago cubano.
- Hay pocos estudios sobre las características de este litoral, los procesos erosivos que afectan las playas y las soluciones más viables para enfrentar los efectos de la erosión.
- Hay una base de datos de perfiles de playas que aportan información relevante para la definición del perfil de equilibrio de playas.

1.2. Hipótesis

Hipótesis General

El litoral nororiental de Cuba tiene características geomorfológicas, hidrodinámicas, sedimentarias y morfodinámicas diferentes al resto del archipiélago cubano, razón por lo cual cualquier modelo, como sustento teórico en los trabajos de control de la erosión, debería considerar las singularidades de estos parámetros, para definir adecuadamente el perfil de equilibrio de estas playas.

Hipótesis específicas

- a) Las condiciones geográficas, la geomorfología y las condiciones climáticas del litoral nororiental de Cuba, permiten suponer que la frecuencia de tormentas, la ocurrencia de huracanes y el incremento del nivel del mar, asociado al cambio climático global, podrían controlar la hidrodinámica litoral.
- b) Considerando que el litoral nororiental de Cuba está constituido principalmente por playas biogénicas, se sugiere que las características texturales y composicionales de estas playas inciden en el comportamiento morfodinámico modal de éstas.
- c) Si los modelos de perfil de equilibrio de playas de Dean (1991) y García (2005), no representan adecuadamente las condiciones geográficas, geomorfológicas y climáticas del litoral nororiental de Cuba, entonces la incorporación de dichas características en los modelos, permitiría definir un nuevo modelo de perfil de equilibrio que caracterice adecuadamente las playas del litoral nororiental y posibiliten un cálculo más preciso de los volúmenes de arena requeridos para el control de la erosión en sus playas.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Definir un modelo de perfil de equilibrio que describa adecuadamente las características geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias y el estado morfodinámico modal de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, como sustento teórico de los trabajos para el control de la erosión en dichas playas.

Objetivos específicos

- a) Analizar las características geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba.

- b) Evaluar la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación y posibles causas de dichos procesos en las playas del litoral nororiental, diferenciando los que se deben a factores naturales de alcance regional y global, de las que responden a factores locales y acciones antrópicas.
- c) Definir los parámetros (A) y (m) del modelo de perfil de equilibrio de playas que mejor se ajusta a las características geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba.
- d) Determinar el estado morfodinámico modal de las playas biogénicas objeto de estudio.
- e) Validar el nuevo modelo de perfil de equilibrio en las ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de las playas, utilizando como casos de estudios las playas Estero Ciego y Don Lino.

II. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Morfodinámica de playas

En la actualidad, los estudios de morfodinámica de playas intentan explicar la respuesta de los sedimentos y las características morfológicas del litoral, a los procesos hidrodinámicos, siendo el oleaje, las corrientes y las mareas los mecanismos dinámicos encargados de la erosión, transporte y sedimentación del material en la costa y por tanto, los factores que definen las características morfológicas del litoral (Vidal et al., 1995; Medina et al., 2001; Bernabéu et al., 2002; Ruggiero et al., 2016). La granulometría, la forma en planta y la sección transversal de la playa son elementos activos, cuya estabilidad dinámica depende fundamentalmente, de la estabilidad energética y del ángulo de incidencia del oleaje (Zenkovich, 1967; Medina et al., 2001; Schwartz, 2005; Ruggiero et al., 2016).

Las variaciones morfológicas en playas, ocurren en distintas escalas espaciales y temporales. Una de las técnicas de análisis de la morfodinámica de playas, en la escala de largo-plazo (años a décadas), es la búsqueda de la posición de equilibrio, o posición media multianual que adopta una playa en su forma en planta y perfil, teniendo en cuenta que los agentes dinámicos (oleajes, corrientes y mareas), geomorfológicos (morfología litoral, sedimentos) y biológicos (abundancia y distribución de organismos formadores de arena), están acotados en una playa (Zenkovich, 1967; Medina et al., 2001; Requejo, 2005; Short, 2006; Ruggiero et al., 2016).

A largo plazo, la playa tenderá a presentar un perfil determinado por las características del sedimento, las condiciones del oleaje y del estado previo de la playa (Short, 2006 y Merlotto et al., 2013), sobre el cual se han establecido las bases teóricas sobre los modelos de equilibrio de perfil y en planta de una playa y su aplicación para los trabajos de regeneración de playas.

Wright y Short (1984) definen que el estado modal de la playa podía ser determinado utilizando el parámetro adimensional (Ω) o Índice de Dean que permite clasificar las

playas en disipativas, reflectivas e intermedias, atendiendo a los parámetros de la ola y del tamaño del grano del sedimento (Ec.1).

$$\Omega = \frac{H_b}{w_s T} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

H_b , altura de la ola de rompiente,

w_s , velocidad de caída del sedimento,

T , periodo de la ola.

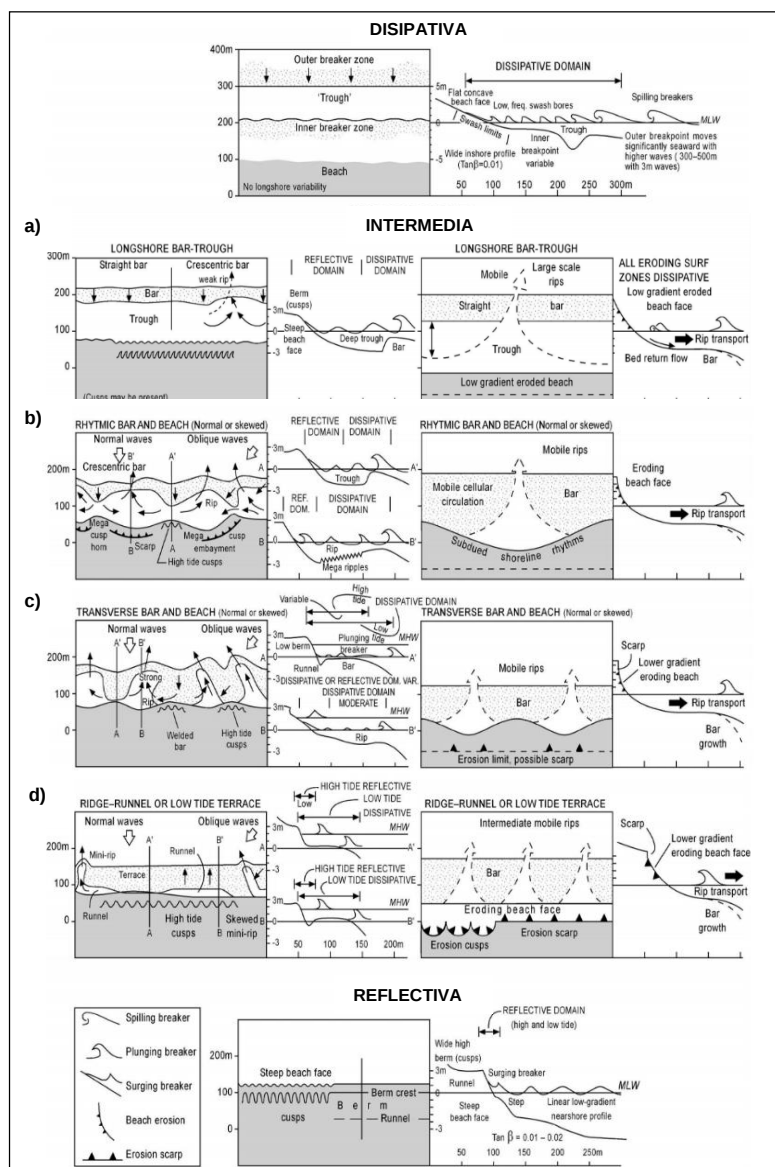
Según esta ecuación, el valor 1 define el umbral de una playa reflectiva a intermedia, un valor 6, un umbral de intermedia a disipativa, por lo que las playas de tipo intermedias tienen un valor de Ω mayor que 1 e inferior a 6.

También Wright y Short (1983, 1984) establecieron que las playas disipativas deben su origen a la combinación de olas altas ($>2,5$ m) y arenas finas ($D_{50} < 0,2$ mm). Se caracterizan por ser playas amplias con poca pendiente en la cara y en la zona de rompiente. Las olas rompen entre 200 m y 500 m de la línea de costa. Desde el punto de vista dinámico, las fuertes olas incidentes comienzan a descrestarse fuera de la zona de rompiente y se deterioran progresivamente al atravesar dicha zona. De este modo, en la zona de rompiente ocurre una disipación del oleaje incidente, convirtiéndolo en olas de baja frecuencia.

En cambio, las playas reflectivas se producen por oleaje de baja altura ($<1,0$ m), particularmente en áreas con sedimentos de granulometría media ($Md \geq 0,6$ mm). Representan el extremo acumulativo en que la arena potencialmente activa es almacenada en la parte emergida. La playa es relativamente alta, usualmente tiene dos bermas, o cúspides en la cresta de la berma de pleamar (Wright y Short, 1984).

Para Wright y Short (1983, 1984) las playas intermedias representan una transición de playas disipativas a playas reflectivas, desde la condición de olas altas donde el sedimento es depositado hacia la zona de rompiente a una condición de oleaje de baja energía, donde

la arena es depositada en la parte emergida de la playa. Consecuentemente el sedimento usualmente reside en la zona de rompiente en forma de barras. Generalmente están constituidas por sedimentos medios y están sometidas a un oleaje moderado, con altura entre 1,0-1,25 m. Para Wright y Short (1983, 1984) los cuatro estados intermedios representan las más complejas formas del perfil de playa y de los procesos costeros que intervienen en su formación (Figura 2.1).



a) Con barras longitudinales (Longshore bar-trough state).

Esta forma de playa se puede desarrollar a un perfil de antecedente disipativo durante un periodo de acumulación. La ruptura de la ola ocurre encima de la barra. En contraste con las playas disipativas, las olas que rompen se reforman en aguas más profundas luego de atravesar la barra.

b) Con topografía rítmica a lo largo de la playa (Rhythmic bar and beach).

Las características son similares al estado descrito anteriormente. Los rasgos distintivos son las ondulaciones regulares que obstruyen la playa, incluyendo las zonas subáreas. Las olas incidentes dominan la circulación a lo largo de la zona de rompiente, pero los subarmónicos y oscilaciones infragravitacionales resultan importantes en algunas zonas.

c) Con barra transversal y corriente de retorno (Transverse-bar and rip state).

Esta morfología normalmente se desarrolla en sucesiones acumulativas, cuando los cuernos de las barras crecen se unen a la playa. El proceso dinámico dominante de este estado de la playa es la circulación sumamente fuerte, con corrientes de resaca que se concentran en las ensenadas.

d) Con surco y barra interna/con terraza de bajamar (Ridge and runnel/low tide terrace state).

Este estado de la playa se caracteriza por una acumulación plana de arena justamente debajo del nivel de la bajamar. La playa es típicamente disipativa en la bajamar y reflectiva en la pleamar.

Figura 2.1. Configuración en planta y perfil de los seis estados de las playas (Short, 2006)

2.2. Modelación morfodinámica de playas

La modelación morfodinámica de playa está basada en la existencia de características repetitivas en la forma y planta de las playas, teniendo en cuenta que los agentes dinámicos, geomorfológicos y biológicos están acotadas en una playa. Por ello, en el largo plazo la playa tenderá a mostrar un estado modal o más frecuente, alrededor del cual presentará cambios, en respuesta a la variabilidad de la hidrodinámica, especialmente del oleaje (Vidal et al., 1995; Medina et al., 2001; Ruggiero et al., 2016).

Basado en la función $h(y)=Ay^{(m)}$, donde (y) es la distancia en metros perpendicular a la dirección de la orilla, (h) la profundidad en metros, (A) el factor de escala dependiente del diámetro medio (D_{50}) de la arena nativa y el exponente (m) un valor teórico dependiente de la energía del oleaje, el modelo de perfil de equilibrio de Dean (1977, 1987, 1991), se han convertido en el modelo más utilizados en los trabajos de regeneración de playas en Cuba y el mundo.

Sin embargo, cuando este modelo desarrollado para playas disipativas, se aplica a playas de estados morfodinámicos diferentes, los resultados evidencian que este modelo no representa bien las características de las nuevas playas consideradas (Boon y Green, 1989; Larson, 1991; Sierra et al., 1994). Ello se debe a que el modelo de Dean, relaciona el parámetro (m) a la hidrodinámica de la zona de rompiente y el parámetro (A) a las características de los sedimentos, parámetros que adquieren rasgos particulares a lo largo de las costas del mundo.

Gracias a estos modelos, en planta y perfil, se derivan aplicaciones diversas, tanto en la gestión de la seguridad en las playas, la planificación de los recursos sanitarios, así como el comportamiento dinámico, respuesta y efectividad de los proyectos de regeneración de playas, entre otros (Benedet et al., 2004b; Sabela y Sánchez, 2013; Yoshida et al., 2014; Ludka et al., 2018; Pranzini et al., 2018).

Por ello, las investigaciones en el campo de los perfiles de equilibrio en playa, se han enfocado en la definición de los parámetros, (A) y (m) y en la aplicabilidad del modelo

de perfil de equilibrio de Dean y las ecuaciones derivadas de él, en los proyectos de regeneración de playa.

Boon y Green (1989), al estudiar los modelos matemáticos de perfil de equilibrio que mejor se ajustan a las playas del Caribe, encuentran que el modelo propuesto por Dean (1977), describe con precisión las características dinámicas de estas playas, asignándole al parámetro (m) un valor de $\frac{1}{2}$. De igual manera concluyen Tristá (2003) y García (2005) al evaluar el comportamiento de los diferentes modelos matemáticos para describir el perfil que mejor se ajusta a las playas interiores del centro y occidente de Cuba y Varadero, respectivamente, realizando sólo los ajustes necesarios en los parámetros (A) y (m). Sin embargo, en los estudios de perfil de equilibrio, Tristá (2003) y García (2005), no abordan el estado morfodinámico modal del perfil de playa, por lo que se utilizaron datos de playas disipativas, reflectivas e intermedias y luego se proponen ajustes, sin distinguir entre ellas.

2.3. Modelos de perfil de equilibrio

Los fundamentos teóricos de los modelos de perfil de equilibrio han sido tratados por Dean (1991), Tristá (2003), Coelho y Veloso (2004), Ozkan-Haller y Brundidge (2004), Requejo (2005), entre otros.

Antes de hablar de perfil de equilibrio en playas es necesario, ante todo, referirse al perfil de playa. Este se define como la variación de la profundidad (h) a una distancia de la línea litoral (x) en dirección perpendicular a ésta (Figura 2.2).

El concepto de perfil de equilibrio ha sido definido por diferentes autores. Dean (1991) considera que el perfil de equilibrio es el resultado del balance que se establece entre las fuerzas destructivas y las constructivas. Schwartz (2005), considera al perfil de equilibrio, como el perfil batimétrico que se establece, a largo plazo, bajo condiciones particulares del clima marítimo y de los sedimentos. Por su parte Dean (1977), al desarrollar su modelo de perfil de equilibrio sentó la hipótesis de que la forma del perfil no cambia en

el tiempo, sino que se mueve paralelo a sí mismo. La metodología utilizada y las propuestas de modelo de perfil de equilibrio propuesto en esta investigación, se realizan sobre la base de estas dos últimas interpretaciones.



Figura 2.2. Esquema de un perfil de playa

Fuente: Adaptado por el autor, *Coastal Engineering Manual* (2002).

Es importante señalar que la separación de la playa, en planta y perfil, se realiza en función de la hipótesis de que el transporte de arena y los cambios morfológicos de la playa, pueden descomponerse en dos modos o direcciones ortogonales, independientes entre sí, denominados transporte longitudinal y transporte transversal; pudiéndose en la naturaleza verificar ambas direcciones del transporte de los sedimentos e incluso el predominio de una con respecto a la otra (Medina et al., 2001; González et al., 2010; Raabe et al., 2010).

El transporte de sedimentos en una u otra dirección es el responsable de las variaciones del perfil de playa, resultando uno de los principales procesos que intervienen en el funcionamiento de esta. Por ello, la existencia de un perfil de equilibrio en la naturaleza es prácticamente imposible, debido a las variaciones constantes de los distintos agentes dinámicos (Medina et al., 2001; González et al., 2010).

Sin embargo, como las variaciones de los diferentes agentes (oleaje, marea, tamaño del grano de sedimento) en una playa están acotadas, la variabilidad del perfil está limitada,

pudiéndose definir un estado modal o más frecuente para ciertos periodos de tiempo (Zenkovich, 1967; Short, 1999; Medina et al., 2001; González et al., 2010; Ruggiero et al., 2016).

A partir del análisis de perfiles de playa de la costa norte danesa y de Mission Bay (California) Bruun (1954), estableció una fórmula para describir la forma general del perfil de equilibrio de la playa (Ec.2):

$$h(x) = Ax^m \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

$h(x)$; es la profundidad a una distancia (x) de la línea de costa,

A ; es un parámetro de escala relacionado con las características del sedimento,

m ; un valor empírico relacionado con la energía del oleaje.

Posteriormente Dean (1977), utilizando el método de los mínimos cuadrados, confirmó esta ecuación sobre la base de 504 perfiles medidos en la costa Atlántica y del Golfo de México en los Estados Unidos, en playas donde la dispersión de la energía de las olas por la unidad de volumen de agua es la fuerza dominante.

El exponente (m) de la ecuación 2 (Ec.2), puede asumir diferentes valores, dependiendo del tipo de dispersión de la energía de la ola. Bruun (1954) y Dean (1977), propusieron al valor de $m=2/3$, para playas disipativas, un valor que ha sido ampliamente aplicado en los proyectos de regeneración de playas en todo el mundo.

Por su parte Vellinga (1983) en trabajos de laboratorio y posteriormente de campo en las costas holandesas y Kotvojs y Cowell (1989) en la costa sureste de Australia, concluyen que el perfil de equilibrio en playas podía ser definido por una curva potencial, similar a la propuesta por Bruun (1954) y Dean (1977), donde el exponente de mejor ajuste para sus ensayos era $m=0,78$ para playas disipativas. Para playas reflectivas Kotvojs y Cowell (1989), le asignan un valor a $m=2/5$.

Para playas de tipo intermedio, Boon y Green (1989) indican un valor de $m=1/2$, para las playas del Caribe; en tanto Keulegan y Krumbein (1949), basado en la teoría lineal de oleaje y Kotvojs y Cowell (1989), en trabajos realizados en la costa sureste de Australia, refieren un valor de $m=4/7$ y $m=2/3$, respectivamente. La figura 2.3, muestra el comportamiento del perfil de playa para distintos valores de (m).

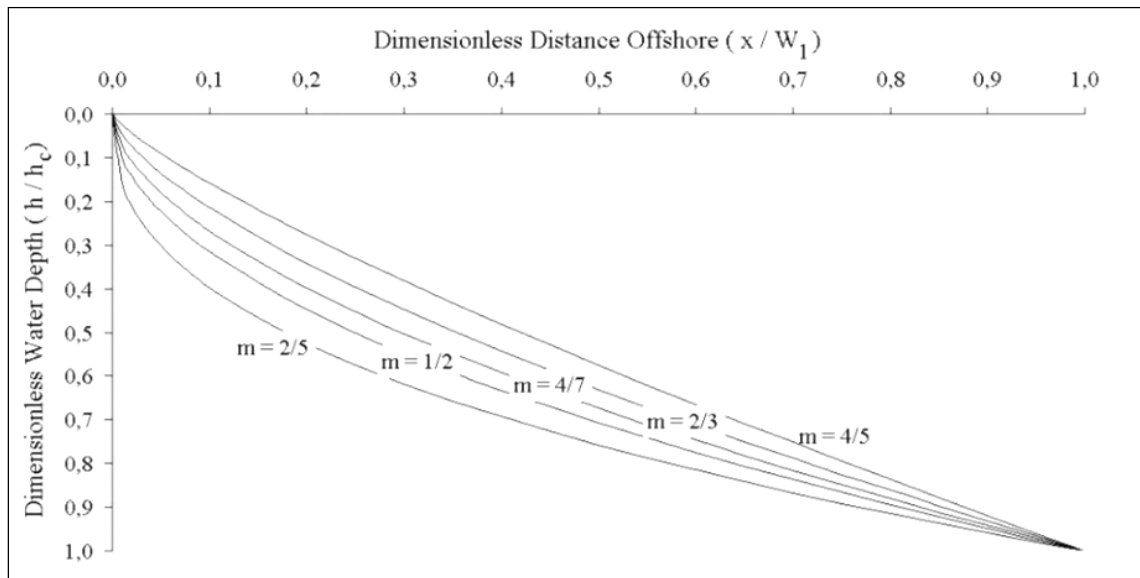


Figura 2.3. Representación dimensional del perfil de equilibrio en playas, dependiendo del exponente (m)

Fuente: Cowell et al. 1999.

Como se aprecia en la figura, la forma pronunciada del perfil, es función del exponente (m) de la ecuación de Dean (1977), que depende de la reflectividad de la playa. La inclinación del perfil es más pequeña en playas del tipo disipativas y más acentuadas en las playas reflectivas.

Pero esta ecuación, no sólo relaciona al exponente (m), sino también al parámetro (A), que depende principalmente de los sedimentos y se expresa en $m^{1/3}$ (Dean, 1977; Moore, 1982; Morang y Parson, 2002).

Dean (1977) estableció una base teórica a su modelo, basándose en la hipótesis de que la disipación de energía por unidad de volumen (D_*) en la zona de rotura es constante, definiendo (A) de la manera siguiente (Ec.3).

$$A = \left[\frac{24 D_* (D_{50})}{5 p g \sqrt{g k^2}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

D_* , dispersión de energía por unidad de volumen,

p , densidad del agua,

g , aceleración de la gravedad,

k , número de onda,

D_{50} , diámetro medio del sedimento.

A partir de la revisión de los datos analizados por Dean (1977), Moore (1982) propuso una relación empírica entre el coeficiente de proporcionalidad (A) y el tamaño del grano del sedimento. Posteriormente, Dean (1987) relacionó el parámetro (A) con la velocidad de caída del grano, transformando los datos de Moore (1982), obteniendo la expresión (Ec.4).

$$A = 0,51 \omega_s^{0,44} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

ω_s , velocidad de caída del grano expresada en m/s.

Cowell et al. (1999) refiere que la forma más válida para obtener el valor del parámetro (A) es por el ajuste de la ecuación (Ec.2), a los perfiles medidos en las playas. Sin embargo, este procedimiento no es útil para predecir los perfiles, porque se obtiene posterior a su medida (Coelho y Veloso, 2004).

También fueron propuestas otras relaciones como las que Kriebel, Kraus y Larson (1991) presentaron para tamaños de grano entre 0,1 mm y 0,4 mm (Ec.5). Cowell et al. (1999) también presentó la ecuación (Ec.6), propuesta por Dean (1997).

$$A = 2,25 \left(\frac{\omega_s^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec.5})$$

$$A = 0,067 \omega_s^{0,44} \quad (\text{Ec.6})$$

Larson (1988), para solucionar la pendiente poco realista de la costa que generan los modelos de Bruun (1954) y Dean (1977), desarrolló un nuevo modelo que incluye la gravedad. La ecuación resultante propuesta por Larson (1988) es (Ec.7).

$$y = \frac{h}{m_o} + \left(\frac{h}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

m_o , es la pendiente del perfil en la cara de la playa calculada usando los datos del perfil medio;

Bodge (1992) comprobó que una expresión exponencial aproximaba mejor la forma del perfil en equilibrio de una playa. Así desarrolló, un modelo de perfil exponencial dado por la expresión (Ec.8).

$$h = B(1 - e^{-kx}) \quad (\text{Ec.8})$$

Donde,

B y k , son unos coeficientes empíricos.

Siguiendo los trabajos de Bodge (1992), Komar y McDougal (1994) utilizaron la misma expresión exponencial en el análisis de perfiles medidos a lo largo de la costa del Delta del Nilo (Ec.9), proponiendo una expresión ligeramente diferente a la propuesta por Bodge (1992).

$$h = \frac{S_0}{k} (1 - e^{-kx}) \quad (\text{Ec.9})$$

En este caso dependía directamente de la pendiente del frente de playa (S_0) y con un único coeficiente por ajustar (k) que determina el grado de concavidad del perfil. El parámetro (S_0) está controlado por el tamaño del grano y por las condiciones del oleaje que afecta la playa.

En el caso de las playas cubanas, Tristá (2003), al estudiar los modelos matemáticos de los perfiles de equilibrio en 41 perfiles, obtenidos en 22 playas interiores del centro y occidente, concluyó que el modelo de Dean (1977), se aproxima mejor a las características particulares de las playas evaluadas que el modelo de Bodge (1992), encontrando que el valor de (m) que mejor representaba sus datos era 0,56.

La ecuación propuesta por Tristá (2003) para caracterizar el perfil de equilibrio en estas playas es Ec.10.

$$h(x) = Ax^{0,56} \quad (\text{Ec.10})$$

Sin embargo, el análisis de los resultados obtenidos por Tristá (2003) en estas playas muestra una alta variabilidad del parámetro (m), con rangos desde 0,174 hasta 0,922.

García (2005) al evaluar las actuaciones para el control de la erosión en las playas biogénicas utilizando como caso a playa Varadero, utiliza la ecuación propuesta por Dean (1977). Basado en los experimentos de velocidad de caída, realizados por especialistas soviéticos, de las arenas de playa Varadero, García (2005) encuentra una relación entre el parámetro (A) y la velocidad de caída de las partículas. Luego concluye que el modelo propuesto por Bruun (1954) y Dean (1977), con un valor del parámetro $m=2/3$, describe la forma del perfil de equilibrio de Playa Varadero, realizando sólo los ajustes necesarios en el parámetro (A), en virtud de sus ensayos.

Finalmente propone las ecuaciones (Ec.11) y (Ec.12), para describir la forma del perfil de equilibrio de las playas biogénicas, en lugar de los valores recomendados en la literatura especializada para los materiales terrígenos de las playas continentales.

$$h(x) = Ax^{0,67} \quad (\text{Ec.11})$$

$$\text{Donde: } A = 0,16D^{0,22} \quad (\text{Ec.12})$$

D , diámetro medio de la arena

En base a los elementos antes expuestos, en esta investigación se decide utilizar una ecuación del tipo potencial, como las descritas por Bruun (1954), Dean (1977, 1991), Boon y Green (1988), Tristá (2003) y García (2005).

$$h(x) = Ax^m \quad (\text{Ec.2, referida anteriormente})$$

La decisión de utilizar esta ecuación obedece a las siguientes consideraciones:

- Describe de manera aceptable, las principales características del perfil de equilibrio de playas, con un número mínimo de parámetros, simplificando el problema real.
- A partir de la función se han desarrollado numerosas aplicaciones, como el estudio del estado morfodinámico del perfil de playa (Wright y Short, 1984; Short, 2006), así como para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en trabajos de regeneración de playa (Dean, 1991; Dean y Dalryple, 2004).
- Los modelos matemáticos para describir el funcionamiento de algunas playas cubanas (Tristá, 2003; García, 2005) y del Caribe (Boon y Green, 1989), cuyas arenas resultan similares a las arenas del litoral nororiental de Cuba, utilizan esta ecuación realizando sólo los ajustes necesarios en los parámetros (A) y (m).

2.4. Aplicación del modelo de perfil de equilibrio

A partir de los modelos de perfil de equilibrio en playas, se han derivado diversas aplicaciones, tanto en la gestión de la seguridad en las playas, la planificación de los recursos sanitarios, así como el comportamiento dinámico, respuesta y efectividad de los proyectos de regeneración de playas, entre otros (Benedet et al., 2004b; Sabela y Sánchez, 2013; Yoshida et al., 2014; Ludka et al., 2018; Pranzini et al., 2018).

La regeneración de playas mediante el aporte externo de arena, se ha convertido en la principal solución para mitigar los procesos erosivos que se aprecian en las playas. Esta solución además de proteger la línea de costa contra la erosión, proporciona un mayor atractivo estético y uso recreativo de las playas, sobre las soluciones tradicionales de ingeniería costera tales como rompeolas, espigones y muros (Hanson et al., 2002; Dean, 2003; Aragonés et al., 2016; Karasu et al., 2016; Ludka et al., 2018; Pranzini, et al., 2018).

Sin embargo, el enfrentamiento de la erosión mediante la aportación exclusiva de arena, depende de la existencia de arena con características similares a las presentes en las playas a regenerar. Por ello, el estudio de las propiedades físicas del sedimento es de gran importancia en los proyectos de vertimiento artificial de arena en playas.

Los criterios de compatibilidad entre las arenas nativas y de préstamo comenzaron a utilizarse en la segunda mitad del siglo XX (ej. Krumbein, 1957; Krumbein y James, 1965; Dean, 1974; James, 1975; Dean 1991), para pronosticar las pérdidas de sedimentos en los vertimientos de arena en los trabajos de regeneración de playas, teniendo en cuenta que normalmente las arenas de préstamo y nativas son diferentes.

En 1965 Krumbein y James desarrollan un método de compatibilidad que supone que la arena de la playa está en equilibrio estricto con los procesos litorales locales y que solamente será estable aquella parte del material de relleno que se corresponde con la distribución granulométrica de la arena nativa. Estos investigadores asumen que tanto la arena nativa como la de préstamo tienen una distribución que en unidades ϕ se ajusta a una curva normal logarítmica y que la densidad, porosidad, angulosidad, rozamiento

interno del grano de arena no influyen en el problema o que al menos son similares a las de la playa.

En 1974, Dean desarrolló en La Florida un modelo matemático que supera algunas deficiencias del modelo anterior, ya que según el modelo Krumbein y James (1965) no sólo se perderían los diámetros finos del sedimento que no coincidían con la función de distribución granulométrica de la arena nativa, sino también las fracciones más gruesas. Según el modelo de Dean (1974), sólo se perderían las arenas de tamaño más fino.

Posteriormente James (1975), desarrolló un método que fue utilizado ampliamente en los años siguientes que predice el comportamiento del material de préstamo en playas, cuyas características son diferentes al material nativo. James (1975) considera que sólo tiene actividad la arena superficial de la playa y el resto del material es inerte e inactivo y define un factor de sobre relleno (R_A) que indica cuánto material de relleno se requiere verter en una playa para lograr estabilizar una determinada cantidad de arena, atendiendo a las diferencias entre el material de préstamo y la arena nativa de la playa.

Además, James (1975) propone un factor de sobre alimentación (R_J), que predice con qué frecuencia es necesario llevar a cabo la realimentación de arena utilizando el mismo material de préstamo.

Sin embargo, según Dean (2000), la experiencia internacional en los trabajos de vertimiento de arena, ha cuestionado el uso de los factores R_A (factor de sobre relleno) y R_J (factor de sobre alimentación) en los trabajos de regeneración de playa mediante el aporte externo de arena, recomendándose el uso del concepto de perfil de equilibrio en estos trabajos, cuyas características fueron tratadas en el acápite anterior.

III. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El litoral nororiental de Cuba, desde Punta Quemado, el extremo más oriental de Cuba, hasta Punta Maternillo, en la bahía de Nuevitas, tiene la singularidad de tener su costa expuesta al embate directo del oleaje oceánico, con una plataforma estrecha que no supera 1 km de ancho y de no formar parte de ninguna de las cuatro zonas de plataforma, que, desde el punto de vista geomorfológico, ha sido subdividido el archipiélago cubano. Núñez-Jiménez (1984), la denomina como región de plataforma estrecha entre la Bahía de Nuevitas y Punta de Maisí (Figura 3.1).

Este litoral tiene una extensión de 1.428 km de costas, incluyendo las costas interiores de las numerosas bahías que en las mismas se encuentran. Su costa exterior, expuesta al oleaje oceánico, tiene una extensión de 499 km y representa el 7,9% de las costas exteriores de la isla de Cuba.

La geología del litoral está representada por la Formación Jaimanitas (Jai.), compuesta por rocas jóvenes que se encuentran en una franja casi continua, paralela a la línea de costa. Se compone de rocas calizas biotriticas masivas, arrecifales, generalmente carsificadas y calcarenitas, sobre la cual aparecen depósitos de arena de la Formación Varadero (Va.). Subyacente a ésta aparece la Formación Júcaro (Jc.) compuesta por margas, margas brechosas, calizas por lo general arcillosas, calcarenitas. En general, son sedimentos carbonatados de facies sublitoral de colores amarillo y crema, que por acción del intemperismo pasan a rojo y violáceo (Orbera, 1989). La estructura geológica es en general de pendiente suave y vergencia hacia el Norte, sin complicación tectónica, apareciendo algunas de fallas y agrietamientos menores (Orbera, 1989).

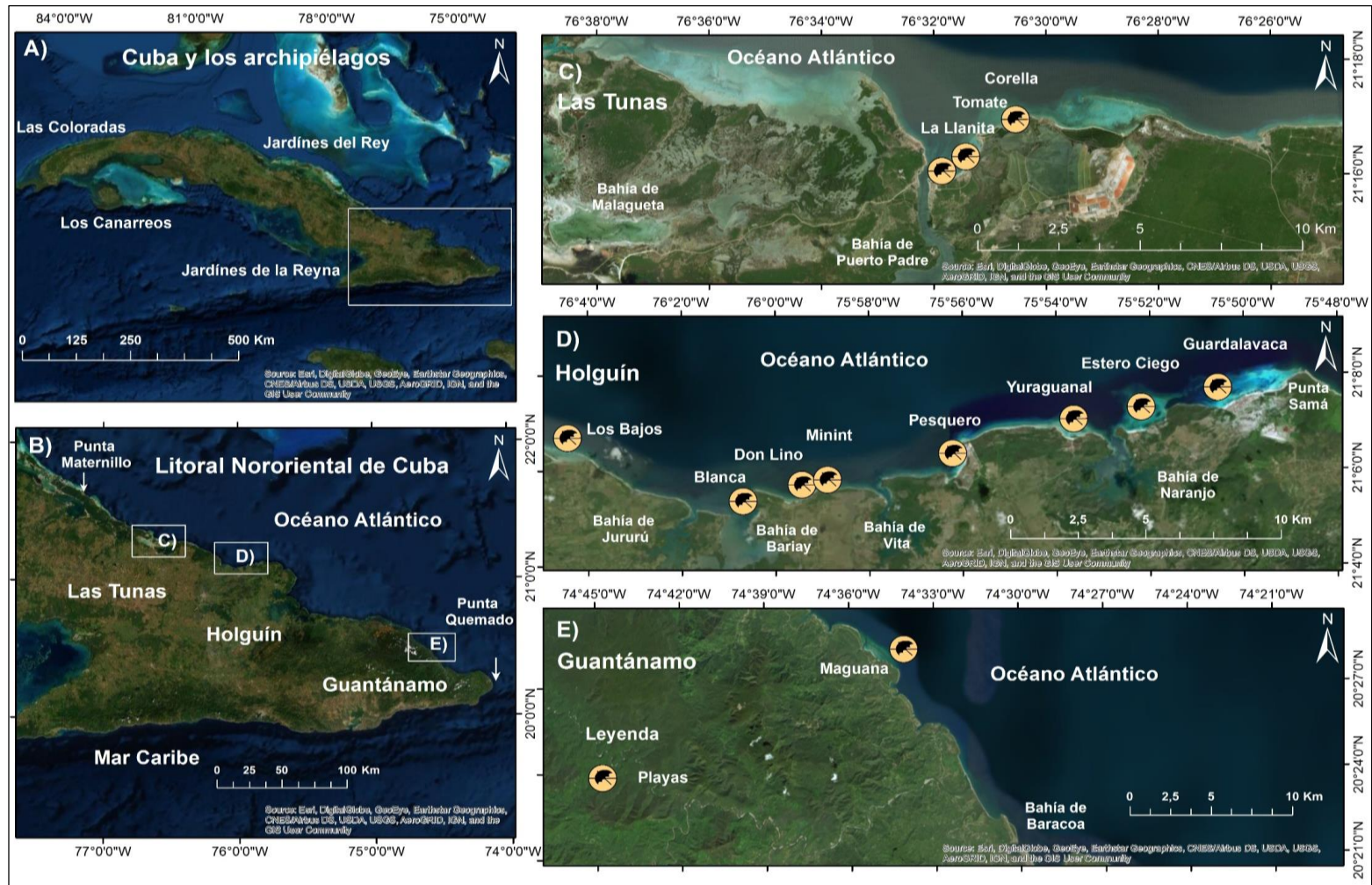


Figura 3.1. Contexto geográfico del área de estudio. A): Isla de Cuba y posición de los archipiélagos, B): Litoral nororiental de Cuba, C), D), E): Playas consideradas en el estudio por subregión

En la mitad Oeste del litoral nororiental de Cuba hay un predominio de rocas calizas y vulcano sedimentarias que favorecen el desarrollo de procesos cársticos (Las Tunas, mitad Oeste de Holguín). Debido a ello hay un pobre desarrollo de la red fluvial, pues el agua de lluvia se infiltra a través de las rocas, dando lugar a numerosos ríos subterráneos. Por el contrario, en la mitad Este del litoral (Mitad Este de Holguín y Guantánamo), hay un predominio de rocas ofiolíticas y serpentinas, lo cual, junto con la condición montañosa de la región, y la gran pluviosidad del área, favorece el desarrollo de una amplia red fluvial, entre ellos, el río más caudaloso de Cuba (Río Toa). Los ríos presentes en este sector del litoral realizan un importante aporte de sedimentos terrígenos a la costa.

El clima en Cuba es subtropical moderado, con dos estaciones bien diferenciadas. En la temporada de noviembre a abril, las variaciones del tiempo y el clima se hacen más notables, con cambios bruscos en el tiempo diario, asociados al paso de sistemas frontales, a la influencia anticiclónica de origen continental y de centros de bajas presiones extratropicales. De mayo a octubre, por el contrario, se presentan pocas variaciones en el tiempo, con la influencia más o menos marcada del Anticiclón del Atlántico Norte. Los cambios más importantes se vinculan con la presencia de disturbios en la circulación tropical: ondas del este y ciclones tropicales (INSMET, 2017).

Las precipitaciones se distribuyen durante los meses de junio, mayo, noviembre y octubre, según el orden de sus promedios históricos. Las precipitaciones promedio son de 1.234 mm, aunque en el litoral no supera los 800 mm, con excepción de la mitad oriental del litoral, donde las precipitaciones alcanzan valores superiores a los 2.000 mm al año (INSMET, 2017).

Los rasgos morfológicos de esta región, se encuentran condicionados por el predominio de los procesos de erosión que se manifiestan en el 60,5% de las costas, mientras que los de acumulación ocupan el 39,5%, en ambos casos para la costa expuesta al oleaje oceánico (Rodríguez y Córdova, 2005a).

En el caso particular de las playas, son fundamentalmente de génesis calcáreas (biogénicas) con arenas constituidas por restos de moluscos, corales y foraminíferos y algas calcáreas. En sentido general, las playas se encuentran anteceditas por arrecifes coralinos, que no sólo le brindan protección ante la acción del oleaje, sino que constituyen, junto a los pastizales marinos, la fuente principal de aporte de los sedimentos que las conforman.

Todas las playas de este litoral se encuentran expuestas a la acción persistente del oleaje del I y IV cuadrante de la rosa de los vientos. Durante el verano predominan los vientos y oleajes del Este-noreste (I Cuadrante) y durante el invierno del Norte y Norte-noroeste (IV Cuadrante), aunque con un predominio de los vientos y oleajes del I Cuadrante durante casi todo el año.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Análisis de las particularidades morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba

El análisis de las particularidades morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas biogénicas de Cuba, fue realizado siguiendo criterios geomorfológicos y oceanográficos, dadas las singularidades que ambos aspectos tienen para el litoral nororiental de Cuba.

3.2.1.1. Geomorfología

La caracterización geomorfológica del litoral se realizó utilizando información levantada en las etapas de terreno (enero 2016-febrero 2018) teniendo en cuenta la composición litológica, las formas del relieve más representativas y los procesos costeros. También se tiene en cuenta la clasificación de las costas de Cuba realizada por Ramírez y Sosa (1989), recogidos en el Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1989).

Se les presta especial atención a las cuatro tipologías de costas de interés para la gestión de la zona costera (acantilados, terrazas bajas, playas y manglares), que aparecen definidas en el Decreto Ley 212/2000² “de Gestión de la Zona Costera”. Este Decreto Ley, define, entre otras regulaciones, las distancias mínimas de construcción respecto a la línea de costa, para los cuatro tipos de costa referidos con anterioridad.

La identificación de los tipos de costa y su representación cartográfica, fue realizado tomando como base mapas a escalas 1:25.000 y 1:50.000 de la República de Cuba. Fueron considerados además otros estudios realizados por el investigador entre los años 2000 y 2014, anterior al desarrollo de la presente investigación, pero que aportan importantes antecedentes sobre el comportamiento de las playas de este litoral e incluye la información obtenida durante tres vuelos en helicóptero a muy baja altura (1999, 2005, 2012), varias expediciones por mar (1993-2013), además de numerosas expediciones por tierra (1993-2014).

En el caso de las playas, se toman como referencias 12 playas arenosas representativas del litoral nororiental, aunque se realizó la caracterización general de 54 playas en total. Durante los trabajos de terreno (2015-2018), para las 12 playas, se levantaron perfiles perpendiculares a la línea de costa, en sitios previamente seleccionados por su representatividad, y se realizó la medición de sus elementos geomorfológicos (ancho de las dunas, ancho de la berma, altura de la berma, ancho de la cara, entre otras). Para cada una de las playas se confeccionó una planilla que muestra la información levantada en terreno. El anexo 1, muestra el listado y las principales características de las 54 playas y el anexo 2, muestra la información levantada en las 12 playas representativas del litoral.

Las playas fueron clasificadas atendiendo a la configuración de la línea litoral. Se le denominó playas lineales o rectas, cuando se presentan como tramos de costa relativamente rectos o ligeramente sinuosos, generalmente con largas zonas de rompiente; playas en caletas o apoyadas, cuando están limitadas a ambos lados por puntas rocosas o

² Decreto Ley 212/2000, <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cub23215.pdf>

grandes promontorios rocosos que se proyectan en dirección al mar; playa en herradura, cuando forman un arco de circunferencia regular, a veces interrumpido por la existencia de fragmentos rocosos. Guilcher (1957), nombró a estas playas como de interior de bahía, por encontrarse fundamentalmente asociadas a estas. Por último, se le dio el nombre de playas en guirnaldas, a las playas que se ubican unas a continuación de otra, separadas por tramos rocosos de poca extensión.

3.2.1.2. Hidrodinámica

Las características hidrodinámicas se determinaron considerando información de viento, oleaje histórico, mareas y corrientes litorales. Se analizó una data de viento de 50 años (1965-2015), suministrada por el Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), que contiene información sobre la velocidad, dirección y frecuencia de los vientos, de la estación meteorológica Cabo Lucrecia (estación N°. 78365 de la OMM) ubicada en el centro del litoral de estudio y que es representativa del mismo (Figura 3.2).

Los datos de oleaje están referidos a la cuadrícula 32 del *Global Wave Statistics* que aporta información relativa a la altura de la ola significativa y periodo, para el área de estudio (Figura 3.2). Esta es una base de datos de oleaje publicado por la Marina Británica en la cual se dividen los mares y océanos del mundo en 104 áreas. Para el estudio se utiliza una base de datos de 50 años (1965-2015).

La transformación del oleaje, desde aguas profundas a aguas someras, fue realizada mediante el programa Ola 2.0, el cual permite realizar la transformación del oleaje, desde aguas profundas hasta la playa, teniendo en cuenta la profundidad y morfología del fondo. Para ello se les dieron continuidad a los perfiles de playas mediante líneas de sondeo (batimetría) con un ecosonda Foruno (precisión de $\pm 0,10$ m) hasta cubrir toda la pendiente sumergida. Los sondeos fueron corregidos en función de la altura de la marea.

También fueron realizadas lecturas de la altura de la ola y el periodo en las 12 playas. Para la determinación de la altura y periodo de la ola se utilizó una regla graduada de 3 metros de altura (mira topográfica), promediándose la altura de 10 olas en un intervalo de tiempo

de 5 minutos y por espacio de una hora. También fue promediado el tiempo transcurrido entre dos trenes de ola para calcular el periodo. El anexo 3 y el anexo 4, muestran la información recogida en terreno sobre la altura y periodo de la ola para el verano de 2016 y el invierno de 2018.

La información sobre la marea fue obtenida a partir de 12 estaciones mareográficas, que cubren totalmente el área de estudio, cuya información aparece en publicaciones de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO y en Tablas de Marea de la República de Cuba. La ubicación de las estaciones aparece en la figura 3.2.

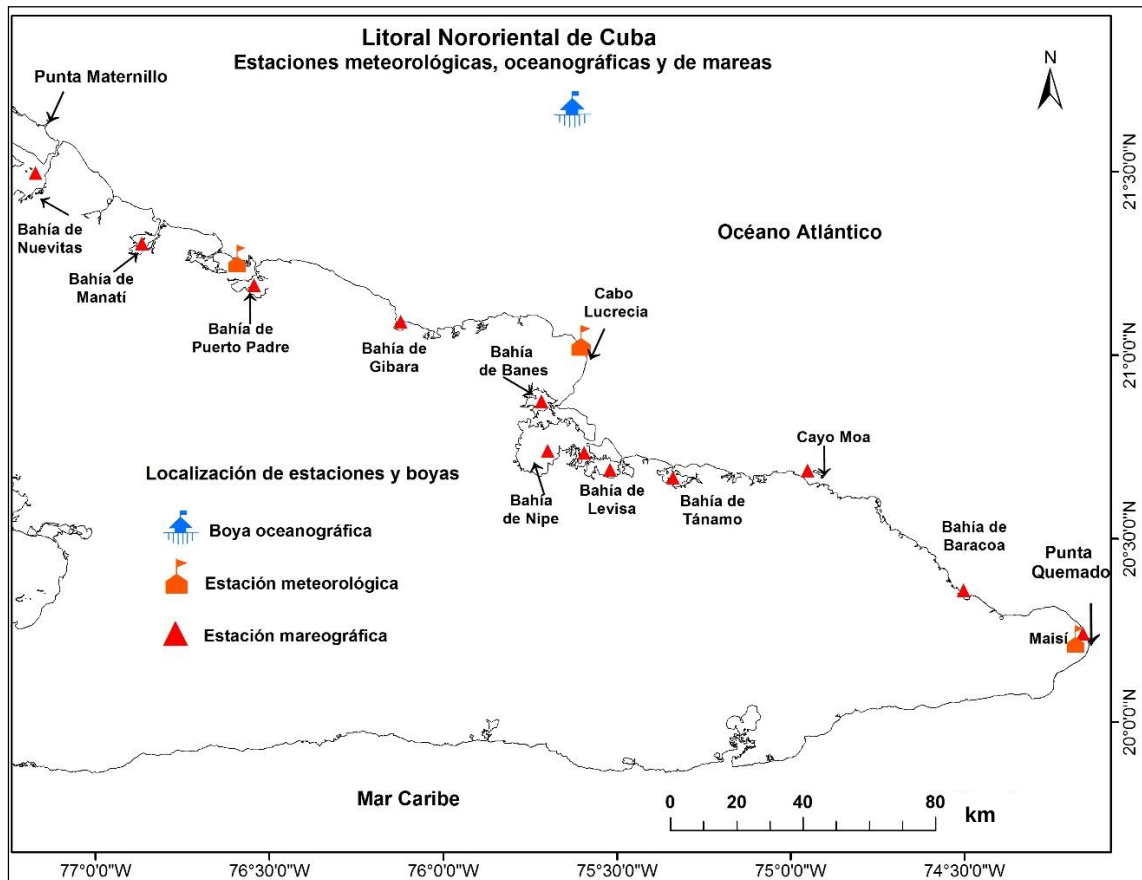


Figura 3.2. Localización de las estaciones meteorológicas, oceanográficas y de mareas en el litoral nororiental de Cuba

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.3. Sedimentos

En los meses de enero-febrero (2017-2018) y agosto (2016-2017), coincidiendo con los periodos de invierno y verano en el hemisferio norte, se llevó a cabo el muestreo sedimentológico de las playas, que incluyó la toma de muestra en la base de la duna, la berma, cara de la playa y dos muestras en la zona submarina (10 y 30 m de la línea litoral), en perfiles localizados en la zona central y a ambos extremos de las playas, de manera que pudiera definirse, con exactitud, las características de la arena nativa de cada playa.

Para cada muestra se colectan aproximadamente 400 gramos de arena. Para la toma de la muestra se eliminó la capa superior, desechándose las arenas que puedan haber sido transportadas por el viento. Posteriormente se seleccionaron 10 gramos de cada muestra y se preparó una muestra única por perfil, generándose un total de 135 muestras de arena.

Posteriormente, en laboratorio, fue identificado su granulometría, peso específico y composición genética. La granulometría y el peso específico fueron determinados por el método de ensayo estándar para el análisis del tamaño de las partículas y peso específico de los suelos según las Normas ASTM (*American Society for Testing and Material*), D-422-98 y D-854-92, respectivamente. El análisis de la composición genética se realizó mediante el empleo de un microscopio estereoscópico y el conteo de 200 granos de arena de fracciones entre 0,25-2,0 mm de diámetro.

Como diámetro medio se utilizó la mediana, es decir, el percentil 50 (D_{50}) en la curva de distribución granulométrica (*U.S. Army Corps of Engineers, 1998*) y en su clasificación se utilizó la escala Wentworth (1922). Por su parte, el coeficiente de selección (So) se determinó mediante la expresión (Ec.13):

$$So = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}} \quad (\text{Ec.13})$$

Donde Q_3 y Q_1 son los percentiles 75 y 25, respectivamente, en la curva de distribución granulométrica (Pettijohn, 1956).

Para la clasificación del coeficiente de selección (S_o), se utilizó la escala de siete valores, usada por Blott y Kenneth (2001), que se refiere a continuación.

Muy bien seleccionado	< 1,27
Bien seleccionado	1,27 – 1,41
Moderadamente bien seleccionado	1,41 – 1,62
Moderadamente seleccionado	1,62 – 2,00
Pobrementemente seleccionado	2,00 – 4,00
Muy pobrementemente seleccionado	4,00 – 16,00
Extremadamente pobre seleccionado	>16,00

3.2.1.4. Características de las playas

Para la caracterización general de las playas se realizó la identificación de las geo-formas características encontradas en 54 playas, para la etapa de verano (agosto de 2017) y para la etapa de invierno (febrero de 2018).

Para ello, se confeccionó una tabla que contiene el nombre de la playa, el ancho total considerando el ancho de las dunas, ancho de la cresta, altura de la cresta, la presencia o ausencia de cúspides, oscilaciones rítmicas, corrientes de retorno y arrecifes coralinos frontales. El anexo 5 y el anexo 6, muestran la información recopilada en las playas para las etapas de verano e invierno, respectivamente.

Además de conocer el funcionamiento general de las playas, esta información servirá de complemento para el estudio del estado morfodinámico modal de las playas, teniendo en cuenta que Wright y Short (1984), definieron ciertas geoformas y características sedimentarias representativas de cada estado morfodinámico modal.

3.2.2. Evaluación de la magnitud y causas de los procesos de erosión-sedimentación

3.2.2.1. Identificación de la erosión en las playas

La identificación de la erosión en las playas toma como referencia 12 playas biogénicas representativas del litoral nororiental. El anexo 2 referido anteriormente y los anexos 7A, 7B y 7C, muestran una ficha técnica, así como fotografías de cada una de las 12 playas. La localización geográfica de las playas aparece en las figuras (Fig.3.1C, Fig.3.1D y Fig.3.1E).

Para la evaluación de la magnitud y causas de los procesos de erosión-sedimentación, se utilizaron dos métodos; la fotointerpretación de imágenes satelitales de Google Earth Pro (CNES/Airbus) y el levantamiento de perfiles de playas. Se considera un período entre 7 y 14 años, que abarcó desde 2003 hasta 2017 mediante imágenes satelitales y entre 11 y 18 años (2000-2018) utilizando perfiles de playa perpendiculares a la línea de costa. Como el marco temporal no es el óptimo, de ahí la razón del uso de ambos métodos.

Con las imágenes satelitales se determina la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación (retroceso o avance de la línea de costa), muy particularmente su expresión espacial, en tanto con los perfiles de playas se corrobora la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación encontrado través de las imágenes satelitales.

Como imágenes satelitales se utilizaron imágenes de Google Earth Pro (CNES/Airbus), dependiendo de la disponibilidad de imágenes de calidad adecuada, eligiéndose la imagen más antigua como imagen base para el análisis. Se utilizaron imágenes de Google Earth porque las imágenes Landsat, tienen una resolución de 30x30 m, la que resulta insuficiente para el estudio de la variabilidad de la línea litoral de las playas cubanas, en tanto, con las imágenes de Google Earth se logran resoluciones aceptables de 10x10 m.

Todas las imágenes fueron rectificadas y georeferenciadas en ArcGIS 10.3.1, en el sistema de coordenadas UTM, GWS1984, Zona 18 Norte y puntos de control terrestre. La tabla A8 (Anexo 8), refiere las fechas y el error de ajuste en la geo-referenciación de cada imagen por playa.

Su procesamiento fue realizado de acuerdo a los criterios propuestos por Rangel-Buitrago et al. (2015) asegurando errores cuadráticos medios (RMSE) inferiores a 1 m. La línea litoral se digitalizó siguiendo la línea húmeda de contacto entre el mar y la tierra detectada visualmente a partir de las imágenes de Google Earth, considerada la más adecuada para este tipo de estudio (Boak y Turner, 2005).

Debido a que no es posible reconstruir las condiciones de la marea en este tipo de imagen y considerando que en este litoral tienen lugar mareas micromareales con una amplitud promedio de 0,56 m, se estimó que la posición de la línea de agua diaria está sujeta a una incertidumbre máxima de 7 m, teniendo en cuenta que, la pendiente intermareal promedio de las playas del litoral nororiental es de 5,1 grados. No se tuvieron en cuenta los efectos de la altura de la ola porque no se observaron condiciones de tormenta en ninguna de las imágenes utilizadas.

Para determinar los cambios en la posición relativa del litoral, se utilizó la extensión *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS 4.3) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para ArcGIS (Thieler et al., 2009).

Posteriormente, en las 12 playas se consideró el desplazamiento de la línea litoral, mediante perfiles topográficos perpendiculares a la playa, en sitios previamente seleccionados por su representatividad en la zona central de las mismas. Las mediciones topográficas se realizaron con un teodolito Daltha, a partir de puntos de control que se han utilizado para el estudio del comportamiento morfodinámico de estas playas (Fig.3.3). Los puntos de control tienen asignado coordenadas desde puntos geodésicos de la Red Geodésica Cubana, la cual toma como valor cero, el valor de la estación mareográfica Siboney, la cual es el Datum Altimétrico de la República de Cuba.



Figura 3.3. Equipamiento utilizado en el levantamiento de los perfiles de playa. A): teodolito Daltha, B): punto de control amarrado a la red geodésica nacional, C): regla graduada.

3.2.2.2. Magnitud de la erosión

La magnitud de la erosión o tasa de cambio promedio (m/año) se determinó usando el algoritmo *End Point Rate* (EPR) de DSAS 4.3, dado que este algoritmo calcula el desplazamiento de la línea litoral en el periodo transcurrido, entre la línea más antigua y la más reciente (Thieler et al., 2009); por tanto, determina la cantidad de metros que se desplaza la línea litoral en el periodo de análisis.

Los procesos de erosión/acumulación encontrados en cada playa se clasificaron en cuatro categorías, similar a la propuesta por Rangel-Buitrago et al. (2015) pero modificando el valor de “fuerte erosión” a partir 1,2 m/año, criterio que se utiliza en Cuba desde que fuera considerado por Juanes (1996), en los estudios de la erosión en playa Varadero. Las categorías quedarían definidas de la manera siguiente: fuerte erosión ($\geq 1,2$ m/año),

erosión (entre -0,2 y -1,2 m/año), estabilidad (entre -0,2 y 0,2 m/año) y acumulación ($\geq 0,2$ m/año).

Para determinar el comportamiento de la erosión costera en el tiempo, se establecieron cuatro períodos de comparación para cada playa, a excepción de cuatro playas donde se utilizaron tres periodos (Anexo 9). En todos los casos, la determinación de los procesos de erosión/acumulación se realizó en función del resultado del EPR, tomando como referencia la imagen más antigua.

Para ello, el área de trabajo fue subdividida en tres subregiones: Las Tunas, hacia el extremo Oeste del área de estudio, siendo Corella, Punta Tomate y La Llanita, las playas representativas de la subregión Oeste (Fig.3.1C). Las playas Guardalavaca, Estero Ciego, Pesquero, Yuraguanal, Don Lino, Minint, Blanca y Los Bajos en la subregión central (Holguín) (Fig.3.1D) y Maguana en la subregión Este (Fig.3.1E).

Finalmente se procedió a realizar el cálculo del retroceso de la línea litoral mediante los perfiles de playas y los resultados se comparan con los obtenidos por medio de imágenes satelitales. La información de los perfiles de playas (distancia y altura) se procesó utilizando el programa BMAP (*Beach Morphology Analysis Package*) desarrollado por *Coastal Engineering Research Center* de los Estados Unidos. Este programa permite modelar de manera automática e interactiva las características morfológicas y dinámicas del perfil de playa y establecer el perfil medio histórico de cada playa.

3.2.2.3. Causas de la erosión

En la investigación se consideran las posibles causas o causas más probables que estén generando erosión en las playas. Su determinación se realizó a partir de la identificación de las intervenciones antrópicas realizadas en las playas y zonas aledañas, tales como espigones, rompeolas y malecones, la presencia de construcciones sobre la cara de la playa, berma y dunas, la extracción de arena en berma, duna y pendiente submarina, entre otras. La información se obtuvo directamente en el terreno a través de observación visual

y la entrevista a personas que habitan en las playas desde hace décadas, así como el registro de las extracciones de arena en las playas del litoral nororiental de Cuba realizado por la Unidad de Inversiones Costeras (UICOS) del Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales y Tecnológico de Holguín (CISAT) en el año 2004.

Descartada que la presencia de la erosión no es ocasionada por las intervenciones realizadas por el hombre en las playas y zonas vecinas, los trabajos se dirigieron a determinar si la presencia de los procesos erosivos podría responder al comportamiento morfodinámico del perfil de playa, debido a las características del régimen hidrodinámico en este sector de costa, o a factores naturales de alcance local, regional o global como tormentas tropicales y huracanes. También se consideró los posibles efectos de los eventos ENOS (El Niño-Oscilación Sur) y el aumento del nivel medio del mar, provocado por el cambio climático.

