

**LIBRO:** PRY. PROYECTO  
**TEMA:** PUE. Puertos  
**PARTE:** 1. ESTUDIOS  
**TÍTULO:** 07. Estudios de Transporte Litoral  
**CAPÍTULO:** 006. Determinación del Perfil de Equilibrio

**A. CONTENIDO**

Este Manual contiene los procedimientos para determinar el perfil de equilibrio de playas, necesario para la elaboración del estudio de transporte litoral para puertos, que realice la Secretaría con recursos propios o mediante un Contratista de Servicios y que se indica en la Fracción E.5. de la Norma N·PRY·PUE·1·07·001, *Ejecución de Estudios de Transporte Litoral*.

**B. DEFINICIÓN**

El perfil de equilibrio de una playa es aquel que se mantendría constante en una determinada zona de la costa cuando sus características físicas permanezcan fijas y sea afectada por una serie de fuerzas (olas, corrientes y marea), es decir, el perfil no varía en el tiempo si las fuerzas actuantes permanecen constantes.

A pesar que el concepto de perfil de equilibrio ha sido duramente criticado, debido a que las fuerzas que afectan el equilibrio están siempre variando con las mareas, las olas, las corrientes y los vientos, el perfil de equilibrio constituye una herramienta eficaz para predecir el comportamiento de una playa y así diseñar y analizar proyectos de regeneración de playas.

Las particularidades que cumplirá el perfil son:

- Ser cóncavo hacia arriba.
- Presentar pendientes más suaves mientras más fina sea la arena que forma parte del perfil.
- Presentar un frente de playa que generalmente es lineal.
- La presencia de olas altas con una relación de esbeltez, es decir la altura entre la longitud de la ola ( $H/L$ ), con valor de 0,10 o mayor, es indicativo de que la pendiente de la playa es fuerte.

**C. REFERENCIAS**

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Estudios de Transporte Litoral .....	N·PRY·PUE·1·07·001
Caracterización Mineralógica y Granulométrica de los Sedimentos .....	M·PRY·PUE 1·07·003
Determinación del Estado Morfodinámico de las Playas .....	M·PRY·PUE 1·07·005

## D. REQUISITOS

Antes de efectuar la determinación del perfil de equilibrio de la playa, se contará con la siguiente información.

**D.1.** La caracterización del sedimento de la playa, efectuada de acuerdo con lo indicado en el Manual M·PRY·PUE·1·07·003, *Caracterización Mineralógica y Granulométrica de los Sedimentos*, que aporte los siguientes datos:

- Diámetro representativo del sedimento  $\bar{D}$ , expresado en mm.
- Velocidad de caída del sedimento  $\omega_f$ , expresada en m/s.
- Diámetro para el que el 50% de las partículas de una muestra es igual que  $\bar{D}$  o mayor, expresado en mm.

**D.2.** Los estudios de oleaje que contengan su dirección, la altura de ola significativa  $H_{1/3}$ , la amplitud del oleaje incidente  $a$  y su periodo  $T$ , así como la altura de ola significativa que es excedida 12 horas por año y su periodo  $T_e$ .

**D.3.** El perfil de la playa bajo estudio, calculado de acuerdo con lo indicado en el Manual, M·PRY·PUE 1·07·005, *Determinación del Estado Morfodinámico de las Playas*, que permita conocer su pendiente del fondo  $\beta$ , expresada en grados.

## E. CÁLCULOS PREVIOS

Antes de efectuar la determinación del perfil de equilibrio de la playa bajo estudio, se deben realizar los siguientes cálculos:

### E.1. ESTIMACIÓN DEL PARÁMETRO DE ESCALA DE SEDIMENTO $A$

El parámetro de escala del sedimento  $A$  es un coeficiente que define la relación matemática entre la coordenada sobre el eje  $Y$  y la profundidad, mismo que se utilizará en los perfiles teóricos presentados en la Cláusula F. de este Manual; este coeficiente es función del tamaño del sedimento y se puede calcular mediante alguno de los siguientes procedimientos:

**E.1.1.** Experimentalmente se ha encontrado que:

$$A \approx \bar{D}^{1/3}$$

Donde:

$A$  = Parámetro de escala de sedimento, ( $m^{1/3}$ )

$\bar{D}$  está en mm y tiene el significado indicado en la Fracción D.1. de este Manual.

