Caracterización de las playas interiores de Cuba. Determinación del perfil de equilibrio

TRISTA E., ÁLVAREZ A., JUANES J. L., FONSECA V., HERNÁNDEZ K (*)

RESUMEN Entre los tipos de playas conocidas, las interiores son aquellas que se distinguen por su protección frente al embate directo del oleaje oceánico, lo cual hace que los procesos dinámicos que las modifican sean menos rigurosos a los que ocurren en las playas abiertas. En las 45 playas inventariadas están presentes los efectos de la erosión, determinándose como sus causas principales las actuaciones del hombre y los fenómenos físicos referentes a la elevación del nivel del mar y a la intensificación de las tormentas.

Un total de 45 perfiles representativos de las playas interiores de Cuba fueron evaluados con el objetivo de determinar cual de las expresiones analíticas propuestas por Dean (1977, 1991), cuya forma es $h(x)=Ax^m$, y Bodge (1992), con la expresión exponencial $h(x)=B(1-e^{-kx})$, es la que mejor se ajusta a dichos perfiles. Como resultado se obtuvo que la curva potencial de Dean (1977) se ajusta mejor a las condiciones naturales de las playas interiores en el 62% de los casos estudiados, lográndose fijar el parámetro m en 0.56, con el cual se describe bien las condiciones de equilibrio de este tipo de playas.

CHARACTERIZATION OF THE INTERIOR BEACHES OF CUBA. DETERMINATION OF THE EQUILIBRIUM PROFILE

ABSTRACT *Among the types of well-known beaches, the interiors are those that are distinguished for their protection in front of the direct attack of the oceanic surf, that which makes that the dynamic processes that modify them are less rigorous to those than they happen in the open beaches. In the 45 inventoried interior beaches they are present the effects of the erosion, determining you as their main causes the man's behavior and the relating physical phenomenon to the elevation of the level of the sea and the increase of the storms.*

A total of 45 representative profiles of the interior beaches of Cuba was evaluated with the objective of determining which of the analytic expressions proposed by Dean (1977, 1991) whose form is $h(x)=Ax^m$, and Bodge (1992), with the exponential expression $h(x)=B(1-e^{-kx})$, it is the one that better it is adjusted to this profiles. As a result it was obtained that the potential curve of Dean (1977) it is adjusted better to the natural conditions of the interior beaches in 62% of the studied cases, achieving you to fix the parameter m in 0.56, with which is described the conditions of equilibrium of this type of beaches.

Palabras clave: Playa; Procesos Dinámicos; Erosión; Perfil de Equilibrio.

INTRODUCCIÓN

En Cuba el turismo de playa se ha convertido en una fuente importante de ingresos económicos por lo que la industria turística se ha extendido desde la consolidación del principal polo turístico de Cuba, la playa de Varadero, hasta la incorporación de sitios menos potenciados para el desarrollo de la actividad recreativa en la costa.

En contraste con el nivel de uso que soportan nuestras playas, se está produciendo en ellas un intenso proceso de erosión con la consecuente reducción de los espacios turísticos, fenómeno que no se limita solamente a nuestros litorales sino que se extiende a numerosos balnearios del mundo los que sufren procesos similares.

(*) Instituto de Oceanología, Ave. 1ra. No. 18406 entre 184 y 186. Reparto Flores, Playa. La Habana, Cuba.

La manifestación generalizada de este fenómeno es ilustrada por varios científicos a nivel mundial. Juanes (1996), cita a Cambers (1985) la cual ofrece, para algunas islas de las Antillas Menores velocidades de retroceso de la línea de costa que oscilan entre 0.5 y 2.2 metros por año. Shusky (1986), reporta para las costas del Mar Negro ritmos de erosión de hasta 8 metros por año y en Gran Bretaña, en el período 1938-1972, un ritmo de 4.2 metros por año. Bird (1976) para las costas del Pacífico de los Estados Unidos de América, muestra velocidades de retroceso de 3 a 5 metros por año y en algunos sitios hasta 9 metros.

Para el caso de Cuba, específicamente en la Playa de Varadero, se registra un ritmo de retroceso de la línea de costa de 1.2 metros por año (Juanes, 1996).

En Cuba la erosión no solo se manifiesta en las playas expuestas directamente al oleaje oceánico, su efecto también está presente en las playas interiores que se caracterizan por ser zonas costeras ubicadas en aguas interiores de la plataforma insular, protegidas de oleajes de alta energía ya sea

por la presencia de cordones de cayos o extensas plataformas submarinas frente a ellas.

Pese a que las playas interiores no figuran en el grupo de las mejores potenciadas para el turismo, estas constituyen uno de los sitios más concurridos por la población de los territorios donde se ubican. Alrededor de ellas crece la urbanización, se promueven zonas recreativas de esparcimiento, y tienden a saturarse los espacios disponibles ante su fácil receptividad.

La problemática de la erosión de las playas ha motivado la realización de diferentes investigaciones con un enfoque geológico y geográfico dirigidas al conocimiento de las causas que le dan origen y a la propuesta de soluciones para su control. En este sentido, la modelación matemática se ha convertido en una de las herramientas útiles para simular los procesos dinámicos y en particular cuantificar las variaciones morfológicas que se producen en las playas en base al monitoreo sistemático de los perfiles topográficos y la determinación del perfil de equilibrio.

