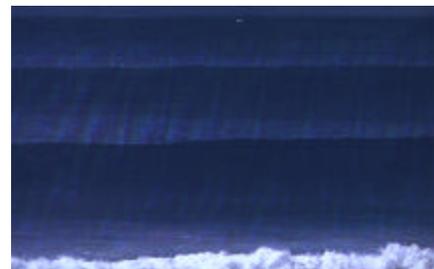




Tutor de  
Ingeniería de Costas



## MANUAL DEL USUARIO Tic 3.0



Ministerio de Medio Ambiente  
Dirección General de Costas

Universidad de Cantabria UC

G.I.O.C.  
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas





---

## **TUTOR DE INGENIERÍA DE COSTAS**

## MANUAL DEL USUARIO

### Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.	INTRODUCCIÓN.....	1.1
1.1	Presentación.....	1.1
1.2	Contenidos del presente documento .....	1.3

### Capítulo 2. ASPECTOS BÁSICOS

2.	ASPECTOS BÁSICOS.....	2.1
2.1	Antecedentes del Tutor de Ingeniería de Costas.....	2.1
2.2	Objetivos del programa .....	2.2
2.3	Usuario tipo y conocimientos requeridos .....	2.2
2.4	Contenido del programa .....	2.3
2.5	Plataforma y requisitos mínimos .....	2.4
2.6	Estructura interna y aspectos informáticos .....	2.5
2.7	Criterio de selección de las formulaciones incluidas.....	2.6
2.8	Posibilidades de desarrollo y ampliación.....	2.6

### Capítulo 3. INSTRUCCIONES GENERALES DE USO

3.	INSTRUCCIONES GENERALES DE USO.....	3.1
3.1	Instalación y primera ejecución del Tic.....	3.1
3.2	Procedimiento de carga y ejecución de los módulos.....	3.3

3.3	Descripción de los elementos del programa.....	3.3
3.3.1	Zonas de pantalla.....	3.3
3.3.2	Tipos de controles .....	3.5
3.3.3	Gráficos y croquis .....	3.7
3.3.4	Gestión y edición de ficheros.....	3.9
3.3.5	Documentos, tablas y herramientas de ayuda .....	3.11
3.3.6	Libreta de resultados.....	3.14
3.3.7	El módulo de impacto ambiental.....	3.16
3.4	Opciones de configuración .....	3.17
3.4.1	Unidades y valores por defecto .....	3.17
3.4.2	Funciones de comunicación entre módulos .....	3.17
3.4.3	Configuración de colores y fuentes.....	3.18
3.5	Control de errores.....	3.19
3.5.1	Mensajes de error .....	3.19
3.5.2	Mensajes de aviso.....	3.20

## **Capítulo 4. DESCRIPCIÓN BREVE DE LOS MÓDULOS**

4.	DESCRIPCIÓN BREVE DE LOS MÓDULOS .....	4.1
----	--	-----

## Capítulo 5. DESCRIPCIÓN INDIVIDUAL DE LOS MÓDULOS

5.	DESCRIPCIÓN INDIVIDUAL DE LOS MÓDULOS.....	5.1
5.1	Sección de dinámicas.....	5.1
5.1.1	Ondas.....	5.1
5.1.2	Oleaje.....	5.4
5.1.3	Propagación y rotura.....	5.26
5.1.4	Cálculo del nivel del mar.....	5.42
5.2	Sección de procesos sedimentarios.....	5.46
5.2.1	Análisis granulométrico .....	5.46
5.2.2	Transporte de sedimentos.....	5.49
5.2.3	Perfil de playas.....	5.53
5.2.4	Forma en planta de Playas.....	5.57
5.2.5	Estados morfodinámicos .....	5.63
5.2.6	Relaciones de equilibrio en estuarios.....	5.68
5.3	Sección de obras marítimas .....	5.71
5.3.1	Diques de escollera.....	5.71
5.3.2	Diques verticales.....	5.97
5.4	Sección de impacto ambiental.....	5.106



---

## **Anejo I. FICHAS DE LOS MÓDULOS**

## **Anejo II. TIPOS DE FICHERO**

## **Bibliografía**

---

## **LISTA DE SÍMBOLOS**



## Lista de Símbolos

$a$	=	amplitud de onda
$a_i$	=	amplitud de las componentes del análisis armónico
$A$	=	área de la canal de entrada (módulo SED 6-1)
$A$	=	parámetro del perfil de Dean
$A^*$	=	parámetro del perfil de Dean modificado para perfil con laja
$A_b$	=	área interior total de un estuario
$A_{ij}$	=	coeficientes de la teoría de ondas de Stokes
$A_e$	=	área dada en el manto principal de un dique en talud
$A_f$	=	área de marismas en un estuario
$A_u$	=	constante empírica del modelo de run-up de Losada y Giménez Curto
$B$	=	anchura de coronación de un dique de escollera
$B$	=	parámetro del perfil reflejante
$B_u$	=	constante empírica del modelo de run-up de Losada y Giménez Curto
$c$	=	celeridad de onda
$C_0$	=	constante de definición de la parábola de Hsu
$C_1$	=	constante de definición de la parábola de Hsu
$C_2$	=	constante de definición de la parábola de Hsu
$C_d$	=	coeficiente de arrastre
$C_f$	=	coeficiente de fricción
$c_g$	=	celeridad de grupo
$c_{g0}$	=	celeridad de grupo en profundidades indefinidas
$C_L$	=	coeficiente de empuje lateral
$C_M$	=	coeficiente de inercia
$c_0$	=	celeridad de onda en profundidades indefinidas
$CSD$	=	coeficiente de seguridad a deslizamiento
$CSV$	=	coeficiente de seguridad a vuelco
$d$	=	profundidad
$d_b$	=	profundidad de rotura
$d_s$	=	profundidad al pie de una estructura
$d_{tr}$	=	profundidad al nivel del seno de la onda
$D$	=	diámetro del pilote (módulo OBR 4.1)
$D_{16}$	=	diámetro del sedimento correspondiente al percentil del 16%
$D_{50}$	=	diámetro medio del sedimento
$D_{84}$	=	diámetro del sedimento correspondiente al percentil del 85%
$D_{n50}$	=	diámetro nominal de las piezas de un dique de escollera
$f_b$	=	frecuencia de emisión de vórtices
$F$	=	francobordo de la estructura
$F$	=	fetch o distancia de generación de oleaje



$F_d$	=	francobordo adimensional $\left( = \frac{F}{D_{n50}} \right)$
$F_D$	=	fuerza de arrastre
$F_i$	=	probabilidad acumulada del valor $x_i$
$F_L$	=	empuje lateral
$F_M$	=	fuerza de inercia
$g$	=	aceleración de la gravedad (9.81 m/Se)
$h$	=	distancia entre las líneas de separación de flujo
$h_s$	=	altura total de un dique
$h^*$	=	profundidad de cierre
$H$	=	altura de ola
$H_b$	=	altura de ola en rotura
$H_i$	=	altura de ola incidente en una estructura
$H_0$	=	altura de ola en profundidades indefinidas
$H_{s12}$	=	altura de ola significativa superada en 12 horas al año
$\bar{H}$	=	valor de la altura de ola media
$H_{rms}$	=	valor de la altura de ola media cuadrática
$H_s$	=	valor de la altura de ola significativa
$H_{si}$	=	altura de ola significativa incidente en una estructura
$H_{1/10}$	=	valor de la altura de ola media del 10% mayor
$H_{max}$	=	valor de la altura de ola máxima
$I_r$	=	número de Iribarren $\left( = \frac{\tan \mathbf{b}}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \right)$
$I_{rb}$	=	número de Iribarren $\left( = \frac{\tan \mathbf{b}}{\frac{H_b}{L_0}} \right)$
$I_{rc}$	=	número de Iribarren crítico en un dique en talud
$k$	=	número de onda $\left( = \frac{2p}{L} \right)$
$K_d$	=	constante de Hudson
$K_e$	=	número de Keulegan - Karpenter
$K_r$	=	coeficiente de refracción
$K_r$	=	coeficiente de reflexión de un dique de escollera (módulo OBR 1.4)
$K_s$	=	coeficiente de difracción
$K_t$	=	coeficiente de transmisión de una estructura



$k_x$	=	componente en $x$ del número de onda $K$
$k_y$	=	componente en $y$ del número de onda $K$
$k_1$	=	constante $k_1$ de la fórmula del CERC de transporte de sedimentos
$k_2$	=	constante $k_2$ de la fórmula del CERC de transporte de sedimentos
$L$	=	longitud de onda
$L_b$	=	longitud de onda en rotura
$L_0$	=	longitud de onda en profundidades indefinidas
$m$	=	tangente de la pendiente media de la playa (= $\tan \beta$ )
$m_0$	=	momento espectral de orden 0
$m_1$	=	momento espectral de orden 1
$m_2$	=	momento espectral de orden 2
$m_3$	=	momento espectral de orden 3
$m_4$	=	momento espectral de orden 4
$M$	=	volumen de arena en una desembocadura (módulo SED 6-1)
$M$	=	carrera de marea media
$M_x$	=	momento debido a la fuerza $x$ en una estructura
$M_{\phi b}$	=	valor medio en unidades $\phi$ de la muestra de relleno
$M_{\phi n}$	=	valor medio en unidades $\phi$ de la muestra de nativa
$N$	=	número de olas en un estado de mar (módulo OBR 2.1)
$N$	=	número de datos censurados en los ajustes de extremos
$N_c^+$	=	número de crestas positivas
$N_c^-$	=	número de crestas negativas
$N_s^+$	=	número de senos positivos
$N_s^-$	=	número de senos negativos
$N_s$	=	número de estabilidad de un dique en talud
$N_T$	=	número total de datos en los ajustes de extremos
$p_e$	=	presión atmosférica media
$p_0$	=	presión en el centro de una borrasca
$p_d$	=	presión pseudo hidrostática en un espaldón
$p_m$	=	presión de impacto en un espaldón
$p_1$	=	presión de Goda para la definición de esfuerzos sobre diques verticales
$p_2$	=	presión de Goda para la definición de esfuerzos sobre diques verticales
$p_3$	=	presión de Goda para la definición de esfuerzos sobre diques verticales
$p_4$	=	presión de Goda para la definición de esfuerzos sobre diques verticales
$P$	=	prisma de marea (módulo SED 6.1)
$P$	=	permeabilidad nocional de Van der Meer
$q_r$	=	caudal de rebase
$Q$	=	caudal sólido de transporte longitudinal en zona de rompientes
$R$	=	distancia del punto de difracción a la línea de costa en el perfil con



		difracción
$R$	=	radio de un punto de la curva de forma en planta de equilibrio
$R_A$	=	tasa de sobrerrelleno
$R_e$	=	número de Reynolds
$R_j$	=	factor de realimentación
$R_u$	=	run-up
$R_{u1\%}$	=	run-up superado el 1% del tiempo en un estado de mar
$R_{u2\%}$	=	run-up superado el 2% del tiempo en un estado de mar
$R_{u50\%}$	=	run-up superado el 50% del tiempo en un estado de mar
$RTR$	=	carrera de marea relativa $\left( = \frac{M}{H_b} \right)$
$S$	=	parámetro de daño
$S_p$	=	subpresiones de una estructura
$t$	=	tiempo
$t_i$	=	duración del campo de viento
$T$	=	régimen de transporte (módulo SED 2.1)
$T$	=	periodo
$T_p$	=	periodo de pico
$T_s$	=	periodo significativo entre pasos ascendentes por cero
$T_z$	=	periodo entre pasos ascendentes por cero
$\overline{T_z}$	=	periodo medio entre pasos ascendentes por cero
$T_{1/10}$	=	periodo medio del 10% mayor ascendentes por cero
$T_{01}$	=	periodo espectral $T_{01}$
$T_{02}$	=	periodo espectral $T_{02}$
$u$	=	velocidad transversal en la zona de rompientes
$\overline{u}$	=	corriente media en la dirección $x$
$u_b$	=	velocidad transversal en el fondo en zona de rompientes
$U_b$	=	velocidad al borde de la capa límite (módulo OBR 4.1)
$u_m$	=	velocidad transversal media en zona de rompientes
$v$	=	velocidad longitudinal en la zona de rompientes
$v_f$	=	velocidad de caída de grano
$U_a$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable con corrección por efectos no lineales
$\hat{U}_a$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable con corrección por efectos no lineales en la dirección del fetch crítico con tipo de fetch restringido
$U_e$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable
$\hat{U}_e$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable en la dirección del fetch crítico con tipo de fetch restringido
$V_b$	=	velocidad longitudinal en el punto de rotura



$w$	=	velocidad horizontal del viento sobre la lámina de agua
$W$	=	peso de una estructura
$W$	=	profundidad media de la canal (módulo SED 6.1)
$\overline{w^2}$	=	velocidad vertical cuadrática media en zona de rompientes
$x$	=	coordenada horizontal
$y$	=	coordenada horizontal
$z$	=	coordenada vertical
$\alpha$	=	ángulo del talud de un dique en talud
$\alpha$	=	ángulo de definición de la espiral logarítmica (módulo SED 4.2)
$\alpha_{min}$	=	ángulo de definición de la forma en planta de equilibrio
$\beta$	=	ángulo de definición de la forma en planta de equilibrio ( $\mathbf{b} = 90 - \mathbf{a}_{min}$ )
$\beta$	=	parámetro de forma de las distribuciones de máximos
$\beta$	=	pendiente media de la playa
$\beta_1$	=	coeficiente de sesgo
$\beta_2$	=	coeficiente de curtosis
$\gamma_p$	=	densidad del material de un dique en talud
$\delta$	=	parámetro de escala de las distribuciones de máximos
$\gamma$	=	índice de rotura $\left( = \frac{H_b}{d_b} \right)$
$\gamma$	=	peso específico del agua de mar
$\gamma_f$	=	factor de reducción por rugosidad del talud de la formulación de run-up de Van der Meer
$\gamma_h$	=	factor de reducción por profundidad a pie de dique de la formulación de run-up de Van der Meer
$\gamma_s$	=	peso específico del sedimento
$\gamma_\beta$	=	factor de reducción por incidencia oblicua de la formulación de run-up de Van der Meer
$\zeta^+$	=	altura de cresta
$\zeta^-$	=	altura de seno
$\eta^*$	=	nivel de diseño del método de Goda para diques verticales
$\bar{h}$	=	valor del nivel medio
$\eta_{rms}$	=	valor del nivel medio cuadrático $\left( = \overline{h^2} \right)$
$\eta_{max}$	=	valor del nivel máximo
$\eta_{min}$	=	valor del nivel mínimo
$\theta$	=	ángulo de incidencia del oleaje
$\theta_b$	=	ángulo de incidencia en rotura
$\kappa$	=	coeficiente de fricción del viento



$\lambda$	=	coeficiente $\lambda$ de la teoría cnoidal (módulo DIN 1.1)
$\lambda$	=	parámetro de localización de las distribuciones de máximos
$\lambda$	=	porosidad del sedimento
$v$	=	anchura espectral $v$
$v$	=	coeficiente de viscosidad de remolino
$\xi_{rms}$	=	valor del surf-beat medio cuadrático
$\pi$	=	constante pi
$\rho_s$	=	densidad del sedimento
$\sigma_{\phi b}$	=	desviación típica en unidades $\phi$ de la muestra de relleno
$\sigma_{\phi n}$	=	desviación típica en unidades $\phi$ de la muestra de nativa
$\Psi$	=	función de estabilidad de un dique en talud
$\tau_0$	=	tensión tangencial en el fondo
$\tau_{0c}$	=	tensión tangencial crítica del fondo
$\tau_w$	=	tensión tangencial del viento sobre la lámina de agua
$\omega$	=	frecuencia angular $\left( = \frac{2p}{T} \right)$
$\phi$	=	función potencial
$\phi$	=	unidad de medida del tamaño del sedimento $(= -\log_2 D)$
$\phi_i$	=	desfase de las componentes del análisis armónico
$\Omega$	=	parámetro adimensional de caída de grano
$\gamma$	=	parámetro de perturbación $(= K \cdot a)$
$\gamma$	=	anchura espectral $\gamma$

---

## **LISTA DE FIGURAS**



## **Lista de Figuras**

### **Figuras del Capítulo 3**

- Figura 3.1. Pantalla de presentación del TIC
- Figura 3.2. Aspecto de un módulo genérico
- Figura 3.3. Cuadro de tipos de controles
- Figura 3.4. Ejemplo de ventana de gráfico
- Figura 3.5. Ejemplo de ventana de croquis
- Figura 3.6. Tipos de ficheros y módulos asociados
- Figura 3.7. Ejemplo de ventana de ayuda
- Figura 3.8. Ejemplo de texto de la libreta de resultados
- Figura 3.9. Ejemplo de valores anteriores de una variable

### **Figuras del Capítulo 5**

- Figura 5.1.1. Análisis estadístico de un estado de mar. Esquema general del método
- Figura 5.1.2. Análisis espectral de un estado de mar. Esquema general del método
- Figura 5.1.3. Esquema de cálculo de fetch restringido
  
- Figura 5.2.1. Esquema general de cálculo de transporte de sedimentos
- Figura 5.2.2. Forma en planta de equilibrio. Espiral logarítmica
- Figura 5.2.3. Forma en planta de equilibrio. Parábola de Hsu
- Figura 5.2.4. Definición geométrica de los tómbolos
- Figura 5.2.5. Estados modales en playas con marea
  
- Figura 5.3.1. Cuadro de permeabilidad nocional de Van der Meer
- Figura 5.3.2. Esquema de un dique rebasable tipo. Formulación de Vidal (1992)
- Figura 5.3.3. Esfuerzos sobre un espaldón. Formulación de Martín
- Figura 5.3.4. Esfuerzos sobre un dique mixto. Método de Goda
  
- Figura 5.4.1. Esquema del método de evaluación de impacto ambiental
- Figura 5.4.2. Matriz acción-factor genérica
- Figura 5.4.3. Matriz acción-factor para proyectos de estabilización de dunas
- Figura 5.4.4. Matriz acción-factor para proyectos de dragado
- Figura 5.4.5. Matriz acción-factor para proyectos de muros y diques
- Figura 5.4.6. Matriz acción-factor para proyectos de regeneración de playas
- Figura 5.4.7. Aspecto genérico de un proyecto de impacto ambiental

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

---



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Presentación

Dentro de la ingeniería civil, es tal vez la especialidad de playas y costas una de las que más tardíamente se ha desarrollado, siendo sus avances más importantes fruto de investigaciones realizadas en las últimas décadas. Al mismo tiempo que se empezaba a desentrañar la naturaleza de los fenómenos presentes en la zona de rompientes de las playas o se formulaban métodos para evaluar el transporte sedimentario en una bahía, los profesionales de ramas como estructuras, geotecnia o hidráulica urbana disponían ya de teorías y herramientas consolidadas esperando la llegada de la revolución informática para dar solución a una buena parte de los problemas existentes.

Las razones que justifican este discurso histórico son variadas: la reciente toma de conciencia de las autoridades y la población en general sobre la importancia de la zona costera como franja de concentración de actividades vitales; la mayor demanda de actividades turísticas y de recreo; finalmente, la creciente preocupación ambiental. En otro orden de motivos, se podría hablar de la complejidad de los fenómenos involucrados, que en muchos casos han requerido avances previos en ramas más básicas del conocimiento (matemáticas, física, computación).

Un hecho ya apuntado merece atención y reflexión especiales: la ingeniería en las últimas décadas del siglo XX se encuentra estrechamente ligada a la tecnología informática; es más, su futuro depende en buena medida del de esta nueva disciplina. La dependencia ingeniería-informática se materializa en dos aspectos: revolución de las herramientas y revolución en los métodos. El primero representa la desaparición a efectos prácticos de objetos comunes como la regla de cálculo, la máquina de escribir o la mesa de dibujo; el segundo, de índole más profunda, apunta a un cambio de planteamientos en la resolución de los problemas, fruto de la potencia de cálculo de las nuevas máquinas.

El trabajo que se presenta a lo largo de estas páginas, si bien hace uso exhaustivo de las nuevas tecnologías, no introduce novedades en la forma de resolución de los problemas, es decir, no aporta nuevas soluciones a los problemas de la ingeniería de costas ni presenta un sofisticado modelo numérico que resuelve las ecuaciones del flujo con mayor grado de exactitud. Constituye, más bien, una aportación a las herramientas de este campo en consonancia con los tiempos. A lo largo de los últimos años se han publicado multitud de libros y artículos sobre los más diversos temas, aportando un enorme número de formulaciones y métodos. En muchos casos se trata de modelos matemáticos, mientras que en otros son ajustes simples a resultados empíricos o a



ensayos de laboratorio. El Ministerio de Medio Ambiente venía contemplando desde hace algunos años la necesidad de seleccionar y agrupar las fórmulas o métodos simples más utilizados en el ámbito profesional en un único entorno que proporcionara las ventajas de las tecnologías actuales, combinando claridad y facilidad de manejo. Fruto de esta iniciativa es el programa que se describe en este documento, denominado Tutor de Ingeniería de Costas<sup>1</sup>.

Cualquier ingeniero en activo y, en general, cualquier persona enfrentada a la resolución de un problema físico donde interactúan agentes naturales con elementos creados por el hombre, siente ante todo la necesidad de identificar con claridad los fenómenos determinantes en el proceso, aquellos que protagonizan la acción, sus componentes principales. Con ello se consigue simplificar el estudio del problema, dejando a un lado otros aspectos presentes pero no determinantes. Dado este paso, el siguiente consiste en caracterizar de una manera física, intuitiva, cada fenómeno que interviene, adquiriendo una idea clara de como se manifiesta en su forma más simplificada. Llegados a este punto, se puede pensar en proponer soluciones concretas a geometrías reales, utilizando modelos más sofisticados, que en ningún caso pueden contradecir en órdenes de magnitud y tendencias las estimaciones previas. Las formulaciones que conforman el Tic responden a las exigencias propias de la fase de tanteo y prediseño de cualquier intervención en la zona costera; con el programa se pretende proporcionar un acceso rápido y simple al acervo de conocimientos acumulado en la disciplina. En muchos casos, es posible que el usuario se sienta no sólo reconfortado por el fácil acceso a fórmulas de siempre conocidas sino también sorprendido al descubrir un buen número de ellas de reciente incorporación. Dada la rápida evolución del estado del arte, la puesta al día en lo referente a nuevos métodos y formulaciones es tarea obligada de cualquier técnico, tanto en el papel de diseñador como de ejecutor.

Por otro lado, no se puede desestimar el potencial didáctico asociado a una tarea tan enciclopédica. Sin convertir este objetivo en el principal, se ha intentado conservar el espíritu divulgativo, previendo que un sector de usuarios podría estar compuesto de futuros técnicos en fase de formación que desean tener una panorámica clara de los avances disponibles y un entorno de comprobación de sus propios ejercicios analíticos o numéricos.

---

<sup>1</sup> De ahora en adelante Tic



## 1.2 Contenidos del presente documento

En el capítulo 2 se hará una descripción general del programa, atendiendo a su estructura interna y externa. Se comentarán los criterios seguidos a la hora de seleccionar los contenidos y se justificarán diferentes aspectos relativos a su apariencia y modo de uso. Finalmente, se comentarán las posibilidades de ampliación y mejora de sus actuales funciones.

Aunque el programa se ha diseñado para que su uso resulte lo más intuitivo posible, en el capítulo 3 se podrá encontrar el manual de usuario donde se describen las características del mismo, los pasos necesarios para ejecutar los módulos y la manera de aprovechar diversas utilidades disponibles.

En el capítulo 4 se recoge una breve reseña de cada módulo, con la que el usuario pueda ubicarse de forma rápida.

La descripción individual de los módulos que componen el Tic se encuentra en el capítulo 5, que es el más extenso de cuantos integran el presente documento. Se incluye un resumen de los fundamentos de las formulaciones empleadas y las hipótesis de partida de cada una de ellas. El usuario interesado en una información exhaustiva de las distintas teorías deberá referirse a la bibliografía.

Finalmente, se presentan dos anejos. El primero contiene una ficha técnica de cada módulo, donde se detallan de forma individual opciones de ejecución, variables de entrada y salida, ficheros y gráficos. En el segundo se especifican los formatos de los diferentes ficheros de datos admitidos por el programa.

## **CAPÍTULO 2**

---

### **ASPECTOS BÁSICOS**



## 2. ASPECTOS BÁSICOS

### 2.1 Antecedentes del Tutor de Ingeniería de Costas

La mayor parte de las organizaciones y empresas dedicadas a las obras marítimas, así como los centros universitarios que imparten programas relacionados con la materia disponen de librerías de subrutinas que facilitan la resolución de problemas habituales. Dicha práctica es comprensible si se tiene en cuenta el frondoso aparato matemático del que suelen ir acompañadas las diversas formulaciones existentes. Sin embargo, sólo en contados casos se han divulgado programas adaptados a un usuario genérico que recojan un buen número de ellas. El más conocido sin duda es el Automated Coastal Engineering System, más conocido como ACES y publicado por el Coastal Engineering Research Center (CERC) del departamento de la Armada de los EEUU. La última versión disponible en la actualidad es la 1.07 con fecha de septiembre de 1992, aunque ya está anunciada una nueva para fecha muy próxima. Esta programado para ordenadores personales y la versión para PC utiliza plataforma MS-DOS; su contenido cubra la mayoría de las ramas de la ingeniería de costas. Cabe también mencionar el programa denominado CRESS realizado por IHE Delft, aunque éste contempla también temas de hidráulica fluvial; la versión última disponible (7.0) es de 1998.

Los motivos que impulsan al Ministerio de Medio Ambiente a realizar un nuevo paquete informático son fundamentalmente las siguientes:

- Actualizar y ordenar las formulaciones y metodologías disponibles en la actualidad.
- Utilizar los avances de la tecnología informática para crear un entorno agradable y de uso intuitivo que haga uso de las ventajas hoy disponibles en cuanto a gráficos, controles, etc.
- Aprovechar e integrar la experiencia española dentro de esta disciplina en la medida de lo posible.

Se pretende por tanto que la nueva herramienta esté en concordancia con los medios actuales tanto en su forma como en su contenido.



## 2.2 Objetivos del programa

El objetivo básico del Tic es reunir aquellas fórmulas y procedimientos de cálculo simples relativos a la ingeniería de costas que más utilidad tienen dentro de la actividad profesional. Se persigue que la organización sistemática y uso intuitivo que proporciona el programa aumente o afiance el nivel teórico de los técnicos. De esta manera se verá asimismo incrementada la fiabilidad de sus decisiones, la precisión de los cálculos y los costes derivados de su posterior puesta en práctica.

## 2.3 Usuario tipo y conocimientos requeridos

El Tutor de Ingeniería de Costas está específicamente diseñado para satisfacer las necesidades del ingeniero de costas, tanto el encargado de redactar proyectos como el ejecutor de una obra. Se pretende proporcionar una herramienta útil de tanteo y prediseño donde estén contenidas las formulaciones más comunes para evaluar cada uno de los aspectos que intervienen en las actuaciones sobre el litoral.

Aunque no es su misión, el Tic podría ser un instrumento indicado para profesores universitarios y futuros ingenieros que deseen ejercitarse en el uso de las fórmulas y métodos de cálculo, adquiriendo una visión más clara de los distintos fenómenos involucrados.

Para la utilización del programa se requieren conocimientos básicos de las disciplinas que se tratan. En concreto sería conveniente cierta familiaridad con los siguientes temas:

- Teorías de ondas, análisis de oleaje y fenómenos de propagación.
- Conocimientos básicos de ingeniería de playas.
- Conocimientos básicos de diseño de obras marítimas.

Por lo general, una asignatura anual de ingeniería de costas o equivalente, impartida en cualquier escuela técnica o superior, proporciona el bagaje de conocimientos suficiente para obtener el máximo rendimiento del programa.



## 2.4 Contenido del programa

El programa está compuesto por una serie de unidades básicas, independientes en su contenido, denominadas módulos. Cada módulo presenta información en una pantalla completa y resuelve un determinado problema, una vez introducidos los datos necesarios. Los módulos están agrupados en capítulos, que a su vez se estructuran en cuatro bloques temáticos: dinámicas, procesos sedimentarios, obras marítimas e impacto ambiental. El esquema final consta por tanto de cuatro grandes secciones que agrupan ordenados por capítulos un total de 33 módulos. Se ha intentado que la estructura de agrupación por bloques y capítulos fuese lo más lógica posible, si bien los criterios varían necesariamente en función del usuario. Todos los bloques excepto el primero tienen una justificación práctica, puesto que recogen aspectos genéricos de la ingeniería de playas, de estructuras marítimas o de evaluación de impacto ambiental. El primero, en cambio, se denomina de forma genérica como dinámicas y reúne conocimientos más teóricos susceptibles de ser utilizados como punto de partida de un módulo más ingenieril. El apartado de impacto ambiental comprende una única aplicación con características peculiares con respecto al resto, tal y como se describe en el apartado 3.3.7 y en las secciones correspondientes de los capítulos 4 y 5.

El esquema completo de los módulos incluidos en esta versión es:

SECCIÓN	CAPÍTULO	MÓDULO
{	Ondas	{ - Teorías de ondas
	Oleaje	{ - Análisis estadístico de un estado de mar - Análisis espectral de un estado de mar - Previsión de oleaje - Regímenes extremales: método POT - Regímenes extremales: ajuste de colas
	Propagación y rotura	{ - Propagación de ondas - Propagación de oleaje - Rotura - Run-up en playas - Corrientes longitudinales - Corrientes transversales
	Nivel del mar	{ - Marea meteorológica - Marea astronómica



Procesos litorales	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Análisis Granulométrico</li> <li>— Transporte de Sedimentos</li> <li>— Forma en Planta</li> <li>— Transporte Longitudinal</li> <li>— Estados morfodinámicos</li> <li>— Procesos litorales en Estuarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis granulométrico</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formulación de Van Rijn</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidad de cierre</li> <li>- Perfil de equilibrio</li> <li>- Planta de equilibrio</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte longitudinal</li> <li>- Planta de equilibrio</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estados morfodinámicos</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relaciones de equilibrio</li> </ul>
Obras marítimas	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Flujo en diques de escollera</li> <li>— Estabilidad de Diques de Escollera</li> <li>— Cálculo de diques verticales y mixtos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Run-up</li> <li>- Rebase</li> <li>- Transmisión</li> <li>- Reflexión</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diques no rebasables</li> <li>- Diques rebasables. Método de Vidal et al.</li> <li>- Espaldones</li> <li>- Diques rebasables. Método de Ahrens-V.d.M.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diques verticales</li> <li>- Diques mixtos</li> </ul>
Impacto Ambiental		

## 2.5 Plataforma y requisitos mínimos

El Tutor de Ingeniería de Costas está diseñado para funcionar en un PC con sistema operativo Windows 95/98 o Windows NT 4.0 y procesador 486 a 66 Mhz o superior. Se necesitan al menos 45 Mb de espacio libre en el disco duro y 16 Mb de memoria RAM. Algunas de las capacidades del programa están condicionadas por el



tipo de equipo, como es el caso del volumen máximo de módulos abiertos al mismo tiempo. El hecho de que haya otros programas funcionando de forma simultánea o residentes en memoria puede también incidir en su rendimiento, sobre todo en el caso de los ordenadores menos potentes.

## 2.6 Estructura interna y aspectos informáticos

El Tic consta desde el punto de vista de concepción y composición de dos niveles bien diferenciados: por un lado, los programas de cálculo de cada uno de los módulos; por otro, el entorno de trabajo, con sus aspectos visuales y de comunicación con el usuario, así como de gestión del conjunto. De esta manera se ha intentado separar las tareas de ingeniería de aquellas que competen directamente a profesionales informáticos, si bien en la práctica la cooperación y mutua adaptación son determinantes.

El tipo de solución informática adoptada para la parte ingenieril del programa debía satisfacer una serie de requisitos:

- Lenguaje de programación simple e intuitivo, fácil de dominar por un técnico con conocimientos medios de informática.
- Lenguaje diseñado específicamente para realizar cálculos matemáticos complejos, a ser posible acompañado de una buena librería de funciones matemáticas y estadísticas.

Con estos criterios se optó por el lenguaje Fortran, en su versión Fortran 90 de Microsoft, acompañado de la librería de subrutinas IMSL (International Mathematical and Statistical Library).

La programación de la cáscara o *shell* del programa, entorno gráfico y de gestión de módulos, está realizada en Visual C++ de Microsoft. Los programas en Fortran se incorporan al programa principal en forma de DLLs, siguiendo un procedimiento estándar.

Todas las variables de entrada o salida pertenecientes a los códigos de los módulos se identifican con una variable global del programa principal. Este hecho garantiza la comunicación entre las distintas pantallas y posibilita ciertas operaciones



que se describirán más adelante.

## 2.7 Criterio de selección de las formulaciones incluidas

En la elección de las formulaciones que constituyen el Tutor de Ingeniería de Costas se ha seguido de cerca el Documento de Referencia, perteneciente al igual que el Tic a la Asistencia Técnica “Desarrollo de un Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral”. En muchos casos se ha variado el orden de presentación del material o la manera en que se encuentra agrupado; esto se debe a que el Documento de Referencia persigue el rigor teórico en la exposición de las diferentes formulaciones, mientras que el programa que aquí se presenta promueve su aplicación práctica directa.

## 2.8 Posibilidades de desarrollo y ampliación

Uno de los primeros aspectos que se tuvieron en cuenta y que resulta de especial importancia en un programa de estas características es la posibilidad de ampliación del número de módulos o la modificación de los existentes. Se prevé la creación de un sistema que permita incorporarlos de manera sencilla.

La concepción global del programa hace de él no sólo un mero conglomerado de aplicaciones individuales, sino que permite de forma natural la comunicación entre ellas. Esto permite que determinadas variables, comunes a ciertos módulos, se puedan actualizar automáticamente al pasar de una pantalla a otra (ver apartado 3.4.2). Basándose en la misma filosofía, también sería posible el encadenamiento de una serie de ejecuciones, de tal forma que los resultados de una de ellos sirvan de datos de partida para la siguiente. Queda totalmente abierta la opción de crear un lenguaje de macros con el cual el propio usuario gestiona y configura el funcionamiento de programa de acuerdo a sus propias necesidades.