**E.1.2.** Utilizando los valores de la Tabla 1 ó el valor obtenido de la Figura 1, que están en función del tamaño representativo del sedimento o grano de playa. La utilización de esta Tabla y Figura sólo son válidas para cuando  $\bar{D}$  es igual que 1 mm o menor.

**E.1.3.** En función de la velocidad de caída del sedimento, donde se tiene que:

$$A = 2,25 \left( \frac{\omega_f^2}{g} \right)^{1/3}$$

Donde

$A$  = Parámetro de escala de sedimento, (m<sup>1/3</sup>)

$\omega_f$  = Velocidad de caída del sedimento, (m/s)

$g$  = Aceleración debida a la fuerza de gravedad, (m/s<sup>2</sup>)

**TABLA 1.- Valores del parámetro  $A$  en función del tamaño representativo del grano**  
Unidades en m<sup>1/3</sup>

Resumen de los valores de $A$										
$\bar{D}$ mm	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,063	0,067	0,071	0,076	0,080	0,084	0,087	0,090	0,094	0,097
0,2	0,100	0,103	0,106	0,109	0,112	0,115	0,117	0,119	0,121	0,123
0,3	0,125	0,127	0,129	0,131	0,133	0,135	0,137	0,139	0,141	0,143
0,4	0,145	0,147	0,148	0,150	0,151	0,153	0,155	0,156	0,158	0,159
0,5	0,161	0,162	0,163	0,165	0,166	0,167	0,168	0,169	0,171	0,172
0,6	0,173	0,174	0,175	0,177	0,178	0,179	0,180	0,181	0,183	0,184
0,7	0,185	0,186	0,187	0,188	0,189	0,190	0,190	0,191	0,192	0,193
0,8	0,194	0,195	0,196	0,196	0,197	0,198	0,199	0,200	0,200	0,201
0,9	2,020	0,203	0,204	0,204	0,205	0,206	0,207	0,208	0,208	0,209
1,0	0,210	0,211	0,212	0,212	0,213	0,214	0,215	0,216	0,216	0,217

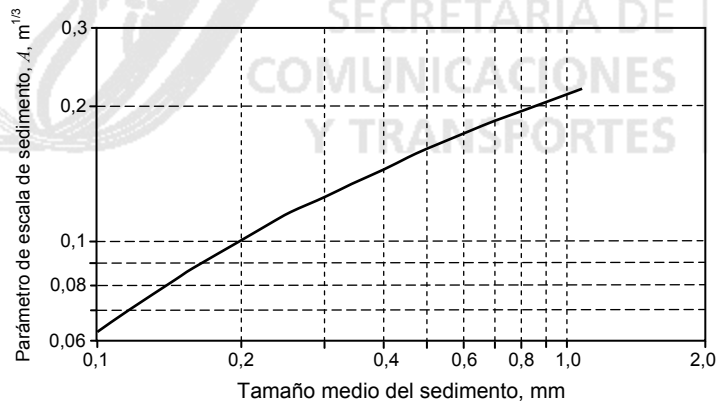


FIGURA 1.- Valores del parámetro  $A$  en función del tamaño medio del grano

**E.1.4.** En función del diámetro medio  $\bar{D}$ , donde se tiene que:

$$A = 0,41 \bar{D}^{0,94} \Rightarrow \bar{D} < 0,4$$

$$A = 0,23 \bar{D}^{0,32} \Rightarrow 0,4 \leq \bar{D} < 10$$

$$A = 0,23 \bar{D}^{0,28} \Rightarrow 10 \leq \bar{D} < 40$$

$$A = 0,46 \bar{D}^{0,11} \Rightarrow 40 \leq \bar{D}$$

Donde  $A$  tiene el significado indicado en el Inciso E.1.1. y  $\bar{D}$  tiene el significado indicado en la Fracción D.1. de este Manual.