Varias expresiones del perfil de equilibrio han sido propuestas y usadas desde hace varias décadas, las cuales van desde simples relaciones lineales hasta complejas relaciones empíricas. Bruun (1954), Dean (1977,1991), Vellinga (1983), Leontiev (1985), Kriebel (1986), Larson (1989), Bodge (1992), Mc Dougal (1993).

Las expresiones obtenidas por los anteriores autores han surgido con el objetivo de mejorar la hipótesis, poco real, de que el perfil puede expresarse por medio de una relación lineal. Sin embargo la mayoría de ellas son muy complejas y de difícil aplicación.

Bruun (1954) y Dean (1977, 1991) muestran una manera sencilla para describir la forma del perfil del perfil de equilibrio, la cual viene dada por la expresión potencial:

$$h(x) = Ax^m \qquad [1]$$

donde h(x) es la profundidad respecto al nivel medio del mar a una distancia x de la línea de costa y A es un parámetro dimensional. La simplicidad de esta expresión, debido a la poca cantidad de parámetros que posee, resulta de gran utilidad ya que los mismos pueden calcularse fácilmente a través del método de los mínimos cuadrados.

Más recientemente Bodge (1992) propuso otra manera alternativa para describir la forma del perfil de equilibrio, la cual viene dada por la expresión exponencial:

$$h(x) = B(1 - e^{-kx}) \qquad [2]$$

donde B y k tienen dimensiones de profundidad e inverso de la distancia, respectivamente.

En este trabajo se presenta una síntesis de las formulaciones teóricas que describen la forma del perfil de equilibrio. Además se realiza un análisis estadístico para determinar cual de las expresiones analíticas propuestas por Dean (1977, 1991) y Bodge (1992) es la que mejor representa el perfil de las playas interiores.

El ajuste de un modelo matemático que describa las características de las playas interiores resulta un ejercicio con determinado nivel de complejidad atendiendo a la irregular distribución en la composición del sedimento, las condiciones de aguas someras y la baja energía del oleaje que se produce en estos sistemas costeros.

Por lo antes expuesto y considerando además, la necesidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento dinámico de estas peculiares regiones costeras es que el presente trabajo se propone, como objetivo general, el estudio de la evaluación y ajuste de modelos matemáticos del perfil de equilibrio a las playas interiores de Cuba.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS PLAYAS INTERIORES

Entre las playas cubanas, las interiores se distinguen por su protección frente al embate directo del oleaje oceánico lo que hace que los procesos dinámicos que las modifican sean menos rigurosos que los que ocurren en las playas abiertas. Las condiciones de aguas someras, la existencia de sedimentos areno fangosos y la baja energía del oleaje, determinan procesos particulares de acreción y erosión en estas regiones costeras.

Es por ello que se establece una división entre nuestras playas enmarcándose dos grandes grupos: Las exteriores o abiertas, enfrentadas directamente al oleaje oceánico y las interiores o protegidas, defendidas de las olas por extensas áreas de bajos fondos y la presencia de los cayos que delimitan la plataforma insular cubana.

En Cuba se localizan 85 playas interiores, es decir, el 25% del total de playas registrado para el país, de las cuales 41 han sido recientemente inventariadas con la actualización de su estado de conservación, 25 corresponden a la costa Norte y 16 a la costa Sur (Tabla 1).

De forma resumida la Tabla 1 muestra algunas de las características generales que recoge en el inventario de cada playa, destacándose su estado de conservación de acuerdo a la magnitud del proceso erosivo. La distinción de la erosión moderada o intensa, se basa en observaciones directas de campo de acuerdo a los indicadores de erosión como la presencia de escarpes, afloramientos de superficies rocosas, deterioro de la vegetación costera, etc. y estimaciones de la magnitud de la erosión a través de mediciones directas de campo, asumiendo que la erosión de una playa es moderada cuando el ritmo de retroceso de la línea de costa no supera 1.20 metros por año e intensa cuando supera este valor (Juanes, 1996).

Un primer resultado que arrojan las investigaciones de campo correspondientes al inventario de las playas interiores es que los procesos de erosión se manifiestan como un fenómeno generalizado en ellas con magnitudes en algunos casos sorprendentes si se tiene en cuenta el grado de protección natural que presentan frente a la actividad del oleaje.

Todo parece indicar que la manifestación de la erosión en la totalidad de las playas inventariadas (Tabla 1), está asociada a la intensa ocupación del litoral que en algunos casos ha contribuido a la pérdida de la franja de arena emergida.

La presencia de instalaciones muy cerca a la línea de costa, sobre todo donde existen asentamientos humanos, provocan que bajo la ocurrencia de cualquier temporal el oleaje alcance el muro que defiende las instalaciones o incluso a las propias instalaciones, de modo que la estabilización de la playa se hace muy difícil porque el oleaje reflejado contribuye a transportar fuera de la costa la arena de la playa.