Como factor natural de alcance local y regional fue considerado el régimen hidrodinámico imperante en el litoral de estudio, las tormentas tropicales y huracanes y los efectos de los eventos ENOS. Como factor de alcance global fue considerado el aumento del nivel del mar provocado por el cambio climático global. La elevación del nivel del mar es el impacto más importante asociado al cambio climático global (IPCC, 2014).

Para las estimaciones del retroceso de la línea litoral provocada por el aumento del nivel medio del mar, se utilizó la regla de Bruun (1962), la cual relaciona el retroceso de la costa (R), a la elevación del nivel del mar (S) (Ec.14).

$$R = S \frac{W_*}{h_* + B} \quad (\text{Ec.14})$$

Donde:

W_* , anchura de la zona activa o distancia hasta la profundidad de cierre

h_* , profundidad de cierre (h_c)

B , altura de la berma

Como altura de la berma (B), fue considerada la altura en la cresta de la berma (límite en dirección al mar de la berma y punto más alto de la cara de la playa), determinada por mediciones directas sobre el terreno. Como tasa de incremento del nivel del mar se asumió 3,2 mm/año, obtenida para el periodo 1993-2010, según IPCC (2014).

Para el cálculo de la profundidad de cierre (h_c o D_c), se utilizó la ecuación (Ec.15) de Hallermeier (1978, 1981) referido en el *Coastal Engineering Manual* (CEM, 2002).

$$h_c = 2,28H_e - 68,5 (H_e^2 / gT_e^2) \quad (Ec.15)$$

Donde:

$$H_e = \bar{H} + 5,6\sigma_H,$$

$\bar{H}$, altura de la ola significativa,

T_e , periodo efectivo de la ola significativa,

σ_H , desviación estándar de la altura de la ola significativa,

T , periodo de la ola efectiva,

g , aceleración de la gravedad.

Los resultados se obtienen de manera automatizada mediante la aplicación *Depth of Closure* del programa *Beach Fill Module 1.0*, desarrollado por *Waterways Experiment Station of US Army Corps of Engineers* (1994).

Los datos de oleaje están referidos a la cuadrícula 32 del *Global Wave Statistics* (*British Maritime Technology Limited*, 1986 y Torres, Córdova, y Fernández, 2012) que aporta información relativa a la altura de la ola significativa y periodo, para al área de estudio, referida con anterioridad.

Además, se midió el ancho total de 54 playas del litoral nororiental para estimar el número de playas que podrían perderse para el año 2100 como resultado del aumento del nivel del mar.

3.2.3. Perfil de equilibrio de mejor ajuste a las características de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba

En la búsqueda de un modelo de perfil de equilibrio que se ajuste adecuadamente a las características de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, se analizaron los modelos de perfil de equilibrio desarrollados por varios investigadores: Bruun (1954), Dean (1977, 1987, 1991), Vellinga (1983), Leontiev (1985), Boon y Green (1988), Larson (1991), Kriebel, Kraus y Larson (1991), Bodge (1992), Komar y Mc Dougal (1994), Garau (1996), Tristá (2003) y García (2005).

Posteriormente se decide utilizar una ecuación del tipo potencial, como las descritas por Bruun (1954), Dean (1977, 1987, 1991), Vellinga (1983), Leontiev (1985), Boon y Green (1988), Tristá (2003) y García (2005).

$$h(y) = Ay^m \quad (\text{Ec.2) Referida anteriormente})$$

Las razones por las cuales fue elegido este modelo están referidas en el marco teórico.

3.2.3.1. Determinación del parámetro (A) en los modelos de perfil de equilibrio

El parámetro (A) es un factor de escala que depende de la velocidad de caída (ω_s), del diámetro medio de la arena nativa (D_{50}), razón por lo cual se lleva a cabo un experimento de velocidad de caída de partículas de arena en agua. La tabla 3.1, recoge las diferentes ecuaciones para el cálculo del parámetro (A) en los modelos de perfil de equilibrio.

Tabla 3.1. Ecuaciones utilizadas para el cálculo del parámetro (A)

Dean, 1987	$A = 0,51\omega^{0,44}$	(Ec.16)
García, 2005	$A = 0,16D^{0,22}$	(Ec.17)
Kriebel, 1991	$A = 1,05\omega^{0,67}$	(Ec.18)
Kriebel, Kraus y Larson (KKL, 1991)	$A = 2,25\left(\frac{\omega_f^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$	(Ec.19)
Dean, 2004	$A = 0,67\omega^{0,44}$	(Ec.20)

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.1.1. Medición de la velocidad de caída de las arenas

La determinación de la velocidad de caída (ω_s) se realizó mediante un diseño experimental similar al empleado por Gibbs et al. (1971), aunque en este caso utilizando un tubo de vidrio de 1.000 mm de longitud y un diámetro interior de 62,25 mm de los cuales 310 mm estaban graduados en la parte inferior del mismo. Los ensayos fueron realizados en agua destilada a una temperatura aproximada de 24°C, monitoreados permanentemente a través de un termómetro colocado en el extremo superior del tubo y filmados con una cámara fotográfica de 6,0 megapixel de resolución, la cual permite distinguir la trayectoria de las partículas de arena a través del tubo (Fig. 3.4). Los ensayos se realizaron en laboratorios de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas y del Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales y Tecnológicos de Holguín.

Para ello, se utilizaron arenas de tres playas (Don Lino, Pesquero y Guardalavaca) que conforman todo el espectro de las arenas biogénicas presentes en el litoral nororiental, de acuerdo a su distribución granulométrica y composición genética. Además, se preparó una muestra compuesta, elaborada a partir de muestras de arena representativas de otras 22 playas. Para ello se toman 10 gramos de arena de cada playa y se mezclan hasta lograr una muestra única homogénea.

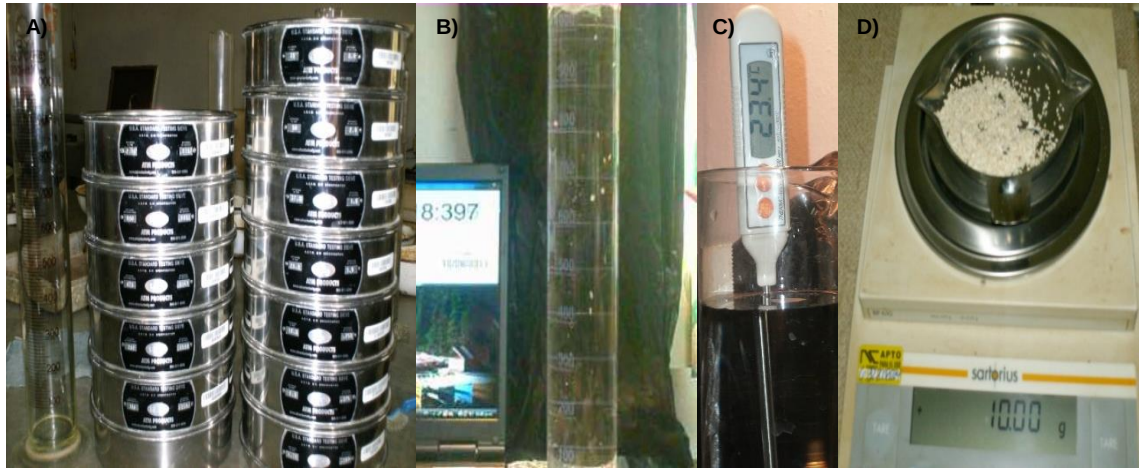


Figura 3.4. Instrumental de laboratorio utilizado para el análisis de velocidad de caída. A): Juego de tamices de la norma ASTM, B): Granos de arena cayendo en un densímetro, un cronómetro atrás controla el tiempo, C): Termómetro controlando la temperatura del agua y D): Balanza con 10 gramos de arena para preparar muestra compuesta

Fotos: R. Rodríguez, 2017.

Las muestras fueron tamizadas para distintas aberturas de tamices (0,106; 0,25; 0,425; 0,84 y 2,0 mm) y clasificada atendiendo a su granulometría. En laboratorio fue determinada su densidad. La densidad (ρ) es igual a la masa (m) entre el volumen (V) y se expresa en kg/m^3 o g/cm^3 . Con la balanza se determina la masa del cuerpo y su volumen se mide por el aumento de volumen del agua de la probeta graduada al introducir el cuerpo en ella.

Con un programa de procesamiento de imágenes previamente confeccionado (Programa Visor de Arenas), se realizó la calibración de las mediciones realizadas en el plano temporal y longitudinal. A partir de mediciones de cada partícula se determinó la ecuación de movimiento, teniendo en cuenta que la velocidad a la que se mueve una partícula a través de un fluido en reposo tal como un líquido, puede representarse por la siguiente ecuación diferencial (Ec.21):

$$\frac{dv}{dt} = g - av - bv^2 \quad (\text{Ec.21})$$

Donde:

g , fuerza de gravedad.

v , velocidad de la partícula.

a , coeficientes relacionados con la viscosidad

b , coeficientes relacionados con la fuerza de choque

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene:

$$v = - \left[\frac{\beta - k \cdot \gamma \cdot e^{-\alpha \cdot t}}{1 - k \cdot e^{-\alpha \cdot t}} \right] \quad (\text{Ec.22})$$

$$H = -\beta \cdot t + \frac{1}{b} \ln \frac{1 - k \cdot e^{-\alpha \cdot t}}{1 - k} \quad (\text{Ec.23})$$

Donde H es la distancia recorrida por la partícula en dirección de la gravedad.

$$k = \frac{\beta}{\gamma} \quad ; \quad \alpha = \frac{a}{\sqrt{4gb + a^2}} \quad ; \quad \beta = \frac{a - \alpha}{2b} \quad ; \quad \gamma = \frac{a}{b} - \beta \quad ; \quad \beta = -V_L$$

Cuando $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ entonces $v = V_L$ y la partícula alcanza la velocidad límite (V_L), la aceleración es cero.

Desarrollando en series de Taylor la expresión (Ec.21), se determinan las incógnitas por el método de los mínimos cuadrados utilizando cuatro o más mediciones para cada una de las partículas.

A los valores obtenidos de velocidad límite, se le aplicó la corrección de Ladenburg (Skiba, 2008) por el efecto de las paredes del tubo que provoca una disminución de la velocidad límite de caída (v_{lim}). Si v_m , es la velocidad medida experimentalmente, la velocidad corregida por este efecto es Ec.24:

$$v_{lim} = \left(1 + 2,4 \frac{D}{\phi} \right) v_m \quad (\text{Ec.24})$$

Donde:

ϕ , diámetro interno del tubo,

D , diámetro medio de la partícula obtenida del tamizado,

v_m , velocidad medida experimentalmente.

A mayor diámetro de la probeta menor será la influencia sobre la determinación de la velocidad de caída.

Para un líquido dado, el valor del coeficiente de viscosidad depende de la temperatura, por lo que es necesario medirla en el instante en que se determina la velocidad. La viscosidad (poises) del agua destilada en función de la temperatura está dada por la expresión de Poiseuille (Ec. 25) (Skiba, 2008):

$$\eta = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot T_c + 0,00022 \cdot T_c^2} \quad (\text{Ec.25})$$

Donde:

T_c , es la temperatura en grados centígrados.

El error medio cuadrático en la determinación de la viscosidad del líquido en función de la temperatura es:

$$\xi_\eta = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial T_c}\right)^2 \mu_{T_c}^2} \quad (\text{Ec.26})$$

Donde:

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_c} = \frac{-0,0178(0,00044 \cdot T_c + 0,0337)}{(1 + 0,0337 \cdot T_c + 0,00022 \cdot T_c^2)^2}$$

Disponiendo de un termómetro con una precisión de 0,5°C y siendo la temperatura 24°C, entonces el error en la determinación de la viscosidad del agua será: 0,0003 poises lo cual es suficiente para la experimentación (Cordobés y Rodríguez, 2014).

3.2.3.2. Determinación del parámetro (m)

La determinación del exponente (m), un valor teórico que depende de la energía del oleaje, se realizó comparando el perfil medio histórico, obtenido a partir de los perfiles reales en 12 playas, con los perfiles de equilibrio pronosticados a partir de los datos del sedimento, incorporando a la ecuación, los valores del parámetro (A) referido con anterioridad, derivados del experimento de velocidad de caída.

Para su análisis se utilizaron los datos levantados en terreno durante el monitoreo morfodinámico y sedimentológico del perfil en 12 playas del litoral nororiental de Cuba, para un periodo entre 11 y 18 años (2000-2018), de los cuales tres años forman parte de la presente investigación (2016-2018). El resto de los datos fueron adquiridos por el autor en investigaciones anteriores. Posteriormente los perfiles fueron extendidos mediante levantamientos batimétricos con un ecosonda Foruno (precisión de $\pm 0,10$ m) hasta cubrir toda la pendiente sumergida. Para la selección de los perfiles se tuvo en cuenta que su pendiente sumergida estuviera cubierta por sedimentos hasta el denominado punto de cierre (hc) y los perfiles fueran representativos de los procesos morfológicos e hidrodinámicos de las 12 playas.

Luego utilizando el programa BMAP 2.0, (*Beach Morphology Analysis Package*) se obtuvo el perfil medio histórico para cada uno de los perfiles de playa contemplados en el estudio (Anexos 10A, 10B y 10C). La decisión de utilizar el perfil medio histórico y no los perfiles levantados de manera individual, radica en que el perfil medio histórico refleja con total objetividad las posibilidades de estabilización transversal del perfil de playa, bajo las variadas condiciones energéticas a las que se encuentra sometido, por lo que representa el estado más probable del perfil de equilibrio en una playa.

El conjunto de datos fue ajustado mediante el método de los mínimos cuadrados (Mendel, 1995), como fue realizado por Dean (1977). El método de los mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados: variable independiente, variable dependiente y una

familia de funciones, se intenta encontrar la función continua, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos (un mejor ajuste), de acuerdo con el criterio del mínimo error cuadrático.

El procedimiento seguido para obtener la ecuación empírica para un determinado conjunto de pares de valores consistió en:

- ✓ Graficar los datos,
- ✓ Determinar el tipo de curva que más se ajuste a los datos,
- ✓ Determinar las constantes.

Para el ajuste de la curva, según el método de los mínimos cuadrados, se utilizó la ecuación (Ec.27) (Mendel, 1995).

$$V \min = \sum (y_e - y_o)^2 \quad (\text{Ec.27})$$

Donde:

y_e , es el valor teórico estimado,
 y_o , es el valor real observado.

Para cuantificar el error (e) entre los perfiles reales obtenidos en terreno y los perfiles de equilibrio pronosticados en función de las características granulométricas de las arenas por los diferentes modelos, se utilizó la ecuación (Ec.28) (Mendel, 1995).

$$e = \sqrt{\sum (y_o - y_e)^2 / n - 1} \quad (\text{Ec.28})$$

Donde:

n , tamaño de la muestra.

Cuando el valor de $e=0$, significa que existe un perfecto ajuste. En la medida en que el valor del error (e) crece, representa una medida de la deficiencia del ajuste. Finalmente se procedió a comparar el perfil medio histórico obtenido de los perfiles reales en las 12 playas, con perfiles teóricos a partir de los modelos de Dean (1977), Bruun y Green (1989), Tristá (2003) y García (2005).

3.2.3.3. Ajuste de los modelos del perfil de equilibrio para las playas del litoral nororiental

Dean (1991), en base al concepto de perfil de equilibrio, definió tres tipos básicos de perfiles, aplicados a los vertimientos de arena en playas: interceptados, no interceptados y sumergidos. Cada uno de los tres tipos de perfiles de vertimiento de arena tiene sus propias ecuaciones de cálculo de los volúmenes de arena a verter para alcanzar el ancho de playa deseado. La Figura 3.5, muestra un esquema de estos tres tipos de perfiles.

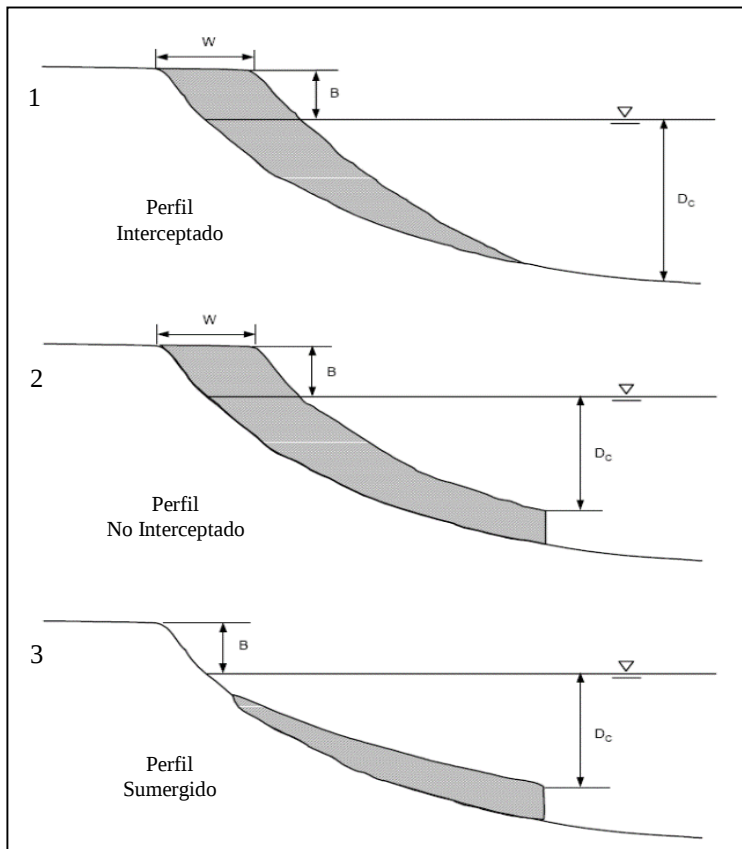


Figura 3.5. Tipos básicos de perfiles de alimentación de arena en playas

Fuente: Elaborado a partir de Dean, 1991.

Los perfiles interceptados (caso 1), son aquellos donde el perfil intercepta al perfil nativo después del vertimiento, por su parte, los no interceptados (caso 2) son aquellos perfiles que después del vertimiento no se intercepta el perfil nativo antes de la profundidad de cierre y por último los perfiles los sumergidos (caso 3) que tienen como característica de no presentar ancho de playa seca después alcanzado el equilibrio.

El análisis de la intercepción o no de los perfiles es determinado por la desigualdad siguiente (Ec.29), (Dean, 1991).

$$W \left(\frac{A_N}{Dc} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{A_N}{A_F} \right)^{\frac{1}{m}} \begin{array}{l} < 1, \text{ los perfiles se interceptan} \\ > 1, \text{ los perfiles no se interceptan} \end{array} \quad (\text{Ec.29})$$

Donde:

m ; exponente propuesto para playas con perfil de tipo intermedio,

W ; Ancho de playa seca después del equilibrio en metros,

A_N ; Valor del coeficiente (A) para el sedimento nativo,

A_F ; Valor del coeficiente (A) para el sedimento de préstamo,

Dc ; Profundidad de cierre en metros.

Para un perfil no interceptado (caso 2), el volumen de arena por metro lineal de playa, que debe colocarse para que luego del vertimiento se logre una playa seca, después de alcanzado el equilibrio, se estima mediante la ecuación (Ec.30), (Dean, 1991).

$$V = \frac{1}{m+1} \left(\frac{Dc}{A_F} \right)^{\frac{m+1}{m}} (A_N - A_F) \quad (\text{Ec.30})$$

Si el volumen vertido es menor que el volumen obtenido mediante la ecuación anterior, se obtiene un perfil sumergido después del equilibrio.

Para perfiles no interceptados, si se desea alcanzar una playa seca después del equilibrio (es decir, el volumen colocado es igual o supera al valor de la ecuación (Ec.30), el volumen

por metro lineal de playa requerido puede ser calculado mediante la ecuación siguiente (Ec.31), (Dean, 1991).

$$V = WB + \frac{1}{m+1} \left(\frac{Dc}{A_F} \right)^{\frac{m+1}{m}} \left\{ A_N \left[1 + W \left(\frac{A_F}{Dc} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^{m+1} - A_F \right\} \quad (\text{Ec.31})$$

Donde:

B ; altura de la berma en metros.

Para perfiles que se interceptan, el volumen por metro lineal de costa requerido para adelantar la playa una distancia determinada, después del equilibrio, puede ser estimado mediante la ecuación (Ec.32), (Dean, 1991).

$$V = WB + \frac{1}{m+1} \frac{W^{m+1} A_N A_F}{(A_F^{1/m} - A_N^{1/m})^m} \quad (\text{Ec.32})$$

En este caso no incluye la profundidad de cierre (Dc) porque por definición el perfil de vertimiento intercepta al perfil nativo.

3.2.4. Determinación del estado morfodinámico modal de las playas biogénicas

Teniendo en cuenta que las ecuaciones de Dean (1991), referidas en el acápite anterior, al igual que los modelos, fueron desarrolladas para playas disipativas, se procedió a determinar el estado morfológico modal de las playas del litoral nororiental para conocer a que estado morfodinámico corresponden y si es posible la extrapolación de los anteriores modelos y ecuaciones a estas playas.

Para ello se realizó el cálculo del parámetro adimensional (Ω) o Índice de Dean en 12 playas, para cada uno de los rumbos de incidencia del oleaje, promediándose por playa, el valor del Índice de Dean para todos los rumbos considerados en el análisis (Anexo 11).

El parámetro adimensional (Ω) o Índice de Dean (Wright y Short, 1983, 1984) permite clasificar las playas en disipativas, reflectivas e intermedias, atendiendo a los parámetros de la ola y la velocidad de caída, asociada al grano de sedimento (Ec.33).

$$\Omega = \frac{H_b}{w_s T} \quad (\text{Ec.33})$$

Donde:

H_b , altura de la ola de rompiente,

w_s , velocidad de caída del sedimento,

T , periodo de la ola.

Según esta ecuación (Ec.33), el valor 1 define el umbral de una playa reflectiva a intermedia, un valor 6, un umbral de intermedia a disipativa, por lo que las playas de tipo intermedias tienen un valor mayor que 1 e inferior a 6.

Los datos de oleaje pertenecen a la cuadrícula 33 del *Global Wave Statistics*, referido anteriormente. Además, se realizó la transformación del oleaje oceánico desde la zona de rompiente, hasta la playa, definiéndose la altura de la ola, a una distancia entre 50 y 100m de la línea litoral, en dependencia de la distancia del arrecife de coral. Para ello se utilizó el programa Ola 2.0, comentado con anterioridad. También fueron utilizados los datos de altura y el periodo de la ola, medidos para el verano de 2016 y el invierno de 2018, en las 12 playas objeto de estudio (Anexos 3 y 4 referidos con anterioridad).

La velocidad de caída (w_s), se obtuvo experimentalmente a través de un tubo de vidrio de 1.000 mm de longitud y un diámetro interior de 62,25 mm, referido en el objetivo 3 de esta investigación.

Además, se tienen en cuenta las geo-formas y las características sedimentarias de 54 playas, referidas en el acápite 1, con el objetivo de encontrar similitudes o diferencias con las geoformas características descritas por Wright y Short (1984) en el estudio de los estados morfodinámicos modales de las playas.

3.2.5. Ajuste de los modelos matemáticos de perfil de equilibrio para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playa

Para el ajuste de los modelos matemáticos de perfil de equilibrio para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playa se toman como referencia los proyectos de regeneración de playa Estero Ciego y de creación artificial de playa Don Lino, ejecutados en los años 1998 y 1999 respectivamente, cuyos resultados han sido publicados por Rodríguez y Córdova (2005a, 2010), en base al monitoreo de perfiles de playas perpendiculares a la línea de costa. Posterior a la ejecución, en ambos casos, se evaluó la efectividad de los trabajos de regeneración de playa llevados a cabo (Rodríguez y Córdova, 2005a, 2010).

Ambos proyectos fueron elaborados en base a la ecuación (Ec.34) que relaciona el volumen de arena a verter (V), con el ancho medio de la playa deseado (W), la altura de la berma (B) y la profundidad de cierre del perfil (Dc), definida en el *Coastal Engineering Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 1998).

$$V = W(B + Dc) \quad (\text{Ec.34})$$

Donde:

W ; Ancho de playa seca después del equilibrio (m),

B ; altura de la berma (m),

Dc ; Profundidad de cierre (m).

Estos proyectos consideraron el análisis de compatibilidad de las arenas (similitud granulométrica entre las arenas nativas y las arenas de préstamo) mediante el uso del factor de sobre-relleno (Ra) propuesto por Jean (1975), referido en el *Shore Protection Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 1984) y el *Coastal Engineering Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 2006), teniéndose en cuenta, en ambos casos, las diferencias granulométricas entre la arena nativa (A_N) de ambas playas y las arenas de las cuencas de préstamo (A_F).

En Playa Estero Ciego, los trabajos de regeneración fueron ejecutados entre el 7 de noviembre de 1997 y el 10 de abril de 1998, mediante el empleo de una draga de succión estacionaria, que vertía las arenas directamente a la playa, a través de un tubo, sin moverse de la zona de extracción (Rodríguez y Córdova, 2005a) (Fig.3.6A). En este periodo fueron vertidos 83.000 m^3 de arena a lo largo de 600 m de costa, para una densidad media de $138,3 \text{ m}^3/\text{m}$ lineal de playa. Como cuenca de préstamo (A_F) se utilizaron las arenas del yacimiento de arena de mar Punta Inglés, ubicado a 400 m al Noroeste de la playa y que no participaba en el balance dinámico de ésta, ni ninguna otra playa.

En Don Lino, los trabajos de creación artificial de playa se ejecutaron entre el 17 de julio y el 26 de noviembre de 1999, mediante el empleo de camiones de volteo, quienes transportaban la arena, desde un punto en tierra, donde había sido depositada por la misma draga, hasta la zona de vertimiento (Rodríguez y Córdova, 2010) (Fig.3.6B). En total, fueron vertidos 40.015 m^3 de arena a lo largo de 300 m de costa, para una densidad media de $133,4 \text{ m}^3/\text{m}$ lineal de playa. Como cuenca de préstamo se utilizaron las arenas del yacimiento de arena de mar Bariay, localizado a 1,5 km al Oeste de la playa y que no participa en el balance sedimentario de ninguna playa.

Como son conocidos los volúmenes de arena vertidos y su comportamiento a lo largo del tiempo, se procedió a calcular los volúmenes de arena que se debieron verter, en ambas playas, según las formulaciones actualmente existentes y las nuevas formulaciones propuestas como parte de esta investigación. Si el volumen de arena a verter en la playa, obtenido en base a las nuevas ecuaciones, se aproximan mejor al volumen y ancho de la playa, luego de la regeneración de la playa, entonces las ecuaciones propuestas como parte de esta investigación resultan válidas.

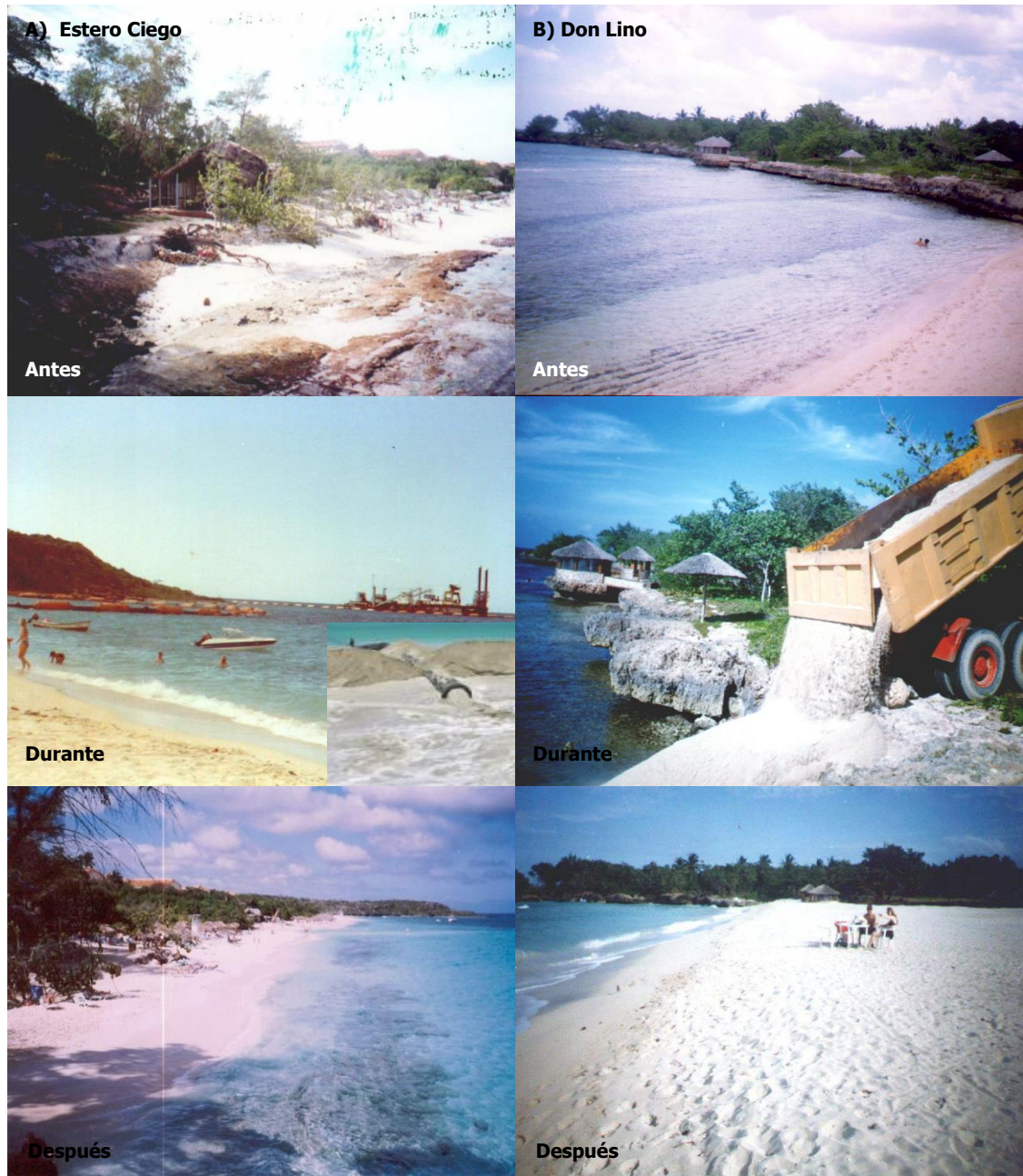


Figura 3.6. Trabajos de regeneración de playas. A) Regeneración de la playa Estero Ciego, B) Creación artificial de la playa Don Lino

Foto: R. Rodríguez, 1998-2010.

Para llevar a cabo el análisis, el primer paso es determinar si los perfiles se interceptan o no (Ec.29), referida anteriormente. Para ello se requiere la profundidad de cierre (D_c), el ancho de la playa seca después del equilibrio (W), todos conocidos, pues son los mismos considerados en ambos proyectos de regeneración de playas, así como los parámetros (A) y (m), obtenidos como parte de esta investigación.

Posteriormente, en función de los resultados, se usan las ecuaciones Ec.30, Ec.31; Ec.32, referidas con anterioridad.

A continuación, se refieren las consideraciones tenidas en cuenta en el diseño de las playas de ambos proyectos y la efectividad de los trabajos de regeneración de playa, cuyos resultados fueron publicados por Rodríguez y Córdova 2005a y Rodríguez y Córdova 2010.

3.2.5.1. Consideraciones tenidas en cuenta en el diseño de las playas

Playa Estero Ciego

Para el diseño de la playa Estero Ciego se tomaron, como referencia, los datos correspondientes a los perfiles monitoreados por un periodo de tres años (1993-1995), por el Instituto Cubano de Hidrografía, caracterizados estadísticamente en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros medios de los perfiles de playa en Estero Ciego

Parámetro	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3
Altura de berma	1,5 m	1,8 m	1,5 m
Pendiente de la berma	1,4°	1,6°	0,5°
Longitud de la anteplaya	6 m	15 m	14 m
Pendiente de la anteplaya	6,9°	7,4°	7,6°

Fuente: Martínez et al. 1995.

Los perfiles diseñados para la regeneración de la playa Estero Ciego, replican las características de los perfiles definidos en la Tabla 3.2, que representan la parte Oeste,

centro y Este de la playa, respectivamente. En el proyecto se tuvo en cuenta adelantar la línea litoral hasta satisfacer la demanda de área de exposición solar necesaria en función del número de habitaciones hoteleras existentes y proyectadas en la playa, la eliminación de los afloramientos rocosos de la zona intermareal y de baño, así como las pérdidas predecibles según el retroceso medio anual de la línea litoral (Martínez et al., 1995).

Según estas consideraciones se necesitaba adelantar la línea litoral 20,5 m, previendo un tiempo de vida útil de cinco años, que es la vida útil promedio de los trabajos de regeneración de playas (Freeman et al., 1997).

Para el cálculo del volumen de arena necesario para la regeneración de Estero Ciego, Freeman et al. (1997) utilizó la ecuación (Ec.34), con un valor de $W=20,5$ m, escogiendo como altura de la berma ($B=1,5$ m), que es la altura de la berma del perfil medio histórico y una profundidad de cierre ($D_c=2,43$ m), determinada visualmente por buceo autónomo hasta los límites del biotopo de arena (zona hasta donde se extiende la arena en la pendiente marina).

Según la ecuación (Ec.34, vista con anterioridad), para regenerar la Playa Estero Ciego se necesitaba del aporte de 58.838 m^3 de arena.

$$V = 20,5 (1,5 + 2,43)$$

$$V = 80,6 \text{ m}^3/\text{m} \times 730 \text{ m}$$

$$V = 58.838 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta las diferencias entre las arenas nativas y de préstamo, Martínez et al. (1995) encontró un factor de sobre-relleno (R_a) de 1,5; es decir para estabilizar $1,0 \text{ m}^3$ de arena provenientes del banco Punta Inglés, era necesario verter en la playa $1,5 \text{ m}^3$, por lo que, para regenerar Playa Estero Ciego, se necesitaba del aporte de 88.257 m^3 de arenas del banco Punta Inglés. De este volumen se vertieron 83.000 m^3 de arena.

Playa Don Lino

Debido a la carencia de sedimentos, en playa Don Lino no existía un perfil de playa definido por los factores morfodinámicos que actúan en la formación de una playa. Por ello, se tomó como referencia los datos correspondientes a dos perfiles de playas monitoreados de manera sistemática en la caleta Minint, ubicada a 200 m al Este de la anterior. Se asumió que la playa a crear en Don Lino, debía poseer arenas con características similares a las existentes en la caleta Minint, por tener características geomorfológicas similares, una misma exposición al oleaje y no existir aportes externos de arena. La Tabla 3.3, recoge los parámetros medios de los perfiles de la caleta Minint.

Tabla 3.3. Parámetros medios del perfil de playa en la caleta Minint

Parámetro	Perfil medio histórico
Altura de berma	1,6 m
Longitud de la anteplaya	12,6 m
Pendiente de la anteplaya	4,53°
Pendiente del perfil sumergido	0,98°
Ancho dinámico	7 m
Volumen dinámico	27,7 m ³ /m

Fuente: Martínez et al., 1996.

Como definición general del proyecto, Rodríguez et al. (1999) consideró adelantar la línea litoral hasta eliminar los afloramientos rocosos y crear una berma de características similares a otras playas. También se consideró la pérdida media anual en el balance sedimentario, para que en un periodo de cinco años no aflorara nuevamente la roca.

Debido a que la zona donde se crearía la playa Don Lino tenía un relieve del fondo irregular, tabicado parcialmente en dirección al mar por una estructura rocosa, fue necesario determinar el volumen de arena para rellenar esta área. Como cota de coronación fue considerada 1,6 m, que es la altura de berma en la caleta Minint. La comparación de

los perfiles reales levantados en el sector Don Lino, con un perfil de diseño, extendido hasta cubrir la superficie rocosa a la cota 1,6 m, arrojó que para rellenar esta área se requería del aporte de 29.800 m³ de arena (Rodríguez et al., 1999).

Posteriormente se procedió a calcular el volumen de arena que participaría en la actividad dinámica de la playa. Este nuevo volumen de arena se extendería hasta cubrir la pendiente submarina del perfil. El ancho de la nueva franja de arena estaba determinado por el retroceso medio anual y el basculamiento obtenido en la caleta Minint. Según estos requerimientos era necesario adelantar la línea litoral 7 m, a continuación del volumen de arena colocado para rellenar previamente al área (Rodríguez et al., 1999).

El volumen igualmente fue calculado por la ecuación (Ec.34, vista con anterioridad). Los parámetros utilizados fueron: altura de berma ($B=1,6$ m), profundidad de cierre ($D_c=2,2$ m) y ancho dinámico ($W=7$ m). Según las consideraciones anteriores, para adelantar la costa de manera estable para evitar la aparición del sustrato rocoso, se necesitaba del aporte de 7.980 m³ de arena (Rodríguez et al., 1999).

$$V = 7(1,6 + 2,2) = 7 (3,8)$$

$$V = 26,6 \text{ m}^3/\text{m} \times 300 \text{ m}$$

$$V = 7.980 \text{ m}^3$$

Rodríguez et al. (1999) encontró un factor de sobre-relleno (R_a)=1,37, considerando las diferencias existentes entre la arena nativa (A_N) y las arenas de préstamo (A_F). Es decir, para lograr estabilizar 1,0 m³ de arena del banco Bariay era necesario verter 1,37 m³. De acuerdo a ello, se necesitaba verter 11.970 m³ de arena del banco Bariay.

Sumando el volumen de arena para rellenar el área, cuyos sedimentos no participan en la actividad dinámica de la playa (29.800 m³), y el volumen de arena necesario para adelantar la costa de manera estable para evitar la aparición del sustrato rocoso, considerando los criterios de compatibilidad, se obtuvo que para crear nuevamente una playa en Don Lino

se necesitaba del aporte de 41.770 m³ de arena del banco de préstamo Bariay. De este volumen se vertieron 40.015 m³ de arena.

3.2.5.2. Efectividad de los trabajos de regeneración de playa

Playa Estero Ciego

Posterior a la ejecución de los trabajos de regeneración de playa Estero Ciego, Rodríguez y Córdova (2005a), evaluaron la efectividad de los trabajos de regeneración de playa llevados a cabo. Para ello, se tomaron como referencia los parámetros del perfil medio de la playa, antes y después del vertimiento, para el periodo entre enero y diciembre del año 2001 y luego en el mes de diciembre de los años 2002, 2003 y noviembre del 2004.

La Tabla 3.4, muestra el volumen total de arena depositado en la playa, al concluirse el vertimiento de arena y los volúmenes retenidos hasta el mes de noviembre del 2004. La tabla considera las pérdidas pronosticadas de acuerdo a los análisis de compatibilidad llevados a cabo (*Ra*).

Tabla 3.4. Variación del volumen de arena en Estero Ciego teniendo en cuenta el factor *Ra*

Fecha	Volumen total medido en monitoreo (m ³)	Volumen teórico a estabilizar (m ³)	Volumen a perderse por <i>Ra</i> =1,5 (m ³)	%
Abr/1998	83.000	55.333	27.667	100
Dic/2001	52.960	52.960	-	95,7
Dic/2002	50.177	50.177	-	90,7
Dic/2003	42.988	42.988	-	77,7
Nov/2004	34.450	34.450	-	62,3

Fuente: Elaborada a partir de Rodríguez y Córdova, 2005a.

Los resultados indican que, en los cinco primeros años, la playa retuvo el 62,3 % de las arenas aportadas. Asimismo, de un ancho medio de 20,5 m pronosticado en el proyecto, luego de transcurridos tres años, el ancho promedio de la playa era de 22,5 m, aunque con

diferencias notables a lo largo del litoral. En términos generales, los resultados evidencian altos porcentajes de retención de las arenas vertidas y un ancho promedio de la playa mayor al previsto en el proyecto.

Playa Don Lino

Posterior a la ejecución de los trabajos de creación artificial de playa Don Lino, Rodríguez y Córdova (2010), evaluaron la efectividad de los trabajos de regeneración de playa llevados a cabo. Para ello, se obtuvo información sobre el ancho de la playa ganado con posterioridad a los trabajos de regeneración, teniendo como referencia los perfiles topobatimétricos de la zona, antes y con posterioridad al vertimiento de arena.

La Tabla 3.5, muestra el volumen total de arena depositado, al concluirse el vertimiento de arena, su comportamiento hasta el mes de diciembre de 2003, así como el volumen que había retenido en marzo de 2008. La Tabla considera las pérdidas pronosticadas de acuerdo a los análisis de compatibilidad llevados a cabo (*Ra*).

Tabla 3.5. Comportamiento del volumen de arena en playa Don Lino

Fecha	Volumen total medido en el monitoreo (m³)	Volumen teórico a estabilizar (m³)	Volumen a perderse por <i>Ra</i>=1,37 (m³)	%
Octubre/1999	40.015	37.256	2.759	100
Octubre/2000	36.096	36.096	-	96,9
Julio/2001	35.139	35.139	-	94,3
Diciembre/2003	33.660	33.660	-	90,3
Marzo/2008	28.149	28.149	-	75,6

Fuente: Elaborada a partir de Rodríguez y Córdova, 2010.

Estos resultados indican que luego de más de ocho años de concluido los trabajos, la playa Don Lino aun retenía, el 75,6 % de las arenas vertidas, según perfiles levantados en el mes de marzo de 2008, un ancho promedio de 50 m, de los cuales 8 m corresponden a la franja añadida posteriormente, por lo que resultó superior a lo pronosticado en el proyecto.

Contándose con los volúmenes de arena vertidos y su comportamiento a lo largo del tiempo, en ambos proyectos, se procedió a calcular los volúmenes de arena que se debieron verter, según las formulaciones existentes y las nuevas ecuaciones propuestas como parte de esta investigación, ajustadas a las características de las playas del litoral nororiental de Cuba.

Para su análisis, se compara el modelo de Dean (1991) y el modelo ajustado por García (2005); en el primer caso, por ser el modelo clásico y usado universalmente y en el segundo caso, por ser el modelo propuesto para las playas cubanas. Inicialmente se probará con el modelo de Dean, luego con el modelo ajustado por García y finalmente el modelo propuesto como parte de esta investigación.

IV. RESULTADOS

4.1. Particularidades morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental de Cuba

La plataforma insular cubana se considera como un área única dividida en cuatro regiones, que se distinguen de acuerdo a su posición geográfica respecto a la isla principal. Estas son: Plataforma Noroccidental (Las Coloradas), Nororiental (Jardines del Rey), Suroccidental (Los Canarreos) y Suroriental (Jardines de la Reyna) (Fig.3.1). Según Ramírez (1989), presenta ciertas diferencias en su desarrollo geomorfológico, los cuales están asociados al comportamiento tectónico de la Isla de Cuba, a su configuración geográfica, a la magnitud de sus ríos, que no aportan grandes volúmenes de sedimentos a la plataforma, a la forma selectiva de destrucción de las costas carbonatadas y a las peculiaridades de los arrecifes coralinos que lo rodean, entre otros.

En este contexto, el litoral nororiental de Cuba, desde Punta Quemado, el extremo más oriental de Cuba, hasta Punta Maternillo, en la bahía de Nuevitas (Fig.3.1), tiene la singularidad de no formar parte de ninguna de las cuatro zonas de plataforma o regiones, que, desde el punto de vista geomorfológico, ha sido subdividido el archipiélago cubano. Núñez-Jiménez (1984), la denomina como región de la plataforma estrecha entre la Bahía de Nuevitas y Punta de Maisí. Esta característica, unida al comportamiento del régimen hidrodinámico y de los sedimentos que componen la costa, impone un grupo de rasgos peculiares para este litoral.

4.1.1. Geomorfología

El rasgo geomorfológico más característico del litoral nororiental de Cuba es la estrechez o ausencia de plataforma marina. Hacia la porción central del territorio la plataforma no supera un kilómetro de ancho y casi desaparece hacia el extremo oriental, contrario a lo que ocurre en el resto de la costa norte de Cuba, donde la plataforma tiene una extensión de varios kilómetros de ancho, llegando a alcanzar incluso decenas de kilómetros.

La costa, en su mayor parte está constituida por una terraza rocosa baja, que no supera 2,0 m de altura (n.m.m.), sobre la cual se desarrolla el lapiés y otras formas cársticas. Se extiende a lo largo de 211,5 km, ocupando el 46,3 % del litoral nororiental de Cuba. En gran parte está cubierta por depósitos de fragmentos de corales (camellón o seboruco costero) (Fig. 4.1A) que constituyen restos de un arrecife frontal que quedó emergido, luego del descenso de unos 3 o 4 m del nivel del mar, ocurrido con posterioridad a la transgresión Flandriense (Cabrera, 2011) y no como consecuencia del acarreo de materiales arrojados por tormentas como había sugerido Núñez-Jiménez (1984). Cabrera (2011), los clasifica como camellones antiguos de edad Holoceno temprano, probablemente correlacionables con la transgresión Flandriense (6.500 AP). En grandes sectores, este camellón costero fue destruido, casi totalmente, para su empleo como material de construcción.

Formando pequeños sectores, aparecen acantilados de poca altura, como en la zona comprendida entre las bahías de Naranjo y Samá y al este del Río Yumurí, en Maisí; ocupando el 14% de las costas. Por su parte, las playas de diverso origen y material constituyente se extienden a lo largo de 123 km de la costa exterior, representando el 26% mientras que los manglares se extienden a lo largo de 57,3 km, representando sólo el 12%, en todos los casos para las costas exteriores expuesta a la acción del oleaje oceánico (Tabla 4.1). Si se consideran las costas interiores, el comportamiento es diferente, debido al predominio de procesos biogénicos, formadores de manglares, en el interior de las bahías, predominando entonces las costas de manglar, en tanto las playas ocuparían sólo el 10%.

A pesar de que éste litoral representa sólo el 8,2% de las costas exteriores de la isla de Cuba, más del 60% de las bahías de bolsa de Cuba se encuentran en él, incluyendo las mayores bahías de bolsa del archipiélago cubano (Nipe, Chaparra - Puerto Padre, Malagueta, Levisa, Tánamo, Manatí y Banes). Estas bahías sirven de trampas para el material sedimentario arrastrado por las corrientes superficiales, desde los territorios emergidos, así como los movidos por la corriente de deriva litoral y las corrientes

asociadas a las mareas. De ahí la razón del predominio de las costas de manglar en el interior de las bahías.

Tabla 4.1. Porcentaje de tipos de costa en el litoral nororiental de Cuba

Litoral Nororiental de Cuba	Expuesto al oleaje oceánico		Incluyendo costas en bahías	
Terrazas	211.456 m	45 %	448.215 m	32 %
Playas	122.979 m	26 %	142.267 m	10 %
Acantilados	64.840 m	14 %	205.632 m	15 %
Manglar	57.280 m	12 %	588.370 m	42 %
Bocanas	17.270 m	3 %	17.270 m	1 %
Total	473.825 m	100 %	1.402.054 m	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Las bahías penetran varios kilómetros tierra adentro, muchas con canales estrechos y sinuosos donde tiene lugar fuertes corrientes asociadas a las mareas. Según Núñez-Jiménez (1982), deben su origen a la transgresión Flandriense, cuando el nivel oceánico ascendió debido a la fusión de los glaciares continentales, quedando inundadas las cuencas inferiores de los ríos regionales. En muchas de ellas, es posible apreciar los paleocauces extendiéndose por la plataforma insular (Fig.4.1B).

Hacia la mitad oriental del territorio, existe una densa red fluvial, que ha dado lugar al desarrollo de algunas zonas palustres, como en el interior de la Bahía de Nipe y gran cantidad de ensenadas, caletas y otras irregularidades en la costa, que han sido propicias para la acumulación de material sedimentario y la formación de playas. La acumulación de arena en muchas de estas irregularidades, creadas por la red fluvial, produce el cierre de la parte anterior de los cauces de agua, dando lugar a numerosos estuarios de barrera (esteros o tibaracón), siendo los de Baracoa, los más conocidos debido a su gran número y extensión (Fig.4.1C).

Estos estuarios tienen la particularidad de estar constituidos por sedimentos aportados, tanto por los cauces fluviales como por el mar, pues al formar irregularidades en la costa,

se han convertido en trampas para los sedimentos que se transportan paralelo al litoral, condicionado por la presencia de una corriente de deriva litoral neta con dirección al Oeste-noroeste.

Un elemento distintivo de este tramo de costa es la ausencia de cayos, islotes y bajos, excepto los que se encuentran en el interior de algunas bahías como en Nuevas Grandes, Manatí, Malagueta, Puerto Padre, Chaparra, Naranjo, Banes, Nipe, Levisa, Tánamo y Cebollas y algunos muy próximos a la costa como Guincho, Burro, Bariay, Moa, del Medio y los de Jaraguá en Baracoa. Estos últimos constituyen, según Rodríguez (2008), los cayos o islotes más orientales del archipiélago cubano y no Cayo del Medio como refiere Núñez-Jiménez (1984).

Otro rasgo característico de este litoral es la presencia de terrazas emergidas, donde se observan claramente seis niveles de superficies emergidas (Fig.4.1D), siendo las de Maisí las más conocidas por su altura y número. Aquí se llegan a contabilizar más de 15 niveles de terrazas, a alturas que alcanzan hasta los 400 m, sobre el nivel medio del mar (n.m.m).

En las bases y zonas frontales de estas terrazas se encuentran labrados numerosos nichos de marea. Para Núñez-Jiménez (1982), constituyen una prueba de las fluctuaciones del nivel del mar que han tenido lugar a lo largo de la historia geológica del territorio, sin descartar los movimientos terrestres que también afectaron la relación entre los niveles de la costa y el mar.

En la plataforma insular, el fondo desciende de manera abrupta, con terrazas entre 5-6 m, 10-12 m, 18-20 m, 26-35, para luego descender nuevamente hasta los 50 m y finalmente descender hasta más de 200 m (Fig. 4.2). Según Ionin et al. (1977), en este litoral se logran contabilizar hasta nueve niveles de terrazas submarinas, a diferencia del resto del archipiélago cubano, donde se aprecian de cinco a seis niveles, dependiendo del territorio en cuestión. Ello obedece al papel, en el pasado, de la actividad tectónica en este sector del archipiélago cubano (Arango, 2015).

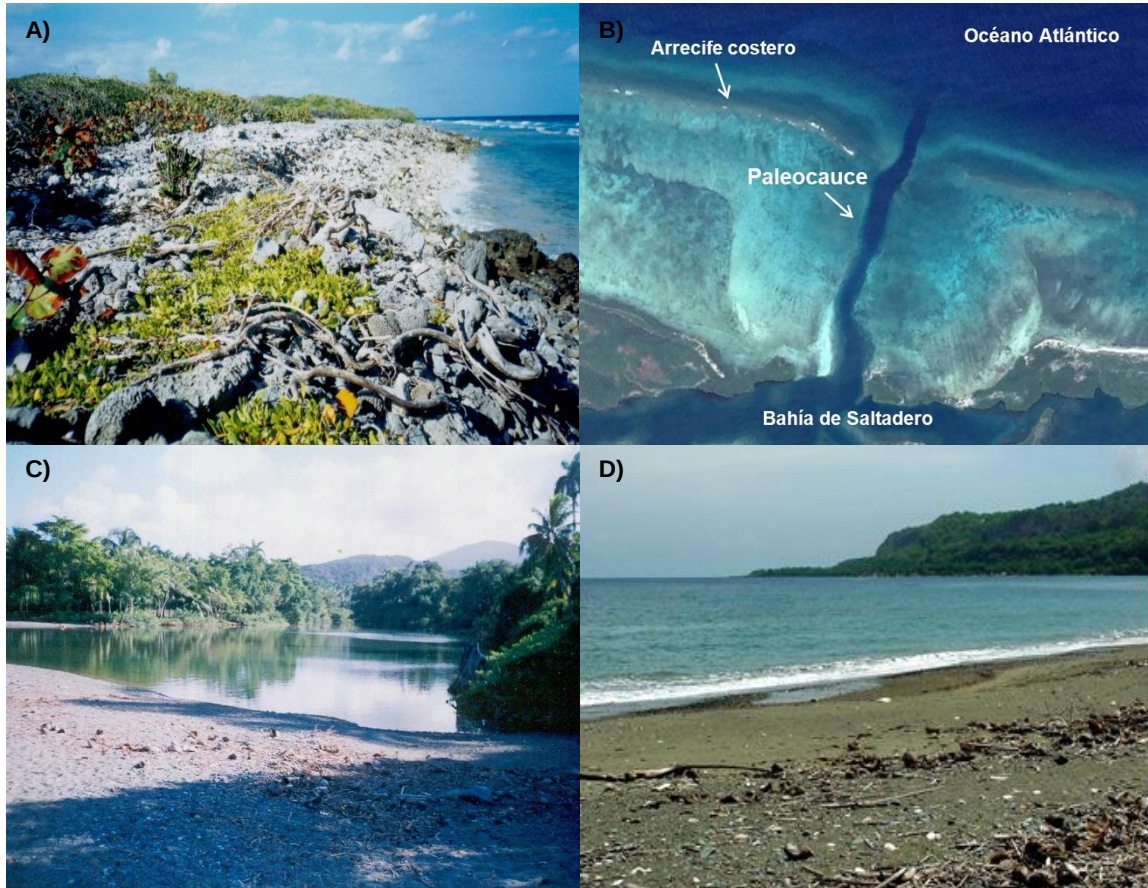


Figura 4.1. Formas del relieve costero característico del litoral nororiental. A): Camellón costero sobre la terraza baja, B): Paleocauce del río Saltadero extendiéndose por la plataforma insular (Google Earth, 2018), C): Estuario de barrera (tibaracón) del río Nibujón, D): Terrazas marinas emergidas en Playa Barigüita, Baracoa

Fuente: Elaboración propia (fotos, 2016-2017 e imagen Google, 2018).

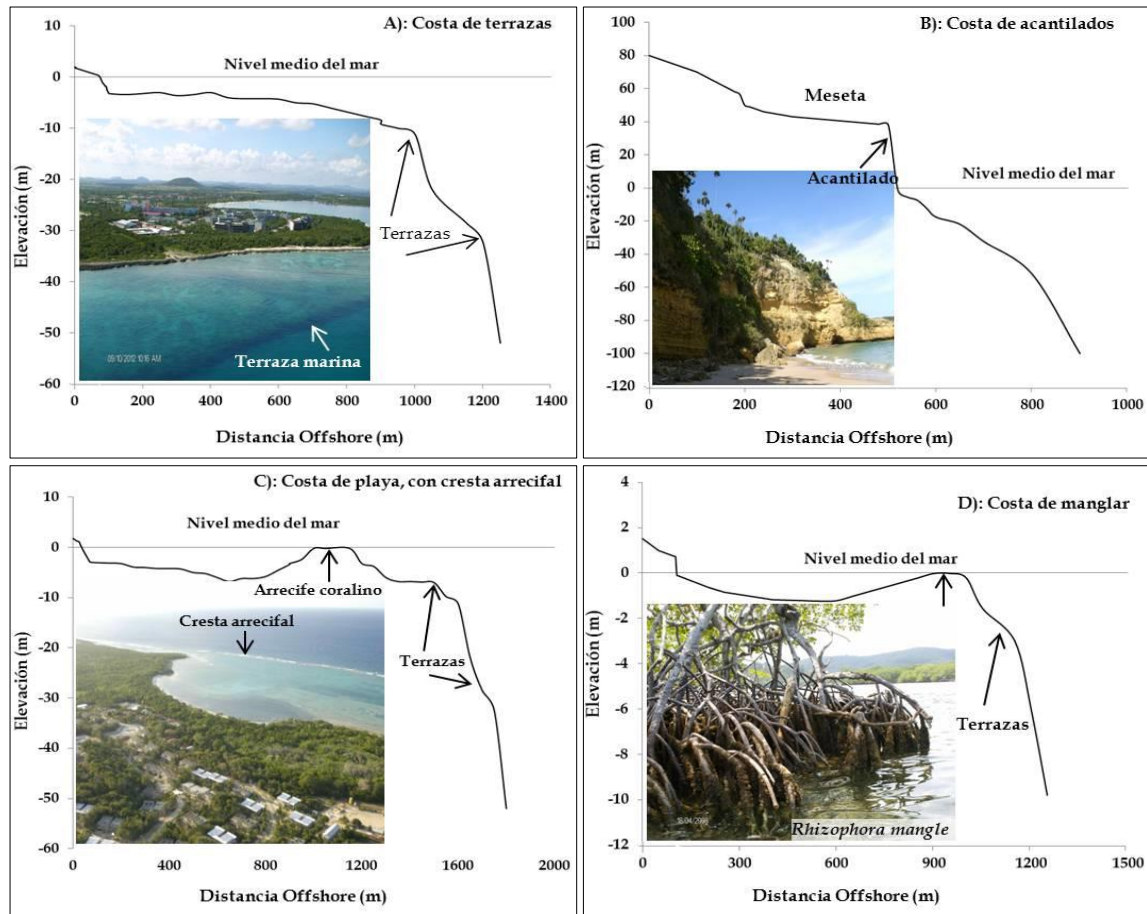


Figura 4.2. Esquema de perfiles característicos en la plataforma marina del litoral nororiental de Cuba. A): Costa de terrazas, la imagen muestra el borde de la primera terraza marina; B): Costa de acantilado, la imagen muestra el colapso de bloques; C): Costa de playa, la imagen muestra el borde del arrecife de coral que bordea la playa; D): Costa de manglares, con una planta de *Rhizophora mangle*

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de terreno (fotos 2012 y 2017).

Aunque hay un amplio predominio de playas de arenas biogénicas, como rasgo característico hay un aumento significativo de las playas constituidas por arenas terrígenas hacia el extremo oriental de la región de estudio (Fig.4.3). Ello se debe a la abundancia de ríos y arroyos en esta porción del territorio, que durante la época de lluvia acarrearán cantidades significativas de sedimentos, favorecido por la condición montañosa del relieve y la gran pluviosidad que allí tiene lugar.