El lenguaje C++ tiene la ventaja, además de utilizar los controles estándar del propio Windows, de ser fácilmente traspasable a otras plataformas, como podría ser una estación UNIX o un Macintosh. Se ha previsto la posibilidad de futuras versiones del programa adaptadas a otros tipos de máquinas. Otra posible alternativa que es del todo viable es la de integrar el programa dentro de uno de mayores dimensiones. Este programa principal gestionaría los contenidos del Tutor de Ingeniería de Costas junto con otras utilidades, permitiendo la interacción de las variables del Tic con, por ejemplo, un sistema de información geográfica (GIS).

## **CAPÍTULO 3**

### **INSTRUCCIONES GENERALES DE USO**



### 3. INSTRUCCIONES GENERALES DE USO

#### 3.1 Instalación y primera ejecución del Tic

Para instalar el Tutor de Ingeniería de Costas se debe introducir el CD de instalación y seguir las instrucciones que van apareciendo en pantalla. El programa de instalación colocará los archivos del programa en el directorio elegido, o en el designado por defecto si así se desea. Así mismo, una vez concluido el proceso, se creará una carpeta en el menú de programas y un icono de acceso directo que puede transportarse directamente al escritorio.

Para ejecutar el Tic es necesario pulsar dos veces en el archivo *tutor.exe* situado en el directorio de instalación o en el icono de acceso directo del escritorio. Entonces aparecerá una pantalla de presentación donde se indica el nombre y versión del producto. Al pulsar el botón *aceptar* se accede directamente a la página principal del programa (fig. 3.1), indicando que todo está listo para a utilizarlo.

El Tutor de Ingeniería de Costas utiliza un entorno plenamente integrado en un sistema operativo Windows 95/98 o Windows NT. Se ha perseguido ante todo la claridad en la presentación de la información relativa a cada módulo, la cual siempre aparece contenida en una única pantalla. El usuario utiliza para comunicarse con el programa, además de la pantalla y el teclado, un ratón genérico. El esquema del programa es de tipo árbol, es decir, se accede a las diferentes unidades de ejecución partiendo de la sección a la que pertenece y seleccionando dentro de ella el capítulo correspondiente y, dentro de él, el módulo que se desea ejecutar; por tanto, todos los módulos se sitúan en un tercer nivel. Por ejemplo, para acceder a la pantalla de análisis espectral de un estado de mar es necesario pulsar con el cursor del ratón en la sección Dinámicas, a continuación, en el capítulo Oleaje y, finalmente, en Análisis Espectral de un Estado de Mar.



Figura 3.1. Pantalla de presentación del Tic



## 3.2 Procedimiento de carga y ejecución de los módulos

Para cargar uno de los módulos es necesario desplegar el árbol lateral hasta el tercer nivel y a continuación pulsar dos veces con el ratón en el tema elegido. Una nueva pantalla se abre automáticamente. El árbol puede ocultarse en cualquier momento accionando un botón de la barra de herramientas superior diseñado a tal efecto.

El programa permite abrir tantos módulos como se desee, pudiéndose pasar de uno a otro mediante el sistema de ventanas, al igual que cualquier otro programa de Windows. Al intentar seleccionar sobre el árbol un módulo ya abierto, el efecto conseguido es el de activar la ventana correspondiente.

Una vez que se ha procedido a la carga de un módulo genérico, aparecen en pantalla una serie de controles y elementos gráficos que se describen a continuación.

## 3.3 Descripción de los elementos del programa

### 3.3.1 Zonas de pantalla

En primer lugar, se aprecian dos zonas bien diferenciadas dentro de cada módulo, agrupando cada una de ellas una serie de controles (fig. 3.2). Por un lado, rodeadas por un marco de color verde, se encuentran las variables de entrada, es decir, los valores que el usuario debe introducir para obtener los resultados correspondientes al módulo en cuestión. Esta zona de entrada de datos se sitúa siempre en la parte izquierda de la pantalla.

De forma similar, se resalta el conjunto de variables resultados rodeándolo de una línea inicialmente negra. Cuando se ejecuta un módulo, se actualizan de forma automática las variables de salida de acuerdo a los valores de entrada. Cuando esto sucede, el negro de la línea exterior de zona de resultados se vuelve azul, para indicar concordancia entre entradas y salidas. En el momento en que modifica un solo dato, es decir, cuando dejan de concordar ambas zonas de pantalla, vuelve a

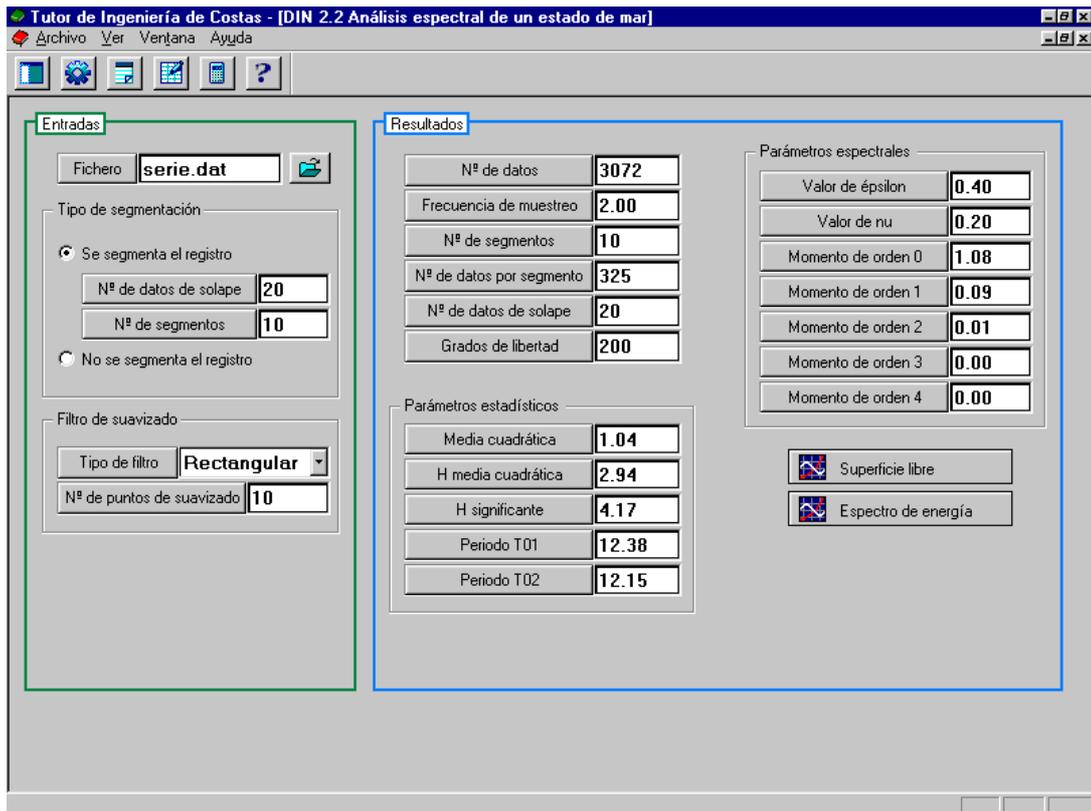


Figura 3.2.Aspecto de un módulo genérico



parecer el negro, color que permanece hasta que se vuelve a ejecutar. De esta manera se previenen posibles confusiones debidas a posibles desfases entre datos de entrada y resultados

### 3.3.2 Tipos de controles

Se denomina control a cualquier dispositivo a través del cual el usuario se comunica con el programa aportando o recibiendo información. Todas las variables de cualquier módulo, tanto las de entrada como las resultado, tienen asociadas un control que sirve para asignarlas un valor, si son entradas, o para mostrar el resultado de los cálculos, en el caso de las salidas. Existen los siguientes tipos de controles:

- Control de edición: se utiliza para asignarle un valor a una variable escalar o a una cadena de caracteres. Está representado por una etiqueta con el nombre de la variable y una casilla a su derecha conteniendo su valor.
- Control desplegable: permite elegir, dentro de una lista de elementos, uno de ellos. Se utilizan a menudo para elegir una determinada opción de ejecución en un módulo.
- Control con ventana asociada: se trata de un control típico de edición con un botón a la derecha que hace aparecer una ventana. Dicha ventana puede ser un control de selección de ficheros, una página HTML o cualquier otra utilidad.
- Botón radial: se coloca en la zona de entradas de un módulo al efecto de elegir una determinada teoría de cálculo u opción de ejecución. Son de forma circular y se seleccionan con el ratón.
- Casilla de control: es similar al botón radial, sólo que tiene forma de casilla cuadrada y al activarlo aparece una cruz en su interior. Este tipo de control se utiliza para seleccionar una serie de elementos de una lista.
- Control de tipo tabla: en ocasiones ciertas entradas o salidas se adaptan de manera natural a una ordenación en forma de tabla, lo que equivale a varios controles de edición agrupados. Siempre que esto es posible se opta por una solución así, debido a su claridad y economía de espacio.
- Botón: Se ha utilizado a menudo en la zona de resultados para permitir la aparición de una ventana gráfica, que por motivos de espacio no se puede visualizar de forma automática al ejecutar. Las ventanas de gráficos permiten ver un resultado de tipo vector, un conjunto de puntos (x,y) o un croquis resultado de una ejecución. Las ventanas de gráficos se describen específicamente en el apartado siguiente.

La figura 3.3 presenta ejemplos gráficos de cada uno de los controles descritos.



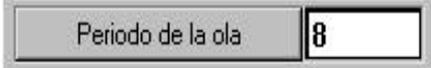
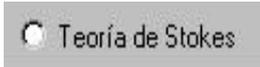
TIPO DE CONTROL	EJEMPLO
Control de edición.	
Control de apertura	
Control de radio.	
Lista desplegable.	
Botón de gráfico.	
Tabla.	

Figura 3.3. Cuadro de tipos de controles

### 3.3.3 Gráficos y croquis

Una serie de módulos contienen en la zona de resultados uno o varios botones de gráficos que permiten visualizar información de tipo vector o pares de puntos (x,y). Al



pulsar en cualquiera de ellos, aparece en pantalla una nueva ventana como la que se representa en la figura 3.4. Dicha ventana consta de una barra de herramientas en la zona superior, una zona central donde se representan las diferentes gráficas con su leyenda y una franja inferior que contiene los nombres de todos los vectores o conjuntos (x,y) representados junto a sendas casillas de control que permiten activarlos o desactivarlos. Las utilidades de la barra de herramientas son las siguientes:

- Exportar: permite guardar los valores numéricos (x,y) representados en la gráfica en un fichero de texto con formato en columnas. Al pulsar el botón aparece un diálogo preguntando el nombre del fichero y su ubicación.
- Copiar: sirve para enviar el gráfico al portapapeles de Windows, con formato \*.bmp. Posteriormente este gráfico podrá incorporarse a cualquier documento mediante la opción de pegar.
- Imprimir: imprime el gráfico tal y como aparece en pantalla en la impresora configurada por defecto.
- Leyenda: hace aparecer o desaparecer la leyenda del gráfico.
- Alejar: se utiliza para disminuir la escala de los ejes x e y, reduciendo el tamaño de los gráficos.
- Ver todo: ajusta la extensión de las gráficas al tamaño de la ventana
- Preferencias: al pulsar este botón, aparece una ventana de configuración del gráfico. En ella se permiten modificar los colores del fondo, el color y tipo de línea, el tipo de escala de los ejes (normal o logarítmica) y el espaciado de la rejilla.

Además, se puede utilizar el ratón sobre la superficie de la gráfica para lograr determinados efectos: fijando los límites superior derecho e inferior izquierdo de un rectángulo con el botón izquierdo del ratón, se hace un zoom del área seleccionada; manteniendo el botón derecho del ratón apretado sobre un punto del gráfico, y desplazando el ratón, se desplaza el gráfico en la dirección deseada manteniendo la misma escala de los ejes. Se hace notar que si una ventana contiene una sola gráfica, el botón leyenda, la propia leyenda y la franja inferior carecen de sentido, y por lo

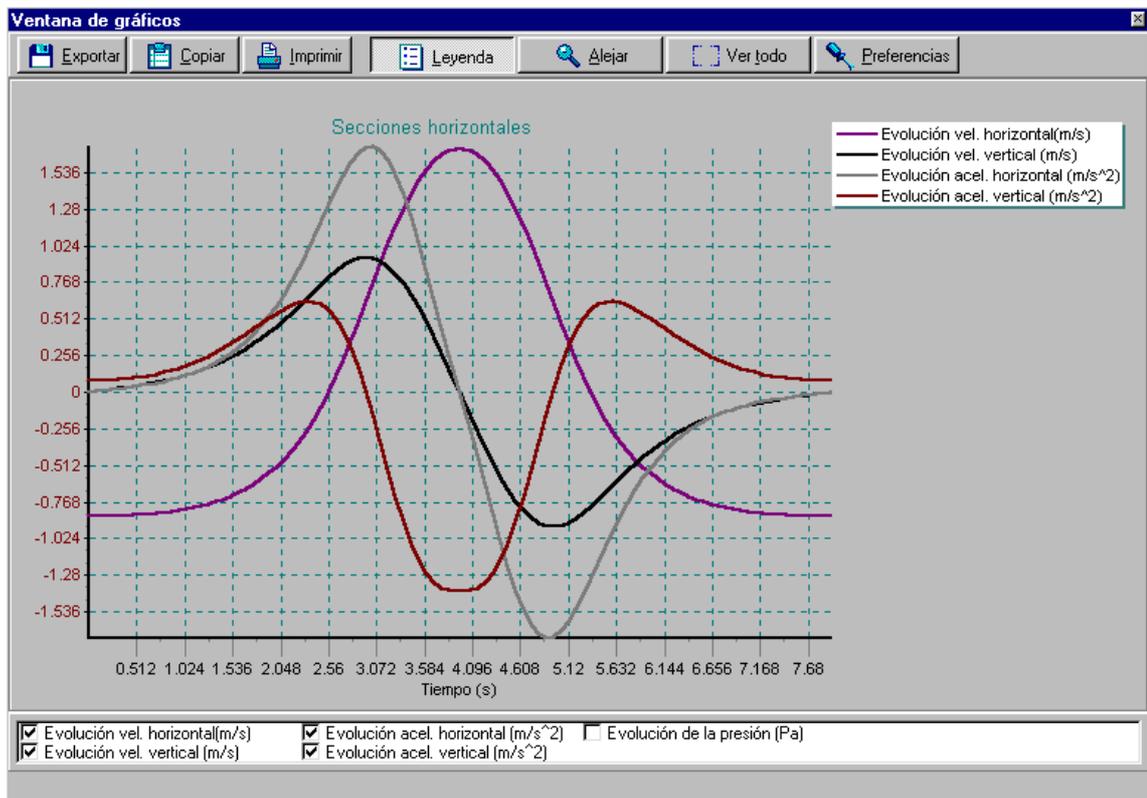


Figura 3.4. Ejemplo de ventana de gráfico



tanto no aparecen.

Existe un tipo de gráfico particular que, pese a estar asociado a un botón en la zona de resultados como los anteriores, presenta características especiales y se denominan botones de croquis. Los módulos dedicados a Espaldones (OBR 2.3), Diques Verticales (OBR 3.1) y Diques Mixtos (OBR 3.2) proporcionan un dibujo a escala de la estructura calculada, que puede servir para tener una noción de sus proporciones y del aspecto general de la obra. Por otro parte, el módulo de Predicción de Oleaje (DIN 2.3) permite, en la opción de *fetch restringido*, visualizar la geometría de cálculo y las direcciones del viento y del oleaje pésimo. Finalmente, el módulo SED 4.2 de Forma en Planta de Equilibrio proporciona una vista aérea de la línea de playa, punto de difracción y dirección del oleaje. Todos estos gráficos únicamente disponen de un botón en la parte superior izquierda de la ventana para copiar su contenido al portapapeles. Un ejemplo de los mismos, concretamente el del módulo de Diques Mixtos (OBR 3.2), se representa en la Figura 3.5.

### **3.3.4 Gestión y edición de ficheros**

Aproximadamente una tercera parte de los módulos del Tutor de Ingeniería de Costas requieren, de forma obligatoria o en alguna de sus opciones de ejecución, un fichero de datos externos. Por facilidad de manejo, se ha optado por emplear ficheros de texto en formato ASCII compuestos de una cabecera y una o varias columnas separadas por espacios.

El programa dispone de un editor de ficheros propio al que se accede pulsando el botón correspondiente de la barra de herramientas. Consta de dos botones con las opciones de abrir y guardar fichero y de una cuadrícula que permite representar series de números en varias columnas.

Todos los módulos del Tic que trabajan con ficheros leen valores en un formato determinado. Si el fichero no se ajusta a dicho formato, es probable que el programa de un mensaje de error (ver la sección 3.5 acerca de errores) o que arroje resultados erróneos. Se han considerado cinco tipos de fichero con distintos formatos:

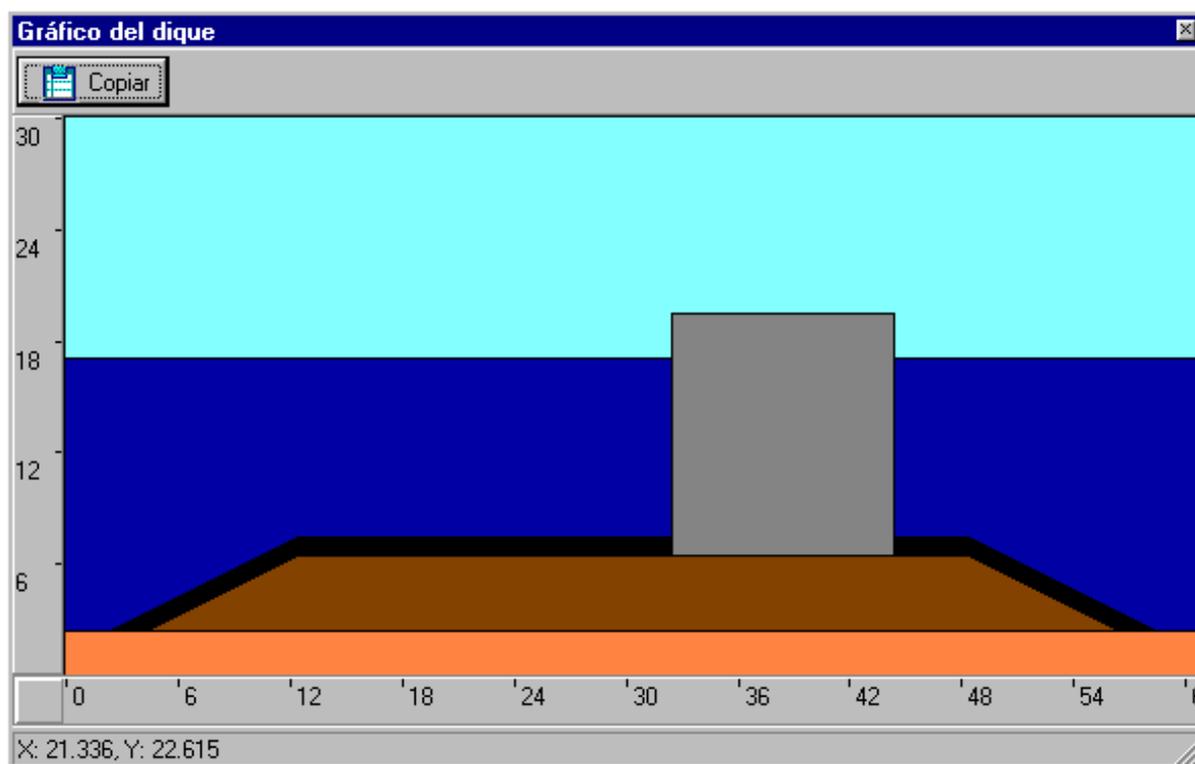


Figura 3.5. Ejemplo de ventana de croquis



1. Fichero de datos con muestreo continuo
2. Fichero de valores extremos
3. Fichero de perfil de batimetría
4. Fichero de geometría de fetch reducido
5. Fichero de granulometrías

En la Figura 3.6 se enumeran todos los módulos con fichero, agrupados según el tipo de fichero de que hacen uso. En el Anejo II se describe el formato de cada tipo junto con un ejemplo. En todos los casos la primera línea se destina a comentarios y el resto de las líneas contienen la información útil.

### **3.3.5 Documentos, tablas y herramientas de ayuda**

Un programa del tipo que se describe puede plantear dudas al usuario referentes al significado concreto de las variables de entrada o salida. Por otra parte, cualquier imprecisión o indefinición redundante en una pérdida de fiabilidad en los resultados y, en muchos casos, hace erróneas determinadas formulaciones; un ejemplo típico es la utilización de la altura de ola cuadrática media en lugar de la significativa en el cálculo del transporte longitudinal de una playa. Otra posible fuente de errores es el tipo de unidades.

Para evitar al máximo errores conceptuales se han desarrollado dos sistemas de ayuda complementarios. El primero se trata de una serie de páginas HTML que contienen información acerca de variables de definición geométrica o de otros tipos. Existe una página para cada módulo que lo requiere; la figura 3.7 muestra como ejemplo la ayuda correspondiente al módulo DIN 3.4 para el cálculo del run-up en playas. Su estructura es la de uno o varios croquis acotados, seguidos de una lista con el nombre de las variables que aparecen y una descripción larga de las mismas. En la parte superior de la página existe una etiqueta donde aparece el módulo al que pertenece y la barra de herramientas de la zona superior de la ventana contiene las opciones básicas de un navegador: ir hacia adelante, ir hacia atrás y retornar a la página de inicio.

Por otra parte, puede suceder que el nombre completo de una variable no quepa en el espacio destinado a su etiqueta, por lo que en ella sólo aparece un

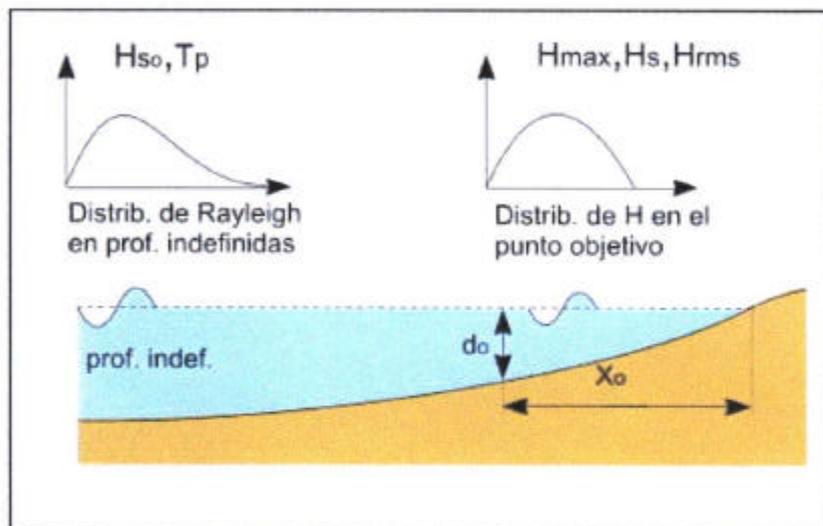


TIPO DE FICHERO	MÓDULOS
Datos con muestreo continuo	DIN 2.1: Análisis Estadístico DIN 2.2: Análisis Espectral DIN 4.2: Marea Astronómica
Geometría de fetch reducido	DIN 2.3: Previsión de Oleaje
Valores extremos	DIN 2.4: Análisis Extremal. Método de Goda DIN 2.5: Análisis Extremal. Ajuste de Colas
Perfil de batimetría	DIN 3.1: Propagación de Ondas DIN 3.2: Propagación de Oleaje DIN 3.5: Corrientes Longitudinales DIN 4.1: Marea Meteorológica SED 3.1: Perfil de Equilibrio
Granulometría	SED 1.1: Análisis Granulométrico

Figura 3.6. Tipos de fichero y módulos asociados



Tutor de ingeniería de costas  
DIN 3.2 : Propagación del oleaje



- $H_{so}$  : Altura de ola significativa en profundidades indefinidas  
 $T_p$  : Periodo de pico incidente  
 $d_o$  : Profundidad del punto objetivo  
 $X_o$  : Distancia a la costa del punto objetivo  
 $H_{max}$  : Altura de ola máxima del punto objetivo  
 $H_s$  : Altura de ola significativa en el punto objetivo  
 $H_{rms}$  : Altura de ola media cuadrática

Figura 3.7. Ejemplo de ventana de ayuda



nombre corto o abreviado. Si se sitúa el ratón sobre cualquier control de edición, desplegable o con ventana asociada, aparecerá un texto indicando el nombre completo de dicha variable con sus unidades entre paréntesis. En el caso de un control de selección de fichero, lo que aparecerá es la ruta completa y el nombre del fichero seleccionado.

Finalmente, se describe en este apartado una utilidad que no es propiamente una ayuda pero sirve para completar y dar plena funcionalidad a algunos módulos. Existen ciertos valores de entrada que son totalmente empíricos y constituyen una medida cuantitativa de cierta propiedad o fenómeno: el número de estabilidad (Ns) de Hudson es un índice de la estabilidad de una determinada pieza de protección de diques; la permeabilidad nocional de Van der Meer contiene, como su nombre indica, una noción del comportamiento del talud de un dique frente a la penetración del agua en sus diferentes capas. En estos casos, se incorpora a la derecha del control de edición asociado a la variable un botón con el símbolo de una calculadora. Al pulsarlo, se abre una ventana con una tabla HTML que permite elegir entre los distintos elementos asociando de forma automática a la variable el valor que corresponde. Esta herramienta constituye una manera simple de suplir la necesidad de tener ciertas tablas a mano para ejecutar determinados cálculos.

### **3.3.6 Libreta de resultados**

La libreta de resultados es una utilidad del programa que registra automáticamente los valores escalares de entrada y salida de cada ejecución en un fichero de texto con un determinado formato. Su nombre refleja exactamente la función que desempeña: cada vez que se ejecuta un módulo, se registra el módulo de que se trata, los valores de entrada en color verde y los de salida en azul, acompañados de sus respectivas unidades entre paréntesis. En la figura 3.8 se muestra como ejemplo el texto que se incorpora a la libreta al ejecutar el módulo OBR 1.1 con unos datos cualesquiera:

Se hace notar que los vectores que se representan en los distintos gráficos no se incorporan a la libreta, aunque sí las tablas y los valores de otros tipos de controles. Existe una barra de herramientas en la parte superior de la ventana que permite las siguientes opciones:

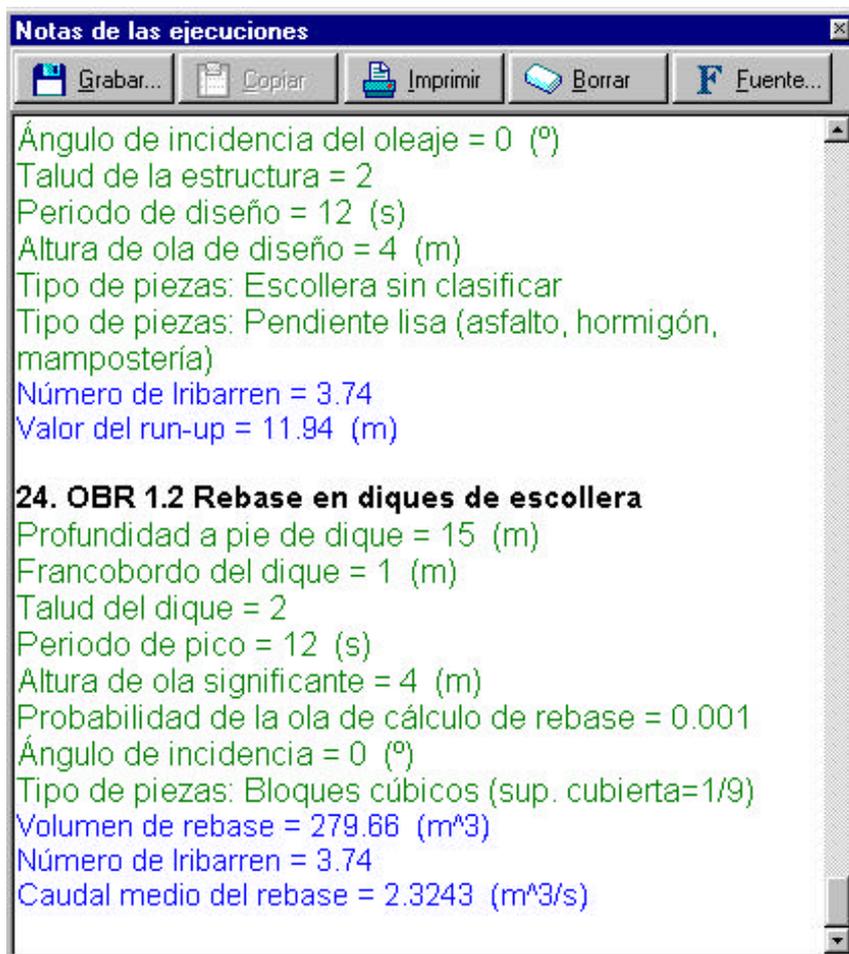


Figura 3.8. Aspecto de la libreta de resultados



- Grabar: hace aparecer un control para guardar el contenido de la libreta en un fichero de texto con el nombre y ubicación que se desee.
- Copiar: copia en el portapapeles de Windows el texto seleccionado
- Imprimir: Imprime el contenido de la libreta o la parte seleccionada en la impresora configurada por defecto.
- Borrar: Borra el contenido de la libreta o el texto seleccionado
- Fuente: Aparece un cuadro de selección de colores, tamaños y tipos de letra. También permite escribir en negrita, cursiva y subrayado.

La libreta de resultados no se inicializa en cada ejecución del Tic, sino que mantiene la información de unas sesiones a otras hasta alcanzar un determinada tamaño; en ese momento, empiezan a borrarse sus contenidos, comenzando por los más antiguos.

La barra de herramientas principal del programa también dispone de un botón de acceso directo a la calculadora de Windows, de modo que el usuario puede realizar por su cuenta las operaciones que desee e incorporar los resultados, mediante la opción de copiar y pegar, a la libreta o a la casilla de una determinada variable.

### **3.3.7 El Módulo de impacto ambiental**

La sección dedicada al impacto ambiental contiene una única aplicación con características distintas al resto de los módulos. La mayoría de las funciones y utilidades descritas hasta ahora no son de aplicación en este apartado, que posee su estructura particular. Ello es debido a que el tema de que se ocupa no se presta como los restantes a un análisis estrictamente numérico, sino que contiene muchos elementos descriptivos e informativos.

Para una descripción detallada del módulo dedicado a la evaluación de impacto ambiental, se remite al usuario al último apartado del capítulo cinco de este documento, donde se describen con detalle sus características y forma de funcionamiento.



## **3.4 Opciones de configuración**

### **3.4.1 Unidades y valores por defecto**

Todas las unidades que utiliza el programa pertenecen al Sistema Internacional. En caso de duda, al situar el ratón sobre la casilla de edición de una variable aparece una descripción de la misma junto con las unidades correspondientes. Habitualmente se emplean las unidades básicas metro, kilogramo y segundo, salvo en ocasiones donde la práctica aconseja el uso de alguna de sus derivadas. El símbolo empleado para la separación de cifras decimales es el punto.

Cuando se carga un módulo, las variables de entrada toman unos valores por defecto que permiten ejecutarlo directamente sin hacer ninguna modificación. De esta manera se puede comprobar el funcionamiento de cualquier apartado sin necesidad de rellenar todas las casillas.

### **3.4.2 Funciones de comunicación entre módulos**

En ocasiones puede ser útil copiar datos o resultados entre módulos, o en otro programa externo. Esta operación puede realizarse con facilidad en el Tic seleccionando el número o texto de interés y pulsando el botón derecho del ratón, con lo que aparece la opción Copiar. Para pegar, se realiza la misma operación en el lugar objetivo y eligiendo la opción correspondiente.

Además de estas operaciones manuales, el programa incorpora un sistema de comunicación entre los distintos subprogramas, de manera que es posible ejecutar un determinado módulo utilizando resultados obtenidos en la ejecución de otro módulo anterior. Pulsando con el ratón sobre la etiqueta de una variable de entrada se despliega una lista con los valores que dicha variable ha tomado anteriormente (figura 3.9) y el módulo donde se ha obtenido cada uno de ellos. Si la variable no coincide exactamente (por ejemplo altura de ola significativa y altura media cuadrática), no se podrán traspasar sus valores.



### 3.4.3 Configuración de colores y fuentes

El Tutor de Ingeniería de Costas utiliza controles estándar de Windows y los colores y fuentes empleadas para los elementos de pantalla coinciden con los que el usuario tiene configurados en el apartado denominado Apariencia de la ventana Configuración de Pantalla en su sistema operativo. Una manera de acceder a esta ventana es seleccionándola entre las opciones que aparecen al pulsar el botón derecho del ratón sobre el escritorio de Windows.

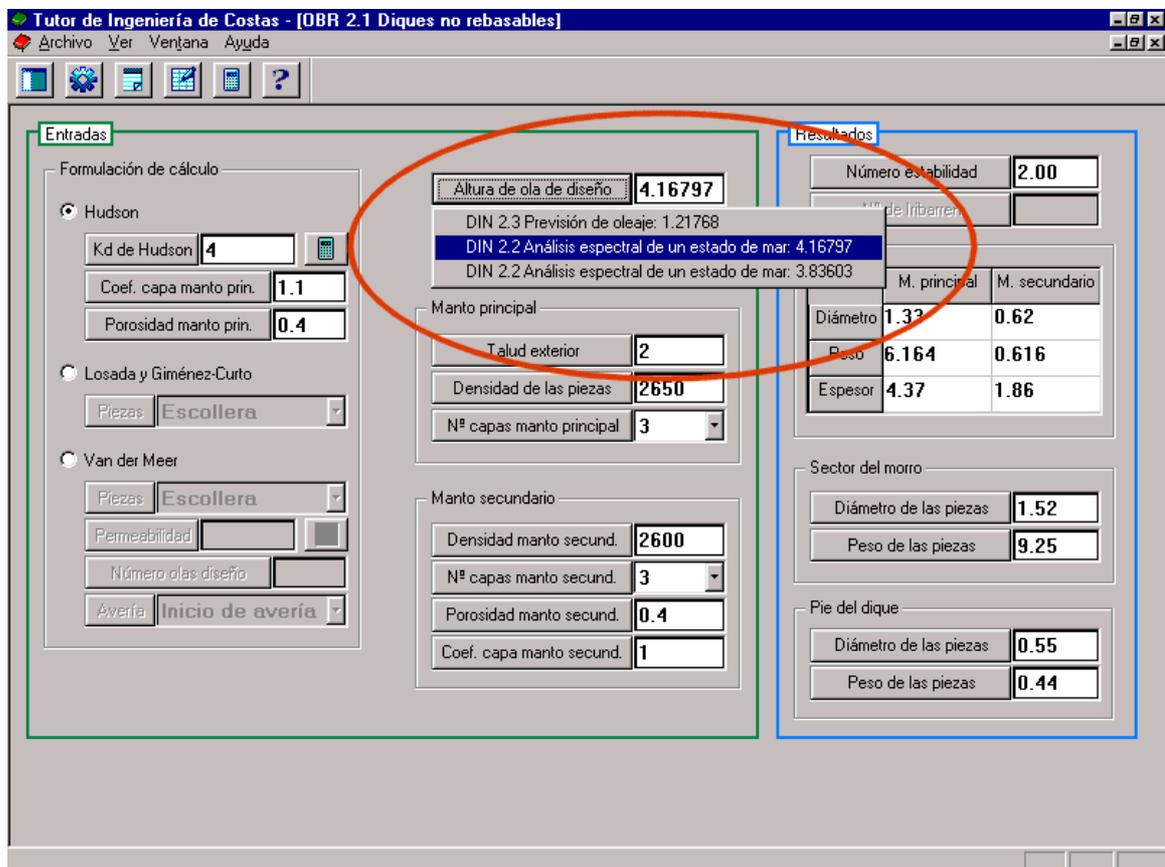


Figura 3.9. Ejemplo de valores anteriores de una variable



### 3.5 Control de errores

La ejecución de un módulo se efectúa pulsando el botón de la barra de herramientas superior dispuesto a tal efecto. Si los datos introducidos no generan ningún conflicto a la hora de ejecutar, aparecerán los resultados en la zona derecha de la pantalla. En ningún caso el programa se demorará más de algunos segundos en la ejecución; en algunos casos más lentos, aparece en pantalla una barra de progreso indicando el porcentaje de cálculos realizados con respecto al total.