Otras acciones del hombre asociadas al inadecuado uso de la zona costera en las playas interiores es la deforestación de la vegetación, en particular del manglar y la extracción de arena de las playas y las dunas, actuaciones que aunque están reguladas por la ley, su práctica continúa atentando contra la estabilidad de este frágil recurso natural.

En el caso de las playas interiores es válido apuntar la ocurrencia de otro fenómeno no menos importante y que también está incidiendo en la degradación de estos litorales y es el relacionado con la elevación del nivel del mar y la intensificación de las tormentas. Aunque por el momento la magnitud de estas afectaciones no parece comparable con las acciones directas del hombre.

Nº	Playa	Provincia	Costa		Long. (m)	Sedimento	Estado erosivo	
			N	S			Moderado	Intenso
1	Punta de Cartas	P. del Río		X	200	Arena-Fango	X	
2	Río Blanco	P. del Río	X		200	Arena		X
3	Las Canas	P. del Río	X		300	Arena	X	
4	Pto. Esperanza	P. del Río	X		200	Arena-Fango	X	
5	Punta Colorada	P. del Río	X		1.500	Arena	X	
6	Las Canas	P. del Río		X	500	Arena	X	
7	Galafre	P. del Río		X	3.000	Arena		X
8	Bailén	P. del Río		X	3.000	Arena	X	
9	Sta. María	P. del Río	X		300	Arena	X	
10	Dimas	P. del Río	X		150	Arena-Fango	X	
11	Caimito	Habana		X	500	Arena		X
12	Majana	Habana		X	100	Arena-Fango	X	
13	Surgidero	Habana		X	1.114	Arena	X	
14	Mayabeque	Habana		X	1.750	Arena	X	
15	Guanimar	Habana		X	250	Arena-Fango	X	
16	Cajío	Habana		X	300	Arena-Fango	X	
17	Rosario	Habana		X	2.350	Arena	X	
18	La Pepilla	Habana		X	1.500	Arena		X
19	La Victoria	Habana		X	1.000	Arena-Fango	X	
20	Júcaro	C. de Avila		X	100	Arena-Fango	X	
21	Jigüey	C. de Avila	X		300	Arena	X	
22	Punta Alegre	C. de Avila	X		100	Arena	X	
23	Palo Alto	C. de Avila		X	300	Arena	X	
24	Cunagua	C. de Avila	X		100	Arena-Fango	X	
25	La Tinaja	C. de Avila	X		500	Arena	X	
26	XI Festival	C. de Avila	X		300	Arena-Fango	X	
27	Nazabal	Villa Clara	X		400	Arena	X	
28	Caibarién	Villa Clara	X		860	Arena	X	
29	Sierra Morena	Villa Clara	X		500	Arena	X	
30	Salto-Ganuza	Villa Clara	X		2.000	Arena	X	
31	Cayo Conuco	Villa Clara	X		300	Arena	X	
32	Juan Francisco	Villa Clara	X		150	Arena-Fango	X	
33	Jáquete	Villa Clara	X		350	Arena-Fango		X
34	La Panchita	Villa Clara	X		200	Arena-Fango	X	
35	Carahata	Villa Clara	X		100	Arena-Fango	X	
36	Jinagüayabo	Villa Clara	X		300	Arena	X	
37	Piñón	Villa Clara	X		200	Arena-Fango	X	
38	Isabela	Villa Clara	X		200	Arena	X	
39	Uvero	Villa Clara	X		300	Arena-Fango	X	
40	Victoria	S. Spíritus	X		200	Arena-Fango	X	
41	Florida	Camagüey		X	200	Arena-Fango	X	

TABLA 1. Resumen del inventario de las playas interiores de Cuba.

En este sentido se destaca la problemática de la costa sur de la Habana donde se verifican intensas penetraciones del mar asociadas principalmente a la ocurrencia de fuertes vientos de dirección sur aunque también ha sido notable el efecto de los ciclones tropicales como el *Eloise* (septiembre de 1975), *Floyd* (octubre de 1987) y *Lili* (octubre de 1996) en los últimos 25 años.

Una primera evaluación del problema de la erosión en las playas interiores permite asumir como hipótesis que la combinación de las actuaciones del hombre con los fenómenos físicos relacionados con las penetraciones del mar son la causa del deterioro generalizado de este grupo de playas en el país.

Resulta comprensible que las acciones para el control de los problemas de erosión se orienten a la eliminación de los factores que los generan a través de la ejecución de trabajos para la recuperación de estas playas, garantizándose de este modo el uso recreativo de las mismas.

En su totalidad, las playas interiores se ubican en sectores costeros pertenecientes a los *Golfos de Batabanó* y *Ana María-Guacanayabo* y las regiones interiores del *subarchipiélago Sabana-Camagüey* y las plataformas norte y sur de Pinar del Río, Por ello es de esperar que la morfología y dinámica de estas playas respondan a las características de los acuatorios a que pertenecen.

Estos acuatorios ocupan extensas áreas de aguas someras, cuya plataforma insular alcanza una amplitud de más de 100 km de ancho con profundidades que no rebasan los 10 m. La pendiente submarina de las playas ubicadas en estas regiones no sobrepasa el 2%. Aunque si se realizara un corte transversal desde la costa hasta el límite de la cayería exterior de la plataforma, se alcanzarían pendientes en el orden del 0.02%.