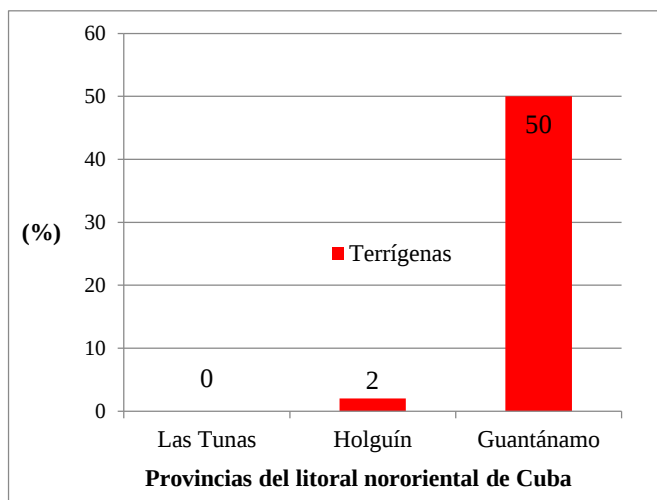


Figura 4.3. Distribución de las playas terrígenas por provincia

Fuente: Elaboración propia. La ubicación de las provincias aparece en la figura 3.1.

Una influencia considerable sobre el régimen hidrológico de estos ríos lo ejercen los ciclones tropicales (huracanes) que traen abundantes y copiosas precipitaciones, fundamentalmente entre los meses de agosto y noviembre.

4.1.2. Hidrodinámica

Desde el punto de vista hidrodinámico, el litoral nororiental de Cuba, se caracteriza por estar expuesto a la acción persistente de oleajes durante todo el año; durante el verano con rumbos predominantes del I y II cuadrantes de la rosa de los vientos y durante el invierno con rumbos del I y IV cuadrantes. Ello está determinado por el régimen de viento que afecta la región (25-30 km/h), favorecido por la estrechez de su plataforma, que rara vez supera una milla náutica de ancho.

Del total de rumbos reportados para este litoral, los vientos del I y II cuadrantes tienen una frecuencia superior al 75%, fundamentalmente los rumbos Este (53,09%), Nordeste (9,75%), Norte (5,48%) y Sureste (8,94%). Esto se debe a que Cuba y el litoral nororiental con más fuerza, es afectada durante casi todo el año por los vientos Alisios, debido a la presencia casi permanente del anticiclón del Atlántico Norte sobre las Islas Azores.

Por tanto, los rumbos de oleajes incidente en la zona de estudio y que definen el comportamiento del régimen hidrodinámico en el litoral nororiental de Cuba son Norte, Nordeste, Este, Noroeste y Sureste. El resto no tienen influencia en la zona de estudio o su influencia es muy baja, por lo que su tiempo de acción puede ser considerado como tiempo de calmas. Bajo estos patrones de oleajes se establece una corriente casi paralela a la línea litoral y una deriva litoral neta con dirección Oeste-noroeste.

La figura 4.4 muestra que las frecuencias de ocurrencia por rumbos aumentan de Noroeste a Este: 4,93%, 9,82% y 18,19% y 29,28% para los rumbos Noroeste, Norte, Nordeste y Este, respectivamente, y el Sureste con 19,42%; o sea predominan los oleajes del I cuadrante.

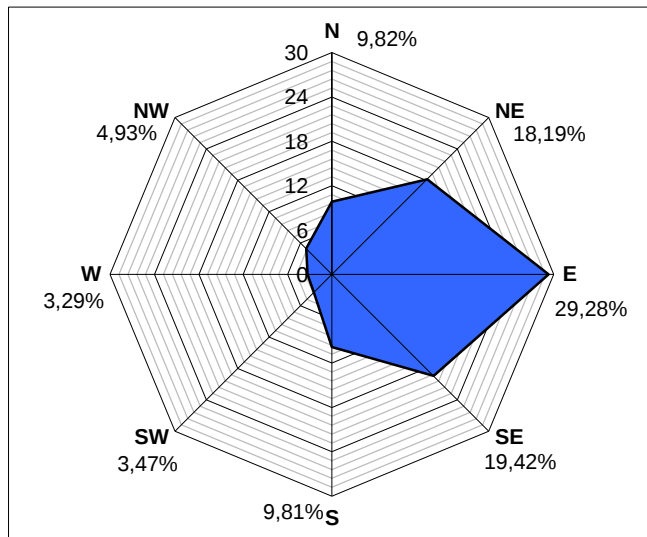


Figura 4.4. Distribución porcentual del oleaje por rumbos

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del *Global Waves Statistics* (1965-2015).

Sin embargo, las mayores alturas medias del oleaje significativo corresponden a los rumbos Norte y Noroeste: 2,00 m y 1,99 m, respectivamente (Tabla 4.2), lo que está relacionado con la entrada de los frentes fríos y los vientos fuertes acompañantes. Ello evidencia que, aunque hay un predominio de los oleajes del I cuadrante, los del IV

cuadrante resultan más energéticos y por tanto tienen una fuerte repercusión en los procesos litorales.

Tabla 4.2. Altura media ponderada del oleaje significativo en el litoral nororiental de Cuba

Rumbos	Altura del oleaje (m) por rumbos de incidencia								Media general
	NW	N	NE	E	SE	S	SW	W	
Litoral NE de Cuba	1,65	1,70	1,49	1,44	1,38	1,31	1,11	1,32	1,43

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del *Global Waves Statistics* para un periodo de 50 años (1965-2015).

Aunque el comportamiento del oleaje es similar para la costa norte de Cuba, como se aprecia en la figura (Fig.4.5), en el litoral nororiental, la altura de la ola resulta mayor, pues recibe la acción directa del oleaje oceánico debido a la estrechez de la plataforma y por el régimen de viento, comentadas con anterioridad.

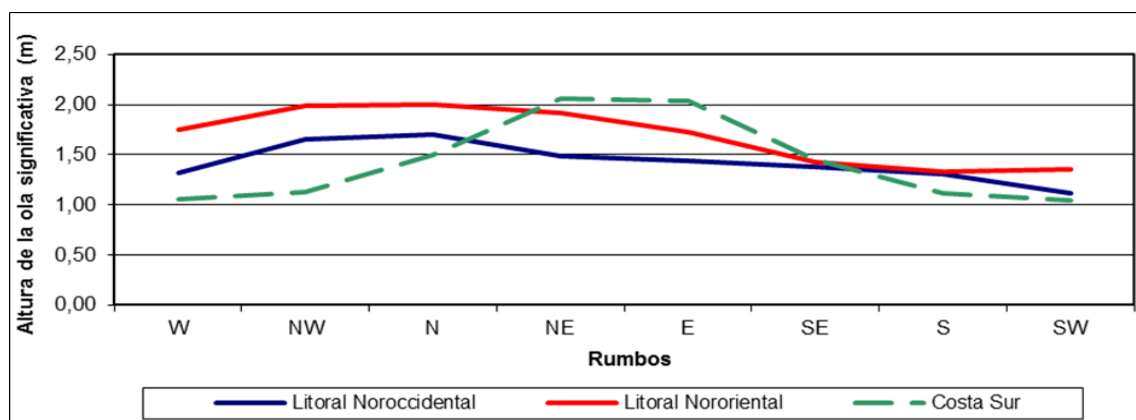


Figura 4.5. Comportamiento del oleaje habitual en el litoral cubano. En el litoral nororiental se registran las mayores alturas de la ola

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del *Global Waves Statistics* para un periodo de 50 años (1965-2015).

En el caso de la costa sur, el comportamiento es totalmente diferente. Aquí las mayores alturas medias del oleaje significativo corresponden a los rumbos Nordeste y Este: 2,06 m y 2,04 m, respectivamente, determinado por los patrones de viento y oleaje del mar Caribe.

En cuanto a las mareas, en el litoral nororiental de Cuba tienen lugar mareas mixtas semidiurnas y tiene la singularidad de registrar las mayores amplitudes de marea del archipiélago cubano, con una amplitud media de 0,56 m, manteniendo el rango de mareas micromareales (Fig.4.6).

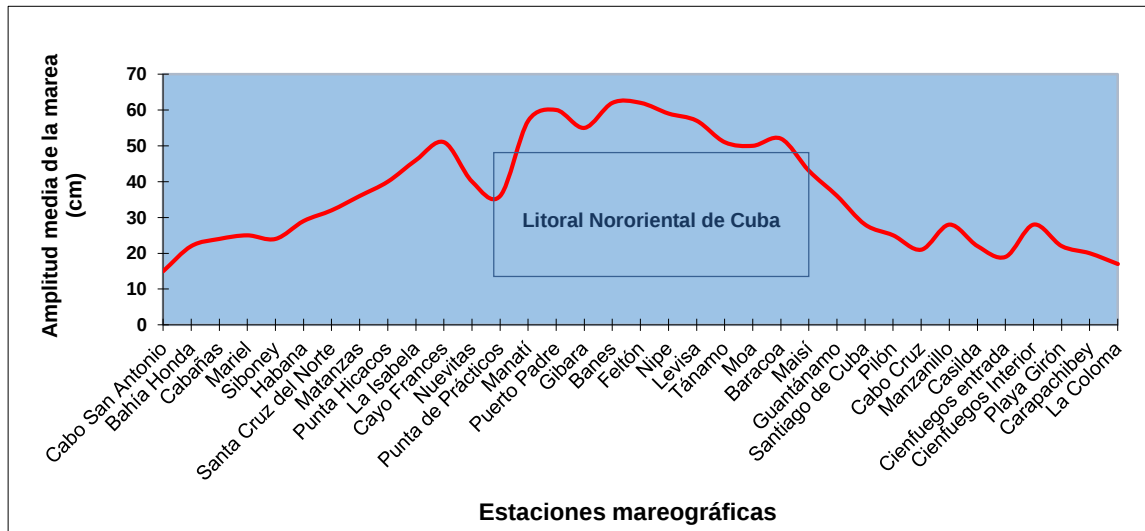


Figura 4.6. Amplitud media de la marea en el archipiélago cubano y litoral nororiental de Cuba

Fuente: Elaboración propia a partir de Tablas de Marea de la República de Cuba, 2017.

Este comportamiento de las mareas genera corrientes, que se vuelven fuertes en la entrada de las bahías, en dirección Oeste-noroeste durante el flujo (llenante) y Este-sureste, durante el reflujo (vaciente) y alcanza una magnitud promedio de 14 cm/seg (GEOCUBA, 2001, 2002). También tienen lugar corrientes de deriva con dirección Oeste-noroeste, debido a la alta persistencia de los vientos Alisios de componentes Este y la orientación y configuración de la línea litoral.

Con la entrada de los frentes fríos, que traen aparejados vientos fuertes de componentes Noroeste, y bajo condiciones de calmas eólicas, relativamente prolongadas, que no es usual para esta región, se produce un flujo residual de la corriente en dirección Sureste (GEOCUBA, 2001, 2002).

4.1.3. Sedimentos

El estudio de la composición genética de 54 playas de este litoral, demuestran el predominio de restos de moluscos, seguido de fragmentos de corales, foraminíferos y algas calcáreas. Los restos de minerales aparecen en proporciones no superiores al 10%, denotando el predominio, casi absoluto, de restos orgánicos y la génesis marina de sus sedimentos.

El análisis comparativo con playas de otras regiones del archipiélago cubano, evidencian que las playas del litoral nororiental de Cuba, poseen una mayor cantidad de restos de moluscos y corales, y mucho menos cantidad de restos de algas calcárea, que las demás playas del archipiélago cubano tomadas como referencia en el estudio (Fig.4.7).

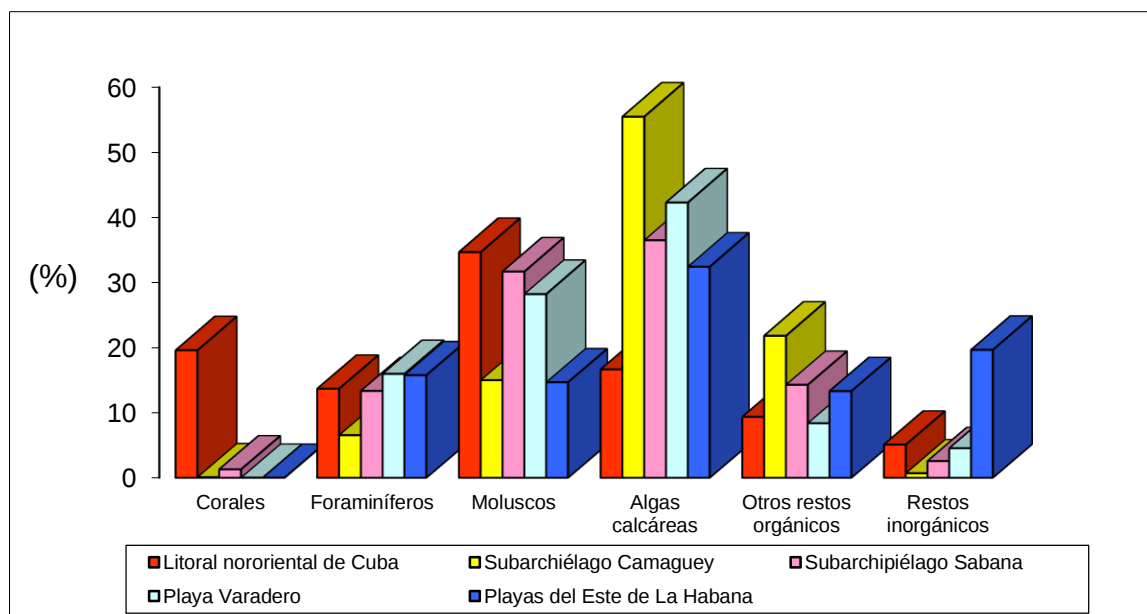


Figura 4.7. Composición genética de las arenas de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba y otras playas del archipiélago cubano

Fuente: Elaborado a partir de datos propios de muestreos de arena realizados en los años 2016, 2017 y 2018, y datos de García (2005), Ramírez y Álvarez (1990), en: García (2005), Proyecto (CUB/98/G32), en: García (2005), Estación de Monitoreo de Caibarién (2009) y Zúñiga (2009).

Esto se debe a las diferencias existentes entre el litoral nororiental de Cuba y las demás regiones del archipiélago cubano, en particular la poca extensión de la plataforma insular, lo cual limita la presencia de grandes áreas de producción de detritos por parte de las algas calcáreas y los organismos marinos en general.

De acuerdo a la granulometría del sedimento hay un predominio de arenas medias (0,25-0,50 mm), según clasificación Wentworth, lo cual está presente en el 72,2% de las playas estudiadas. El 10,9% de las playas están constituidos por sedimentos finos y un 16,4% por sedimentos gruesos. La tabla 4.3, muestra la granulometría de la arena (D_{50}) y el coeficiente de selección (S_o) en la totalidad de las playas del litoral nororiental.

El predominio de arena de granulometría de constitución media (0,25-0,50 mm) y gruesa (0,51-2,00 mm), según clasificación Wentworth, se debe a la cercanía de las fuentes de abasto de sedimentos. Los restos de moluscos, foraminíferos y corales que conforman la arena de estas playas se produce a escasos metros de la línea de costa, en la laguna arrecife y el arrecife coralino que antecede a las playas.

Tabla 4.3. Granulometría y coeficiente de selección de las arenas de las playas del litoral nororiental

Nombre de la playa	D_{50} (mm)	S_o	Clasificación Wentworth	Nombre de la playa	D_{50} (mm)	S_o	Clasificación Wentworth
Nuevas Grandes	0,35	1,473	Arena media	Minint	0,53	1,440	Arena gruesa
La Victoria	0,49	1,667	Arena media	Pesquero	0,32	1,659	Arena media
Los Pinos	0,28	1,576	Arena media	Yuraguanal	0,24	1,899	Arena fina
Manglito	0,47	1,560	Arena media	Estero Ciego	0,31	1,744	Arena media
Brava	0,31	1,970	Arena media	Guardalavaca	0,21	1,984	Arena fina
Blanche	0,32	1,920	Arena media	Del Muerto	0,42	1,750	Arena media
Bonita	0,30	1,590	Arena media	Larga	0,36	1,970	Arena media
Rocosa	0,46	1,970	Arena media	Manglito	0,43	1,970	Arena media
Covarrubias	0,46	1,367	Arena media	Punta de Mulas	0,42	1,670	Arena media
R. Covarrubias	0,29	1,570	Arena media	Puerto Rico	0,44	1,750	Arena media
Las Guanas	0,30	1,545	Arena media	Morales	0,49	1,424	Arena media
Punta Piedra	0,22	1,616	Arena fina	Carmona	0,45	1,533	Arena media
Dorada	0,51	1,579	Arena gruesa	Baracutey	0,40	1,547	Arena media

Yuraguana	0,42	1,870	Arena media	Larga	0,54	1,630	Arena gruesa
La Boca	0,21	1,500	Arena fina	Corinthia	0,38	1,846	Arena media
La Llanita	0,33	3,755	Arena media	Barrederas	0,36	2,130	Arena media
Punta Tomate	0,36	1,541	Arena media	Mejías	0,45	1,610	Arena media
Los Jarros	0,57	1,313	Arena gruesa	Yamanigüey	0,41	1,630	Arena media
Corella	0,33	1,599	Arena media	Jaragua	0,21	1,410	Arena fina
La Herradura	0,45	1,630	Arena media	Mercedes	0,47	2,170	Arena media
Ens. Honda	0,43	1,433	Arena media	Maguana	0,44	1,615	Arena media
Las Azules	0,29	1,544	Arena media	Cajuaio	0,37	1,777	Arena media
Juan Antonio	0,48	2,740	Arena media	Quibungo	0,43	1,970	Arena media
Caletones	0,38	1,580	Arena media	María	0,58	1,970	Arena gruesa
Los Bajos	0,39	1,501	Arena media	Manglito	0,51	2,110	Arena gruesa
Blanca	0,23	2,042	Arena fina	Las Azules	0,53	1,160	Arena gruesa
Don Lino	0,55	1,450	Arena gruesa	Quemado	0,43	1,141	Arena media

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al coeficiente de selección (S_o), según la clasificación de Blott y Kenneth (2001), el 89,1% de las playas tienen sus arenas entre moderadamente seleccionadas o muy bien seleccionadas ($S_o < 1,27-2,00$). Sólo un 10,9% de las arenas entran en el rango de pobremente seleccionado ($S_o > 2,00-4,00$). Ello demuestra que las arenas presentes en las playas del litoral nororiental de Cuba son muy homogéneas en el tamaño de grano, es decir se encuentra muy próximo al valor de la granulometría media de la playa.

4.1.4. Características generales de las playas

El 78,8% de las playas del litoral nororiental de Cuba están constituidas por arenas biogénicas, un 14,1% por terrígenas y el 7,1% por arenas de génesis mixtas (Fig.4.8). Se consideran playas biogénicas, aquellas que están constituidas en más del 70% por elementos provenientes de organismos marinos y en su composición destacan los moluscos, foraminíferos, corales y algas calcáreas.

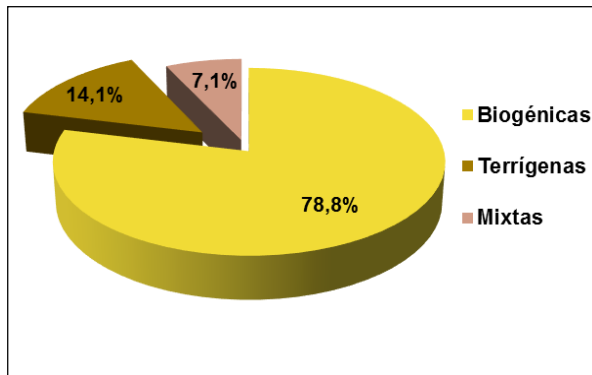


Figura 4.8. Génesis de los sedimentos de las playas del litoral nororiental de Cuba

Fuente: Rodríguez y Córdova, 2006.

A diferencia de lo que ocurre en el resto del archipiélago cubano, en este litoral hay una ausencia total de sedimentos oolíticos. En ello influye la constitución geológica, los procesos geoquímicos que intervienen en su formación, la actividad de los organismos marinos, entre otros factores.

La identificación y análisis de las geo-formas características encontradas en la totalidad de las playas biogénicas del litoral nororiental (54 playas) evidencia que el 91% de ellas poseen arrecifes costeros, generalmente paralelos a las playas y una distancia promedio de 441 metros. En el análisis de las geo-formas para dos periodos analizados (verano e invierno), muestra que en ninguna de las dos estaciones fueron encontradas corrientes de retorno (resaca), ni cúspides y sólo en dos playas (3,6%), para la temporada de invierno, fueron encontradas ligeras oscilaciones rítmicas. Los anexos 5 y 6, referidos con anterioridad, contienen los resultados para cada playa.

La tabla 4.4, muestra la comparación de los valores promedio de los elementos morfológicos de las playas del litoral nororiental durante el verano de 2017 y el invierno de 2018. En ella se aprecia el estrechamiento de la playa durante la época de invierno (ancho de la berma y ancho total) y un ligero incremento del ancho de la cara y la altura de la berma. También para el periodo del invierno, hay un ligero incremento del número de barras y aparecen las únicas oscilaciones rítmicas encontradas en las playas.

Tabla 4.4. Valores promedio de los elementos morfológicos de las playas del litoral nororiental

Elementos morfológicos	Etapas de Verano	Etapas de Invierno
Ancho total	64,49 m	57,55 m
Ancho cara	11,20 m	11,24 m
Ancho berma	12,93 m	8,02 m
Altura de la berma	1,29 m	1,33 m
Número de crestas	1,00	1,11
Número de barras	0,60	0,76
Presencia cúspides	0,00	0,00
Oscilaciones rítmicas	0,00	0,04
Corrientes de resaca	0,00	0,00
Granulometría media	0,40 mm	0,39 mm

Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, las playas del litoral nororiental, se caracterizan por poseer un ancho medio superior a 50 m, con una cara de 11 m de ancho y bermas estrechas, en muchos casos ausentes, para dar paso a una o dos cadenas de pequeñas dunas. Predominan las playas con arenas de granulometría media, con una sola cresta de berma y alturas entre 1,29 y 1,33 m, como promedio. En la parte sumergida de la playa aparece generalmente una barra de arena de poca altura a una distancia inferior a los 100 m de la costa, sin la presencia de corrientes de retornos y con arrecifes coralinos frangeantes en forma de barrera, adosados generalmente al extremo Este de los litorales. La figura 4.9, muestra un perfil característico de las playas del litoral nororiental de Cuba.

Bajo el régimen de oleaje que incide en este litoral (Fig.4.4, Tabla 4.2) debido a la orientación de la línea de costa (Este sureste-Oeste noroeste), como tendencia general, las playas del litoral nororiental de Cuba, muestran procesos acumulativos al final del invierno e inicios de la primavera, con una máxima acumulación en el mes de abril, en tanto se erosionan al inicio del otoño, con picos en los meses de septiembre y octubre (Rodríguez, 1992; Rodríguez y Córdova, 2005a, 2006, 2010).

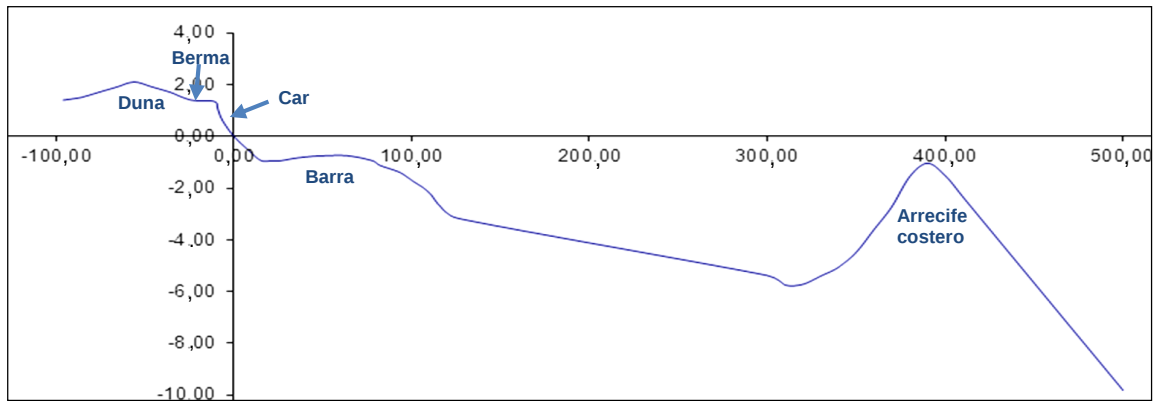


Figura 4.9. Perfil típico de las playas del litoral nororiental de Cuba

Fuente: Elaboración propia a partir de sondeo de pendiente submarina de playa Los Bajos, 2017.

La figura 4.10, integra las principales características del litoral nororiental de Cuba. En ella se aprecia la orientación de la línea de costa, la disposición de los arrecifes coralinos, los procesos litorales, entre otros aspectos.

Los arrecifes coralinos se disponen casi paralelos a la línea litoral. Estos arrecifes cumplen un importante papel en las playas, pues son los responsables de la creación de condiciones adecuadas para el desarrollo de las especies marinas productoras de sedimentos, y además un excelente elemento de defensa ante la acción de los oleajes de mayor energía, particularmente durante el paso de huracanes y tormentas tropicales.

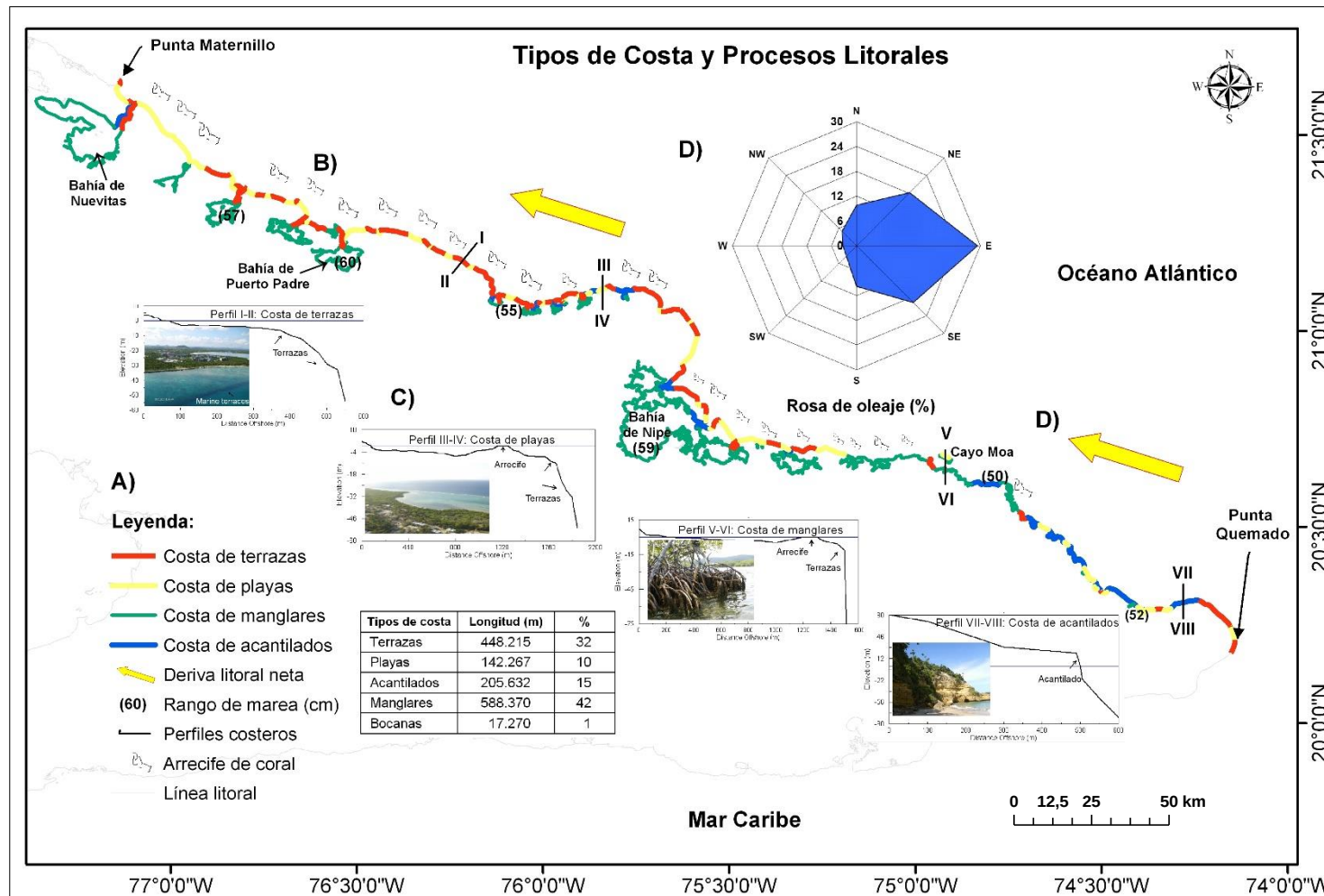


Figura 4.10. Tipos de costa y procesos litorales en el litoral nororiental de Cuba. A): Tipos de costa y orientación de la línea litoral, B): Disposición de los arrecifes de coral, C): Perfiles característicos de diferentes tipos de costa, D): Rosa de oleaje y dirección de la corriente de deriva litoral

Fuente: Elaboración propia.

4.2. La erosión en las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba

4.2.1. Identificación de la erosión en las playas

El 50% de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba tienen una tendencia erosiva (erosión o fuerte erosión), procesos que ocupan el 47,4% del total de la longitud de las costas consideradas en el estudio (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Categorías de los procesos costeros en el litoral nororiental de Cuba

Playa	Longitud total (m)	Alta Erosión (m)	%	Erosión (m)	%	Estabilidad (m)	%	Acumulación (m)	%	Tendencia
Maguana	960	160	16,7	140	14,6	60	6,3	600	62,5	Acumulación
Guardalavaca	640	64	10,0	304	47,5	52	8,1	220	34,4	Erosión
Estero Ciego	807	28	3,5	400	49,6	316	39,2	63	7,8	Erosión
Yuraguanal	560	0	0	154	27,5	200	35,7	206	36,8	Acumulación
Pesquero	748	0	0	646	86,4	102	13,6	0	0	Erosión
Don Lino	295	0	0	265	89,8	30	10,2	0	0	Erosión
Minint	100	0	0	38	38,0	62	62,0	0	0	Estabilidad
Blanca	250	20	8	200	80,0	30	12,0	0	0	Erosión
Los Bajos	680	40	5,9	540	79,4	100	14,7	0	0	Erosión
Corella	2.800	320	11,4	560	20,0	720	25,7	1.200	42,9	Acumulación
P. Tomate	1.000	154	15,4	264	26,4	470	47,0	112	11,2	Estabilidad
La Llanita	1.450	0	0	580	40,0	0	0	870	60,0	Acumulación
Total	10.290	786	7,6	4.091	39,8	2.142	20,8	3.271	31,8	Erosión

Fuente: Elaborado a partir de interpretación de imágenes satelitales y el uso de la aplicación DSAS. La figura 3.1, muestra la localización geográfica de las playas.

Las evidencias de los procesos erosivos más recurrentes en el tiempo fueron la existencia de afloramientos rocosos en la zona intermareal, la presencia de escarpes en la berma y de tocones de árboles en la cara de la playa (Fig.4.11).



Figura 4.11. Evidencias erosivas más recurrentes encontradas en las playas. A): Afloramientos rocosos en la zona intermareal, B): Tocones y árbol centenariano abatido en la cara de la playa, C): Escarpes en bermas y base de la duna

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de terreno (fotos, 2012-2017).

Similares resultados se obtienen del estudio de la variación de la línea litoral por medio de perfiles de playa. La tabla 4.6, muestra la magnitud de los procesos erosivos, obtenido a través de perfiles de playas para tres periodos de análisis.

Tabla 4.6. Variación de la línea litoral a través de perfiles de playas

Perfil por playa	Periodo	Magnitud (m/yr.)	Periodo	Magnitud (m/yr.)	Periodo	Magnitud (m/yr.)	Tendencia
P3 Maguana	2000-2010	-0,81	2000-2015	-0,75	2000-2017	-0,75	Erosión
C4 Guardalavaca	2000-2009	-0,17	2000-2013	-0,08	2000-2018	-0,33	Erosión
P5 Estero Ciego	2001-2009	-0,53	2001-2012	-0,95	2001-2018	-0,32	Erosión
P2 Yuraguanal	2003-2012	0,56	2003-2015	0,25	2003-2018	0,26	Acumulación
P3 Pesquero	2005-2012	-0,14	2005-2015	-0,46	2005-2017	-0,23	Erosión
P47 Don Lino	2000-2008	-0,16	2000-2012	-0,05	2000-2017	-0,33	Erosión
P5 Minint	2000-2003	-0,50	2000-2012	-0,75	2000-2018	-0,33	Erosión
C1 Blanca	2000-2009	-0,23	2000-2015	-0,33	2000-2018	-0,22	Erosión
P5 Los Bajos	2007-2013	-0,33	2007-2016	-0,56	2000-2018	-0,45	Erosión
P4 Corella	2007-2013	0,01	2007-2016	0,36	2007-2018	0,64	Acumulación
P1 Punta Tomate	2004-2013	-0,09	2004-2015	-0,12	2004-2018	-0,02	Estabilidad
P4 La Llanita	2004-2012	0,45	2004-2015	0,19	2004-2017	0,63	Acumulación

Nota: Los códigos de los perfiles de playa se basan en la clasificación oficial utilizada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en Holguín, Cuba.

En la tabla se aprecia que la tendencia (erosión, estabilidad, acumulación) encontrada en las playas mediante perfiles de playa es la misma a la encontrada mediante imágenes satelitales, cuyos resultados se mostraron anteriormente. Las figuras A1, A2 y A3 (Anexo 11), muestran los perfiles de playa, utilizados para el análisis, en cada una de las 12 playas consideradas en el estudio.

En los casos particulares de las playas Maguana y Minint, la condición cambia, debido a la localización del perfil utilizado para el análisis (Fig.4.12, Fig.4.13 y Anexo 11), pero se corresponden con los resultados obtenidos mediante imágenes satelitales para el sector donde se localiza el perfil utilizado para el análisis, confirmando la coincidencia de resultados mediante ambas técnicas.

4.2.2. Magnitud de la erosión

Aunque el 50% de las playas estudiadas tienen una tendencia erosiva, ninguna de ellas está sometida a procesos erosivos fuertes ($\geq 1,2$ m/año). En términos de longitud de costa afectada predomina “erosión”, representando el 39,8% de la totalidad de la costa evaluada (Tablas 4.5).

Como se aprecia en la figura 4.12, en playas como Blanca, Pesquero, Don Lino, Estero Ciego y Guardalavaca de la subregión central (Holguín) predomina la “erosión (entre -0,2 y -1,2 m/año). Sólo de manera muy puntual en sectores de las playas Estero Ciego y Guardalavaca aparece “fuerte erosión” ($\geq -1,2$ m/año), sin que sea la tendencia que se aprecia en ambas playas.

Una situación distinta ocurre en las playas Maguana (subregión Este), Corella y La Llanita (subregión Oeste). Si bien en estas playas hay sectores donde aparece “fuerte erosión” ($\geq -1,2$ m/año), en términos generales predominan procesos acumulativos o estabilidad (Fig.4.13). El análisis de la variabilidad de la línea litoral en ellas, evidencia que las arenas perdidas en algunos sectores constituyen ganancias para otros.

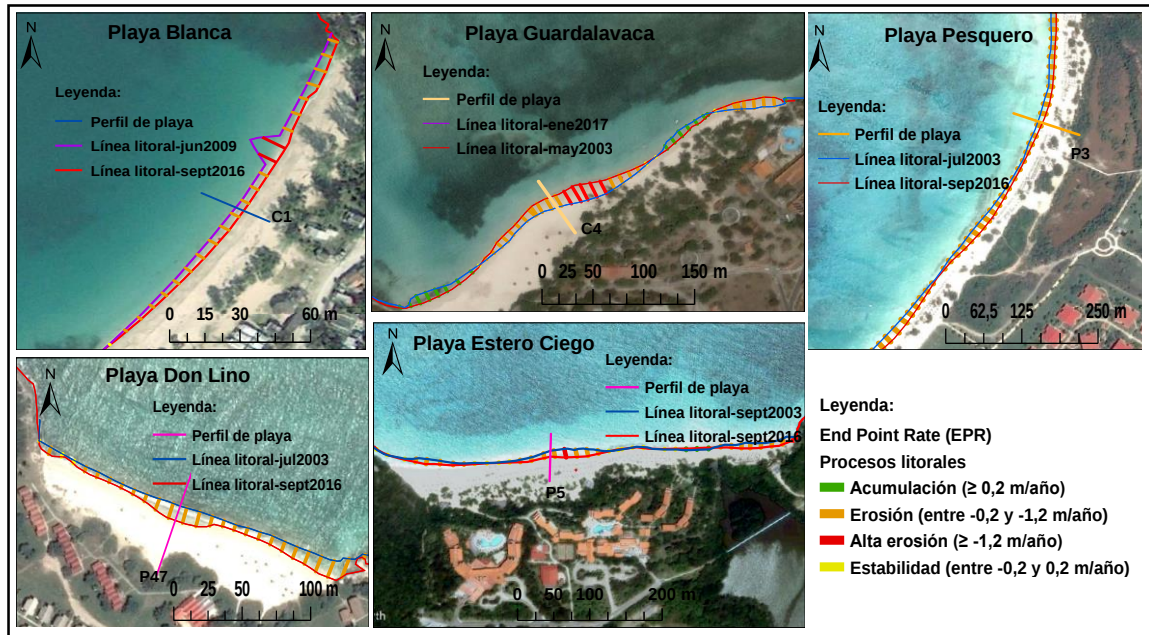


Figura 4.12. Magnitud de los procesos de erosión en playas de la subregión central del litoral nororiental

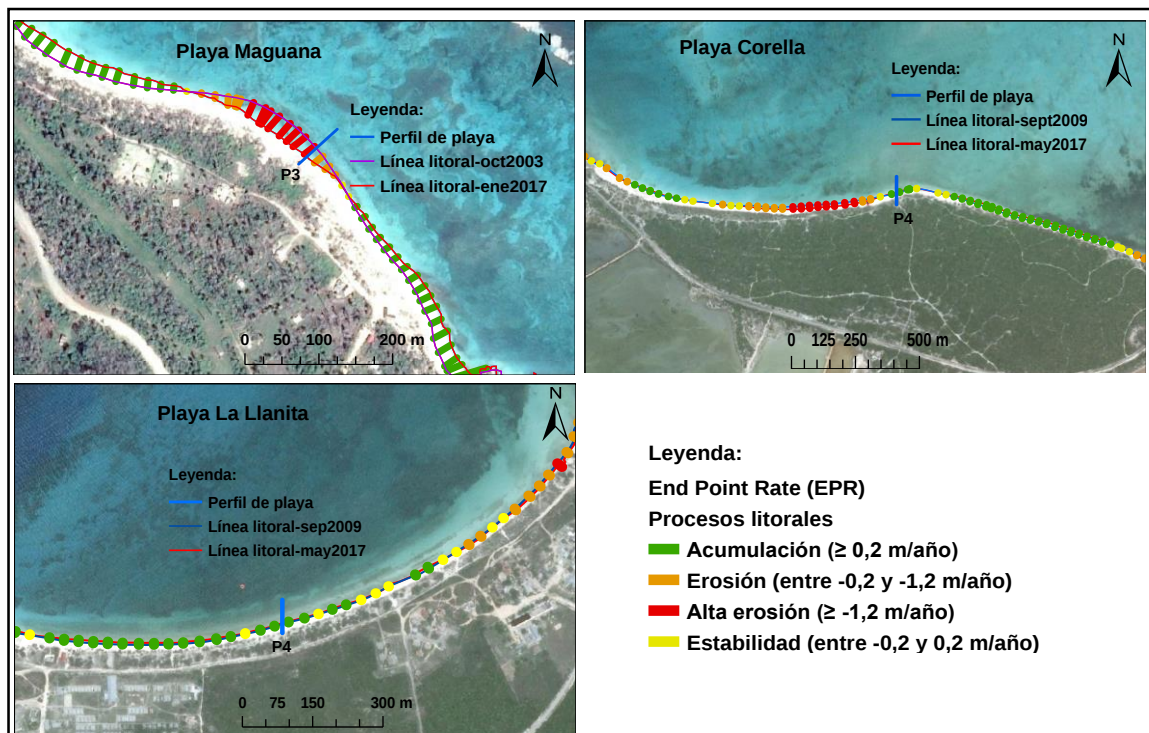


Figura 4.13. Procesos acumulativos o estabilidad en playas de la subregión Oeste del litoral nororiental. Sólo de manera puntual aparece erosión o fuerte erosión

Un caso singular resulta Playa Punta Tomate. El extremo nororiental de esta playa sufre un acelerado proceso erosivo, con un retroceso superior a los 40 metros y una magnitud promedio de 4,5 m/año para el periodo 2009-2017 (Fig.4.14A). Para evitar la pérdida total de la carretera que bordea el litoral fue necesario la colocación de rocas (Fig.4.14B). Sin embargo, en términos generales, el resto de la playa muestra estabilidad.

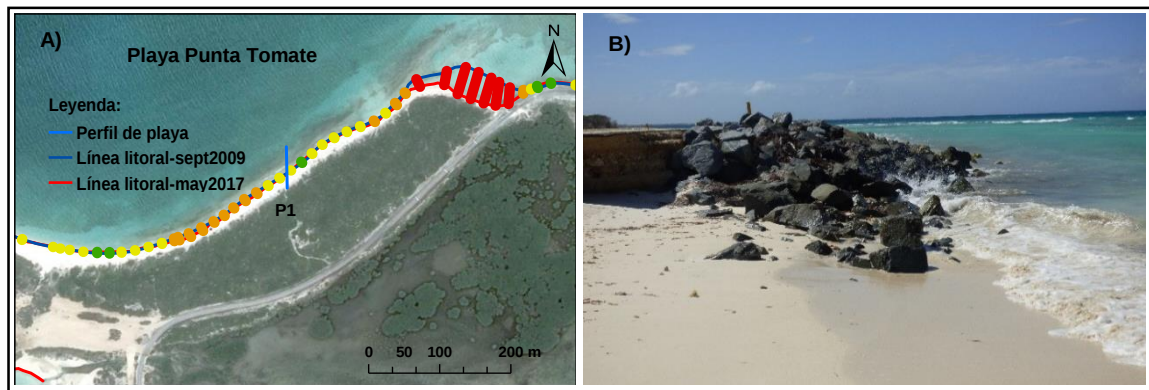


Figura 4.14. Fuerte erosión en el extremo noreste de playa Punta Tomate. A): Variabilidad de la línea litoral, B): Colocación de rocas para proteger de la erosión la carretera que se encuentra próxima a la playa

4.2.3. Causas de la erosión

La tabla 4.7, muestra que las playas que presentan dunas, barras de arena en la pendiente submarina, arrecifes coralinos en sus zonas frontales y una vegetación autóctona conservada, son las que muestran tendencia a la acumulación o a la estabilidad. Sin embargo, aquellas playas donde se registraron extracciones de arena en el pasado, o carecen de dunas y barras, son las playas que muestran procesos erosivos. El hecho que las playas donde se manifiestan procesos erosivos coinciden, además, con la zona donde se concentra el desarrollo del turismo en el litoral nororiental, podría ser causa del desbalance en el sistema sedimentario provocados por el turismo y el desarrollo urbano en las playas y ecosistemas costeros.

Tabla 4.7. Relación de los procesos de erosión - acumulación con presencia o no de elementos morfológicos del perfil de playa y otros elementos

Tendencia	Playa/elemento	Duna	Barras	Presencia de arrecifes	Conservación vegetación	Extracción de arena
Acumulación	Maguana	1	1	1	1	0
	Yuraguanal	1	1	1	1	0
	Corella	1	1	1	1	0
	La Llanita	1	1	0	0	0
	<i>Promedio</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>0,75</i>	<i>0,75</i>	<i>0</i>
	<i>Desv. Stand.</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,50</i>	<i>0,50</i>	<i>0</i>
Estabilidad	Punta Tomate	1	1	1	0	0
	Minint	0	0	1	0	0
	<i>Promedio</i>	<i>0,50</i>	<i>0,50</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
	<i>Desv. Stand.</i>	<i>0,71</i>	<i>0,71</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Erosión	Los Bajos	1	1	1	0	1
	Blanca	1	0	0	0	1
	Don Lino	0	0	1	0	0
	Pesquero	1	1	0	0	0
	Estero Ciego	1	0	1	1	0
	Guardalavaca	0	1	1	1	0
	<i>Promedio</i>	<i>0,67</i>	<i>0,50</i>	<i>0,67</i>	<i>0,33</i>	<i>0,33</i>
	<i>Desv. Stand.</i>	<i>0,52</i>	<i>0,55</i>	<i>0,52</i>	<i>0,52</i>	<i>0,52</i>

Leyenda: 1, significa presencia del elemento; 0, significa la ausencia.

Sin embargo, hay otras causas que pudieran tener mayor repercusión en la actualidad, considerando la forma poco invasiva del desarrollo del turismo en las playas de este litoral. En ellas se ha respetado adecuadamente las regulaciones establecidas en el Decreto Ley 212 para la Gestión de la Zona Costera, que establece los límites mínimos de construcción con respecto a la línea litoral y garantiza la continuidad y conservación de los espacios litorales y ecosistemas allí presentes. A continuación, se comentan y evalúan la contribución que podrían tener otros factores.

4.2.3.1. Régimen hidrodinámico

El litoral nororiental está expuesto a la acción persistente de oleajes energéticos durante todo el año; durante el verano con rumbos del Este y Estenordeste, debido a la influencia de los vientos Alisios y durante el invierno con rumbos del Nordeste, Norte y Noroeste por los frentes fríos, aunque con predominio del Este y Estenordeste durante todo el año.

Bajo estas condiciones las playas experimentan un comportamiento basculante; durante el verano las porciones orientales se erosionan y la arena perdida se acumula en las mitades occidentales. Por el contrario, en invierno, las arenas se mueven desde el Oeste al Este, particularmente durante la influencia de los frentes fríos (Fig.4.15).

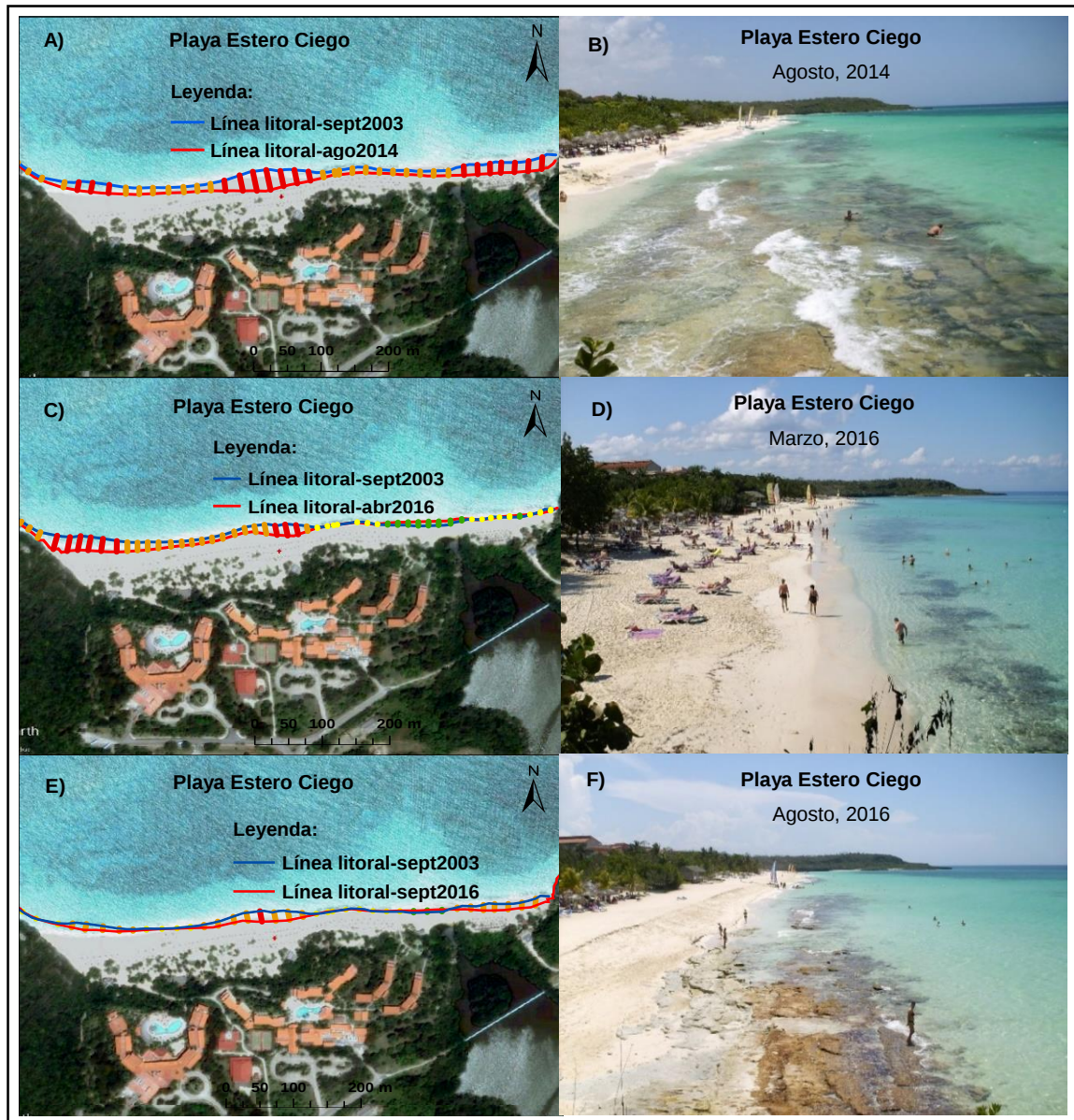


Figura 4.15. Estacionalidad de los procesos de erosión y acumulación en las playas en caleta. A) y B): erosión en el verano de 2014, C) y D): acumulación en la mitad oriental, al final del invierno de 2016, E) y F): erosión en el verano de 2016

Sin embargo, en los últimos 50 años ha habido una disminución de la frecuencia e intensidad de los frentes fríos que afectan el litoral nororiental (Fig.4.16). En consecuencia, hay una mayor persistencia de oleajes del Este y Este nordeste, lo cual determina la casi permanente acumulación de arena en las porciones occidentales de las playas, a expensas de erosión en las porciones más orientales (Fig.4.15 vista anteriormente). Por ello, la disminución de los frentes fríos provoca erosión en las playas, particularmente en las porciones más orientales.

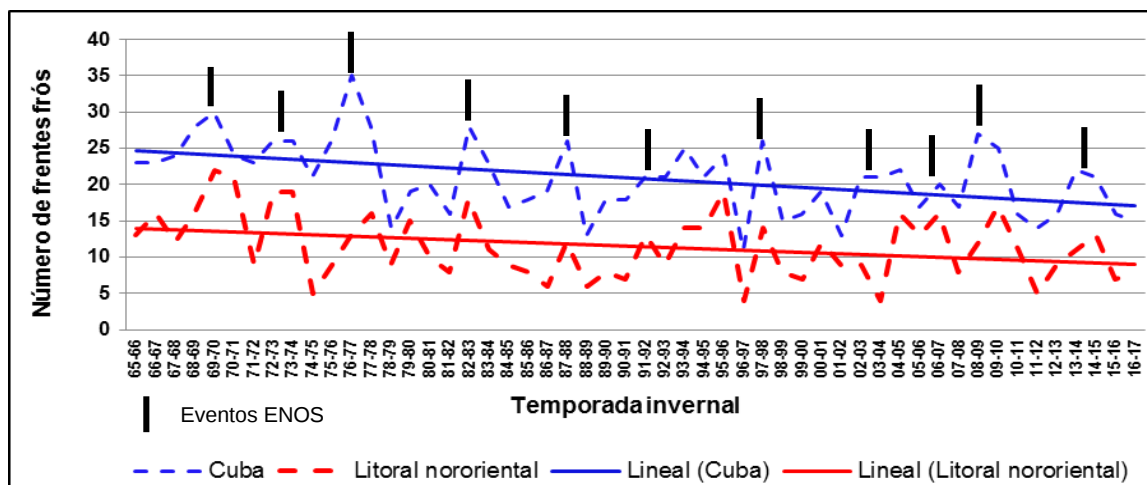


Figura 4.16. Récord de incidencia de frentes fríos por temporada y su relación con El Niño. Como tendencia los frentes fríos tienen a disminuir, pero el número que arriban al litoral nororiental se incrementa durante los eventos ENOS

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto de Meteorología de Cuba (1965-2017).

4.2.3.2. Los eventos ENOS

En América Latina, El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) es el fenómeno océano-atmosférico más importante que genera variabilidad climática. Estos juegan un importante papel en el número de tormentas tropicales y huracanes que afectan la región (Fernández y Ramírez, 1991; Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla, 2007).

El análisis del número de frentes fríos que arriban a Cuba y en particular al litoral nororiental (Fig.4.16 vista anteriormente), muestra que existe una correlación positiva entre el número de frentes fríos y la manifestación de los eventos ENOS, en particular El Niño. Cada año, durante el periodo invernal arriban a Cuba, como promedio 21 frentes fríos. Aunque los frentes fríos se debilitan en la medida que se desplazan al Este sobre la isla de Cuba, al menos el 50% de ellos llegan al litoral nororiental, con un valor promedio de 12 frentes fríos por temporada. Sin embargo, para los años con eventos ENOS, el promedio de frentes fríos que afectan a este litoral llega a 15 frentes fríos por temporada.

Similar resultado encontró Hernández (2002) para la región occidental de Cuba. Este investigador reportó que los frentes fríos que llegan a la región occidental tienden a aumentar en años afectados por eventos ENOS moderados, mientras que en años con ENOS fuertes o muy fuertes, aunque ocurren máximos de entradas de frentes, no son tan elevados como en los eventos ENOS moderados.

4.2.3.3. Eventos hidrometeorológicos extremos

Debido a la influencia del cambio climático, el IPCC (2014) estimó que ha ocurrido un aumento de la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales y extratropicales desde mediados del siglo XX, tendencia que al parecer continuará en el futuro. En el caso de los huracanes, en la cuenca Atlántica, el Mar Caribe y el Golfo de México, estos se forman principalmente durante el verano y el otoño (de junio a noviembre), caracterizándose por abundantes e intensas lluvias, vientos de gran velocidad e inundaciones por penetraciones del mar en las zonas bajas del litoral (INSMET, 2017).

Según los registros de NOAA (2018), en los últimos nueve años (2008-2017) cuatro huracanes con categoría III, han afectado directamente el área de estudio: Ike, en el 2008, Sandy en el año 2012, Matthew en el 2016 e Irma en el 2017, lo cual demuestra el aumento de la recurrencia de estos fenómenos, teniendo en cuenta que en los 28 años anteriores (1979-2007), sólo dos huracanes afectaron directamente el área de estudio (David, 1979

y Georges, 1998). La figura 4.17, muestra la tendencia al aumento de la recurrencia de eventos extremos durante los últimos 39 años.

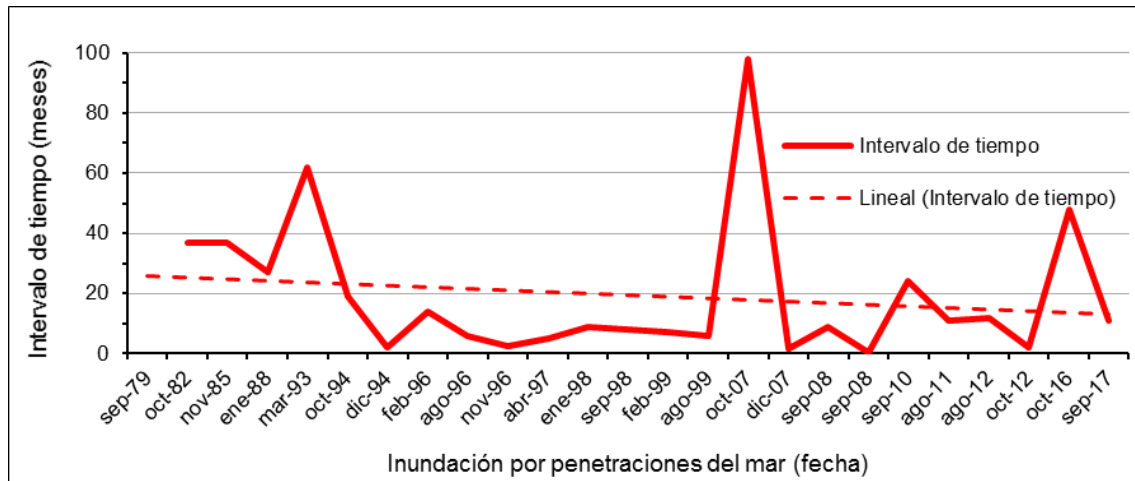


Figura 4.17. Frecuencia de ocurrencia de inundaciones costeras en el litoral nororiental de Cuba por eventos hidrometeorológicos extremos

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NOAA (1979-2018).

La figura 4.18, muestra la aparición e incremento de los procesos erosivos en la porción central de playa Maguana por afectaciones de los huracanes Sandy en octubre de 2012 y Matthew en octubre de 2016. Como se aprecia en la figura (Fig.4.18A), aunque la playa estaba afectada por la erosión, ésta no alcanzaba la magnitud encontrada luego del paso de los huracanes Sandy y Matthew (Fig.4.18B).

Luego del paso del huracán Matthew, la erosión y pérdida de arena se hace crítica (Fig.4.18C), apareciendo fuerte erosión en la parte central de la playa y dejando la roca expuesta en la zona intermareal y cara de la playa.

Los escarpes de erosión que se observan en la base de la duna natural, la existencia de afloramientos rocosos en la zona intermareal, y el derribo de grandes árboles, en zona no batidas por el oleaje habitual, encontrada en casi todas las playas de este litoral (Fig.4.11, vista anteriormente), sólo pueden ser explicado por la acción de los grandes oleajes generados por los huracanes y tormentas tropicales.