## E.2. PROFUNDIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO DE LOS SEDIMENTOS

Al avanzar los oleajes de altamar hacia la costa, a una cierta profundidad, los sedimentos empiezan a moverse por la acción de la energía del oleaje, a lo que se le conoce como profundidad límite de inicio de movimiento y se determina con alguna de las siguientes expresiones:

**E.2.1.** Para condiciones extremas (presencia de ciclones o nortes):

$$D_c = 2,28 H_e - 68,5 \left( \frac{H_e^2}{g T_e^2} \right)$$

Donde:

$D_c$  = Profundidad de inicio de movimiento de los sedimentos, (m)

$H_e$  = Altura de ola significativa que es excedida 12 horas por año, (m), valor obtenido de un estudio de oleaje de la zona

$T_e$  = Periodo de tiempo asociado a  $H_e$ , (s)

$g$  = Aceleración debida a la fuerza de gravedad, (m/s<sup>2</sup>)

**E.2.2.** Para condiciones normales:

$$D_c = \frac{A^3}{\tan^2 \beta}$$

Donde  $D_c$  tiene el significado indicado en el Inciso anterior;  $A$  se calcula conforme a lo establecido en la Fracción E.1. de este Manual y  $\beta$  tiene el significado indicado en la Fracción D.3.

Se recomienda utilizar los dos valores anteriores de la profundidad de inicio de movimiento de los sedimentos para el cálculo del perfil de equilibrio; el primero será para las condiciones extremas y el segundo para las condiciones que generalmente se presentan durante todo el año; la profundidad de inicio de movimiento de los sedimentos sirve para que, hasta ese punto, se calcule el perfil de equilibrio.

**E.2.3.** Sato y Tanaka distinguen tres conceptos con respecto a la profundidad límite de inicio de movimiento, (ver Figura 2), y que a continuación se describen.

**E.2.3.1.** Profundidad límite del movimiento general

El límite del movimiento general indica el límite en que todas las partículas de la primera capa del fondo del mar, empiezan a moverse. Se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{H_0}{L_0} = 0,565 \left( \frac{\bar{D}}{L_0} \right)^{\frac{1}{3}} \sinh \frac{2\pi h}{L} \frac{H_0}{H}$$

Donde:

$H_0$  = Altura de ola en aguas profundas, (m)

$L_0$  = Longitud de ola en aguas profundas, (m)

$\bar{D}$  = Diámetro medio de la arena, (m), de acuerdo con lo señalado en el Párrafo D.2.3.1. del Manual M-PRY-PUE-1-07-003, *Caracterización Mineralógica y Granulométrica de los Sedimentos*.

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i P_i}{100}$$

$D_i$  = Diámetro de cada malla, (mm)

$P_i$  = Masa retenida en cada malla, (%)

$h$  = Profundidad límite del movimiento, (m)

$L$  = Longitud de la ola en la profundidad límite del movimiento general, (m)

$H$  = Altura del oleaje en la profundidad límite, (m)