Ionin et al., (1972), evaluando las bahías interiores que encierran el subarchipiélago *Sabana-Camagüey,* caracteriza estas regiones como lagunas de gran tamaño que se distinguen por condiciones específicas del desarrollo de las costas, los procesos de sedimentación y las formas del relieve del fondo.

En correspondencia, las características del régimen hidrodinámico que se establece está condicionado fundamentalmente a las características del relieve con pendientes suaves y regulares, de manera que las pequeñas profundidades de las regiones interiores y el limitado fetch, no permiten que se desarrollen olas de altura significativa, así como derivas litorales de gran intensidad por lo que los procesos de erosión parecen estar asociados particularmente al paso de ciclones tropicales o frentes fríos.

Experimentos realizados con el uso de cuerpos de deriva en algunas regiones interiores (Tristá y Col., 1988, 1995), indican que la velocidad de la corriente de deriva no sobrepasa 1 m/s, por lo que se consideran de baja energía, al menos bajo la ocurrencia de las velocidades del viento más frecuentes.

El sedimento nativo de la playa presenta un diámetro medio en el orden de 0.22 mm, por lo que se clasifica como arena fina cuyos principales componentes corresponden a los fragmentos calcáreos de organismos bentónicos, entre los que predominan los moluscos (41%), los foraminíferos (25%) y las algas calcáreas (16%).

Las investigaciones sobre las características morfológicas, sedimentológicas e hidrodinámicas de algunas playas interiores como El Salto-Ganuza, Punta Alegre y Caibarién, han permitido obtener la información básica para el diseño de actuaciones costeras en función de la elaboración de proyectos ejecutivos dirigidos a la recuperación de estas playas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desde hace varias décadas diferentes expresiones analíticas han sido propuestas con el fin de representar el perfil de equilibrio. La primera de estas expresiones es la relación lineal:

$$h(x) = Mx \qquad [3]$$

donde M es la pendiente general de la playa.

Sin embargo esta expresión se aleja de lo que sucede en los perfiles reales.

Otras expresiones empíricas han sido obtenidas a partir de los parámetros de las olas y las características del sedimento. En la mayoría de los casos resultan fórmulas complejas y difíciles de aplicar a problemas concretos.

Por esta razón las investigaciones en este sentido han estado dirigidas, por un lado a buscar expresiones sencillas con la mínima cantidad de parámetros que representen aceptablemente, con cierto error, a los perfiles reales y por otro lado a justificar a través de los procesos dinámicos en la zona de rompiente las expresiones propuestas.

Varios de los modelos propuestos, como es el caso de Bruun (1954), Leontiev (1985) y Dean (1977, 1991) llegan a definir las curvas del tipo potencial (1). Otros modelos, como el de Leontiev (1985), Gusa y Bowen (1981) y Bodge (1992), proponen curvas exponenciales del tipo (2).

En cualquier caso como dichos modelos parten de suposiciones diferentes, lo aconsejable en estos estudios es ajustar las expresiones alternativas deducidas al perfil real, utilizando como base perfiles seleccionados de diversas playas.

Las ecuaciones (1) y (2) fueron ajustadas para un conjunto de 45 perfiles de playas interiores. Para el procesamiento de los datos se utilizaron los softwares Topocar 1.0, Surfer 6.01 y Estadística 4.2, que permiten obtener como resultado final el ajuste de las expresiones (1) y (2) para cada caso específico.

En el presente estudio solamente fue considerada la parte del perfil que se encuentra sumergida a partir del punto de la línea de costa que coincide con el nivel del mar. Esta consideración requiere de la aplicación de algunas correcciones a los datos iniciales del perfil. Como se conoce, los valores de distancia y desnivel de cada punto del perfil medido están referidos a un monumento de control con coordenadas y altura conocidas.

Al asumir como punto inicial del perfil aquel punto de la línea de costa que coincide con el nivel del mar, es necesario aplicarles las correspondientes correcciones a los restantes puntos de la parte sumergida del perfil, cuyos valores de distancia y desnivel están referidos al punto de control.

Dean (1977) y Bodge (1992) realizaron el ajuste de 504 perfiles, de la Costa Este de los Estados Unidos y el Golfo de México, por el método de los Mínimos Cuadrados. En el presente estudio el ajuste de los 45 perfiles de playas interiores, se realiza por el método de Quasi Newton.

El objetivo de los métodos para ajustar curvas a una serie de datos, consiste en buscar los valores de los parámetros de tal manera que se minimice la función de error dada por la expresión:

$$L(A,B) = \sum_{i=1}^{n} (h_{pi} - h_i)^2 \qquad [4]$$

donde h_{pi} es el valor predicho que depende de los parámetros A y B a estimar, y h_i es el valor real observado.