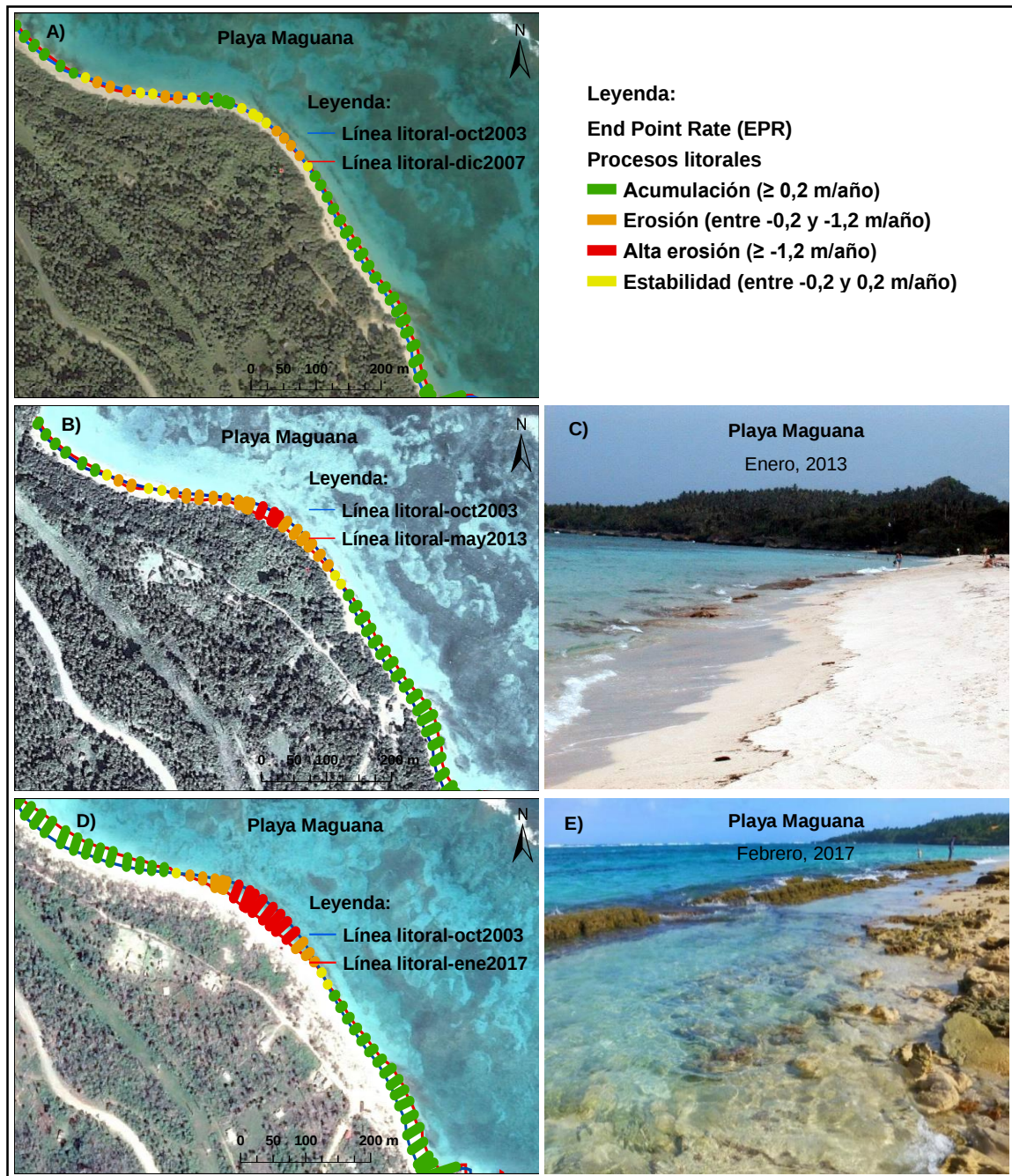


Figura 4.18. Procesos erosivos en la porción central de playa Maguana. A), erosión en playa Maguana, antes de las afectaciones del huracán Ike (2008); B) y C), aparición de fuerte erosión luego del huracán Sandy (octubre 2012); D) y E), incremento de la fuerte erosión y aparición del sustrato rocoso en la zona intermareal luego del paso del huracán Matthew (octubre de 2016)

Durante los huracanes y tormentas el potencial destructivo del oleaje se incrementa, particularmente cuando se combinan grandes oleajes con las mareas vivas. Con las mareas vivas la energía de las olas alcanza la parte alta de la playa e inundan una mayor área de la playa. Con la inundación disminuye la percolación, la pendiente de la playa se satura rápidamente y se intensifica el flujo de retorno, que arrastran hacia el mar los sedimentos presentes en la parte emergida de la playa (Splinter et al., 2014; Coco et al., 2014).

4.2.3.4. El aumento del nivel del mar

Para el cálculo del retroceso de la línea de costa, como consecuencia del aumento del nivel del mar provocado por el cambio climático global, se utilizó la regla de Bruun (Ec.14), considerando un aumento del nivel medio del mar de 3,2 mm/año, reportado por el IPCC (2014), para el periodo 1993-2010. La tabla 4.8, muestra los resultados del retroceso esperado de la línea de costa, en 12 playas, del litoral nororiental de Cuba, aplicando el modelo o regla de Bruun.

Tabla 4.8. Retroceso esperado de la línea litoral para playas del litoral nororiental

Playas	B (m)	hc (m)	W (m)	R (m/año)	R 2100(m)
Maguana	1,61	3,4	162	0,10	8,10
Guardalavaca	1,45	3,3	270	0,18	14,58
Estero Ciego	1,54	3,4	197	0,13	10,53
Yuraguanal	1,46	3,3	390	0,26	21,06
Pesquero	1,45	3,3	250	0,18	14,58
Don Lino	1,69	3,2	130	0,08	6,48
Minint	1,46	3,2	120	0,08	6,48
Blanca	1,10	3,9	130	0,08	6,48
Los Bajos	1,59	3,1	316	0,22	17,82
Corella	1,53	3,8	289	0,17	13,77
Punta Tomate	1,47	3,7	295	0,18	14,58
La Llanita	1,43	3,3	314	0,21	17,01
Promedio	1,48	3,4	239	0,16	12,62
Desv. Stand.	0,14	0,3	89	0,06	4,94

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla (Tabla 4.8), sólo por causas del aumento del nivel medio del mar, las playas de litoral nororiental de Cuba podrían retroceder 0,16 m/año, como promedio. De mantenerse esta tendencia, como ha pronosticado el IPCC (2014) como consecuencia del aumento del nivel medio del mar, para el año 2100 se habrán perdido el 4% de las playas de este litoral y se reducirá significativamente el ancho del 20% de las demás playas (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Pronóstico de las playas que se perderían por el retroceso de la línea litoral

Nº de playas	Menos de 12,6 m	(%)	Entre 12,6 - 40 m	(%)	Más de 40 m	(%)
54	2	3,7	11	20,4	41	75,9

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a este escenario, el aumento del nivel del mar provocado por el calentamiento global no tendrá una fuerte repercusión en los procesos de erosión de las playas del litoral nororiental de Cuba. Sin embargo, el hecho que el 50% de las playas del litoral nororiental tienen una tendencia erosiva, evidencia la necesidad de contar con nuevos modelos numéricos predictivos de perfil de equilibrio y ecuaciones ajustadas a las características hidrodinámicas y sedimentarias del litoral nororiental y las playas allí presentes, que sirvan de sustento teórico en los trabajos de regeneración de playas mediante el vertimiento externo de arena. En el siguiente acápite se define el perfil de equilibrio que mejor se ajusta a las características de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba.

4.3. Perfil de equilibrio de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba

Existe una estrecha relación de la velocidad de caída (ω_s) de las partículas de arena en el agua con la forma del perfil de equilibrio, siendo este un elemento de gran importancia en los estudios de morfodinámica de playas. Por ello, se lleva a cabo un estudio de la velocidad de caída (ω_s) de las arenas biogénicas de las playas del litoral nororiental de Cuba, se define el perfil de equilibrio que mejor se ajusta a las características de las playas allí presentes y se realiza el ajuste de las ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playa, como sustento teórico de dichas actuaciones. A continuación, se exponen los resultados.

4.3.1. Experimento de velocidad de caída

La tabla 4.10, muestra la cantidad de ensayos válidos realizados en el experimento de velocidad de caída, según las fracciones granulométricas que fueron consideradas, a partir de la apertura de tamices según normas ASTM. Los detalles del experimento aparecen en materiales y métodos.

Tabla 4.10. Resumen de cantidad de ensayos válidos según fracciones granulométricas

Cantidad de ensayos válidos	Fracciones granulométricas (mm)			
	0,106-0,25	0,25-0,425	0,425-0,84	0,84-2,00
	85	156	198	165

Fuente: Elaboración propia.

El menor número de ensayos (85), corresponden a las fracciones más finas y más difícil de seguir su trayectoria a través del tubo de vidrio (densímetro) utilizado para la medición de su velocidad de caída.

La tabla 4.11 muestra un resumen de los resultados del experimento de velocidad de caída para las fracciones granulométricas consideradas. El anexo 12, muestra la totalidad de los resultados de los ensayos de cada partícula por las tres playas (Don Lino, Pesquero y

Guardalavaca), cuyas arenas fueron utilizadas para el análisis y una muestra compuesta (compos) elaborada a partir de muestras de arenas representativas de 22 playas del litoral nororiental de Cuba. Con esta muestra se pretende representar la totalidad de las playas de este litoral.

Tabla 4.11. Resumen de velocidad de caída por fracciones granulométricas

Ensayos	Fracciones granulométricas (mm)			
	0,106-0,25	0,25-0,425	0,425-0,84	0,84-2,00
Número de casos (n)	85	156	198	165
Máximo ($\omega_{\max}$) m/s	0,049	0,555	0,596	0,488
Mínimo ($\omega_{\min}$) m/s	0,015	0,022	0,011	0,012
Moda (ω_{mo}) m/s	0,030	0,058	0,097	0,103
Media (ω_s) m/s	0,031	0,063	0,097	0,105
Desv. Stad. (σ) m/s	0,005	0,041	0,059	0,074
Coef. de Var. (Cv)	0,150	0,652	0,605	0,705

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla, hay un incremento de los valores medios de la velocidad de caída (ω_s) en la medida que aumenta los intervalos de las fracciones granulométricas, lo cual era esperable, pues en la medida que crece el diámetro de la partícula, generalmente aumenta su peso y, por ende, mayor es su velocidad de caída.

La figura 4.19, muestra la curva de velocidad de caída obtenida en el experimento, así como las curvas de velocidad de caída teórica de acuerdo a la ecuación de Gibbs et al. (1971) y la obtenida en la playa de Varadero por investigadores soviéticos (Juanes, 1996) y posteriormente ajustada por García (2005).

Como se aprecia en la figura, la velocidad de caída de las arenas de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba, es mayor que la obtenida por los especialistas soviéticos, denominada Soviet (Soviet, 1986) y la ajustada por García (2005) para Varadero y menores a la curva teórica utilizando el modelo de Gibbs et al. (1971).

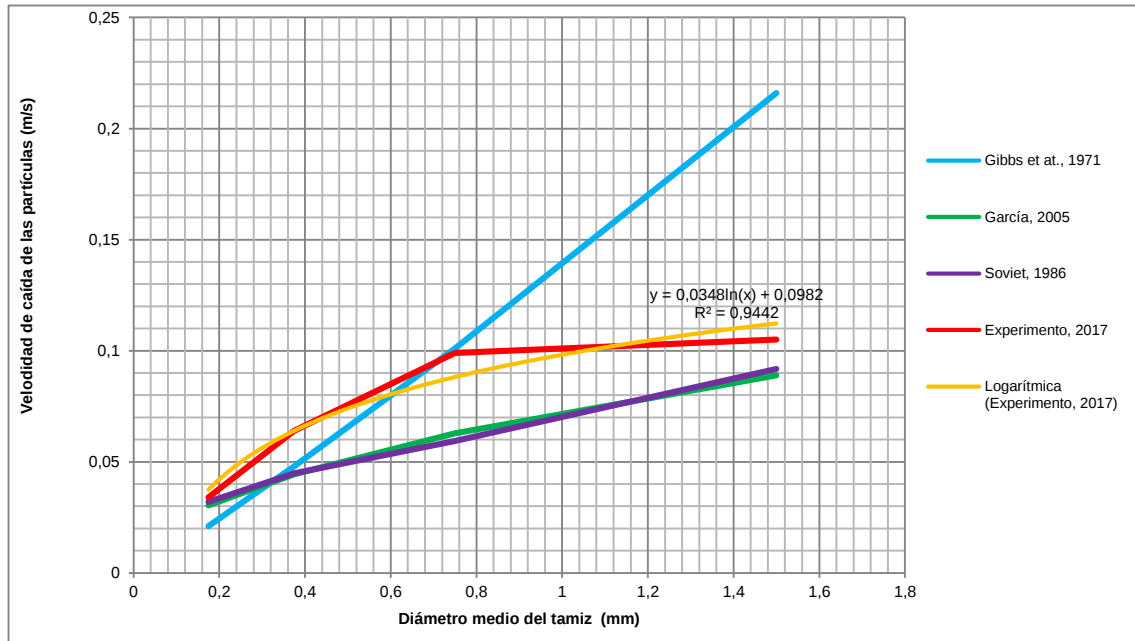


Figura 4.19. Curva de velocidad de caída obtenida en el experimento y su comparación con otras curvas

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del experimento.

Si bien hay un aumento de la velocidad de caída (ω_s) en la medida que aumenta la fracción granulométrica de la arena, a partir de la fracción 0,76 mm, ocurre una desaceleración (ω_s tiende a mantenerse constante), lo cual obedece a la presencia de mucha más cantidad de fragmentos de moluscos en las muestras utilizadas, propias de las playas del litoral nororiental, cuyas formas son aplanadas y por tanto de mayor flotabilidad en el agua.

En la figura 4.20, se aprecia que hay mucha más cantidad de restos de moluscos y corales en las playas Guardalavaca, Pesquero y Don Lino y en la muestra compuesta (litoral NE de Cuba), cuyas arenas fueron utilizadas para determinar la velocidad de caída de las arenas biogénicas del litoral nororiental de Cuba, en comparación con las arenas de playa Varadero.

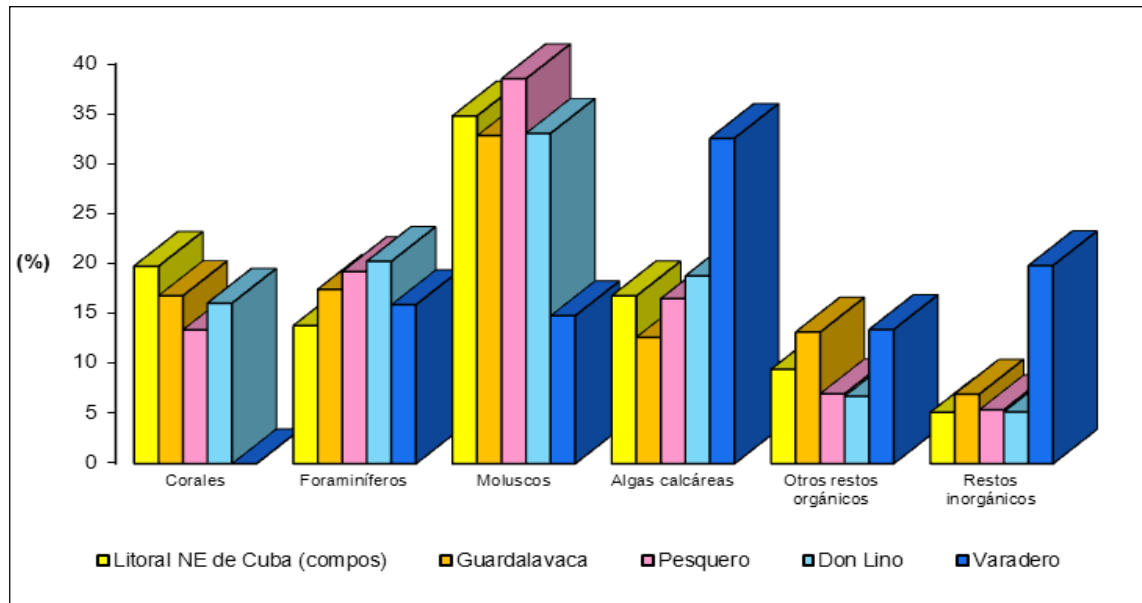


Figura 4.20. Composición genética de las arenas consideradas en el experimento contrastadas con la arena de playa Varadero

Fuente: Elaboración a partir de datos de terreno (2016, 2017 y 2018) y de García (2005).

La figura 4.21, muestra una vista ampliada de los granos de arena por fracción granulométrica de la muestra compuesta (compos) utilizada en los experimentos de velocidad de caída. Como se aprecia en la figura, la fracción 0,106-0,25 mm, está compuesta por granos de arena casi redondeados y en la medida que crece el diámetro de la arena hay una mayor diversidad de tamaños y formas. Ello explicaría también la desaceleración de la velocidad de caída en la medida que aumenta el tamaño de la arena.

Teniendo en cuenta que las playas del litoral nororiental están constituidas por arenas de granulometría media (<0,50 mm), según clasificación Wentworth (1922), se eliminan los resultados de velocidad de caída obtenidos para las fracciones 0,84-2,00 mm, cuya apertura de la malla de los tamices es mayor y por tanto un mayor rango de partículas de diferente génesis y forma.

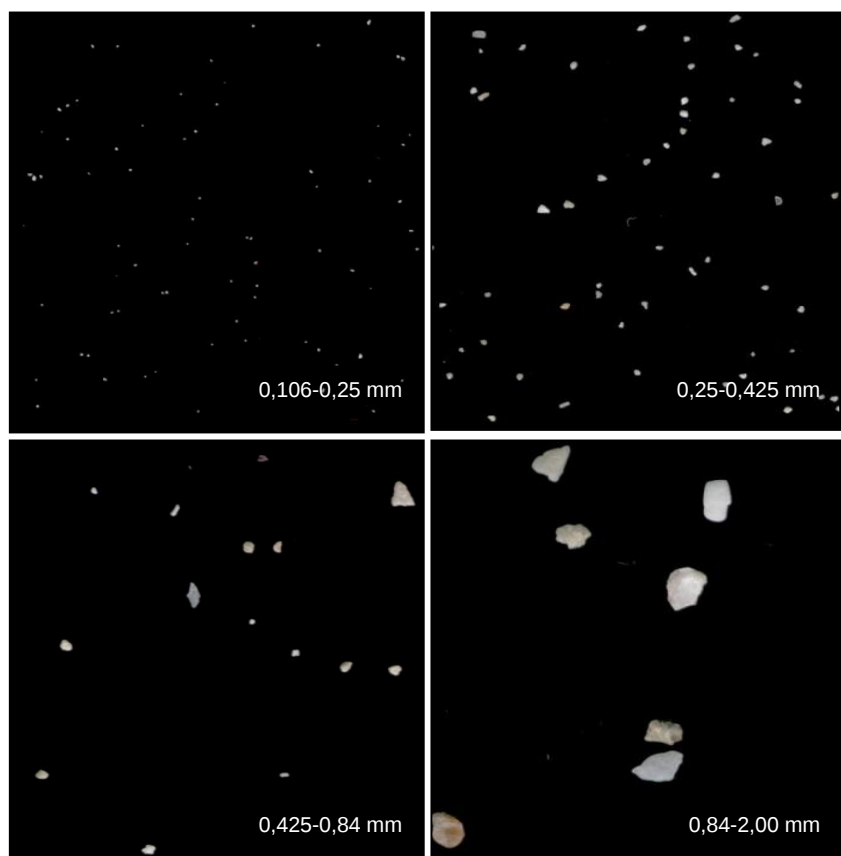


Figura 4.21. Vista ampliada de los granos de arena por fracción granulométrica

Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.22, muestra el predominio de arenas de granulometría inferior a 0,50 mm en las playas del litoral nororiental de Cuba, que estarían en el rango de arenas finas o medias de acuerdo a la clasificación Wentworth (1922).

La figura 4.23, muestra que eliminándose los resultados obtenidos para las fracciones más gruesas y por tanto de mayor diversidad de forma y origen, disminuye el error cuadrático medio (R^2), ajustándose adecuadamente a una expresión parabólica. Este gráfico permite además determinar la velocidad de caída de una partícula ploteando los resultados directamente sobre él.

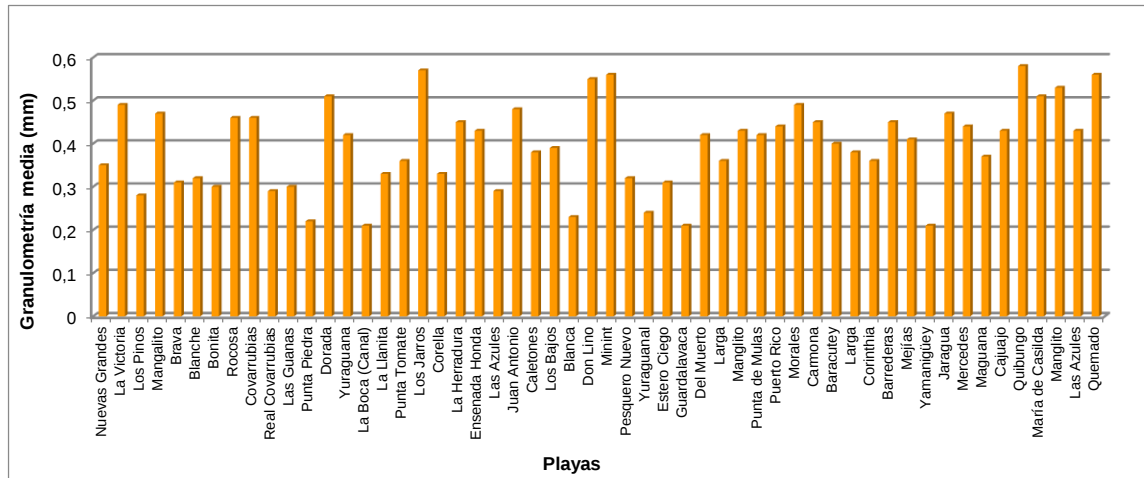


Figura 4.22. Granulometría media de la arena de las playas del litoral nororiental de Cuba

Fuente: Elaboración propia a partir de muestreos de arena en playas, 2017-2018.

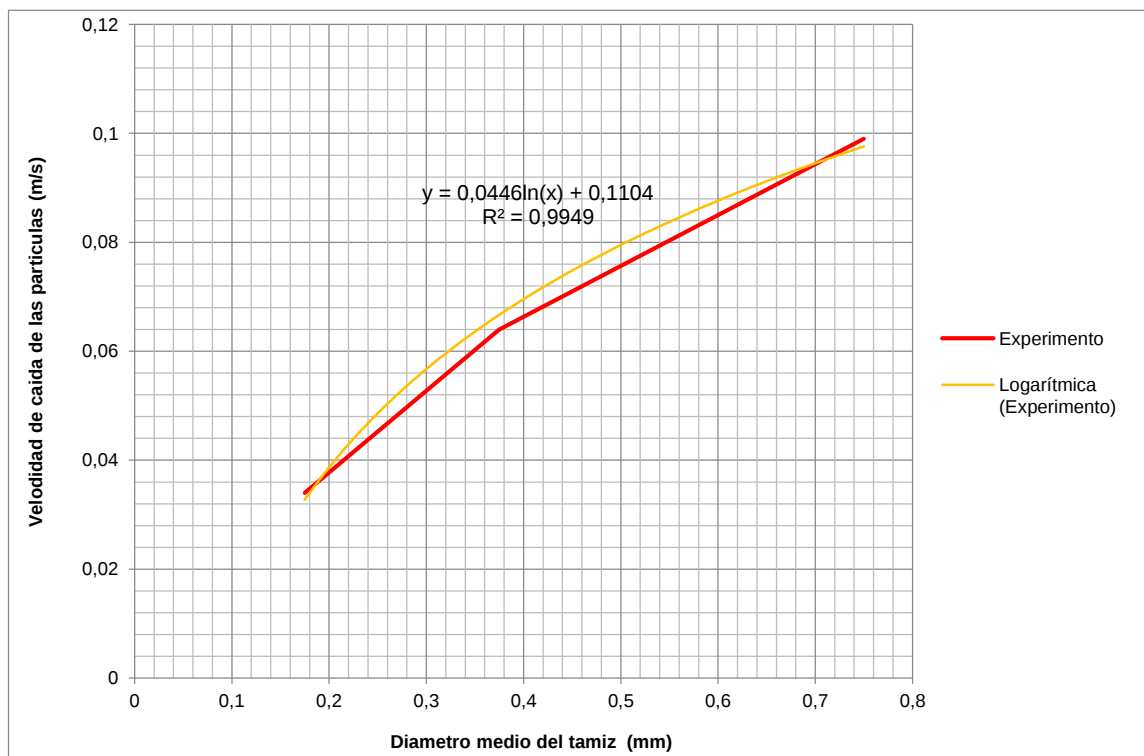


Figura 4.23. Curva de velocidad de caída obtenida en el experimento eliminando los valores para las fracciones de arena gruesas

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del experimento.

4.3.2. Determinación del parámetro (A)

Una vez obtenido la velocidad de caída (ω_s), se procedió a determinar el parámetro (A) para las playas del litoral nororiental, pues este parámetro está relacionado con la velocidad de caída del sedimento. Como resultado del experimento de velocidad de caída (ω_s), se obtiene la ecuación (Ec.35)³, lo cual se denominará en lo adelante modelo MPECU2017 (Modelo de Perfil de Equilibrio para Cuba 2017).

$$A = 0,67\omega^{0,56} \quad \text{Ec.35}$$

Además, se utilizan las ecuaciones Ec.16; Ec.17; Ec.18; Ec.19 y Ec.20, referidas en la metodología. La tabla 4.12, muestra los valores del parámetro (A) obtenido a partir de los experimentos de velocidad de caída, para los diferentes modelos.

Tabla 4.12. Determinación del parámetro (A) para ajuste de perfil de equilibrio de playa

Nombre de la playa	Md(D ₅₀) (mm)	Vel. C. Exper.	Dean 1987	García 2005	Kriebel 1991	KKL 1991	Dean 2004	MPECU 2017
Maguana	0,44	0,070	0,1514	0,1336	0,1818	0,1883	0,2118	0,1547
Guardalavaca	0,21	0,039	0,1030	0,1135	0,1373	0,1428	0,1761	0,1223
Esterio Ciego	0,31	0,054	0,1270	0,1237	0,1699	0,1762	0,2026	0,1462
Yuraguanal	0,24	0,044	0,1120	0,1169	0,1558	0,1618	0,1914	0,1360
Pesquero	0,32	0,056	0,1290	0,1245	0,1682	0,1744	0,2013	0,1450
Don Lino	0,55	0,080	0,1670	0,1403	0,2029	0,2098	0,2276	0,1696
Minint	0,53	0,078	0,1646	0,1391	0,2061	0,2130	0,2300	0,1718
Blanca	0,23	0,043	0,1090	0,1158	0,1215	0,1266	0,1625	0,1105
Los Bajos	0,39	0,065	0,1430	0,1301	0,1717	0,1779	0,2040	0,1475
Corella	0,33	0,057	0,1310	0,1254	0,1818	0,1883	0,2118	0,1547
Punta Tomate	0,36	0,062	0,1370	0,1278	0,1467	0,1524	0,1840	0,1293
La Llanita	0,33	0,057	0,1310	0,1254	0,1785	0,1849	0,2092	0,1523

Leyenda: Md (D₅₀); granulometría media de la arena de la playa.

Vel. C. Exper. Velocidad de caída del experimento según granulometría.

KKL1991, Kriebel, Kraus y Larson (1991).

MPECU 2017, modelo de perfil de equilibrio Cuba (2017).

³ Se eligió la ecuación propuesta por Dean (2004) y se fue variando el valor exponencial hasta lograr el menor error de ajuste en correspondencia con el perfil real de la playa.

Una vez obtenido el parámetro (A) relacionado con las características de las arenas, es posible obtener el valor del parámetro (m), relacionado con las características del oleaje.

Utilizando el método de los mínimos cuadrados, se procedió a determinar el valor del parámetro (m), de mejor ajuste. Para ello se utilizan los perfiles reales de las playas del litoral nororiental de Cuba (perfil medio histórico obtenido mediante el programa BMAP). El valor de (m) se va variando paulatinamente hasta lograr obtener el menor error de ajuste (e) con respecto al perfil de la playa analizado.

4.3.3. Determinación del parámetro (m)

La tabla 4.13, muestra el valor del parámetro (m) de mejor ajuste obtenido para las 12 playas consideradas en el estudio, según el valor del parámetro (A) obtenido en el acápite anterior. Las tres últimas columnas a la derecha de la tabla 4.13, muestran la moda (Mo), la media (μ) y la desviación estándar ($D.St.$), del parámetro (m) por playas, en tanto las tres últimas filas, muestran estas mismas variables estadísticas, pero para cada uno de los modelos considerados.

Se aprecia que el parámetro (m) varía para cada modelo, lo cual era esperable pues los modelos probados tienen un valor del parámetro (A) diferente, como fue mencionado anteriormente, aunque se presentan también algunas coincidencias.

Como valor modal se encontró (m)=0,59 en tanto el valor promedio es algo más bajo correspondiente a (m)=0,56, lo cual obedece a la presencia de pendientes más suaves del perfil en algunas playas.

Si se analiza el error de ajuste (e) (tabla 4.13, penúltima fila), hay coincidencia en el error promedio encontrado entre el perfil de real de la playa y el perfil pronosticado por los modelos de García (2005), Kriebel (1991), Kriebel, Kraus and Larson (1991) y el modelo MPECU2017, obtenido en esta investigación. En los cuatro casos se obtiene un valor de ajuste $e=0,221$.

Tabla 4.13. Parámetro (*m*) de mejor ajuste obtenido para las playas consideradas en el estudio usando diversos modelos

Playa	Md (mm)	Dean 1987		García 2005		Kriebel 1991		KKL 1991		Dean 1997		MPECU 2017		Mo	μ	D. St.
		<i>m</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
Maguana	0,44	0,57	0,134	0,60	0,143	0,54	0,119	0,54	0,116	0,52	0,122	0,57	0,131	0,57	0,56	0,029
Guardalavaca	0,21	0,60	0,144	0,63	0,153	0,59	0,149	0,59	0,139	0,56	0,137	0,62	0,149	0,59	0,60	0,025
Estero Ciego	0,31	0,59	0,263	0,62	0,266	0,56	0,245	0,56	0,240	0,55	0,250	0,59	0,256	0,59	0,58	0,026
Yuraguanal	0,24	0,55	0,357	0,58	0,338	0,54	0,366	0,53	0,371	0,50	0,392	0,57	0,356	#N/A	0,55	0,029
Pesquero	0,32	0,59	0,340	0,63	0,295	0,58	0,344	0,57	0,353	0,55	0,382	0,61	0,319	#N/A	0,59	0,029
Don Lino	0,55	0,53	0,512	0,59	0,477	0,51	0,530	0,50	0,537	0,49	0,549	0,55	0,503	#N/A	0,53	0,037
Minint	0,53	0,48	0,316	0,49	0,263	0,40	0,254	0,40	0,252	0,39	0,255	0,45	0,257	0,40	0,44	0,044
Blanca	0,23	0,66	0,173	0,69	0,183	0,67	0,173	0,66	0,168	0,60	0,140	0,69	0,186	0,69	0,66	0,033
Los Bajos	0,39	0,45	0,088	0,49	0,091	0,42	0,086	0,41	0,087	0,38	0,087	0,46	0,088	#N/A	0,44	0,039
Corella	0,33	0,58	0,110	0,62	0,096	0,56	0,107	0,56	0,118	0,53	0,128	0,59	0,099	0,56	0,57	0,031
Pta. Tomate	0,36	0,62	0,123	0,64	0,136	0,61	0,121	0,60	0,121	0,57	0,132	0,63	0,126	#N/A	0,61	0,025
La Llanita	0,33	0,61	0,179	0,65	0,202	0,59	0,159	0,59	0,152	0,57	0,148	0,62	0,181	0,59	0,61	0,028
Moda	0,33	0,59	#N/A	0,49	#N/A	0,56	#N/A	0,56	#N/A	0,57	#N/A	0,59	#N/A	0,59	0,56	0,037
Media	0,35	0,57	0,228	0,60	0,221	0,55	0,221	0,54	0,221	0,52	0,227	0,58	0,221	#N/A	0,56	0,030
Desv. Stand.	0,109	0,059	0,130	0,060	0,113	0,076	0,134	0,076	0,137	0,069	0,144	0,068	0,123	#N/A	0,07	0,007

Fuente: Elaboración propia.

En el caso particular del modelo MPECU2017 (tabla 4.13), además de obtenerse el mismo error de ajuste ($e=0,221$), es el modelo cuyo valor de la media ($m=0,58$), se aproxima mejor a la moda obtenida para el conjunto de los demás modelos (antepenúltima columna).

La Tabla 4.14 muestra el error de ajuste de cuatro modelos de perfil de equilibrio actualmente existente que han sido elegidos para el análisis (Dean, 1987; Boom y Green, 1988; Tristá, 2003; García, 2005).

Tabla 4.14. Error de ajuste de modelos de perfil de equilibrio

Playas/ error de ajuste	Modelos de perfil de equilibrio			
	Dean, 1987	Boom y Green, 1988	Tristá, 2003	García, 2005
Maguana	1,527	0,241	1,093	0,799
Guardalavaca	0,304	0,360	0,463	0,551
Estero Ciego	0,489	0,333	0,529	0,500
Yuraguanal	1,246	0,367	1,179	0,676
Pesquero	0,887	0,747	1,017	1,233
Don Lino	1,845	0,507	1,246	0,709
Minint	1,712	0,687	1,277	0,355
Blanca	0,282	0,646	0,198	0,800
Los Bajos	1,243	0,441	1,063	0,157
Corella	1,047	0,413	0,690	0,897
Punta Tomate	0,313	0,743	0,313	1,089
La Llanita	0,617	0,774	0,357	1,220
Media	0,959	0,522	0,785	0,749
Desv. Stand.	0,564	0,188	0,401	0,332

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se aprecia en la tabla 4.14, el análisis comparativo de los cuatro modelos de perfil de equilibrio actualmente existentes muestra que, en todos los casos, el valor del error de ajuste promedio (media) está por encima de $e=0,221$, que fue el valor promedio del error de ajuste (e) encontrado en el modelo MPECU2017.

Por ello, ninguno de los cuatro modelos referidos en la tabla 4.12 (Dean, 1987; Boom y Green, 1988; Tristá, 2003 y García, 2005), representan adecuadamente a las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba, pues no consiguen un adecuado ajuste de los perfiles reales, con los perfiles teóricos pronosticados a partir de las consideraciones de cada modelo.

4.3.4. Modelo de perfil de equilibrio propuesto

Las figuras A4 a la figura A15 (Anexo 13), muestran en color negro, el perfil medio histórico de las 12 playas consideradas en el estudio y en color rojo, el perfil de mejor ajuste para cada una de ellas. En otros colores se muestran los demás modelos probados.

Como se aprecia en las figuras, los perfiles de equilibrio obtenidos a partir de la determinación de la velocidad de caída (ω_s) por vía experimental y el ajuste del parámetro (m) a través del método de los mínimos cuadrados, se ajusta mejor que los demás, a las características del perfil de equilibrio encontrado en las 12 playas del litoral nororiental.

Ello confirma que los parámetros (A) y (m) encontrados en el estudio son válidos, así como el nuevo modelo de perfil de equilibrio obtenido como parte de la presente investigación (MPECU2017), cuyas expresiones se refieren a continuación.

$$h(x) = Ax^{0,58} \quad (\text{Ec.36})$$

Donde:

$$A = 0,67\omega_s^{0,56} \quad (\text{Ec.35, referida anteriormente})$$

$h(x)$, profundidad a una distancia (x) de la línea litoral

Por ello, se recomienda en adelante el uso del modelo MPECU2017 para describir las características hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental de Cuba.

4.3.5. Ajuste de las ecuaciones de cálculo para proyectos de regeneración de playa

La experiencia internacional en los trabajos de vertimiento de arena, ha cuestionado el uso de los factores Ra (factor de sobre relleno) y Rj (factor de sobrealimentación) en los trabajos de regeneración de playa mediante el aporte externo de arena, recomendándose el uso del concepto de perfil de equilibrio en estos trabajos (Dean, 2000). El uso del concepto de perfil de equilibrio tiene la ventaja de incorporar un número mayor de procesos físicos que ocurren en la zona costera, que los que incorporan el uso de los factores Ra y Rj (Dean, 2000).

Tomando en consideración el criterio de Dean 2000 y contándose con un modelo de perfil de equilibrio que se ajusta a las características de las playas del litoral nororiental de Cuba (modelo MPECU2017), resulta conveniente incorporar los resultados obtenidos mediante el experimento de velocidad de caída de arena en agua (parámetro A) y el método de los mínimos cuadrados (parámetro m) (Ec.35 y Ec.36), a las ecuaciones de cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playa (Ec.29, Ec.30., Ec.31 y Ec.32) definidas por Dean 1991. Como se conoce el valor del parámetro ($m=0,58$), sólo se requiere deducir los parámetros exponenciales en términos de variables en las ecuaciones antes referidas.

A continuación, se refieren las nuevas ecuaciones propuestas, como parte de esta investigación, para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playas (Ec.37, Ec.38, Ec.39 y Ec.40), las cuales han sido ajustadas a las características hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental.

$$w \left(\frac{A_N}{D_C} \right)^{1,72} + \left(\frac{A_N}{A_F} \right)^{1,72} \begin{array}{l} < 1, \text{ los perfiles se interceptan} \\ > 1, \text{ los perfiles no se interceptan} \end{array} \quad (\text{Ec.37})$$

Donde:

W ; Ancho de la playa seca después del equilibrio en metros,

A_N ; Valor del coeficiente (A) para el sedimento nativo,

A_F ; Valor del coeficiente (A) para el sedimento de préstamo,

D_C ; Profundidad de cierre en metros.

Para un perfil no interceptado, el volumen de arena por metro lineal de playa, que debe colocarse para que luego del vertimiento se logre una playa seca, después de alcanzado el equilibrio, se estima mediante la ecuación Ec.38 (Fig.3.5 caso 1).

$$V = 0,63 \left(\frac{D_C}{A_F} \right)^{2,72} (A_N - A_F) \quad (\text{Ec.38})$$

Donde:

D_C , profundidad de cierre en metros

Si el volumen vertido es menor que el volumen obtenido mediante la ecuación anterior, se obtiene un perfil sumergido después del equilibrio.

Para perfiles no interceptados, si se desea alcanzar una playa seca después del equilibrio, es decir, el volumen colocado es igual o supera el valor obtenido por la Ec.38, entonces debe ser calculado mediante la ecuación Ec.39 (Fig.3.5 caso 2).

$$V = WB + 0,63 \left(\frac{D_C}{A_F} \right)^{2,72} \left\{ A_N \left[1 + W \left(\frac{A_F}{D_C} \right)^{1,72} \right]^{1,58} - A_F \right\} \quad (\text{Ec.39})$$

Donde:

B ; altura de la berma en metros

Para perfiles que se interceptan, el volumen por metro lineal de costa requerido para adelantar la playa una distancia determinada, después del equilibrio, puede ser estimado mediante la ecuación Ec.40 (Fig.3.5 caso 3).

$$V = WB + \frac{0,63 W^{1,58} A_N A_F}{(A_F^{1,72} - A_N^{1,72})^{0,58}} \quad (\text{Ec.40})$$

En este caso no incluye la profundidad de cierre (D_C) porque por definición el perfil de vertimiento intercepta al perfil nativo.

4.4. Estado morfodinámico modal en playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba

En el presente acápite se determina el estado morfodinámico modal de 12 playas representativas del litoral nororiental con el objetivo de conocer, a cuál estado morfodinámico corresponden las playas del litoral nororiental, teniendo en cuenta que el modelo de perfil de equilibrio de Dean (1977, 1991), y las ecuaciones derivadas de él fueron desarrolladas para playas disipativas (Dean, 1991; Dean y Dalryple, 2004). La tabla 4.15, muestra los resultados del cálculo del parámetro adimensional (Ω) para las 12 playas.

Tabla 4.15. Estado morfodinámico de las playas del litoral nororiental de Cuba

Playa	Datos del sedimento		Ω_m	Verano			Invierno			Estado morfodinámico	
	D_{50} (mm)	w_s (m/s)		Hbv	Tv	Ω_v	Hbi	Ti	Ω_i	Ω_p	Estado modal
Maguana	0,44	0,07	2	0,85	6,1	2	0,81	6,2	2	2	Intermedio
Guardalavaca	0,21	0,039	4	1,09	6,4	4	0,97	6,5	4	4	Intermedio
Esterio Ciego	0,31	0,054	3	1,04	6,4	3	0,96	6,5	3	3	Intermedio
Yuraguanal	0,24	0,044	3	0,58	6,2	2	0,58	6,2	2	2	Intermedio
Pesquero	0,32	0,056	2	1,01	6,4	3	0,72	6,4	2	2	Intermedio
Minint	0,53	0,078	1	0,61	6,1	1	0,52	6,1	1	1	Reflectivo
Don Lino	0,55	0,08	1	0,61	6,1	1	0,57	6,1	1	1	Reflectivo
Blanca	0,23	0,043	4	1,06	6,6	4	1,04	6,7	4	4	Intermedio
Los Bajos	0,39	0,065	2	0,76	6,2	2	0,95	6,7	2	2	Intermedio
Corella	0,33	0,057	2	0,63	6,5	2	0,95	6,7	2	2	Intermedio
Punta Tomate	0,36	0,062	2	0,66	6,4	2	0,72	6,7	2	2	Intermedio
La Llanita	0,33	0,057	2	0,65	6,5	2	0,95	6,7	2	2	Intermedio

Leyenda:

D_{50} , granulometría media de la arena

w_s , velocidad de caída por granulometría de la arena de acuerdo al experimento de velocidad de caída realizado

Ω_m , valor de omega modelado en base transformación de oleaje oceánico promediado por rumbos (Anexo 10)

Ω_p , Valor de omega promedio

Hbv, altura de la ola en verano

Tv, periodo de la ola en verano

Ω_v , Valor de omega en verano

Hbi, altura de la ola en invierno

Tv, periodo de la ola en invierno

Ω_i , Valor de omega en invierno

Los valores del parámetro adimensional calculado mediante la transformación del oleaje oceánico desde aguas profundas (Ω_m) y los valores del parámetro adimensional obtenidos mediante mediciones directas del oleaje, en general coinciden. En el 83 % de los casos, hay total coincidencia, considerando las tres fuentes de información para el cálculo. En un

caso, para el verano, se encuentra un valor de (Ω) diferente respecto a las otras dos fuentes previas, aunque sin que cambie la condición del estado morfodinámico encontrado (Playa Pesquero) y sólo en una playa (Playa Yuraguanal) hay cambio de condición del estado modal encontrado mediante la transformación del oleaje desde aguas profundas (Ω_m) en comparación con los oleajes medidos en el terreno (Ω_v y Ω_i).

Los resultados demuestran que las playas del litoral nororiental de Cuba, tienden a ser de tipo intermedio (83%), y los 17% restantes corresponden a estado modal reflectivo, no existiendo ningún caso de estado modal disipativo. En términos generales tienden más a playas con estados morfodinámicos reflectivos que disipativos.

4.4.1. Características de los estados morfológicos de las playas del litoral nororiental

Teniendo en cuenta que los rasgos morfológicos responden a las características climáticas de cada latitud (Goulart, 2003), se procedió a determinar los rasgos morfológicos asociados a los valores de (Ω) encontrada en cada una de las 12 playas. La figura 4.24, resume los principales rasgos morfológicos de las playas del litoral nororiental.

La figura 4.24 muestra cuatro estadios modales en las playas estudiadas, permitiendo encontrar diferencias, aunque en algunos casos aparecen también similitudes, como el caso de los estados modales $\Omega=1$ y $\Omega=4$, particularmente en la forma y configuración del perfil. A continuación, se resumen las principales características encontradas mediante la clasificación de las playas atendiendo al índice de Dean.

Valor de $\Omega=1$. Reflectivo

En esta condición fueron encontradas el 17% de las playas consideradas para el cálculo del parámetro adimensional. Estas fueron Don Lino y Minint. Como rasgo característico, destaca el predominio de arenas gruesas ($>0,50$ mm), la ausencia de barras de arena en la pendiente submarina, la presencia de una cresta de berma bien definida y una altura de la berma entre 1,30-1,35 m. El arrecife de coral se encuentra muy cerca de la playa (menos de 100 m) por lo que la rotura del oleaje ocurre sobre la playa (Figura 4.24B).

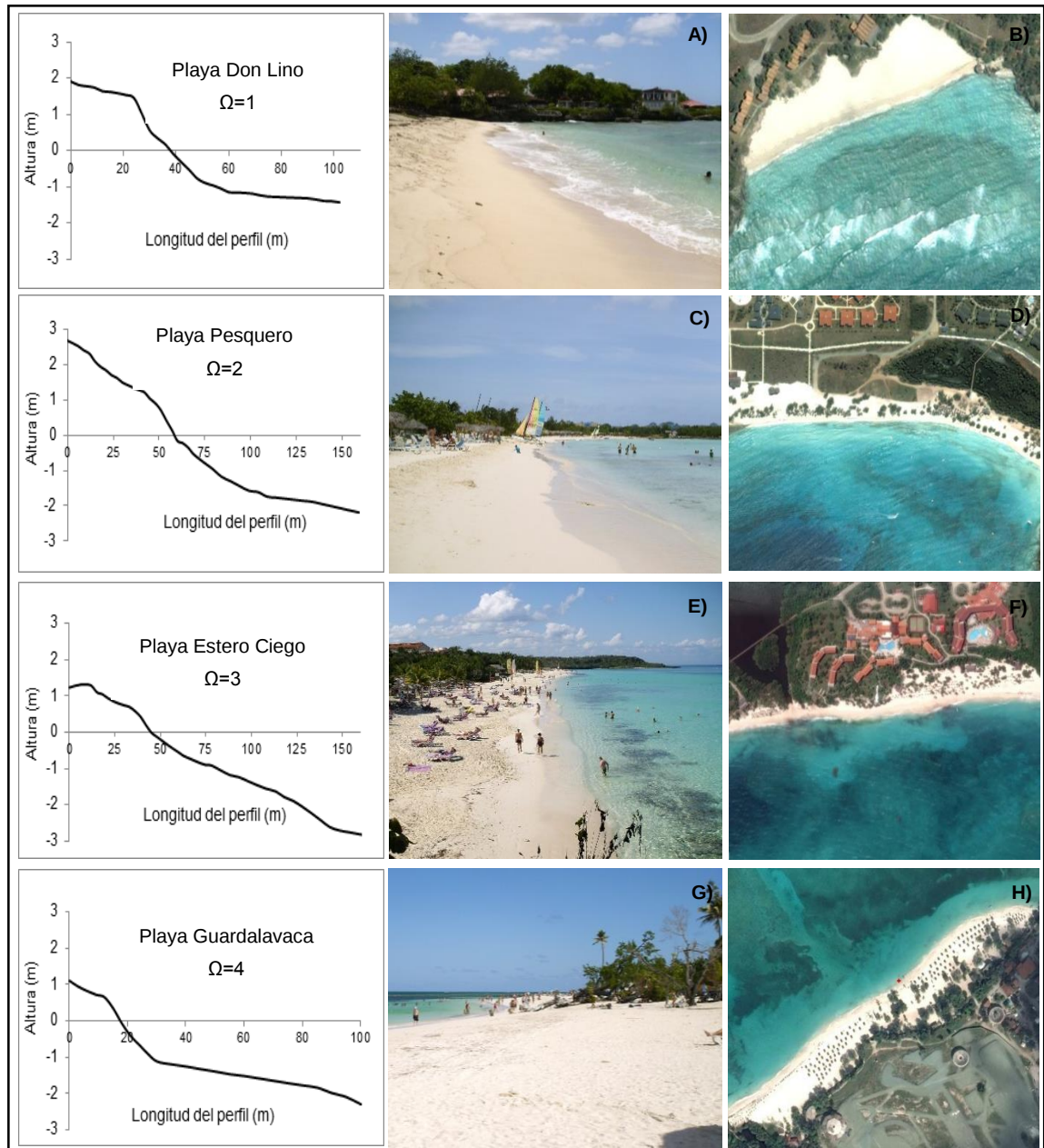


Figura 4.24. Principales rasgos morfológicos de las playas del litoral nororiental

Fuente: Elaboración propia.

Valor de $\Omega=2$. Con arrecife frontal y barras en la pendiente submarina

En esta condición fueron encontradas el 58% de las playas consideradas en el cálculo del parámetro adimensional. Estas fueron Maguana, Yuraguanal, Pesquero, Los Bajos, Corella, Punta Tomate y La Llanita. Como rasgos característicos, destacan principalmente la presencia de arrecifes costeros entre 300 y 900 m de la costa y al menos una barra de arena en la pendiente sumergida (Fig.4.24D). También tiene una cresta de berma muy alta. Hay un predominio de arena de granulometría media (0,25-0,5 mm). En un caso aparecieron topografías rítmicas en la cara de la playa, lo cual obedece una condición muy puntual durante la etapa de invierno, con olas de mayor altura, pues no se encontró en ningún otro periodo analizado y en ninguna de las imágenes satelitales de Google Earth Pro, consultadas de los años 2003, 2007, 2013, 2014, 2016 y 2017.

Valor de $\Omega=3$. Con barra y sin arrecife costero

En esta condición apareció una sola playa (Playa Estero Ciego), por lo cual no es posible establecer rasgos específicos, pero sí destaca la presencia de sedimentos de granulometría media (Fig.4.24F).

Valor de $\Omega=4$. Con o sin arrecifes con barras

En esta condición fueron encontradas el 17% de las playas consideradas para el cálculo del parámetro adimensional. Estas fueron Guardalavaca y Blanca. Como rasgos característicos, destaca principalmente el predominio de arenas de granulometría fina, de una barra de arena en la parte sumergida y crestas de berma bien definida. En el caso específico de Guardalavaca, se aprecian unas amplias semilunas, condición definida por la disposición del arrecife de coral y la pradera de algas y fanerógamas marinas (Fig.4.24H).

A modo de resumen, como elemento común encontrado en los estados morfodinámico de tipo intermedio ($\Omega=2$, 3 y 4), destaca la presencia de barras en la pendiente submarina. Estas barras generalmente son pequeñas y se denotan por un ligero cambio de la pendiente

en la zona sumergida, como dan cuenta los perfiles característicos de estos estados morfodinámicos (Fig.2.24).

4.5. Validación de las ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena en los proyectos de regeneración de playas

El objetivo de este acápite es demostrar la conveniencia de utilizar las nuevas ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena a verter, en los proyectos de regeneración de playa, en vez de las formulaciones hasta ahora utilizadas. Se toman como referencia los trabajos de vertimiento artificial de arena en las playas Estero Ciego y Don Lino, ejecutados en los años 1998 y 1999 respectivamente.

Como es conocido el comportamiento de los volúmenes de arena en el tiempo, reportado por Rodríguez y Córdova (2005a, 2010), por tanto, es posible determinar cuál de los modelos representa, más fielmente, los volúmenes de arena retenidos por ambas playas, luego de ejecutados los trabajos de regeneración.

4.5.1. Playa Estero Ciego

Para determinar el volumen de arena que se debió verter, para alcanzar un ancho de la playa seca de 22,5 m después de alcanzado el equilibrio, se procedió a determinar los parámetros (A) y (m) de los modelos de Dean (1991), García (2005) y el modelo MPECU2017 propuesto en esta investigación. Los resultados y datos para el análisis aparecen en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Parámetros (A) y (m) según los diferentes modelos para playa Estero Ciego

Modelos	<i>Arena nativa</i>		<i>Arena de préstamo</i>		Parámetro (m)
	Md (D_{50})	Parámetro (A)	Md (D_{50})	Parámetro (A)	
Dean, 1991	0,51 mm	0,1622 m ^{1/3}	0,31 mm	0,127 m ^{1/3}	0,67
García, 2005	0,51 mm	0,138 m ^{1/3}	0,31 mm	0,124 m ^{1/3}	0,67
MPECU2017	0,51 mm	0,149 m ^{1/3}	0,31 mm	0,129 m ^{1/3}	0,58

Fuente: Elaboración propia.

El primer paso es determinar si los perfiles se interceptan o no (Ec.37). Para ello se requiere la profundidad de cierre (D_c), el ancho de la playa seca después del equilibrio (W), la altura de la berma (B) y los parámetros (A) y (m), todos conocidos.

Realizándose el análisis inicialmente para el modelo de Dean (1991), los valores a tener en cuenta son: $A_N=0,1622\text{m}^{1/3}$; $A_F=0,127\text{m}^{1/3}$; $B=1,5\text{m}$; $W=22,5\text{m}$; $D_c=2,43\text{m}$; $m=0,67$ y longitud de playa de 600 m, que fue la longitud de la playa regenerada.

$$22,5 \left(\frac{0,1622}{2,43} \right)^{3/2} + \left(\frac{0,1622}{0,127} \right)^{3/2} = 1,82$$

Como el valor obtenido mediante esta ecuación es mayor que 1, el perfil de relleno no intercepta al perfil nativo, por lo que, para alcanzar un ancho medio de playa seca después del equilibrio de 22,5 m, se requiere del uso de la ecuación (Ec.39).

$$V = 22,5 \times 1,5 + 0,6 \left(\frac{2,43}{0,127} \right)^{5/2} \left\{ 0,1622 \left[1 + 22,5 \left(\frac{0,127}{2,43} \right)^{3/2} \right]^{5/3} - 0,127 \right\}$$

$$V = 143,67\text{m}^3/\text{m} \times 600 \text{ m}$$

$$V = 86.202 \text{ m}^3$$

Ello arrojó que según el modelo de Dean (1991) se debieron verter 86.202 m³ de arena, provenientes del banco de préstamo Punta Inglés.

Posteriormente se procedió a realizar el mismo análisis siguiendo el modelo de García (2005). Los valores a tener en cuenta son: $A_N=0,138 \text{ m}^{1/3}$; $A_F=0,124 \text{ m}^{1/3}$; $B=1,5 \text{ m}$; $W=22,5 \text{ m}$; $D_c=2,43 \text{ m}$ y $m=0,67$.

$$V = 22,5 \times 1,5 + 0,6 \left(\frac{2,43}{0,124} \right)^{5/2} \left\{ 0,138 \left[1 + 22,5 \left(\frac{0,124}{2,43} \right)^{3/2} \right]^{5/3} - 0,124 \right\}$$

$$V = 114,16 \text{ m}^3/\text{m} \times 600 \text{ m}$$

$$V = 68.496 \text{ m}^3$$

Según el modelo ajustado por García (2005), se debieron verter 68.496 m^3 de arena.

Finalmente se procedió a realizar el mismo análisis siguiendo el modelo MPECU2017. Los valores a tener en cuenta son: $A_N=0,149 \text{ m}^{1/3}$; $A_F=0,129 \text{ m}^{1/3}$; $B=1,5 \text{ m}$; $W=22,5 \text{ m}$; $D_c=2,43 \text{ m}$ y $m=0,58$.

$$V = 22,5 \times 1,5 + 0,63 \left(\frac{2,43}{0,129} \right)^{2,72} \left\{ 0,149 \left[1 + 22,5 \left(\frac{0,129}{2,43} \right)^{1,72} \right]^{1,58} - 0,129 \right\}$$

$$V = 136,12 \text{ m}^3/\text{m} \times 600 \text{ m}$$

$$V = 81.672 \text{ m}^3$$

Según el modelo MPECU2017 se debieron verter 81.672 m^3 de arena, provenientes del banco de préstamo Punta Inglés. La Tabla 4.17, resume los volúmenes obtenidos mediante el empleo de los tres modelos.

Tabla 4.17. Volumen de arena necesario en Estero Ciego según tres modelos

Volúmenes de arena en m^3				
Propuesto	Vertido	Dean/1991	García/2005	MPECU/2017
88.219	83.000	86.202	68.496	81.672

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados demuestran que los volúmenes de arena obtenidos a partir del modelo MPECU2017 y las ecuaciones ajustadas como parte de la investigación resultan más precisas que los volúmenes obtenidos mediante los modelos y ecuaciones de García (2005) y Dean (1991). En el caso del modelo de Dean (1991), hay un sobredimensionamiento de los volúmenes de arena a verter, en tanto el modelo de García (2005), predice volúmenes de arena inferior a los necesarios para estabilizar la línea de costa.

Atendiendo a ello es posible concluir que el modelo MPECU2017 y las ecuaciones de cálculo propuestas (Ec.37, Ec.38, Ec.39, Ec.40), reflejan con mayor precisión y objetividad el comportamiento experimentado por Playa Estero Ciego, validando la utilización del parámetro $m=0,58$ y un valor de $A=0,67\omega_s^{0,56}$, para representar el perfil de equilibrio en las playas biogénicas arenosas, con estado modal intermedio ($\Omega=2$).

4.5.2. Playa Don Lino

Como se conocen los volúmenes de arena vertidos en Don Lino y su comportamiento a lo largo del tiempo, se procedió a calcular el volumen de arena que se debió verter para obtenerse una playa seca de 8 m, después del equilibrio. La secuencia de cálculo y el procedimiento seguido es el mismo utilizado en el caso anterior.

Para ello, se procedió a determinar los parámetros (A) y (m) de los modelos de Dean (1991), García (2005) y el propuesto como parte de esta investigación. Los resultados y datos para el análisis aparecen en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Parámetros (A) y (m) según los diferentes modelos para Don Lino

Modelos	<i>Arena nativa</i>		<i>Arena de préstamo</i>		Parámetro (m)
	Md (D_{50})	Parámetro (A)	Md (D_{50})	Parámetro (A)	
Dean, 1991	0,56 mm	0,1682 m ^{1/3}	0,50 mm	0,161 m ^{1/3}	0,67
García, 2005	0,56 mm	0,141 m ^{1/3}	0,50 mm	0,137 m ^{1/3}	0,67
MPECU2017	0,56 mm	0,163 m ^{1/3}	0,50 mm	0,159 m ^{1/3}	0,58

Fuente: Elaboración propia.

Como en el caso anterior, primero se determina si los perfiles se interceptan o no (Ec.37). Para el caso del modelo de Dean (1991), los valores a tener en cuenta son: $A_N=0,1682 \text{ m}^{1/3}$; $A_F=0,161 \text{ m}^{1/3}$; $W=8 \text{ m}$; $B=1,6 \text{ m}$; $Dc=2,2 \text{ m}$; $m=0,67$ y una longitud de costa de 300 m.

$$8\left(\frac{0,1682}{2,2}\right)^{3/2} + \left(\frac{0,1682}{0,161}\right)^{3/2} = 1,23$$

Como se aprecia, se obtiene un valor mayor que uno, lo que indica que el perfil de relleno no intercepta al perfil nativo, por lo que, para alcanzar un ancho medio de playa seca de ocho metros, después del equilibrio, se requiere del uso de la ecuación (Ec.39).

$$V = 8x1,6 + \frac{3}{5}\left(\frac{2,2}{0,161}\right)^{5/2} \left\{ 0,1646 \left[1 + 8\left(\frac{0,161}{2,2}\right)^{3/2} \right]^{5/3} - 0,161 \right\}$$

$$V = 35,56 \text{ m}^3/\text{m} \times 300 \text{ m}$$

$$V = 10.667 \text{ m}^3$$

Ello muestra que según el modelo de Dean (1991) para alcanzarse un ancho de playa seca de 8 m después del equilibrio, se debieron verter 10.667 m³ de arenas provenientes del banco de préstamo Bariay, a los que habría que sumar 29.800 m³ que fueron necesarios verter para cubrir la parte posterior de la playa.