Muchos de los módulos que contiene el Tutor utilizan métodos aproximados y realizan una gran cantidad de operaciones numéricas. Es muy fácil que si los datos no se ajustan al rango de validez de las fórmulas se produzca un error de cálculo, interrumpiendo la ejecución. Con el fin de evitar que esto suceda, antes de ejecutar el programa principal comprueba que los valores asignados a las variables de entrada se mantiene en unos rangos razonables designados para cada una de ellas. Si el valor que se le da a una variable se encuentra fuera de los límites establecidos, la casilla correspondiente se pondrá en negro y, al intentar ejecutar, aparecerá un mensaje indicando los límites de validez. Este filtro inicial, previo al comienzo de los cálculos en sí, permite detectar únicamente algunos errores simples, pero debe ir complementado de un sistema de detección de errores internos y emisión de avisos, como se describe a continuación.

#### 3.5.1 Mensajes de error

Cuando la combinación de valores de entrada introducida no permite obtener resultados, aunque cada valor se encuentre en su rango establecido, el programa emitirá un mensaje de error, explicando la causa por la que se produce. Con este tipo de mensajes, se interrumpe automáticamente la ejecución y no se rellena la zona de resultados. Un mensaje típico de error sería: “El método no converge con la precisión requerida al cabo de 100 iteraciones”.

#### 3.5.2 Mensajes de Aviso

Cuando los valores de entrada permiten realizar los cálculos prescritos por un determinado método, pero se encuentran fuera de su rango de validez o experimentación,



se emite un mensaje de aviso indicando el punto en que son violadas las hipótesis del método. En estos casos, los resultados pueden ser erróneos y deben ser tomados con suma precaución.

## **CAPÍTULO 4**

### **DESCRIPCIÓN BREVE DE LOS MÓDULOS**



## 4. DESCRIPCIÓN BREVE DE LOS MÓDULOS

### *Sección 1. Dinámicas*

#### Capítulo 1. Ondas

- DIN 1.1 - Teorías de ondas

Este módulo determina diversas magnitudes y parámetros de una onda (longitud de onda, celeridad, flujo energía, presión, velocidad horizontal y vertical, aceleración horizontal y vertical, número de Ursell, superficie libre, etc.). Estas magnitudes podrán ser calculadas usando diferentes teorías de ondas: lineal (onda progresiva y estacionaria), Stokes (órdenes 1 a 5) y cnoidal (órdenes 1 a 3). El programa determina, además, cuál es la teoría más indicada para el caso que el usuario proponga, de acuerdo con los datos de entrada: altura de ola, profundidad y período (H, d, T).

#### Capítulo 2. Oleaje

- DIN 2.1 - Análisis estadístico de un estado de mar.

El programa realiza un análisis estadístico de un estado de mar a partir de un fichero de datos que contenga la serie de elevaciones o superficie libre de dicho estado de mar. Se determinan parámetros estadísticos de la altura de ola  $(\bar{H}, H_{\frac{1}{3}}, H_{rms}, H_{\frac{1}{10}}, H_{max})$ , de los períodos de paso ascendente por cero  $(\bar{T}_z, T_{z\frac{1}{3}}, \bar{T}_{zmax})$  y de los períodos entre crestas. Asimismo, se ajustan funciones de distribución teóricas a los datos, (Gauss, Bretschneider, Rayleigh, Longuet-Higgins).

- DIN 2.2 - Análisis espectral de un estado de mar

El programa realiza un análisis espectral de un estado de mar a partir de un fichero de datos que contenga la serie de elevaciones o superficie libre de dicho estado de mar. Se calcula la función de densidad espectral del oleaje,  $S(f)$ , los momentos espectrales y los parámetros espectrales del oleaje, tales como la altura de ola media cuadrática y altura de ola significativa del registro.



- DIN 2.3 - Previsión de oleaje

El módulo de previsión de oleaje facilita una rápida y simple estima del oleaje existente ( $H_s$ ,  $T_p$ ) en punto a partir de un viento definido por su velocidad representativa (a 10 m. de altitud y en atmósfera en equilibrio) y su dirección (sólo en el caso de fetch restringido), incluyendo situaciones de fetch limitado/ilimitado y profundidad reducida/ilimitada. El programa utiliza la metodología propuesta por Vicent (1984), S.P.M. (1984), Smith (1991) y Donelan(1992).

- DIN 2.4 - Regímenes extremales. Ajuste de colas

Este módulo implementa la metodología de Goda (1988) para calcular la altura de ola de diseño en una determinada ubicación a partir de un registro de alturas de ola máximas. Se determina la altura de ola correspondiente a un periodo de retorno dado, con y sin banda de confianza.

- DIN 2.5 - Regímenes extremales. Ajuste de colas

Este módulo ajusta una serie de datos a funciones de distribución usuales (Weibull, Gumbel, Frechet, Log-normal). No debe tratarse necesariamente de datos de oleaje, sino que se puede ajustar cualquier variable. Asimismo, el programa proporciona el valor ajustado para un cierto período de retorno y el intervalo de confianza. El programa utiliza la metodología desarrollada por Castillo (1988).

### Capítulo 3. Propagación y rotura

- DIN 3.1 - Propagación de ondas

El módulo de propagación de ondas determina la evolución de un tren de ondas regular a lo largo de batimetría recta y paralela, simulando los procesos de refracción, asomeramiento, rotura y evolución post-rotura. El programa utiliza teoría lineal o de Shuto (1984) para el asomeramiento y permite determinar las magnitudes  $H$ ,  $T$ ,  $\theta$  en el punto de rotura o en cualquier punto objetivo, así como el tipo de rotura. Para la evolución post-rotura se utiliza el modelo de Dally, Dean y Dalrymple.



- DIN 3.2 - Propagación de oleaje

Este programa determina la transformación de un oleaje irregular con espectro de banda estrecha, cuando se propaga por una batimetría recta y paralela. El programa utiliza las metodologías propuestas por Goda (1984) para la refracción, Shuto (1984) para el shoaling y Goda (1975) para la rotura y evolución post-rotura del oleaje.

- DIN 3.3 - Rotura

El módulo de rotura evalúa el índice de rotura  $g$  en función de las características de oleaje (regular/irregular) y de la playa, utilizando diversas formulaciones. Se permiten dos modos de ejecución: a) calcular la altura de rotura conociendo la profundidad y el periodo y b) calcular la profundidad de rotura conociendo la altura y el periodo.

- DIN 3.4 - *Run-up* en playas

Este programa calcula diversos parámetros estadísticos del *run-up* en una playa (*run-up* medio cuadrático, significativo y superado el 2% del tiempo). Se utilizará las metodologías propuestas por Holman (1986) y Nielsen y Hanslow (1991). Se también se proporciona un valor del avance de costa estimado para una pendiente media del frente de playa.

- DIN 3.5 - Corrientes longitudinales

Este programa evalúa la distribución de la corriente longitudinal en un perfil de playa, asumiendo batimetría recta y paralela, en función de los parámetros propuestos por el usuario (perfil de playa, fricción, coeficiente de viscosidad de remolino, oleaje incidente). Se implementan las formulaciones de Longuet-Higgins basadas en el concepto de tensor de radiación. En caso de despreciar la viscosidad de remolino, se puede realizar el cálculo con un perfil arbitrario.



- DIN 3.6 - Corrientes de resaca

Este programa estima la distribución vertical de corriente transversal en un punto de un perfil de playa arbitrario en función de los parámetros de oleaje propuestos por el usuario. Se emplean las formulaciones de Stive y Wind (1986) y Svendsen y Buhr-Hansen (1987). En el caso de esta última formulación, se calculan teniendo en cuenta el diámetro nominal del sedimento las características de la capa límite en el fondo.

#### Capítulo 4. Nivel del mar

- DIN 4.1 - Marea meteorológica

El módulo de marea meteorológica calcula la variación del nivel medio del mar a lo largo de un perfil arbitrario de una playa de batimetría recta y paralela en función de los valores propuestos por el usuario de presión atmosférica y velocidad del viento. Asimismo, se proporciona el retroceso de la línea de costa debido a la acción de dichas dinámicas.

- DIN 4.2 - Marea astronómica

Este programa determina las componentes de marea en un punto a partir de un registro de nivel del mar. Se puede elegir entre tres tipos de ajuste: registro de corta duración, de larga duración y registro en zona de ría o estuario. El programa evalúa parámetros estadísticos de la serie (nivel cuadrático medio, nivel máximo/mínimo) y calcula el error máximo y medio cuadrático del ajuste.



## Sección II. Procesos Litorales

### Capítulo 1. Análisis granulométrico

#### - SED 1.1 - Análisis granulométrico

Este programa dibuja, a partir de un fichero de datos de granulometría de una muestra nativa y otra de relleno, las curvas granulométricas de probabilidad y de distribución tanto en mm como en unidades  $\phi$ . Se determinan diversos estadísticos de interés en Ingeniería Litoral, tales como  $D_{50}$ ,  $D_{16}$ ,  $D_{84}$ , desviación standard, curtosis y clasifica la muestra de acuerdo con el criterio de Wentworth. Asimismo se calcula la velocidad de caída de grano y la pérdida de finos, junto con el factor de realimentación (*renourishment factor*) y la tasa de sobrerrelleno (*overflow ratio*) propuestos por James (1974).

### Capítulo 2. Transporte de Sedimentos

#### - SED 2.1 - Formulación de Van Rijn

Este programa determina el transporte de sedimentos que tiene lugar en un lecho horizontal de material no cohesivo bajo la acción de un flujo uniforme, oscilatorio o combinado utilizando la formulación de Van Rijn (1993). También se proporcionan resultados relativos a las formas de lecho generadas por el flujo.

### Capítulo 3. Perfil de Playa

#### - SED 3.1 - Perfil de equilibrio

Este programa permite al usuario realizar diversos cálculos relativos a la teoría de perfil de equilibrio propuesta por Dean (1991), González (1995), Muñoz (1997), Bernabeu(1997) y Vellinga (1978). Se pueden representar perfiles de equilibrio de Dean, con difracción, con laja, con reflexión, con marea y de Vellinga. Asimismo, se permite ajustar un perfil medido al perfil de Dean ( $y=A*x^{(2/3)}$ ) o a uno de la forma  $y=A*x^m$ , mediante la técnica de mínimos cuadrados.



- SED 3.2 – Regeneración de playas

Se pretende con este módulo proporcionar una herramienta de uso simple para el tanteo y prediseño de una regeneración de playa. Asumiendo perfiles de Dean y playa bidimensional, se calcula el volumen de arena necesario para un determinado avance de la línea de costa o, en caso recíproco, el avance conseguido con un cierto volumen. Existen opciones para perfil simple, con laja rocosa, con muro y con laja y muro combinados; también se hace una estimación del perfil provisional de vertido. Los resultados son de tipo numérico (distancias, volúmenes, parámetros de definición de los perfiles) y gráfico (perfil nativo, de relleno y de vertido).

#### Capítulo 4. Forma en Planta

- SED 4.1 - Predicción del transporte longitudinal

Este programa estima el transporte longitudinal potencial existente en una playa de batimetría recta y paralela bajo la acción de olas rompiendo. El programa utilizará las formulaciones del CERC (Komar e Inman, 1970), Kraus (1982), Kamphuis (1991) y Bijker (1971). Los resultados son el caudal medio inducido por el oleaje propuesto y los volúmenes diarios, anuales y mensuales asociados. En la formulación de Bijker se puede utilizar un perfil arbitrario propuesto por el usuario, obteniéndose la distribución de transporte longitudinal a lo largo del mismo.

- SED 4.2 - Planta de equilibrio

Este programa permite al usuario realizar diversos cálculos relativos a la teoría del perfil de equilibrio propuesta por González (1995). En particular se puede: 1) determinar el ángulo  $\alpha_{\min}$ , 2) determinar los coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , de la parábola de equilibrio, 3) determinar los radios vectores de una playa en equilibrio, 4) determinar los parámetros de anchura y saliente en el caso de formación de tómbolo y hemitómbolo. También se incluye la formulación de la espiral logarítmica.



## Capítulo 5. Estados Morfodinámicos

### - SED 5.1 - Estados morfodinámicos de playas

En este módulo el usuario puede determinar el estado modal de una playa de acuerdo con los modelos de Wright y Short (1983) y de Masselink y Short (1993) para playas con y sin marea. Se presenta un croquis representativo de la playa resultante, con sus elementos característicos, junto con algunos resultados numéricos de interés: parámetro adimensional de caída de grano, velocidad de caída de grano, etc.

## Capítulo 6. Procesos Litorales en Estuarios

### - SED 6.1 - Relaciones de equilibrio en estuarios

Este programa permite al usuario verificar si su estuario se ajusta o no a las relaciones de equilibrio propuestas por O'Brien (1969), Johnson (1973), Bruun (1968), Walton y Adams (1980), Marino y Mehta (1982) y finalmente Renger y Partenscky (1974). Se proponen tres tipos de fórmulas: 1) relación entre el prisma de marea y el área de la sección de la canal; 2) relación entre el prisma de marea y el volumen de arena en la desembocadura y 3) relación entre el área total del estuario y el área de marismas.



### *Sección III. Obras*

#### Capítulo 1. Flujos en Diques de Escollera

##### - OBR 1.1 - Run-up

Este programa determina el run-up producido en estructuras con talud liso y rugoso, ya sean permeables o impermeables. El programa calcula el run-up, tanto bajo condiciones de oleaje monocromático como de oleaje irregular. Se implementan las formulaciones empíricas propuestas por Ahrens (1977), van der Meer y Janssen (1995) y Losada y Giménez-Curto (1979).

##### - OBR 1.2 - Rebase

Este programa determina el rebase generado en estructuras con talud liso y rugoso de diferentes tipos bajo condiciones de oleaje irregular. Se emplean las fórmulas empíricas propuestas por van de Meer y Janssen (1995). Los resultados obtenidos son el número de Iribarren sobre el talud, el caudal medio de rebase en el estado de mar de cálculo y el volumen de rebase debido a una ola de probabilidad dada en dicho estado de mar.

##### - OBR 1.3 - Transmisión

Este programa determina el coeficiente de transmisión en diques en talud permeables e impermeables tanto bajo condiciones de oleaje regular como irregular. Se consideran efectos de rebase sobre la coronación y de transmisión, en el caso de estructura prorsosa, así como varios tipos de piezas y materiales en el manto principal. Se utilizarán los modelos propuestos por Seelig (1980) y D'Angremond, van der Meer y de Jong (1996).

##### - OBR 1.4 - Reflexión

Este módulo calcula el coeficiente de reflexión de un dique en talud no rebasable, definido como el cociente entre la altura de ola reflejada y la altura de ola incidente frente al talud del dique. Se implementa la formulación de Seelig y Ahrens (1995), fruto de numerosos ensayos de laboratorio en condiciones de oleaje irregular y válida tanto para taludes lisos como rugosos.



## Capítulo 2. Cálculo de Estabilidad de Diques de Escollera

### - OBR 2.1 - Diques no rebasables

Este programa calcula el peso de las piezas del manto principal de un dique de escollera no rebasable utilizando las formulaciones de Hudson (1959), Losada (1992) y Van der Meer (1992). El programa determina, asimismo, el espesor de los mantos y el peso de las piezas del manto secundario, del morro y del pie del dique. En la opción de Hudson, se proporciona un acceso simple a la tabla de valores de la constante  $K_d$ .

### - OBR 2.2 – Estabilidad de diques en talud rebasables y sumergidos. Metodología de Vidal et al. (1992, 1994).

Este programa determina el peso del manto principal exterior, interior y de coronación de un dique rebasable o sumergido usando la metodología de Vidal et al. (1992, 1994). Esta metodología es el resultado de una serie de ensayos de laboratorio realizados por el autor en diques no deformables con oleaje irregular.

### - OBR 2.3 - Espaldones

Este programa determina la estabilidad, el vuelco y el deslizamiento de un espaldón rebasable y no rebasable ubicado sobre un dique de escollera. El cálculo de la estabilidad se realiza utilizando la formulación de Martín et al. (1995). El programa calcula los coeficientes de seguridad a deslizamiento y a vuelco bajo las dos hipótesis de carga que el método establece.

### - OBR 2.4 – Estabilidad de diques en talud rebasables y sumergidos. Fórmulas de Ahrens–Van der Meer (1990)

Se proponen en este módulo una serie de fórmulas para calcular la estabilidad de las piezas de dos tipos de estructuras de protección: diques deformables (rebasables o sumergidos) y diques rígidos. En ambos casos la cota de coronación puede situarse por encima o por debajo del nivel medio (dique rebasable o sumergido). Están basadas en numerosos ensayos de laboratorio con oleaje irregular y sólo son válidas para diques de escollera sin núcleo.



### Capítulo 3. Cálculo de Diques Verticales y Mixtos

#### - OBR 3.1 - Estabilidad de diques verticales sin rotura del oleaje

Este programa calcula la estabilidad a deslizamiento y a vuelco de un dique vertical sujeto a oleaje sin rotura. Se pueden emplear la teoría lineal y las formulaciones de Nagai (1979) y Sainflou (1928). Para unos determinados coeficientes de seguridad a deslizamiento y a vuelco se calculan las dimensiones mínimas necesarias del dique, así como un croquis a escala del mismo.

#### - OBR 3.2 -Estabilidad de diques verticales con rotura del oleaje

Este programa calcula la estabilidad a deslizamiento y a vuelco de un dique vertical sujeto a oleaje con rotura. Se emplea teoría la formulación de Goda (1973) y Takahashi (1994). También se calcula el peso necesario de la escollera de apoyo a pie de dique, utilizando expresiones de Tanimoto et al. (1982). Se obtienen, para unos determinados coeficientes de seguridad a deslizamiento y a vuelco, las dimensiones mínimas necesarias del dique, así como un croquis a escala del mismo.



#### *Sección IV. Evaluación del Impacto Ambiental*

Se recoge en este capítulo una única aplicación destinada a facilitar la evaluación de impacto ambiental (EIA) de un proyecto de ingeniería litoral utilizando el método de análisis acción-factor (Leopold, 1978). Se consideran cuatro proyectos tipo:

- 1- Estabilización de dunas litorales.
- 2- Dragados.
- 3- Muros, diques y paseos marítimos.
- 4- Regeneración de playas.

También se permite partir de un proyecto genérico, adaptándolo a unas necesidades particulares. Una vez introducidos los valores de los atributos en cada pareja acción- factor considerada, el programa presenta una lista de acciones e impactos, ordenados según su importancia. La información se presenta utilizando árboles estándar de Windows, con lo que se consigue un aspecto claro y funcional que minimiza los errores en la introducción de los datos.

## **CAPÍTULO 5**

### **DESCRIPCIÓN INDIVIDUAL DE LOS MÓDULOS**



## 5. DESCRIPCIÓN INDIVIDUAL DE LOS MÓDULOS

Se pretende en este capítulo describir de manera breve y concisa el contenido de cada uno de los módulos de cálculo incluidos en el Tutor de Ingeniería de Costas. Dada la variedad existente en cuanto a naturaleza y contenidos, ha sido inevitable profundizar de manera desigual en cada uno de ellos con objeto de no extenderse en exceso. El lector interesado podrá encontrar la información restante en las referencias.

### 5.1 Sección de dinámicas

Se agrupan en este bloque temático aquellos módulos dedicados al análisis hidrodinámico de diversos procesos ondulatorios del medio marino (ondas de gravedad, marea astronómica, marea meteorológica) y sus fenómenos asociados (sobreelevaciones, rotura, corrientes de rotura, etc.). También se incluyen módulos para el estudio y análisis del oleaje.

Se estructura el material en los siguientes capítulos:

- 1- Ondas.
- 2- Oleaje.
- 3- Propagación y rotura.
- 4- Cálculo del nivel del mar.

#### 5.1.1 Ondas

##### DIN 1.1<sup>1</sup> - Teorías de ondas

Este módulo calcula una serie de magnitudes relativas a la propagación de una onda teórica sobre fondo plano utilizando teoría lineal, de Stokes y cnoidal.

---

<sup>1</sup> A partir de ahora se empleará una nomenclatura abreviada para referirse a los módulos: una palabra de tres letras indicando la sección a que pertenece (DIN para dinámicas, SED para procesos litorales, OBR para obras de protección e IMP para impacto ambiental) seguida del número del capítulo y del número que el módulo ocupa dentro de él.



Puesto que cada teoría de ondas se adapta bien a unas condiciones determinadas, el programa aconseja el uso de una u otra en función de los parámetros de la onda. Para esta operación se implementa en forma paramétrica el diagrama de La Méhauté, tomado del *Shore Protection Manual* (1984). También se pueden obtener gráficas de perfiles y secciones horizontales de velocidades y aceleraciones, para una determinada fase y profundidad respectivamente.

### ***Teoría lineal***

También conocida como de primer orden, sinusoidal, de pequeña amplitud o teoría de Airy. Es la forma más simple de modelar un movimiento ondulatorio en el seno de un fluido y se ajusta bien a condiciones que satisfacen las relaciones  $H \ll L$  y  $H \ll d$ , siendo “ $H$ ” la altura de onda, “ $d$ ” la profundidad y “ $L$ ” la longitud de onda. La fórmula del potencial y la ecuación de la dispersión para este tipo de ondas resulta de resolver el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de separación de variables y linealizando los términos no lineales. La expresión del potencial utilizada en esta aplicación es la siguiente:

$$\phi = \frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh(ks)}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t)$$

y la ecuación de la dispersión se puede expresar como:

$$\omega^2 = g k \tanh(kd)$$

donde:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$s = z + d$$



Las velocidades y aceleraciones, así como la presión y superficie libre se derivan directamente del potencial. Las magnitudes energéticas (energía de una onda, flujo medio de energía, celeridad de grupo) también son calculadas en la aplicación.

Finalmente, se proporciona el valor de diversos parámetros adimensionales como el peralte ( $H/L$ ), la profundidad relativa ( $d/L$ ) y el número de Ursell  $U_r = \frac{HL^2}{d^3}$  que aporta información sobre la importancia de los términos no lineales.

El programa permite calcular las magnitudes tanto de una onda lineal progresiva como de una estacionaria, suma de dos progresivas de la misma amplitud y fase, pero de distinto sentido de propagación. Las fórmulas en este último caso resultan de sumar las correspondientes a dos ondas progresivas simples con sus números de onda de distinto signo.

### *Teoría de Stokes*

El módulo de teoría de ondas permite también calcular los parámetro de una onda utilizando un desarrollo de Stokes de orden menor o igual a cinco. Con este procedimiento matemático se resuelven igualmente las ecuaciones de Navier-Stokes buscando soluciones para el potencial de la forma:

$$\phi = -\bar{u}x + C_o \left( \frac{g}{k^3} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cos h(j k y) \cdot \sin(j k x) + O(\varepsilon^6)$$

donde:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{\bar{u}} &= k \cdot a \\ &= \text{corriente media en la dirección } x. \end{aligned}$$

Los coeficientes  $A_{ij}$  se pueden encontrar en el artículo original de Fenton (1985). Como se puede observar el parámetro de perturbación es  $k \cdot a$ , es decir, una magnitud proporcional al peralte de la onda. Esta teoría es más exacta que la lineal para ondas viajando en profundidades indefinidas.



Para el caso de orden uno, la solución obtenida coincide idénticamente con la lineal, referida en el apartado anterior. A medida que dicho orden de aproximación aumenta, intervienen nuevos armónicos y también la ecuación de la dispersión se hace más complicada. Las magnitudes adimensionales mencionadas en el apartado anterior también son calculadas.

### *Teoría cnoidal*

Recibe el nombre de teoría cnoidal una solución periódica de las ecuaciones de Boussinesq basada en un método de perturbación. El aparato matemático que conlleva es un tanto complejo y a lo largo de los desarrollos aparecen las funciones elípticas de Jacobi (sn y cn), de ahí la denominación. La teoría cnoidal persigue soluciones al problema de una onda de gravedad propagándose en profundidades reducidas, y es únicamente válida para condiciones cercanas a la rotura.

En la presente aplicación están implementadas las teorías de orden uno, dos y tres, acompañadas de sus magnitudes cinemáticas, dinámicas y energéticas, así como del peralte, profundidad relativa y número de Ursell. Las expresiones completas de estas magnitudes no se incluyen en esta referencia y se remite el lector a alguno de los múltiples textos que las contienen (Mei, 1988; Dean, 1991; Horikawa, 1988)

## **5.1.2 Oleaje**

### **DIN 2.1 - Análisis estadístico de un registro de oleaje**

La aplicación de análisis estadístico de un registro de oleaje analiza una serie temporal de datos de superficie libre leídos de un fichero, tomados con una frecuencia de muestreo determinada, calculando diversas magnitudes de interés. Aunque la mayor parte del análisis es aplicable a otras variables físicas, el programa está específicamente diseñado para ondas de mar gravitatorias. El criterio escogido para la definición de una ola individual es el de pasos ascendentes por cero.

Los pasos que sigue el programa se encuentran resumidos en el esquema de la figura 5.1.1 y se enumeran a continuación:

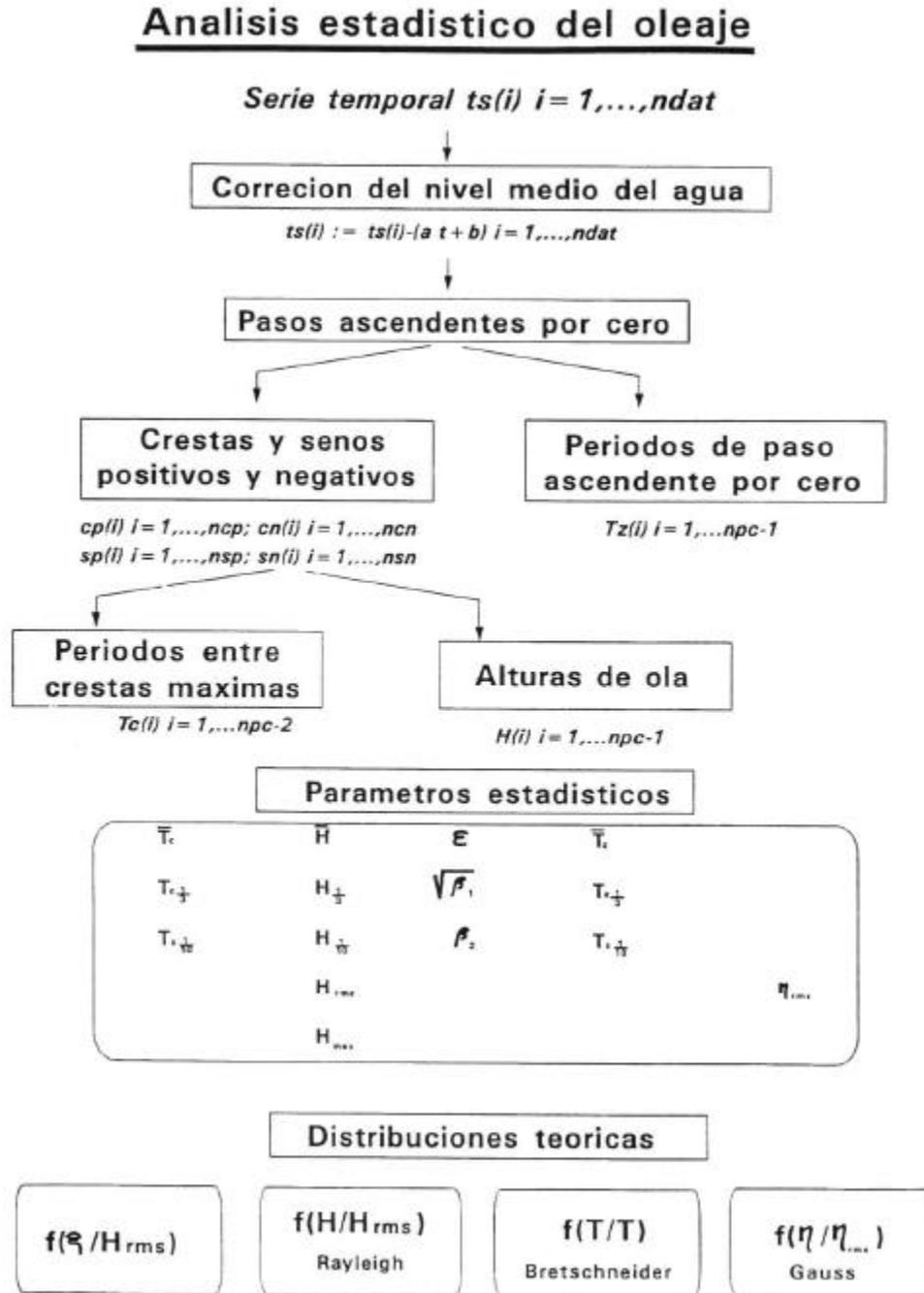


Figura 5.1.1. Análisis estadístico de un estado de mar.  
Esquema general del método



1. Lectura de la serie de datos y corrección del nivel medio mediante regresión lineal.
2. Cálculo de los pasos ascendentes por cero y de valores máximos y mínimos positivos y negativos.
3. Cálculo de los diferentes parámetros estadísticos.
4. Ajuste de los resultados a algunas funciones de probabilidad teóricas.

Los parámetros estadísticos calculados son:

- Superficie libre: media ( $\bar{h}$ ), media cuadrática ( $\eta_{rms}$ ), máxima ( $\eta_{max}$ ) y mínima ( $\eta_{min}$ )
- Alturas de ola: media, cuadrática media ( $H_{rms}$ ), significativa ( $H_s$ ), media del 10% mayor ( $H_{1/10}$ ) y máxima ( $H_{max}$ )
- Periodos: tanto entre pasos ascendentes por cero ( $T_z$ ) como entre crestas positivas se calcula el periodo medio ( $\bar{T}$ ), el significativo ( $T_s$ ) y el medio del 10% mayor ( $T_{1/10}$ )
- Otras magnitudes de interés: anchura espectral ( $\gamma$ ), sesgo ( $\beta_1$ ) y curtosis ( $\beta_2$ ). La anchura espectral proporciona una idea de la anchura de banda de la señal, concepto que anticipa las funciones del módulo siguiente, dedicado al análisis espectral; el sesgo y la curtosis aportan información referente a los momentos de tercer y cuarto orden de la función de densidad de superficie libre, es decir, sobre su asimetría y apuntamiento. Las fórmulas empleadas son las siguientes:

$$e = 4r(1 - r)$$

donde:

$$r = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{N_o}{N_c^+ + N_c^-} \right]$$



donde:

- $N_0$  = número de pasos ascendentes por cero  
 $N_c^+$  = número de crestas positivas  
 $N_c^-$  = número de crestas negativas

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{1}{\eta_{rms}^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^3$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\eta_{rms}^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^4$$

Las funciones de densidad teóricas que se evalúan en función de parámetros estadísticos del registro son las siguientes:

- Función de densidad de superficie libre: se calcula la distribución Gaussiana de expresión:

$$f(x) = \frac{1}{h_{rms} \sqrt{2p}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \text{ donde } x = \frac{h}{h_{rms}}$$

- Función de densidad teórica de cresta/senos: se utiliza las expresiones obtenidas por Cartwright y Longuet-Higgins (1956):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ \varepsilon \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2\varepsilon^2}\right) + \sqrt{1-\varepsilon^2} x \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right) \cdot \int_{-\infty}^{\frac{x\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon}} \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right) dx \right]$$



donde:

$$x = \frac{z^+}{h_{rms}}$$

$z^+$  = valor del desplazamiento de crestas

- Función de densidad de altura de ola: si el proceso estocástico es de banda estrecha se demuestra en la literatura que la función de probabilidad de alturas de ola se ajusta correctamente mediante una distribución de Rayleigh:

$$f(x) = \frac{2}{H_{rms}} x e^{-x^2}$$

donde:

$$x = \frac{H}{H_{rms}}$$

- Función de densidad de periodos: se ajusta la función propuesta por Bretschneider, 1959:

$$f(T^*) = 2.7 T_*^3 \exp[-0.675 T_*^4]$$

donde:

$$T_* = \frac{T}{\bar{T}_z}$$

$\bar{T}_z$  = período medio entre pasos ascendentes por cero

El programa presenta gráficas en las que aparece superpuesta la distribución teórica y la obtenida del registro.



## **DIN 2.2 - Análisis espectral de un registro de oleaje**

Al igual que en el caso del módulo anterior, el punto de partida de esta aplicación es un registro de superficie libre con una longitud y una frecuencia de muestreo adecuada. El fundamento teórico de la metodología que se va a describir es el análisis de Fourier que consiste en la descomposición de una señal en una suma de funciones armónicas -senos o cosenos-, cada una con una amplitud ( $a_k$ ) y un desfase ( $\phi_k$ ):

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi k t}{T} + \phi_k\right)$$

El programa de análisis espectral calcula un estimador de la función de densidad espectral asociada a un proceso estocástico del cual se poseen una serie de realizaciones suficientemente larga. De la longitud y frecuencia de muestreo de los datos disponibles dependerá el grado de exactitud o fiabilidad del espectro estimado. El módulo, además de calcular diversos parámetros espectrales, da una indicación de la bondad de la estimación.