Además de los métodos de ajuste mencionados existen otros que permiten estimar estos parámetros: procedimiento

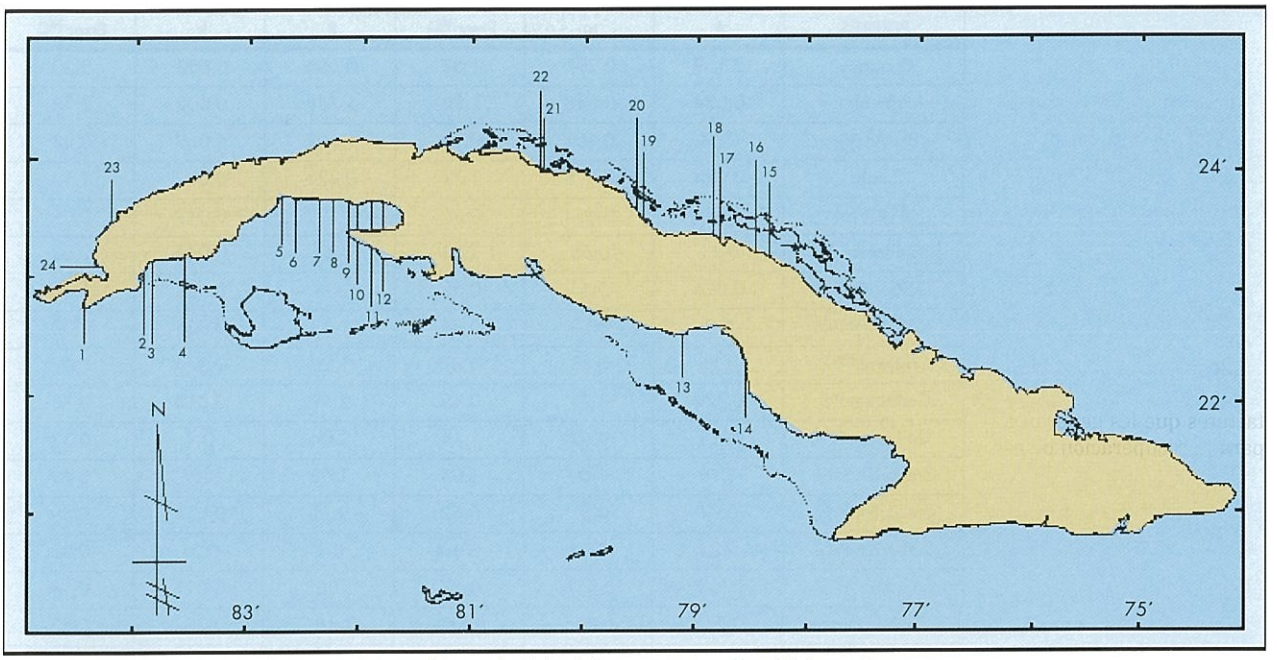

FIGURA 1. Localización de las playas interiores usadas en el cálculo de los parámetros del perfil de equilibrio.

del Simplex, Hooke-Jeeves, Rosenbrock, Hessian Matrix y Error Estándar.

Después de realizar varias pruebas con estos métodos, se selecciona el método Quasi Newton, para estimar los parámetros de las curvas potenciales de Dean (ecuación 1) y la exponencial de Bodge (ecuación 2). Este método converge rápidamente y tiene la ventaja sobre otros procedimientos de que es menos sensible a encontrar los mínimos locales malos.

El método Quasi Newton se fundamenta en que la pendiente de una función de dos variables, en un punto particular, puede calcularse por medio de las derivadas de primer orden, además la función decrece en la dirección de la pendiente. La pendiente de la pendiente se calcula con las segundas derivadas parciales, y muestra en que dirección la pendiente cambia más rápido.

Este es un método iterativo por lo que en cada paso evalúa la función en los puntos sucesivos, determina la primera y la segunda derivada con el objetivo de buscar el camino que haga mínima la función de error. Los valores de entrada del algoritmo son: los valores iniciales de los parámetros, el paso inicial para comenzar la iteración, el número máximo de iteraciones y el criterio de convergencia.

Se obtiene como resultado: el valor final de la función de error donde esta se hace mínima, los valores de los parámetros a estimar, su media, desviación estándar, rango y los valores predichos y residuales.

La calidad del ajuste para cada modelo (1) y (2) fue determinada por la fórmula:

$$e = \frac{\sum (h_{pi} - h_i)^2}{\sum h_i^2} * 100\% \qquad [5]$$

donde h_i es la profundidad medida y h_{pi} es la profundidad predicha por cualquiera de los modelos (1) y (2). El subíndice i se refiere a cada uno de los puntos espaciados a lo largo del perfil. En la ecuación (5) el valor de e=0 corresponde a un perfecto ajuste y el aumento del valor de e da una medida de la disminución de la calidad del ajuste.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 y la Tabla 1 muestran las playas interiores utilizadas para ajustar los parámetros de la ecuación del perfil de equilibrio. Las playas analizadas presentan una excelente diversidad con respecto a longitud, localización, orientación general de la línea de costa y el tipo de sedimento, razón por la cual pueden considerarse representativas de la tipología general de las playas interiores.

En 28 de los 45 perfiles distribuidos en las 24 playas analizadas, la expresión potencial $h(x)=Ax^m$ produce mejor aproximación al perfil real que la expresión exponencial, $h(x)=B(1-e^{-kx})$, lo que representa el 62% de los casos tratados.