Posteriormente se procedió a realizar el mismo análisis siguiendo el modelo ajustado por García (2005). Los valores a tenerse en cuenta son: $A_N=0,139 \text{ m}^{1/3}$; $A_F=0,137 \text{ m}^{1/3}$; $W=8 \text{ m}$; $Dc=2,2 \text{ m}$; $B=1,6 \text{ m}$ y $m=0,67$.

$$V = 8x1,6 + \frac{3}{5}\left(\frac{2,2}{0,137}\right)^{5/2} \left\{ 0,141 \left[1 + 8\left(\frac{0,137}{2,2}\right)^{3/2} \right]^{5/3} - 0,137 \right\}$$

$$V = 33,26 \text{ m}^3/\text{m} \times 300 \text{ m}$$

$$V = 9.978 \text{ m}^3$$

Según el modelo ajustado por García (2005), se debieron verter 9.978 m³ de arenas provenientes del banco Bariay.

Luego se procedió a realizar el mismo análisis siguiendo el modelo MPECU2017. Los valores a tenerse en cuenta son: $A_N=0,164\text{m}^{1/3}$; $A_F=0,158\text{m}^{1/3}$; $W=8$ m; $D_c=2,2$ m; $B=1,6$ m y el parámetro $m=0,58$, obtenido por el método de los mínimos cuadrados.

$$V = 8 \times 1,6 + 0,63 \left(\frac{2,2}{0,159} \right)^{2,72} \left\{ 0,163 \left[1 + 8 \left(\frac{0,159}{2,2} \right)^{1,72} \right]^{1,58} - 0,159 \right\}$$

$$V = 34,40\text{m}^3/\text{m} \times 300 \text{ m}$$

$$V = 10.322 \text{ m}^3$$

De acuerdo al modelo MPECU2017, para lograr un ancho de playa seca de ocho metros, después del equilibrio, se debieron verter 10.322 m³ de arena. La Tabla 4.19, resume los volúmenes de arena que se debieron verter para lograr un ancho de playa seca de 8 m, en los trabajos de creación artificial de Playa Don Lino, utilizando el banco de préstamo Punta Bariay. El cómputo final incluye 29.800 m³ de arena que se vertieron en la parte posterior para lograr un perfil homogéneo.

Tabla 4.19. Volúmenes necesarios en Don Lino según los modelos

Volúmenes de arena en m ³				
Pronosticado	Vertido	Dean/1991	García/2005	MPECU2017
41.770	40.015	40.468	39.778	40.122

Fuente: Elaboración propia.

Aunque no se aprecian diferencias significativas entre los tres modelos, estos resultados demuestran que los volúmenes de arena obtenidos a partir del modelo MPECU2017 y las ecuaciones ajustadas resultan más precisas que el resto de los modelos considerados. La poca diferencia de los volúmenes de arena se debe a la poca extensión de la playa creada y el poco ancho de la playa seca considerada en el cálculo. Indudablemente que, para dimensiones mayores, el volumen de arena variaría de manera significativa, haciendo más

notable, el mejor ajuste del modelo MPECU2017 y las ecuaciones propuestas derivadas de este modelo.

Atendiendo a ello es posible concluir que el modelo MPECU2017 y las ecuaciones de cálculo propuestas (Ec.37, Ec.38, Ec.39, Ec.40), reflejan con mayor precisión y objetividad el comportamiento experimentado por Playa Don Lino, validando la utilización del parámetro $m=0,58$ para representar el perfil de equilibrio en las playas biogénicas, con estado modal reflectivo ($\Omega =1$), del litoral nororiental de Cuba y un valor de $A=0,67\omega_s^{0,56}$.

V. DISCUSIÓN

5.1. Particularidades morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias del litoral nororiental de Cuba

La ausencia o estrechez de la plataforma insular marina en el litoral nororiental de Cuba, constituye un elemento esencial que contribuye a la diferenciación espacial, en muchos aspectos de este litoral, respecto a cualquier otro sector del archipiélago cubano y a su vez tiene una fuerte influencia en las características hidrodinámicas y sedimentarias del litoral nororiental de Cuba.

La estrechez de su plataforma hace que la zona litoral esté expuesta a la acción directa del oleaje oceánico, proveniente del Atlántico. Si bien hay un predominio de los oleajes de rumbo Este y Etenordeste asociados a los vientos Alisios, las mayores alturas medias del oleaje significativo corresponden a los rumbos Norte y Noroeste, lo que está relacionado con la entrada de los frentes fríos y los vientos fuertes acompañantes. Ello tiene una fuerte repercusión en los procesos litorales y el transporte sedimentario (Fig.4.12, Fig.4.13, Fig.4.14 y Fig.4.15)

También esta característica determina que, en el litoral nororiental de Cuba, tengan lugar las mayores alturas del oleaje habitual registrado para Cuba (Fig.4.5) y también las mayores alturas de marea del archipiélago cubano (Fig.4.6). Hacia el occidente de la isla de Cuba, la altura de la ola se hace menor, por la protección que le brindan los cayos que se encuentran al Norte, así como las islas del archipiélago de las Bahamas.

Además, debido a la estrechez de la plataforma insular en el litoral nororiental de Cuba no existen grandes áreas de producción de sedimentos por parte de los organismos marinos y en consecuencia las playas son de poca extensión y desarrollo. Su existencia está ligado al arrecife de coral, por ser, no sólo, el responsable de la creación de condiciones adecuadas para el desarrollo de las especies marinas productoras de sedimentos, sino además un excelente elemento de defensa ante la acción del oleaje de mayor energía, particularmente durante el paso de huracanes y tormentas tropicales. Este elemento denota

la importancia de la preservación de los arrecifes coralinos para la protección de las playas cubanas (Alcolado, 2010).

El predominio de restos de moluscos en la composición genética de los sedimentos de las playas, seguido de fragmentos de corales, foraminíferos, y mucho menos cantidad de restos de algas calcáreas, es la característica más importante que distingue las playas del litoral nororiental de Cuba, respecto a otros sectores del archipiélago cubano (Fig.4.7). Ello es consecuencia directa de la poca extensión de la plataforma insular y, en consecuencia, de la ausencia de grandes áreas de producción de sedimentos por parte de los organismos marinos.

El predominio de los restos de algas calcáreas en la playa de Varadero y en las playas del archipiélago Sabana-Camagüey (Jardines del Rey) (Fig.4.7), obedece a la amplitud de la plataforma insular en estos territorios (Ionin et al., 1977) y, en consecuencia, la existencia de grandes áreas para el desarrollo y crecimiento de las algas calcáreas que conforman sus sedimentos (Juanes, 1996; Alcolado, 2010).

5.2. La erosión en las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba

Los estudios llevados a cabo evidencian que el 50% de las playas del litoral nororiental de Cuba tienen una tendencia erosiva (erosión o fuerte erosión), sin embargo es evidente que la manifestación de los procesos erosivos en este litoral, es menor que la reportada por Juanes (1996) para las playas de Cuba, con un 86% de afectación por procesos erosivos y Tristá (2003) para las playas interiores del occidente y centro de Cuba, donde se reportó que el 100% de las playas estaban afectados por procesos erosivos. Sin embargo, hay que señalar que los estudios realizados por Juanes (1996) y Tristá (2003) están basados, en algunos casos, en el uso de fuentes indirectas de información y perfiles de playas por cortos periodos, por lo que también reflejan la variabilidad de la playa para determinados periodos de tiempo y por tanto pueden exagerar la presencia de los procesos erosivos presentes en ellas.

Rangel et al. (2015), utilizando el algoritmo *End Point Rate* (EPR) de DSAS, reportó que el 48,3% de las costas colombianas estaban afectada por “erosión” o “fuerte erosión”, resultados muy similares a los encontrados para las playas del litoral nororiental de Cuba.

En el litoral nororiental, predominan magnitudes de erosión inferior a 1,2 m/año y sólo de manera muy puntual aparece “fuerte erosión”, es decir magnitudes superiores a 1,2 m/año, espacios que pueden ser considerados como puntos calientes (*hot spot*) y no representan la tendencia de los procesos que se manifiestan en las playas.

Estos resultados también son muy similares a los encontrados por Aedlaa et al. (2015), en playas de la India, donde reporta un retroceso de la línea litoral de 0,56 m/año, utilizando el algoritmo EPR de DSAS, sin embargo, contrastan con los reportes del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA, 2017), que refieren que el ritmo de retroceso de la línea litoral de las playas arenosas de Cuba es de 1,2 metros por año.

Interesante resulta que en el 31,8% de las costas tienen lugar procesos de “acumulación” en tanto los procesos de “erosión fuerte” ($\geq 1,2$ m/año) sólo ocupan el 7,6% de las costas (Tabla 4.5, Fig.4.12 y Fig.4.13). Ello demuestra que si bien la erosión es un fenómeno generalizado en las playas de Cuba (Juanes, 1996; Tristá, 2003; CITMA, 2017), hay playas que muestran un comportamiento diferente, siendo los procesos de erosión fuerte ($\geq 1,2$ m/año) casos puntuales.

El análisis de la variabilidad de la línea litoral en algunas playas, evidencia que las arenas perdidas en algunos sectores constituyen ganancias para otros. Por ejemplo, Playa Maguana, si bien presenta procesos erosivos muy fuertes en la porción central de la playa, la mayor parte de la playa, hacia ambos extremos, presenta una gran acumulación de arena, razón por la cual la playa ha sido definida con tendencia a la acumulación (Fig.5.1).

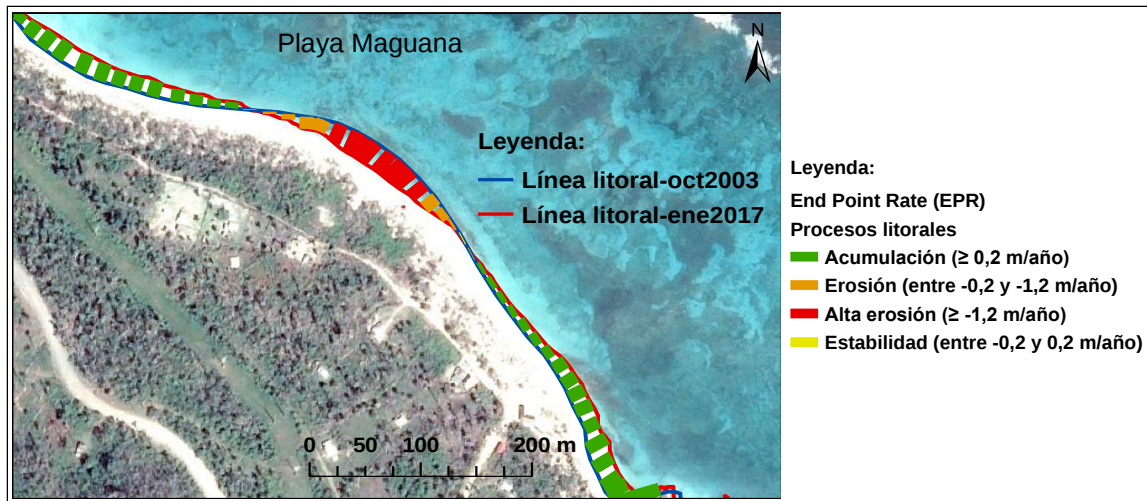


Figura 5.1. Variabilidad de la línea litoral en playa Maguana. Como se aprecia en la figura, si bien en la parte central se aprecia erosión, en los extremos hay procesos de acumulación

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la tendencia (erosión, estabilidad o acumulación) encontrada en las playas mediante perfiles topográficos de playa (Tabla 4.6) es similar a la encontrada mediante imágenes satelitales (Tabla 4.5), lo cual demuestra la viabilidad del uso de DSAS, en el análisis rápido de los procesos costeros en determinados territorios. Sin embargo, la magnitud de los procesos erosivos encontrados en las playas mediante el algoritmo *End Point Rate* (EPR) de DSAS, son ligeramente superiores a los encontrados mediante el levantamiento de perfiles de playa (Tabla 4.6), lo cual se entiende por las particularidades de ambas técnicas, la época de las mediciones y los errores asociados al levantamiento de la línea litoral mediante imágenes satelitales, aunque en general hay correspondencia en los resultados.

La existencia de una costa rocosa adyacente a las playas y afloramientos rocosos en algunas de ellas, permitió mejorar la precisión de las mediciones mediante imágenes satelitales. Además, en el procesamiento de las imágenes, se logró una precisión adecuada según el error de ajuste (Anexo 8 referido anteriormente), y los resultados obtenidos se corresponden con los resultados observados durante las inspecciones de campo realizadas en diferentes condiciones meteorológicas y altura de marea.

La magnitud de los procesos erosivos encontrados en el litoral nororiental también se corresponde con los reportados por otros autores en la misma región de estudio. Rodríguez y Córdova (2006), estiman que el 96,5% de las playas del litoral nororiental tenían una erosión moderada o baja, con una magnitud inferior a 1,2 m/año. Similar resultado reporta Rodríguez et al. (2009), para las playas del litoral de Holguín. Córdova (2016), reporta procesos erosivos inferiores a 1,2 m/año, mediante el uso de perfiles de playas y datas superiores a 10 años para las playas de interés turístico del litoral de Holguín.

Estos elementos demuestran que el algoritmo *End Point Rate* (EPR) de DSAS, es una herramienta válida para el análisis de la variabilidad de la línea litoral en playas arenosas, con la ventaja sobre los métodos tradicionales, usando perfiles de playa, en que aporta una clara expresión espacial de los procesos costeros que tienen lugar en ellas, aunque con la desventaja que los resultados pueden resultar menos precisos, en cuanto a la magnitud de los procesos que se aprecian en las playas.

En cuanto a las causas de la erosión, los huracanes y tormentas tropicales parecen ser actualmente los responsables de las mayores afectaciones por erosión en las playas del litoral nororiental de Cuba, cuya recurrencia ha aumentado en los últimos años (Fig.4.17). En los últimos nueve años cuatro huracanes con categoría III, han afectado directamente el área de estudio, mientras que el periodo anterior (29 años), sólo dos huracanes la afectaron directamente.

Morton y Sallenger (2003), Martell et al. (2012) y Palafox y Gutiérrez (2013) también definen a los huracanes y tormentas tropicales como responsables de las mayores afectaciones por erosión en las playas arenosas del golfo de México y la costa oriental de los Estados Unidos, así como Cancún, Cozumel, Quintana Roo y San Blas en México. Durante los huracanes y tormentas el potencial destructivo del oleaje se incrementa, particularmente cuando se combinan grandes oleajes con las mareas vivas.

En lo que respecta a los eventos ENOS, éstos tendrían una influencia favorable sobre las playas del litoral nororiental al existir la tendencia a aumentar el número de frentes fríos que arriban a Cuba durante los eventos ENOS (Fig.4.16). Durante la entrada de los frentes

fríos, los vientos giran al Noroeste y Norte. Bajo estos rumbos se invierte la circulación de las aguas costeras y con ello el transporte sedimentario, devolviendo a sus posiciones de origen, las arenas que se han transportado de manera, casi permanente, en dirección Oeste por la existencia de una deriva litoral neta en esa dirección.

Por otra parte, el hecho que con los eventos ENOS se reduzca el número de tormentas tropicales y huracanes que afectan el Caribe (Fernández y Ramírez, 1991; Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla, 2007), cuyo potencial destructivo es conocido, podría tener igualmente un efecto favorable para las playas de este litoral.

Aunque los modelos preliminares del impacto del cambio climático hasta el año 2100 en Cuba, prevén un aumento del nivel medio del mar de 0,85 m, estos valores podrían ser superiores considerando las últimas estimaciones del IPCC (2014). La CEPAL (2018), alerta precisamente sobre los efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe, definiendo la erosión de las playas como uno de los principales efectos del cambio climático.

En el caso del litoral nororiental de Cuba, mediante la aplicación del modelo de Bruun, se estableció que consecuencia del aumento del nivel del mar, se perderán, como promedio, 12,6 metros de ancho de las playas para el año 2100. Sin embargo, los resultados de la tabla 4.8, muestran que el aumento del nivel del mar, aporta sólo un pequeño componente (0,16 m/año), de retroceso de la línea de costa, en tanto hay otros factores, como los huracanes, que tienen una mayor incidencia en los procesos erosivos que se aprecian en las playas.

Si bien es cierto, que a medida que aumenta la tasa de aumento del nivel del mar, el retroceso de la línea litoral será mayor, el aumento del nivel del mar ha sido un contribuyente menor en el retroceso de las líneas de costa en las últimas décadas (Le Cozannet et al., 2014; Dean y Houston, 2016).

Estos resultados chocan con las declaraciones del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA, 2017), que atribuye al aumento del nivel del mar,

generado por el cambio climático, la responsabilidad de los procesos erosivos presentes en las playas cubanas.

Si bien es cierto que la regla de Bruun ha sido cuestionada en los últimos tiempos (ej. Cooper y Pilkey 2004) otros muchos estudios la apoyan (ej. Schwartz, 1967; Houston y Dean, 2014; Houston, 2015; Kerans y Cartwright, 2016) o introducen ajustes (ej. Dean y Dalrymple, 2004; Rosati *et al.*, 2013). Más allá de cualquier cuestionamiento, la Regla de Bruun sigue siendo un modelo simplificado, de amplio uso a escala global, tal y como dan cuenta los estudios de los autores antes citados.

El retroceso de la línea litoral que se aprecia en el 50 % de las playas del litoral nororiental demuestra que las condiciones geográficas, la geomorfología y las condiciones climáticas del litoral nororiental de Cuba, inciden directamente en el comportamiento morfodinámico de las playas.

La erosión que se aprecia en las playas generados fundamentalmente por los huracanes, los eventos ENOS y el aumento del nivel del mar, justifica la búsqueda de nuevos modelos numéricos predictivos de perfil de equilibrio que se ajusten a las características hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental, que sirvan de sustento teórico en los trabajos de control de la erosión. En tal sentido, la alimentación artificial de arena es una estrategia de adaptación efectiva para contrarrestar los efectos del aumento del nivel medio del mar provocado por el cambio climático global (Yoshida *et al.*, 2014; Dean y Houston, 2016).

5.3. Perfil de equilibrio de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba

La velocidad de caída (ω_s) de las arenas de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba, es mayor que la obtenida por los especialistas soviéticos (Soviet, 1986) y la ajustada por García (2005) para Varadero y menores a la curva teórica utilizando el modelo de Gibss *et al.* (1971) (Fig.4.19), sin embargo, la curva de velocidad de caída evidencia una desaceleración en la medida que aumenta la fracción de la arena. Esta desaceleración de la velocidad de caída de las fracciones más gruesas obedece a la presencia de mucha más

cantidad de fragmentos de moluscos en las muestras utilizadas (Fig.4.20), cuyas formas son aplanadas y una mayor diversidad de tamaño y formas en la medida que aumenta el tamaño del grano de arena (Fig.4.21). La mayor proporción de moluscos en la composición genética de las arenas es precisamente una de las singularidades encontradas en las playas del litoral nororiental de Cuba (Fig.4.7).

Un comportamiento similar obtiene Cuttler et al. (2016), quien encontró una clara tendencia a aumentar la velocidad de caída en la medida que aumenta el tamaño del grano y una desaceleración de dicha velocidad en la medida que el grano se hace más grande. También es similar al reportado por Maiklem (1968) al determinar la velocidad de caída de arena de génesis calcárea, en donde las partículas de forma plana, muestran una desaceleración de su velocidad de caída en la medida que aumenta el tamaño del grano, de manera más significativa, que las demás formas de partículas consideradas en el estudio.

Además, en los estudios sobre la velocidad de caída de las partículas de origen biogénicos realizados por Komar y Reimers (1978) y Cheng (1997), se demuestra que los granos calcáreos, propios de los ambientes tropicales, tienen un rango mucho más amplio de tamaños y formas, en comparación con los granos de cuarzo, que son comunes en las costas continentales.

La mayor velocidad de caída en comparación con las demás muestras utilizadas también está relacionada con la mayor densidad de las arenas calcáreas ($2,72 \text{ g/cm}^3$), la cual es superior a la densidad de las arenas cuarcíferas ($2,65 \text{ g/cm}^3$).

Sin embargo, el hecho que las playas del litoral nororiental, posean una mayor cantidad de restos de moluscos y corales y mucho menos cantidad de restos de algas calcárea, que las demás playas del archipiélago cubano (Fig.4.7), determina que la velocidad de caída de las arenas sea mayor que la encontrada en Playa Varadero, donde predominan los restos de algas calcáreas, y podría ser causa de los menores índices de erosión encontrado en las playas del litoral nororiental en comparación con otras playas del archipiélago cubano.

Estas particularidades de las arenas biogénicas sientan la hipótesis que las playas de ambientes tropicales son menos susceptibles a la erosión, que las playas constituidas por sedimentos terrígenos, debido a que las arenas permanecen durante menor tiempo en suspensión en la columna de agua⁴, al ser levantadas por el flujo oscilatorio de la ola y la turbulencia generada en la rotura. Sin embargo, las causas que generan erosión son muy variadas y en su susceptibilidad entran otros factores como la granulometría media de la arena (Barnard et al., 2015), entre otros factores.

Por otra parte, el análisis comparativo de los modelos de perfil de equilibrio de Dean (1987), Boon y Green (1988), Tristá (2003) y García (2005), demuestra que ninguno de los cuatro modelos representa adecuadamente a las playas biogénicas del litoral nororiental. El análisis de los resultados obtenidos por Tristá (2003) muestra una alta variabilidad del parámetro (m), con rangos desde 0,174 hasta 0,922, lo cual puede ser causa de la heterogeneidad de las playas consideradas en el estudio, sin que se hayan hecho distinciones entre ellas.

El hecho de haberse formulado un modelo (MPECU2017) que logra mejores ajustes que los cuatro modelos referidos anteriormente, permite desechar el uso de los modelos tradicionales basados en los trabajos de Dean (1977) y las ecuaciones propuestas por Tristá (2003) y García (2005) para las playas cubanas y en lo adelante utilizar el modelo MPECU2017 y las ecuaciones derivadas de este modelo, en los trabajos de regeneración de playas. La regeneración de playas mediante el aporte externo de arena es considerada como la forma más aceptable de estabilización y defensa de la costa contra la erosión (Leonard et al., 1990; Juanes 1996; Dean, 2003; Aragonés et al., 2016; Chiva et al., 2018; Ludka et al., 2018; Pranzini, et al., 2018).

Además de proteger la línea litoral contra la erosión, la regeneración de playas, proporciona un mayor atractivo estético y uso recreativo de las playas, sobre las soluciones

⁴ A medida que aumenta la velocidad de caída, es menor el tiempo que el grano de arena permanece en la columna de agua y por tanto menos susceptible a ser transportado y sacado del sistema litoral de la playa.

tradicionales de ingeniería costera tales como rompeolas, espigones y muros (Hanson et al., 2002; Dean, 2003; Aragonés et al., 2016; Karasu et al., 2016; Ludka et al., 2018; Pranzini, et al., 2018). También es considerada como una importante alternativa para la prevención de desastres, incluyendo el aumento del nivel medio del mar, así como en la conservación de los ecosistemas (Yoshida et al., 2014; Karasu et al., 2016; Dean y Houston, 2016; Chiva et al., 2018).

Por otra parte, el ajuste de las ecuaciones de cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playa, de acuerdo a las características y particularidades hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental, permite responder, de manera más adecuada, a los efectos de la erosión que se aprecia en las playas del litoral nororiental de Cuba.

5.4. Estado morfodinámico modal en playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba

El predominio de los estados morfodinámicos intermedio encontrados en el 83% de las playas del litoral nororiental (Tabla 4.15), coincide con la condición intermedia reportada por Boon y Green (1989), al estudiar el perfil de equilibrio en playas del Caribe bahameño, con características sedimentarias y de oleaje similares a las presentes en el litoral nororiental.

También confirma los resultados obtenidos por Goulart (2003), al estudiar la ocurrencia de estados de playa y su relación con la latitud y los cambios de los factores físicos con la morfodinámica y la latitud, en 52 playas micro mareales localizadas en las zonas tropical (Madagascar, Noreste de Brasil), subtropical (Sureste de Brasil) y templada (Sudáfrica y costa centro sur de Chile) de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico, quien reporta un predominio de playas de tipo intermedio en la región subtropical.

El estrechamiento de las playas durante el invierno, encontrado en el análisis de las geoformas características para el verano y el invierno (Tabla 4.4), responde al comportamiento general de las playas durante la época de verano y la época de invierno,

como dan cuenta diversos autores (Vidal et al., 1995; Bernabeu et al., 2003; Schwartz, 2005; Bird, 2008; Bird, y Lewis, 2015). Ello explica el incremento de la presencia de barras, durante la época invernal, encontradas en las playas del litoral nororiental.

El ligero incremento de la altura de la berma y también un ligero incremento del ancho de la cara de la playa, se explica por el hecho que durante la etapa invernal tienen lugar oleajes de mayor altura (Tabla 4.2), capaces de avanzar, aún más, tierra adentro. Con el avance de la ola, se incrementa la altura de la berma o aparece una berma de tormenta, y en consecuencia generalmente se produce un ligero incremento del ancho de la cara.

La forma característica del perfil de playa (Fig.4.9), lo asemeja a un perfil con barras longitudinales (*longshore bar-trough state*) de playas de perfil intermedio (Wright y Short, 1984), con la diferencia que no se trata de barras conformadas por arenas, sino de arrecifes coralinos. Por esta razón no es posible afirmar que las playas intermedias del litoral nororiental responden a este estado morfodinámico.

Para Wright y Short (1984), Short (2006) y Short (2010) las playas intermedias generalmente están constituidas por sedimentos de granulometría media (0,25-0,50 mm) y están sometidas a un oleaje moderado, con altura entre 1,0-1,25 m. Estas características reportadas para las playas intermedias, confirman que las playas del litoral nororiental de Cuba, son de tipo intermedia (Tabla 4.3, Figura 4.24). En los estados morfodinámico con valores $\Omega=2$, $\Omega=3$ y $\Omega=4$, destaca la presencia de barras en la pendiente submarina, arenas de granulometría media, con crestas de bermas altas y bien definidas, en general protegido por arrecifes coralino que atenúan el oleaje incidente.

El hecho que las playas reflectivas se producen por oleaje de baja altura ($<1,0$ m), particularmente con arenas medias o gruesas, explica que las playas del litoral nororiental, en términos generales, tienden más a playas con estados modales reflectivo que disipativo (Tabla 4.15). Estas fueron características reportadas también por Wright y Short (1984), Short (2006) y Short (2010) para las playas reflectivas.

Wright y Short (1984), Short (2006) y Short (2010), definieron que las playas disipativas deben su origen a la combinación de olas altas (mayores de 2,5 m) y arenas finas (D_{50}) inferior a 0,2 mm. Se caracterizan por ser playas amplias, con poca pendiente en la cara y en la zona de rompiente. Desde el punto de vista dinámico, las fuertes olas incidentes comienzan a descrestarse fuera de la zona de rompiente y se deterioran progresivamente al atravesar dicha zona. De este modo, ocurre una disipación del oleaje incidente, convirtiéndolo en olas de baja frecuencia.

Estas características descritas por Wright y Short (1984), Short (2006) y Short (2010) para las playas disipativas no se encuentran presentes en el litoral nororiental de Cuba. Las playas allí presentes son afectadas por oleajes de baja altura ($\leq 1,0$ m) y predominan los sedimentos de granulometría media (0,25-0,50 mm).

Aun cuando las características climáticas y sedimentarias reportadas por Wright y Short (1984), Short (2006) y Short (2010), para playas intermedias coincidan con los valores del parámetro adimensional (Ω), y con las características sedimentarias e hidrodinámicas de las playas del litoral nororiental, los estados morfodinámicos reportados por Wright y Short (1984), Short (2006) y Short (2010) no se corresponden con los encontrados en estas playas. Estos elementos demuestran que las particularidades hidrodinámicas y la granulometría y composición genética de los sedimentos inciden directamente en el comportamiento del estado morfodinámico modal de las playas, confirmando una de las hipótesis de la investigación. En estas playas no aparecen corrientes de retornos, topografía rítmica, cúspides, surcos litorales, y en sólo dos casos, aparecen ligeras y pequeñas topografías rítmicas en la parte alta de la cara.

Algunos investigadores (Hegge et al., 1996; Jackson et al., 2005), también han señalado que no siempre se cumple la clasificación de las playas realizada por Wright y Short (1984), particularmente por la presencia de arrecifes costeros cercanos a la costa, la baja energía del oleaje, el control geológico, entre otros. Al menos dos de las condiciones señaladas por Hegge et al. (1996) y Jackson et al. (2005), como la presencia de arrecifes

costeros cercanos a la costa y la baja energía del oleaje, son características que se encuentran presentes en las playas del litoral nororiental de Cuba.

Considerando que las ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playas, a partir de las ecuaciones propuestas por Dean (1991) y Dean y Dalryple (2004), son aplicables a las playas disipativas, entonces estas ecuaciones no son aplicables a las playas del litoral nororiental de Cuba, las cuales muestran un estado morfodinámico modal intermedio y tienden más a estados modales reflectivos que disipativos. De ahí la necesidad de contar con estudios que permitan ajustar estos modelos y ecuaciones a las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada litoral.

5.5. Validación de las ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena en los proyectos de regeneración de playas

El análisis de la permanencia de la arena vertida en las playas Estero Ciego y Don Lino, luego de los trabajos de regeneración de playas, evidencian que el modelo MPECU2017 y las ecuaciones de cálculo de los volúmenes de arena a verter, derivadas de este modelo (Ec.37, Ec.38, Ec.39 y Ec.40), reflejan con mayor precisión y objetividad el comportamiento experimentado por ambas playas luego de la ejecución de los trabajos de regeneración de playas. En ambos casos, (Estero Ciego y Don Lino), los volúmenes que se estabilizaron en la playa, son muy similares a los predichos mediante el modelo MPECU2017 y las ecuaciones (Ec.37, Ec.38, Ec.39 y Ec.40) que en base al modelo fueron derivadas.

En el caso de los demás modelos (Dean, 1991 y García, 2005), utilizados a modo de comparación para el análisis, los volúmenes predichos por ambos, se aproximan menos a los volúmenes de arena presentes en ambas playas. El modelo de Dean, sobredimensiona los volúmenes de arena a verter, en tanto, el modelo de García, predice volúmenes de arena inferiores a los necesarios para estabilizar la línea de costa.

Para playas de mayor longitud y ancho de la playa a regenerar, las diferencias en los volúmenes de arena serían mayores, haciendo más notable, el mejor ajuste del modelo MPECU2017 para caracterizar el comportamiento morfodinámico y sedimentario de las playas del litoral nororiental de Cuba. Por ello, el uso de las ecuaciones derivadas de este modelo, contribuirá a un uso óptimo de los volúmenes de arena necesarios en los trabajos de regeneración de playa, así como una mayor efectividad de los vertimientos de arena que se lleven a cabo.

El hecho que las playas tomadas como referencias fueron identificadas como playas con estado morfodinámico reflectivo o intermedio (Don Lino, $\Omega=1$ y Estero Ciego, $\Omega=2$) (Tabla 4.15), que son los estados morfodinámicos más abundantes encontrados en el litoral nororiental, permite asegurar que ambas playas son representativas de las características geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental y también del modelo del perfil de equilibrio de playa que se ha propuesto. Por ello, en adelante se proponen las ecuaciones $h(x)=Ax^{0,58}$ y $A=0,67\omega_s^{0,56}$, para representar el perfil de equilibrio de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba, en vez de las ecuaciones propuestas por Dean (1977) y García (2005).

Además, las ecuaciones de cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playas mediante el vertimiento artificial de arena, quedan ajustadas en sus parámetros (m) y (A), para las playas del litoral nororiental de Cuba, a las consideraciones antes expuestas y que se refieren en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Ecuaciones para el cálculo del volumen de arena requerido en los proyectos de regeneración de playa en el litoral nororiental de Cuba

Tipo de perfil	Volumen
Sumergido	$V = 0,63 \left(\frac{D_c}{A_F} \right)^{2,72} (A_N - A_F)$
No interceptado	$V = WB + 0,63 \left(\frac{D_c}{A_F} \right)^{2,72} \left\{ A_N \left[1 + W \left(\frac{A_F}{D_c} \right)^{1,72} \right]^{1,58} - A_F \right\}$
Interceptado	$V = WB + \frac{0,63 W^{1,58} A_N A_F}{(A_F^{1,72} - A_N^{1,72})^{0,58}}$

Independientemente de los resultados alcanzados y las propuestas realizadas, es muy importante considerar que la alimentación artificial de arena, por si misma, no detiene los procesos de erosión presentes en las playas. Por ello, es necesario eliminar todas las posibles causas de carácter antrópico que pueden incidir en la aparición o intensificación de la erosión en las playas del litoral nororiental. También serán necesarios nuevos enfoques que permitan reducir la exposición y vulnerabilidades de los asentamientos humanos a los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, en el contexto actual de adaptación al cambio climático y de reducción del riesgo de desastres en las playas y la costa en general.

Si bien la regeneración de las playas mediante el aporte externo de arena se ha convertido en la principal solución para mitigar los procesos erosivos en las playas, a largo plazo podría ser una solución no sostenible debido a los daños ecológicos al fondo marino que provocan las extracciones de arena (Ibáñez et al., 2016).

De ahí el hecho que las extracciones de arena en fondos marinos y playas están totalmente prohibidas en Cuba por el Decreto Ley 212/2000 de Gestión de la Zona Costera y las únicas excepciones son como fuente de préstamo para la regeneración de las playas, y

dragados portuarios necesarios para la construcción o mantenimiento de puertos y vías de navegación, en ambos casos, condicionado a un estudio de impacto ambiental.

5.6. Limitaciones materiales, teóricas y metodológicas de la investigación

Una de las principales limitaciones en la investigación fue la falta de imágenes satelitales de calidad adecuada. No en todas las playas fue posible contar con imágenes de alta resolución anterior al año 2009, lo que limitó, entre 7 y 14 años el periodo de análisis de la variabilidad de las líneas litorales en las playas mediante imágenes satelitales.

Además, en la investigación fue necesario el uso de imágenes de Google Earth Pro (CNES/Airbus), en las cuales no es posible establecer las correcciones en función de las mareas, pues las fechas de dichas imágenes son sólo indicativas. Debido a la baja variabilidad de la línea litoral en las playas objetos de estudio, no es posible el uso de imágenes Landsat, pues estas tienen una resolución espacial de 30x30 m, la que resulta insuficiente para el análisis de la línea litoral en las playas del litoral nororiental de Cuba.

Ello determinó que para corroborar los resultados obtenidos mediante las imágenes satelitales fuera necesario el uso de perfiles de playas. Si bien estos perfiles no cubren toda la playa, permiten comprobar la correspondencia o no, de la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación encontrado por ambos métodos en el sitio de análisis.

Por otra parte, la información de oleaje aportada por el *Global Wave Statistics*, si bien es una base estadística de muchos años, es una base de datos de baja resolución para el área de estudio, por lo que los resultados obtenidos mediante ella deben ser considerados aproximados. Ello determinó que fuera necesario llevar a cabo lecturas de la altura de la ola y el periodo, en las 12 playas objeto de estudio, tanto para el verano (2016) como para el invierno (2018).

A pesar de la coincidencia de los datos de oleajes colectados en el terreno con los del *Global Wave Statistics*, los datos colectados en el terreno son datos puntuales que obedecen a las particularidades del clima oceánico en el momento de la toma de los datos,

por lo que será necesario llevar a cabo estudios específicos del oleaje para periodos largos de tiempo que validen el uso seguro de los datos provenientes del *Global Wave Statistics*.

Por otra parte, los resultados del estudio del retroceso de la línea litoral mediante el uso de la regla de Bruun, también deben ser considerados aproximados, por las propias limitaciones del método (modelo bidimensional). Sin embargo, a pesar de los cuestionamiento de la Regla de Bruun muchos son los estudios que la apoyan (ej. Schwartz, 1967; Houston y Dean, 2014; Houston, 2015; Kerans y Cartwright, 2016) o introducen ajustes (ej. Dean y Dalrymple, 2004; Rosati *et al.*, 2013), por lo que la Regla de Bruun sigue siendo un modelo simplificado de amplio uso a escala global.

Además, los datos de ascenso del nivel medio del mar utilizados para la determinación del retroceso de la línea de costa mediante la regla de Bruun, son datos globales y por tanto no son específicos para Cuba. El archipiélago cubano si bien es cierto que está cubierto por una densa red mareográfica, no hay estudios altimétricos que corroboren si los datos reportados por los mareógrafos corresponden a un aumento del nivel del mar, o a procesos neotectónicos o la combinación de ambos. Por eso en Cuba generalmente se usan datos de fuentes internacionales.

En cuanto al experimento de velocidad de caída (ω_s), las aperturas de los tamices siguen la Norma ASTM (*American Society for Testing and Material*) y las muestras fueron tamizadas para distintas aberturas de tamices (0,106; 0,25; 0,425; 0,84 y 2,0 mm), por lo que hay ligeras diferencias en los rangos de apertura de los tamices en unidades logarítmicas.

Sin embargo, los resultados de esta investigación coinciden con los obtenidos por Cuttler et al. (2016), quien llevó a cabo el estudio de la velocidad de caída de arena por difracción laser y aseguró intervalos uniformes en unidades logarítmicas. En ambos casos hay una clara tendencia a aumentar la velocidad de caída en la medida que aumenta el tamaño del grano y una desaceleración de dicha velocidad en la medida que el grano se hace más grande.

El gran número de ensayos realizados en el experimento de velocidad de caída como parte de esta investigación (85-198 en dependencia de la fracción) les agregan una mayor certeza a los resultados, siendo una de las razones fundamentales de la coincidencia de los resultados entre ambos estudios, aunque se hallan usado métodos diferentes.

En cuanto a la determinación del estado morfodinámico modal de las playas, sólo fue posible la determinación del parámetro adimensional (Ω) en 12 playas, lo cual resulta insuficiente para arribar a estudios concluyentes. Para solventar esta deficiencia se realizó la identificación de las geo-formas características en 54 playas, tanto en verano, como en invierno, existiendo coincidencia en los resultados obtenidos por ambos métodos y confirmando los resultados obtenidos mediante el cálculo del parámetro adimensional (Ω).

Sin embargo, debido a la ausencia de otros estudios similares en el archipiélago cubano resulta conveniente replicar el estudio en otros sectores, con vistas a confirmar esta condición para la generalidad de las playas cubanas.

Finalmente, es importante considerar que las investigaciones de morfodinámica y perfil de equilibrio de playas son estudios que requieren periodos largos de tiempo, siendo insuficiente los dos años con que se cuenta para llevar a cabo estos estudios. De ahí el hecho del uso de varios métodos para respaldar los resultados de la investigación, así como el uso de información obtenida por el investigador en momentos anteriores a la misma.

VI. CONCLUSIONES

El litoral nororiental de Cuba, como las playas que allí se localizan, tienen un grupo de rasgos geomorfológicos, hidrodinámicos y sedimentarios que las distinguen del resto de las playas del archipiélago cubano. La ausencia o estrechez de la plataforma marina es la característica geomorfológica más importante que distingue al litoral nororiental, y constituye un elemento esencial que contribuye a la diferenciación espacial, en muchos aspectos, de este sector de costa respecto a cualquier otro sector del archipiélago cubano.

Esta característica determina la existencia de perfiles costeros de pendiente abrupta en la plataforma marina y la existencia de muy pequeñas áreas de producción de sedimentos por parte de los organismos marinos, por lo que las playas allí presentes son generalmente de poca extensión y su existencia está ligada a los arrecifes de corales que le protegen de los oleajes de mayor energía y que a la vez le suministran sus sedimentos.

Hay un predominio de playas constituidas por sedimentos biogénicos y tienen la singularidad de estar compuestas por restos de moluscos y corales, en proporciones más altas a las encontradas en el resto de las playas del archipiélago cubano y mucho menos cantidad de restos de algas calcáreas.

En este litoral se registran las mayores alturas de ola de la costa norte de Cuba y también las mayores amplitudes de marea de todo el archipiélago cubano, lo cual obedece también a la estrechez de la plataforma insular y su exposición directa al oleaje del océano Atlántico.

La densa red fluvial existente hacia el extremo Este del litoral nororiental, donde desembocan algunos de los ríos más caudalosos de Cuba (ej. ríos Toa, Duava y Miel), determina un aumento significativo de las playas constituidas por arenas terrígenas hacia esta porción de costa, a diferencia de lo que ocurre en el resto del litoral nororiental.

El estudio de los procesos de erosión - sedimentación, usando imágenes satelitales y perfiles de playa, evidenció que el 50% de las playas biogénicas tienen una tendencia erosiva, aunque predominan los procesos erosivos con magnitudes inferiores a 1,2 m/año

y sólo, de manera puntual, en algunos sectores de playa, aparece “fuerte erosión” ($\geq 1,2\text{m/año}$). Estos resultados son inferiores a los reportados por otros investigadores, en periodos anteriores, tanto para Cuba, como para el litoral nororiental.

Las evidencias erosivas más recurrentes encontradas en la mayoría de las playas fueron la existencia de afloramientos rocosos en la zona intermareal, la presencia de escarpes en la berma y base de la duna, así como la presencia de tocones de árboles derribados en la cara de la playa. Entre las posibles causas se señalan las particularidades del régimen hidrodinámico, los efectos de los huracanes y tormentas tropicales, así como el aumento del nivel del mar provocado por el cambio climático global.

La disminución del número de frentes fríos que llegan al litoral nororiental, determina la permanente acumulación de arena en las porciones occidentales de las playas, a expensas de erosión en las porciones más orientales, razón por la cual ha sido identificado como una de las posibles causas que genera la erosión en las playas.

Los eventos ENOS podrían tener un efecto positivo en el balance sedimentario de las playas del litoral nororiental pues favorecen el incremento del número de frentes fríos que llegan a Cuba y con ello el retorno de las arenas a las porciones orientales, que de otra manera no retornarían nunca a la playa.

Hay una tendencia al aumento de la recurrencia de eventos extremos durante los últimos 39 años, particularmente huracanes y tormentas tropicales. Por ello, los huracanes y tormentas tropicales han sido identificados como los responsables de las mayores afectaciones por erosión en las playas del litoral nororiental, debido a los fuertes oleajes que generan estos eventos.

Como consecuencia del incremento del nivel medio del mar, provocado por el cambio climático global, las playas del litoral nororiental podrían retroceder, como promedio, $0,16\text{m/año}$. Con este pronóstico, para el año 2100 se habrán perdido el 4% de las playas de este litoral y se reduciría significativamente el ancho del 20% de las demás playas. Ello requerirá de nuevos enfoques dirigidos a eliminar las causas, de origen antrópico que

genera erosión y de medidas dirigidas a disminuir la exposición y vulnerabilidades de las instalaciones turísticas y los asentamientos humanos.

Estos resultados permiten considerar que las condiciones geográficas, la geomorfología y las condiciones climáticas del litoral nororiental de Cuba, inciden directamente en el comportamiento morfodinámico de las playas, debido a los efectos que generan las tormentas tropicales, los huracanes, los eventos ENOS y el incremento del nivel del mar en estas playas, confirmado unas de las hipótesis de la investigación.

Sin embargo, aun cuando se eliminen las causas de origen natural que generan erosión en las playas, parte de los agentes erosivos presentes, no podrán ser eliminados por responder fundamentalmente a fenómenos naturales, lo que requerirá de trabajos de regeneración de playas para asegurar adecuados estándares de calidad, exigidos por la actividad turística de sol y playa en Cuba.

El análisis comparativo de cuatro modelos de perfiles de equilibrio, dos de ellos desarrollados para caso específicos de playas cubanas (Tristá, 2003 y García, 2005), evidencian que ninguno de los modelos existentes representa adecuadamente a las playas biogénicas del litoral nororiental.

El uso de la regeneración de playas, para contrarrestar los efectos de la erosión en las playas del litoral nororiental de Cuba, requirió de la definición de un nuevo modelo numérico predictivo de perfil de equilibrio, ajustado a las características de las playas de este litoral. Este nuevo modelo de perfil de equilibrio propuesto (MPECU2017), permitió ajustar las ecuaciones de cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playa, en función de las características y particularidades geomorfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas del litoral nororiental.

Por ello, en adelante, se sugiere considerarse los valores de (A) y (m) encontrados en este estudio, así como el nuevo modelo de perfil de equilibrio obtenido como parte de esta investigación, cuyas expresiones se refieren a continuación.

Modelo MPECU2017

$$h(x) = Ax^{0,58}$$

Donde:

$$A = 0,67\omega_s^{0,56}$$

$h(x)$, profundidad a una distancia (x) de la línea litoral

La determinación del estado morfodinámico de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba, atendiendo al parámetro adimensional (Ω) demuestra que las playas de este litoral, tienden a ser de tipo intermedio (83%), y los 17% restantes corresponden a estado modal reflectivo, no existiendo ningún caso de estado modal disipativo. Por ello, no es posible extrapolar las ecuaciones del cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playa derivadas de la función $h(y)=Ay^{2/3}$, propuesta por Dean (1977, 1991), pues su modelo es aplicable sólo a playas disipativas.

Estos elementos demuestran que las particularidades hidrodinámicas y la granulometría y composición genética de los sedimentos inciden directamente en el comportamiento del estado morfodinámico modal de las playas, confirmando otra de las hipótesis de la investigación.

El análisis del comportamiento de los volúmenes de arena vertidos en las playas Estero Ciego y Don Lino, como parte de los proyectos de regeneración de playas, considerando tres modelos (Dean, 1991; García, 2005; MPECU2017), mostró que las ecuaciones de cálculo ajustados en sus parámetros (A) y (m) al modelo MPECU2017, reflejan con mayor precisión y objetividad el comportamiento experimentado por las playas Don Lino y Estero Ciego, validando la utilización del parámetro $m=0,58$ y un valor de $A=0,67\omega_s^{0,56}$, para representar el perfil de equilibrio en las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba, con estados modales reflectivo e intermedio.

En el caso de los demás modelos (Dean, 1991 y García, 2005), los volúmenes predichos por las ecuaciones derivadas de ambos modelos, se aproximan menos a los volúmenes de

arena presentes en ambas playas. El modelo de Dean, sobredimensiona los volúmenes de arena a verter, en tanto, el modelo de García, predice volúmenes de arena inferiores a los necesarios para estabilizar la línea de costa.

Los resultados confirman que, el ajuste de los modelos de perfil de equilibrio de Dean 1991 y García 2003, a las características morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias y el estado morfodinámico modal de las playas del litoral nororiental, permite obtener un modelo que describe adecuadamente el funcionamiento morfodinámico de las playas del litoral nororiental de Cuba, como sustento teórico de los trabajos para el control de la erosión en dichas playas, confirmando otra de la hipótesis de la investigación.

Además, estos resultados mejoran el conocimiento científico de los procesos costeros en el litoral nororiental cubano, a la vez que ofrecen criterios útiles para el manejo y uso sostenible de las playas allí presentes.

VII. RECOMENDACIONES

Independiente de los resultados alcanzados, es importante considerar que la regeneración de playas, por si misma, no detiene los procesos de erosión natural presentes en las playas del litoral nororiental. Ello requerirá de nuevos enfoques que permitan reducir la exposición y vulnerabilidades de las instalaciones turísticas y asentamientos humanos a los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, en el contexto actual de adaptación al cambio climático global. Es necesario además eliminar todas posibles las causas, de origen antrópico, que genera erosión en las playas.

Teniendo en cuenta el predominio de fragmentos de moluscos, foraminíferos y corales en las arenas de las playas del litoral nororiental, es necesario considerar esta particularidad en la elección de los sedimentos de préstamos en los trabajos de regeneración de playas. En lo adelante, no sólo deberá considerarse la similitud en la granulometría media y el color de las arenas, sino también la similitud en la composición genética de los sedimentos de préstamo.

Por otra parte, se propone el uso de *End Point Rate* de la aplicación DSAS en el estudio de la erosión de las playas cubanas, por ser una opción de análisis rápido fiable, que permite obtener una visión espacial de los procesos de erosión - acreción en las playas y sectores de costa cubano. Además, se recomienda mantener y ampliar la red de monitoreo mediante perfiles de playa, así como la toma de muestras de sedimentos, actualizando periódicamente la información sobre el registro de las playas cubanas, de manera tal que facilite los procesos de toma de decisión.

Considerando que las playas del litoral nororiental tienden más a estados morfodinámicos modales reflectivos que disipativos, se recomienda también replicar el estudio en otros sectores del archipiélago cubano, con vistas a confirmar esta condición para la generalidad de las playas cubanas.

Los resultados alcanzados en la comprobación del modelo MPECU2017 y ecuaciones derivadas de él, en dos proyectos de regeneración de playas (Don Lino y Estero Ciego),

permite recomendar, en lo adelante, el nuevo modelo de perfil de equilibrio, cuyas expresiones fueron referidas con anterioridad, para describir el comportamiento del perfil de equilibrio en playas biogénicas del litoral nororiental, en vez de las formulaciones que hasta el momento se venían utilizando.

Así mismo, se propone el uso de las nuevas ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los proyectos de regeneración de playas (Ec. 37, Ec.38, Ec.39 y Ec.40) y desechar el uso del factor de sobre relleno (Ra), que hasta el momento de venía utilizando para estimar las pérdidas, en función de las diferencias entre las arenas nativas (A_N) y de préstamo (A_F).

Sería conveniente además comprobar estos resultados en otros sectores de costa del archipiélago cubano en vistas a la posible extrapolación y generalización de los resultados obtenidos en esta investigación.

Asimismo, se sugiere entender la red de monitoreo mediante perfiles de playas y realizar estudios de la variabilidad de las líneas litorales mediante el uso de ambos métodos para corroborar, mediante otros estudios, las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Aedlaa, R., Dwarakish, G., Reddyc, D.V. (2015). Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-Gurpur Rivermouth Using Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques. *Aquatic Procedia*, 4; 563-570.
- Alcolado, P.M. (2010). El cambio climático y los arrecifes coralinos del Gran Caribe y Cuba En: A. Hernández-Zanuy y Alcolado P.M. (Eds). 2010. *La Biodiversidad en ecosistemas marinos y costeros del litoral de Iberoamérica y el cambio climático*. La Habana, Cuba: Memorias del Primer Taller de la Red CYTED BIODIVMAR.
- Aldana, P.G., Ramírez, A., Godínez, L., Cruz, S., y Suarez, A. (2009). Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 20; 41-56. Colombia.
- AMA: Agencia de Medio Ambiente (2014). *Cuba y El Cambio Climático*. La Habana, Cuba: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 49pp.
- ASTM: American Society for Testing Materials (1999). *Annual Book of ASTM Standards. Normas D-422-98 y D-854-92*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- Aragónés, L., Serra, J.C., Villacampa, Y., Saval, J.M., y Tinoco, H. (2016). New methodology for describing the equilibrium beach profile applied to the Valencia's beaches. *Geomorphology*, 259; 1-11.
- Arango, E., Pérez, M., Ávila, L., y Batista, J. (2015). *Nueva valoración sismo tectónica de la región oriental de Cuba en el contexto geodinámica del norte del Caribe*. Memorias de la Sexta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2015. La Habana, Cuba, 18pp.
- Barnard, P.L., Short, A.D., y Harley, M.D., Splinter, K.D., Vitousek, S., Turner, I.L., Allan, J., Banno, M., Bryan, K.R., Doria, A., Hansen, J.E., Kato, S., Kuriyama, Y., Randall-Goodwin, E., Ruggiero, P., Walker, I.J., y Heathfield, D.K. (2015). Coastal

- vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Geoscience*, 8; 801-807.
- Bernabeu, A. M., Medina, R., y Vidal, C. (2003). Wave reflection on natural beaches: an equilibrium beach profile model. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 57; 577-585.
- Benedet, L., Finkl, C., Campbell, T., y Klein A. (2004a). Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment. *Coastal Engineering*, 51; 839-861.
- Benedet, L., Klein, A., y Hsu, J. (2004b). Practical insights and applicability of empirical bay shape equations. Proceeding 29th International Conference on Coastal Engineering. *American Society of Civil Engineer*, 2; 2181-2193.
- Benavente, J., Gracia, J., Del Río, L., Anfuso, G., y Rodríguez-Ramírez, A. (2015). Caracterización morfodinámica de las playas españolas del Golfo de Cádiz. *Boletín Geológico y Minero*, 126(2-3); 409-426.
- Bernabeu, M., Medina, R., y Vidal, C. (2002). Efecto de la reflexión sobre la forma de equilibrio del perfil de playa: Validación para la costa de la Península Ibérica. *Revista C&G.*, 16(1-4); 83-95.
- Bernabeu, M., Muñoz, J., y Medina, R. (2002). Influence of a rocky platform in the profile morphology: Victoria beach, Cadiz (Spain). *Ciencias Marinas*, 28(2); 181-192.
- Bernabeu, M., Medina, R., y Vidal, C. (2003). Wave reflection on natural beaches: An equilibrium beach profile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57; 577-585.
- Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: An Introduction* (Second Edition). England: John Wiley y Sons Ltd.
- Bird E., Lewis N. (2015). Causes of Beach Erosion. In: *Beach Renourishment*. New York, USA: Springer Briefs in Earth Sciences. Springer.

- Blott, S.J., y Kenneth, P. (2001). GRADISTAT: A grain size distribution and statistics Package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26; 1237-1248.
- Boak, E.H., y Turner, I.L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21 (4); 688–703.
- Bodge, R. (1992). Representing equilibrium profiles with an exponential expression. *Journal of Coastal Research*, 8; 47-55.
- Boon, D., y Green, O. (1989). Caribbean beach face slopes and beach equilibrium modes. Proceeding 21 Coastal Engineering Conferences, *American Society of Civil Engineer*: 1618-1630.
- British Maritime Technology Limited (1986). *Global wave statistics*. Unwin Brothers, London, 661 p.
- Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board, Technical memorandum 44. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88; 117-130.
- Bruun, P. (1988). The Bruun Rule of Shore Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion on Large-Scale Two and Three-Dimensional Usage. *Journal of Coastal Research*, 4 (4); 627-648; Charlottesville.
- Cabrera, M. (2011). Los depósitos cuaternarios del territorio marino de Cuba. *Minería y Geología*, 27; 2-25.
- Camacho, V. (2003). *Características morfodinámicas y texturales de los depósitos eólicos de Cabo Falso, Baja California Sur, México*. Tesis (Maestro en Ciencias Marinas, con especialidad en manejo de recursos marinos) México. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.

- Canteras J.C. Pérez, L., Cantera, E., Soler, M., Carralimos, C.I. (1995). Proyectos y Construcción de Playas Artificiales y Regeneración de Playas. Impacto Ambiental. *Ingeniería del Agua*, 2; 223-243, Cantabria.
- Carranza-Edwards, A. (2010). Causas y consecuencias de la erosión de playas. In: a. Yáñez-Arancibia (ed.). *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*. México: Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- CESAM (2009). *Comportamiento morfodinámico del perfil de playas en el subarchipiélago Sabana*. Informe técnico. CESAM-CITMA, Villa Clara, 31pp.
- CEPAL (2018). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Metodologías y herramientas para la evaluación de impactos de la inundación y la erosión por efecto del cambio climático*, CEPAL, 59 p.
- Cheng, N.S. (1997). A simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(2); 149-152.
- Chiva, L., Pagán, J.I., López, I., Tenza-Abril, A.J., Aragonés, L., y Sánchez, I. (2018). The effects of sediment used in beach nourishment: Study case El Portet de Moraira beach. *Science of the Total Environment*, 628-629; 64-73.
- CITMA: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (2017). Un 82 % de las playas de Cuba sufre erosión. La Habana, Cuba. <https://www.cubaencuentro.com/cuba/noticias/un-82-de-las-playas-de-cuba-sufre-erosion-329543>.
- Coco, G., Senechal, N., Rejas, A., Bryan, K. R., Capo, S., Parisot, J. P., y MacMahan, J. (2014). Beach response to a sequence of extreme storms. *Geomorphology*, 204; 493-501.
- Conde-Álvarez, C. y Saldaña-Zorrilla, S. O. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe: Impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y Desarrollo*, 23; 23-30.

- Cooper, J.A., Leggett, D.J., y Lowe, J.P. (2000). Beach-profile measurement, theory and analysis: practical guidance and applied case studies. *Water and Environmental Journal*, 14(2); 79-88.
- Cooper, J.A., y Pilkey, O.H. (2004). Sea-level Rise and Shoreline Retreat: Time to Abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43(3); 157-171.
- Córdova, E. (2003). *Monitoreo de los elementos geomorfológicos del perfil de Playa Guardalavaca en el polo turístico de la provincia de Holguín*. Memorias del VI Congreso de Ciencias del Mar. PALCO, La Habana.
- Córdova, E., Ocaña, F., y González, P. (2005). *Monitoreo morfodinámico y biomonitoreo del macrofitobentos de Playa Yuraguana*. CISAT-CITMA, Holguín, 19pp.
- Córdova, E. (2016). *Comportamiento morfodinámico del perfil de playas en el litoral de Holguín entre el año 2000 y 2015*. Informe técnico. CISAT-CITMA, Holguín, 98pp.
- Cotilla, M., Bankwitz, P., Franzke, H.J., Álvarez, L., González, E., Díaz, J.L., Grunthal, G., Pilarski, J., y Arteaga, F. (1996). Una valoración sismotectónica de Cuba, *Revista Geofísica. IPGH*, 45; 145-179.
- Coelho, C., y Veloso, F. (2004). Cross-Shore Beach Profile Models-Application to Aveiro Coast. *Journal of Coastal Research*, SI 39; 345 - 350.
- Cordobés, J.M., y Rodríguez, R. (2014). Relación entre la Forma y la Velocidad de Caída de las Arenas Playa Varadero, República de Cuba. Wordpress. <https://josecordovez.files.wordpress.com/2014/12/velocidad-de-caida-varadero.pdf>
- Cowell, J., Hanslow, J., y Meleo, F. (1999). The Shoreface. In Short, A. (ed.), *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Sydney, Australia: University of Sydney, 9-71.
- Cuttler, M.V.E., Lowe, R.J., Falter, J.L. y Buscombe, D. (2016). Estimating the settling velocity of bioclastic sediment using common grain-size analysis techniques. *Sedimentology*, 1-19. Doi: 10.1111/sed.12338.