Los pasos que sigue el programa están plasmados en el esquema de la figura 5.1.2 y se detallan a continuación:

1. Lectura del fichero de datos y corrección de nivel medio mediante la recta de regresión.
2. Segmentación de todo el registro en varias subseries, a cada una de las cuales se le resta de nuevo su valor medio.
3. Se aplica una ventana de tipo coseno en cada subserie para evitar transferencia de energía de pico.
4. Se calcula el espectro de potencia de cada subserie mediante un algoritmo FFT (transformada rápida de Fourier).
5. El espectro obtenido por cada subserie es suavizado mediante un filtro rectangular o triangular.
6. Se calcula la media de todas las subseries para obtener el espectro estimado final del registro. Se corrige éste con un factor de proporcionalidad de manera que el área que encierre coincida con el valor del nivel cuadrático medio  $\bar{h}^2$
7. Se calculan los momentos del espectro estimado junto a otros parámetros espectrales.

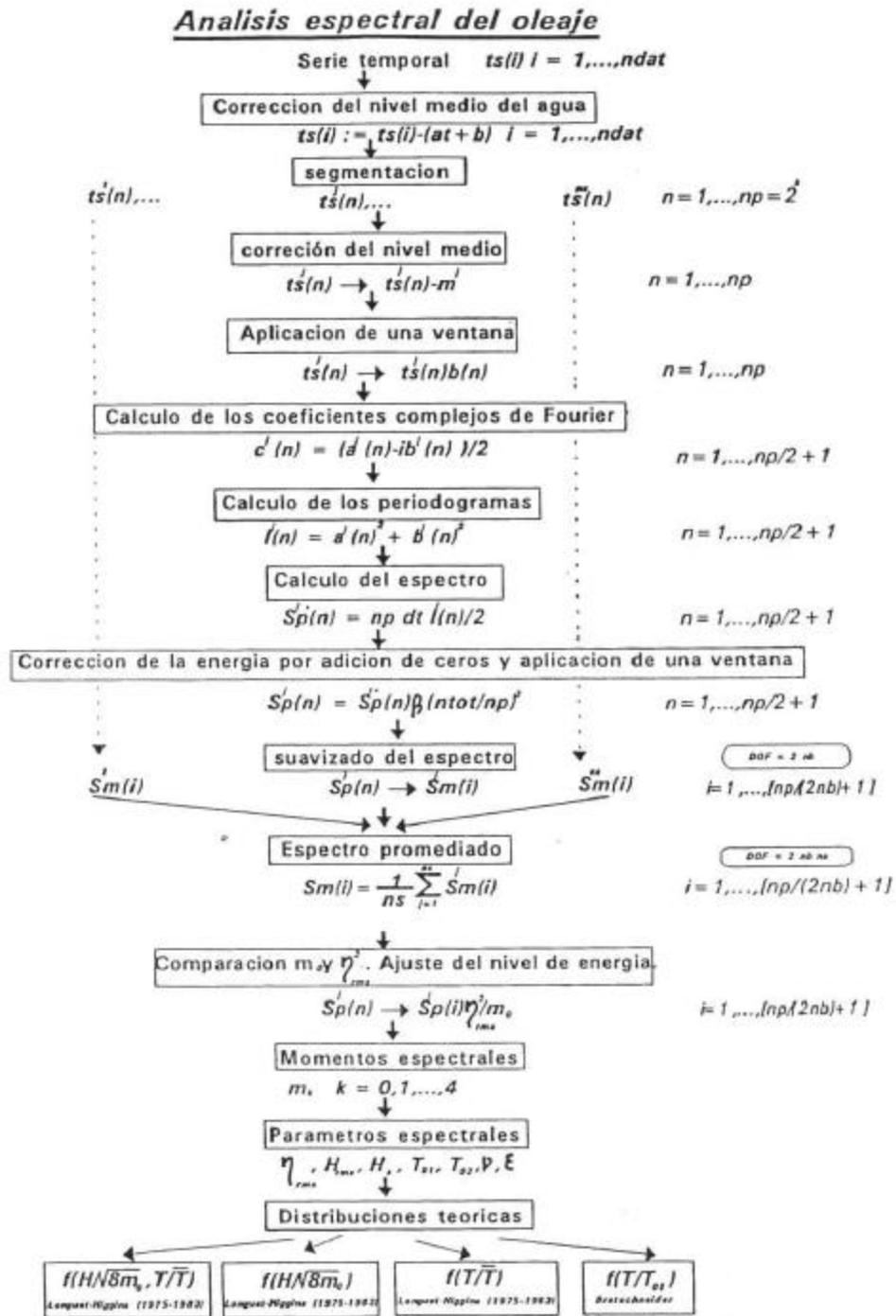


Figura 5.1.2. Análisis espectral de un estado de mar.  
Esquema general del método



8. Se calculan las funciones de densidad teóricas de diversas magnitudes basándose en los parámetros estimados.

Los parámetros espectrales que se calculan a partir de los momentos del espectro ( $m_0, m_1, m_2, m_3, m_4$ ) son los siguientes:

- Media cuadrática del registro,  $\eta_{rms}$ :

$$h_{rms} = \sqrt{m_0}$$

- Altura de ola media cuadrática,  $H_{rms}$ :

$$H_{rms} = \sqrt{8 m_0}$$

- Altura de ola significativa,  $H_s$ :

$$H_s = 4.004 \sqrt{m_0}$$

- Periodos  $T_{01}$  y  $T_{02}$

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} ; T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

- Anchura espectral  $\epsilon$ :

$$e = \sqrt{\left(1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right)}$$

- Anchura espectral  $v_n$ :

$$v = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1}$$



Las funciones de densidad teóricas que son calculadas se enumeran a continuación:

- Función de densidad conjunta H - T (Longuet-Higgins, 1983):

$$f(R, t) = \frac{2L(\mathbf{n})}{\sqrt{\rho n}} \frac{R^2}{t^2} \exp \left[ -R^2 \left( 1 + \frac{1}{n^2} \left( 1 - \frac{1}{t} \right)^2 \right) \right]$$

donde:

$$R = \frac{H}{\sqrt{8m_0}}$$

$$t = \frac{T}{\bar{T}}$$

$$L(\mathbf{n}) = \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{1+n^2}} \right) \right]^4$$

$\bar{T}$  = periodo medio

- Función de densidad marginal de periodos (Longuet-Higgins, 1983):

$$f(\tau) = \frac{L(\nu)}{2\nu} \frac{1}{\tau^2} \cdot \frac{1}{\alpha \sqrt{\alpha}}$$

donde  $a = a(t) = 1 + \frac{1}{n^2} \left( 1 - \frac{1}{t} \right)^2$  y  $L(\mathbf{n}), t$  se definieron en la fórmula anterior.

- Función de densidad marginal de alturas de ola (Longuet-Higgins, 1983):

$$f(R) = 2L(\nu) e^{-R^2} \cdot G \left( \frac{R}{\nu} \right)$$



siendo  $G\left(\frac{R}{n}\right) = \frac{1}{\sqrt{p}} \int_{-\infty}^{\frac{R}{n}} e^{-b^2} db$  y  $R, L(n)$  se definieron anteriormente.

- Función de densidad de periodos (Bretschneider, 1959):

$$f(T_*) = 2.7 \frac{T_*^3}{T_{01}} e^{-0.0625 T_*^4}$$

donde:

$$T_* = \frac{T}{T_{01}}$$

El programa permite visualizar en una gráfica la distribución teórica junto con la obtenida a partir del registro.

### **DIN 2.3 - Previsión de oleaje**

El proceso de generación del oleaje a partir de un campo de viento es de naturaleza compleja y ha constituido un tema de investigación permanente desde mediados del siglo XX. El ingeniero de costas, a menudo ajeno a los mecanismos internos de los fenómenos, ha hecho uso de las formulaciones existentes para predecir episodios de oleaje partiendo de datos de viento en una determinada zona. Este método de predicción es adecuado cuando no se dispone de registros de oleaje, o no son suficientemente largos para acometer un análisis estadístico de valores extremos.

Dentro de los métodos de predicción existen dos categorías:

- Métodos numéricos de evolución espectral basados en la ecuación de conservación de la energía.
- Fórmulas paramétricas de estimación.

El primer punto incluye modelos sofisticados que exigen grandes esfuerzos de computación y precisan una fuente de datos en consonancia con el grado de exactitud que se desea obtener. El segundo constituye un método simplificado de estimación y es el que se presenta en el Tutor de Ingeniería de Costas.

Las fórmulas que se proponen a continuación se deben a diversos autores: Vincent (1984), SPM (1984), Smith (1991), Donelan (1992) y otros. Muchas de ellas se apoyan en los resultados del proyecto JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) publicados a principios de los años setenta.

Todas ellas proporcionan estimaciones de los valores de altura significativa y periodo de pico a partir de las siguientes hipótesis:

- Situación inicial de mar de reposo.
- Geometrías reducidas, de *fetch*<sup>2</sup> no superior a 150 km.
- Campos de viento relativamente constantes en intensidad y dirección.
- Estabilidad en la interfase agua-atmósfera, es decir, igualdad de temperaturas.
- Coeficiente de arrastre constante ( $C_d = 0.001$ ).

Los datos de partida son los siguientes:

- Tipo de profundidad relativa: se especifica si el fenómeno de generación se produce en profundidades indefinidas o reducidas. En el segundo caso, las fórmulas tendrán en cuenta efectos de fricción por fondo y rotura.
- Tipo de *fetch*: el programa permite elegir entre *fetch* ilimitado y restringido. En el primer caso la dirección del oleaje generado coincide con la del viento; en el segundo, esto no es necesariamente así.
- Velocidad del viento: corresponde a una velocidad media a lo largo del tiempo de persistencia, a 10 metros de altura sobre la lámina de agua y en condiciones de estabilidad agua-atmósfera.
- Persistencia del campo de viento: tiempo en horas a lo largo del cual se mantiene el viento y, por tanto, el crecimiento del oleaje.
- Profundidad de generación: debe ser especificada en el caso de que se trabaje en profundidades reducidas.

---

<sup>2</sup> La denominación castellana es *distancia de generación*. A lo largo de este documento se utilizará a menudo el término anglosajón, tanto por brevedad como por lo extendido de su uso.

- Fichero de datos de contorno de costa: cuando se ejecuta el programa bajo condiciones de *fetch* limitado, es necesario describir en un fichero de texto la geometría de la costa mediante coordenadas polares, tomando como origen el punto de estudio y eligiendo un origen de ángulos cualquiera.
- Dirección del viento: sólo cuando se trabaja en un *fetch* restringido. El origen de medida de este ángulo debe ser consistente con el que se haya tomado para generar el fichero de datos con la geometría de la costa.

Cuando se elige la opción de *fetch* restringido, el propio programa calcula, tras procesar el fichero de datos y el punto objetivo, la longitud de generación y el ángulo de desviación entre la dirección del viento y el oleaje crítico generado. El algoritmo de cálculo se describe en Donelan (1992) y consiste en calcular en primer lugar un *fetch* corregido a partir del que se introduce por fichero. A continuación se evalúa en cada dirección, con intervalos de un grado sexagesimal, el siguiente funcional (ver figura 5.1.3):

$$F(\mathbf{y}) = R_y^{0.426} \cdot \cos(\mathbf{y} - \mathbf{f})$$

donde:

- $\phi$  = dirección del viento
- $\psi$  = dirección de los posibles oleajes.

La dirección  $\psi$  que lo maximice será aquella que proporciona la mayor altura de ola, pudiéndose entonces utilizar las mismas fórmulas que con *fetch* ilimitado, pero introduciendo como longitud de generación la corregida correspondiente a la dirección pésima.

Las fórmulas empleadas se presentan a continuación:

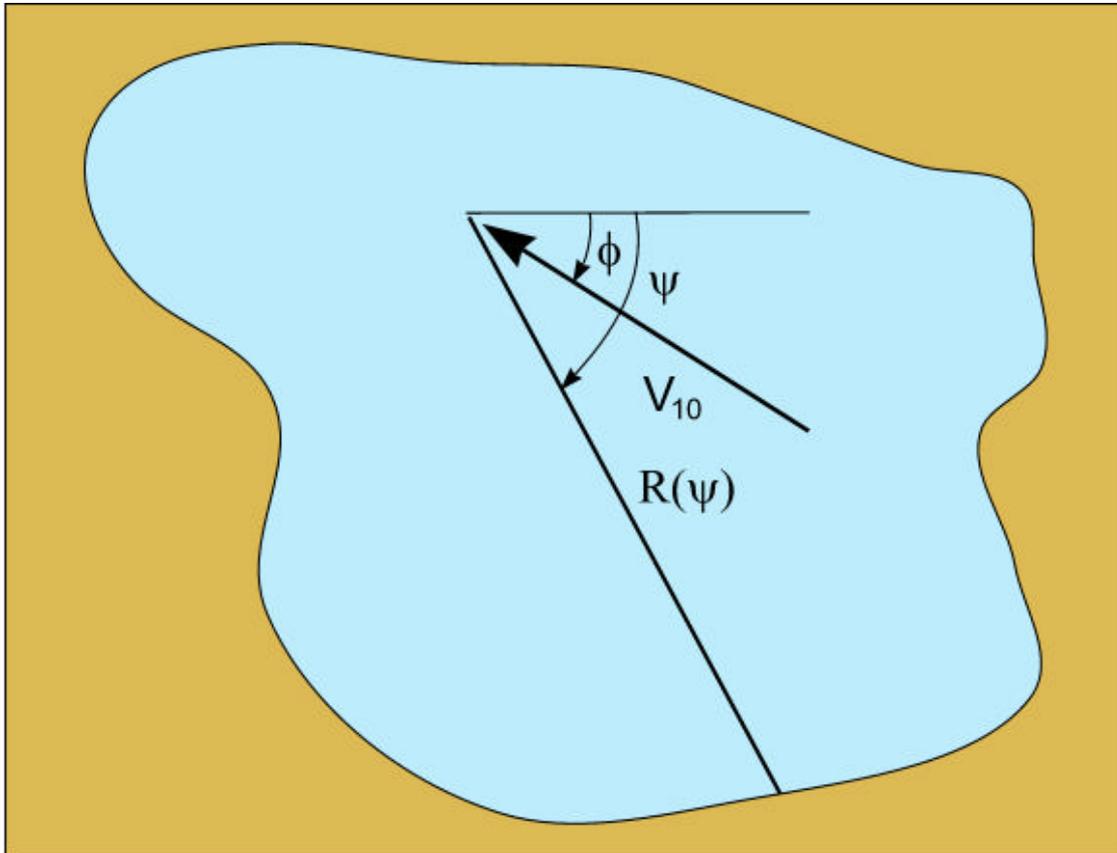


Figura 5.1.3. Esquema de cálculo de fetch restringido



### A. Profundidades indefinidas

#### A.1. Oleaje limitado por la duración del viento:

- Fetch no restringido

$$H_s = 0.0000851 \left( \frac{U_a^2}{g} \right) \left( \frac{g t_i}{U_a} \right)^{\frac{5}{7}}$$

$$T_p = 0.082 \left( \frac{\hat{U}_a}{g} \right) \left( \frac{g t_i}{\hat{U}_a} \right)^{0.39}$$

$$T_p = 0.0702 \left( \frac{U_a}{g} \right) \left( \frac{g t_i}{U_a} \right)^{0.411}$$

- Fetch restringido

$$H_s = 0.000103 \left( \frac{\hat{U}_a^2}{g} \right) \left( \frac{g t_i}{\hat{U}_a} \right)^{0.69}$$

$$T_p = 0.082 \left( \frac{\hat{U}_a^2}{g} \right) \left( \frac{g t_i}{\hat{U}_a} \right)^{0.39}$$

#### A.2 Oleaje limitado por fetch:

- Fetch no restringido

$$H_s = 0.0016 \left( \frac{U_a^2}{g} \right) \left( \frac{g F}{U_a^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$T_p = 0.2857 \left( \frac{U_a}{g} \right) \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

- Fetch restringido

$$H_s = 0.0015 \left( \frac{\hat{U}_a^2}{g} \right) \left( \frac{gF}{\hat{U}_a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$T_p = 0.3704 \left( \frac{\hat{U}_a}{g} \right) \left( \frac{gF}{\hat{U}_a^2} \right)^{0.28}$$

A.3 Oleaje totalmente desarrollado:

- Fetch no restringido

$$H_s = 0.2433 \left( \frac{U_e^2}{g} \right)$$

$$T_p = 8.134 \left( \frac{U_e}{g} \right)$$

- Fetch restringido

$$H_s = 0.2433 \left( \frac{\hat{U}_e^2}{g} \right)$$

$$T_p = 8.134 \left( \frac{\hat{U}_e}{g} \right)$$



### B. Profundidades reducidas

- Fetch no restringido

$$H_s = \frac{U_a^2}{g} 0.283 \tan h \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right] \tan h \left\{ \frac{\frac{0.0016 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.5}}{0.283 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75}}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right]} \right\}$$

$$T_p = \frac{U_a}{g} 7.54 \tan h \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right] \tan h \left\{ \frac{\frac{0.2857 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.333}}{7.54 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375}}}{\tan h \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right]} \right\}$$

- Fetch restringido

$$H_s = \frac{U_a^2}{g} 0.283 \tan h \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right] \tan h \left\{ \frac{\frac{0.0015 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.5}}{0.283 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75}}}{\tan h \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right]} \right\}$$

$$T_p = \frac{U_a}{g} 7.54 \tan h \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right] \tan h \left\{ \frac{\frac{0.3704 \left( \frac{gF}{U_a^2} \right)^{0.28}}{7.54 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375}}}{\tan h \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right]} \right\}$$



donde:

$H_s$	=	altura de ola significativa prevista
$T_p$	=	periodo de pico previsto
$U_a$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable con corrección por efectos no lineales
$\hat{U}_a$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable con corrección por efectos no lineales en la dirección del <i>fetch</i> crítico con tipo de <i>fetch</i> restringido
$U_e$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable
$\hat{U}_e$	=	velocidad del viento a 10 m de altura en atmósfera estable en la dirección del <i>fetch</i> crítico con tipo de <i>fetch</i> restringido
$t_i$	=	duración del campo de viento
$F$	=	distancia de generación
$d$	=	profundidad media

Al ejecutar, se comprueba si con las condiciones elegidas se puede llegar a producir un oleaje totalmente desarrollado; si no es así, se determina cual es el aspecto limitante: la duración del viento o bien la longitud de generación. En función de ello se emplean unas u otras fórmulas.

Cabe comentar que las expresiones que corresponden a profundidades reducidas no están respaldadas por ningún tipo de observación real y, por lo tanto, deben ser utilizadas con la máxima reserva y sólo con fines de tanteo y prediseño.

#### **DIN 2.4 - Regímenes extremales- método POT**

El método presentado en este módulo suele denominarse comúnmente con el acrónimo POT, procedente de las palabras inglesas *Peak Over Threshold*, pico por encima de un umbral. Fue presentado a la comunidad técnica por su autor, Yoshimi Goda, con motivo de la 21<sup>a</sup> Conferencia Internacional de Ingeniería de Costas en un artículo titulado “*On the Methodology of Selecting Design Wave Height*” (Goda, 1988). Desde ese momento ha cobrado cierta popularidad entre los ingenieros. En España, la ROM 0.3-91 utiliza dicha metodología para ajustar los regímenes extremales de oleaje en cada sector del litoral.



Goda prescribe un protocolo de cálculo para decidir la altura de ola de diseño en un punto con profundidad no limitante partiendo de un registro de alturas de ola en temporales suficientemente amplio. Es necesario especificar dos magnitudes: el número medio de temporales anuales (que dependerá de la definición de temporal que adopte el usuario) y un umbral de censura. Los datos inferiores a este último valor son eliminados del proceso de ajuste.

El método consiste en ajustar mediante la técnica de mínimos cuadrados la serie de datos (una vez censurada) a una serie de funciones de distribución extremales conocidas. En concreto se proponen cinco: una distribución Gumbel de máximos y cuatro distribuciones Weibull de mínimos con diferentes parámetros de forma. Sus expresiones son:

$$\text{Gumbel : } F(x) = \exp \left[ - \exp \left( \frac{-(x - I)}{d} \right) \right]$$

$$\text{Weibull: } F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{(x - I)}{d} \right)^\beta \right]$$

con  $\beta = 1, 1.5, 2$  y  $2.5$

donde:

$\lambda$	=	parámetro de localización
$\delta$	=	parámetro de escala
$\beta$	=	parámetro de forma

Se prescribe el uso de una fórmula de punteo de datos concreta para cada familia de funciones. En concreto:

$$F_m = 1 - \frac{(m - 0,44)}{N_T + 0,12} \quad m = 1, 2, \dots, N$$

- Distribución de Gumbel: se utilizará la fórmula de Gringorten (1961): siendo,  $N_T$  el número total de datos y  $N$  el número de datos una vez realizada la censura.



- Distribuciones de Weibull minimales: se utilizará la fórmula de Petruaskas y Aagaard (1970) modificada:

$$F_m = 1 - \frac{m - \mathbf{a}}{N_T + \mathbf{b}} \quad m = 1, 2, \dots, N$$

$$\text{con: } \mathbf{a} = 0.20 + \frac{0.27}{\sqrt{k}}$$
$$\mathbf{b} = 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}$$

donde:

$$F_m = \text{probabilidad acumulada del dato } m$$
$$N_T = \text{número total de datos}$$

A continuación se calcula el coeficiente de regresión lineal de los datos ajustados a cada una de las distribuciones seleccionadas, eligiéndose aquella que proporcione el valor más cercano a uno.

En última instancia, el autor propone una serie de fórmulas destinadas a calcular una banda de confianza del ajuste obtenido, teniendo en cuenta el número de datos empleado y la propia incertidumbre acerca de la verdadera función de distribución. El programa proporciona el valor de la altura de ola de diseño con o sin banda de confianza correspondiente a un periodo de retorno especificado.

### **DIN 2.5 - Regímenes extremales - ajuste de colas**

En determinadas actuaciones de la ingeniería de costas surge la necesidad de elegir un valor de diseño para una determinada variable de naturaleza aleatoria partiendo de un registro histórico. La estadística ha producido en las últimas décadas herramientas para llevar a cabo esta operación que tanto condiciona el diseño y el coste de las diversas actuaciones. El método POT, descrito en el apartado precedente, constituye un ejemplo de técnica particular



adaptada al problema concreto del oleaje; en ella se asume que los valores máximos/mínimos alcanzados en un determinado fenómeno responden a una serie de funciones de probabilidad específicas. Estas distribuciones, denominadas de máximos/mínimos, se conocen por los nombres de Gumbel, Weibull y Frechet, existiendo en cada caso la versión de máximos y la de mínimos. Tanto las de Weibull como las de Frechet son triparamétricas, es decir, se definen mediante tres parámetros denominados de localización, de escala y de forma, mientras que las de Gumbel requieren sólo los dos primeros.

Tradicionalmente, los ingenieros han utilizado sus propios métodos con cierta independencia de las recomendaciones y el rigor matemáticos. La variable aleatoria log-normal se ha utilizado frecuentemente junto con la Gumbel y las Weibull de máximos y mínimos.

El presente módulo permite ajustar una serie de datos a cinco distribuciones de extremos mediante el método de mínimos cuadrados o de mínimos cuadrados ponderados con el periodo de retorno. En este último caso, los valores extremos tienen más peso que los centrales. Las distribuciones disponibles, con su expresión matemática, son las siguientes:

- Gumbel de máximos

$$F(x; \mathbf{l}, \mathbf{d}) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{x - \mathbf{l}}{\mathbf{d}} \right) \right]$$

- Frechet de máximos

$$F(x; \mathbf{l}, \mathbf{d}, \mathbf{b}) = \exp \left[ -\left( \frac{\mathbf{d}}{x - \mathbf{l}} \right)^{\mathbf{b}} \right]$$



- Weibull de máximos

$$F(x; \mathbf{l}, \mathbf{d}, \mathbf{b}) = \exp \left[ - \left( \frac{\mathbf{l} - x}{\mathbf{d}} \right)^{\mathbf{b}} \right]$$

- Weibull de mínimos

$$F(x; \mathbf{l}, \mathbf{d}, \mathbf{b}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - \mathbf{l}}{\mathbf{d}} \right)^{\mathbf{b}} \right]$$

donde:

$\lambda$	=	parámetro de localización
$\delta$	=	parámetro de escala
$\beta$	=	parámetro de forma

- Log-normal

$$f(x) = \frac{1}{x \mathbf{s} \sqrt{2\mathbf{p}}} \exp \left[ - \frac{1}{2} \left( \frac{\ln(x) - \mathbf{m}}{\mathbf{s}} \right)^2 \right]$$

donde:

$\mu$	=	parámetro de localización de la distribución log-normal
$\sigma$	=	parámetro de escala de la distribución log-normal



En los casos de distribuciones triparamétricas (Weibull y Frechet), el usuario deberá introducir el parámetro de forma. Es posible designar un umbral de censura de los datos, de manera que sólo se consideren aquellos que lo excedan sin modificar el fichero que los contiene. Las fórmula de punteo utilizada para asignar una probabilidad acumulada a cada dato se puede elegir entre las siguientes:

- Weibull:

$$F_i = \frac{i}{N+1}$$

- Blom:

$$F_i = \frac{i - \frac{3}{8}}{N + \frac{1}{4}}$$

- Hazen:

$$F_i = \frac{i - \frac{1}{2}}{N}$$

- Gringorten:

$$F_i = \frac{i - 0.44}{N + 0.12}$$

donde:

$i$  = 1, 2, ...,  $N$  siendo  $N$  el número de datos  
 $F_i$  = probabilidad acumulada del dato  $i$



El programa también calcula bandas de confianza de la función de ajuste mediante el método denominado *bootstrap*. Éste consiste en hacer uso de la eficiencia numérica del ordenador generando un número muy alto de series de valores siguiendo la distribución obtenida. La distribución de los distintos estadísticos de orden se ajusta a una campana de Gauss centrada en el valor de la función de ajuste. Desplazándose un número de veces la desviación típica hacia arriba o hacia abajo se pueden determinar las bandas de confianza.

### 5.1.3 Propagación y rotura

#### DIN 3.1 - Propagación de ondas

El módulo DIN 3.1 tiene como finalidad propagar una onda teórica a lo largo de una costa con batimetría recta y paralela considerando efectos de refracción, asomeramiento, rotura y disipación post-rotura de la misma. Para el cálculo de la refracción se utiliza la conocida ley de Snell:

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}}$$

donde  $K_r$  es el coeficiente de refracción,  $\alpha_0$  es el ángulo de incidencia en profundidades indefinidas y  $\alpha$  es el ángulo de incidencia en el punto objetivo.

En el caso del asomeramiento o shoaling, el programa permite elegir entre dos métodos:

- Teoría lineal: se basa en la conservación del flujo de energía de la onda asumiendo que se trata de una onda de pequeña amplitud. El coeficiente de asomeramiento  $K_s$  tiene la siguiente expresión:

$$K_s = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}}$$



donde  $c_g = \frac{c}{2} \left[ 1 + \frac{2Kd}{\sinh(2Kd)} \right]$  y el subíndice 0 indica profundidades indefinidas.

- Teoría de Shuto (1974): se trata de una curva de asomeramiento compuesta de tres tramos: el primero basado en la teoría lineal, el segundo un tramo de acuerdo y el último una aproximación a la ecuación de  $KdV$  mediante un método de perturbación. Este último tramo corresponde aproximadamente al asomeramiento de una onda cnoidal. Las expresiones matemáticas que describen la variación de  $H$  con la profundidad son las siguientes:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{c}{2 c_g \tanh(Kd)}} ; \quad \frac{gH T^2}{d^2} < 30$$

$$H d^{\frac{2}{7}} = A ; \quad 30 < \frac{gH T^2}{d^2} < 50$$

$$H d^{\frac{5}{2}} \left[ \sqrt{\frac{gH T^2}{d^2}} - 2\sqrt{3} \right] = B ; \quad \frac{gH T^2}{d^2} > 50$$

donde  $A, B =$  constantes de Shuto.

El proceso de rotura de una ola se produce en el momento en que la presencia del fondo es tan importante que el flujo no puede adaptarse a él conservando sus características generales, sino que experimenta un cambio brusco y cualitativo. Existen multitud de criterios para calcular la profundidad de rotura de una onda de mar gravitatoria, de los cuales el presente módulo incorpora el de la onda solitaria:

$$H_b = 0.78 \cdot d$$



El último de los fenómenos considerados es el de la evolución del oleaje después de la rotura. La formulación que se ha elegido con este fin es la debida a Dally, Dean y Dalrymple (1992), que considera que en cada profundidad existe un flujo de energía de equilibrio cuya superación determina la tasa de decrecimiento de la altura de ola. Esto es lo que refleja de forma matemática la siguiente expresión:

$$\frac{d(H^2 d^{\frac{1}{2}})}{dx} = -\frac{K}{h} \left[ H^2 d^{\frac{1}{2}} - \Gamma^2 d^{\frac{5}{2}} \right]$$

donde:

$K, \Gamma$  = constantes del modelo de Dally y Dean  
 $x$  = coordenada en la dirección perpendicular a la costa.

El programa permite trabajar con batimetrías de pendiente constante o totalmente irregulares; en este último caso, se leerán los datos de distancia a la costa y profundidad en diferentes puntos de un fichero de texto. Como método de cálculo se utiliza un esquema explícito en diferencias finitas con incrementos variables proporcionales a la longitud de onda en cada punto. Al pulsar el botón de ejecución se proporcionan diversos parámetros de la onda en el punto de rotura y en la profundidad objetivo. También es posible observar gráficamente la evolución de diversas magnitudes como la altura de ola, el *set-up* y el ángulo de incidencia.

### **DIN 3.2 - Propagación de oleaje**

El módulo DIN 2.3 presenta el método que Y. Goda presentó en 1975 en un artículo que lleva por título “*Irregular Wave Deformation in the Surf Zone*” (Goda, 1975). En él se propone un método para calcular la deformación de un tren de ondas irregulares en la zona de rompientes teniendo en cuenta los siguientes fenómenos:

- asomeramiento
- rotura
- *set-up*

- *surf-beat*

El módulo de propagación de oleaje implementa este método de manera que pueda ser aplicado al caso de un perfil de costa arbitrario, siempre y cuando se tengan en cuenta las siguientes limitaciones:

1. La distribución de alturas de ola incidentes se puede aproximar con una función de densidad de tipo Rayleigh.
2. Las olas se propagan sobre una costa de batimetría recta y paralela, contornos suaves y no reflejante.
3. El asomeramiento de un tren de ondas puede ser aproximado por el de cada onda individual.
4. La función de probabilidad de alturas de olas rotas es proporcional a la de las no rotas.
5. Se asume la validez de una fórmula empírica para el *surf-beat*.

El método parte de una distribución de altura de ola tipo Rayleigh en profundidades indefinidas. A medida que las olas más grandes empiezan a romper, se redistribuye la probabilidad variando el tipo de función de densidad. El criterio de rotura empleado depende de la profundidad; ésta se calcula sumando al nivel en reposo un *set-up* fijo y una sobreelevación por *surf-beat* con función de probabilidad normal. Para cada punto se considera que las olas rompen en el rango de alturas comprendido entre  $H_{b1}$  y  $H_{b2}$ . Esta hipótesis pretende compensar la imprecisión de los criterios de rotura y la variabilidad del fenómeno. A medida que nos aproximamos a la costa, la distribución de alturas se desplaza hacia valores menores

Goda prescribe el uso de fórmulas y métodos concretos para cada uno de los fenómenos implicados. Se mencionan a continuación las teorías utilizadas:

- asomeramiento: se utiliza la teoría de Shuto (1974), cuyas expresiones matemáticas aparecen reflejadas en la referencia del módulo DIN 3.1. Esta teoría plantea una curva de asomeramiento mixta que presenta comportamiento lineal hasta una cierta profundidad para a continuación tender hacia una solución aproximada de la ecuación de KdV. Como ya se comentó en las hipótesis de partida, se asume que el asomeramiento del tren de ondas es igual al de cada onda considerada de forma individual.
- rotura: Goda propone su propio criterio de rotura, que tiene la siguiente expresión:



$$\frac{H_b}{L_0} = A \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \frac{pd}{L_0} \left( 1 + 15 \tan \beta^{\frac{4}{3}} \right) \right] \right\}$$

con  $K = 15$  y  $s = 4/3$

donde:

$\tan \beta$  = pendiente media de la playa  
 $A$  = constante con valor 0.18 para calcular  $H_{b1}$  y 0.12 para  $H_{b2}$

- *set-up*: se calcula utilizando la expresión del tensor de radiación que da la teoría lineal. La formula que lo gobierna es:

$$\frac{d\bar{h}}{dx} = \frac{-1}{\bar{h} + d} \frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{8} H_{rms}^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{2Kd}{\sinh(2Kd)} \right) \right]$$

donde:

$\bar{h}$  = *set-up*  
 $x$  = coordenada en la dirección perpendicular a la costa

Se trata de una ecuación diferencial ordinaria de primer orden que se resuelve por un método explícito con sentido de avance hacia la costa y mediante tanteos.

- *surf-beat*: fruto de la observación de trenes de onda medidos en distintas playas de Japón, el método propone la siguiente fórmula empírica, que da un valor de la amplitud de la oscilación de onda larga:

$$x_{rms} = \frac{0.01 H_0}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0} \left( 1 + \frac{d}{H_0} \right)}}$$



donde:

$$\xi_{rms} = \text{surf-beat cuadrático medio}$$

Se puede trabajar con batimetrías de pendiente constante o totalmente irregulares; en este último caso, se leerán los datos de distancia a la costa y profundidad de un fichero de texto. Al pulsar el botón de ejecución se proporciona la evolución de distintos estadísticos ( $H_{rms}$ ,  $H_s$ ,  $H_{max}$ ) de la distribución de alturas de ola en cada punto del perfil. También se puede observar la evolución del nivel medio y el *surf-beat* estimado, tanto mediante sus valores numéricos como a través de una gráfica.