En la Figura 2 se muestra la cantidad de casos y el porciento del total en que cada curva de ajuste es mejor respecto a la otra.

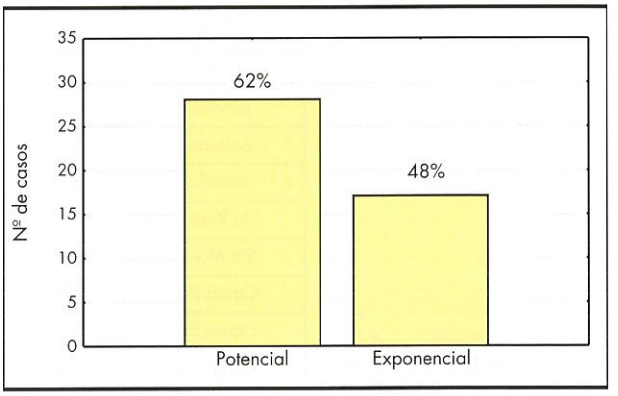

FIGURA 2. Curvas de mejor ajuste.

PERFILES	A	m	Error (%)	B	k	Error (%)
Cunagua	0.159	0.297	1.55	0.604	0.053	0.30
Palo Alto	0.024	0.848	1.98	5.789	0.002	2.18
Pta Alegre	0.14	0.603	0.14	1.609	0.039	0.48
Tinaja	0.024	0.595	1.74	0.421	0.019	1.10
XI Festival	0.097	0.664	0.39	1.192	0.049	0.09
Caibarién-2	0.11	0.65	1.65	1.55	0.044	0.83
Caibarién P-4	0.096	0.63	0.53	1.6	0.025	1.06
Caibarién P-5	0.2	0.52	0.06	1.23	0.085	0.30
Caibarién P-7	0.16	0.48	0.47	1.28	0.044	0.07
Caibarién P-8	0.072	0.73	0.45	2.69	0.014	0.73
Caibarién P-9	0.18	0.52	1.14	1.04	0.1	0.32
Caibarién P-11	0.16	0.69	1.05	1.62	0.07	0.53
Caibarién P-12	0.07	0.61	0.62	0.71	0.056	0.49
Caibarién P-13	0.23	0.14	0.60	0.4	0.21	0.23
Caibarién P-14	0.272	0.436	0.27	1.308	0.091	0.19
Cayo Conuco	0.244	0.485	0.07	1.367	0.077	0.63
S. Morena. P-1	0.08	0.618	1.06	1.464	0.02	0.78
S. Morena. P-2	0.04	0.793	0.73	2.516	0.008	0.83
S. Morena. P-3	0.043	0.777	0.72	2.751	0.008	0.95
Salto P-2	0.141	0.546	0.05	1.47	0.035	0.13
Salto P-3	0.127	0.58	1.75	1.66	0.018	1.65
Salto P-4	0.124	0.568	0.18	1.436	0.32	0.65
Salto P-5	0.049	0.712	2.57	2.115	0.01	3.04
Salto P-7	0.048	0.744	1.05	2.929	0.007	1.38
Salto P-9	0.181	0.355	2.82	0.952	0.031	6.31
Salto P-11	0.079	0.659	1.85	2.091	0.014	2.67
Salto P-13	0.08	0.579	2.09	1.292	0.019	3.16
Caimito	0.169	0.363	0.87	1.024	0.025	3.26
Cajio	0.212	0.461	0.31	1.398	0.051	0.73
Guanimar	0.177	0.46	1.00	1.329	0.037	3.25
Majana-E	0.049	0.92	0.85	12.281	0.003	0.91
Majana-W	0.144	0.553	0.54	1.668	0.029	0.88
Mayabeque	0.396	0.26	1.52	1.13	0.13	0.33
Pepilla	0.164	0.415	1.83	1.16	0.026	4.14
Rosario	0.422	0.27	0.33	1.221	0.103	0.21
Surgidero	0.368	0.255	0.68	0.978	0.198	1.02
Bailen	0.025	0.56	1.10	1.558	0.026	1.87
canas N	0.263	0.287	2.24	0.997	0.048	1.74
Colorada	0.059	0.722	0.96	2.134	0.012	1.21
Galafre	0.336	0.296	1.28	1.107	0.096	0.29
Rio Blanco	0.249	0.394	0.57	1.265	0.061	0.35
Sta Maria	0.094	0.553	0.56	1.416	0.017	1.45
Canas P-1	0.019	0.9	0.49	5.974	0.002	0.59
Canas P-2	0.029	0.879	2.02	18.66	0.001	2.14
Canas P-3	0.024	0.937	0.73	33.98	0.0005	0.74
Promedio	0.14	0.56	1.01	2.98	0.0518	1.24

TABLA 2. Parámetros y calidad del ajuste de las expresiones y a las características de un conjunto de 24 playas interiores.

Es destacar que en el caso de perfiles con la presencia de barras, ninguna de las dos expresiones propuestas representan particularmente bien al perfil real. Entre los perfiles con estas características están los de las playas: Palo Alto, Pepilla, Las Canas, y el Salto P-5, P-9 y P-13. La presencia de barras y valles bien definidos le atribuyen una morfología variable al perfil de playa, mientras que las fórmulas de ajuste tienen una curvatura general cóncava hacia arriba, lo que les imposibilita describir varias concavidades en un mismo perfil.