- Dean, R. G. (1974). Compatibility of borrow material for beach fills. *Proceedings, 14th International Conference on Coastal Engineering*, American Society of Civil Engineers, 1319-1333.
- Dean, R.G. (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Department of Civil Engineering, *Ocean Engineering Report*, 12, University of Delaware, Newark.
- Dean, R.G. (1987). *Coastal sediments processes: Toward engineering solutions*. Proceeding Specialty Conference on Coastal Sediments'87, New Orleans. USA.
- Dean, R.G. (1991). Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7; 53-84.
- Dean, R.G. (2000). *Beach Nourishment Design: Consideration of Sediment Characteristics*. UFL/COEL-2000/002, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville, FL.
- Dean, R.G. (2003). Beach nourishment: theory and practice. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 18; 21-70.
- Dean, R.G., y Dalrymple, R. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Dean, R.G., y Houston, J.R. (2016). Determining shoreline response to sea level rise. *Coastal Engineering*, 114; 1-8.
- Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D.S., Schlacher, T. A., Dugan, J.; Jones, A., y Scapini, F. (2009). Threats to sandy beach ecosystems: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 8(1); 1-12.
- Derruau, M. (1970). *Geomorfología*. España: Ediciones Ariel, S. A. Barcelona.
- Fernández, W. y Ramírez, P. (1991). El Niño, la Oscilación del Sur y sus efectos en Costa Rica: una revisión. *Tecnología en Marcha*, 11(1); 3-10.
- Folk, R. (1966). A review of grain-size parameters. *Sedimentology*, 6; 73-93.

- Freeman, A., Martínez, N., Rodríguez, R., y Lancho, P. (1997). *Proyecto ejecutivo para la regeneración de Playa Estero Ciego*. GEOCUBA-ICH. 18pp.
- Galster, R., y Schwartz, M. (1990). Ediz Hook: A case history of coastal erosion and rehabilitation. *Journal of Coastal Research, (Special Issue)*; 103-113.
- Garau, C. (1996). El concepto de perfil de equilibrio del frente de playa: una revisión crítica. *Revista de Obras Públicas* 143(3357); 43-56.
- García, C. (2005). *Actuaciones para el control de la erosión en playas biogénicas. El caso de la playa de Varadero*. Tesis (Doctor en Ciencias Geográficas) Cuba. Universidad de La Habana.
- GEOCUBA Estudios Marinos (2001). *Línea base abiótica del tramo costero Bahía de Banes-Bahía de Tánamo*. La Habana, 102 h.
- GEOCUBA Estudios Marinos (2002). *Línea base abiótica marina de los principales parámetros oceanográficos en el sector costero Bahía de Mata –Punta Maisí*. La Habana, 91 h.
- Gibbs, R.J., Mathews, M.D., y Link, D.A. (1971). The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44(1); 7-18.
- Gregory, K., y Goudie, A. (2011). *The SAGE Handbook of Geomorphology*. USA. SAGE Publication Inc. California.
- González, M., Medina, R. y Losada, M. (1999). Equilibrium beach profile model for perched beaches. *Coastal Engineering*, 36; 343-357.
- González, M. y Medina, R. (2001). On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. *Coastal Engineering*, 43; 209-225.
- González, M., Medina, R. y Losada, M. (2010). On the design of beach nourishment projects using static equilibrium concepts: Application to the Spanish coast. *Coastal Engineering*, 57(2); 227-240.

- Goudie, A. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. London and New York: Routledge, 1156p.
- Goulart, A. (2003). *Sandy Beach Morphodynamics and Macrobenthic on Sandy Beach Morphodynamics and Macrobenthic Communities in Temperate, Subtropical and Tropical Regions - A Macroecological Approach*. Thesis on option of the Degree of Philosophiae Doctor in the Faculty of Science at The University of Port Elizabeth, South Africa; 171pp.
- Guido, P., Ramírez, A., Godínez, L., y Cruz, S. (2009). Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 20; 41-56.
- Guilcher, A. (1957). *Morfología Litoral y Submarina*. Barcelona, España: Ediciones Omega S. A. 274pp.
- Guillén, J. (2015). Geología de la zona litoral. *Marine Geosciences*, Institute of Marine Sciences-Barcelona. <http://ww2.icm.csic.es/gma/es/content/geologia-del-litoral>.
- Hallermeier, R.J. (1981). Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. *Sedimentology*, 28; 859-865.
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H.H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., y Spanhoffh, R. (2002). Beach nourishment projects, practices, and objectives a European overview. *Coastal Engineering*, 47; 81-111.
- Harley, C., y Hughes, A.R. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9(2); 228-241.
- Hattersley, R., y Foster, N. (1968). Problems of beach erosion and some solutions. *Australian Civil Engineering*, 9; 1-14.
- Hegge, B., Eliot, I., y Hsu, J. (1996). Sheltered sandy beaches of Southwestern Australia. *Journal of Coastal Research*, 12(3); 748-760.

- Hernández, B. (2002). El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y los frentes fríos que arriban a la región occidental de Cuba. *Investigaciones Marinas*, 3(2); 3-19. Valparaíso.
- Houston, J.R., y Dean, R.G. (2014). Shoreline change on the east coast of Florida. *Journal of Coastal Research*, 30(4); 647-660. Florida.
- Houston, J.R. y Dean, R.G. (2016). Erosional Impacts of Modified Inlets, Beach Encroachment, and Beach Nourishment on the East Coast of Florida. *Journal of Coastal Research*, 32(2); 227-240. Florida.
- Houston, J.R. (2015). Shoreline Response to Sea-Level Rise on the Southwest Coast of Florida. *Journal of Coastal Research*, 31(4); 777-789. Florida.
- Hsu, J., Yu, J., Lee, C., y Benedet, L. (2010). Static bay beach concept for scientists and engineers: A review. *Coastal Engineering*, 57; 76-91.
- Ibáñez, M., Rojas, M. y London, S. (2016). Servicios ecosistémicos del estuario de Bahía Blanca y el conflicto del dragado. *Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica*, 26; 59-71.
- INSMET: Instituto de Meteorología de Cuba (2005). *Resumen de Temporada ciclónica de 2005 en el Atlántico Norte*. La Habana. Cuba.: Instituto de Meteorología. Consultado Noviembre, 11, 2015. <http://www.met.inf.cu/>
- INSMET: Instituto de Meteorología de Cuba (2017). *El Clima de Cuba. Características generales*. La Habana. Cuba.: Instituto de Meteorología. Consultado diciembre 16, 2017. <http://www.met.inf.cu/>
- Instituto Mundial de Recursos (2010). *Análisis Piloto de los Ecosistemas del Mundo* Washington, D.C. USA.
- Ionin, A., Pavlidis, Y., y Delgado, R. (1972a). Geomorfología Litoral de la Costa Nordeste de Cuba. *Serie Oceanológica*, 11. IDO. La Habana.

- Ionin, A., Pavlidis, Y., y Avello, O. (1972b). Relieve de la Zona Costera y Sedimentos del Fondo de la Costa Norte en la Región del Archipiélago Sabana-Camagüey. *Serie Oceanológica*, 12. IDO. La Habana.
- Ionin, A., Pavlidis, Y., y Abello, O. (1977). *Geología de la plataforma marina insular de Cuba*. Moscú, URSS: Nauka.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*. Geneva, Switzerland: OMM, PNUMA. 114pp.
- IPCC (2012). *Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Informe de síntesis*. Geneva, Switzerland: OMM, PNUMA. 32pp.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland.: Pachauri, R.K. and Meyer, L.A., 151pp.
- Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G., y del Rio, L. (2005). Geological control of beach morphodynamic state. *Marine Geology*, 216(4); 297-314.
- James, R. (1975). Techniques in evaluating suitability of borrow material for beach nourishment. *Technical Memorandum, 60, Coastal Engineering Research Center*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- James, R. (2000). From beaches to beach environments: Linking the ecology, human-use and management of beaches in Australia. *Ocean y Coastal Management*, (43); 495-514.
- Johnson, W. (1919). *Shore Processes and Shoreline Development*. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc., 584pp.
- Juanes, J.L., Ramírez, E., y Medviedev V.S. (1984). Dinámica de los sedimentos en la Península de Hicacos, Cuba. (I). Variaciones morfológicas del perfil de playa, *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 10; 69-84.

- Juanes, J.L., Ramírez, E., y Medviedev V.S. (1985). Dinámica de los sedimentos en la Península de Hicacos, Cuba. (II). Efecto de las olas de viento en la zona costera, *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 11; 93-101.
- Juanes, J.L. (1996). *La Erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control*. 108p., Tesis (Doctor en Ciencias Geográficas) Cuba. Universidad de La Habana.
- Karasu, S., Work, P.A., Uzlu, E., Kankal, M., y Yuksek, O. (2016). Beach nourishment alternative assessment to constrain cross-shore and longshore sediment transport. *Applied Ocean Research*, 59; 459-471.
- Kerans, A., y Cartwright, N. (2016). Testing versions of the Bruun rule for low energy macro-tidal tropical beaches against a theoretical late Holocene sea-level high stand and beach ridge evidence of late Holocene beach faces. *Journal of Coastal Research*, SI (75); 740-744.
- Keulegan, G., y Khumbein, W. (1949). Stable configuration of bottom slope in a shallow sea and its bearing on geological processes. *Transactions American Geophysical Union*, 30(6): 855-861.
- Komar, P., y Gaughan, K. (1972). Airy wave theory and breaker height prediction. Proceeding 13th Conference on Coastal Engineering, *American Society of Civil Engineer*; 405-418.
- Komar, P. (1976). *Beach Processes and Sedimentations*. New Jersey, USA: Prentice Hall. 429pp.
- Komar, P., y Reimers, C. (1978). Grain shape effects on settling rates. *Journal of Geology*, 86; 193-209.
- Komar, P., y Baba, J. (1984). Grain-size analyses of mica within sediments and the hydraulic equivalence of Mica and Quartz. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54; 1379-1391.

- Komar, P., y Clemens, K. (1986). The relationship between a grain's settling velocity and threshold of motion under unidirectional currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56; 258-266.
- Komar, P., y McDougal, G. (1994). The analysis of exponential beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 10; 59-69.
- Kotvojs, F.K., y Cowell, P.J. (1989). Refinement of the Dean Profile Model for Beach Design. In: *Ninth Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering*. Adelaide, Australia.
- Kraus, N., Larson, M., y Kriebel, D. (1991). Evaluation of beach erosion and accretion predictors. Proceedings of Coastal Sediments '91, *American Society of Civil Engineer*; 572-587.
- Kriebel, D.L., Kraus, N.C., y Larson, M. (1991). Engineering methods for predicting beach profile response. Proceedings of Coastal Sediments '91, *American Society of Civil Engineer*; 557-571.
- Krumbein, W. C. (1957). A method for specification of sand for beach fills. *Technical Memorandum 102, U.S. Army Corps of Engineers*, Beach Erosion Board, Washington, DC.
- Krumbein, W. C., y James, R. (1965). Spacial and temporal variations in geometric and material properties of a natural beach. *Technical Report 44, Coastal Engineering Research Center*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Larson, M. (1991). Equilibrium profile of a beach with varying grain size. Proceeding of Coastal Sediments '91, *American Society of Civil Engineer*; 905-919.
- Le Cozannet, G., Garcin, M., Yates, M., Idier, D., Meyssignac, B. (2014). Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. *Earth-Science Reviews*, 138; 47-60.
- Leonard, L., Dixon, K.L., y Pilkey, O.H. (1990). A comparison of beach replenishment on the U.S. Atlantic, Pacific and Gulf Coasts. *Journal of Coastal Research*, 6; 127-140.

- Leontiev, O.K. (1985). Sediment transport and beach equilibrium profile. *Journal of Coastal Engineering*, 9; 277-291.
- Lizárraga, R., Martínez, A., Delgado, O., Torres, C.R., y Galindo, L. A. (2007). Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 33(3), 259-269.
- Ludka, B.C., Guza, R.T., y O'Reilly, W.C. (2018). Nourishment evolution and impacts at four southern California beaches: A sand volume analysis. *Journal of Coastal Engineering*, 136; 96-105.
- MacLachlan, A., Defeo, O., Jaramillo, E., y Short, A. (2013). Sandy beach conservation and recreation: guidelines for optimising management strategies for multi-purpose use. *Ocean and coastal management*, 71; 256-268.
- MacLachlan, A., y Defeo, O. (2017). *The Ecology of Sandy Shores*. (3rd Edition). London, United Kingdom, Elsevier. 572pp.
- Mahabot, M.-M., Pennober, G., Suanez, S., Troadec, R., y Delacourt, C. (2017). Effect of tropical cyclones on short-term evolution of carbonate sandy beaches on Reunion Island, Indian Ocean. *Journal of Coastal Research*, 33(4); 839-853.
- Maiklem, W.R. (1968). Some hydraulic properties of bioclastic carbonate grains. *Sedimentology*, 10; 101-109.
- Martell, R., Mendoza, E., Mariño, I., Silva, R., Escalante, C. (2012). Impactos de corto plazo del huracán Dean sobre la morfología de la playa de Cancún, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(4); 89-111.
- Martínez, N., Rodríguez, R., y Freeman, A. (1995). *Comportamiento morfodinámico de la playa Estero Ciego, Rafael Freyre*. Memorias del III Congreso de Ciencias del Mar, PALCO, La Habana.
- Martínez, N., Rodríguez, R., Freeman, D., Alfaro, D., y Lancho, P. (1996). *Regeneración del sector costero Don Lino, Holguín*. Informe científico técnico. Instituto Cubano de Hidrografía. Holguín, 131pp.

- Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., y Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?. *Ocean & Coastal Management*, 156; 141-155.
- Masselink, G. y Short, A. (1993). The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model. *Journal of Coastal Research*, 9; 785-800.
- Masselink, G. y Russell P. (2013). Impacts of Climate Change on Coastal Erosion. *MCCIP Science Review*; 71-86. Plymouth University, UK.
- Medina, R., Vidal, C., y González, M. (2001). Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio. *Física de la Tierra*, 13: 95-117
- Mendel, J. (1995). *Lessons in Estimation Theory for Signal Processing, Communications and Control*. (2nd Edition). New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Merlotto, A., Ricardo, G., y Piccolo, M. (2013). Morphodynamic classification of beaches in Necochea. *Ciencias Marinas*, 39(4): 331-347.
- MINTUR: Ministerio de Turismo de Cuba (2015). *Cuba reconoce valor del turismo en economía nacional*. La Habana, Cuba: Juventud Rebelde. Consultado noviembre 11, 2015. <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2015-09-27>
- Moore, B. (1982). Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height. Thesis (Master Science) USA. University of Delaware.
- Morang, A., y Melton, J. (2001). *Beach erosion and sediment processes study, North East Marina, Erie County, Pennsylvania*. Pittsburgh. U.S. Army Engineer Research and Development Center, 122pp.
- Morang, A., y Parson, L. (2002). Coastal Morphodynamics. In Morang, A. (ed.), *Coastal Engineering Manual, Part IV, Coastal Geology, Chapter IV-3, Engineer Manual 1110-2-1100*, Washington, D.C. USA. Army Corps of Engineers.

- Morton, R.A., y Sallenger, A.H. (2003). Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers. *Journal of Coastal Research*, 19(3); 560-573. Florida.
- Moreno, L., y Kraus, N. (1999). Equilibrium Shape of Headland-bay Beaches for Engineering Design. Proceedings, coastal sediments '99, *American Society of Civil Engineer*; 860-875.
- Muehe, D. (1998). Beach morphodynamic state at the moment of observation: an alternative for identification. *Revista Brasileña de Oceanografía*, 46(2); 157-169.
- Muñoz, J.J., López, B., Gutiérrez, J.M., y Cuenca, G.J. (2000). La Regeneración de Playas en el Golfo de Cádiz. Un Coste Asumible y Sostenible. *Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil*, 3(199); 23-28.
- Nicholls, R.J., y Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985); 17-20.
- NOAA (2017). *Extremely active 2017 Atlantic hurricane season finally ends*. Maryland, USA.: <http://www.noaa.gov/media-release/extremely-active-2017-atlantic-hurricane-season-finally-ends>.
- NOAA (2018). *Tropical Cyclone Reports*. Maryland, USA.: National Hurricane Center. <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/>.
- Núñez-Jiménez, A. (1982). *Cuba: La naturaleza y el hombre. El Archipiélago*. La Habana, Cuba: Editorial Letras Cubanas.
- Núñez-Jiménez, A. (1984). *Cuba: La naturaleza y el hombre. Bojeo*. La Habana, Cuba: Editorial Letras Cubanas.
- ONU (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. New York, USA: Naciones Unidas. 247 pp.
- Orbera, L. (1989). *Geología de Cuba*. La Habana.: Nuevo Atlas Nacional de Cuba.

- Ortega, L., Celentano, E., Finkl, C., y Defeo, O. (2013). Effects of climate variability on the morphodynamics of Uruguayan sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, 29(4); 747-755.
- Ozkan–Haller, T., y Brundidge, S. (2004). *Equilibrium beach profiles for Delaware beaches and the effects of the gravity term*. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University. USA.
- Palafox, A. y Gutiérrez, A. (2013). Cambio climático y desarrollo turístico. Efectos de los huracanes en Cozumel, Quintana Roo y San Blas, Nayarit, México. *Investigación y Ciencia*, 21(58), 36-46.
- Pérez, C., Graniczny, M., y Kowalski, Z. (2001). *Interpretación tectónica de imágenes espaciales de Cuba oriental*. Memorias del IV Congreso de Geología y Minería. GEOMIN 2001, La Habana, 8 pp.
- Pettijohn, F.J. (1956). *Sedimentary rocks*. (2nd edit). Wisconsin, USA: The Rice Institute, 719 pp.
- Pranzini, E., Anfuso, G., y Muñoz-Perez, J.J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139; 32-35
- Raabe, A., Klein, A.; González, M., y Medina, R. (2010). MEPBAY and SMC: programa tools to support different operational levels of headland bay beaches in coastal engineering projects. *Coastal Engineering*, 57; 213-226.
- Ramírez, E., y Foyo, J. (1987). Particularidades de la dinámica de los sedimentos en las playas del E de la Ciudad de La Habana. *Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 14;1-14.
- Ramírez, E. (1989). *Geomorfología del litoral norte (Habana-Matanzas)*. Tesis (Doctor en Ciencias Geográficas) Cuba. Universidad de La Habana. Unpublished.
- Ramírez E., y Sosa, M. (1989). *Geomorfología litoral*. La Habana.: Nuevo Atlas Nacional de Cuba.

- Rangel, N.G., y Posada, B.O. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio. *Revista Intrópica*, 8; 29-42; Santa Marta, Colombia.
- Rangel, N.G., Anfuso, G., y Williams, A.T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean and Coastal Management*, 114:129-144.
- Requejo, M. (2005). *Análisis y mejoras en la evaluación de diversos términos de los modelos de evolución de playas en escalas de medio plazo*. Tesis (Doctor en Ciencias Hidráulicas) España. Universidad de Cantabria.
- Rodríguez, E. (2003). *Determinación de los valores de asolvamiento en la bahía de Moa producto de la explotación minera*. Memorias de Conferencia Internacional sobre Manejo Integrado de Zonas Costeras. Santiago de Cuba.
- Rodríguez, M., García, K., Nureña, C., Palacios, A., Quijano, C., Santos, C., Vargas, C., y Vigo, B. (2016). Análisis de la erosión costera en la playa de Buenos Aires, distrito de Víctor Larco, provincia de Trujillo, La Libertad, Perú. *Revista Electrónica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte*, 4 (1); 19-31.
- Rodríguez, R. (1992). *Caracterización de las variaciones morfológicas del perfil de playa en el litoral de la provincia de Holguín*. Tesis (Licenciatura en Geografía) Cuba. Universidad de La Habana.
- Rodríguez, R., Martínez, N., Alfaro, D., Lancho, P., y Freeman, A. (1999). *Proyecto ejecutivo para la regeneración del sector costero Don Lino*. CITMA-ICH. 31 pp.
- Rodríguez, R. (2004). *Inventario y caracterización de las playas del litoral nororiental de Cuba*. Informe Técnico, UICOS. CISAT. CITMA. 152 pp.
- Rodríguez, R., y Córdova, E. (2005a). Efectividad de los trabajos de alimentación artificial con arenas ejecutadas en Playa Estero Ciego entre 1997 y 1998, Cuba. *Revista de Ciencias Holguín*, Año XI, julio-septiembre, 3; 1-14.
<http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=181517982003>

- Rodríguez R., y Córdova, E. (2005b). *Particularidades morfodinámicas de la costa nororiental de Cuba*. Memorias de la V Convención de Medio Ambiente; La Habana, 15 pp.
- Rodríguez, R., Córdova, E. y Álvarez, R. (2006). La Erosión en las Costas de la Ciudad de Gibara, Cuba. *Revista de Ciencias Holguín*, Año XII, enero-marzo, 1; 1-11. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181515833003>
- Rodríguez, R., y Córdova, E. (2006). La Erosión en las Playas de la Región Nororiental de Cuba. *Revista Geográfica*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México, 139; 9-26. <http://www.jstor.org/discover/10.2307/40996716?uid=3737784yuid=2yuid=4ysid=21106050727711>
- Rodríguez, R. (2008). *Exploración de los cayos más orientales del archipiélago cubano*. Informe a la Comisión Nacional de Nombres Geográficos de la Oficina de Hidrografía y Geodesia; 10 pp.
- Rodríguez, R., Córdova, E., Franco, J., y Rueda, A. (2009). La Erosión en las Playas del Litoral de Holguín, Cuba. *Revista de Ciencias Holguín*, Año XV enero-marzo, 1:1-20. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181517987001>
- Rodríguez, R. (2009). Cuba. In Bird, E. (ed.). *Encyclopedia of the World's Coastal Landforms*. London, New York.: Springer. DOI 10.1007/ 978-1-4020-8639-7_7_5.1. <http://download-v2.springer.com/static/pdf/997/>
- Rodríguez, R., y Córdova, E. (2010). Efectividad de los trabajos de creación artificial de Playa Don Lino, Cuba. *Revista de Ciencias Holguín*, XVI (1); 1-18. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=181517919023>
- Rodríguez, R., y Beltrán, H. (2012). *Estudio de los Procesos de Erosión–Sedimentación en Playa El Espino, República de El Salvador*. San Salvador.: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. <http://www.mapas.snet.gob.sv/oceanografia/ProcesoErosionElEspino.pdf>

- Rodríguez, R. (2016). *Particularidades morfológicas, hidrodinámicas y sedimentarias de las playas biogénicas del litoral nororiental de Cuba*. (Resultado parcial de tesis para optar a la candidatura doctoral en Geografía). Santiago.: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Rosati, J., Dean, R., y Walton, T. (2013). The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology*, 340; 71-81.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., Gelfenbaum, G., y Cohn, N. (2016). Morphodynamics of prograding beaches: A synthesis of seasonal-to century-scale observations of the Columbia River littoral cell. *Marine Geology*, 376; 51-68.
- Sabela, S., y Sánchez, V.J. (2013). *Estudio morfodinámico de una playa lineal. Aplicación al caso de Gandía*. Tesis (Master en Ciencias) España. Universidad Politécnica de Valencia.
- Sandoval C., Caram, J., y Salinas, J. (2009). La engañosa simplicidad del método de Stokes para medir viscosidades *Revista Brasileira de Ensino de Física* 31(4). 4310-4323.
- Schwartz, M.L. (1967). The Bruun theory of sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Geology*, 75(1); 76-92.
- Schwartz, M.L. (1982). The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments, Schwartz, M.L. (ed.). *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. New York, USA.: Springer, 940 pp.
- Schwartz, M.L. (2005). *Encyclopedia of Coastal Science*. The Netherlands: Springer, 1126 p.
- Scott, T., Russell, P., Masselink, G., y Wooler, A. (2009). Rip current variability and hazard along a macro-tidal coast. *Journal of Coastal Research*, SI 56; 895-899.
- Scott, T., Masselink, G., y Russell, P. (2011). Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 286; 1-20.

- Shantzer, E., Petrov, M., y Franco, G. (1975). Sobre las formaciones costeras del Holoceno en Cuba. Las terrazas pleistocénicas de la región Habana-Matanzas y los sedimentos vinculados con ellas. Academia de Ciencias de Cuba. *Serie Geológica*, 21; 3-26.
- Short, A.D. (2006). Australian Beach Systems-Nature and Distribution. *Journal of Coastal Research*; 22(1); 11-27.
- Short, A.D. (2010). Role of geological inheritance in Australian beach morphodynamics. *Coastal Engineering*, 57; 92-97.
- Sierra, J., Presti, L., y Sánchez-Arcilla, A. (1994). Representación del perfil de equilibrio en las playas del litoral Catalán. *Revista de Obras Públicas*, 3333 Año 141. Marzo.
- Silva, R., Martínez, M.L., Hesp, P., Catalan, P., Osorio, A. F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., MariñoTapia, I., Pereira, P., Cienfuegos, R., Klein, A., y Govaere, G. (2014). Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. In: Silva, R., y Strusińska-Correia, A. (eds.), *Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases. Journal of Coastal Research*, SI 71; 1-16.
- Silvester, R. (1959). Engineering aspects of Coastal Sediment Movement. Proceeding ASCE. *Journal Waterways and Harbours Division*, 85, Sept.
- Silvester, R. y Hsu, J. (1997). *Coastal stabilization*. Singapore, River Edge, N.J.: World Scientific.
- Skiba, Y.N. (2008). *Introducción a la Dinámica de Fluidos*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México, 431 p.
- Sommer, M. (2005). *Arrasan las Dunas de Punta del Este*. www.ecoportal.net. [consultado: septiembre de 2015].
- Sosa, M., Guerra, R., y Rivas, L. (2005). *Análisis actual de los procesos erosivos en las Playas del Este*. Instituto de Oceanología. La Habana, Cuba.

- Splinter, K.D., Carley, J.T., Golshani, A., y Tomlinson, R. (2014). A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion. *Coastal Engineering*, 83; 49-55.
- Stoddart, D.R. (1978). Mechanical analyses of reef sediments. In: Stoddart, R.D and Johannes, R.E. (ed.), *Coral reefs: research methods*. Paris, France: UNESCO, 572pp.
- Tejedor, F. (1999). Análisis de Varianza. Madrid, España: Schaum. La Muralla S.A.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., y Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Open-File Report 2008-1278. *Geological Survey*. California
- Torres, R. (2007). Generalización de los cálculos para la obtención del volumen lineal de vertimiento de arena. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2. La Habana.
- Torres, R., Córdova, L., y Fernández, F. (2012). HIDRICOS: Una herramienta de investigación y desarrollo en ingeniería costera. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(3); 1-8.
- Tristá, E. (2003). *Evaluación de los procesos de erosión en las playas interiores de Cuba*. Tesis (Doctor en Ciencias Geográficas) Cuba. Universidad de La Habana.
- Udhaba, G., Sanil, V., Johnson, G., Sajiv, C., y Vinayaraj, P. (2012). Short-term observation of beach dynamics using cross-shore profiles and foreshore sediment. *Ocean and Coastal Management*, 67; 101-112
- UNEP (2003a). *Informe GEO03: Global Environment Outlook 3. Pasado, Presente y Futuro*. Nairobi, Kenya: United Nation Environment Program (UNEP). www.unep.org/80/geo/geo3/spanish/overview/012.htm
- UNEP (2003b). *Informe GEO03: Global Environment Outlook 3. América Latina y el Caribe. Perspectiva del Medio Ambiente*. Nairobi, Kenya: United Nation Environment Program (UNEP).

- UNEP/GPA (2003). *Diagnosis of the Erosion Processes in the Caribbean Sandy Beaches* (Technical Report). La Habana, Cuba: Ministry of Science, Technology and Environment of Cuba.
- U.S. Army Corps of Engineers (1984). *Shore Protection Manual (I)*. Waterways Experiment Station, Washington D.C. USA.
- U.S. Army Corps of Engineers (1998). *Engineering and Design*. Coastal Engineering Manual, Part III, Washington, D.C. USA.
- U.S. Army Corps of Engineers (2001). *Beach Fill Design (Part V)*. Coastal Engineering Manual, Washington, D.C. USA.
- U.S. Army Corps of Engineers (2002). *Coastal Morphodynamics (Part IV)*. Coastal Engineering Manual, Washington, D.C. USA.
- U.S. Army Corps of Engineers (2006). *Cross-shore sediment transport processes (part III)*. Coastal Engineering Manual, Washington, D.C. USA.
- Vidal, C., Losada, M., Medina, R., y Losada, I. (1995). Modelos de Morfodinámica de Playas. *Ingeniería del Agua*, 2; 55-74.
- Vellinga, P. (1983). *Predictive computational model for beach and dune erosion during storm surges*. Proceedings Specialty Conference on Coastal Structures'83; 806-819.
- Veneziano, M. F., y García, M.C. (2014). Protección costera y regeneración de playas en el sur de municipio de Gral. Pueyrredon, Pcia. de Buenos Aires. En: *Libro de resúmenes de las Segundas Jornadas Nacionales de Ambiente*. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30; 377–392.
- Wright, D., y Short, A. (1983). Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia. In Komar, D. (ed.). *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Florida, USA: CRC Press. Taylor & Francis Group.

- Wright, D., y Short, A. (1984). Morphodynamic variability and surf zone and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56; 93-118.
- Yoshida, J., Udo, K., Takeda, Y., y Mano, A. (2013). Potential impact of climate change at five Japanese beaches In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12 th International Coastal Symposium (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, SI, 65; 2185-2190.
- Yoshida, J., Udo, K., Takeda, Y., y Mano, A. (2014). Framework for proper beach nourishment as adaptation to beach erosion due to sea level rise. In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 70; 467-472.
- Zenkovich, V.P. (1967). *Processes of coastal development*. Edinburgh, Scotland: Oliver and Boyd, 738 pp.
- Zúñiga, A. (2009). *Características geomorfológicas y sedimentarias de las playas del subarchipiélago Camagüey*. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros, Ciego de Ávila.

IX. ANEXOS

Anexo 1. Listado de las playas del litoral nororiental de Cuba referidas en el estudio.

No.	Nombre de la playa	Municipio	Longitud (m)	Granulometría D ₅₀ (mm)	Coefficiente Selección So	Clasificación Wentworth
1.	N. Grandes	Manatí	450	0,35	1,473	Arena media
2.	La Victoria	Manatí	1.075	0,49	1,667	Arena media
3.	Los Pinos	Manatí	920	0,28	1,576	Arena media
4.	Mangalito	Manatí	230	0,47	1,560	Arena media
5.	Brava	Manatí	120	0,31	1,970	Arena media
6.	Blanche	P. Padre	250	0,32	1,920	Arena media
7.	Bonita	P. Padre	160	0,30	1,590	Arena media
8.	Rocosa	P. Padre	85	0,46	1,970	Arena media
9.	Covarrubias	P. Padre	2.560	0,46	1,367	Arena media
10.	Real	P. Padre	3.000	0,29	1,570	Arena media
11.	Las Guanas	P. Padre	2.500	0,30	1,545	Arena media
12.	Punta Piedra	P. Padre	1.050	0,22	1,616	Arena fina
13.	Dorada	P. Padre	935	0,51	1,579	Arena gruesa
14.	Yuraguana	P. Padre	750	0,42	1,870	Arena media
15.	La Boca	P. Padre	780	0,21	1,500	Arena fina
16.	La Llanita	P. Padre	1.500	0,33	3,755	Arena media
17.	P. Tomate	P. Padre	1.255	0,36	1,541	Arena media
18.	Los Jarros	P. Padre	190	0,57	1,313	Arena gruesa
19.	Corella	P. Padre	2.350	0,33	1,599	Arena media
20.	La Herradura	P. Padre	300	0,45	1,630	Arena media
21.	Ensenada	J.Menéndez	320	0,43	1,433	Arena media
22.	Las Azules	J.Menéndez	6.000	0,29	1,544	Arena media
23.	Juan Antonio	Gibara	300	0,48	2,740	Arena media
24.	Caletones	Gibara	370	0,38	1,580	Arena media
25.	Los Bajos	Gibara	1.250	0,39	1,501	Arena media
26.	Blanca	R. Freyre	245	0,23	2,042	Arena fina
27.	Don Lino	R. Freyre	285	0,55	1,450	Arena gruesa
28.	Minint	R. Freyre	100	0,53	1,440	Arena gruesa
29.	Pesquero	R. Freyre	930	0,32	1,659	Arena media
30.	Yuraguanal	R. Freyre	560	0,24	1,899	Arena fina

Anexo 1. Listado de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

No.	Nombre de la playa	Municipio	Longitud	Granulometría D ₅₀ (mm)	Coefficiente Selección So	Clasificación Wentworth
31.	Estero Ciego	R. Freyre	730	0,31	1,744	Arena media
32.	Guardalavaca	Banes	540	0,21	1,984	Arena fina
33.	Del Muerto	Banes	450	0,42	1,750	Arena media
34.	Larga	Banes	950	0,36	1,970	Arena media
35.	Manglito	Banes	1.200	0,43	1,970	Arena media
36.	Punta de	Banes	6.900	0,42	1,670	Arena media
37.	Puerto Rico	Banes	5.000	0,44	1,750	Arena media
38.	Morales	Banes	1.160	0,49	1,424	Arena media
39.	Carmona	Antillas	670	0,45	1,533	Arena media
40.	Baracutey	Antillas	2.100	0,40	1,547	Arena media
41.	Larga	Mayarí	6.000	0,38	1,846	Arena media
42.	Corinthia	F. País	6.800	0,36	2,130	Arena media
43.	Barrederas	F. País	1.800	0,45	1,610	Arena media
44.	Mejías	F. País	7.000	0,41	1,630	Arena media
45.	Yamanigüey	Moa	2.100	0,21	1,410	Arena fina
46.	Jaragua	Baracoa	2.900	0,47	2,170	Arena media
47.	Mercedes	Baracoa	1.200	0,37	1,615	Arena media
48.	Maguana	Baracoa	900	0,44	1,777	Arena media
49.	Cajuaio	Baracoa	950	0,43	1,970	Arena media
50.	Quibungo	Baracoa	250	0,58	1,970	Arena gruesa
51.	María de	Baracoa	1.200	0,51	2,110	Arena gruesa
52.	Manglito	Baracoa	850	0,53	1,160	Arena gruesa
53.	Las Azules	Maisí	350	0,43	1,141	Arena media
54.	Quemado	Maisí	1.600	0,56	1,440	Arena gruesa

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba.

Nombre de la playa: Maguana

Municipio: Baracoa

Provincia: Guantánamo

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Caleta
2.	Orientación de la línea de costa	NW-SE
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	900 m
	♦ Ancho total	72 m
	♦ Ancho de la cara	12 m
	♦ Ancho de la berma	20 m
	♦ Ancho de la duna	40 m
	♦ Altura de la duna	3 m
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: media Total
4.	Tipo de perfil de playa	Completo – Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,44 mm So = 1,615
	♦ Color de la arena	Amarillo - crema
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	300 – 350 m
8.	Estado de conservación vegetación	Conservada
9.	Evidencias de erosión	• Afloramientos rocosos • Escarpes sobre berma
10.	Magnitud de erosión	
11.	Causas u origen	• Eventos extremos • Oleaje
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo Internacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	No
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	No
13.	Carga física de la playa	Baja
14.	Estado de conservación	Conservada

Coordenadas: X: 734 325.00

Y: 203 400.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Guardalavaca

Municipio: Banes

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Caleta
2.	Orientación de la línea de costa	ENE-WSW
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	540 m
	♦ Ancho total	60 m
	♦ Ancho de la cara	10 m
	♦ Ancho de la berma	50 m
	♦ Ancho de la duna	No tiene
	♦ Altura de la duna	-
	♦ Pendiente	Emergida: 5,93 Sumergida: 1,31 (media) Total:
4.	Tipo de perfil de playa	Incompleto – Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,21 mm So = 1,984
	♦ Color de la arena	Amarillo – crema
6.	Constitución del fondo	Seibadal
7.	Tipo y distancia del arrecife	300 m
8.	Estado de conservación vegetación	Conservada
9.	Evidencias de erosión	• Retroceso de línea de costa • Caída de árboles obre costa • Afloramientos de raíces de plantas
10.	Magnitud de erosión	Moderada (0,61 m/año) data de 41 años (0,88 m/año) acumulación
11.	Causas u origen	• Alta persistencia de oleaje del Este • Fijación del Seibadal • Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo internacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No tiene
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No tiene
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	No tiene
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	-
13.	Carga física de la playa	Media
14.	Estado de conservación	Medio conservada

Coordenadas: X: 603 325.00

Y: 274 350.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Estero Ciego

Municipio: R. Freyre

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Caleta
2.	Orientación de la línea de costa	E – W
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	730 m
	♦ Ancho total	80 m
	♦ Ancho de la cara	12 m
	♦ Ancho de la berma	13 m
	♦ Ancho de la duna	55 m
	♦ Altura de la duna	3 m
	♦ Pendiente	Emergida: Sumergida: Fuerte Total:
4.	Tipo de perfil de playa	Incompleto- Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,31 mm So = 1,744
	♦ Color de la arena	Amarillo crema
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	700 – 800 m
8.	Estado de conservación vegetación	Conservada
9.	Evidencias de erosión	• Escarpes en base de duna • Afloramiento en zona intermareal • Retroceso de línea litoral
10.	Magnitud de erosión	Moderada
11.	Causas u origen	• Alta persistencia de oleaje del Este • Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo internacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	No
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	No
13.	Carga física de la playa	Media
14.	Estado de conservación	Medio conservada

Coordenadas: X: 599 900.00

Y: 273 280.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Yuraguanal

Municipio: R. Freyre

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Herradura
2.	Orientación de la línea de costa	E - W
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	560 m
	♦ Ancho total	65 m
	♦ Ancho de la cara	10 m
	♦ Ancho de la berma	15 m
	♦ Ancho de la duna	40 m
	♦ Altura de la duna	3 m
	♦ Pendiente	Emergida: Sumergida: Suave Total:
4.	Tipo de perfil de playa	Completo-Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénicas
	♦ Granulometría	Md = 0,24 mm So = 1,899
	♦ Color de la arena	Blanco marfil
6.	Constitución del fondo	Seibadal
7.	Tipo y distancia del arrecife	400 – 500 m
8.	Estado de conservación vegetación	Conservada
9.	Evidencias de erosión	• Escarpes de cara de la playa • Afloramientos de raíces de las plantas
10.	Magnitud de erosión	Baja
11.	Causas u origen	• Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo internacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No tiene
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No tiene
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	-
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	-
13.	Carga física de la playa	Media
14.	Estado de conservación	Conservada

Coordenadas: X: 597 500.00

Y: 273 000.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Pesquero

Municipio: R. Freyre

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Herradura
2.	Orientación de la línea de costa	NNE-SSW
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	930 m
	♦ Ancho total	60 m
	♦ Ancho de la cara	10 m
	♦ Ancho de la berma	20 m
	♦ Ancho de la duna	30 m
	♦ Altura de la duna	2.5 m
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: media Total
4.	Tipo de perfil de playa	Completo – Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,32 mm So = 1,659
	♦ Color de la arena	Blanco marfil
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	No tiene
8.	Estado de conservación vegetación	Alterada
9.	Evidencias de erosión	• Afloramientos rocosos en zona intermareal • Retroceso de línea de costa • Afloramientos raíces de las plantas
10.	Magnitud de erosión	Media: 0,65 m/año (Data de 31 años)
11.	Causas u origen	• Eventos extremos • Baja frecuencia e intensidad de frentes fríos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo internacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No tiene
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No tiene
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	No tiene
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	No tiene
13.	Carga física de la playa	Media
14.	Estado de conservación	Medio conservada

Coordenadas: X:593 350.00

Y: 271 700.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Minint

Municipio: R. Freyre

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Caleta
2.	Orientación de la línea de costa	E- W
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	90 m
	♦ Ancho total	15 m
	♦ Ancho de la cara	8 m
	♦ Ancho de la berma	7 m
	♦ Ancho de la duna	No tiene
	♦ Altura de la duna	-
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: Suaves Total
4.	Tipo de perfil de playa	Incompleto – Poco desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénicos
	♦ Granulometría	Md = 0,56 mm So = 1,440
	♦ Color de la arena	Amarillo – crema
6.	Constitución del fondo	Fragmento de coral
7.	Tipo y distancia del arrecife	100 m
8.	Estado de conservación vegetación	Alterada
9.	Evidencias de erosión	• Surcos en cara de la playa • Afloramientos de rocas en zona intermareal
10.	Magnitud de erosión	Baja
11.	Causas u origen	• Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo nacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	Malecón sobre acantilado
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No tiene
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	-
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	-
13.	Carga física de la playa	Baja
14.	Estado de conservación	Medio conservada

Coordenadas: X: 587 400.00

Y: 270 000.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Don Lino

Municipio: R. Freyre

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Caleta
2.	Orientación de la línea de costa	E- W
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	285 m
	♦ Ancho total	50 m
	♦ Ancho de la cara	10 m
	♦ Ancho de la berma	40 m
	♦ Ancho de la duna	-
	♦ Altura de la duna	-
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: Suave Total
4.	Tipo de perfil de playa	Incompleto-Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénicos
	♦ Granulometría	Md = 0,55 mm So = 1,450
	♦ Color de la arena	Gris –crema
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	100 – 150 m
8.	Estado de conservación vegetación	Alterada
9.	Evidencias de erosión	• Escarpes en base de berma • Afloramientos en zona intermareal • Retroceso de línea litoral
10.	Magnitud de erosión	Baja
11.	Causas u origen	• Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo internacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	-
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	-
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	-
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	-
13.	Carga física de la playa	Baja
14.	Estado de conservación	Medio conservada

Coordenadas: X: 587 00.00

Y: 270 545.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Blanca

Municipio: R. Freyre

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Herradura
2.	Orientación de la línea de costa	NE – SW
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	245 m
	♦ Ancho total	30 m
	♦ Ancho de la cara	8 m
	♦ Ancho de la berma	22 m
	♦ Ancho de la duna	-
	♦ Altura de la duna	-
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: Fuerte Total
4.	Tipo de perfil de playa	Incompleto – desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,23 mm So = 2,042
	♦ Color de la arena	Gris- crema
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	No tiene
8.	Estado de conservación vegetación	Alterada
9.	Evidencias de erosión	• Afloramiento superficial de raíces plantas
10.	Magnitud de erosión	
11.	Causas u origen	• Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Urbano
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	-
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	-
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	Berma (aprox. 6 mil m ³)
13.	Carga física de la playa	Alta
14.	Estado de conservación	Medio conservada

Coordenadas: X: 585 855.00

Y: 270 000.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Los Bajos

Municipio: Gibara

Provincia: Holguín

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Lineal
2.	Orientación de la línea de costa	E - W
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	1 250 m
	♦ Ancho total	60 m
	♦ Ancho de la cara	12 m
	♦ Ancho de la berma	8 m
	♦ Ancho de la duna	40 m
	♦ Altura de la duna	3 m
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: Suave Total
4.	Tipo de perfil de playa	Completo - Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,39 mm So = 1,501
	♦ Color de la arena	Gris –crema
6.	Constitución del fondo	Seibadal
7.	Tipo y distancia del arrecife	250 – 350 m
8.	Estado de conservación vegetación	Alterada
9.	Evidencias de erosión	• Escarpes en base de berma y dunas de casi 1 m de altura • Afloramientos raíces de árboles • Retroceso de línea de costa
10.	Magnitud de erosión	Baja (0,58 m/año) data de 26 años
11.	Causas u origen	• Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Rural permanente
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	Fortificaciones en berma y dunas
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	Duna, berma
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	15 %
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	En duna (aprox. 40 mil m ³)
13.	Carga física de la playa	Baja
14.	Estado de conservación	Medio Conservada

Coordenadas: X: 578 495.00

Y:272 150.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Corella

Municipio: Puerto Padre

Provincia: Las Tunas

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Lineal
2.	Orientación de la línea de costa	Este -Oeste
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	2 350 m
	♦ Ancho total	218 m
	♦ Ancho de la cara	11 m
	♦ Ancho de la berma	7 m
	♦ Ancho de la duna	200 m
	♦ Altura de la duna	4 – 5 m
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: Suave Total
4.	Tipo de perfil de playa	Completo- Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,33 mm So = 1,599
	♦ Color de la arena	Amarillo – crema
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	600 – 1 000 m
8.	Estado de conservación vegetación	Conservada
9.	Evidencias de erosión	• No
10.	Magnitud de erosión	
11.	Causas u origen	Tiene más de seis cadenas de dunas y continúan en formación nuevas cadenas.
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	No
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	No
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	Más de 25 mil m ³ de la duna
13.	Carga física de la playa	Muy Baja
14.	Estado de conservación	Conservada

Coordenadas: X= 536 000.00

Y= 291 595.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: Punta Tomate

Municipio: Puerto Padre

Provincia: Las Tunas

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Herradura
2.	Orientación de la línea de costa	ENE- WSW
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	1 255 m
	♦ Ancho total	57 m
	♦ Ancho de la cara	12 m
	♦ Ancho de la berma	15 m
	♦ Ancho de la duna	30 m
	♦ Altura de la duna	3,5 m
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: Suave Total
4.	Tipo de perfil de playa	Completo- Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,36 mm So = 1,541
	♦ Color de la arena	Blanco marfil
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	-
8.	Estado de conservación vegetación	Alterada
9.	Evidencias de erosión	No
10.	Magnitud de erosión	
11.	Causas u origen NO	No
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	No
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	No
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	No
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	No
13.	Carga física de la playa	Muy baja
14.	Estado de conservación	Conservada

Coordenadas: X= 533 250.00

Y= 291 525.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ficha técnica de las playas del litoral nororiental de Cuba (continuación).

Nombre de la playa: La Llanita

Municipio: Puerto Padre

Provincia: Las Tunas

No.	Indicador	Medida indicadora
1.	Tipo de playa	Lineal
2.	Orientación de la línea de costa	Oeste – nordeste
3.	Elementos morfométricos	
	♦ Largo total	1 500 m
	♦ Ancho total	60 m
	♦ Ancho de la cara	10 m
	♦ Ancho de la berma	-
	♦ Ancho de la duna	50 m
	♦ Altura de la duna	2,5 m
	♦ Pendiente	Emergida Sumergida: Media Total
4.	Tipo de perfil de playa	Incompleto - Desarrollado
5.	Características de los sedimentos	
	♦ Génesis	Biogénica
	♦ Granulometría	Md = 0,33 mm So = 3,755
	♦ Color de la arena	Amarillo – crema
6.	Constitución del fondo	Arena
7.	Tipo y distancia del arrecife	1 000 m
8.	Estado de conservación vegetación	Altera
9.	Evidencias de erosión	Afloramientos rocosos hacia el extremo Este
10.	Magnitud de erosión	
11.	Causas u origen	Eventos extremos
12.	Evidencias antrópicas	
	♦ Asentamientos y tipo	Turismo nacional
	♦ Tipo y ubicación de obras costeras	No
	♦ Construc. sobre elementos geomor.	Sobre la duna
	♦ Porcentaje de ocupación de la playa	25 %
	♦ Extracciones de arena, lugar y volumen	No
13.	Carga física de la playa	Baja
14.	Estado de conservación	Conservada

Coordenadas: X= 532 200.00

Y= 290 450.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de verano de 2016.

Nombre de la playa:		Maguana	
Fecha:		26 de agosto /2016	
Hora:		10:00 AM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Este	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
10:00	0,80	6,1	10
10:05	0,80	6,2	10
10:10	0,85	6,1	10
10:15	0,85	6,1	10
10:20	0,87	6,2	10
10:25	0,87	6,1	10
10:30	0,85	6,1	10
10:35	0,85	6,1	10
10:40	0,88	6,2	10
10:45	0,85	6,2	10
10:50	0,85	6,1	10
10:55	0,88	6,1	10
11:00	0,85	6,1	10
Promedio	0,85	6,13	10

Nombre de la playa:		Guardalavaca	
Fecha:		20 de agosto/2016	
Hora:		3:40 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
4:00	1,07	6,5	10
4:05	1,50	6,5	10
4:10	1,05	6,4	10
4:15	1,08	6,4	10
4:20	1,08	6,4	10
4:25	1,05	6,5	10
4:30	1,05	6,5	10
4:35	1,03	6,4	10
4:40	1,03	6,5	10
4:45	1,05	6,4	10
4:50	1,10	6,4	10
4:55	1,05	6,5	10
5:00	1,05	6,5	10
Promedio	1,09	6,45	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de verano de 2016 (continuación).

Nombre de la playa:		Estero Ciego	
Fecha:		20 de agosto/2016	
Hora:		2:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
2:00	1,05	6,5	10
2:05	1,05	6,5	10
2:10	1,03	6,4	10
2:15	1,03	6,4	10
2:20	1,05	6,5	10
2:25	1,03	6,3	10
2:30	1,05	6,4	10
2:35	1,03	6,4	10
2:40	1,05	6,5	10
2:45	1,05	6,5	10
2:50	1,05	6,5	10
2:55	1,05	6,4	10
3:00	1,05	6,5	10
Promedio	1,04	6,45	10

Nombre de la playa:		Yuraguanal	
Fecha:		20 de agosto/2016	
Hora:		10:30 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Este	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
10:30	0,55	6,1	10
10:35	0,55	6,1	10
10:40	0,55	6,1	10
10:45	0,57	6,2	10
10:50	0,57	6,2	10
10:55	0,57	6,2	10
11:00	0,57	6,2	10
11:05	0,60	6,2	10
11:10	0,60	6,2	10
11:15	0,60	6,2	10
11:20	0,60	6,2	10
11:25	0,60	6,1	10
11:30	0,60	6,1	10
Promedio	0,58	6,16	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de verano de 2016 (continuación).

Nombre de la playa:		Pesquero	
Fecha:		20 de agosto/2016	
Hora:		9:00 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
9:00	0,92	6,3	10
9:05	0,95	6,4	10
9:10	0,95	6,4	10
9:15	0,98	6,5	10
9:20	0,98	6,5	10
9:25	1,00	6,3	10
9:30	1,05	6,5	10
9:35	1,05	6,2	10
9:40	1,10	6,5	10
9:45	1,00	6,5	10
9:50	1,00	6,3	10
9:55	1,10	6,3	10
10:00	1,10	6,3	10
Promedio	1,01	6,38	10

Nombre de la playa:		Minint	
Fecha:		19 de agosto/2016	
Hora:		6:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
6:00	0,60	6,1	10
6:05	0,63	6,0	10
6:10	0,63	6,1	10
6:15	0,60	6,1	10
6:20	0,60	6,1	10
6:25	0,62	6,1	10
6:30	0,63	6,1	10
6:35	0,60	6,1	10
6:40	0,60	6,1	10
6:45	0,60	6,1	10
6:50	0,60	6,1	10
6:55	0,60	6,0	10
7:00	0,60	6,0	10
Promedio	0,61	6,08	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de verano de 2016 (continuación).

Nombre de la playa:		Don Lino	
Fecha:		19 de agosto/2016	
Hora:		4:30 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
4:30	0,60	6,0	10
4:35	0,62	6,1	10
4:40	0,62	6,1	10
4:45	0,62	6,1	10
4:50	0,62	6,0	10
4:55	0,60	6,0	10
5:00	0,62	6,1	10
5:05	0,62	6,1	10
5:10	0,60	6,1	10
5:15	0,60	6,1	10
5:20	0,60	6,1	10
5:25	0,60	6,0	10
5:30	0,62	6,0	10
Promedio	0,61	6,06	10

Nombre de la playa:		Blanca	
Fecha:		19 de agosto/2016	
Hora:		3:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
3:00	1,00	6,6	10
3:05	1,03	6,6	10
3:10	1,05	6,5	10
3:15	1,00	6,7	10
3:20	1,05	6,6	10
3:25	1,07	6,6	10
3:30	1,05	6,6	10
3:35	1,08	6,6	10
3:40	1,08	6,7	10
3:45	1,10	6,5	10
3:50	1,10	6,6	10
3:55	1,07	6,6	10
4:00	1,10	6,7	10
Promedio	1,06	6,61	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de verano de 2016 (continuación).

Nombre de la playa:		Los Bajos	
Fecha:		19 de agosto/2016	
Hora:		1:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Este	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
1:00	0,77	6,2	10
1:05	0,75	6,3	10
1:10	0,75	6,3	10
1:15	0,77	6,1	10
1:20	0,77	6,1	10
1:25	0,73	6,2	10
1:30	0,75	6,2	10
1:35	0,78	6,3	10
1:40	0,8	6,2	10
1:45	0,75	6,1	10
1:50	0,72	6,1	10
1:55	0,75	6,2	10
2:00	0,78	6,1	10
Promedio	0,76	6,18	10

Nombre de la playa:		Corella	
Fecha:		11 de agosto/2016	
Hora:		4:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
4:00	0,65	6,5	10
4:05	0,67	6,6	10
4:10	0,63	6,4	10
4:15	0,60	6,5	10
4:20	0,65	6,5	10
4:25	0,63	6,5	10
4:30	0,62	6,6	10
4:35	0,62	6,5	10
4:40	0,60	6,4	10
4:45	0,62	6,6	10
4:50	0,62	6,6	10
4:55	0,63	6,5	10
5:00	0,60	6,5	10
Promedio	0,63	6,52	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de verano de 2016 (continuación).

Nombre de la playa:		Punta Tomate	
Fecha:		11 de agosto/2016	
Hora:		2:20 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
2:20	0,67	6,4	10
2:25	0,66	6,5	10
2:30	0,65	6,4	10
2:35	0,65	6,4	10
2:40	0,63	6,5	10
2:45	0,65	6,3	10
2:50	0,67	6,3	10
2:55	0,67	6,4	10
3:00	0,67	6,4	10
3:05	0,68	6,3	10
3:10	0,65	6,4	10
3:15	0,65	6,4	10
3:20	0,67	6,3	10
Promedio	0,66	6,4	10

Nombre de la playa:		La Llanita	
Fecha:		11 de agosto/2016	
Hora:		1:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
1:00	0,60	6,1	10
1:05	0,63	6,5	10
1:10	0,62	6,4	10
1:15	0,65	6,5	10
1:20	0,65	6,5	10
1:25	0,63	6,3	10
1:30	0,62	6,5	10
1:35	0,64	6,6	10
1:40	0,70	6,5	10
1:45	0,65	6,5	10
1:50	0,70	6,5	10
1:55	0,68	6,6	10
2:00	0,68	6,6	10
Promedio	0,65	6,5	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de invierno de 2018.

Nombre de la playa:		Maguana	
Fecha:		12 de enero/2018	
Hora:		10:00 AM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
10:00	0,83	6,2	10
10:05	0,80	6,2	10
10:10	0,85	6,3	10
10:15	0,85	6,3	10
10:20	0,80	6,2	10
10:25	0,85	6,2	10
10:30	0,80	6,2	10
10:35	0,80	6,3	10
10:40	0,78	6,2	10
10:45	0,78	6,2	10
10:50	0,80	6,3	10
10:55	0,82	6,2	10
11:00	0,82	6,2	10
Promedio	0,81	6,23	10

Nombre de la playa:		Guardalavaca	
Fecha:		19 de enero/2018	
Hora:		3:40 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
3:40 PM	0,95	6,5	10
3:45	0,95	6,4	10
3:50	1,00	6,5	10
3:55	0,98	6,4	10
3:00	0,98	6,4	10
3:05	1,00	6,5	10
3:10	0,98	6,5	10
3:15	0,95	6,5	10
3:20	0,95	6,5	10
3:25	0,95	6,4	10
3:30	0,98	6,4	10
3:35	0,95	6,5	10
3:40	0,95	6,4	10
Promedio	0,97	6,46	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de invierno de 2018 (continuación).

Nombre de la playa:		Estero Ciego	
Fecha:		19 de enero/2018	
Hora:		2:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
2:00	0,95	6,5	10
2:05	0,95	6,5	10
2:10	0,98	6,5	10
2:15	0,98	6,5	10
2:20	0,95	6,4	10
2:25	0,95	6,5	10
2:30	0,98	6,4	10
2:35	0,98	6,4	10
2:40	0,98	6,5	10
2:45	0,95	6,5	10
2:50	0,95	6,4	10
2:55	0,95	6,4	10
3:00	0,98	6,5	10
Promedio	0,96	6,46	10

Nombre de la playa:		Yuraguanal	
Fecha:		19 de enero/2018	
Hora:		10:30 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
10:30	0,57	6,1	10
10:35	0,57	6,2	10
10:40	0,55	6,2	10
10:45	0,55	6,1	10
10:50	0,58	6,2	10
10:55	0,58	6,2	10
11:00	0,60	6,1	10
11:05	0,60	6,2	10
11:10	0,60	6,1	10
11:15	0,60	6,2	10
11:20	0,58	6,2	10
11:25	0,58	6,2	10
11:30	0,60	6,1	10
Promedio	0,58	6,16	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de invierno de 2018 (continuación).

Nombre de la playa:		Pesquero	
Fecha:		19 de enero/2018	
Hora:		8:30 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
8:30	0,78	6,5	10
8:35	0,78	6,5	10
8:40	0,75	6,4	10
8:45	0,75	6,4	10
8:50	0,75	6,5	10
8:55	0,80	6,4	10
9:00	0,80	6,4	10
9:05	0,75	6,5	10
9:10	0,80	6,4	10
9:15	0,08	6,4	10
9:20	0,75	6,5	10
9:25	0,80	6,4	10
9:30	0,80	6,4	10
Promedio	0,72	6,45	10

Nombre de la playa:		Minint	
Fecha:		18 de enero/2018	
Hora:		3:30 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
3:30	0,55	6,1	10
3:35	0,55	6,2	10
3:40	0,53	6,2	10
3:45	0,53	6,1	10
3:50	0,53	6,2	10
3:55	0,50	6,1	10
4:00	0,50	6,2	10
4:05	0,52	6,1	10
4:10	0,52	6,2	10
4:15	0,50	6,1	10
4:20	0,50	6,2	10
4:25	0,53	6,1	10
4:30	0,53	6,1	10
Promedio	0,52	6,15	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de invierno de 2018 (continuación).