### **DIN 3.3 - Rotura del oleaje**

El módulo dedicado a la rotura del oleaje permite evaluar este fenómeno con diferentes criterios seleccionados de la literatura. Se permiten dos opciones de ejecución:

- a) Dada una altura de ola en rotura y su periodo de propagación, calcular la profundidad de rotura.
- b) Dados el periodo y la profundidad de rotura, calcular la altura de ola en rotura.

A continuación se enumeran los criterios incluidos en el programa, que representan una parte de cuantos han aparecido desde los inicios de esta rama de la ingeniería, junto con su expresión matemática:

- Onda solitaria

$$H_b = 0.78 d_b$$

- Weggel (1972)

$$\frac{H_b}{d_b} = b(m) = a(m) \frac{H_b}{g T^2} - H_s = \frac{b(m)}{\frac{1}{d_b} + \frac{a(m)}{g T^2}}$$

$$b(m) = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5m})}$$

$$a(m) = 43.8(1 - e^{-19m})$$

- Goda (1975)

$$H_s = 0.17 L_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \frac{p d_b}{L_0} \left( 1 + 15 \tan^{\frac{4}{3}} \mathbf{b} \right) \right] \right\}$$

- Sunamura (1983)

$$\frac{H_b}{d_b} = 1.09 (\tan \mathbf{b})^{0.19} \left( \frac{H_b}{L_0} \right)^{-0.1}$$

- Kaminsky-Kraus (1993)

$$H_b = \mathbf{g}_b h$$

$$\mathbf{g}_b = 1.2 I_r^{0.27}$$

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

- Miche (1951)

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 \tanh \left( \frac{2p d_b}{L_b} \right)$$



- Ostendorf-Madsen (1979)

$$\tan \mathbf{b} < 0.1 : \frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh \left\{ (0.8 + 5 \tan \mathbf{b}) \frac{2p d_b}{L_b} \right\}$$

$$\tan \mathbf{b} > 0.1 : \frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh \left\{ (1.3) \frac{2p d_b}{L_b} \right\}$$

- Battjes (1985)

$$H_b = 0.88 \left( \frac{2\pi}{L_b} \right)^{-1} \tanh \left( \gamma \frac{2\pi d_b}{L_b \cdot 0.88} \right)$$

- Kamphuis (1991)

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.5 + 0.4 \tanh (33 m)$$

- Larson y Kraus (1994)

$$H_b = 0.095 \cdot e^{4m} L_b \tanh \left( \frac{2\pi d_b}{L_b} \right)$$

donde los símbolos empleados son los siguientes:

$H_b$  = altura de ola en rotura



$d_b$	=	profundidad en rotura
$L_0$	=	longitud de onda en profundidades indefinidas
$H_0$	=	altura de ola en profundidades indefinidas
$m$	=	pendiente media de la zona de rompientes ( $m = \tan b$ )
$L_b$	=	longitud de onda en rotura

Según el criterio empleado, son necesarios algunos parámetros adicionales, en concreto la pendiente del fondo y la altura de ola en profundidades indefinidas. Al ejecutar, el programa resolverá únicamente aquellas expresiones para las que disponga de datos.

### **DIN 3.4 - Run-up en playas**

El ascenso y descenso del nivel del mar en una playa constituye un fenómeno de capital importancia para el diseño. Las variables que intervienen son de diversa naturaleza y se manifiestan con distinta intensidad y periodicidad, según las condiciones particulares. En general, se deben considerar las siguientes:

- La marea astronómica (en caso de que exista).
- El viento y la presión atmosférica, denominados en su acción conjunta como marea meteorológica.
- El oleaje.
- El *set-up* o sobreelevación del nivel medio por gradiente transversal de tensor de radiación debido a la rotura del oleaje.
- Los movimientos de largo periodo en la zona de rompientes, especialmente el *surf-beat* u oscilación de onda larga.

Tanto la sobreelevación por marea astronómica como la debida a viento y presión están asociadas a agentes ajenos al oleaje y se tratan en los módulos DIN 4.1 y DIN 4.2 respectivamente. El presente módulo presenta dos métodos empíricos para evaluar la sobreelevación debida a la acción conjunta del resto de los fenómenos: oleaje, *set-up* y *surf-beat*. La complejidad de la hidrodinámica de la zona de rompientes hace que la separación de los tres sea más bien de carácter pedagógico, aunque existen fórmulas que evalúan cada uno ellos por separado. La simple observación de una playa real demuestra a) la estrecha relación que existe entre todos los posibles movimientos y b) la dificultad de aislar los efectos



debidos a cada uno de ellos, suponiendo su independencia. Por tales motivos, y manteniendo una postura más ingenieril que científica, se ha optado por incluir aquellas formulaciones que consideran la totalidad de los fenómenos mencionados, adoptando la denominación de *run-up* para el resultado de la acción de todos ellos, sin indagar en la aportación particular de cada uno.

#### Formulación de R. A. Holman (1986)

Los resultados de 149 series de datos de *run-up* de 35 minutos de duración en la playa de Duck, Carolina del Norte, son analizados por Holman, y los resultados publicados en el artículo “*Extreme Value Statistics for Wave Run-up on a Natural Beach*” (1986). La conclusión básica es una aceptable correlación entre el *run-up* normalizado con la altura de ola significativa incidente y el número de Iribarren. Concretamente, la siguiente relación es la de mejor ajuste para los datos:

$$\frac{R_{u\ 2\%}}{H_s} = 0.822 \cdot I_r + 0.2$$

donde  $I_r = \frac{\tan \mathbf{b}}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$  y  $R_{u\ 2\%}$  es el *run-up* superado el 2% del tiempo.

#### Formulación de P. Nielsen y D. J. Hanslow (1991)

La formulación de Nielsen y Hanslow es fruto de una amplia serie de campañas de campo realizados en seis playas de la costa sudeste de Australia de distintas características morfodinámicas. Los resultados, recogidos en el artículo “*Wave Runup Distributions on Natural Beaches*” (1991), revelan la independencia del *run-up* de la pendiente de la playa en el caso de playas tendidas  $\left( \tan \mathbf{b} < \frac{1}{10} \right)$ ; en playas más reflejantes, se confirma la dependencia del ángulo del talud y, por tanto, del número de Iribarren. El valor del *run-up* se ajusta bien a una distribución de tipo Rayleigh. Las fórmulas finales se recogen a continuación:



$$z = 0.47 (H_s L_0)^{0.5} \tan b \quad \text{si } \tan b > 0.1$$

$$z = 0.04 (H_s L_0)^{0.5} \quad \text{si } \tan b < 0.1$$

$$R_{u50\%} = 0.83 z$$

$$R_{u2\%} = 1.98 z$$

$$R_{u1\%} = 2.15 z$$

donde  $R$  indica el valor del *run-up* y el subíndice el porcentaje del tiempo en el que es superado.

### **DIN 3.5 - Corrientes longitudinales en playas**

Con la aparición del concepto de tensor de radiación (Longuet-Higgins, 1970) el conocimiento de la hidrodinámica en la zona de rompientes experimentó un avance sin precedentes. Muchos de los fenómenos que antes eran explicados de forma confusa o cualitativa recibieron repentinamente una justificación científica y encontraron expresión analítica. Fue el inicio de todo un campo de investigación que sigue ocupando a la comunidad científica.

El presente módulo recoge las fórmulas clásicas relativas a corrientes longitudinales generadas por la rotura del oleaje. Estas corrientes sólo se manifiestan dentro de la zona de rompientes y se pueden producir por dos causas principalmente:

- Incidencia oblicua del oleaje.
- Gradientes longitudinales de altura de ola debidos a diversos fenómenos (difracción, ondas de borde, formas de playa rítmicas, etc.)

El módulo DIN 3.5 incorpora dos formulaciones analíticas clásicas para la corriente longitudinal. En ambas se asume batimetría recta y paralela. La primera de ellas es la más simple y solamente considera la disipación por fricción de fondo, despreciando las tensiones de Reynolds. Con estas hipótesis simplificadoras la distribución de velocidades a lo largo de la zona de rompientes



tiene estructura triangular, con su máximo situado en el punto de rotura. Su expresión matemática es la siguiente:

$$v = \frac{5p}{16} \frac{g \tan b}{C_f} \frac{\sin q_b}{c_b} gd$$

donde:

$v$	=	corriente longitudinal
$C_f$	=	coeficiente de fricción
$\gamma$	=	$\frac{H_b}{d_b}$
$\theta_b$	=	ángulo de incidencia en rotura
$c_b$	=	celeridad de la onda en rotura
$d$	=	profundidad

La segunda que se presenta es una solución analítica al problema incorporando, además de la fricción por fondo, las tensiones turbulentas mediante una viscosidad de remolino. Esta solución ya clásica se debe también a Longuett-Higgins . El resultado es una curva que extiende su dominio de definición más allá de la zona de rompientes (por el efecto de la difusión turbulenta) y que ya no tiene su máximo en el punto de rotura. Su expresión es:

$$V^* = B_1 X^{P_1} + A X_1 \quad \text{para } X < 1$$

$$V^* = B_2 X^{P_2} \quad \text{para } X \geq 1$$

donde:

$$X = \frac{x}{x_b}$$

$$V^* = \frac{v}{V_b}$$

siendo  $x_b$  la distancia desde la línea de costa al punto de rotura y  $V_b$  vale:

$$V_b = \frac{5p}{16} \frac{g}{C_f} \sqrt{g d_b} \tan b \sin q_b$$



$P_1$ ,  $P_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  y  $A$  son parámetros cuya expresión se puede encontrar en las referencias. En caso de no considerar la viscosidad de remolino, el programa también permite trabajar con una batimetría arbitraria leída de fichero. Para resolver este caso no se existen formulaciones compactas, por lo que se implementa un esquema numérico en diferencias finitas con sentido de avance hacia la costa. El valor del nivel medio en cada punto se le suma una sobreelevación por *set-up* obtenida mediante teoría lineal; para la evolución post-rotura se emplea el modelo de Andersen-Fredsøe (Fredsoe y Deigaard, 1992), que tiene la siguiente expresión:

$$\frac{H}{d} = 0.5 + 0.3 \cdot \exp\left(-0.11 \frac{\Delta x}{d_b}\right)$$

donde:

H	=	altura de ola
d	=	profundidad
$d_s$	=	profundidad de rotura
$\Delta x$	=	distancia hacia la costa desde el punto de rotura.

Se obtienen resultados numéricos de diversas magnitudes (punto de rotura, velocidad media y máxima, etc.) así como un gráfico que muestra la evolución a lo largo del perfil de la altura de ola, el *set-up* y la velocidad longitudinal.

### **DIN 3.6 - Corrientes transversales en playas**

Es muy común en playas de perfil disipativo y longitudinalmente uniforme la observación de corrientes de resaca en la zona de rompientes dirigidas hacia el exterior. En épocas de temporal esta corriente, que se manifiesta sobre todo en las proximidades del fondo, produce la formación de barras al transportar gran cantidad de sedimento previamente removido por el oleaje. La formación de los perfiles de playa está estrechamente ligada a este mecanismo.

La corriente de resaca, denominada en inglés “undertow”, se produce como consecuencia de que la variación del flujo de momento transversal -causa



directa del *set-up*- no es constante en toda la columna de agua, sino que se manifiesta de forma desigual en la dimensión vertical. Una vez que la ola comienza a romper, se pueden distinguir en ella dos zonas bien diferenciadas desde el punto de vista hidrodinámico: una zona superior denominada *bore* con predominio de la turbulencia y una zona inferior que conserva los rasgos de un movimiento oscilatorio. El *bore* es a efectos prácticos una caudal de agua intermitente que se mueve en dirección hacia la costa con celeridad aproximada  $\sqrt{gd}$  ; la zona por debajo del nivel del seno se puede modelar con las teorías de ondas clásicas. Aceptada esta estructura vertical del flujo, una consecuencia directa es la presencia de un caudal entrante por la zona superior que de forma global se compensa con el *set-up* y con las tensiones tangenciales pero que localmente crea una circulación en perfil y un flujo de retorno. El presente módulo implementa dos modelos destinados a cuantificar este fenómeno. El punto de partida de ambos modelos es la ecuación de conservación de cantidad de movimiento transversal promediada en un periodo:

$$\frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} = -g \frac{\partial b}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

donde:

$\overline{u^2}$	=	velocidad transversal al cuadrado promediada en el tiempo
$b$	=	superficie libre
$\tau$	=	tensión de Reynolds
$x$	=	coordenada en la dirección perpendicular a la costa.

Aplicando ciertas simplificaciones y describiendo las tensiones de Reynolds mediante un modelo de viscosidad de remolino se llega una expresión para la corriente de resaca en función de la profundidad:

$$U(z) = \mathbf{a}_1(x) \int \frac{z}{\mathbf{n}_1(z)} dz + \mathbf{b}_1(x) \int \frac{dz}{\mathbf{n}_1(z)} + \mathbf{g}(x)$$

donde:

$$\mathbf{a}_1(x) = \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u_w^2} + gb)$$



$\beta_{1, \gamma}$  = funciones de integración  
 $z$  = coordenada vertical

Para llegar a una expresión que sólo contenga variables conocidas, es necesario imponer dos condiciones de contorno y dar un valor a  $v_t(z)$ . La primera condición de contorno es común a los dos modelos propuestos y se trata de la conocida ecuación de continuidad integrada: el caudal introducido por el *bore* debe ser igual al correspondiente a la corriente de resaca. Es en la segunda condición en la que difieren, puesto que en ambos se asumen viscosidades de remolino constantes.

El programa permite calcular la distribución vertical de la corriente de resaca en un punto determinado del perfil de playa. En el modelo de Svendsen y Buhr-Hansen, se proporcionan asimismo resultados relativos a la capa límite (altura, rugosidad y tensión tangencial). Se describen a continuación de forma somera los planteamientos particulares de ambos modelos.

### **Modelo de Steve y Wind (1986)**

Su punto de partida es el descrito anteriormente. Como segunda condición de contorno, los autores proponen una condición de tensión tangencial en la interfase del *bore* con la región inferior. Se considera coeficiente de viscosidad de remolino constante. El resultado final tiene la siguiente expresión matemática:

$$u(z) = \frac{1}{2} \left[ (\mathbf{h} - 1)^2 - \frac{1}{3} \right] \frac{d_t^2}{\mathbf{r} \mathbf{n}_t} \frac{dR}{dx} + \left( \mathbf{h} - \frac{1}{2} \right) \frac{d_t \mathbf{x}_t}{\mathbf{r} \mathbf{n}_t} + \bar{u}_r$$

donde:

$$R = \mathbf{r} g \bar{z} + \mathbf{r} (\bar{u}^2 - \bar{w}^2)$$

$$\bar{\mathbf{t}}(z_t) = d_t \frac{dR}{dx} + \bar{\mathbf{t}}_b$$

$$\mathbf{h} = \frac{z + d}{d_t}$$



### ***Modelo de Svendsen y Buhr Hansen (1987)***

Como se ha podido observar, el aspecto clave de las formulaciones analíticas de corriente de resaca es la elección de la segunda condición de contorno. Todos los autores coinciden en utilizar la ecuación de continuidad para imponer el valor del caudal de resaca; sin embargo, la condición restante no es trivial e involucra los aspectos más sutiles del fenómeno. Svendsen y Buhr-Hansen, en su modelo de 1987, plantean un perfil de velocidades con dos tramos: uno para la capa límite y otro hasta el nivel del seno. En la interfase de ambos se impone la condición de igualdad de velocidades y de tensiones tangenciales.

Con el modelado de la capa límite, entran en juego las características del sedimento y una serie de formulaciones para determinar parámetros como el coeficiente de fricción y la rugosidad. De la misma manera, se ha de considerar una viscosidad de remolino distinta en cada uno de los tramos, que en el caso más simple se asumen constantes.

El resultado final es un modelo que permite más precisión al mismo que tiempo que exige más variables de entrada. El perfil dentro de la capa límite es lineal y no tiene otro interés práctico que el de proporcionar el valor de la velocidad y la tensión tangencial en el fondo. La expresión final del perfil superior tiene la siguiente forma:

$$\frac{U - U_b}{\sqrt{gd}} = \frac{1}{2} A y^2 + \frac{2}{2r+1} \left( \frac{U_m}{\sqrt{gd}} - \frac{1}{6} A - \frac{u_s - u_s' z_0}{\sqrt{gd}} \right) y$$

$$z_0 < z < d_r$$

donde las expresiones de  $A, r, u_s, u_s', a_1$ , junto con una descripción rigurosa del modelo, se pueden encontrar en el artículo original (Svendsen y Buhr-Hansen, 1987).



#### 5.1.4 Cálculo del nivel del mar

##### DIN 4.1 - Marea meteorológica

Se denomina marea meteorológica a la variación del nivel del mar debida tanto al efecto del viento como al de la presencia de una borrasca o anticiclón que modifique las condiciones de presión atmosférica. Su efecto debe en general ser tenido en cuenta en el diseño de estructuras costeras y en la determinación de la cota máxima de inundación, y puede poseer signo positivo o negativo. El orden de magnitud del fenómeno es el de la decena de centímetros, alcanzando en algunos lugares y ocasiones concretas valores de varios metros.

El presente módulo permite resolver tanto el problema de sobreelevación por viento como por presión. Para ello se utilizan las hipótesis de onda larga para el movimiento del fluido, lo cual implica velocidades y aceleraciones verticales despreciables; también se asume que la geometría es bidimensional. A continuación se describen las hipótesis y formulaciones de cada fenómeno:

##### Sobreelevación por viento

Se produce debido a la transmisión de energía cinética que realiza el viento sobre la lámina de agua a través de las tensiones tangenciales, que tienen como expresión:

$$z_w = r k w |w|$$

donde  $k$  es un factor de fricción que es función a su vez de la velocidad del viento y toma valores del orden de  $10^{-6}$ . Para calcularlo, el programa utiliza la formulación de Van Dorn (1953).

La ecuación diferencial que rige la distribución de sobreelevaciones a lo largo del perfil de estudio es:

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} = \frac{n t_{zx}(\bar{h})}{rg(d + \bar{h})}$$



donde:

$$\begin{aligned} \bar{h} &= \text{sobreelevación del nivel medio} \\ d &= \text{profundidad} \\ t_{zx} &= \text{tensión tangencial en el plano } xz \\ n &= 1 - \frac{t_{zx}(-d)}{t_{zx}(\bar{h})} \end{aligned}$$

Esta ecuación tiene solución analítica cuando la batimetría es de profundidad constante o responde a determinadas geometrías simples. El programa la resuelve para una batimetría arbitraria mediante un esquema explícito en diferencias finitas avanzando en dirección hacia la costa.

### Sobreelevación por presión

La presencia de una borrasca o anticiclón sobre una superficie de agua representa una perturbación de la presión atmosférica a la cual el fluido responde con un gradiente de superficie libre. Si se asume que dicha perturbación es estática, se puede demostrar que la variación de nivel responde a la siguiente expresión:

$$\eta = 9.85(p_e - p_0) \cdot \frac{\left(1 - \exp\left(1 - \frac{R_b}{r}\right)\right)}{1000}$$

donde:

$$\begin{aligned} p_e &= \text{presión atmosférica media (mb)} \\ p_0 &= \text{presión en el centro de la borrasca (mb)} \\ R_b &= \text{radio de la borrasca} \\ r &= \text{distancia del punto de estudio al centro de la borrasca} \end{aligned}$$

El efecto de una borrasca es un aumento local del nivel medio, mientras que un anticiclón trae como consecuencia el efecto contrario.

En el caso de fondos de poca pendiente, el aumento de nivel provoca la inundación de zonas secas. El programa da también una estimación del avance de la línea de costa asumiendo batimetría recta y paralela y despreciando interacciones con los contornos.

#### **DIN 4.2 - Marea astronómica**

La marea astronómica, vulgarmente conocida como marea, es uno de los fenómenos más importantes en muchos de los procesos estudiados en la ingeniería de costas: perfiles de playas, cotas de inundación, morfodinámica de estuarios, etc. En multitud de lugares del mundo, constituye el condicionante más importante a la hora de diseñar soluciones estructurales en puertos, diques, canales de navegación y otros. Por estos motivos es interesante disponer de una herramienta que permita evaluar las características de este movimiento de largo periodo en un punto concreto y predecir su comportamiento con antelación. Ése es el objetivo del presente módulo.

Hoy en día se conoce con bastante exactitud la naturaleza del fenómeno mareal y las causas que lo originan. La interacción gravitatoria entre la tierra y los cuerpos celestes más próximos, en especial la luna y el sol, configura un sistema dinámico por el que se ven afectadas las grandes masas de agua que rodean nuestro planeta. Todas las fuerzas que excitan el sistema tienen carácter periódico, y el problema se traduce en estudiar las oscilaciones forzadas del elemento líquido sujetas a unas condiciones de contorno impuestas por la superficie emergida y todo ello sobre una geometría esférica.

Existen dos teorías básicas que permiten aproximarse a un análisis cuantitativo del problema:

- Análisis armónico
- Modelado de las ecuaciones generales del flujo

El primero es el método implementado en el presente módulo y sus fundamentos se presentan en las próximas líneas. En lo que respecta al segundo procedimiento, consiste en resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas esféricas, aplicando las simplificaciones de onda larga y un esquema numérico adecuado.



El análisis armónico parte del conocimiento de un registro suficientemente largo de datos de nivel; dado que es un movimiento de largo periodo, se necesitan series de varios meses de duración para disponer de información de todas las componentes. También debe determinarse el número de componentes de marea que se desean analizar y el periodo propio de cada una.

El método consiste en ajustar la serie medida a una suma de  $n$  armónicos, siendo  $n$  el número de componentes, con frecuencias dadas y amplitudes y desfases desconocidos:

$$h = \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i t + \phi_i) + \text{residuo}$$

donde:

$\eta$	=	nivel del mar
$n$	=	número de componentes
$a_i$	=	amplitud de la componente $i$
$\omega_i$	=	frecuencia angular de la componente
$\phi_i$	=	desfase de la componente $i$

El residuo corresponde a aquellas variaciones del nivel no asociadas a la marea o debidas a componentes no consideradas en el análisis; habitualmente los picos del residuo están asociados a perturbaciones atmosféricas (marea meteorológica)

El ajuste se realiza mediante el método de mínimos cuadrados y se proporcionan en forma de tabla la amplitud y el desfase de cada una de las componentes. También se representan en una gráfica la serie medida, el ajuste y el residuo.



## 5.2 Sección de procesos sedimentarios

El bloque temático dedicado a los procesos sedimentarios incorpora una serie de herramientas que permiten analizar una muestra de sedimentos y predecir el comportamiento mecánico de éstos al verse sometidos a diferentes dinámicas. También se presentan modelos en macroescala para el análisis de playas (perfil y planta de equilibrio, estados morfodinámicos) así como algunas relaciones de equilibrio en estuarios. Se han considerado en concreto los siguientes capítulos:

- 1- Análisis granulométrico
- 2- Transporte de sedimentos
- 3- Perfil de playas
- 4- Forma en planta de playas
- 5- Estados morfodinámicos
- 6- Relaciones de equilibrio en estuarios

### 5.2.1 Análisis granulométrico

#### SED 1.1 - Análisis granulométrico

Recibe el nombre de análisis granulométrico de una muestra el conjunto de procedimientos físicos y numéricos destinados a extraer de ella toda la información posible relativa a sus características geométricas. En ciertos, casos, determinados parámetros requieren varias muestras para ser calculados.

El proceso habitual es el siguiente:

1. Recogida *in situ* de las muestras y colocación de las mismas en bolsas de plástico previamente etiquetadas.
2. Inspección directa de las muestras, con vistas a valorar diversos aspectos como proporción de finos, color, redondez de los granos, sabor u otros.
3. Determinación de las curvas granulométricas mediante una serie de tamices previamente elegida, acorde al diámetro medio del material de estudio.
4. Procesamiento numérico de las curvas granulométricas y obtención de diversos parámetros estadísticos y de diseño.



El módulo SED 1.1 del Tutor de Ingeniería de Costas está diseñado para realizar de manera simple todas las operaciones relativas al mencionado apartado 4. Se parte de dos granulometrías correspondientes a una muestra nativa y una de relleno y se procede a su análisis, que abarca los siguientes puntos:

- Cálculo de las funciones de densidad y distribución de las granulometrías, tanto en mm como en unidades  $\phi$ . Éstas últimas se definen como:

$$f = -\log_2 D$$

donde  $D$  = diámetro (mm)

- Determinación del  $D_{50}$ ,  $D_{84}$  y  $D_{16}$  y otros estadísticos de interés: desviación típica, sesgo y curtosis. Se clasifican las muestras según el criterio de Wentworth.
- Conocida la densidad del material, se calcula la distribución de velocidades de caída de grano, ( $V_f$ ) de acuerdo a la formulación de Hallermeier (1981):

$$V_f = \left[ \left( \frac{g_s}{g} - 1 \right) g \right]^{0.7} \frac{D_{50}^{1.1}}{6n^{0.4}} \quad (39 < B < 10^4)$$

$$V_f = \left( \frac{g_s}{g} - 1 \right) \frac{g D_{50}^2}{18n} \quad (B < 39)$$

$$V_f = \left[ \left( \frac{g_s}{g} - 1 \right) g \frac{D_{50}}{0.91} \right]^{0.5} \quad (10^4 < B)$$

$$B = \left( \frac{g_s}{g} - 1 \right) \frac{g D_{50}^3}{n^2}$$

donde:



$\gamma$	=	peso específico del agua
$\gamma_s$	=	peso específico de la arena
$\nu$	=	viscosidad cinemática del agua

Se determina la velocidad media de caída de grano de cada muestra, valor que no coincide con la velocidad de caída correspondiente al diámetro medio ( $D_{50}$ ).

- Determinación de la tasa de sobrerrelleno (*overflow ratio*) propuesto por James (1974) a partir de una muestra nativa y otra de relleno. Su valor indica el número de metros cúbicos de material de relleno que hay que depositar para producir un metro cúbico de playa estable. Su valor depende de diversos valores estadísticos y tiene la siguiente expresión:

$$\frac{l}{R_A} = 1 - F\left(\frac{q_2 - d}{s}\right) + F\left(\frac{q_1 - d}{s}\right) + \left[ \frac{F(q_2) - F(q_1)}{s} \right] \exp \left\{ \frac{l}{2} \left[ q_1^2 - \left( \frac{q_1 - d}{s} \right)^2 \right] \right\}$$

donde:

$R_A$	=	tasa de sobrerrelleno
$F$	=	integral de la distribución normal canónica
$\delta$	=	$\frac{M_{\phi b} - M_{\phi n}}{\sigma_{\phi n}}$
$M_{\phi b}, M_{\phi n}$	=	valor medio en unidades $\phi$ de la muestra de relleno y nativa respectivamente
$\sigma_{\phi b}, \sigma_{\phi n}$	=	desviación típica en unidades $\phi$ de la muestra de relleno y la nativa, respectivamente.

los valores de  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se pueden encontrar en la bibliografía.



- Determinación del factor de realimentación (*renourishment factor*) propuesto también por James (1974) y que indica el aumento de frecuencia de relleno necesario en una playa realimentada con respecto a su situación previa. El uso de este parámetro denota un conocimiento del balance sedimentario anterior a la actuación.

$$R_j = \exp \left[ \Delta \left( \frac{M_{fb} - M_{fn}}{d_{fn}} \right) - \frac{\Delta^2}{2} \left( \frac{s_{fb}^2}{s_{fn}^2} - 1 \right) \right]$$

donde  $\Delta$  es constante (valor recomendado: 1.0)

- Eliminación de finos: dada una granulometría de partida, se eliminará la fracción menor de ella a partir de un determinado diámetro. Se proporcionará la curva resultante y el peso de finos eliminado. Esto permite estimar la pérdida de material resultante de un determinado proceso de lavado.

El programa permite trabajar con una serie de tamices de tamaños cualesquiera, especificándose éstos en el fichero de entrada. El formato del fichero de granulometría se describe en el Anexo II. Se presentan resultados tanto numéricos como gráficos.

## **5.2.2 Transporte de sedimentos**

### **SED 2.1 - Transporte de sedimentos**

Dentro de la ingeniería de costas, la mecánica de transporte de sedimentos constituye una rama de particular importancia que atrae la atención de abundantes técnicos e investigadores. La razón se asienta en que el identificar los mecanismos que generan el movimiento de un lecho de material cohesivo o granular sometido a la acción de un flujo determinado permite un acercamiento racional a multitud de problemas prácticos: formación de perfiles de playa,

sedimentación en puertos y canales de navegación, estudios de dragados, procesos estuarinos, etc.

Las formulaciones existentes son de diversa índole y procedencia. Una parte de ellas se basa en una serie de aproximaciones empíricas procedentes de medidas de campo o de laboratorio. Otras son expresiones derivadas a partir de argumentos teóricos, casi siempre con aplicación de las leyes de la mecánica racional. Existen fórmulas o modelos específicos para flujo uniforme, que sería el caso típico de un río, y otros para flujo oscilatorio. El cálculo del transporte debido a la acción conjunta de ambos flujos no se reduce simplemente a la suma vectorial de sus efectos individuales, de tal manera que también se han elaborado modelos para calcular el transporte debido a un oleaje en presencia de una corriente. En general, una formulación concreta está diseñada y verificada para una situación concreta y no sirve para otra distinta; el ingeniero debe conocer perfectamente el rango de aplicabilidad de cualquier fórmula relativa al transporte de sedimentos antes de hacer uso de ella.

En el presente módulo se incorpora la formulación debida a Van Rijn (1993), válida para todo tipo de sedimentos no cohesivos, por diversas razones:

1. Cubre todos los posibles casos de flujo (sólo corriente, sólo ola, ola-corriente).
2. Hace revisión de otras formulaciones anteriores, contrastando los resultados y revisando las razones de divergencia. Algunas de ellas se incorporan directamente.
3. Parte de una amplia serie de datos de campo y laboratorio.

Además, Van Rijn propone fórmulas para evaluar las formas de lecho producidas bajo las distintas hipótesis de flujo, así como sus parámetros geométricos y la rugosidad inducida por su presencia. Se contempla también la posibilidad de que la ola y la corriente no tengan la misma dirección.

El método de cálculo se basa en considerar un transporte por fondo y otro por suspensión. El primero se produce por arrastre de los granos de material sobre el fondo y está vinculado en gran medida a la capa límite; el transporte por suspensión tiene lugar cuando granos que previamente han sido separados del suelo son transportados por acción de una corriente. Existe un posible mecanismo intermedio, a veces denominado de saltación, que en esta metodología se encuentra incluido en el de fondo.



El organigrama de la figura 5.2.1 presenta el esquema general del programa. Se consideran tres modalidades de flujo:

1. sólo corriente
2. ola y corriente débil
3. ola y corriente fuerte.

El caso de sólo ola se incluye dentro del de ola y corriente débil. A partir de los datos, se evalúa cual es la modalidad correspondiente. La rugosidad total que experimenta el flujo es la suma de la rugosidad debida al material y la debida a las formas de lecho. Éstas son función del régimen de transporte  $T$  y del tamaño de grano; el primero se define como:

$$T = \frac{\tau_0 - \tau_{0c}}{\tau_{0c}}$$

donde:

- $\tau_0$  = tensión tangencial en el fondo  
 $\tau_{0c}$  = tensión tangencial de inicio de movimiento

donde  $\tau_{0c}$  es la tensión tangencial crítica o de inicio de movimiento y  $\tau_0$  es la tensión que se produce bajo el flujo de diseño. Las posibles formas de lecho son, a medida que  $T$  aumenta:

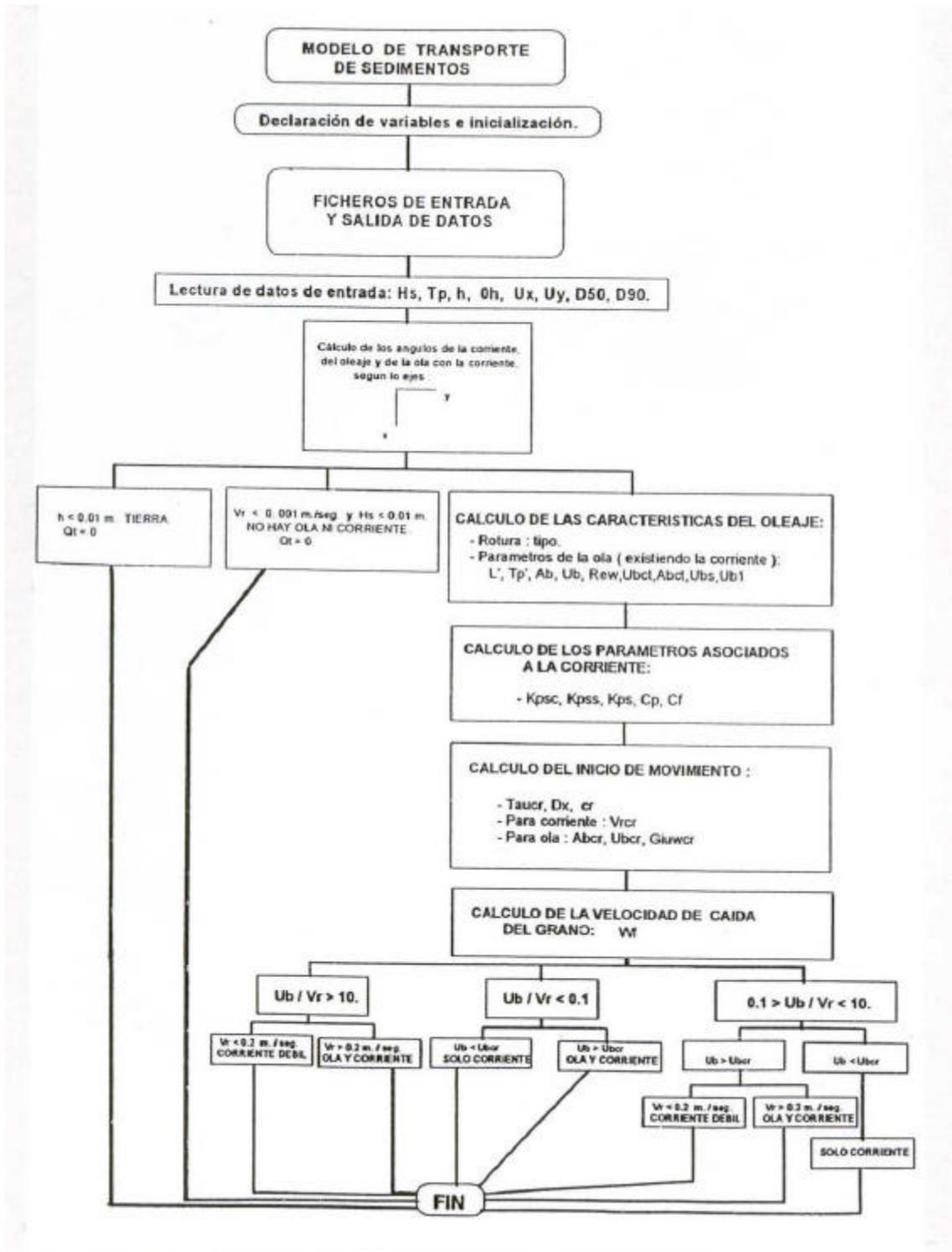


Figura 5.2.1. Esquema general de cálculo de transporte de sedimentos



- *mini-ripples*
- *mega-ripples* y dunas
- dunas
- ondas de arena
- antidunas

El programa evalúa el transporte por fondo, suspensión y total (suma vectorial de ambos) y las formas de lecho asociadas con sus dimensiones. También se presentan algunos resultados intermedios de interés, como el mencionado régimen de transporte.