La Tabla 2 contiene los valores de los parámetros de las expresiones (1) y (2) para cada perfil de las playas interiores analizadas.

Es aconsejable adoptar un valor fijo para el parámetro m en la ecuación (1), pues su rango es pequeño, oscilando entre 0.14 y 0.93, con una media y una desviación estándar de 0.56 y 0.195 respectivamente (Tabla 3). De igual manera también se fija el valor del parámetro k, que varía entre 5×10^{-4} 1/m y 0.32 1/m, la media y la desviación estándar son respectivamente 0.51 y 0.062.

El valor medio del parámetro m de la ecuación (1) determinado por Dean (1977), para las playas de la Costa Este de los Estados Unidos y el Golfo de México es de 0.67. En el caso de las 24 playas interiores el valor medio de m es relativamente menor al calculado por Dean, o sea 0.56 (Tabla 3), lo cual pudiera estar asociado a las bajas energías del oleaje a la que están expuestos los acuatorios interiores.

Dean (1977) propone que el perfil de equilibrio se calcule por la fórmula:

$$h(x) = Ax^{\frac{2}{3}} \qquad [6]$$

donde $\frac{2}{3} \approx 0.67$

Para el caso de las playas analizadas la curva de mejor ajuste, en el 62% de las perfiles, es la del modelo de Dean, por ello se propone la siguiente fórmula para caracterizar el perfil de equilibrio de las playas interiores:

$$h(x) = Ax^{0.56} \qquad [7]$$

Dean (1977) señala, que el parámetro m es un factor que describe la forma de la playa. Si es menor que uno se obtiene un perfil cóncavo hacia arriba y si es mayor que 1 el perfil es cóncavo hacia abajo. Además el parámetro m se relaciona con las características hidrodinámicas como son: el nivel de turbulencia, los tensores de fuerza longitudinal, la resaca y otros.

Teniendo en cuenta lo señalado por Dean (1977), es de esperar que para el caso de las playas interiores donde la actividad de las olas es moderada, el valor del parámetro m, sea diferente al de las playas abiertas que están expuestas directamente al oleaje oceánico como es el caso de las estudiadas por Dean (1977) y Bodge (1992).

Por otro lado, Dean (1977) y Moore (1985), relacionan el parámetro A con las características del sedimento. El prime-

Datos Estadísticos	B	k	A	m	e% (Dean)	e% (Bodge)
Media	2.986	0.519	0.143	0.56	1.01	1.24
Mínimo	0.4	0.0005	0.019	0.14	0.048	0.065
Máximo	33.98	0.32	0.422	0.937	2.82	6.31
Rango	33.98	0.319	0.403	0.797	2.77	6.24
Desviación Estándar	5.67	0.062	0.104	0.195	0.72	1.26

TABLA 3. Datos estadísticos de los parámetros.

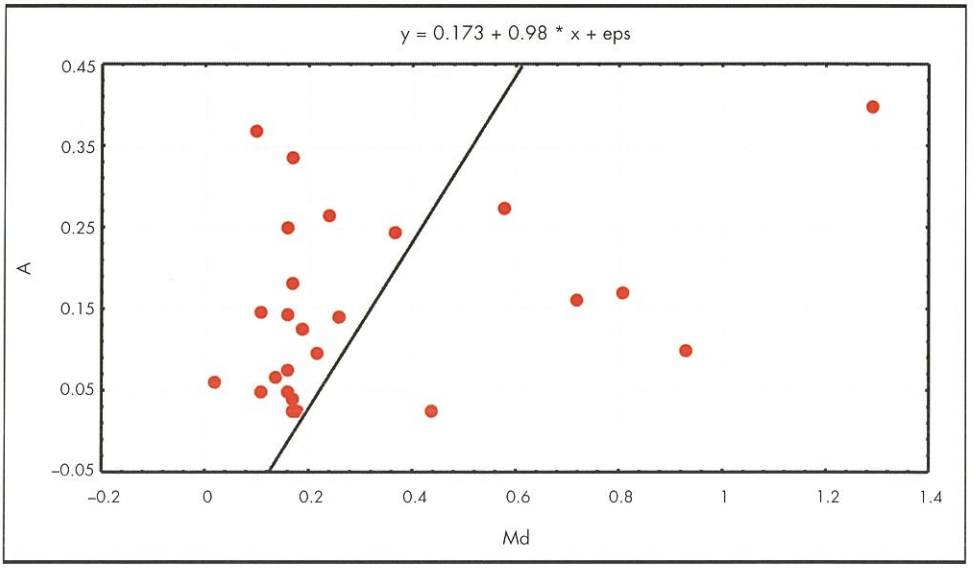

FIGURA 3. Gráfico de dispersión del parámetro A con respecto al diámetro del sedimento (Md).

ro encuentra una relación entre A y el tamaño medio del grano del sedimento D y el segundo plantea una relación con la velocidad de caída de las partículas del sedimento. Bodge (1992) señala que existe poca confianza en sugerir las relaciones descritas anteriormente para predecir el parámetro A en un lugar específico.