Nombre de la playa:		Don Lino	
Fecha:		18 de enero/2018	
Hora:		2:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
2:00	0,57	6,1	10
2:05	0,55	6,1	10
2:10	0,58	6,2	10
2:15	0,59	6,2	10
2:20	0,58	6,1	10
2:25	0,58	6,1	10
2:30	0,54	6,2	10
2:35	0,58	6,2	10
2:40	0,58	6,1	10
2:45	0,6	6,2	10
2:50	0,58	6,1	10
2:55	0,59	6,2	10
3:00	0,58	6,1	10
Promedio	0,57	6,14	10

Nombre de la playa:		Blanca	
Fecha:		18 de enero/2018	
Hora:		11:00 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Norte	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
11:00	1,00	6,8	10
11:05	1,00	6,7	10
11:10	1,05	6,8	10
11:15	1,05	6,7	10
11:20	1,05	6,6	10
11:25	1,00	6,7	10
11:30	1,05	6,6	10
11:35	1,10	6,7	10
11:40	1,10	6,7	10
11:45	1,05	6,8	10
11:50	1,05	6,8	10
11:55	1,03	6,7	10
12:00	1,03	6,7	10
Promedio	1,04	6,72	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de invierno de 2018 (continuación).

Nombre de la playa:		Los Bajos	
Fecha:		18 de enero/2018	
Hora:		9:00 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
9:00	0,78	6,3	10
9:05	0,78	6,4	10
9:10	0,80	6,4	10
9:15	0,78	6,4	10
9:20	0,78	6,5	10
9:25	0,80	6,5	10
9:30	0,80	6,6	10
9:35	0,80	6,5	10
9:40	0,80	6,4	10
9:45	0,82	6,5	10
9:50	0,82	6,4	10
9:55	0,80	6,4	10
10:00	0,80	6,5	10
Promedio	0,95	6,7	10

Nombre de la playa:		Corella	
Fecha:		27 de enero/2018	
Hora:		2:00 PM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Noroeste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
2:00	0,80	6,7	10
2:05	0,83	6,7	10
2:10	0,83	6,8	10
2:15	0,80	6,8	10
2:20	0,80	6,7	10
2:25	0,80	6,8	10
2:30	0,82	6,7	10
2:35	0,82	6,7	10
2:40	0,85	6,8	10
2:45	0,80	6,7	10
2:50	0,80	6,7	10
2:55	0,85	6,8	10
3:00	0,88	6,7	10
Promedio	0,95	6,7	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Medición altura y periodo de la ola para el periodo de invierno de 2018 (continuación).

Nombre de la playa:		Punta Tomate	
Fecha:		27 de enero/2018	
Hora:		10:30 AM	
Estado de la marea:		Marea Baja	
Rumbo del oleaje:		Noreste	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
10:30	0,75	6,7	10
10:35	0,75	6,8	10
10:40	0,70	6,8	10
10:45	0,70	6,7	10
10:50	0,73	6,8	10
10:55	0,75	6,8	10
11:00	0,75	6,7	10
11:05	0,70	6,7	10
11:10	0,70	6,8	10
11:15	0,73	6,8	10
11:20	0,70	6,7	10
11:25	0,73	6,7	10
11:30	0,73	6,7	10
Promedio	0,72	6,7	10

Nombre de la playa:		La Llanita	
Fecha:		27 de enero/2018	
Hora:		9:00 AM	
Estado de la marea:		Marea Llena	
Rumbo del oleaje:		Norte	
Hora	Altura (m)	Periodo (seg.)	Número observaciones
9:00	0,87	6,7	10
9:05	0,87	6,7	10
9:10	0,95	6,7	10
9:15	0,95	6,8	10
9:20	0,95	6,7	10
9:25	0,95	6,8	10
9:30	0,93	6,7	10
9:35	0,98	6,8	10
9:40	1,00	6,7	10
9:45	1,00	6,7	10
9:50	1,00	6,8	10
9:55	0,98	6,8	10
10:00	0,98	6,7	10
Promedio	0,95	6,7	10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Identificación de geo formas de estados geomorfológicos en playas del litoral nororiental para la etapa de verano (agosto de 2017).

No.	Playa	Ancho total	Ancho cara	Ancho berma	H. Berma	Nº crestas	Nº barras	Pres. cúspides	Corr. retorno	Osc. rítmica	Dist. arrecifes	Md (D50)
	Nuevas Grandes	38	8	0	1,35	1	0	0	0	0	890	0,35
2	La Victoria	33	8	0	1,35	1	0	0	0	0	890	0,49
3	Los Pinos	88	13	75	1,35	1	1	0	0	0	800	0,28
4	Manglito	22	10	0	1,35	1	0	0	0	0	680	0,47
5	Brava	50	10	0	1,35	1	0	0	0	0	680	0,31
6	Blanche	40	10	0	1,35	1	0	0	0	0	680	0,32
7	Bonita	35	10	0	1,35	1	1	0	0	0	800	0,30
8	Rocosa	54	9	0	1,35	1	0	0	0	0	900	0,46
9	Covarrubias	50	10	0	1,35	1	0	0	0	0	1000	0,46
10	Real Covarrubias	102	12	35	1,35	1	0	0	0	0	1100	0,29
11	Las Guanas	66	11	55	1,35	1	0	0	0	0	600	0,29
12	Punta Piedra	24	10	0	1,35	1	0	0	0	0	800	0,19
13	Dorada	80	10	0	1,35	1	1	0	0	0	700	0,51
14	Yuraguana	70	10	0	1,35	1	0	0	0	0	700	0,42
15	La Boca	55	10	0	1,20	1	1	0	0	0	0	0,21
16	La Llanita	60	10	0	1,30	1	1	0	0	0	0	0,33
17	Punta Tomate	57	12	15	1,30	1	1	0	0	0	780	0,36
18	Los Jarros	61	11	0	1,35	1	1	0	0	0	500	0,57
19	Corella	218	11	7	1,35	1	1	0	0	0	900	0,33
20	La Herradura	68	11	17	1,35	1	1	0	0	0	0	0,45
21	Ensenada Honda	77	12	15	1,35	1	1	0	0	0	590	0,43
22	Las Azules	80	12	8	1,35	1	1	0	0	0	700	0,29
23	Juan Antonio	42	8	4	1,30	1	1	0	0	0	250	0,48
24	Caletones	45	15	0	1,30	1	1	0	0	0	250	0,38
25	Los Bajos	60	12	8	1,30	1	1	0	0	0	300	0,39
26	Blanca	40	12	28	1,25	1	0	0	0	0	0	0,23
27	Don Lino	50	12	38	1,35	1	0	0	0	0	100	0,55
28	Minint	18	10	8	1,35	1	0	0	0	0	80	0,53
29	Pesquero	60	12	20	1,35	1	1	0	0	0	0	0,32
30	Yuraguanal	65	10	15	1,25	1	1	0	0	0	620	0,24
31	Estero Ciego	80	12	13	1,50	1	0	0	0	0	700	0,31
32	Guardalavaca	60	11	49	1,35	1	1	0	0	0	300	0,21
33	Del Muerto	40	12	0	1,20	1	1	0	0	0	250	0,42
34	Larga	45	13	0	1,30	1	1	0	0	0	350	0,36
35	Manglito	101	11	20	1,25	1	1	0	0	0	250	0,42
36	Punta de Mulas	94	10	24	1,25	1	1	0	0	0	250	0,42
37	Puerto Rico	95	10	20	1,25	1	1	0	0	0	250	0,44
38	Morales	50	10	0	1,25	1	1	0	0	0	250	0,49
39	Carmona (Rincón)	110	10	10	1,30	1	1	0	0	0	120	0,45
40	Baracutey	65	10	10	1,30	1	1	0	0	0	120	0,40
41	Larga	65	10	15	1,30	1	0	0	0	0	300	0,54

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Identificación de geo formas de estados geomorfológicos en playas del litoral nororiental para la etapa de verano (agosto de 2017) (continuación).

No.	Playa	Ancho total	Ancho cara	Ancho berma	H. Berma	N° crestas	N° barras	Pres. cúspides	Corr. retorno	Osc. rítmica	Dist. arrecifes	Md (D50)
42	Corinthia	70	12	8	1,30	1	0	0	0	0	600	0,39
43	Barrederas	60	12	7	1,30	1	0	0	0	0	600	0,30
44	Mejías	80	13	12	1,30	1	1	0	0	0	700	0,35
45	Yamanigüey	70	10	20	1,40	1	1	0	0	0	300	0,41
46	Jaragua	71	11	20	1,40	1	1	0	0	0	450	0,21
47	Mercedes	100	15	55	1,35	1	0	0	0	0	200	0,42
48	Maguana	72	12	20	1,50	1	1	0	0	0	350	0,44
49	Cajuajo	60	10	20	1,35	1	0	0	0	0	200	0,37
50	Quibungo	45	15	0	1,35	1	0	0	0	0	200	0,43
51	María	26	11	0	1,35	1	0	0	0	0	200	0,48
52	Manglito	40	10	10	1,35	1	1	0	0	0	250	0,41
53	Las Azules	80	15	5	1,40	1	1	0	0	0	250	0,43
54	Quemado	80	15	5	1,45	1	1	0	0	0	200	0,43
	Moda	80	10	0	1,30	1	1	0	0	0	250	0,42
	Media	64,49	11,20	12,93	1,29	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	441	0,39
	Desv. Estándar	30,11	1,78	16,29	0,03	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00	306,19	0,10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6. Identificación de geo formas de estados geomorfológicos en playas del litoral nororiental para la etapa de invierno (enero-febrero/2018).

No.	Playa	Ancho total	Ancho cara	Ancho berma	H. Berma	Nº crestas	Nº barras	Pres. cúspides	Corr. retorno	Osc. rítmica	Dist. arrecifes	Md (D50)
1	Nuevas Grandes	30	10	0	1,35	2	0	0	0	0	900	0,35
2	La Victoria	25	10	0	1,35	1	0	0	0	0	900	0,49
3	Los Pinos	75	12	63	1,35	1	1	0	0	0	800	0,28
4	Manglito	18	10	0	1,35	1	0	0	0	0	700	0,47
5	Brava	45	10	0	1,35	1	1	0	0	0	700	0,31
6	Blanche	40	10	0	1,35	1	0	0	0	0	700	0,32
7	Bonita	30	10	0	1,35	1	1	0	0	0	800	0,30
8	Rocosa	50	10	0	1,35	1	1	0	0	0	900	0,46
9	Covarrubias	45	10	0	1,35	2	1	0	0	1	1000	0,46
10	Real Covarrubias	92	11	23	1,35	1	1	0	0	0	1200	0,29
11	Las Guanas	53	11	42	1,35	1	1	0	0	0	600	0,29
12	Punta Piedra	19	10	0	1,35	1	0	0	0	0	800	0,19
13	Dorada	73	10	0	1,35	1	1	0	0	0	700	0,51
14	Yuraguana	59	10	0	1,35	1	1	0	0	0	700	0,42
15	La Boca	50	10	0	1,20	1	1	0	0	0	0	0,21
16	La Llanita	40	11	0	1,30	1	1	0	0	0	0	0,33
17	Punta Tomate	50	12	5	1,30	1	1	0	0	0	780	0,36
18	Los Jarros	46	11	0	1,35	1	1	0	0	0	500	0,57
19	Corella	212	11	0	1,30	1	2	0	0	0	900	0,33
20	La Herradura	56	11	5	1,35	1	1	0	0	0	0	0,45
21	Ensenada Honda	65	12	5	1,35	1	1	0	0	0	590	0,43
22	Las Azules	72	12	0	1,35	1	2	0	0	0	700	0,29
23	Juan Antonio	38	10	0	1,30	1	1	0	0	0	250	0,48
24	Caletones	45	12	0	1,30	1	1	0	0	0	250	0,38
25	Los Bajos	60	12	8	1,25	1	1	0	0	0	300	0,39
26	Blanca	38	12	26	1,25	1	0	0	0	0	0	0,23
27	Don Lino	48	12	36	1,35	1	0	0	0	0	100	0,55
28	Minint	17	10	7	1,35	1	0	0	0	0	80	0,53
29	Pesquero	52	12	18	1,35	1	1	0	0	0	0	0,32
30	Yuraguanal	60	10	10	1,25	1	1	0	0	0	620	0,24
31	Estero Ciego	75	12	8	1,50	2	0	0	0	1	700	0,31
32	Guardalavaca	51	11	40	1,35	1	1	0	0	0	300	0,21
33	Del Muerto	35	12	0	1,20	1	1	0	0	0	250	0,42
34	Larga	39	12	0	1,30	1	1	0	0	0	350	0,36
35	Manglito	91	11	10	1,25	2	2	0	0	0	250	0,42
36	Punta de Mulas	83	10	15	1,25	1	1	0	0	0	250	0,42
37	Puerto Rico	85	10	10	1,25	2	1	0	0	0	250	0,44
38	Morales	46	10	0	1,25	1	1	0	0	0	250	0,49
39	Carmona	100	10	0	1,30	1	1	0	0	0	120	0,45
40	Baracutey	56	10	0	1,30	1	1	0	0	0	120	0,40
41	Larga Saetía	55	10	0	1,30	1	0	0	0	0	300	0,54

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6. Identificación de geo formas de estados geomorfológicos en playas del litoral nororiental para la etapa de invierno (enero-febrero/2018) (continuación).

No.	Playa	Ancho total	Ancho cara	Ancho berma	H. Berma	Nº crestas	Nº barras	Pres. cúspides	Corr. retorno	Osc. rítmica	Dist. arrecifes	Md (D50)
42	Corinthia	68	12	7	1,30	1	0	0	0	0	600	0,39
43	Barrederas	59	12	5	1,30	1	0	0	0	0	600	0,30
44	Mejías	69	13	5	1,30	1	1	0	0	0	700	0,35
45	Yamanigüey	58	10	10	1,40	1	1	0	0	0	300	0,41
46	Jaragua	63	11	12	1,40	1	1	0	0	0	450	0,21
47	Mercedes	90	15	46	1,35	1	0	0	0	0	200	0,42
48	Maguana	66	12	6	1,50	1	1	0	0	0	350	0,44
49	Cajuajo	48	10	8	1,35	1	0	0	0	0	200	0,37
50	Quibungo	47	15	0	1,35	1	0	0	0	0	200	0,43
51	María	24	11	0	1,35	1	0	0	0	0	200	0,48
52	Manglito	36	10	3	1,35	1	1	0	0	0	250	0,41
53	Las Azules	75	15	0	1,40	1	1	0	0	0	250	0,43
54	Quemado	75	15	0	1,45	1	1	0	0	0	200	0,43
Moda		75	10	0	1,35	1	1	0	0	0	250	0,42
Media		57,55	11,24	8,02	1,33	1,11	0,76	0,00	0,00	0,04	441	0,39
Desv. Estándar		28,87	1,49	13,63	0,06	0,31	0,54	0,13	0,00	0,19	306	0,10

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7A. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión Este (Guantánamo).



Foto: R. Rodríguez, 2018.

Anexo 7B. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión central (Holguín).



Foto: R. Rodríguez, 2018.

Anexo 7B. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión central (Holguín)
(continuación).



Foto: R. Rodríguez, 2018.

Anexo 5B. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión central (Holguín)
(continuación).



Foto: R. Rodríguez, 2018.

Anexo 5C. Playas del litoral nororiental de Cuba. Subregión Oeste (Las Tunas).



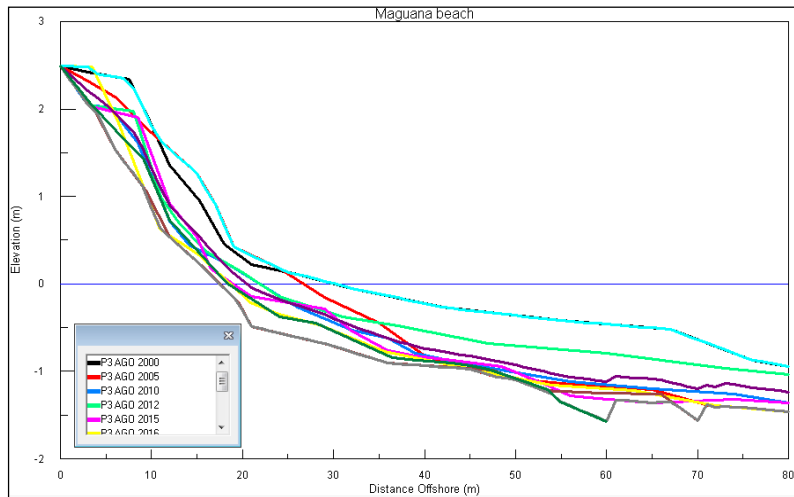
Foto: R. Rodríguez, 2018.

Anexo 8. Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth Pro y error de ajuste.

Sub región	Playa	Escala de tiempo (año)	Fecha	Error de ajuste
Guantánamo (Litoral Este)	Maguana	13	11, octubre 2003	0,202361
			18, diciembre 2007	0,150915
			06, agosto 2011	0,229078
			26, mayo 2013	0,193988
			23, enero 2017	0,228044
Holguín (Litoral central)	Guardalavaca	14	14, mayo 2003	0,187092
			04, mayo 2007	0,293175
			08, febrero 2013	0,229869
			24, diciembre 2014	0,295994
			21, enero 2017	0,161034
	Estero Ciego	13	22, septiembre 2003	0,168806
			04, mayo 2007	0,108585
			08, febrero 2013	0,164564
			11, agosto 2014	0,110211
			01, septiembre 2016	0,208422
	Pesquero	13	13, Julio 2003	0,109581
			07, noviembre 2013	0,243085
			24, diciembre 2014	0,067665
			09, septiembre 2016	0,096171
	Don Lino	13	13, Julio 2003	0,050198
			08, junio 2009	0,040732
			27, noviembre 2011	0,049429
			24, diciembre 2014	0,031104
			01, septiembre 2016	0,056129
	Blanca	7	30, junio 2009	0,110062
			27, noviembre 2011	0,121316
			08, febrero 2013	0,074739
			13, enero 2014	0,072386
			01, septiembre 2016	0,043896
Las Tunas (Litoral Oeste)	Corella	8	11, septiembre 2009	0,471692
			29, enero 2011	0,522457
			11, agosto 2013	0,579641
			13, enero 2016	0,643825
			26, mayo 2017	0,896807
	Tomate	8	11, septiembre 2009	0,143809
			29, enero 2011	0,186105
			11, agosto 2013	0,111176
			13, enero 2016	0,128197
			26, mayo 2017	0,053822
	La Llanita	8	11, septiembre 2009	0,113293
			29, enero 2011	0,141092
			11, agosto 2013	0,126651
			13, enero 2016	0,144285
			26, May 2017	0,232937

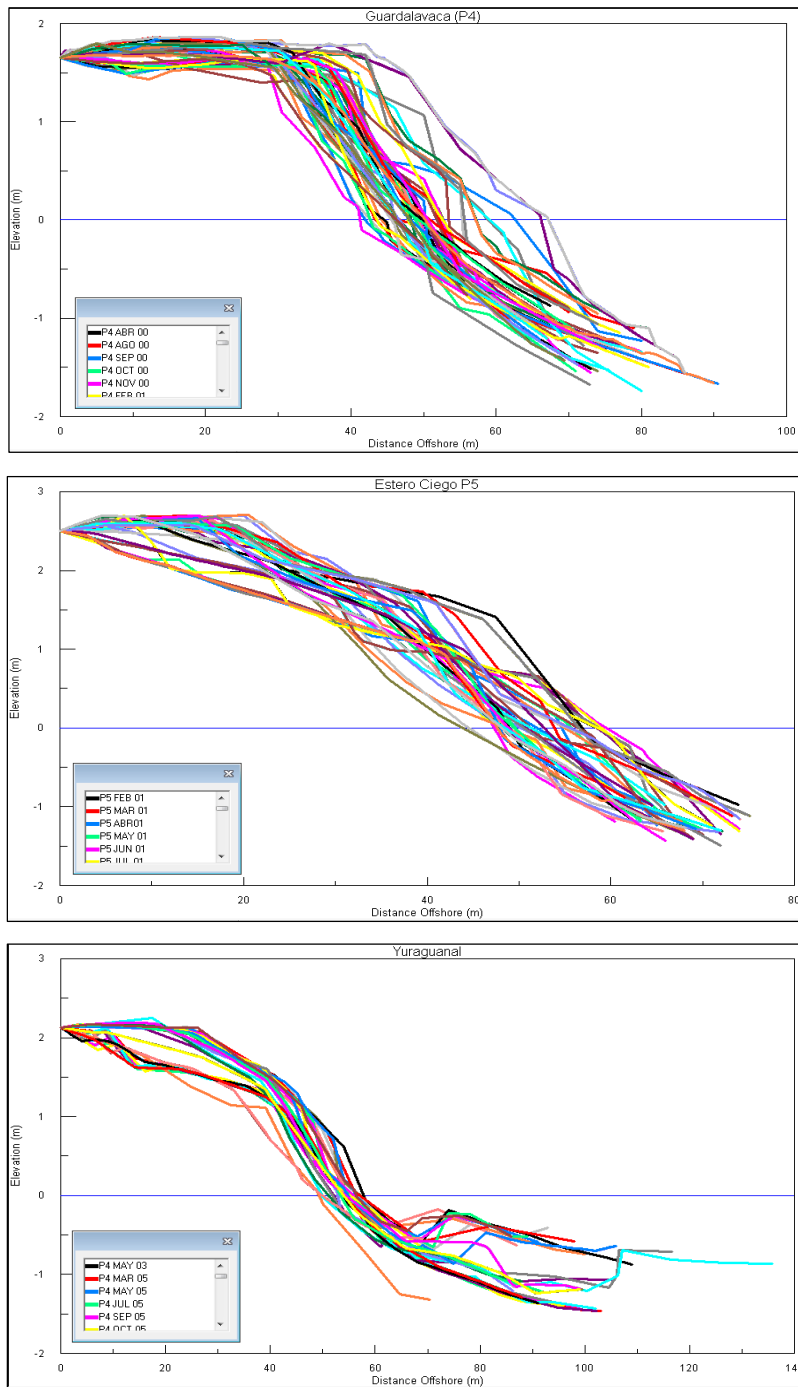
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9A. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión Este, Guantánamo).



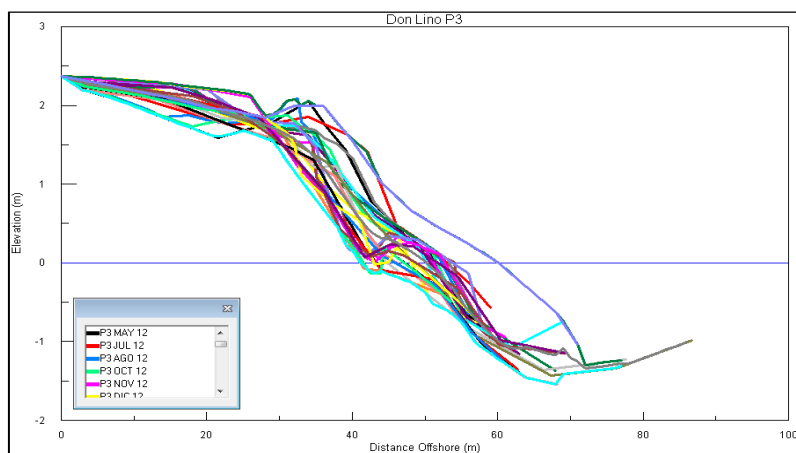
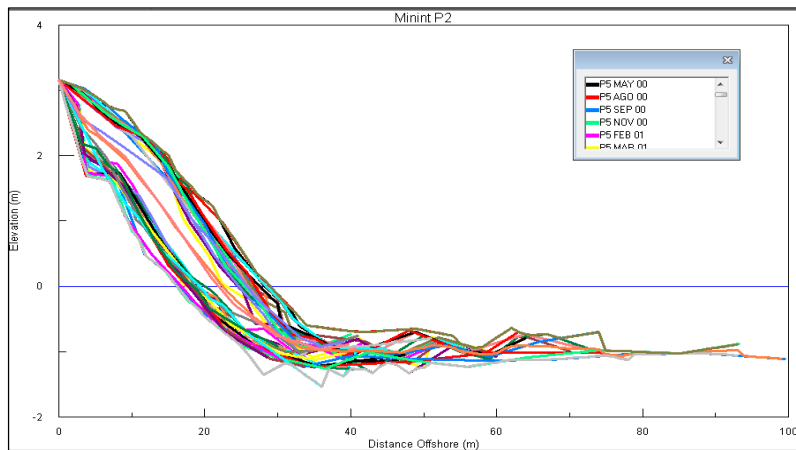
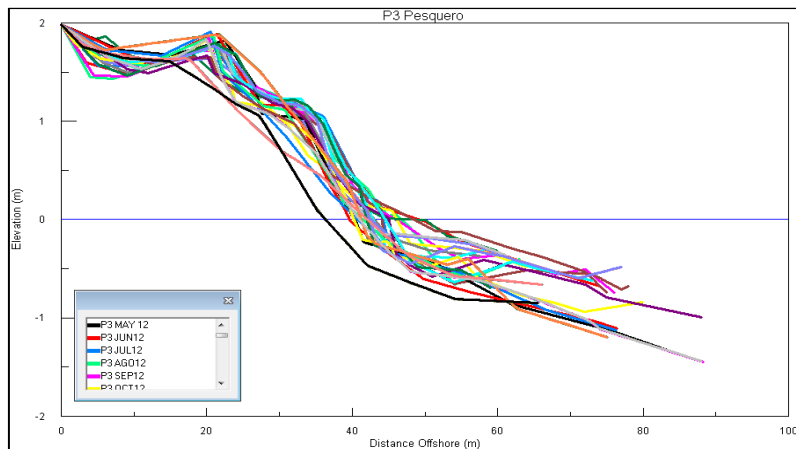
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9B. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión Central, Holguín).



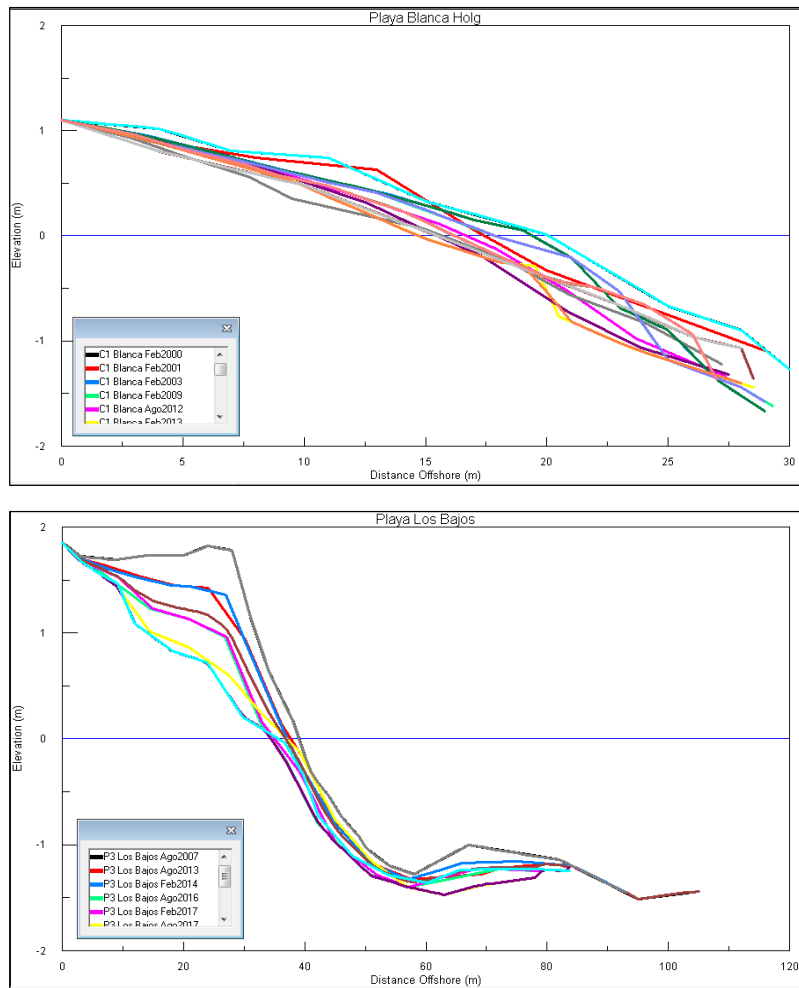
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9B. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión Central, Holguín) (continuación).



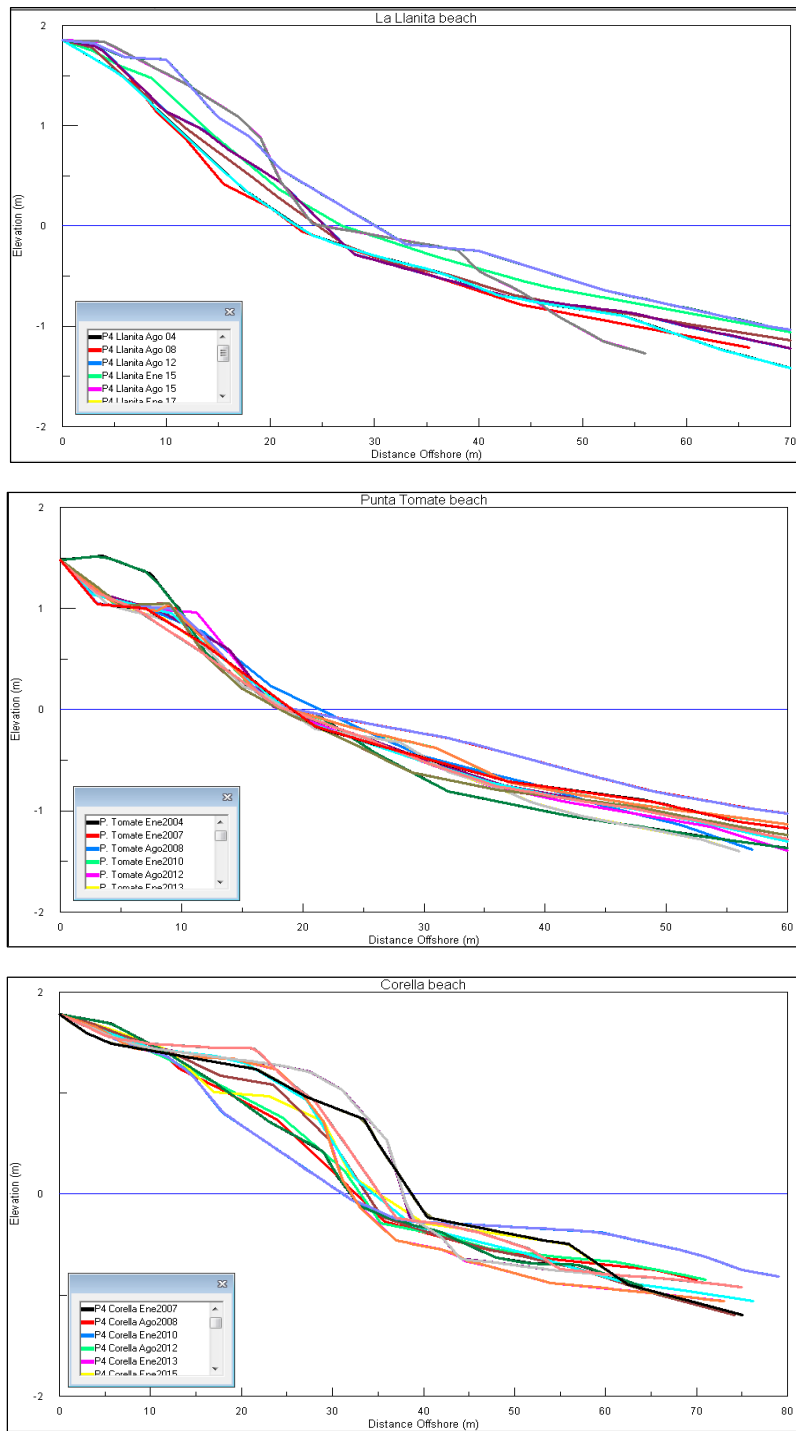
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9B. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión Central, Holguín) (continuación).



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9C. Perfiles utilizados para determinar el perfil medio histórico (Subregión Oeste, Las Tunas).



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Estado modal de las playas por rumbo de incidencia del oleaje.

Playa Maguana

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,71	6,56	0,78	8 grados	0,44 mm	0,070	2723	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,65	6,89	0,78	53 grados	0,44 mm	0,070	2723	1	Reflexivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,77	6,41	0,78	82 grados	0,44 mm	0,070	2723	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Este									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,73	0,68	6,06	0,78	37 grados	0,44 mm	0,070	2723	2	Intermedio

Playa Guardalavaca

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Oeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,75	0,91	5,79	0,78	23 grados	0,21 mm	0,039	2870	4	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	1,14	6,56	0,78	68 grados	0,21 mm	0,039	2870	4	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,89	6,89	0,78	67 grados	0,21 mm	0,039	2870	3	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,93	6,41	0,78	22 grados	0,21 mm	0,039	2870	4	Intermedio

Playa Estero Ciego

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Oeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,75	1,06	5,79	0,78	23 grados	0,31 mm	0,054	2870	3	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	1,06	6,56	0,78	68 grados	0,31 mm	0,054	2870	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,97	6,89	0,78	67 grados	0,31 mm	0,054	2870	2	Intermedio

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Estado modal de las playas por rumbo de incidencia del oleaje (continuación)

Playa Estero Ciego (continuación)

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,98	6,41	0,78	22 grados	0,31 mm	0,054	2870	2	Intermedio

Playa Yuraguanal

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Oeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,75	0,56	5,79	0,78	10 grado	0,24 mm	0,044	2794,8	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,61	6,56	0,78	35 grados	0,24 mm	0,044	2794,8	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,58	6,89	0,78	80 grados	0,24 mm	0,044	2794,8	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,60	6,41	0,78	55 grados	0,24 mm	0,044	2794,8	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Este									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,73	0,62	6,06	0,78	10 grados	0,24 mm	0,044	2794,8	2	Intermedio

Playa Pesquero

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Oeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,75	1,02	5,79	0,78	60 grados	0,32 mm	0,055	2711	3	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,84	6,56	0,78	75 grados	0,32 mm	0,055	2711	3	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,91	6,89	0,78	30 grados	0,32 mm	0,055	2711	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,98	6,41	0,78	1 grado	0,32 mm	0,055	2711	3	Intermedio

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Estado modal de las playas por rumbo de incidencia del oleaje (continuación)

Playa Minint

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Oeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,75	0,62	5,79	0,78	1 grados	0,53 mm	0,078	2797,3	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,67	6,56	0,78	45 grados	0,53 mm	0,078	2797,3	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,29	6,89	0,78	89 grados	0,53 mm	0,078	2797,3	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,61	6,41	0,78	45 grados	0,53 mm	0,078	2797,3	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Este									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,73	0,62	6,06	0,78	1 grado	0,53 mm	0,078	2797,3	1	Reflectivo

Playa Don Lino

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Oeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,75	0,62	5,79	0,78	10 grados	0,55 mm	0,080	2690	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,53	6,56	0,78	45 grados	0,55 mm	0,080	2690	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,28	6,89	0,78	89 grados	0,55 mm	0,080	2690	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,55	6,41	0,78	45 grados	0,55 mm	0,080	2690	1	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Este									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,73	0,58	6,06	0,78	1 grado	0,55 mm	0,080	2690	1	Reflectivo

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Estado modal de las playas por rumbo de incidencia del oleaje (continuación)

Playa Blanca

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	1,25	6,89	0,78	1 grado	0,23 mm	0,043	2795	4	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	1,15	6,56	0,78	46 grados	0,23 mm	0,043	2795	4	Intermedio

Los Bajos

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,60	6,89	0,78	89 grados	0,39	0,065	2723	1	Reflexivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,77	6,41	0,78	45 grados	0,39	0,065	2723	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Este									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,73	0,80	6,06	0,78	1 grado	0,39	0,065	2723	2	Intermedio

Playa Corella

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,52	6,56	0,78	30 grados	0,33 mm	0,057	2794,8	1	Reflexivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,53	6,89	0,78	75 grados	0,33 mm	0,057	2794,8	1	Reflexivo

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,54	6,41	0,78	30 grados	0,33 mm	0,057	2794,8	1	Reflexivo

Playa Punta Tomate

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,62	6,56	0,78	60 grados	0,36 mm	0,062	2794,8	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,61	6,89	0,78	75 grados	0,36 mm	0,062	2794,8	2	Intermedio

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Estado modal de las playas por rumbo de incidencia del oleaje (continuación)

Playa Punta Tomate (continuación)

Datos de oleaje					Datos del sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,67	6,41	0,78	30 grados	0,36 mm	0,062	2794,8	2	Intermedio

La Llanita

Datos de oleaje					Datos del Sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noroeste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,99	0,68	6,56	0,78	78 grados	0,33 mm	0,057	2723	2	Intermedio

Datos de oleaje					Datos del Sedimento			Estado Modal	
Rumbo Norte									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
2,00	0,69	6,89	0,78	33 grados	0,33 mm	0,057	2723	2	Reflectivo

Datos de oleaje					Datos del Sedimento			Estado Modal	
Rumbo Noreste									
Hb	Hbt	Periodo	I, Rompiente	A, Inciden	D ₅₀	ω_s	Densidad	Ω	Estado
1,92	0,67	6,41	0,78	14 grados	0,33 mm	0,057	2723	2	Intermedio

Fuente: Elaboración propia.

Leyenda:

- Hb, altura de la ola significativa (m),
- Hbt, altura de la ola en rompiente (m),
- A. Inciden, Angulo de incidencia del oleaje (grados),
- D₅₀, granulometría media de la arena (mm),
- ω_s , velocidad de caída (m/s),
- Ω , índice adimensional.

Anexo 11. Evaluación de procesos costeros a través de perfiles de playas.

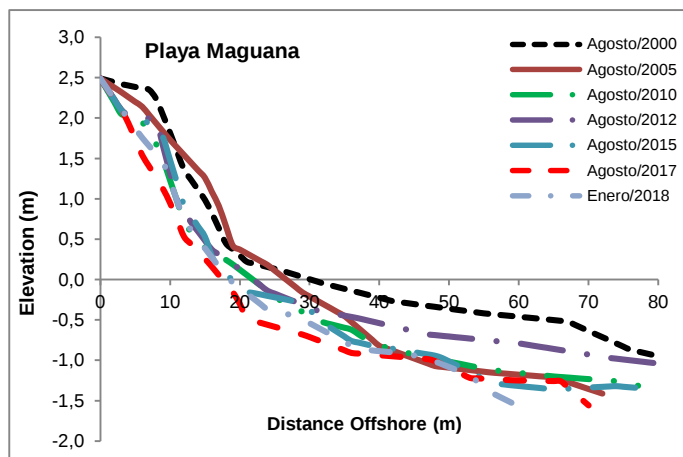


Figura A1. Perfiles de playa en las subregiones litoral Este. La erosión que se aprecia se explica por la ubicación del perfil en el centro de la playa, previamente identificado como un sitio sujeto a erosión o alta erosión.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Evaluación de procesos costeros a través de perfiles de playas (continuación).

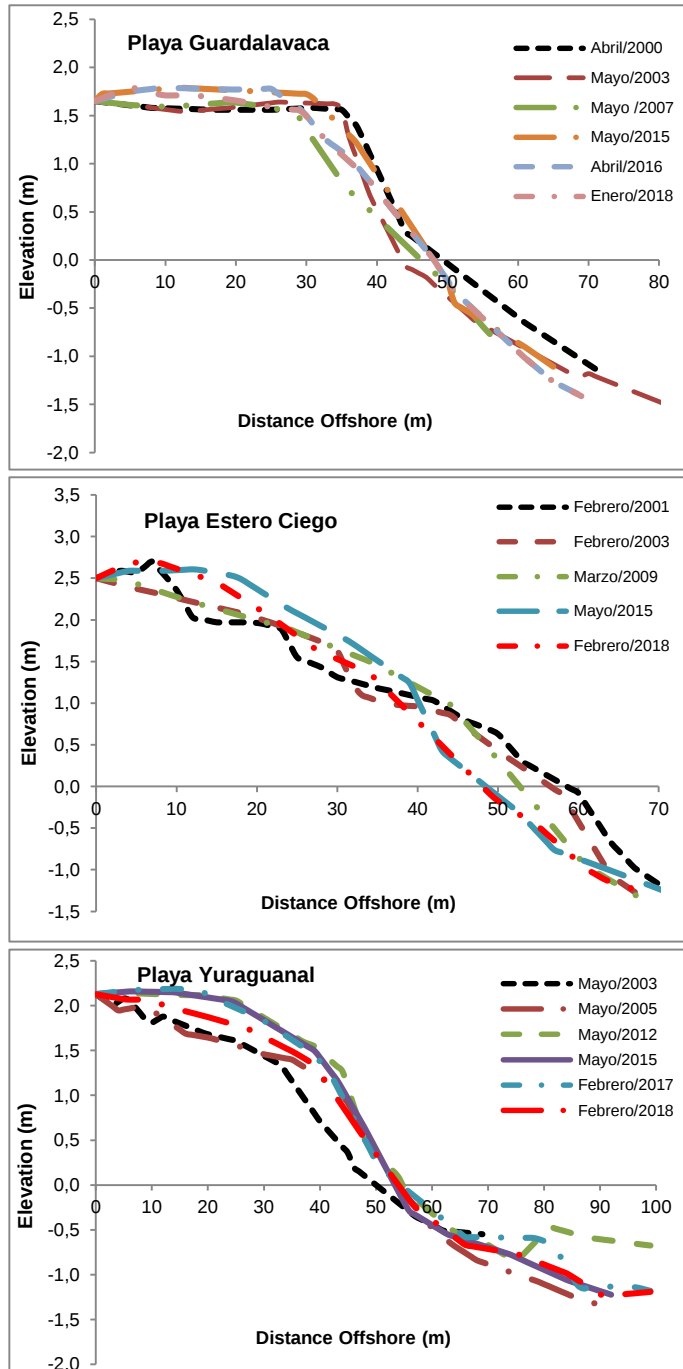


Figura A2. Perfiles de playas en la subregión central. La figura muestra, en general, retroceso continuo de la costa, coincidiendo con los resultados obtenidos en las imágenes satelitales.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Evaluación de procesos costeros a través de perfiles de playas (continuación).

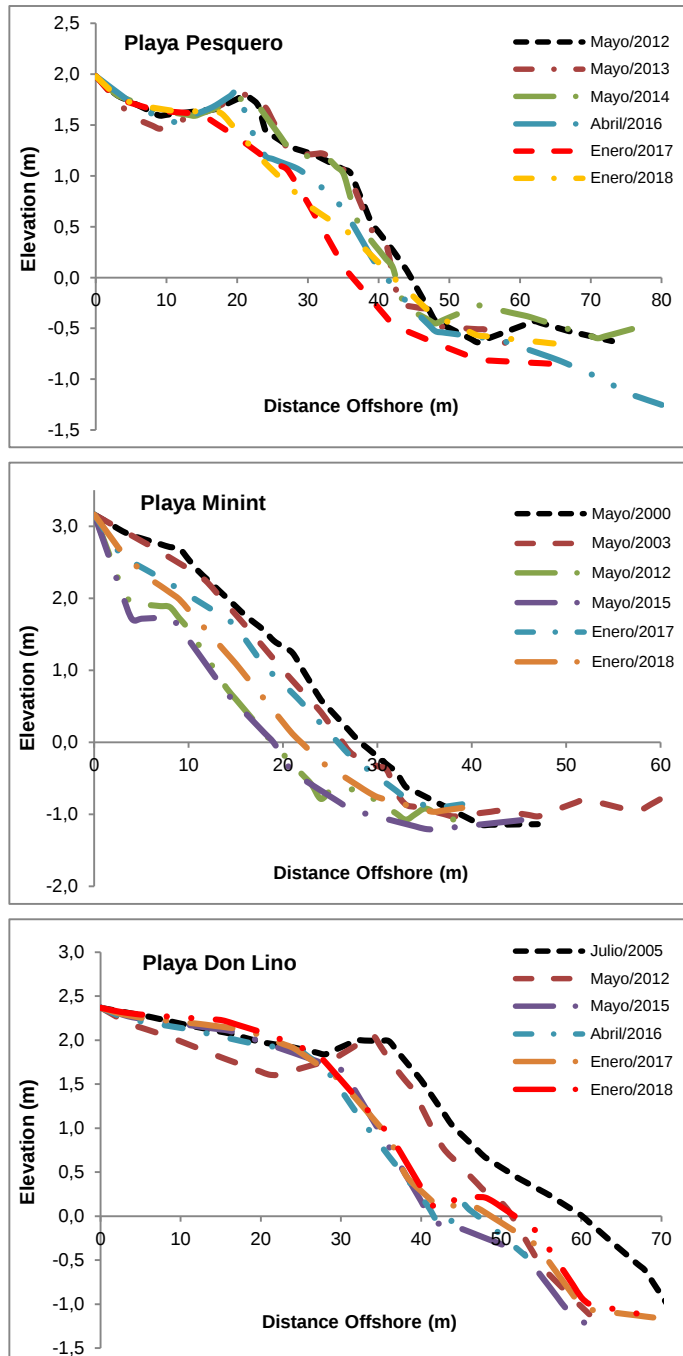


Figura A2. Perfiles de playas en la subregión central. La figura muestra, en general, retroceso continuo de la costa, coincidiendo con los resultados obtenidos en las imágenes satelitales.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Evaluación de procesos costeros a través de perfiles de playas (continuación).

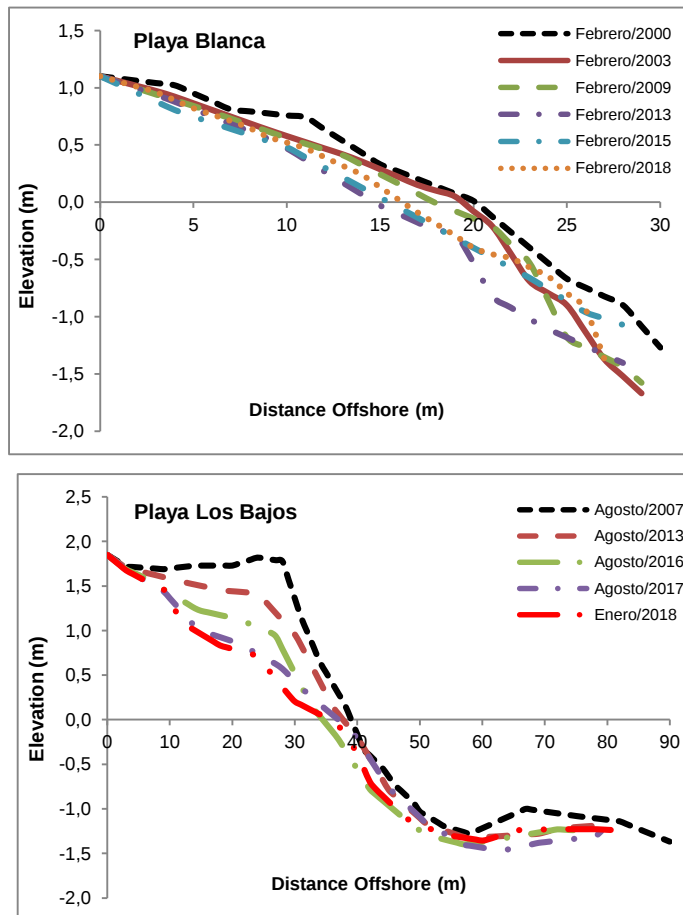


Figura A2. Perfiles de playas en la subregión central. La figura muestra, en general, retroceso continuo de la costa, coincidiendo con los resultados obtenidos en las imágenes satelitales.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Evaluación de procesos costeros a través de perfiles de playas (continuación).

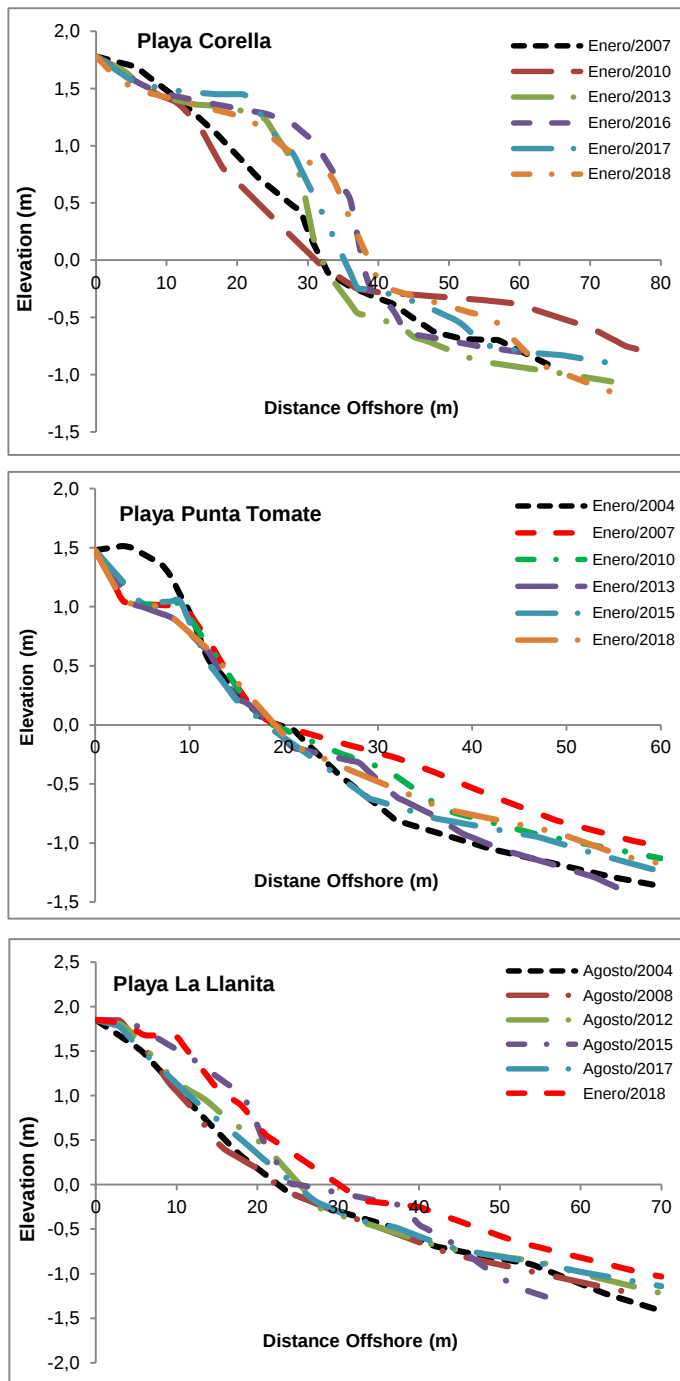


Figura A3. Perfiles de playas en la subregión litoral Oeste. En general hay estabilidad o acumulación.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12. Datos de entrada y resultados del experimento de velocidad de caída de arenas biogénicas.

Playa Guardalavaca
Fracción 0,84 – 2,00 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	G 0747	24,9	28,70	1	1.	0,031	0,034
				2	2.	0,021	0,024
2.	G 0748	24,9	28,70	1	3.	0,076	0,083
				2	4.	0,101	0,113
3.	G 0749	24,9	28,70	1	5.	0,155	0,128
				2	6.	0,060	0,067
4.	G 0750	24,9	28,70	1	7.	0,082	0,091
				2	8.	0,038	0,042
5.	G 0752	24,9	28,70	1	9.	0,073	0,081
				2	10.	0,072	0,080
6.	G 0753	24,9	28,70	1	11.	0,198	0,219
				2	12.	0,017	0,018
7.	G 0754	24,9	28,70	1	13.	0,191	0,212
				2	14.	0,091	0,101
8.	G 0755	24,9	28,70	1	15.	0,094	0,104
				2	16.	0,101	0,111
9.	G 0756	24,9	28,70	1	17.	0,034	0,038
				2	18.	0,117	0,130
10.	G 0757	24,9	28,70	1	19.	0,050	0,056
				2	20.	0,051	0,057
11.	G 0758	24,9	28,70	1	21.	0,059	0,065
				2	22.	0,027	0,029
12.	G 0759	24,9	28,70	1	23.	0,046	0,052
				2	24.	0,074	0,083
13.	G 0760	24,9	28,70	1	25.	0,096	0,107
				2	26.	0,135	0,150
14.	G 0762	24,9	28,70	1	27.	0,049	0,054
				2	28.	0,011	0,012
15.	G 0763	24,9	28,70	1	29.	0,038	0,042
				2	30.	0,130	0,145
16.	G 0765	24,9	28,70	1	31.	0,072	0,080
				2	32.	0,048	0,052
17.	G 0766	24,9	28,70	1	33.	0,070	0,078
				2	34.	0,059	0,065
18.	G 0767	24,9	28,70	1	35.	0,128	0,142
				2	36.	0,049	0,055
19.	G 0768	24,9	28,70	1	37.	0,026	0,027
				2	38.	0,084	0,094
20.	G 0769	24,9	28,70	1	39.	0,054	0,060
				2	40.	0,061	0,068
21.	G 0771	24,9	28,70	1	41.	0,126	0,140
				2	42.	0,188	0,209
22.	G 0772	24,9	28,70	1	43.	0,066	0,072

				2	44.	0,093	0,103
23.	G 0773	24,9	28,70	1	45.	0,038	0,041
				2	46.	0,078	0,086

Fuente: Elaboración propia.

Playa Guardalavaca
Fracción 0,425 – 0,84 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	G 0775	24,8	28,70	1	1.	0,084	0,089
				2	2.	0,068	0,071
2.	G 0776	24,8	28,70	1	3.	0,060	0,063
				1	4.	0,063	0,066
3.	G 0777	24,8	28,70	1	5.	0,056	0,059
				2	6.	0,067	0,071
4.	G 0778	24,8	28,70	1	7.	0,087	0,092
				2	8.	0,046	0,051
5.	G 0779	24,8	28,70	1	9.	0,093	0,097
				2	10.	0,101	0,106
6.	G 0780	24,8	28,70	1	11.	0,092	0,097
				2	12.	0,085	0,089
7.	G 0781	24,8	28,70	1	13.	0,048	0,050
				2	14.	0,071	0,074
8.	G 0782	24,8	28,70	1	15.	0,100	0,105
				2	16.	0,065	0,068
9.	G 0783	24,7	28,70	1	17.	0,014	0,015
				2	18.	0,073	0,077
10.	G 0784	24,8	28,70	1	19.	0,092	0,097
				2	20.	0,062	0,065
11.	G 0785	24,8	28,70	1	21.	0,037	0,039
				2	22.	0,094	0,099
12.	G 0788	24,9	28,70	1	23.	0,069	0,073
				2	24.	0,123	0,130
13.	G 0789	24,8	28,70	1	25.	0,189	0,197
				2	26.	0,095	0,100
14.	G 0790	24,9	28,70	1	27.	0,078	0,082
				2	28.	0,089	0,094
15.	G 0791	24,8	28,70	1	29.	0,045	0,048
				2	30.	0,150	0,156
16.	G 0792	24,8	28,70	1	31.	0,094	0,098
				2	32.	0,096	0,101
17.	G 0793	24,9	28,70	1	33.	0,111	0,116
				2	34.	0,010	0,011
18.	G 0795	24,8	28,70	1	35.	0,224	0,235
				2	36.	0,182	0,191
19.	G 0796	24,9	28,70	1	37.	0,073	0,077
				2	38.	0,071	0,074
20.	G 0797	24,8	28,70	1	39.	0,092	0,097
				2	40.	0,066	0,069
21.	G 0797	24,8	28,70	1	41.	0,092	0,097

				2	42.	0,100	0,105
22.	G 0799	24,9	28,70	1	43.	0,107	0,113
				2	44.	0,026	0,028
23.	G 0799	24,9	28,70	1	45.	0,098	0,103
				2	46.	0,046	0,048

Fuente: Elaboración propia.

Playa Guardalavaca
Fracción 0,25 – 0,425 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	G 0802	24,9	28,70	1	1.	0,045	0,046
				2	2.	0,040	0,041
2.	G 0803	24,9	28,70	1	3.	0,068	0,069
				2	4.	0,053	0,054
3.	G 0804	24,9	28,70	1	5.	0,084	0,086
				2	6.	0,076	0,078
4.	G 0805	24,9	28,70	1	7.	0,061	0,063
				2	8.	0,065	0,067
5.	G 0806	24,7	28,70	1	9.	0,056	0,057
				2	10.	0,054	0,055
6.	G 0807	24,7	28,70	1	11.	0,079	0,081
				2	12.	0,062	0,064
7.	G 0808	24,9	28,70	1	13.	-	-
				2	14.	0,053	0,054
8.	G 0810	24,8	28,70	1	15.	-	-
9.	G 0811	24,8	28,70	1	16.	0,071	0,073
				2	17.	0,057	0,059
10.	G 0812	24,8	28,70	1	18.	0,056	0,058
				2	19.	0,057	0,058
11.	G 0814	24,8	28,70	1	20.	-	-
				2	21.	0,049	0,051
12.	G 0815	24,8	28,70	1	22.	-	-
				2	23.	0,057	0,059
13.	G 0816	24,7	28,70	1	24.	0,056	0,058
				2	25.	0,053	0,055
14.	G 0817	24,8	28,70	1	26.	0,056	0,058
				2	27.	0,061	0,062
15.	G 0818	24,8	28,70	1	28.	0,069	0,071
				2	29.	0,068	0,070
16.	G 0819	24,8	28,70	1	30.	0,057	0,059
				2	31.	0,050	0,052
17.	G 0820	24,9	28,70	1	32.	0,062	0,064
				2	33.	0,052	0,054
18.	G 0821	24,9	28,70	1	34.	0,067	0,069
				2	35.	0,068	0,069
19.	G 0822	24,8	28,70	1	36.	0,055	0,057
				2	37.	0,056	0,058
20.	G 0823	24,9	28,70	1	38.	0,052	0,053
				2	39.	0,052	0,053

21.	G 0824	24,8	28,70	1	40.	0,059	0,060
				2	41.	0,049	0,051
22.	G 0825	24,8	28,70	1	42.	0,050	0,052
				2	43.	0,055	0,056
23.	G 0826	24,8	28,70	1	44.	0,052	0,053
				2	45.	0,051	0,053
24.	G 0827	24,9	28,70	1	46.	0,072	0,074
				2	47.	0,061	0,062

Fuente: Elaboración propia.