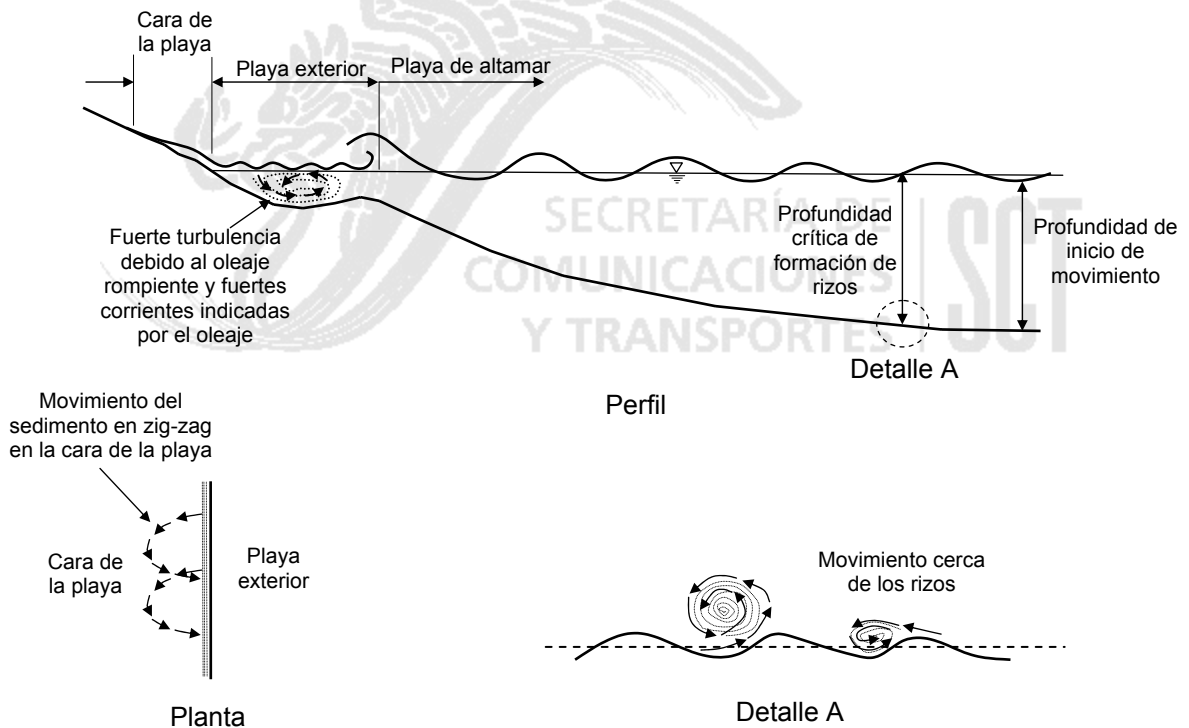


FIGURA 2.- Modos de movimiento del sedimento

**E.2.3.2. Profundidad límite del movimiento superficial**

El movimiento superficial indica que las partículas de arena cerca de la superficie del fondo se mueven en conjunto con la dirección del oleaje. Se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{H_0}{L_0} = 1,35 \left( \frac{\bar{D}}{L_0} \right)^{\frac{1}{3}} \sinh \frac{2\pi h}{L} \frac{H_0}{H}$$

### E.2.3.3. Profundidad límite del movimiento perfecto

El movimiento perfecto indica la condición en que las partículas se mueven tan fuerte que cambia la profundidad.

Desde el punto de vista de la ingeniería de costas, resulta de mucha importancia el cálculo de la profundidad límite del movimiento perfecto, más que las profundidades límite de los movimientos general y superficial. Se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{H_0}{L_0} = 2,4 \left( \frac{\bar{D}}{L_0} \right)^{\frac{1}{3}} \sinh \frac{2\pi h}{L} \frac{H_0}{H}$$

## F. PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR EL PERFIL DE EQUILIBRIO DE UNA PLAYA

El perfil de equilibrio se modela como la variación de la profundidad del agua  $h$ , en función de la distancia  $y$ , medida desde la línea de costa  $x$ , en dirección normal a la misma, hasta la profundidad de inicio de movimiento de los sedimentos  $D_c$ , es decir:

$$h = f(y), \quad \text{para } 0 > y > D_c$$

El cálculo del perfil de equilibrio puede utilizarse para conocer cuál será el ancho de playa que se puede llegar a ganar en un proyecto de relleno de playa, en este caso, se agrega una arena de diferente tamaño a la presente, por lo cual el perfil de la playa cambiará. El perfil de equilibrio es un esquema de cómo varía la profundidad conforme se aumenta la distancia sobre la costa, es una curva monótonica, que no representa las barras que pueden formarse en la playa, pero aún así muestra adecuadamente el perfil de playa; la distancia  $y$  puede variarse en múltiplos de 10 m para realizar el cálculo de la variación de la profundidad del agua  $h$ .