### 5.2.3 Perfil de playas

#### SED 3.1 - Perfiles de playa

Cualquier metodología de diseño de playas tiene necesidad de recurrir a alguna formulación que permita determinar el perfil de equilibrio a partir de unas condiciones de oleaje y de un sedimento dado. Se denomina perfil de equilibrio al perfil medio alrededor del cual se producen de manera centrada las distintas variaciones estacionales o temporales. Se trata de curvas algebraicas suaves con uno o varios tramos y generalmente fáciles de manejar y calcular.

El concepto de perfil de equilibrio está estrechamente ligado al de profundidad de cierre. Se define esta última como aquella profundidad en la cual los movimientos transversales del sedimento debidos al oleaje son prácticamente nulos. Hallermeier (1978) propone la siguiente expresión:

$$h_* = 1.75 H_{s12} - 57.9 \left( \frac{H_{s12}^2}{g T_s^2} \right)$$

donde:

$h_*$	=	profundidad de cierre (m)
$H_{s12}$	=	altura de ola significativa superada en 12 horas al a   o
$T_s$	=	periodo significativa asociado



Existen dos razones por las cuales el conocimiento del perfil de equilibrio de una playa es importante:

- a) Permite estimar la distancia de la costa a la que se alcanza la profundidad de cierre y, por lo tanto, la estabilidad de la arena.
- b) Sirve para calcular el volumen de material necesario para una realimentación.

Por estos motivos se incorpora en el Tutor de Ingeniería de Costas una herramienta que permita a) estimar el perfil de equilibrio según distintas formulaciones para un oleaje y un tamaño de grano dado y b) ajustar puntos medidos de un perfil real a una solución teórica. Los perfiles teóricos que el programa permite representar son los siguientes:

- Perfil de Dean (1977). Representa un perfil con disipación de energía por unidad de volumen constante. Su expresión matemática es la siguiente:

$$y = A x^{\frac{2}{3}}$$

donde:

$$\begin{aligned} x &= \text{distancia a la costa} \\ y &= \text{profundidad} \\ A &= 0.51 V_f^{0.44} \end{aligned}$$

siendo  $V_f$  la velocidad de caída de grano.

- Perfil con difracción (González, 1995). En este caso, se produce una dispersión lateral de energía debido al efecto de la difracción. El perfil resultante se ajusta a la siguiente expresión:

$$y = A \left[ \frac{5 (R - x)^{\frac{8}{5}} - R^{\frac{8}{5}}}{8 (R - x)^{\frac{3}{5}}} \right]^{\frac{2}{3}}$$

siendo  $R$  la distancia del extremo del dique a la línea de costa.

- Perfil con laja (Muñoz, 1997). Corresponde a una playa con presencia de un



sustrato rocoso a cierta profundidad menor que la profundidad de corte. La energía se atenúa antes de llegar al perfil y éste se hace más vertical. La ecuación correspondiente es idéntica a la del perfil de Dean con distinto valor de A:

$$y = A^* \cdot x^{\frac{2}{3}}$$

donde:  $A^* = 1.48 A$

- Perfil de Vellinga (1978): Vellinga propuso este perfil de temporal basándose en un análisis dimensional y ajustando valores medidos en playas reales. Su expresión es:

$$\left(\frac{7.6}{H_{os}}\right)y = 0.47 \left[ \left(\frac{7.6}{H_{os}}\right)^{1.28} \left(\frac{\omega_f}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18 \right] - 2$$

donde:

$\omega_f$  = velocidad de caída de grano en m/seg.  
 $H_{os}$  = altura de ola significante en profundidades indefinidas (m)

El programa también permite ajustar un perfil medido a uno teórico de la forma  $y=A \cdot x^{(2/3)}$  (perfil de Dean) o  $y=A \cdot x^m$  utilizando la técnica de mínimos cuadrados. Los resultados son los parámetros A y m de mejor ajuste, el error cuadrático medio y las gráficas con el perfil ajustado y el medido.

### **SED 3.2 – Regeneración de playas**

El objetivo de este módulo es proporcionar una rápida herramienta de tanteo previo a la realización de un proyecto de regeneración de playas. El problema que se resuelve es el siguiente: dado un perfil de playa con una determinada arena nativa, calcular el volumen de arena de relleno necesario por metro lineal de playa para conseguir un determinado avance de la línea de costa. También se da la opción de resolver el problema recíproco: dado un volumen, calcular el avance de la costa. El diámetro nominal y la densidad de la arena nativa y de relleno son datos conocidos, así como el clima marítimo al que está

sometida la zona y algunos parámetros de definición geométrica. Se consideran cuatro posibles configuraciones, que equivalen a sendas opciones de ejecución:

1. Perfil completo: representa una playa natural sin sustrato rocoso y sin limitación por el lado de tierra.
2. Perfil con laja: no existe límite por el lado de tierra pero se considera una laja rocosa horizontal y suficientemente extensa situada a cierta profundidad por encima de la profundidad de corte.
3. Perfil con muro: simula la presencia de un acantilado o paseo marítimo que intersecta por el lado de tierra al perfil nativo a una cierta profundidad. Es el caso de regeneración de una playa sumergida.
4. Perfil con laja y muro: es la unión de los casos 2 y 3.

Para resolver este problema es necesario aceptar una serie de hipótesis de partida que se enumeran a continuación:

- El perfil de equilibrio de una playa es un perfil de Dean (ver el módulo SED 3.1), aun en el caso de que exista una laja rocosa o un muro.
- Existe una profundidad, denominada profundidad de corte, a la cual el perfil de equilibrio deja de ser aplicable. A partir de dicha profundidad la arena genera un derrame de pendiente constante.
- Cada perfil es independiente de los adyacentes y no se produce transferencia longitudinal de material (playa bidimensional).
- No se tienen en cuenta pérdidas de material por lavado, segregación, dispersión, etc. Al volumen de relleno obtenido se le deberán aplicar las correcciones pertinentes (pérdida de finos, factor de realimentación, factor de relleno u otras), tal y como se describe en la referencia del módulo SED 1.1

Cuando se realiza un vertido, la arena aportada no se dispone de forma inmediata de acuerdo a su perfil de equilibrio, sino que inicialmente adopta una determinada forma, ajena a la acción del oleaje y que depende del procedimiento constructivo empleado en la regeneración. En el caso de que se disponga de una tubería o de camiones que vierten en la playa seca, la geometría resultante se asemeja a la de un acopio con su talud de derrame y un determinado avance de la línea de costa, distinto del que se producirá con el perfil definitivo. El presente módulo proporciona una cruda estimación de esta situación transitoria asumiendo que la arena se coloca de acuerdo a una superficie horizontal que a una cierta distancia de la costa cae con talud constante hasta intersectar el perfil nativo. Este perfil provisional es denominado perfil de vertido.

Los resultados de la ejecución son, como en otros casos, tanto numéricos (distancias, volúmenes, coeficientes de Dean) como gráficos. Resulta de especial interés el gráfico donde se representan superpuestos el perfil natural, el de relleno y el de vertido.

#### **5.2.4 Forma en planta de playas**

##### **SED 4.1 - Transporte longitudinal en playas**

Las playas se pueden clasificar, desde el punto de vista de su evolución en planta, como playas en equilibrio y playas en proceso de adaptación a sus condicionantes externos. Las playas en estado natural pertenecen por regla general al primer tipo, mientras que las artificiales o aquellas donde se ha producido una actuación (diques, puertos, paseos marítimos, etc.) pueden pertenecer al segundo debido a un proceso de reacomodación de carácter temporal. Dentro de las playas en equilibrio, se puede asimismo hacer una segunda clasificación que las divide en playas en equilibrio y playas en equilibrio dinámico. Las primeras corresponden a unidades fisiográficas relativamente cerradas, en las cuales el material presente es siempre el mismo, aunque pueda ser removido dentro del sistema; por el contrario, las segundas reciben del exterior un cierto caudal sólido y dejan salir otro de magnitud similar, con lo que su forma en planta apenas varía.

El fenómeno responsable de que se produzcan los procesos mencionados es en gran medida el transporte longitudinal de sedimentos. En el momento de planear una intervención en una determinada zona, es de capital importancia conocer su signo y orden de magnitud; para ello, diversos investigadores han propuesto fórmulas basadas tanto en ensayos de campo o laboratorio como en consideraciones teóricas. En el presente módulo se han agrupado algunas de las fórmulas más populares entre los técnicos con el fin de facilitar su uso y permitir la comparación de resultados. A continuación se enumeran las fórmulas consideradas junto con las hipótesis básicas que las gobiernan:

- Fórmula del CERC (Komar, 1970). Es la formulación incluida en el SPM (1984) y su uso está muy extendido. Hace depender el caudal sólido del flujo de energía longitudinal debido al oleaje. Es únicamente válida para transporte



debido a incidencia oblicua del oleaje en playas suficientemente largas (no es válida para playas encajadas) y en ella sólo interviene el oleaje incidente. Su expresión matemática es la siguiente:

$$Q = \frac{l}{(r_s - r) g (l - l)} K_l E_b c_{gb} \sin(\alpha_b) \cos(\alpha_b)$$

donde:

$Q$	=	caudal sólido (m <sup>3</sup> /seg.)
$K_l$	=	constante
$c_{gb}$	=	celeridad de grupo en rotura
$E_b$	=	energía de onda en rotura
$\alpha_b$	=	ángulo de incidencia en rotura
$\rho_s$	=	densidad del sedimento
$\lambda$	=	porosidad

- Fórmula de Kraus et al. (1982). En este caso el caudal sólido depende únicamente de la altura de ola en rotura y de la corriente longitudinal. La ventaja con respecto a la anterior es que el mecanismo generador de dicha corriente es arbitrario y no necesariamente la incidencia oblicua del oleaje.

$$Q = 0.024 \cdot H_{sb}^2 \cdot v$$

donde  $v$  es la velocidad longitudinal media.



- Fórmula de Kamphuis et al. (1991). Tras un análisis de abundantes datos de campo y laboratorio, Kamphuis propone la siguiente fórmula que hace intervenir no sólo la altura de ola incidente sino también la pendiente de la playa y el tamaño medio del sedimento:

$$Q = \frac{2.27}{(r_s - r)(1 - I)} \cdot H_{sb}^2 \cdot T_s^{1.5} (\tan \mathbf{b})^{0.75} \cdot D_{50}^{-0.25} \cdot \sin(2 \mathbf{a}_b)^{0.6}$$

donde:

$$\begin{aligned} T_s &= \text{periodo significativo asociado a } H_b \\ D_{50} &= \text{diámetro nominal del sedimento} \end{aligned}$$

- Formulación de Bijker (1971). El autor considera los dos tipos clásicos de transporte: por fondo y por suspensión. El transporte por fondo se calcula mediante una formulación de capa límite adaptada a la zona de rompientes mientras que para el de suspensión se aplica un perfil de concentración de Einstein basado en una distribución de viscosidad de remolino parabólica. Las fórmulas correspondientes se pueden encontrar en las referencias. Para calcular el transporte total en un perfil de playa arbitrario es preciso subdividirlo en varios tramos y evaluar en cada uno de ellos el transporte por fondo y por suspensión. Esta complicación operativa tiene la ventaja de que permite calcular la distribución de caudal sólido a lo largo de un perfil arbitrario, siempre y cuando se conozca la distribución de corriente longitudinal en el mismo. Este último problema se resuelve mediante un esquema explícito en diferencias finitas y aplicando el concepto del tensor de radiación, al igual que se reseñó en el módulo dedicado a las corrientes longitudinales (DIN 3.5). Los resultados de ejecutar con esta formulación son los caudales sólidos por fondo y por suspensión, junto con una gráfica de distribución de corriente longitudinal y transporte a lo largo del perfil.

#### **SED 4.2 - Planta de equilibrio**

Se denomina planta de equilibrio la forma que alcanza una playa una vez que se ha acomodado a unas condiciones de oleaje y de contorno dadas, permaneciendo sensiblemente estable hasta que éstas se modifican. Las playas



abiertas no merecen mayor comentario en cuanto a la forma de la línea de costa que conforman, pues es prácticamente recta, salvo posible existencia de fenómenos locales o formas rítmicas sobre las que más tarde se hará un breve comentario. Sin embargo, aquellas playas configuradas al abrigo de uno o varios salientes presentan geometrías curvas que pueden responder a una determinada expresión analítica.

En la ingeniería de playas, el conocimiento de la forma en planta de equilibrio es el punto clave de cualquier diseño. Por esa razón, se han creado herramientas más o menos sofisticadas para evaluarla. Una de las más populares es el modelo de una línea denominado GENESIS, difundido por el CERC. En este módulo, se presentan una serie de formulaciones paramétricas de uso mucho más simple y directo que permiten en fase de prediseño predecir el comportamiento de la línea de costa sin disponer de demasiados datos de partida.

Antes de pasar a describir las formulaciones empleadas, conviene comentar un aspecto de cierta importancia, sobre todo en algunos casos concretos. Es muy común en determinadas playas distribuidas a lo largo de la costa de todo el mundo encontrar variaciones periódicas de la forma en planta (periodicidad que puede oscilar entre las decenas y las centenas de metros) denominadas cúspides de playa o *beach-cusps*. Estas formaciones se cree que están asociadas a movimientos de largo periodo en la zona de rompientes: ondas subarmónicas, ondas de borde, ondas de cizalla, etc. Las formulaciones de forma en planta de equilibrio son curvas suaves que pretenden representar la interacción oleaje-sedimento en una primera aproximación, prescindiendo por tanto de las posibles formas periódicas existentes. Sin embargo, aún en los casos en que existan estos fenómenos, las expresiones que se presentan predicen correctamente la tendencia media de la línea de costa.

### ***Método de la parábola de Hsu (1993)***

Se trata de una formulación más reciente y se ha demostrado que su capacidad de ajuste es mayor que la de la espiral. En esta caso la fórmula utilizada para representar la línea de costa es una expresión parabólica en coordenadas polares con tres constantes que son función del ángulo  $\beta$  (figura 5.2.2) y con el origen de coordenadas en el punto de difracción del oleaje:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{b}{q} \right) + C_2 \left( \frac{b}{q} \right)^2$$



donde:

$C_0$ ,  $C_1$  y  $C_2$  son valores que dependen de  $\beta$ .

Una ventaja de la parábola de Hsu es que se puede utilizar no sólo para comprobar el equilibrio de una playa ya existente, sino como herramienta de diseño, tal y como describe González (1995) en su Tesis Doctoral; esta metodología también se ha introducido en el Tic. González propone un valor de beta en función de las características del flujo medio de oleaje incidente y de la geometría particular de la zona:

$$b = \frac{p}{2} - a_{\min}$$

$$a_{\min} = \arctan \left[ \frac{\left( 0.1 + 0.63 \frac{y}{L} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{y}{L}} \right]$$

donde:

- $y$  = distancia a la costa del punto de difracción  
 $L$  = longitud de onda media en la zona comprendida entre la línea de costa y el punto de difracción.

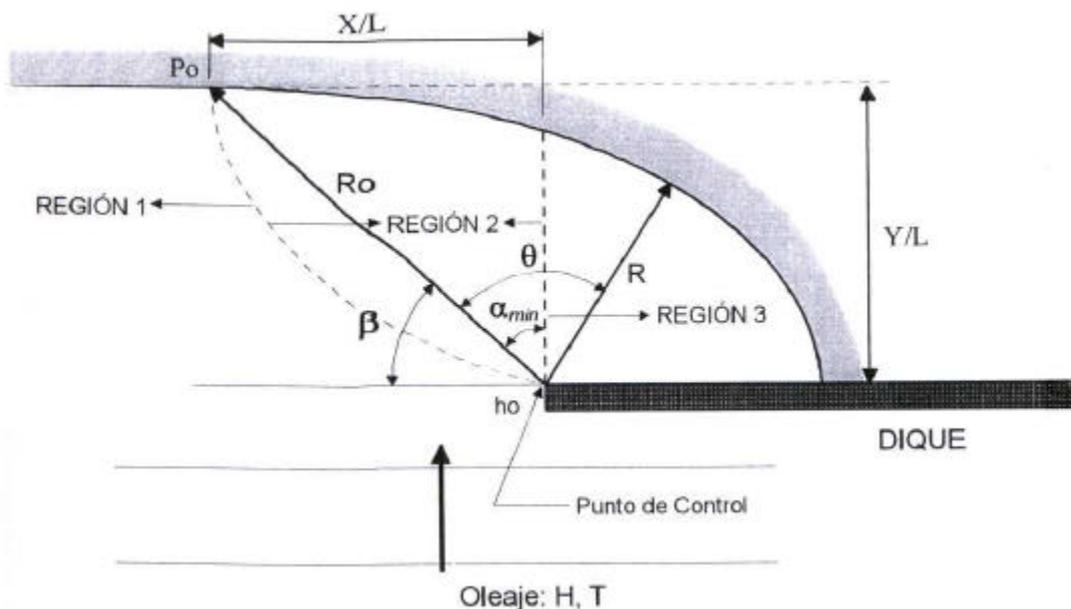


Figura 5.2.2. Forma en planta de equilibrio. Parábola de Hsu

A partir de los datos pertinentes, el programa calcula los parámetros propios de cada formulación y dibuja las curvas correspondientes, procediendo en el caso de la parábola mediante tanteos, tal y como el método exige.

Un accidente geográfico vinculado a los procesos costeros y que encaja perfectamente en el contenido de este módulo es el de los tómbolos. El programa permite la opción de estimar los parámetros geométricos fundamentales de estas formaciones a partir del oleaje incidente y de la longitud y distancia a la costa del elemento que lo provoca (figura 5.2.3). La teoría de los tómbolos se puede deducir, al menos en una primera aproximación, de la de la forma en planta de equilibrio; en este caso se utilizan parábolas de Hsu para su definición.

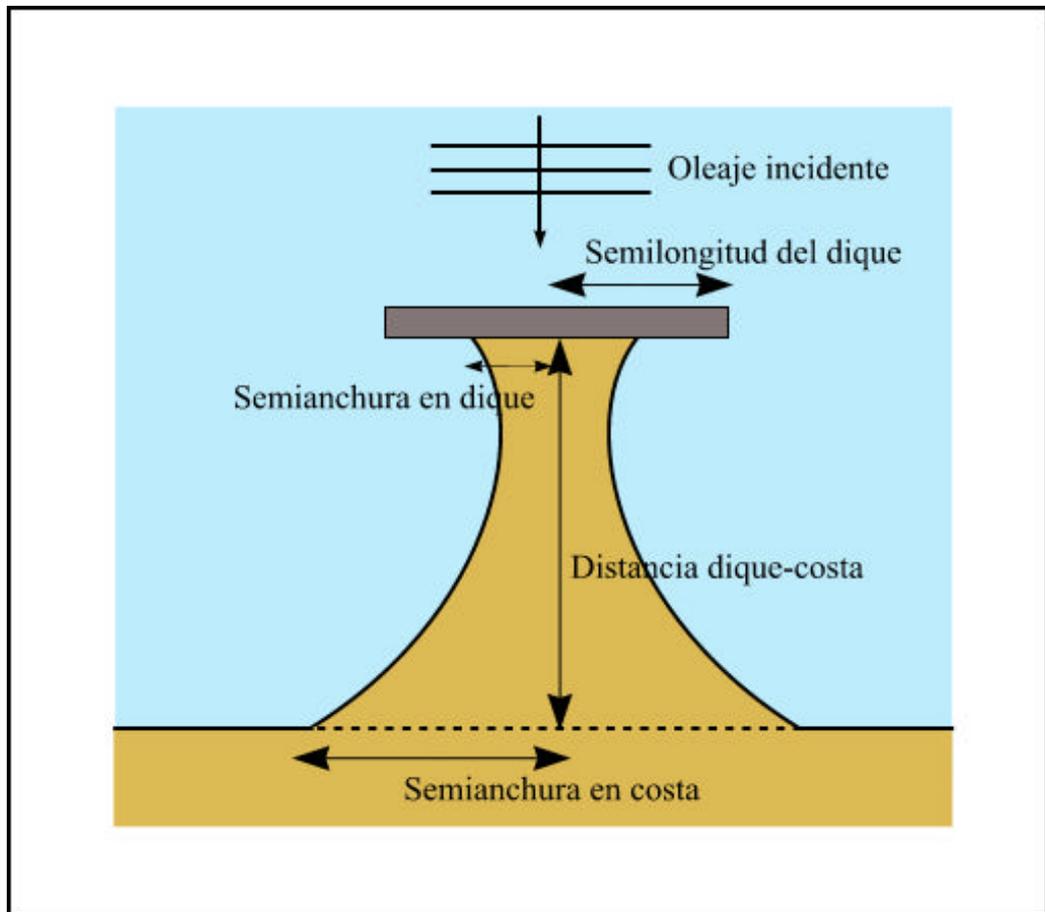


Figura 5.2.3. Definición geométrica de los tómbolos.

### 5.2.5 Estados morfodinámicos

#### SED 5.1 - Estados morfodinámicos en playas

Uno de los primeros objetivos que se plantea cualquier disciplina naciente es el de clasificar los elementos de los que se ocupa, encontrando los discriminantes óptimos que permiten agruparlos en distintas clases, géneros o especies. Algo similar ha sucedido en la ingeniería de costas desde la década de



los setenta, cuando diversos investigadores deciden clasificar las playas de acuerdo a determinados parámetros intentando abarcar la totalidad de los casos posibles.

Wright y Short, como resultado de la puesta en común de resultados e investigaciones llevadas a cabo desde finales de la década de los setenta, publicaron un artículo (Wright, 1984) que lleva por título “*Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches: a Síntesis*”. En él se plantea un esquema de clasificación de playas, según el cual éstas pueden ser disipativas, intermedias y reflejantes, dependiendo de su perfil característico. Las intermedias se dividen a su vez en cuatro tipos que más tarde se describirán. Cada una de estas categorías recibe la denominación de estado de playa. Esta ordenación, que es válido para playas sin marea, se realiza en función de una magnitud denominada parámetro adimensional de caída de grano y que se define matemáticamente como:

$$\Omega = \frac{H}{V_f T}$$

donde  $H$  y  $T$  son la altura significativa y el periodo de pico medio en el tiempo de estudio mientras que  $V_f$  es la velocidad de caída de grano y sólo depende del tamaño del sedimento (ver su expresión analítica en la referencia del módulo SED 1.1).

A continuación se describen las características principales de cada estado de playa definido por Wright y Short:

### ***Playa disipativa ( $\mathbf{W} > 5.1$ )***

Se producen con oleajes grandes y tamaños de grano pequeños. De carácter bidimensional, tiene un perfil muy tendido con posibilidad de una o varias barras y roturas en descrestamiento. La presencia de energía infragravitatoria es muy importante en la zona de rompientes y no existen corrientes de retorno ni oscilaciones subarmónicas. Apenas se detectan corrientes longitudinales y el *undertow* o corriente de resaca es muy marcada.

***Playa con barra longitudinal y seno (  $5.1 > \mathbf{W} > 4.1$  )***

La barra del estado anterior se hace más marcada y asimétrica; el oleaje rompe sobre ella y se recompone a continuación para volver a romper en oscilación o colapso sobre el frente de playa. En ocasiones se producen *beach cusps*.

***Playa y barra rítmicas (  $4.1 > \mathbf{W} > 3.3$  )***

Llega un momento que el estado modal anterior evoluciona hacia una barra rítmica con longitud de onda entre 100 y 300 metros y naturaleza oscilante. Se producen corrientes de retorno que afectan al oleaje incidente. La playa se convierte en un sistema totalmente tridimensional.

***Playa con barra transversal y rip (  $3.3 > \mathbf{W} > 2.8$  )***

Se acentúa el estado anterior hasta el punto de que las barras se unen con la línea de costa en su zona más ancha. Se produce una alta disipación sobre las barras y las corrientes de retorno adquieren máxima intensidad.

***Playa con barra-canaleta o terraza de bajamar (  $2.8 > \mathbf{W} > 2.0$  )***

Las barras transversales del estado anterior llegan a unirse hasta formar una terraza cuasi-horizontal que puede emerger ligeramente en bajamar. En algunos puntos, la unión no es completa y la barra queda separada del frente de playa por una pequeña canaleta. Las características dinámicas son similares a las de la playa reflejante.



### ***Playa reflejante ( $W < 2.0$ )***

Frente de playa de pendiente elevada con roturas en colapso u oscilación. Frecuente aparición de *beach cusps* y escasa presencia de energía infragravitatoria. Domina la energía subarmónica. Se produce este tipo de playas con arenas gruesas y oleaje poco energético.

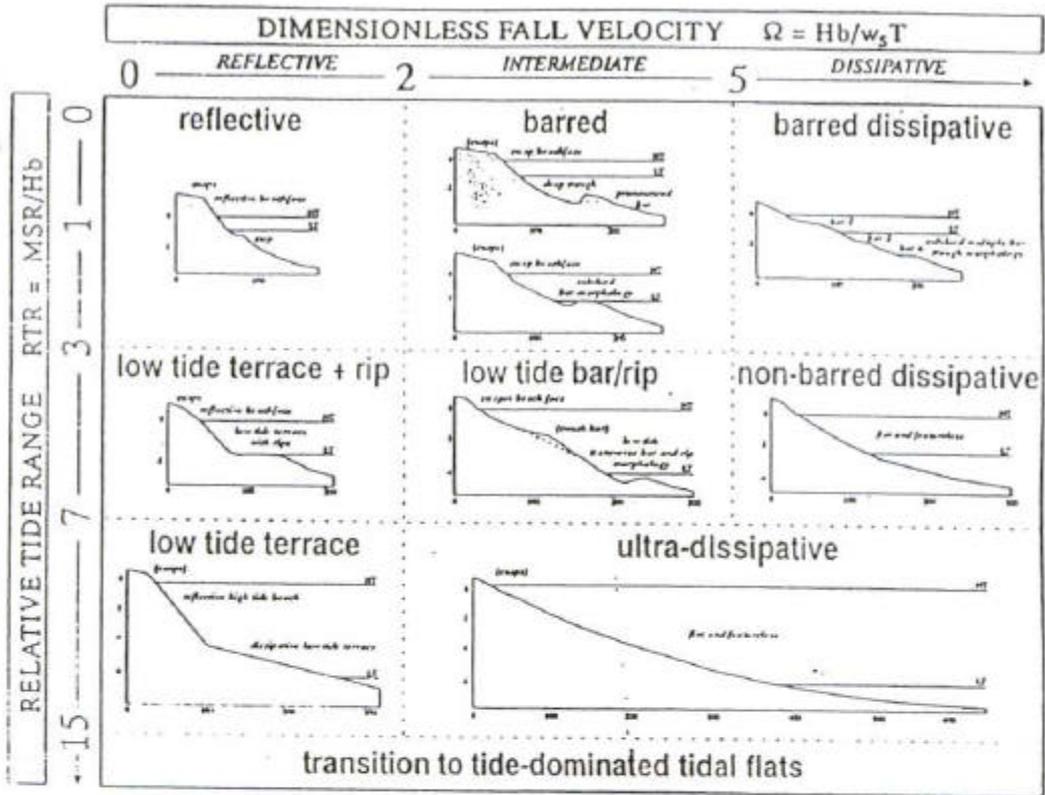
Posteriormente, en concreto en el año 1993, Masselink y Short publicaron un artículo (Masselink, 1993) en el cual la clasificación se extendía a playas con marea. Para ello se incorporó otro parámetro denominado carrera de marea relativa:

$$RTR = \frac{M}{H_b}$$

donde  $M$  representa la carrera de marea media y  $H_b$  la altura de ola media en rotura. Los tipos de playas resultantes aparecen reflejados en la figura 5.2.4 tomada del artículo original y se enumeran a continuación:

Playas reflejantes:

- reflejantes
- con terraza de bajamar y *rip*
- con terraza de bajamar.



RTR : Carrera de marea relativa

$\Omega$  : Velocidad adimensional de caída de grano

$H_b$  : Altura de ola en rotura

$w_s$  : Velocidad de caída del grano

T : Periodo del oleaje

MSR : Carrera de marea

$H_o$  : Altura de ola

Figura 5.2.4.Estados modales en playas con marea



Playas intermedias:

- con barras
- con barra de bajamar y *rip*
- ultra-disipativas

Playas disipativas:

- disipativa con barras
- disipativa sin barras
- ultra-disipativa

El módulo determina el estado de playa con o sin marea correspondiente a un determinado oleaje y muestra su perfil tipo junto con sus características relevantes.

### **5.2.6 Relaciones de equilibrio en estuarios**

#### **SED 6.1 - Relaciones de equilibrio en estuarios**

Las bahías o estuarios son accidentes geográficos de dimensiones del orden de magnitud de kilómetros y cuya dinámica está íntimamente asociada a la marea. En el entorno de estos ecosistemas, que se caracterizan por la diversidad y riqueza biobotánica, tiene lugar multitud de procesos físico-químicos. En este módulo se abordan diversos aspectos con carácter de macroescala relativos a estuarios genéricos; se trata de una serie de fórmulas de naturaleza empírica que ponen de manifiesto la relación entre variables hidrodinámicas y de transporte de sedimentos.

Un estuario típico para el cual serían aplicable las formulaciones que se presentan consta de una zona exterior, una desembocadura y una zona interior protegida del oleaje. Todas ellas se relacionan entre sí pero poseen características distintivas: la zona exterior se caracteriza por estar expuesta al oleaje; la desembocadura es un canal relativamente estrecho con una sección que resulta de la interacción de la corriente y del oleaje; la zona interior está protegida de las olas, presenta una serie de canales ramificados y existen zonas de marisma.



Los agentes que intervienen en el equilibrio morfodinámico de un estuario son básicamente el oleaje y la marea. El primero sólo se manifiesta en la zona exterior mientras que la marea genera corrientes intensas en la desembocadura y un efecto chorro a la entrada y a la salida de la misma. El volumen de agua que entra y sale del estuario a lo largo de un ciclo de marea se denomina prisma de marea y constituye uno de los parámetros claves para caracterizarlo. Si a esta hidrodinámica se le añade un volumen de material sedimentario susceptible de ser transportado la escena alcanza un alto grado de complejidad.

Se presentan tres tipos de fórmulas: el primero incluye expresiones que relacionan el prisma de marea con el área de la desembocadura; el segundo presenta una relación entre el prisma de marea y el volumen de sedimentos activo en la desembocadura; finalmente, el tercer tipo vincula el área de un estuario con el área de marisma que le corresponde en una situación estable.

Antes de describir cada formulación en particular, cabe hacer un comentario relativo a todo el conjunto. A estas relaciones se las denomina con frecuencia relaciones de equilibrio, haciendo referencia a un hecho de capital importancia: la relación que cada una de ellas expresa es aproximadamente válida en un estuario que no haya sufrido alteraciones por agentes externos (rellenos, dragados, obras de acceso, etc.) durante un tiempo suficientemente largo. Cada vez que se lleva a cabo alguna actuación de la índole de las mencionadas, el sistema responde a ella con una rapidez que puede oscilar entre unos cuantos días y las centenas de años. Durante ese tiempo de respuesta las fórmulas que se presentan no son de aplicación, y será preciso emplear un modelo más sofisticado que tenga en cuenta la variable tiempo.

### ***Relaciones entre el prisma de marea y el área de la canal de entrada***

Diversos autores proponen relaciones matemáticas entre el prisma de marea (P) y el área media de la canal de entrada (A):

*Fórmulas de O'Brian (1969):* en esta serie de fórmulas  $P$  representa el prisma correspondiente a una marea viva medido en  $\text{Km}^3$  y  $A$  es el área a media marea expresada en  $\text{Km}^2$

$$\text{Desembocadura sin diques: } A = 6.65 \cdot 10^{-2} P \text{ (Km}^2\text{)}$$

$$\text{Desembocadura con diques: } A (\text{Km}^2) = 4.063 \cdot 10^{-2} P \text{ (Km}^3\text{)}$$



*Fórmulas de Johnson (1973):*  $P$  en este caso es el prisma medio del estuario y  $A$  la sección media de la canal de entrada. Las unidades son las mismas que en las expresiones previas:

$$\text{Desembocadura sin diques: } A = 5.96 \cdot 10^{-2} P$$

$$\text{Desembocadura con diques: } A = 5.78 \cdot 10^{-2} P^{0.9}$$

### ***Relaciones entre el prisma de marea y el volumen de arena en la desembocadura***

*Fórmula de Walton y Adams (1980):* permite calcular el volumen de arena activo  $M$  a partir del prisma de marea  $P$  en dos escenarios:

$$\text{Estuario moderadamente expuesto: } M = 64.4 \cdot 10^{-4} \cdot p^{1.23}$$

$$\text{Estuario altamente expuesto: } M = 53.3 \cdot 10^{-4} \cdot p^{1.23}$$

*Fórmula de Marino y Mehta (1982):* en este caso, se requiere conocer el cociente entre la anchura y la profundidad en la canal de entrada ( $w$ ) para calcular el volumen de arena existente:

$$M = p(-0.0033 \cdot W + 1)$$

### ***Relaciones entre el área total del estuario y el área de marismas***

*Renger y Partenscky (1974)* proponen la siguiente relación entre el área interior total del estuario ( $A_b$ ) y el área de marismas ( $A_f$ ) que le corresponden en situación de equilibrio, expresadas ambas magnitudes en  $\text{Km}^2$ :

$$A_f = A_b (1 - 0.025 \sqrt{A_b})$$

El programa permite la aplicación inmediata de todas las fórmulas mencionadas.