El análisis, para el caso de las playas interiores, en la búsqueda de una posible relación entre el parámetro A y el tamaño medio del sedimento (Md) muestra una gran dispersión de los valores (Fig. 3), y no es posible ajustar ninguna curva a los datos. Esto último corrobora en cierta medida la hipótesis planteada por Bodge (1992).

Esta discrepancia aparece por el hecho de que la hipótesis del modelo de Dean parte de suponer que la disipación de energía por unidad de volumen es constante en la zona de rompientes y que el tamaño del sedimento se distribuye uniformemente en todo el perfil, lo cual no es cierto en la naturaleza, por ejemplo en las playas interiores el sedimento varía significativamente, y va, en muchos de los casos, desde la presencia de arena en la anteplaya, pasando por una mezcla de arena-fangosa en la pendiente submarina aledaña a la costa hasta un fondo fangoso relativamente alejado de la orilla.

La dificultad planteada es resuelta por Dean (1991), el cual propone dividir el perfil en secciones, donde en cada una se tuviese un tipo de sedimento específico y que este fuera decreciendo en la medida que se ganara en profundidad.

Para ello se parte de expresión $h(x) = Ax^{\frac{2}{3}}$ y una vez dividido en secciones para el parámetro A se obtiene:

$$h(x) = \left(A_{n-1} x_n^{\frac{2}{3}} - A_n x_n^{\frac{2}{3}} \right) + A_n x^{\frac{2}{3}} \qquad [8]$$

Para $x_n < x < x_{n+1}$.

donde es el valor del parámetro de escala A para cada una de las N secciones en que se divide el perfil y que están acotadas por x_n y x_{n+1}.

En el caso de las playas interiores donde la forma del perfil de ajuste como promedio, es $h(x)=Ax^{0.56}$ se propone la siguiente expresión para describir el perfil de equilibrio, teniendo en cuenta el reajuste hecho por Dean (1991):

$$h(x) = \left(A_{n-1} x_n^{0.56} - A_n x_n^{0.56} \right) + A_n x^{0.56} \qquad [9]$$

para $x_n < x < x_{n+1}$.

donde A_n es el valor del parámetro de escala A para cada una de las N secciones en que se divide el perfil y que están acotadas por x_n y x_{n+1}. El número de secciones podría ser tres.

CONCLUSIONES

1. Las playas interiores se distinguen por su protección frente al embate directo del oleaje oceánico, sin embargo en las 45 playas inventariadas están presentes los efectos de la erosión, cuya causa principal es la combinación de las actuaciones del hombre con los fenómenos físicos referentes a la elevación del nivel del mar y a la intensificación de las tormentas.
2. De la evaluación de los parámetros de los modelos de Dean (1977) y Bodge (1992), se obtiene que la curva potencial de Dean (1977) se ajusta mejor a las condiciones naturales de las playas interiores en el 62% de los casos estudiados, cuya expresión es: $h(x)=Ax^m$. Lográndose fijar el parámetro m en 0.56, con el cual se describe bien las condiciones de equilibrio de este tipo de playas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las recomendaciones del Lic. Carlos García y la valiosa colaboracion de el Lic. Hermes Salazar en el procesamiento de los perfiles de playa.

BIBLIOGRAFÍA

BODGE, K. R. "Representing Equilibrium profiles with an Exponential Expression". Journal of Coastal Research. No 8. Fort Lauderdale, Florida. 1992.

BRUUN, P. "Coast Erosion and Development of Beach Profiles". Beach Erosion Board. Technical Memorandum. No 44. 1954.

DEAN, R. G. "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts". Ocean Engineering Report. No 12.University of Delaware, Newark D E. 1977.

DEAN, R. G. "Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions". Specialty Conference on Coastal Sediment. 1987.

DEAN, R. G. "Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications". Coastal and Ocanografhic Engineering Department. University of Florida. 1990.

IONIN, A. S.; AVELLO, O. PAVLIDIS "Sedimentos del Fondo del Golfo de Batabanó". Condiciones de Sedimentación. 1969.

JUANES, J. L. "La Erosión en las Playas de Cuba. Alternativas para su control. Tesis de Doctorado. Instiuto de Oceanología (CITMA). 1996.

KOMAR, P. D.; MCDOUGAL, W. G. "The Analysis of Exponential Beach Profiles". Journal of Coastal Research. No 10. Fort Lauderdale, Florida. 1994.

LARSON, D. L. "Quantification of Beach Profile Change". Department of Water Resources Engineering. Report No 3. Sweden. 1988.

LEONTIEV, I. O. "Sediment Transport and Beach Equilibrium Profile". 1985.

TRISTÁ, E., Juanes, J. L., Salazar H. "Consideraciones científico técnicas para la creación de la playa artificial El Salto Ganuza". Informe Técnico. Instituto de Oceanología (CITMA). 1988.

TRISTA, E.; MARTELL, R.; SALAZAR, H. "Regeneración de la playa de Caibarién". Informe técnico. Instituto de Oceanología (CITMA). 1995.