A continuación se presentan los modelos para estimar el perfil de equilibrio de una playa.

### F.1. PERFIL DE DEAN (1977)

Este perfil se calcula con la expresión:

$$h = A y^n$$

Donde:

$A$  = Parámetro de escala de sedimento, ( $m^{1/3}$ )

$h$  = Profundidad a la distancia  $y$ , (m)

$y$  = Distancia desde la costa hasta el punto de interés, (m)

$n$  = Parámetro de ajuste

$A$  se calcula conforme a lo establecido en la Fracción E.1. de este Manual, cuyo valor varía dentro del rango de  $0,0025 < A < 6,31$ ; para obtener su valor se utiliza primero la Tabla 1 de este Manual; en caso de que los límites sean mayores se utilizan las expresiones indicadas en los Incisos E.1.3. ó E.1.4. de este Manual.

Dean (1977) comparó más de 500 perfiles de playa (costa este y del Golfo de México en Estados Unidos) con la expresión anterior, encontrando que aunque el valor de  $n$  varía dentro

del rango de  $0,1 < n < 1,4$ , el valor de  $\frac{2}{3}$  permite el mejor ajuste, concordando con lo expresado por Bruun. Este es el que se recomienda utilizar para calcular el perfil de equilibrio.

## F.2. PERFIL DE BRUUN (1954)

Como se esquematiza en la Figura 3, el perfil de Bruun se calcula con la siguiente expresión:

$$h = A y^{2/3}$$

Donde:

$A$  = Parámetro de escala de sedimento, ( $m^{1/3}$ )

$h$  = Profundidad a la distancia  $y$ , (m)

$y$  = Distancia desde la costa hasta el punto de interés, (m)

$A$  se calcula conforme a lo establecido en la Fracción E.1. de este Manual.

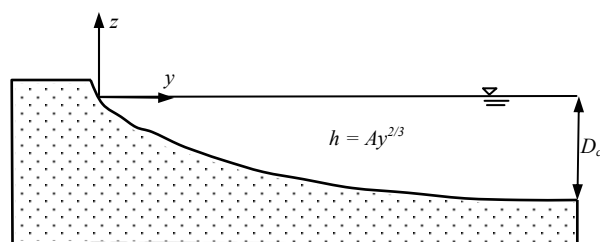


FIGURA 3.- Perfil de equilibrio

## G. BIBLIOGRAFÍA

Birkemeier, W., *Field data on seaward limit of profile change*, Journal of Waterways, Port and Oceanic Eng., Vol. 111 ASCE (1985)

Bruun, P., *Coast Erosion and the Development of Beach Profiles*, Journal of Waterways Experiment Station, Vol. 44, ASCE (1954)

Dean, R., *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts*, Newark, Universidad de Delaware, EUA (1977)

Dean, R., *Coastal sediment processes: toward engineering solutions*, Coastal Sediments, Vol. 1, ASCE (1987)

Hallermieier, R., *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*, Proc. 16th Coastal Eng. Conference, ASCE (1978)

Keulegan, G., *An experimental study of submarine sand bars*, Vicksburg, US Army, EUA (1948)

Kriebel, D., y Larson, N., *Engineering Methods for Predicting Beach Profile Response*, Proc. of Conf. on Coastal Sediments, ASCE (1991)

Van Rijn, L., *Principles of Coastal Morphology*, Aqua Publications, Amsterdam, Netherlands (1998)

Texto para el Proyecto del Centro Hidráulico Portuario, Vol. 7, *Propiedades Generales y Modelo Hidráulico del Movimiento de Arena*, México (1987)

Montoya, R., *Movimiento de arena*, Curso Internacional Ingeniería Hidráulica Portuaria, México (1988)