### 5.3 Sección de obras marítimas

El bloque temático dedicado a las obras marítimas pretende ser una herramienta útil para el prediseño de estructuras de protección del litoral. Se consideran una serie de tipologías clásicas y en cada una de ellas se presentan herramientas que permiten predecir el comportamiento del flujo (ascenso y descenso, reflexión, trasmisión, etc) y su estabilidad estructural. El esquema de capítulos es el siguiente:

- 1- Flujo en diques de escollera
- 2- Estabilidad en diques de escollera
- 3- Diques verticales
- 4- Pilotes

#### 5.3.1 Diques de escollera

##### OBR 1.1 - Run-up en diques de escollera

El *run-up* o ascenso del oleaje sobre un dique de escollera es el parámetro fundamental para determinar la cota de diseño de la obra. Del valor de dicha cota depende en muchos casos la solución estructural y por supuesto el coste total de la actuación. Se podría decir que el estudio de *run-up* es, junto con el cálculo del peso de la escollera necesaria, el factor crítico de un dique en talud.

Desde los años cincuenta se vienen utilizando fórmulas para evaluar el *run-up* en aquellos países con tradición en este tipo estructural de diques (España, Holanda, Italia). Hoy en día se dispone de estas mismas fórmulas u otras más modernas junto con sofisticados modelos que resuelven mediante un método aproximado el flujo sobre un medio poroso. El módulo que se incluye en el Tic permite el uso fácil y cómodo de tres de las formulaciones existentes, todas ellas respaldadas por amplias series de ensayos de laboratorio y verificadas en multitud de estructuras reales. Para su empleo tan sólo es necesario conocer un número mínimo de parámetros referentes al oleaje incidente y a las características geométricas del dique. Todas ellas buscan una relación entre el ascenso del oleaje adimensionalizado con la altura de ola incidente y el número de Iribarren y son válidas para taludes lisos (hormigón, baldosa, hierba) o



rugosos (escollera, todo uno, piezas de diseño). A continuación se enumeran las formulaciones seleccionadas y sus características básicas:

***Ahrens y McCartney (1975)- Ahrens y Titus (1985)***

La fórmula propuesta por Ahrens y McCartney es válida para diques en talud porosos con manto principal de escollera sin clasificar y hace depender el *run-up* del número de Iribarren y de dos constantes empíricas *a* y *b*.

$$R_u = H_i \frac{a I_r}{1 + b \cdot I_r}$$

donde:

$H_i$	=	altura de ola incidente a pie de la estructura
$I_r$	=	número de Iribarren $I_r = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H_i}{L_0}}}$
$\theta$	=	ángulo del talud
$a$	=	1.13
$b$	=	0.506

La formulación siguiente, Ahrens y Titus (1985), es aplicable en taludes sensiblemente lisos y tiene una estructura algo más complicada. Básicamente, el *run-up* es proporcional a la altura de ola incidente y la constante de proporcionalidad varía según el tipo de rotura de que se trate: en roturas tipo voluta toma valores proporcionales al número de Iribarren; en las de tipo oscilación, es una función de diversos parámetros de la onda. Las expresiones matemáticas son:

$$R_u = C \cdot H_i$$

donde *C* se calcula mediante una serie de expresiones que dependen del número de Iribarren (Ahrens, 1985).

$$I_r \leq 2 ; C_p = 1.002 I_r$$



$$2 < I_r < 3.5 ; C = \left( \frac{3.5 - I_r}{1.5} \right) C_p + \left( \frac{I_r - 2}{1.5} \right) C_{pb}$$

$$I_r \geq 3.5 ; C_{nb} = 1.087 \sqrt{\frac{P}{2 \tan \alpha}} + 0.775 D$$

$$D = \frac{\frac{H_i}{L}}{\tanh^3 \left( \frac{2ph}{L} \right)}$$

Ahrens y  
Burke (ACES)

L = longitud de onda incidente a pie de dique  
h = profundidad a pie de dique.

### ***Losada y Giménez-Curto (1979)***

La fórmula que presentan estos autores tiene una filosofía similar a la de Ahrens y McCartney, con la diferencia de que en este caso la familia de funciones es exponencial, en lugar de un cociente de polinomios. El *run-up* depende nuevamente del número de Iribarren y de dos constantes empíricas, calculadas para distintos tipos de piezas:

$$\frac{R_u}{H} = A_u [1 - \exp(-B_u \cdot I_r)]$$

donde:

$R_u$  = *run-up*  
 $A_u, B_u$  = constantes empíricas que dependen del talud y el tipo de pieza (ver siguiente tabla).



Tipo de pieza	$A_u$	$B_u$	$A_d$	$B_d$
Escollera sin clasificar	1.80	-0.46	-1.10	+0.30
Escollera clasificada	1.37	-0.60	-0.85	-0.43
Tetrápodos	0.93	-0.75	-0.80	-0.45
Dolos	0.70	-0.82	-0.75	-0.49
Cuadrípodos	0.93	-0.75	-0.80	-0.45
Cubos	1.05	-0.67	-0.72	-0.42

### *Van der Meer y Janssen (1995)*

Esta formulación tiene algunas particularidades con respecto a las anteriores: permite incidencia oblicua del oleaje y está basada en ensayos con oleaje irregular sobre revestimientos. Su estructura es la siguiente:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1.6 g_h g_f g_b I_{rop}$$

donde:

$R_u$  = *run-up* superado el 2% del tiempo en un estado de mar

$H_s$  = altura de ola significativa

$I_{rop}$  = número de Iribarren del período de pico  $I_{rop} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{op}}}}$

$\tan \alpha$  = pendiente del talud

$L_{op}$  = longitud de onda profundidades indefinidas del período de pico

Las constantes  $\gamma$  son factores reductores:

$\gamma_h$  = reducción por limitación de profundidad al pie del dique

$$g_h = 1 - 0.03 \left( 4 - \frac{h}{H_s} \right)^2 \quad \text{para } \frac{h}{H_s} < 4$$

$$g_h = 1 \quad \text{para } \frac{h}{1+s} \geq 4$$

con  $H_s$  = altura significativa antes de rotura

$h$  = Profundidad a pie de dique.



$\gamma_f$  = reducción por rugosidad del talud (adoptar valor unidad para taludes lisos). Según tipo superficie manto exterior:

Factor de reducción,  $\gamma_f$  para un talud rugoso

Tipo de talud	Factor de reducción $g$	Factores de reducción antiguos		
Liso (hormigón, asfalto)	1.0	1.0		
Revestimiento liso y cerrado de bloques	1.0	0.9		
Hierba (3 cm)	0.9 – 1.0	0.85 – 0.90		
1 capa de escollera ( $H_s/D = 1.5 - 3$ )	0.55 – 0.60	0.80		
2 ó más capas de escollera ( $H_s/D = 1.5 - 6$ )	0.50 – 0.55	0.50 – 0.55		
Elementos de rugosidad sobre un talud liso. Altura = $f_h$ , anchura = $f_b$				
Tipo	$f_h/f_b$	$f_b/H_s$	Superficie cubierta	
1/25 bloque	0.88	0.12-0.24	1/25	0.75-0.85
1/9 bloque	0.88	0.12-0.19	1/9	0.70 – 0.75
Medio bloque	0.44	0.12-0.24	1/25	0.85 – 0.95
Solo sobre Nmedio	0.88	0.12-0.18	1/25	0.85 – 0.95
Bloque ancho	0.18	0.55-1.1	1 / 4	0.75 – 0.85
Costillas $f_b/H_s = 0.12-0.19$ y $f_L/f_h = 7$ (óptimo) Donde $f_L$ = distancia entre costillas				0.60 – 0.70

$\gamma_\beta$  = reducción por incidencia oblicua.

$$g_b = 1 - 0.0022b \quad (b \text{ en grados})$$



## **OBR 1.2 - Rebase en diques de escollera**

Los diques de protección se pueden diseñar con criterio de rebase nulo o, por el contrario, aceptando que en determinados eventos anuales cierta cantidad de agua supere la cota de coronación y acceda a la zona abrigada. El caudal de agua admisible en un determinado temporal con periodo de retorno dado depende de los riesgos materiales y humanos en que se incurra. En realidad, el criterio de rebase nulo es más una ficción teórica que una solución práctica: evitar el más mínimo rebase en el temporal del siglo supone a menudo unos costes inasumibles. En países como Japón se construyen tradicionalmente diques ampliamente rebasables (en este caso de tipología vertical o mixta) destinados a reflejar sólo una parte de la energía incidente en situaciones extremas.

De lo dicho anteriormente se deduce que toda estructura real tiene que ser diseñada asumiendo un cierto caudal de rebase, que en el mejor de los casos puede ser cercano a cero. En este módulo se proponen la fórmula empírica de van der Meer y Janssen (1995), basada en numerosos ensayos de laboratorio con oleaje irregular. Se hace hincapié en que estas fórmulas son útiles con fines de tanteo o prediseño; en obras de alto compromiso, es conveniente realizar ensayos en modelo reducido para verificar y afinar los resultados obtenidos.

### ***Formulación de van der Meer y Janssen (1995)***

Al igual que en su formulación de *run-up*, van der Meer y Janssen consideran oleaje irregular e introducen el efecto de la oblicuidad para estimar el rebase. El caudal obtenido corresponde a un valor medio en el estado de mar. Se proponen dos fórmulas, una para oleaje en rotura y otra para oleaje sin romper:

- para olas rompiendo:

$$Q_b = 0.06 \exp(-4.7 R_b) \quad \text{si } I_{rop} < 2$$

donde:

$$Q_b = \frac{q_r}{\sqrt{g H_s^3}} \sqrt{\frac{S_{0p}}{\tan \alpha}}$$

$$R_b = \frac{F}{H_s \tan \alpha} \frac{\sqrt{S_{0p}}}{g_h g_f g_b} l$$

$$S_{op} = \frac{2p H_s}{g T_p^2}$$

- $q_r$  = caudal medio de rebase, por unidad de anchura  
 $F$  = francobordo de la estructura  
 $T_p$  = periodo de pico  
 $\gamma_h, \gamma_f, \gamma_\beta$  = factores reductores iguales a los empleados en en la formulación de *run-up* (ver OBR 1.1), salvo para  $\gamma_\beta = 1 - 0.0033\beta$  ( $\beta$  en grados)

- para oleaje sin romper:

$$Q_n = 0.2 \exp(-2.3 R_n) \quad I_{rop} \geq 2$$

donde:

$$Q_n = \frac{q_r}{\sqrt{g H_s^3}}$$

$$R_n = \frac{F}{H_s} \frac{l}{g_h g_f g_b}$$

El caudal medio de rebase no da una idea de cual es el rebase producido por una determinada ola individual, siendo este valor importante en muchos aspectos. Este método permite evaluar el rebase de una cierta probabilidad de ocurrencia en un estado de mar debido a una ola individual. Este valor puede ser un orden de magnitud mayor que el caudal medio. Se hace notar que las fórmulas mencionadas no tienen en cuenta el efecto del viento en el valor del rebase.

Los resultados del programa son el número de Iribarren sobre el talud, el caudal medio de rebase en el estado de mar de cálculo y el volumen de rebase debido a una ola de probabilidad dada en dicho estado de mar.



### **OBR 1.3 - Transmisión en diques de escollera**

Se define coeficiente de transmisión ( $K_t$ ) de una estructura como el cociente entre la altura existente en la zona abrigada y la altura incidente en la zona expuesta. El hecho de que un dique no refleje o disipe la energía recibida puede deberse a dos causas: existe un rebase de la estructura o el dique es poroso y deja pasar en cierta medida el oleaje. La mayor parte de las formulaciones existentes para calcular el coeficiente de transmisión especifican si son válidas para diques permeables o impermeables; en los segundos sólo existe transmisión por rebase.

Las formulaciones más conocidas para evaluar el coeficiente de transmisión son las siguientes:

#### ***Seelig (1980)***

Consiste en una formulación empírica basada en los resultados de Cross y Sollit (1971) y reformada por Seelig mediante ensayos de laboratorio en dos dimensiones; proporciona un valor del coeficiente de transmisión por efecto de rebase, es decir, asumiendo dique impermeable. Como cálculo intermedio es necesario calcular el run-up sobre la estructura, que depende del tipo de talud. La expresión de  $K_t$  es la siguiente:

$$K_t = C \left( 1 - \frac{F}{R_u} \right)$$

donde:

$C$	=	coeficiente empírico = $0.51 - 0.11 \frac{B}{h_s}$
$B$	=	anchura de coronación
$h_s$	=	altura de la estructura
$F$	=	francobordo de la estructura
$R_u$	=	run-up (Ahrens y McCartney, 1975 – Ahrens y Titus , 1985)



### *D'Angremond, van der Meer y De Jong (1996)*

Se utiliza un amplio registro de datos que inicialmente fue sometido a un cuidadoso filtrado para asegurar la homogeneidad. El resultado es una fórmula para estructuras permeables:

$$K_t = -0.4 \frac{F}{H_{si}} + \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{-0.5I_r p_o}) \cdot 0.64$$

válido para  $0.075 < K_T < 0.8$

donde:

- $H_{si}$  = altura de ola significativa incidente
- $F$  = francobordo de la estructura
- $B$  = Anchura de coronación
- $I_{rp}$  =  $\frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{p_o}}}}$
- $L_{p_o}$  = longitud de onda asociada al período de pico en profundidades indefinidas.

y otra para impermeables:

$$K_t = -0.4 \frac{F}{H_{si}} + \left( \frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5I_r p_o}) 0.8$$

válido dentro de los mismos límites. Estas fórmulas proporcionan un valor del coeficiente de transmisión debido tanto al rebase como al flujo en el interior del dique. Los autores consideraron que no había suficientes datos para incluir la dependencia del diámetro nominal y del tipo de piezas en las expresiones de  $K_t$

### **OBR 1.4 - Reflexión en diques de escollera**

El fenómeno de reflexión es mucho más marcado en estructuras de tipo vertical que en las de tipo talud. Esto no significa que los diques de escollera no reflejen cierta proporción de la energía incidente generando afecciones en playas, canales de navegación, resonancia portuaria, etc. El objetivo del modulo OBR 1.4 es presentar al ingeniero una formulación que permita evaluar el coeficiente de reflexión ( $K_r$ ) de una estructura en talud, definido éste como el cociente entre la altura de ola reflejada y la incidente. Se trata de expresiones obtenidas a partir de ensayos de laboratorio con oleaje irregular y se asume como hipótesis de partida que el dique es no rebasable. Se describen a continuación las expresiones utilizadas:

#### ***Seelig y Ahrens (1995). Talud rugoso***

Esta formulación tiene las siguientes características:

- a) Es fácil de utilizar y no incluye variables marginales o de segundo orden.
- b) Es consistente con una amplia variedad de datos procedentes de distintos experimentos y distintos tipos de oleaje.
- c) Es consecuente con la comprensión que se tiene del proceso físico.
- d) Tiende a valores límite lógicos.

La expresión propuesta para olas sin romper es la siguiente:

$$K_r = \frac{I}{I + \lambda^{1.57} \cdot \exp(\alpha)}$$

donde:

$$\alpha = 2.29 \left[ (\cot \theta)^{0.3} \left( \frac{D_{n50}}{L_p} \right)^{0.15} \left( 1 + \frac{H}{ds} \right)^{1.5} + \frac{p^{0.4}}{(\cot \theta)^{0.7}} \right]$$

$\theta$  = ángulo del talud de la estructura  
 $L_p$  = longitud de onda de pico



$d_s$	=	profundidad al pie de la estructura
$p$	=	factor de permeabilidad de Van der Mer (figura 5.3.1)
$D_{n50}$	=	diámetro nominal de las piezas

en el caso de olas rotas se tiene:

$$K_r = 1 - \exp \left[ \left( -0.6 I_r^{2.4} - 0.5 \frac{H_{m0}}{d_s} \right) f \right]$$

$$I_{r_{op}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{op}}}}$$

donde:

$$f = 0.16 + (-0.45 + 0.5P) \ln \left( \frac{D_{n50}}{H_{m0}} \right)$$

con la condición de que  $\left( \frac{D_{n50}}{H_{m0}} \right) < 1$  y  $f < 1$ , siendo  $H_{m0}$  la altura de ola cuadrática media obtenida del espectro  $\cong H_s$ .

### **OBR 2.1 - Estabilidad de diques en talud no rebasables**

Se presentan en este módulo un conjunto de tres formulaciones cuyo objetivo es determinar el peso que deben tener las piezas de un determinado dique en talud para resistir los esfuerzos a los que se ven sometidas por el oleaje de diseño. Las formulaciones elegidas son las más conocidas entre la comunidad de técnicos y su validez ha sido contrastada en numerosas obras. Las dos primeras se formularon a partir de oleaje regular pero se pueden aplicar para



oleajes irregulares aceptando el principio de independencia. La de van der Meer se basa en ensayos con oleaje irregular.

Un acercamiento teórico-analítico al problema de la estabilidad de las piezas de un dique de escollera plantea multitud de dificultades que hacen que en la actualidad no esté todavía resuelto. Sí que es cierto que se han hecho progresos en la descripción matemática del flujo en un medio poroso, aunque esto sólo supone el primer paso hacia un problema que de momento se sigue resolviendo de forma aproximada.

El análisis dimensional de las variables que interviene en el proceso de ascenso y descenso del flujo sobre el talud ayuda a perfilar una metodología de ensayo en modelo reducido y favorece un enfoque racional del problema. Llevando a cabo este análisis y aceptando ciertas hipótesis que se pueden consultar en la bibliografía de referencia, se llega a la conclusión de que el peso de las piezas que es estable para un determinado nivel de daño se puede calcular con una expresión del tipo:

$$W = g_w H^3 R y$$

donde:

$$S_r = \frac{g_p}{g_w}$$

$$R = f(S_r)$$

$$\psi = \psi(\alpha, H/L)$$

$$\alpha = \text{ángulo del talud de la estructura}$$

$$\gamma_p = \text{densidad de la escollera}$$

$R$  es función de la relación entre el peso específico del material y el del agua de mar y representa por tanto la influencia de la densidad del material de las piezas. Se acepta una función de la forma:

$$R = \frac{S_r}{(S_r - 1)^3}$$



La variable es  $\psi$  la denominada función de estabilidad, que depende del talud de la estructura y del peralte del oleaje incidente para cada tipo de piezas y grado de avería. Esta función refleja la naturaleza de la interacción onda-talud: tipo de rotura, fenómenos resonantes, etc. La diferencia entre unas y otras metodologías de cálculo estriba en la forma en que se define esta función.

Una de las formulaciones más antiguas para estabilidad de diques, y que aún sigue siendo utilizada aunque con modificaciones y correcciones, es la de Hudson (1959). Su estructura se ajusta a la de la fórmula mencionada, con la particularidad de que el autor define en lugar de una función de estabilidad el denominado número de estabilidad, que vale:

$$N_s = \frac{H}{D_{50}(S_r - 1)}$$

y se relaciona con la función de estabilidad de la siguiente forma:

$$\psi = \frac{1}{N_s^3}$$

Con este cambio de nomenclatura, la expresión del peso de las piezas resulta:

$$W = \gamma_w \cdot H^3 \cdot S_r \cdot \frac{1}{N_s^3}$$

Antes de pasar a la descripción somera de las fórmulas incluidas en el Tic, cabe hacer una matización sobre la influencia del parámetro  $H/L$  en el valor de  $\psi$  ó  $N_s$ . El peralte de la onda incidente determina en gran medida el tipo de rotura y por tanto los esfuerzos generados; sin embargo, a la hora de diseñar se opta por una determinada altura de ola cuya longitud de onda asociada es incierta, y por lo tanto su peralte. En conclusión, una metodología adecuada para el diseño deberá proporcionar para cada tipo de piezas, daño de avería y talud de la estructura un valor de  $\psi$  o  $N_s$  correspondiente al peralte pésimo y considerando la banda de confianza (dada la dispersión de los datos) que cubra un alto porcentaje de ellos y no sólo la tendencia media.



Otro tema que no se discute en esta breve referencia pero que reviste una gran importancia es la elección de la altura de ola de diseño en obras donde no existe limitación por fondo. Baste decir que esta elección debe estar condicionada a la forma en que se llevó a cabo la experimentación con que se obtuvieron los valores de  $\psi$  o  $N_s$  utilizados.

A continuación se resumen brevemente los puntos básicos de las metodologías incluidas:

### ***Fórmula de Hudson (1959)***

Hudson definió la siguiente expresión para determinar  $N_s$ :

$$N_s = (K_d \cotg \alpha)^{\frac{1}{3}}$$

Existe una tabla detallada, incluida en el módulo mediante un botón de acceso, donde se especifican valores para  $K_d$  en función del talud, tipo de piezas, olas rotas o sin romper y otros parámetros. Algunas desventajas de esta formulación son:

- Se realizó mediante ensayos de pequeña escala por lo que los resultados contienen defectos potenciales de escala.
- Se utilizó únicamente oleaje regular.
- Sólo se emplearon estructuras de núcleo permeable.

### ***Fórmula de Losada y Giménez-Curto (Losada, 1992)***

Esta formulación encuentra una expresión para la función de estabilidad que depende del número de Iribarren y de dos constantes empíricas definidas para cada tipo de pieza, talud y nivel de avería. La forma general de esta función es la siguiente:

$$\psi = A (I_r - I_{r0}) \exp [ B (I_r - I_{r0}) ]$$

donde:

$$I_{r0} = 2.654 - \tan \alpha$$



$A, B =$  coeficiente de ajuste. Los valores de  $A$  y  $B$  y el valor máximo de la banda superior de confianza del 95% para  $\psi$  viene dado en las tablas 4.2.5.1 y 4.2.6.1 “Documento de Referencia” (Obras), para varios tipos de piezas y taludes del manto principal.

Cada una de ellas tiene un máximo para un determinado valor del número de Iribarren que es el que se toma como valor de diseño. Asimismo, se calcularon bandas de confianza asumiendo una distribución gaussiana de los valores en torno a su media.

### ***Fórmula de Van der Meer (1993)***

La formulación de Van der Meer se basa en experimentación con oleaje irregular e introduce en la expresión del número de estabilidad dos nuevos factores que son la duración del estado de mar y la porosidad de la estructura. Dicha porosidad es una magnitud introducida por el propio Van der Meer y los valores que toma en función de la configuración de las capas del dique se reflejan en la figura 5.3.1. Se proponen dos familias de fórmulas en función de que el dique se encuentre en zona de altura de ola limitada por fondo o no, existiendo en cada caso una expresión para olas rompiendo en voluta o en colapso.

Van der Meer, para su Tesis Doctoral (1988), realizó un conjunto exhaustivo de ensayos de laboratorio sobre flujo y estabilidad de diques escolleras (simulados con gravas). Las estructuras ensayadas comprendían un amplio rango de permeabilidades de mantos y núcleo, así como de condiciones de oleaje, siempre irregular. Como resultado del análisis dimensional de los resultados de estabilidad, van der Meer propuso las siguientes fórmulas:

- Olas rompiendo en voluta-colapso sobre el dique:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 P^{0.18} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} I_{rm}^{-0.5} ; \text{ para } I_{rm} < I_{rmc} \text{ y } cota \leq 4$$



- Olas sin romper (oscilación) sobre el dique:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 P^{-0.13} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} I_{rm}^P \quad ; \text{ para } I_{rm} \geq I_{rmc} \text{ ó } \cot \alpha \geq 4$$

La transición entre las dos fórmulas se define mediante un número de Iribarren crítico,  $I_{rmc}$ , dado por la expresión:

$$I_{rmc} = \left( 6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha} \right)^{\frac{1}{P+0.5}}$$

Para valores de  $\cot \alpha \geq 4$ , se utilizará siempre la formulación para olas en oscilación sobre el dique.

El número de Iribarren,  $I_{rm}$ , se define mediante la altura de ola significativa a pie de dique,  $H_s$ , y la longitud de onda en profundidades indefinidas,  $L_{0m}$ , asociada al período medio del oleaje,  $T_m$ ,  $L_{0m} = gT_m^2/2p$ .

$P$  es un coeficiente relacionado con la permeabilidad de los mantos y núcleo del dique. Los valores indicativos de este parámetro vienen indicados en la figura 5.3.1.  $N$  es el número de olas del estado de mar de cálculo y no debe ser superior a 7500. Por encima de este número, el daño o bien ha alcanzado un equilibrio o ha producido la destrucción de la estructura.

El rango de peraltes (involucrados en el número de Iribarren) ensayados cubrió prácticamente todo el rango posible ( $0.005 < H_s / L_{0m} < 0.06$ ) y la densidad de las piezas ensayadas varió entre 2000 y 3100 Kg/m<sup>3</sup>, es decir prácticamente todo el rango de aplicación en escolleras naturales.

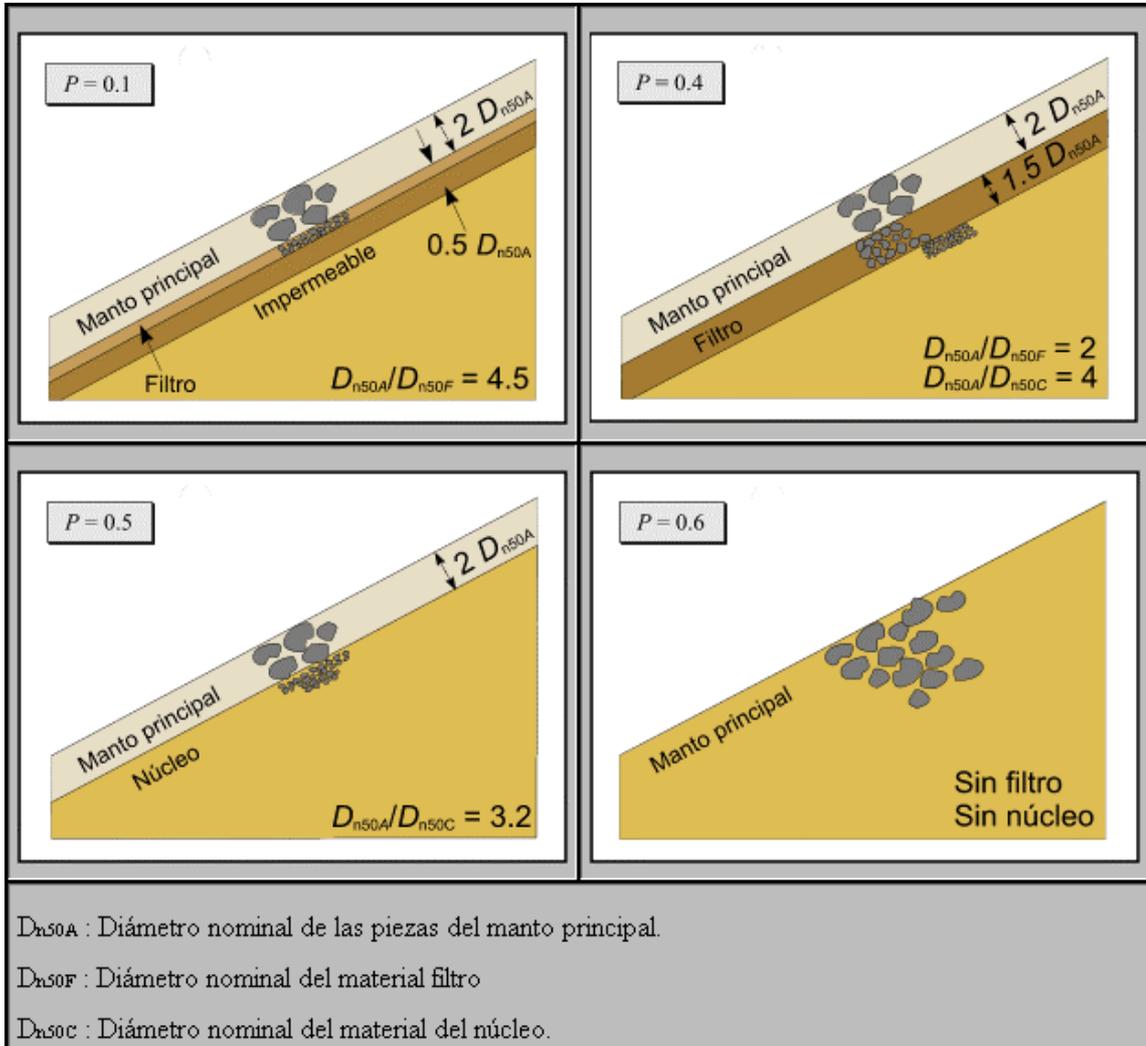


Figura 5.3.1. Cuadro de permeabilidad nocional de Van der Meer



## **OBR 2.2 - Estabilidad de diques en talud rebasables y sumergidos. Metodología de Vidal et al. (1992, 1994)**

Se denominan diques rebasables aquellos que, debido a su baja cota de coronación, están diseñados para permitir un caudal de rebase importante sobre la misma. En el caso de que dicha cota se sitúe por debajo del nivel medio en reposo, el dique se denomina sumergido. Estas estructuras tienen como característica principal el dejar pasar un alto porcentaje de la energía del oleaje, tanto por efecto del rebase como a través de su núcleo, muchas veces permeable. Su importancia en la ingeniería de costas radica en el hecho de que muchas veces es necesario proteger una zona o sostener una playa mediante una estructura que apenas sea perceptible o, en el mejor de los casos, que pase totalmente desapercibida.

En el presente módulo se implementa la metodología propuesta por Vidal et al. (1992,1994) para el diseño de diques en talud rebasables y sumergidos. Dicha formulación se basan en una serie de ensayos realizados en modelo reducido destinados a analizar la influencia del francobordo en la estabilidad de las piezas de las diferentes zonas de la estructura. El autor experimentó con diques exentos de las siguientes características:

- Manto exterior de grava clasificada y núcleo permeable de grava con menor clasificación.
- Talud de todos los mantos, tanto el exterior como el interior, de valor 1.5 (cotg  $\alpha = 1.5$ )

Se empleó para los ensayos oleaje irregular generado según espectros tipo JONSWAP con periodos de pico 1.4 y 1.8 segundos. Los resultados del modelo fueron una serie de gráficas en las cuales se expresa para cada nivel de avería la relación entre el francobordo adimensional ( $F_d$ ) y el número de estabilidad ( $N_s$ ) definidos como:

$$F_d = \frac{F}{D_{n50}}$$

$$N_s = \frac{H_s}{D_{n50} \left( \frac{g_r}{g} - 1 \right)}$$

donde  $F$  es el francobordo en metros,  $H_s$  la altura de ola significativa de diseño,  $D_{n50}$  el diámetro nominal de las piedras,  $\gamma_r$  el peso específico de la roca y  $\gamma_{el}$  del agua.

Se consideraron las siguientes zonas en el dique: manto exterior, manto interior, sector exterior del morro, sector interior del morro y coronación (figura 5.3.2). Cada una de ellas tiene un comportamiento distinto frente a la variación del francobordo; el autor ajustó para cada zona y nivel de daño una curva de segundo grado que da el valor del número de estabilidad ( $N_s$ ) en función de  $F_d$ :

$$N_s = A + B \cdot F_d + C F_d^2$$

Los valores de A, B y C y el valor límite del francobordo de no rebase se encuentran en la siguiente tabla (Parámetros de ajuste para las curvas  $N_s = A + B F_d + C F_d^2$  para cada sector de los diques rebasables o sumergidos y nivel de avería).

Para aplicar los resultados de estos ensayos al diseño de diques con otros tipos de piezas y talud de los mantos distinto de 1.5 es necesario asumir dos hipótesis adicionales:

1. Para un sector determinado del dique y un nivel de avería dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos francobordos diferentes es independiente del tipo de piezas y del ángulo del talud.
2. Para un francobordo dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos sectores distintos de un dique sólo depende del tipo de piezas y del ángulo de los taludes.

Utilizando estas hipótesis el autor desarrolla una metodología (ver apartado 4.3.13.5 del “Documento de Referencia” (OBRAS)) que permite calcular, dada la definición geométrica y el material del dique, el peso necesario en cada zona para resistir los esfuerzos debidos al oleaje. Los resultados que se obtienen son el diámetro y peso de las piezas estables en cada sector del dique.

Sector	Avería	Límite experimental de $F_d$	A	B	C	Francobordo de no rebase $F_{dnr}$
<b>IM</b>	<b>IA</b>	-2.01 a 2.41	1.681	-0.474	0.1050	2.40
	<b>AI</b>		2.046	-0.499	0.0913	2.41
	<b>ID</b>		2.517	-0.536	0.0613	3.15
	<b>D</b>	-0.01 a 2.41	3.027	-0.756	0.120	3.90
<b>EM</b>	<b>IA</b>	-2.01 a 2.41	1.839	-0.363	0.0105	2.40
	<b>AI</b>		2.331	-0.320	-0.0173	2.41
	<b>ID</b>		2.802	-0.278	-0.0382	3.15
	<b>D</b>		3.062	-0.262	-0.0494	3.90
<b>TI</b>	<b>IA</b>	-2.01 a 2.41	2.575	-0.540	0.115	---
	<b>AI</b>	0.80 a 2.41	5.628	-1.459	0.0837	---
	<b>ID</b>	1.60 a 2.41	8.669	-2.272	---	---
<b>C</b>	<b>IA</b>	-2.01 a 2.41	1.652	0.0182	0.159	---
	<b>AI</b>		2.122	0.0434	0.150	---
	<b>ID</b>		2.734	0.123	0.177	---
	<b>D</b>	-2.01 a 1.00	3.21	0.0965	0.175	---
<b>TE</b>	<b>IA</b>	-2.01 a 2.41	1.831	-0.245	0.0119	2.40
	<b>AI</b>		2.256	-0.320	0.0189	2.41
	<b>ID</b>		2.650	-0.313	0.0129	3.15
	<b>D</b>		3.237	-0.357	0.0357	3.90

Parámetros de ajuste para las curvas  $N_s = A + B F_d + C F_d^2$  para cada sector de los diques rebasables o sumergidos y nivel de avería.