Playa Guardalavaca

Fracción 0,106 – 0,25 mm

No.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	G 0828	24,4	28,70	1	1.	0,031	0,031
				2	2.	-	-
2.	G 0831	24,4	28,70	1	3.	0,041	0,041
3.	G 0832	24,4	28,70	1	4.	-	-
4.	G 0833	24,4	28,70	1	5.	-	-
5.	G 0835	24,4	28,70	1	6.	0,029	0,030
				2	7.	-	-
6.	G 0836	24,4	28,70	1	8.	0,035	0,035
7.	G 0837	24,4	28,70	1	9.	0,035	0,035
8.	G 0838	24,4	28,70	1	10.	0,032	0,033
				2	11.	-	-
9.	G 0839	24,4	28,70	1	12.	0,032	0,032
				2	13.	-	-
10.	G 0840	24,4	28,70	1	14.	-	-
				2	15.	0,029	0,029
11.	G 0841	24,3	28,70	1	16.	0,031	0,032
				2	17.	-	-
12.	G 0842	24,3	28,70	1	18.	0,029	0,029
				2	19.	-	-
13.	G 0843	24,4	28,70	1	20.	0,030	0,030
				2	21.	0,028	0,028

Fuente: Elaboración propia.

Playa Pesquero

Fracción 0,84 – 2,00 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	P 0915	24,0	27,11	1	1.	-	-
2.	P 0916	24,0	27,11	1	2.	0,173	0,191
				2	3.	0,024	0,026
3.	P 0917	24,1	27,11	1	4.	0,234	0,259
				2	5.	0,027	0,030
4.	P 0918	23,8	27,11	1	6.	0,069	0,077

				2	7.	0,183	0,202
5.	P 0919	23,8	27,11	1	8.	0,169	0,188
				2	9.	0,177	0,196
6.	P 0920	23,9	27,11	1	10.	0,098	0,109
				2	11.	0,191	0,211
7.	P 0922	24,0	27,11	1	12.	0,094	0,103
				2	13.	0,125	0,138
8.	P 0924	24,0	27,11	1	14.	0,142	0,157
				2	15.	0,243	0,270
9.	P 0925	24,1	27,11	1	16.	0,105	0,116
				2	17.	0,012	0,012
10.	P 0926	24,1	27,11	1	18.	0,061	0,068
				2	19.	0,047	0,052
11.	P 0927	24,2	27,11	1	20.	0,084	0,092
				2	21.	0,116	0,129
12.	P 0928	24,1	27,11	1	22.	0,096	0,107
				2	23.	0,119	0,211
13.	P 0929	24,2	27,11	1	24.	0,041	0,046
				2	25.	0,121	0,134
14.	P 0930	24,2	27,11	1	26.	0,022	0,023
				2	27.	0,059	0,065
15.	P 0931	24,3	27,11	1	28.	0,045	0,050
				2	29.	0,040	0,045
16.	P 0932	24,2	27,11	1	30.	0,107	0,118
				2	31.	0,091	0,101
17.	P 0933	24,2	27,11	1	32.	0,030	0,034
				2	33.	0,123	0,136
18.	P 0934	24,2	27,11	1	34.	0,073	0,081
				2	35.	0,093	0,103
19.	P 0935	24,3	27,11	1	36.	0,072	0,079
20.	P 0937	24,3	27,11	1	37.	0,169	0,188
				2	38.	0,049	0,054
22.	P 0938	24,3	27,11	1	39.	0,034	0,037
				2	40.	0,075	0,084
23.	P 0939	24,3	27,11	1	41.	0,055	0,060
				2	42.	0,043	0,048

Fuente: Elaboración propia.

Playa Pesquero
Fracción 0,425 – 0,84 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	P 0887	23,7	27,11	1	1.	0,107	0,112
				2	2.	0,057	0,060
2.	P 0888	23,9	27,11	1	3.	0,037	0,038
				2	4.	0,042	0,044
3.	P 0889	24,0	27,11	1	5.	0,148	0,155
				2	6.	0,094	0,099
4.	P 0891	24,0	27,11	1	7.	0,120	0,126
				2	8.	0,090	0,094
5.	P 0892	24,0	27,11	1	9.	0,149	0,157
				2	10.	0,078	0,082
6.	P 0893	24,0	27,11	1	11.	0,098	0,103
				2	12.	0,077	0,081
7.	P 0894	24,0	27,11	1	13.	0,046	0,048
				2	14.	0,060	0,062
8.	P 0895	24,1	27,11	1	15.	0,153	0,161
				2	16.	0,079	0,083
9.	P 0896	24,1	27,11	1	17.	0,071	0,075
				2	18.	0,111	0,117
10.	P 0897	24,1	27,11	1	19.	0,190	0,200
				2	20.	0,115	0,121
11.	P 0898	24,1	27,11	1	21.	0,083	0,087
				2	22.	0,068	0,071
12.	P 0899	24,1	27,11	1	23.	0,085	0,089
				2	24.	0,111	0,116
13.	P 0900	24,2	27,11	1	25.	0,079	0,083
				2	26.	0,092	0,097
14.	P 0901	24,2	27,11	1	27.	0,053	0,056
				2	28.	0,087	0,091
15.	P 0902	24,1	27,11	1	29.	0,160	0,168
				2	30.	0,057	0,060
16.	P 0903	24,2	27,11	1	31.	0,099	0,104
				2	32.	0,106	0,111
17.	P 0904	24,2	27,11	1	33.	-	-
				2	34.	0,096	0,101
18.	P 0905	24,2	27,11	1	35.	0,089	0,094
				2	36.	0,037	0,039
19.	P 0906	24,3	27,11	1	37.	0,067	0,071
				2	38.	0,088	0,093
20.	P 0907	24,3	27,11	1	39.	0,190	0,200

				2	40.	0,087	0,092
21.	P 0908	24,3	27,11	1	41.	0,120	0,126
				2	42.	0,038	0,040
22.	P 0909	24,3	27,11	1	43.	0,060	0,062
				2	44.	0,012	0,012
23.	P 0910	24,3	27,11	1	45.	0,088	0,092
				2	46.	0,058	0,060
24.	P 0912	24,3	27,11	1	47.	0,047	0,049
				2	48.	0,091	0,095
25.	P 0913	24,3	27,11	1	49.	0,049	0,052
				2	50.	0,076	0,080

Fuente: Elaboración propia.

Playa Pesquero
Fracción 0,25 – 0,425 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	P 0857	24,2	27,11	1	1.	0,069	0,071
				2	2.	0,058	0,060
2.	P 0858	24,2	27,11	1	3.	0,052	0,053
				2	4.	0,046	0,047
3.	P 0859	24,2	27,11	1	5.	0,058	0,060
				2	6.	0,056	0,058
4.	P 0860	24,3	27,11	1	7.	0,052	0,054
5.	P 0861	24,3	27,11	1	8.	0,055	0,057
				2	9.	0,052	0,054
6.	P 0862	24,4	27,11	1	10.	0,054	0,056
				2	11.	0,051	0,053
7.	P 0863	24,4	27,11	1	12.	0,053	0,054
				2	13.	0,054	0,056
8.	P 0865	24,5	27,11	1	14.	0,060	0,061
				2	15.	0,057	0,058
9.	P 0866	24,5	27,11	1	16.	0,047	0,048
				2	17.	0,046	0,047
10.	P 0867	24,5	27,11	1	18.	0,056	0,058
				2	19.	0,056	0,058
11.	P 0868	24,5	27,11	1	20.	0,073	0,075
				2	21.	-	-
12.	P 0869	23,9	27,11	1	22.	-	-
				2	23.	0,053	0,056
13.	P 0871	24,1	27,11	1	24.	0,051	0,053
				2	25.	0,043	0,044
14.	P 0872	24,2	27,11	1	26.	0,053	0,054

				2	27.	0,021	0,022
15.	P 0873	24,2	27,11	1	28.	0,060	0,062
				2	29.	0,058	0,059
16.	P 0874	24,3	27,11	1	30.	0,056	0,057
				2	31.	0,060	0,062
17.	P 0875	24,3	27,11	1	32.	0,060	0,062
				2	33.	0,059	0,061
18.	P 0876	24,3	27,11	1	34.	0,056	0,057
				2	35.	0,052	0,054
19.	P 0878	24,4	27,11	1	36.	0,056	0,057
				2	37.	0,049	0,050
20.	P 0880	24,5	27,11	1	38.	-	-
				2	39.	0,052	0,053
21.	P 0881	24,4	27,11	1	40.	-	-
				2	41.	-	-
22.	P 0882	24,5	27,11	1	42.	0,056	0,057
				2	43.	-	-
23.	P 0883	24,5	27,11	1	44.	0,056	0,058
				2	45.	0,050	0,052
24.	P 0884	24,5	27,11	1	46.	0,067	0,068
				2	47.	0,057	0,058
25.	P 0885	24,5	27,11	1	48.	0,053	0,055
				2	49.	0,052	0,053

Fuente: Elaboración propia.

Playa Pesquero
Fracción 0,106 – 0,25 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	P 1188	21,0	27,11	1	1.	0,026	0,026
2.	P 1189	21,2	27,11	1	2.	0,027	0,028
3.	P 1190	21,3	27,11	1	3.	0,026	0,027
4.	P 1191	21,3	27,11	1	4.	0,029	0,030
5.	P 1192	21,4	27,11	1	5.	0,029	0,030
6.	P 1193	21,5	27,11	1	6.	0,032	0,032
7.	P 1195	21,7	27,11	1	7.	0,031	0,031
8.	P 1196	21,7	27,11	1	8.	0,028	0,029
9.	P 1197	21,8	27,11	1	9.	0,029	0,029
10.	P 1198	21,9	27,11	1	10.	0,026	0,026
11.	P 1199	21,8	27,11	1	11.	0,026	0,026
12.	P 1200	21,9	27,11	1	12.	0,025	0,025
13.	P 1201	22,1	27,11	1	13.	0,026	0,027
14.	P 1202	22,2	27,11	1	14.	0,026	0,027

15.	P 1203	22,3	27,11	1	15.	0,026	0,026
16.	P 1204	22,5	27,11	1	16.	0,014	0,015
17.	P 1205	22,6	27,11	1	17.	0,029	0,030
18.	P 1206	22,7	27,11	1	18.	0,027	0,027
19.	P 1207	22,8	27,11	1	19.	0,027	0,027
20.	P 1208	22,9	27,11	1	20.	0,027	0,028
21.	P 1209	22,8	27,11	1	21.	0,028	0,028
22.	P 1210	23,0	27,11	1	22.	0,025	0,026
23.	P 1211	23,1	27,11	1	23.	0,028	0,028
24.	P 1212	23,2	27,11	1	24.	0,027	0,027
25.	P 1213	23,2	27,11	1	25.	0,028	0,028
26.	P 1214	23,2	27,11	1	26.	0,027	0,027

Fuente: Elaboración propia.

Playa Don Lino

Fracción 0,84 – 2,00 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	DL 0940	24,3	26,90	1	1.	0,126	0,140
				2	2.	0,055	0,061
2.	DL 0943	24,2	26,90	1	3.	0,116	0,128
				2	4.	0,019	0,020
3.	DL 0946	24,2	26,90	1	5.	0,043	0,047
				2	6.	0,043	0,047
4.	DL 0947	24,2	26,90	1	7.	0,128	0,142
				2	8.	0,046	0,051
5.	DL 0950	24,2	26,90	1	9.	0,439	0,488
				2	10.	0,213	0,236
6.	DL 0951	24,3	26,90	1	11.	0,093	0,103
				2	12.	0,136	0,150
7.	DL 0953	24,2	26,90	1	13.	0,064	0,071
				2	14.	0,230	0,255
8.	DL 0954	24,3	26,90	1	15.	0,098	0,108
				2	16.	0,120	0,135
9.	DL 0955	24,3	26,90	1	17.	0,108	0,120
				2	18.	0,069	0,076
10.	DL 0956	24,4	26,90	1	19.	0,143	0,158
				2	20.	0,053	0,059
11.	DL 0957	24,3	26,90	1	21.	0,042	0,047
				2	22.	0,033	0,037
12.	DL 0958	24,4	26,90	1	23.	0,121	0,134
				2	24.	0,011	0,012
13.	DL 0960	24,4	26,90	1	25.	0,131	0,145
				2	26.	0,267	0,296
14.	DL 0961	24,5	26,90	1	27.	0,080	0,089
				2	28.	0,140	0,155
15.	DL 0962	24,5	26,90	1	29.	0,118	0,131

				2	30.	0,034	0,038
16.	DL 0964	24,4	26,90	1	31.	0,040	0,045
				2	32.	0,083	0,092
17.	DL 0965	24,5	26,90	1	33.	-	-
				2	34.	0,070	0,077
18.	DL 0966	24,4	26,90	1	35.	0,053	0,059
				2	36.	0,068	0,076
19.	DL 0968	24,5	26,90	1	37.	0,045	0,050
				2	38.	0,064	0,071
20.	DL 0969	24,5	26,90	1	39.	0,043	0,048
				2	40.	0,095	0,106

Fuente: Elaboración propia.

Playa Don Lino

Fracción 0,425 – 0,84 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	DL 0970	23,1	26,90	1	1.	0,028	0,029
				2	2.	0,092	0,097
2.	DL 0972	22,5	26,90	1	3.	0,099	0,104
				2	4.	0,094	0,098
				3	5.	0,077	0,080
3.	DL 0974	22,7	26,90	1	6.	-	-
				2	7.	0,097	0,102
4.	DL 0975	22,7	26,90	1	8.	0,123	0,129
				2	9.	0,076	0,080
5.	DL 0977	22,6	26,90	1	10.	0,062	0,065
				2	11.	0,031	0,033
6.	DL 0978	22,6	26,90	1	12.	0,075	0,079
				2	13.	0,036	0,038
7.	DL 0979	22,6	26,90	1	14.	0,123	0,128
				2	15.	0,095	0,100
8.	DL 0980	22,6	26,90	1	16.	0,097	0,102
				2	17.	0,092	0,097
9.	DL 0981	22,6	26,90	1	18.	0,175	0,184
				2	19.	0,097	0,102
10.	DL 0982	22,6	26,90	1	20.	0,086	0,090
				2	21.	0,082	0,086
11.	DL 0983	22,7	26,90	1	22.	0,102	0,107
				2	23.	0,015	0,014
12.	DL 0984	22,7	26,90	1	24.	0,066	0,070
				2	25.	0,130	0,136
13.	DL 0985	22,8	26,90	1	26.	0,092	0,097
				2	27.	0,070	0,074
14.	DL 0986	22,8	26,90	1	28.	0,109	0,114
				2	29.	0,075	0,079
15.	DL 0987	22,8	26,90	1	30.	0,110	0,116
				2	31.	0,090	0,094
16.	DL 0988	22,8	26,90	1	32.	0,071	0,074
				2	33.	0,066	0,070

17.	DL 0989	22,9	26,90	1	34.	0,066	0,069
				2	35.	0,053	0,056
18.	DL 0990	22,8	26,90	1	36.	0,052	0,054
				2	37.	0,029	0,031
19.	DL 0991	22,9	26,90	1	38.	0,083	0,087
				2	39.	0,118	0,124
20.	DL 0992	22,9	26,90	1	40.	0,055	0,057
				2	41.	0,065	0,069
21.	DL 0993	23,0	26,90	1	42.	0,104	0,109
				2	43.	0,087	0,092
22.	DL 0994	23,0	26,90	1	44.	0,073	0,077
				2	45.	0,099	0,104
23.	DL 0995	23,1	26,90	1	46.	0,062	0,065
				2	47.	0,057	0,060
24.	DL 0996	23,1	26,90	1	48.	0,095	0,100
				2	49.	0,093	0,097
25.	DL 0997	23,1	26,90	1	50.	0,385	0,405
				2	51.	0,110	0,116
26.	DL 0998	23,2	26,90	1	52.	0,568	0,596
				2	53.	0,092	0,096
27.	DL 0999	23,2	26,90	1	54.	0,070	0,074
				2	55.	0,046	0,048

Fuente: Elaboración propia.

Playa Don Lino

Fracción 0,25 – 0,425 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	DL 1135	24,8	26,90	1	1.	0,039	0,040
2.	DL 1136	24,8	26,90	1	2.	0,050	0,051
3.	DL 1137	24,8	26,90	1	3.	0,056	0,058
4.	DL 1138	24,8	26,90	1	4.	0,051	0,052
5.	DL 1139	24,8	26,90	1	5.	0,060	0,061
6.	DL 1141	24,9	26,90	1	6.	0,058	0,059
7.	DL 1142	24,9	26,90	1	7.	0,059	0,060
8.	DL 1143	24,9	26,90	1	8.	-	-
9.	DL 1144	24,9	26,90	1	9.	0,059	0,060
				2	10.	0,057	0,059
10.	DL 1145	24,9	26,90	1	11.	-	-
11.	DL 1146	24,9	26,90	1	12.	0,051	0,053
				2	13.	0,048	0,049
12.	DL 1147	24,9	26,90	1	14.	-	-
				2	15.	0,059	0,060
13.	DL 1148	25,0	26,90	1	16.	-	-
				2	17.	-	-
14.	DL 1149	24,9	26,90	1	18.	0,058	0,060
				2	19.	-	-
15.	DL 1150	25,1	26,90	1	20.	0,059	0,061
				2	21.	-	-
16.	DL 1151	25,1	26,90	1	22.	0,052	0,054

				2	23.	0,056	0,057
17.	DL 1152	25,1	26,90	1	24.	0,052	0,054
				2	25.	0,050	0,051
18.	DL 1153	25,0	26,90	1	26.	0,061	0,063
				2	27.	0,058	0,059
19.	DL 1154	25,0	26,90	1	28.	-	-
				2	29.	0,045	0,046
20.	DL 1155	25,0	26,90	1	30.	0,049	0,050
				2	31.	0,045	0,046
21.	DL 1156	25,0	26,90	1	32.	0,035	0,036
				2	33.	0,038	0,039
22.	DL 1157	25,0	26,90	1	34.	0,057	0,059
				2	35.	0,053	0,055

Fuente: Elaboración propia.

Playa Don Lino

Fracción 0,106 – 0,25 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	DL 1030	23,2	26,90	1	1.	0,032	0,032
				2	2.	-	-
2.	DL 1031	23,2	26,90	1	3.	0,034	0,035
				2	4.	0,035	0,036
3.	DL 1032	23,2	26,90	1	5.	0,040	0,040
				2	6.	0,031	0,031
4.	DL 1033	23,3	26,90	1	7.	0,037	0,037
5.	DL 1035	23,4	26,90	1	8.	0,042	0,043
				2	9.	0,030	0,030
6.	DL 1036	23,4	26,90	1	10.	0,030	0,030
				2	11.	-	-
7.	DL 1037	23,5	26,90	1	12.	0,028	0,029
8.	DL 1038	23,6	26,90	1	13.	0,031	0,031
9.	DL 1039	23,6	26,90	1	14.	0,029	0,030
				2	15.	0,029	0,030
10.	DL 1040	23,7	26,90	1	16.	0,033	0,033
				2	17.	0,029	0,030
11.	DL 1041	23,8	26,90	1	18.	0,031	0,031
				2	19.	0,028	0,028
12.	DL 1042	23,7	26,90	1	20.	0,035	0,035
13.	DL 1044	23,8	26,90	1	21.	0,030	0,031
14.	DL 1045	24,2	26,90	1	22.	0,023	0,024
15.	DL 1046	24,3	26,90	1	23.	-	-
16.	DL 1047	24,3	26,90	1	24.	0,031	0,031
17.	DL 1048	24,3	26,90	1	25.	0,029	0,030
18.	DL 1049	24,3	26,90	1	26.	-	-
19.	DL 1050	24,3	26,90	1	27.	-	-
20.	DL 1054	24,5	26,90	1	28.	0,029	0,030
21.	DL 1055	24,5	26,90	1	29.	0,033	0,034
22.	DL 1056	24,5	26,90	1	30.	0,027	0,028
				2	31.	-	-

23.	DL 1057	24,5	26,90	1	32.	0,029	0,030
24.	DL 1058	24,5	26,90	1	33.	0,024	0,025
25.	DL 1059	24,6	26,90	1	34.	-	-
26.	DL 1060	24,6	26,90	1	35.	0,036	0,037
27.	DL 1062	24,7	26,90	1	36.	0,031	0,032
28.	DL 1063	24,7	26,90	1	37.	0,032	0,032
29.	DL 1064	24,7	26,90	1	38.	0,027	0,028
30.	DL 1065	24,7	26,90	1	39.	0,029	0,030
31.	DL 1067	24,8	26,90	1	40.	0,029	0,029
32.	DL 1069	24,8	26,90	1	41.	0,030	0,030
33.	DL 1073	25,0	26,90	1	42.	0,035	0,035

Fuente: Elaboración propia.

Playa Nordeste de Cuba (compuesta)

Fracción 0,84 – 2,00 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	NE 1074	24,2	27,23	1	1.	0,141	0,157
				2	2.	0,036	0,039
2.	NE 1075	24,2	27,23	1	3.	0,129	0,143
				2	4.	0,044	0,048
3.	NE 1076	24,2	27,23	1	5.	0,074	0,082
				2	6.	0,107	0,118
4.	NE 1078	24,3	27,23	1	7.	0,024	0,025
				2	8.	0,200	0,222
5.	NE 1088	24,4	27,23	1	9.	0,309	0,342
				2	10.	0,068	0,074
6.	NE 1089	24,5	27,23	1	11.	-	-
				2	12.	0,097	0,108
7.	NE 1090	24,5	27,23	1	13.	0,026	0,028
				2	14.	0,026	0,029
8.	NE 1091	24,5	27,23	1	15.	0,030	0,032
				2	16.	0,119	0,131
9.	NE 1092	24,5	27,23	1	17.	0,221	0,246
				2	18.	0,099	0,109
10.	NE 1093	24,5	27,23	1	19.	0,144	0,160
				2	20.	0,121	0,134
11.	NE 1094	24,5	27,23	1	21.	0,258	0,287
				2	22.	0,023	0,026
12.	NE 1095	24,5	27,23	1	23.	0,118	0,131
				2	24.	0,044	0,048
13.	NE 1095	24,5	27,23	1	25.	0,115	0,128
				2	26.	0,021	0,022
14.	NE 1095	24,5	27,23	1	27.	0,303	0,337
				2	28.	0,073	0,081
15.	NE 1098	24,7	27,23	1	29.	0,073	0,081
				2	30.	0,124	0,137
16.	NE 1099	24,7	27,23	1	31.	0,033	0,036
				2	32.	0,015	0,016
17.	NE 1100	24,8	27,23	1	33.	0,219	0,243

				2	34.	0,061	0,068
18.	NE 1101	24,8	27,23	1	35.	0,071	0,079
				2	36.	0,130	0,145
19.	NE 1102	24,8	27,23	1	37.	0,115	0,127
				2	38.	0,112	0,124
20.	NE 1103	24,9	27,23	1	39.	0,188	0,208
				2	40.	0,064	0,072

Fuente: Elaboración propia.

Playa Nordeste de Cuba (compuesta)

Fracción 0,425 – 0,84 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	NE 1105	24,7	27,23	1	1.	0,064	0,068
				2	2.	0,053	0,055
2.	NE 1107	24,7	27,23	1	3.	0,090	0,095
				2	4.	0,115	0,121
3.	NE 1108	24,7	27,23	1	5.	0,092	0,097
				2	6.	0,146	0,153
4.	NE 1109	24,7	27,23	1	7.	0,092	0,097
				2	8.	0,068	0,072
5.	NE 1110	24,7	27,23	1	9.	0,263	0,276
				2	10.	0,080	0,084
6.	NE 1111	24,7	27,23	1	11.	0,077	0,081
				2	12.	0,091	0,096
7.	NE 1112	24,8	27,23	1	13.	0,103	0,108
				2	14.	0,080	0,084
8.	NE 1113	24,7	27,23	1	15.	0,057	0,060
				2	16.	0,102	0,108
9.	NE 1114	24,7	27,23	1	17.	0,102	0,107
				2	18.	0,093	0,098
10.	NE 1115	24,7	27,23	1	19.	0,097	0,102
				2	20.	0,108	0,113
11.	NE 1116	24,6	27,23	1	21.	0,300	0,315
				2	22.	0,048	0,050
12.	NE 1117	24,6	27,23	1	23.	0,083	0,087
				2	24.	0,060	0,063
13.	NE 1118	24,7	27,23	1	25.	0,133	0,140
				2	26.	0,078	0,082
14.	NE 1119	24,6	27,23	1	27.	0,130	0,137
				2	28.	0,079	0,083
15.	NE 1120	24,6	27,23	1	29.	0,117	0,123
				2	30.	0,101	0,106
16.	NE 1122	24,6	27,23	1	31.	0,080	0,084
				2	32.	0,077	0,081
17.	NE 1123	24,6	27,23	1	33.	0,069	0,073
				2	34.	0,057	0,060
18.	NE 1124	24,6	27,23	1	35.	0,060	0,063
				2	36.	0,100	0,105
19.	NE 1125	24,6	27,23	1	37.	0,015	0,014

				2	38.	0,095	0,099
20.	NE 1126	24,7	27,23	1	39.	0,078	0,082
				2	40.	-	-
21.	NE 1127	24,7	27,23	1	41.	0,057	0,060
				2	42.	0,048	0,051
22.	NE 1128	24,7	27,23	1	43.	0,095	0,100
				2	44.	0,088	0,093
23.	NE 1129	24,7	27,23	1	45.	0,031	0,032
				2	46.	0,094	0,099
24.	NE 1130	24,7	27,23	1	47.	0,110	0,115
				2	48.	0,094	0,099
25.	NE 1132	24,7	27,23	1	49.	0,077	0,081
				2	50.	0,072	0,075

Fuente: Elaboración propia.

Playa Nordeste de Cuba (compuesta)

Fracción 0,25 – 0,425 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	NE 1001	22,5	27,23	1	1.	0,060	0,061
				2	2.	-	-
2.	NE 1002	22,5	27,23	1	3.	0,076	0,078
				2	4.	0,061	0,062
3.	NE 1003	22,6	27,23	1	5.	0,065	0,067
				2	6.	0,056	0,058
4.	NE 1004	22,6	27,23	1	7.	0,060	0,062
5.	NE 1005	22,7	27,23	1	8.	0,077	0,079
6.	NE 1006	22,7	27,23	1	9.	0,081	0,083
				2	10.	0,056	0,058
7.	NE 1007	22,7	27,23	1	11.	0,080	0,082
8.	NE 1008	22,8	27,23	1	12.	0,082	0,084
				2	13.	0,059	0,060
9.	NE 1009	22,8	27,23	1	14.	0,061	0,063
10.	NE 1010	22,8	27,23	1	15.	0,057	0,059
11.	NE 1011	22,8	27,23	1	16.	0,084	0,086
				2	17.	0,060	0,063
12.	NE 1012	22,7	27,23	1	18.	0,057	0,059
13.	NE 1013	22,8	27,23	1	19.	0,061	0,062
				2	20.	0,062	0,063
14.	NE 1014	22,8	27,23	1	21.	0,061	0,062
15.	NE 1015	22,8	27,23	1	22.	0,064	0,066
16.	NE 1016	22,8	27,23	1	23.	0,053	0,055
				2	24.	0,053	0,555
17.	NE 1017	22,7	27,23	1	25.	0,066	0,068
18.	NE 1018	22,8	27,23	1	26.	0,066	0,068
				2	27.	0,058	0,060
19.	NE 1019	22,8	27,23	1	28.	0,088	0,090
				2	29.	0,074	0,076
20.	NE 1020	22,8	27,23	1	30.	0,071	0,073
				2	31.	0,063	0,065

21.	NE 1021	22,8	27,23	1	32.	0,063	0,065
				2	33.	0,057	0,059
22.	NE 1022	22,7	27,23	1	34.	0,047	0,049
				2	35.	0,052	0,054
23.	NE 1023	22,7	27,23	1	36.	0,067	0,069
24.	NE 1024	22,7	27,23	1	37.	0,075	0,077
				2	38.	0,064	0,066
25.	NE 1025	22,7	27,23	1	39.	-	-
				2	40.	0,050	0,051
26.	NE 1025	22,7	27,23	1	41.	0,078	0,081
				2	42.	-	-
27.	NE 1027	22,8	27,23	1	43.	0,067	0,069
				2	44.	0,057	0,059
28.	NE 1028	22,8	27,23	1	45.	0,056	0,058
				2	46.	0,047	0,049

Fuente: Elaboración propia.

Playa Nordeste de Cuba (compuesta)

Fracción 0,106 – 0,25 mm

Nº.	Identific. Video	Temp. °C	Peso Esp. KN/m ³	Nº. Análisis	Nº. Ensayos	Vel. Caída. Medida	Vel. Caída. Corregida
1.	NE 1160	24,7	27,23	1	1.	-	-
2.	NE 1162	24,8	27,23	1	2.	0,032	0,033
3.	NE 1163	24,8	27,23	1	3.	0,029	0,029
4.	NE 1164	24,8	27,23	1	4.	0,049	0,049
				2	5.	-	-
5.	NE 1172	25,0	27,23	1	6.	0,029	0,029
6.	NE 1173	25,0	27,23	1	7.	0,036	0,036
7.	NE 1174	25,1	27,23	1	8.	-	-
8.	NE 1175	25,2	27,23	1	9.	0,028	0,029
9.	NE 1176	24,5	27,23	1	10.	0,024	0,025
10.	NE 1177	24,6	27,23	1	11.	0,029	0,029
11.	NE 1179	24,6	27,23	1	12.	-	-
12.	NE 1180	24,7	27,23	1	13.	-	-
13.	NE 1181	24,7	27,23	1	14.	0,032	0,033
14.	NE 1182	24,8	27,23	1	15.	0,031	0,031
15.	NE 1183	24,8	27,23	1	16.	-	-
16.	NE 1184	24,8	27,23	1	17.	0,033	0,033
17.	NE 1186	24,8	27,23	1	18.	-	-
18.	NE 1187	24,8	27,23	1	19.	0,041	0,042

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Curvas de los cinco modelos de ajuste del perfil de equilibrio.

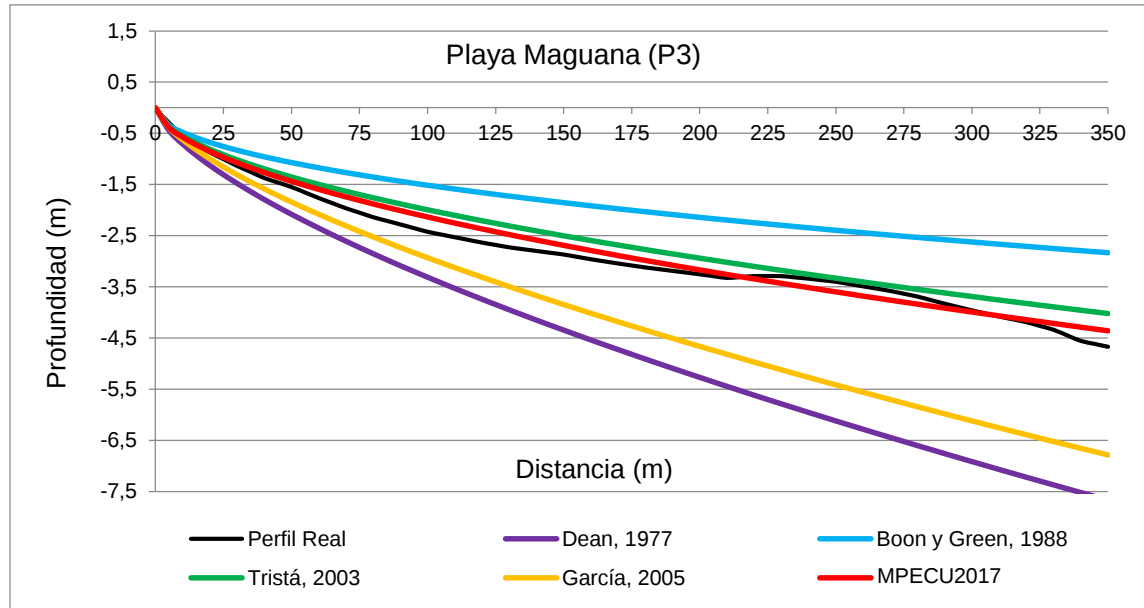


Figura A4. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Maguana. Fuente: Elaboración propia.

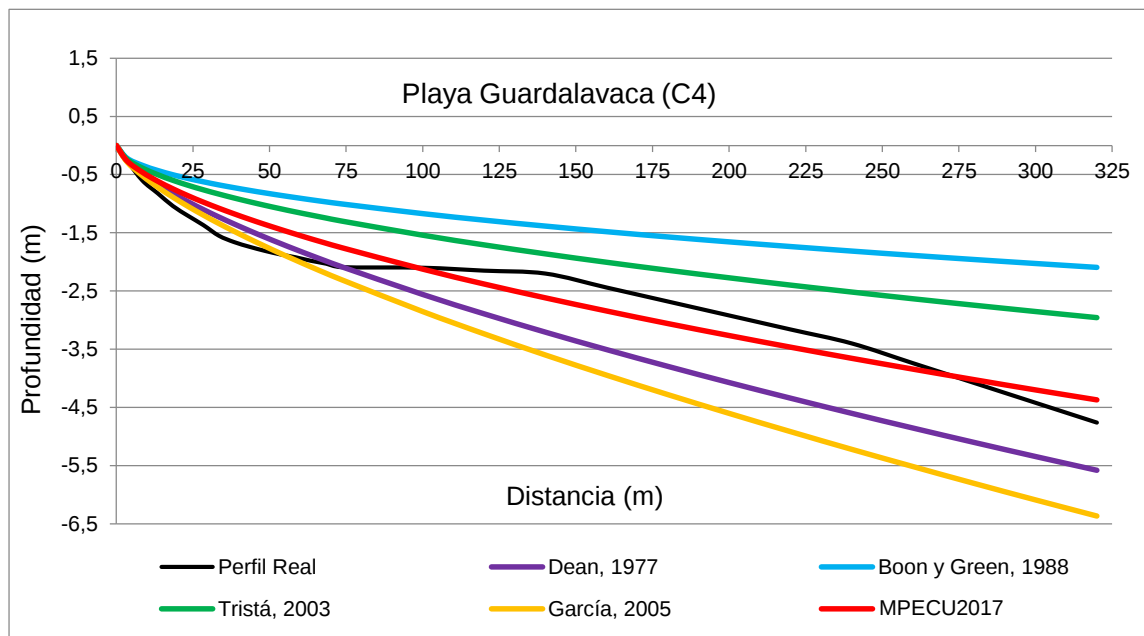


Figura A5. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Guardalavaca. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Curvas de los cinco modelos de ajuste del perfil de equilibrio (continuación).

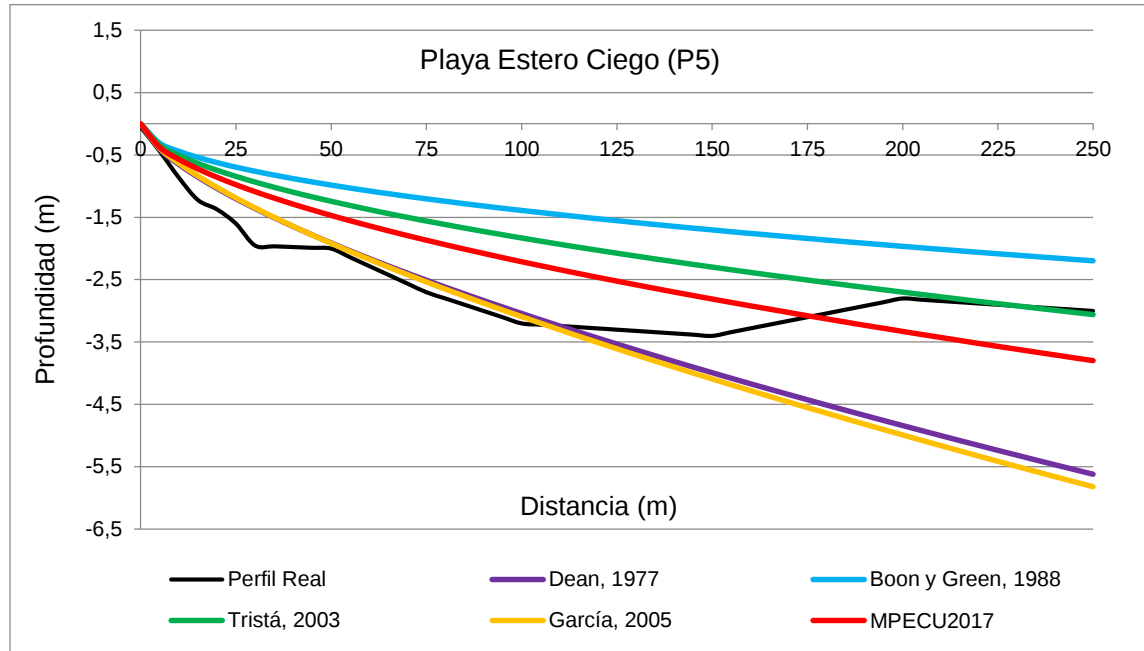


Figura A6. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Estero Ciego.
Fuente: Elaboración propia.

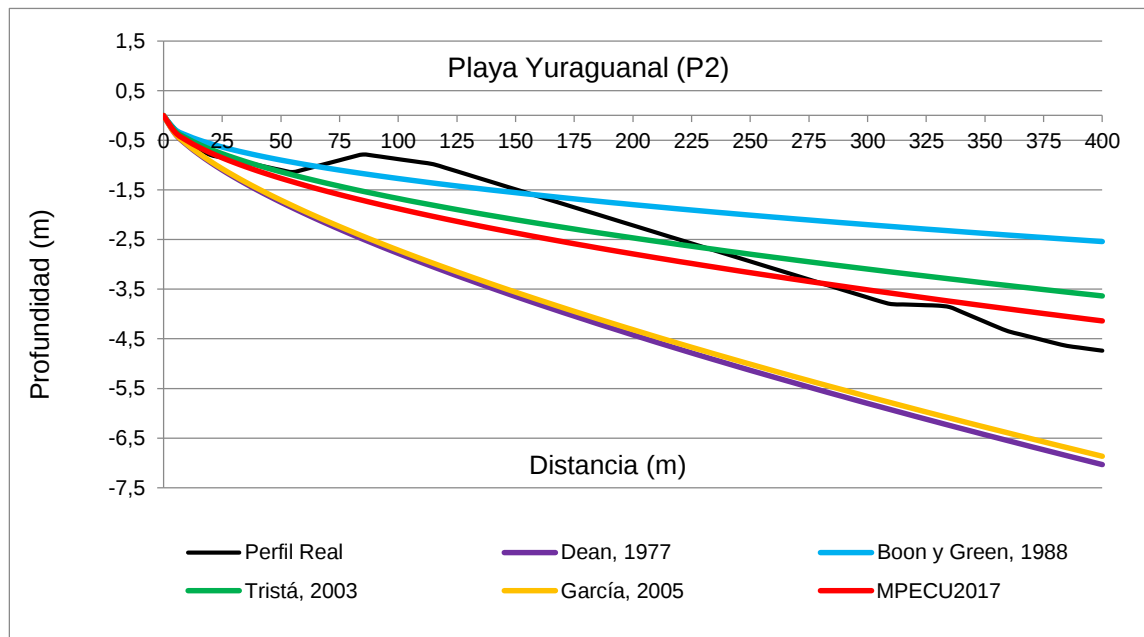


Figura A7. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Yuraguanal.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Curvas de los cinco modelos de ajuste del perfil de equilibrio (continuación).

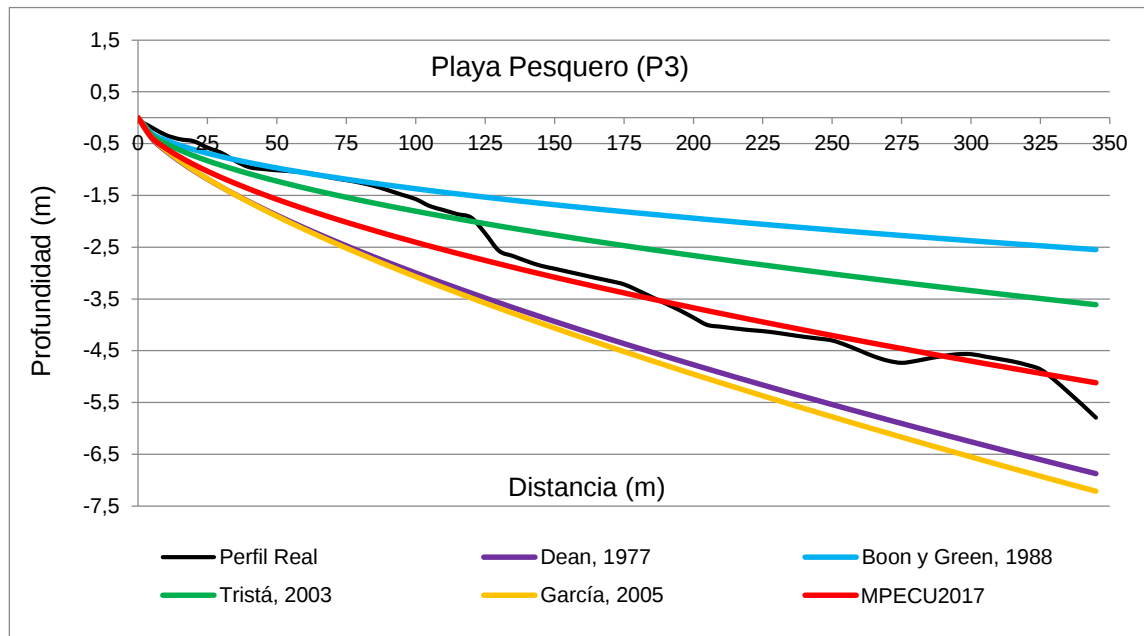


Figura A8. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Pesquero. Fuente: Elaboración propia.

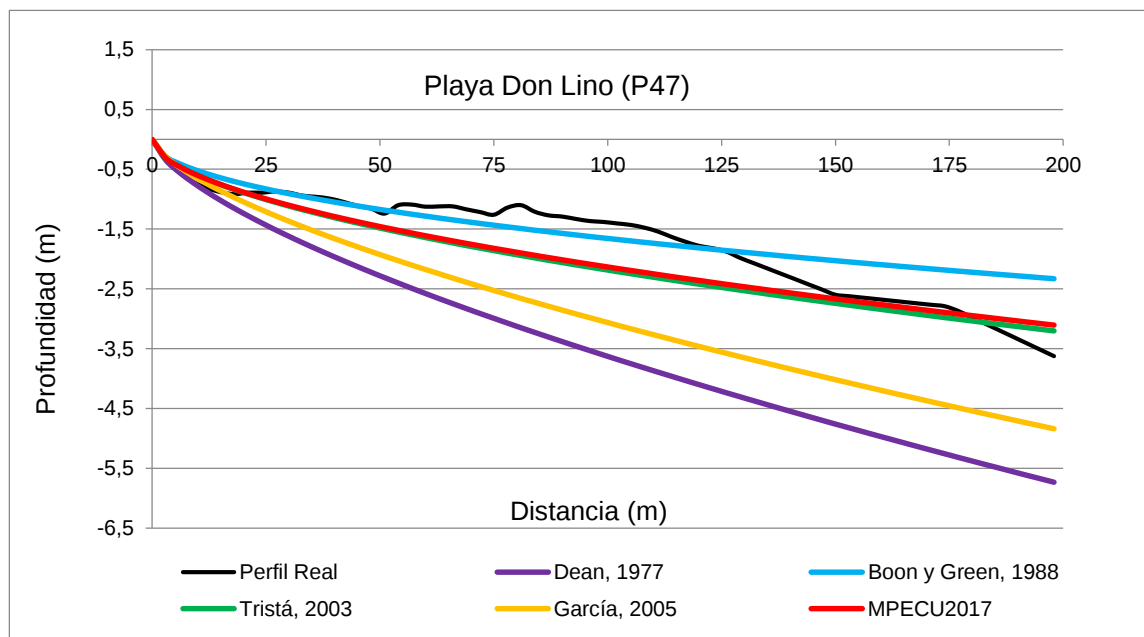


Figura A9. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Don Lino. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Curvas de los cinco modelos de ajuste del perfil de equilibrio (continuación).

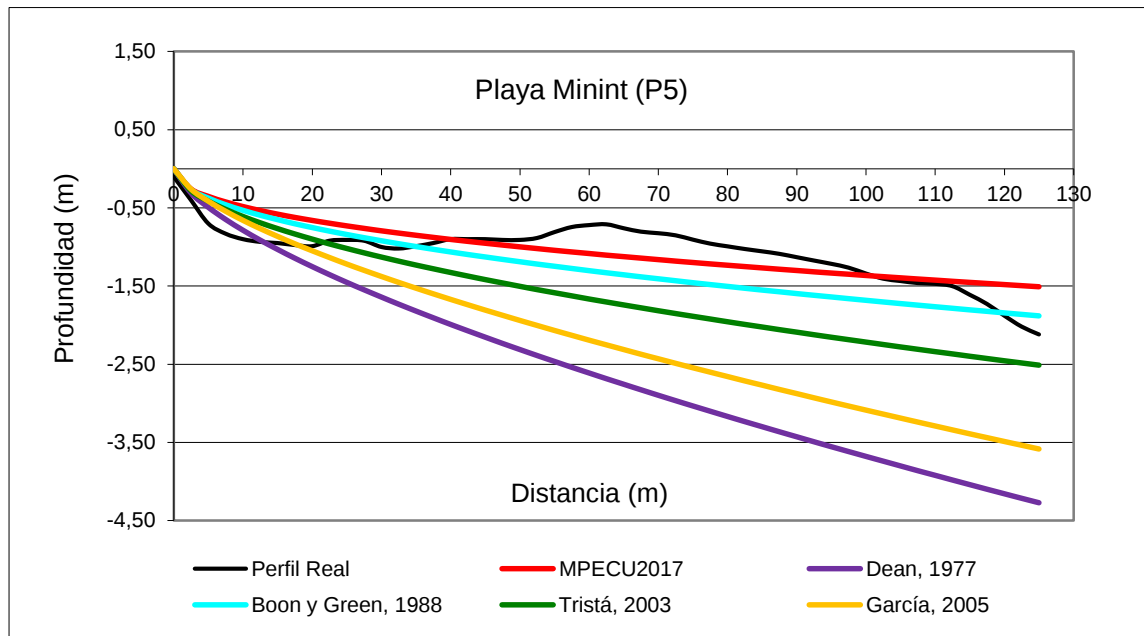


Figura A10. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Minint.
Fuente: Elaboración propia.

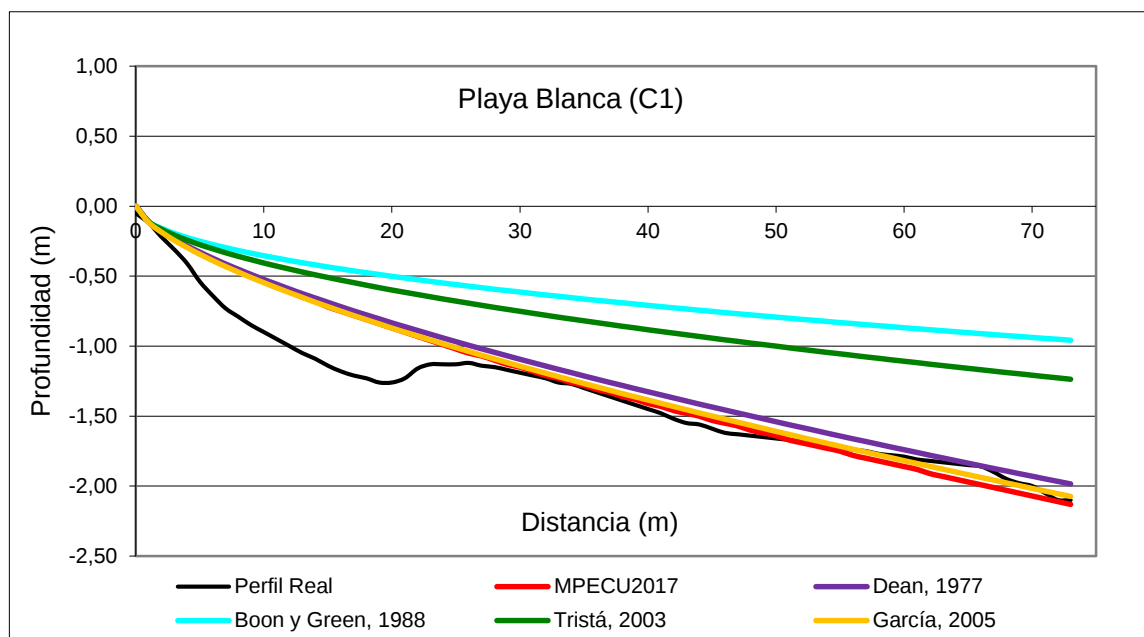


Figura A11. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Blanca.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Curvas de los cinco modelos de ajuste del perfil de equilibrio (continuación).

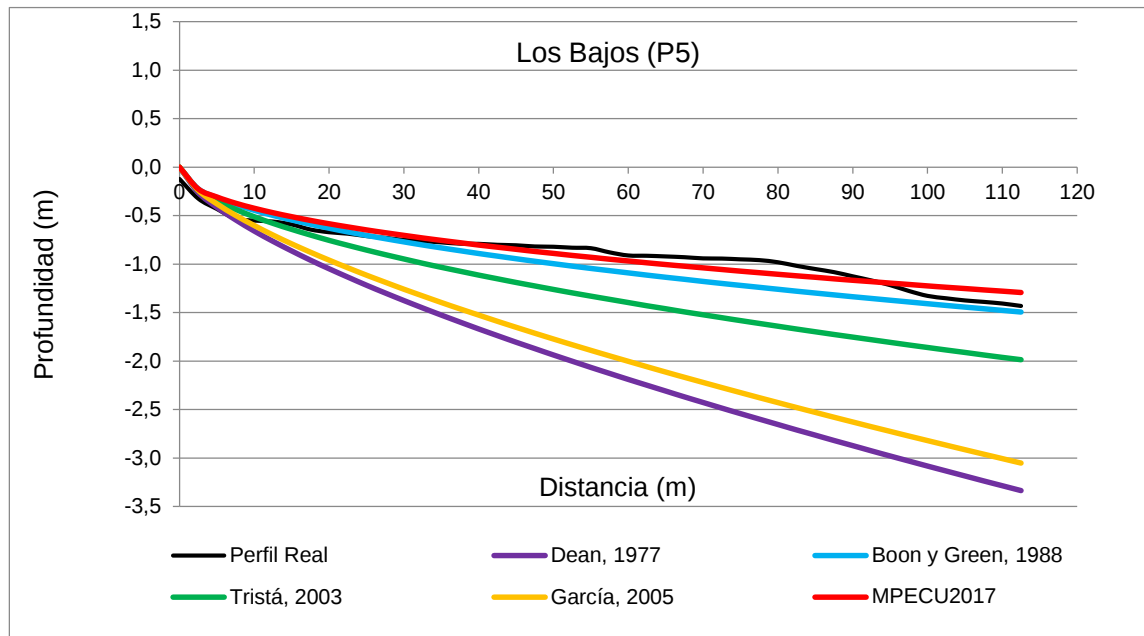


Figura A12. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Los Bajos.
Fuente: Elaboración propia.

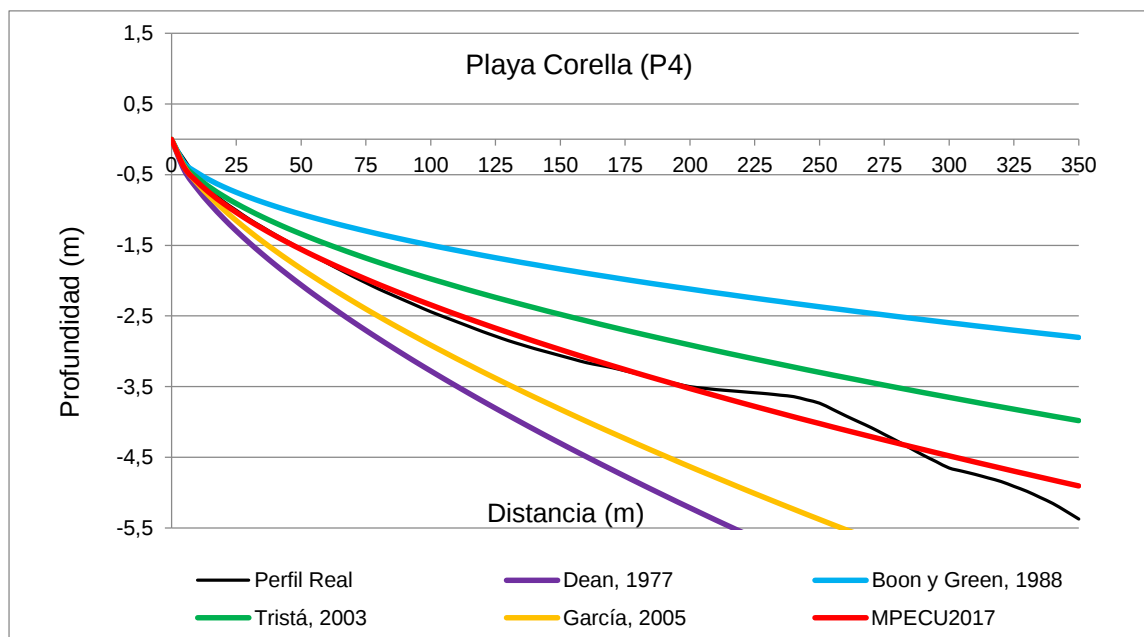


Figura A13. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Corella.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Curvas de los cinco modelos de ajuste del perfil de equilibrio (continuación).

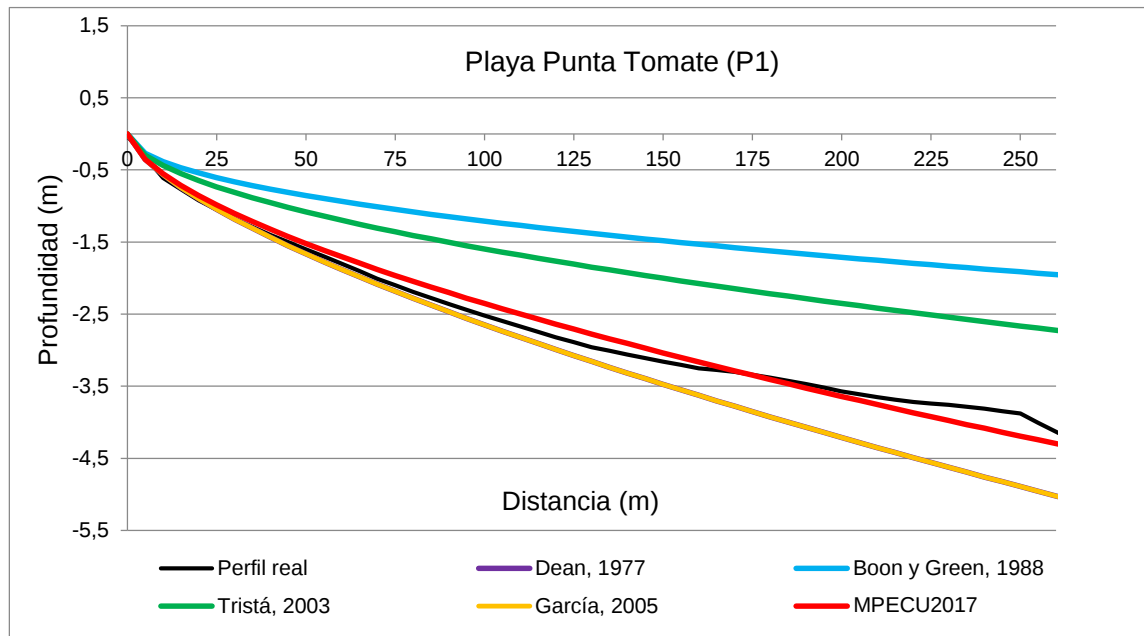


Figura A14. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa Punta Tomate. Fuente: Elaboración propia.

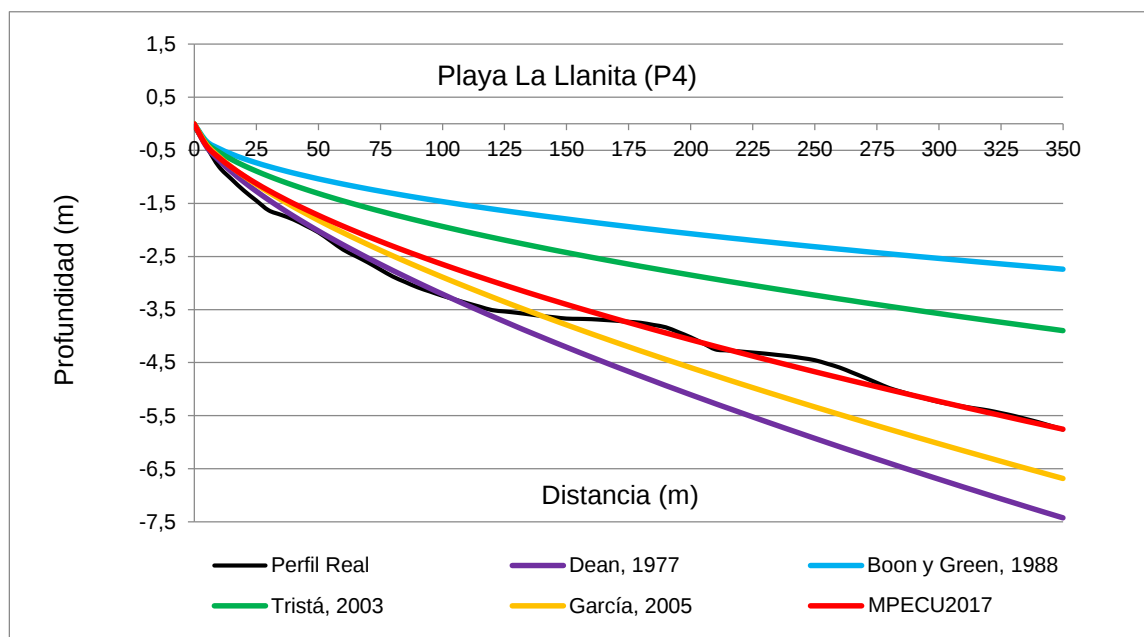


Figura A15. Ajuste de las curvas de equilibrio teórica con respecto al perfil real en Playa La Llanita. Fuente: Elaboración propia.