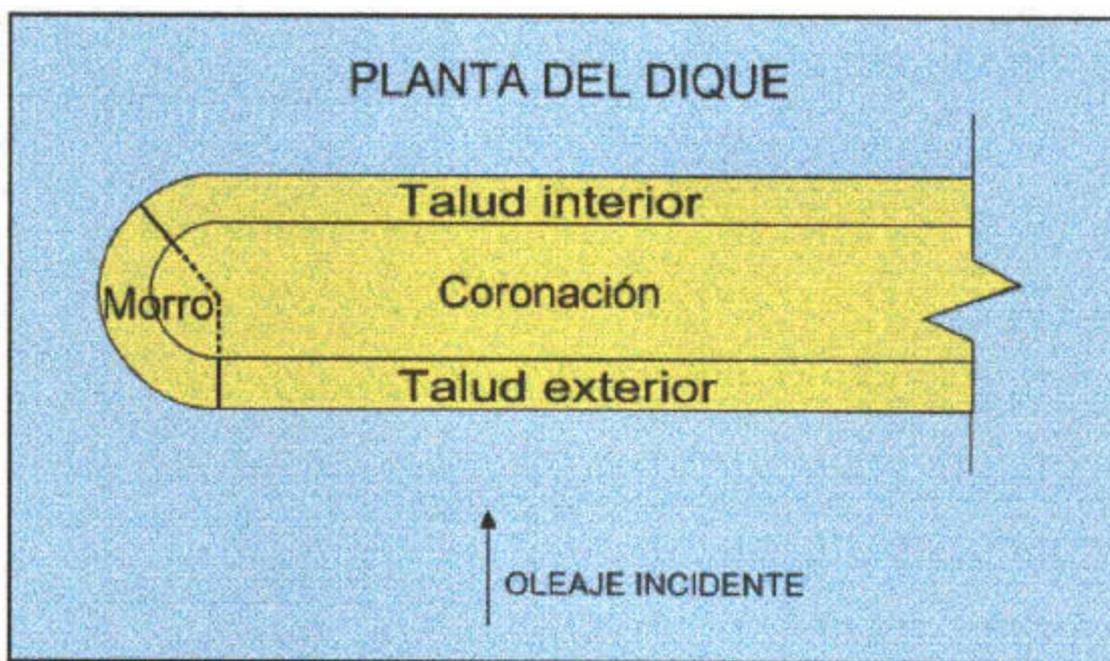


Figura 5.3.2. Esquema de un dique rebasable tipo. Formulación de Vidal (92)

### **OBR 2.3 - Estabilidad de espaldones en diques de escollera**

El módulo OBR 2.3 permite calcular la estabilidad a deslizamiento y vuelco de un espaldón rebasable o no rebasable situado en la coronación de un dique en talud. Para ello se emplean la formulación de Martín et al. (1995). La finalidad de estas estructuras se concreta en los siguientes puntos:

- Reducen el volumen de escollera necesario para una cota de coronación dada.
- Permiten el acceso rodado y determinadas operaciones sobre el dique.
- Sirve de soporte para canalizaciones, tomas de agua y luz, etc.

Una de las condiciones que plantea esta metodología es la de que el oleaje no rompa contra la estructura. En el caso de que esto sucediese, el diseño se debería realizar con formulaciones para diques mixtos (ver módulo OBR 2.3). A continuación se resumen la hipótesis y las fórmulas implementadas:



**Método de Martín et al. (1995). (ver Documento de Referencia (OBRAS) apartado 4.1.1.7)**

Del estudio de los resultados de una serie de experimentaciones los autores han verificado que una única ola genera dos máximos relativos de fuerza: el primero de ellos es debido a la deceleración del frente de la onda, mientras que el segundo se produce durante el descenso de la masa de agua acumulada contra la estructura (figura 5.3.3).

La estabilidad tanto a deslizamiento como a vuelco debe comprobarse bajo ambas hipótesis de carga. Para el cálculo del *run-up* se recomienda utilizar la formulación debida a Losada y Giménez-Curto, incluida en el módulo correspondiente.

Carga dinámica: se considera una distribución uniforme de distinto valor según se trate de la zona expuesta o de la protegida por los mantos. La expresión matemática que da el valor de la presión es:

- zona expuesta:

$$P_d = a r g s$$

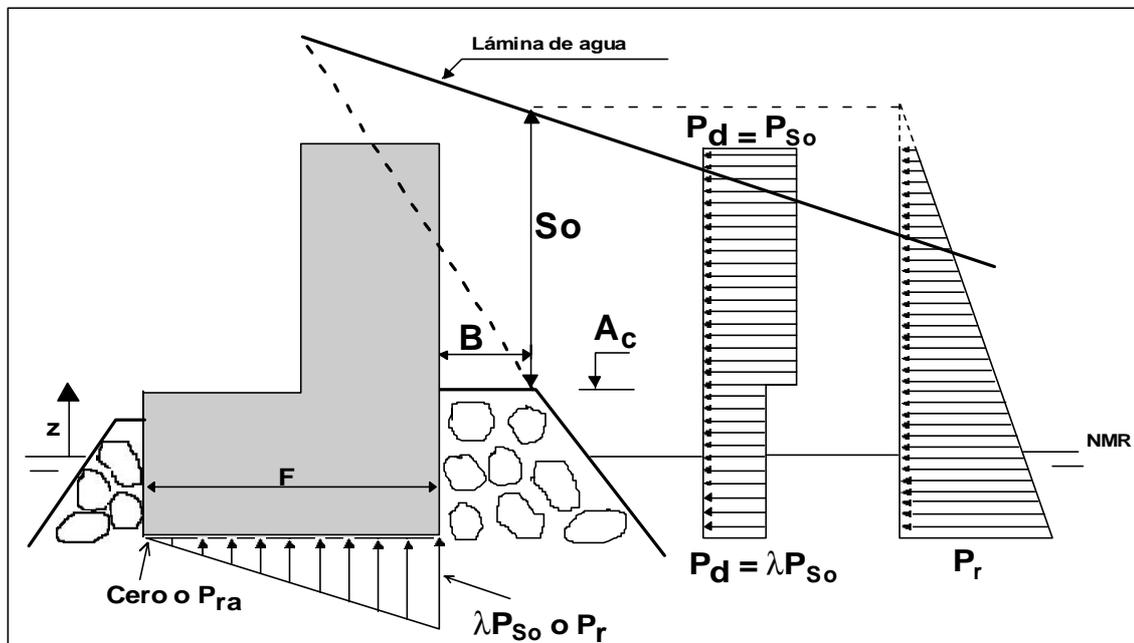


Figura 5.3.3. Esfuerzos sobre un espaldón. Formulación de Martín



donde:

$$\begin{aligned} s &= \text{anchura de la lámina de agua} \\ \alpha &= \text{parámetro empírico del modelo} \end{aligned}$$

- zona protegida:

$$P_d = I \alpha r g s$$

donde:

$$\lambda = \text{coeficiente de reducción empírico}$$

mientras que las subpresiones son triangulares con valor  $I \cdot P_d$  en la zona expuesta y nulo en la protegida.

Carga pseudohidrostática: tiene una distribución triangular o trapezoidal (según se rebase o no el espaldón) cuya expresión es:

$$P_h = m r g (s + A_c - z)$$

donde:

$$\begin{aligned} A_c &= \text{cota de la berma sobre el nivel del mar} \\ z &= \text{distancia al nivel del mar} \\ \mu &= \text{factor reductor tabulado} \end{aligned}$$

Las subpresiones tienen también distribución trapezoidal cuyo valor en la zona expuesta es  $m r g (A_c + s - z)$  mientras que en la protegida es de  $k m r g (A_c + s - z)$  donde  $k$  es un factor tabulado menor que la unidad.

En esta formulación, las dimensiones de diseño serán aquellas que resulten más críticas con relación a las dos situaciones de carga consideradas. El módulo permite verificar si un espaldón de dimensiones determinadas es estable a deslizamiento y a vuelco.

Los detalles del método y valores de los coeficientes  $\alpha$ ,  $\lambda$  y  $\mu$  se encuentran en el apartado 4.1.1.7 del “Documento de Referencia” (Obras).

## **OBR 2.4 - Estabilidad de diques en talud rebasables y sumergidos. Fórmulas de Ahrens - Van der Meer (1990)**

Se propone en este módulo una alternativa a la ya planteada en el OBR 2.2 - *Estabilidad de diques en talud rebasables y sumergidos. Formulación de Vidal et al.* para el cálculo de este tipo de estructuras. El enfoque y origen de las fórmulas que aquí se presentan son, en ciertos aspectos, diferentes a los anteriores, al igual que las hipótesis y restricciones impuestas. Se recomienda, a la hora de emprender el diseño de un dique rebasable o sumergido, un conocimiento básico de las características de las formulaciones disponibles y la utilización conjunta de las mismas. La comparación de los resultados, unido a un análisis crítico de las posibles diferencias obtenidas, ayudará a un diseño más racional y fiable.

Se implementa en este módulo una serie de fórmulas aplicables a dos tipos de estructuras:

- Diques deformables (rebasables y sumergidos): su sección tipo inicial se ve modificada por acción del oleaje hasta alcanzar una forma final estable.
- Diques rígidos (rebasables y sumergidos): sus características geométricas permanecen inalteradas a lo largo de la vida útil.

Dichas fórmulas están basadas en abundantes ensayos de laboratorio, la mayoría con oleaje irregular, realizados por diversos autores a lo largo de la década de los 80. La agrupación y revisión de las mismas se debe a J. W. van der Meer e Ivar F. R. Daemen (1994). Debe apuntarse que sólo son válidas para diques de escollera sin núcleo, a diferencia de las propuestas por Vidal et al. (ver OBR 2.2); Por esta razón, tampoco proporcionan distintos tamaños de pieza estable para los distintos sectores (taludes, coronación y morro). Sin embargo, estas fórmulas contemplan la posibilidad de dique deformable y están sustentadas por un mayor número de ensayos con distintas geometrías, escalas y oleajes.

A continuación se resumen las hipótesis y fórmulas de aplicación en cada una de las dos tipologías mencionadas:



## Diques deformables rebasables y sumergidos.

Ahrens (1987) investigó la estabilidad y el coeficiente de transmisión de estructuras deformables para distintos francobordos iniciales y peraltes del oleaje incidente. Como resultado de los ensayos, se obtuvo una expresión que relacionaba el francobordo final con el área de la sección y con un número de estabilidad modificado ( $N_s^*$ ):

$$h_c = \sqrt{\frac{A_t}{e^{aN_s^*}}} \quad \text{ó} \quad c = \frac{A_t}{h_c^2} = e^{aN_s^*}$$

donde:

$h_c$  = altura final del dique

$A_t$  = área de la sección.

$a$  = coeficiente cuya expresión se puede encontrar en Ahrens (1989) = 0.0945

$$N_s^* = \frac{H_s^{2/3} L_p^{1/3}}{\delta D_{n50}}$$

$H_s$  = altura significativa de cálculo

$L_p$  = periodo de pico del oleaje de cálculo

$$\delta = \frac{\rho_a}{\rho_\omega} - 1$$

$\rho_a, \rho_\omega$  = densidad de la escollera y del agua

$D_{n50}$  = diámetro nominal de la escollera.

Van der Meer (1988, 1990) amplió los ensayos sobre este tipo de estructuras y, tras analizar los resultados de Ahrens y los suyos propios, modificó la expresión final del parámetro  $a$  de Ahrens, haciendo también depender el francobordo final de la pendiente inicial del dique:

$$a = -0.028 + 0.045C' + 0.034 \left( \frac{h_c}{d} \right) - 6 \cdot 10^{-9} B_n^2$$



donde:

$$C' = \frac{A_t}{(h_{c'})^2}$$

$h_{c'}$  = altura inicial del dique  
 $d$  = profundidad a pie de dique

$$B_n = \frac{A_t}{(D_{n50})^2}$$

Con estas expresiones se puede calcular el francobordo final a partir de la geometría inicial y el oleaje de cálculo.

### Diques rígidos rebasables y sumergidos

En el caso de que se trate de una estructura emergida (francobordo positivo) cuya geometría se mantiene sensiblemente constante a lo largo del tiempo, el problema que se plantea es similar al de los diques no rebasables, y Van der Meer propone aplicar un coeficiente de reducción al diámetro de las piezas estables obtenido para dique no rebasable. Diversos ensayos (Powell y Allsop, Ahrens, van der Meer) sustentan esta hipótesis. La expresión del factor de reducción ( $C_r$ ) propuesta es:

$$D_{n50} = C_r \cdot D_{n50sr}$$

$$C_r = \frac{1}{(1.25 - 4.8 R_p^*)}$$

donde:

$$R_p^* = \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}}$$

$R_c$  = francobordo del dique  
 $s_{op}$  = peralte del oleaje  $s_{op} = 2\pi \frac{H_s}{gT_p^2}$



$D_{n50sr}$  = diámetro nominal de la escollera en dique no rebasable calculado con la formulación de Van der Meer (ver OBR 2.1).

En el caso de diques sumergidos, los ensayos realizados son mucho más escasos (van der Meer, Givler y Sorensen) y las expresiones obtenidas para relacionar el número de estabilidad con la altura del dique sólo son válidas para taludes comprendidos entre 1.5 y 2.5. La expresión calculada por Van der Meer hace intervenir el parámetro de daño  $S$  y el número de estabilidad modificado:

$$\frac{h_c'}{d} = (2.1 + 0.1S) \cdot e^{(-0.14N_s')}$$

El criterio de símbolos es el mismo que en las fórmulas anteriores y los valores de  $S$  para distintos grados de avería son los siguientes:

Inicio de avería:  $S = 2$

Avería de Iribarren:  $S = 5$

Inicio de destrucción:  $S = 8-12$

El programa calcula el diámetro y el peso de la escollera estable, junto con algunos otros resultados intermedios.

### **5.3.2 Diques Verticales**

#### **OBR 3.1 - Cálculo de diques verticales**

Se contempla dentro de este módulo el diseño de diques de tipología vertical con banqueta baja, con la condición impuesta de que el oleaje llegue sin romper a la estructura ( $H/d < 0.5$ ). El aspecto básico de la metodología está en la evaluación de los esfuerzos dinámicos producidos por el oleaje, siendo el resto de fuerzas implicadas las subpresiones, el peso de la estructura y las posibles sobrecargas.

Es un hecho conocido que cuando un tren de ondas regular se aproxima a un elemento reflejante se genera una onda estacionaria o clapotis de mayor amplitud (el doble si se admite reflexión perfecta) que la incidente. La

distribución de presiones sobre la estructura es la correspondiente al antinodo (punto de máximo ascenso y descenso del nivel) de la onda estacionaria y se evalúa a partir del potencial del flujo y aplicando la ecuación de Bernoulli. De lo anterior se deduce que el cálculo de dichas presiones, y por ende del resto de las magnitudes dinámicas integradas, es sólo un ejercicio matemático más o menos complejo que depende de la teoría de ondas adoptada para representar el fenómeno. En ocasiones un determinado autor plantea una metodología que no constituye una teoría de ondas en sí, como es el caso de Nagai, sino un conjunto de expresiones semiempíricas basadas en la teoría lineal con algunas correcciones para incluir efectos no lineales.

Con excepción de la de Nagai, las formulaciones incluidas en el Tic para el diseño de diques verticales se basan en diferentes teorías matemáticas de modelización del flujo. La derivación de todas ellas parte de la conocida ecuación de Laplace y de las condiciones de contorno correspondientes; posteriormente, el método y grado de aproximación empleado para resolverlas distingue a unas de otras. Únicamente la teoría lineal permite incidencia oblicua del oleaje. Las formulaciones que se presentan corresponden en su totalidad a ondas en régimen de Stokes:  $d/L > 0.135$

Se ofrece la posibilidad de diseñar el dique como rebasable o no rebasable. En el caso de dique rebasable, el programa trunca las distribuciones de presión en la cota de coronación, ignorando los esfuerzos del caudal de rebase sobre el dique y las modificaciones de la ley de presiones por efecto del truncamiento. Tampoco se evalúan los esfuerzos debidos a una posible onda transmitida. El cálculo de las subpresiones dinámicas se realiza asumiendo distribución triangular con valor igual a la presión dinámica al pie del dique en la zona expuesta y cero en la protegida. La formulación de Nagai incluye su propia definición de la misma, como se señala en el apartado correspondiente. Únicamente se resuelven las presiones dinámicas positivas (bajo la cresta) puesto que las negativas que se producen bajo el seno no producen estados de cargas críticos en estructuras puramente de protección. Sin embargo, si se planteara como objetivo resolver estructuras de atraque con relleno sólido a sotavento del oleaje, sí que habría que considerar el efecto de succión de las olas.



Las teorías de cálculo que el programa incorpora son las siguientes:

### ***Teoría lineal***

La expresión del potencial que se emplea es la suma del de dos ondas lineales viajando en sentido contrario:

$$f = \frac{-g H_I}{2s} [1 + k_r] \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(k_y y - \omega t) \cos(k_x x)$$

la ley de presiones sobre la pared vertical del dique es

$$P(0, y, z, t) = -r g z + r g \frac{H_I}{2} (1 + K_R) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(k_y y - \omega t)$$

donde:

$$s = \frac{2p}{L}$$

$$k_r = \text{coeficiente de reflexión}$$

$$H_I = \text{altura de ola incidente}$$

Al ser una onda de pequeña amplitud, se utiliza una aproximación lineal para las presiones por encima del nivel medio. Esta es la única formulación incluida que permite incidencia oblicua

### ***Teoría de Nagai sin rotura (1973)***

Es de carácter semiempírico: parte de la estructura de las expresiones correspondientes a la teoría lineal y ajusta diversos parámetros según el dique se encuentre en profundidades indefinidas, reducidas o muy reducidas. Las fórmulas finales para las fuerzas son como sigue:

- profundidades indefinidas:  $\left( \frac{d}{L} > 0.35 \right)$



$$p = -rgz + rgH_1 \frac{\cosh K(d+z)}{\cosh K(d+H_1)} \quad H_1 < z < 0$$

- profundidades reducidas:  $\left(0.135 < \frac{d}{L} < 0.35\right)$

$$p = -rgz + rgH_1 \frac{\cosh K(d+z)}{\cosh Kd} \quad -d < z < 0$$

- profundidades muy reducidas:  $\left(\frac{d}{L} < 0.135\right)$

$$p = -rgz + rgH_1 \frac{\cosh K(d+z)}{\cosh Kd} + rg \frac{0.3 H_1 (z+d)}{d} \quad -d < z < 0$$

Para las subpresiones dinámicas Nagai prescribe la utilización de una ley triangular con valor 1.5 ó 3  $T/m^2$  en la zona expuesta (según que la banqueta de cimentación se mantenga intacta o haya sido removida) y cero en la protegida.

### ***Teoría de Sainflou (1928)***

Sainflou publicó en 1928 una solución teórica para la distribución de presiones sobre una pared vertical debida a un tren monocromático de ondas perfectamente reflejadas. Su solución se basa en la teoría de ondas trocoidales y es parcialmente completa al segundo orden en el parámetro  $H/L$ . Se aplican las siguientes fórmulas para la superficie libre y las presiones:

$$h_{\max} = H_1 + p H_1 \left(\frac{H_1}{L}\right) \coth \left(\frac{2pd}{L}\right)$$

Nagai afirma que la solución de Sainflou solamente proporciona resultados aproximados a sus resultados experimentales en el rango  $0.13 < d/L < 0.2$  y  $H/L < 0.035$ .



$$\frac{p}{g} = -z - H_1 \frac{\sin\left(\frac{2pz}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{2pd}{L}\right) \cosh\left(\frac{2pd}{L}\right)}$$

Los resultados que se obtienen son los pesos, presiones dinámicas, subpresiones, fuerzas y momentos resultantes, así como un croquis a escala del dique calculado que permite tener una primera idea de las proporciones y aspecto del mismo.

### **OBR 3.2 - Cálculo de diques mixtos**

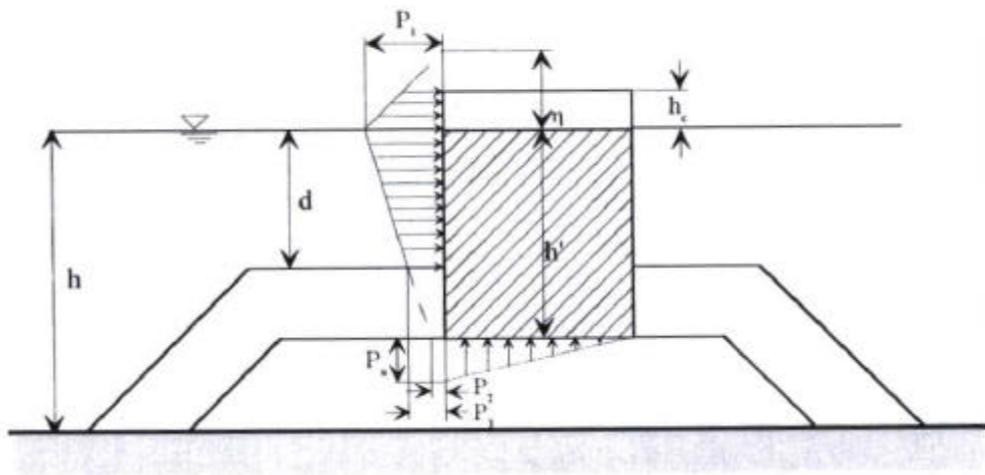
Se denominan diques mixtos en el contexto del Tutor de Ingeniería de Costas aquellos diques verticales que pueden estar expuestos a la rotura del oleaje incidente. Su tipología habitual es la de una banqueta de cimentación compuesta de piezas de escollera y una superestructura de gravedad de tipo cajón celular de hormigón o compuesta de bloques de fábrica adecuadamente entrelazados. Este tipo de diques se caracteriza por un alto coeficiente de reflexión y han tenido gran popularidad en costas con oleajes de intensidad media-alta, tales como el Mediterráneo y Japón.

La metodología que presenta este módulo es la propuesta por Goda en 1973, fruto de estudios teóricos y de laboratorio, y posteriormente corregida y adaptada a otros tipos de estructuras por él mismo y otros autores (Takahashi, 1997). Su validez queda probada tras numerosas obras esparcidas por todo el mundo. Las ventajas que presenta con respecto a otras formulaciones de fecha anterior son (Takahashi, 1997):

- Puede emplearse para todo tipo de oleajes, tanto en rotura como sin romper.
- La altura de ola de diseño es la máxima que debe soportar la estructura a lo largo de su vida útil, o bien la máxima permitida por limitación de fondo.
- Está parcialmente basada en teoría no lineal y permite introducir el efecto de una componente de presión impulsiva y otra de variación lenta.
- Presenta una formulación precisa para la subpresión dinámica.



Goda plantea una distribución de presiones sobre la pared expuesta de forma trapezoidal, tal y como aparece en la figura 5.3.4. Ésta queda perfectamente definida con los valores de  $p_1$ ,  $p_3$ ,  $p_4$  y  $p_u$ , que se calculan mediante las siguientes expresiones genéricas:



- $h$  = profundidad
- $d$  = profundidad de la berma del manto principal
- $h_c$  = elevación de la corona del dique sobre el nivel de diseño
- $h'$  = profundidad de la corona del manto secundario
- $\eta$  = máxima cota que alcanza el agua al impactar con la pared.

Figura 5.3.4. Esfuerzos sobre un dique mixto. Método de Goda



$$h^* = 0.75(1 + \cos q) I_1 H_D$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos q)(I_1 a_1 + I_2 a \cos^2 q) w_0 H_D$$

$$p_3 = a_3 p_1$$

$$p_4 = a_4 p_1$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos \theta) \lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 w_0 H_D$$

en las cuales los distintos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  toman los siguientes valores:

$$a_1 = 0.6 + 0.5 \left\{ \frac{\left( \frac{4ph}{L_D} \right)}{\sinh \left( \frac{4ph}{L_D} \right)} \right\}^2$$

$$a_2 = \min \left\{ \left( 1 - \frac{d}{h_b} \right) \frac{\left( \frac{H_D}{d} \right)^2}{3}, \frac{2d}{H_D} \right\}$$

$$a_3 = 1 - \left( \frac{h'}{h} \right) \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh \left( \frac{2ph}{L_D} \right)} \right\}$$

$$a_4 = 1 - \frac{h_c^*}{h^*}$$



$$h_c^* = \min \{h^*, h_c\}$$

donde :

$\theta$	=	ángulo entre la dirección de incidencia del oleaje y la normal al dique
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	=	factores modificadores que dependen del tipo estructural (para diques verticales convencionales con banquetas valen la unidad)
$H_d, L_d$	=	altura y longitud de onda de diseño
$\alpha_I$	=	coeficiente de presión impulsiva
$w_0$	=	peso específico del agua de mar (= $\rho g$ )
$h_b$	=	profundidad exterior a una distancia de 5 veces la altura de ola significativa.
$\min \{a, b\}$	=	el mínimo de $a$ y $b$
$\max \{a, b\}$	=	el máximo de $a$ y $b$

Los parámetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  representan la componente de presión de variación lenta y la componente de presión impulsiva respectivamente al nivel del mar en reposo, que es la cota donde el método predice la presión total máxima. Takahashi et al. (ver apartado 4.1.1.6 del “Documento de Referencia” introdujeron en 1994 el parámetro  $\alpha_i$  que tiene en cuenta el efecto de respuesta dinámica en el deslizamiento del cajón.  $\alpha_3$  representa, como se puede observar en las ecuaciones, el cociente entre la presión al pie del dique y la presión máxima; finalmente,  $\alpha_4$  es el cociente entre la presión a la cota de coronación y la máxima.

Los coeficientes de seguridad a deslizamiento ( $CSD$ ) y a vuelco ( $CSV$ ) se definen como:

$$CSD = \frac{m(W - S_p)}{\sum F_H}$$

$$CSV = \frac{M_W - M_{S_p}}{\sum M_{FH}}$$



donde:

$W$	=	peso
$S_p$	=	subpresiones
$F_H$	=	fuerzas horizontales
$M_x$	=	momento de las fuerzas $x$

$\mu$  es el coeficiente de rozamiento entre la banquetta y el dique y suele tomar valores entre 0.5 y 0.6. Valores típicos de diseño par *CSD* y *CSV* son 1.2 y 1.4 respectivamente (téngase en cuenta que el fallo por deslizamiento es por naturaleza progresivo mientras que el que se produce por vuelco inhabilita de forma brusca la estructura). La anchura del dique será la menor que satisfaga ambas condiciones de estabilidad.

El programa incorpora también un criterio de diseño para el peso de las piezas de la banquetta de apoyo propuesto por Tanimoto et al. (1982) y basado en la formulación clásica en diques de escollera del número de estabilidad:

$$N_s = \max \left\{ 1.8, 1.3 \frac{1-k}{k^3} \left( \frac{h'}{H_s} \right) + 1.8 \exp \left[ -1.5 \frac{1-k^2}{k^3} \left( \frac{h'}{H_s} \right) \right] \right\}$$

$$k = k_1 (k_2)_B$$

$$k_1 = \frac{2kh'}{\sinh 2kh'}$$

$$(k_2)_B = \max \left\{ a_2 \sin^2 \mathbf{q} \cos^2 (k B_M \cos \mathbf{q}), \cos^2 \mathbf{q} \sin^2 (k B_M \cos \mathbf{q}) \right\}$$



$k$	=	$2\pi/L'$ ; $L'$ = longitud de onda asociada a $T_s$
$B_M$	=	anchura de berma apoyo pie
$h'$	=	profundidad berma pie

donde:

$h'$	=	profundidad de apoyo de la escollera
$L'$	=	longitud de onda correspondiente a $h'$
$B_m$	=	anchura de la berma frente al dique
$\alpha_s$	=	factor corrector de tipo empírico.

El programa presenta, además de los resultados numéricos de esfuerzos, longitudes, parámetros adimensionales, etc., un croquis del dique obtenido de acuerdo a los datos propuestos, con sus dimensiones a escala. Esta utilidad permite tener una idea aproximada de la obra que se está proyectando.

## 5.4 Sección de impacto ambiental

En las últimas décadas del siglo XX ha adquirido una importancia creciente la evaluación de los impactos que una determinada actuación produce en el medio físico y biológico. El estudio de impacto ambiental, hoy en día de carácter obligatorio en la mayoría de los países civilizados, debe pertenecer a la fase de prediseño de una obra y condicionar o invalidar las posibles soluciones recomendables por consideraciones económicas o funcionales.

De todos cuantos temas se han recogido en el Tutor de Ingeniería de Costas, éste es quizás el menos dado a un análisis estrictamente numérico o cuantitativo; la tendencia natural a calificar un posible impacto como positivo o negativo, añadiendo adverbios como mucho, poco, bastante, etc., no ayuda a la objetividad ni permite fijar una metodología científica. Sin embargo, no se ha dudado en incluir en el Tic un capítulo individual dedicado al tema, siendo conscientes de que su contenido y estructura iban a ser distintos de los precedentes. Se pretende con esto hacer patente, por un lado, la gran trascendencia que tiene en la ingeniería el estudio del impacto ambiental y, por otro, la necesidad de objetivar métodos y contenidos relativos a dicho estudio.

De acuerdo con la filosofía anterior, se presenta una aplicación

informática que permite evaluar el impacto de una obra en el medio litoral, siguiendo una metodología concreta que reduce en lo posible la dependencia del criterio individual. En cualquier caso, debe tenerse presente que la evaluación de los impactos de una posible actuación es tarea que compete a un gran número de especialistas (ingenieros, biólogos, ecólogos, sociólogos, economistas, etc.) y la exactitud de dicha evaluación dependerá en última instancia del número, variedad, conocimientos e intercomunicación de los profesionales implicados. A continuación se resumen los fundamentos e hipótesis de la metodología propuesta.

## **DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN PROYECTOS DE INGENIERÍA LITORAL**

### *Metodología general*

La aplicación dedicada al estudio de impacto ambiental incluida en el Tutor de Ingeniería de Costas está basada en el método de análisis acción-factor, también conocido como método de la matriz de Leopold (1978). Este método, válido en principio para cualquier tipo de actuación, se recoge de forma ya adaptada a actuaciones propias de la ingeniería litoral, por lo que el módulo no es de aplicación a otros campos.

El objetivo último del método es obtener una lista de parejas causa-efecto o acción-impacto ordenadas según su grado de afección. Para ello, el punto de partida es hacer un inventario de todas las posibles acciones involucradas en el proyecto (en cualquiera de sus fases) y de todos los posibles factores ambientales susceptibles de ser modificados como consecuencia del mismo. Este acopio de información inicial constituye la denominada matriz de acción-factor del proyecto. Una vez obtenida esta matriz, se procede de acuerdo a los siguientes pasos:

- 1- Se valoran una a una todas las posibles parejas acción-factor de acuerdo a una serie de atributos, tal y como se expondrá más adelante. Como resultado se obtiene una cifra denominada importancia de la acción en cada caso; la totalidad de los valores de importancia conforman la matriz de importancia del proyecto.



- 2- Se determina el valor de importancia máximo, con el objeto de normalizar entre 0 y 10 todos los valores obtenidos. Se obtiene la matriz de importancia normalizada.
- 3- Según un criterio prefijado, se desprecian aquellas parejas acción-factor cuya importancia normalizada asociada sea menor que un determinado valor. Se elabora una lista de acción-impacto tomando las parejas que quedan, ordenadas de mayor a menor importancia de impacto.
- 4- Opcionalmente se crea una matriz acción-impacto depurada donde se representan con puntos negros y rojos las parejas críticas cuya importancia de impacto supera cierto valor.

En el esquema anterior, el problema fundamental radica en calcular la importancia de impacto para cada pareja acción-factor. Esta operación debe realizarse de la manera menos subjetiva posible, de modo que las cifras obtenidas no dependan del técnico encargado del estudio ni de variables no cuantificables. Para ello se consideran seis atributos que deben ser valorados de forma independiente:

- Signo (S): define si se trata de un impacto beneficioso o perjudicial
- Intensidad (I): define, como su nombre indica, la magnitud o fuerza de los daños/beneficios resultantes de la acción sobre el factor considerados (baja, media, alta, etc.)
- Extensión (E): cuantifica la manifestación espacial del fenómeno (puntual, extenso, total, etc.)
- Momento (M): se pretende con este atributo representar el tiempo de respuesta del factor a la acción (efecto inmediato, efecto a corto plazo, a largo plazo, etc.)
- Persistencia (P): sirve para representar la duración de la afección, una vez que ésta se ha manifestado (fugaz, temporal, permanente, etc.)
- Reversibilidad (R): finalmente, se recoge en este atributo la capacidad natural o artificial que tiene el elemento afectado de ser restituido a su estado previo a la actuación (corto plazo, largo plazo, irrecuperable, etc.).

En la tabla 4.1 se recoge la equivalencia que permite asociar a cada grado de valoración de un atributo una cifra. A la vista de dicha tabla, la importancia acción-factor (Imp) se determina mediante la siguiente fórmula, en la que las letras representan el valor de los distintos atributos:



$$IMP = S \cdot (3I + 2E + M + P + R)$$

En la figura 5.4.1 se presentan de manera esquemática los pasos fundamentales del método, tal y como se ha venido describiendo. En el siguiente apartado se particulariza el método para facilitar su aplicación a proyectos de ingeniería litoral.

### *Aplicación de la metodología a proyectos de ingeniería litoral*

Una vez descrito el método general, sólo resta definir las matrices acción-factor que deben ser utilizadas en cada caso concreto. Para la presente aplicación, se ha considerado una matriz genérica, válida para cualquier proyecto de ingeniería litoral, y un total de cuatro submatrices, obtenidas a partir de la general, que representan sendos proyectos tipo. La matriz genérica pretende incluir todas las acciones y factores que en un caso hipotético podrían incidir en una obra cualquiera, mientras que las reducidas corresponden a las siguientes actuaciones particulares:

- 1- Estabilización de dunas litorales
- 2- Dragados
- 3- Muros, diques y paseos marítimos
- 4- Regeneración de playas.

En las matrices reducidas se han mantenido únicamente aquellas acciones y factores propias de cada actuación. En el caso de que una obra no se enmarque de forma clara en una de las cuatro categorías consideradas, se deberá partir de la matriz genérica, desechando manualmente las combinaciones irrelevantes. La matriz genérica considerada es la suma de las correspondientes a cada proyecto particular, que se presentan en las figuras 5.4.3 a 5.4.6.

De acuerdo a este planteamiento, el primer paso para utilizar el módulo de impacto ambiental consiste en crear un proyecto nuevo o seleccionar uno antiguo que se encuentre guardado en memoria. Al crear un proyecto nuevo, se especifica a que obra tipo se refiere y se le da un nombre de identificación. Superado este punto, aparece una nueva pantalla dividida en tres columnas: la columna izquierda contiene todas las posibles acciones organizadas en un árbol desplegable (similar al árbol estándar del Explorador de Windows 95/98); la central, contiene otro árbol, pero en este caso conteniendo los factores; finalmente, la tercera columna se encuentra vacía, y está destinada a contener los

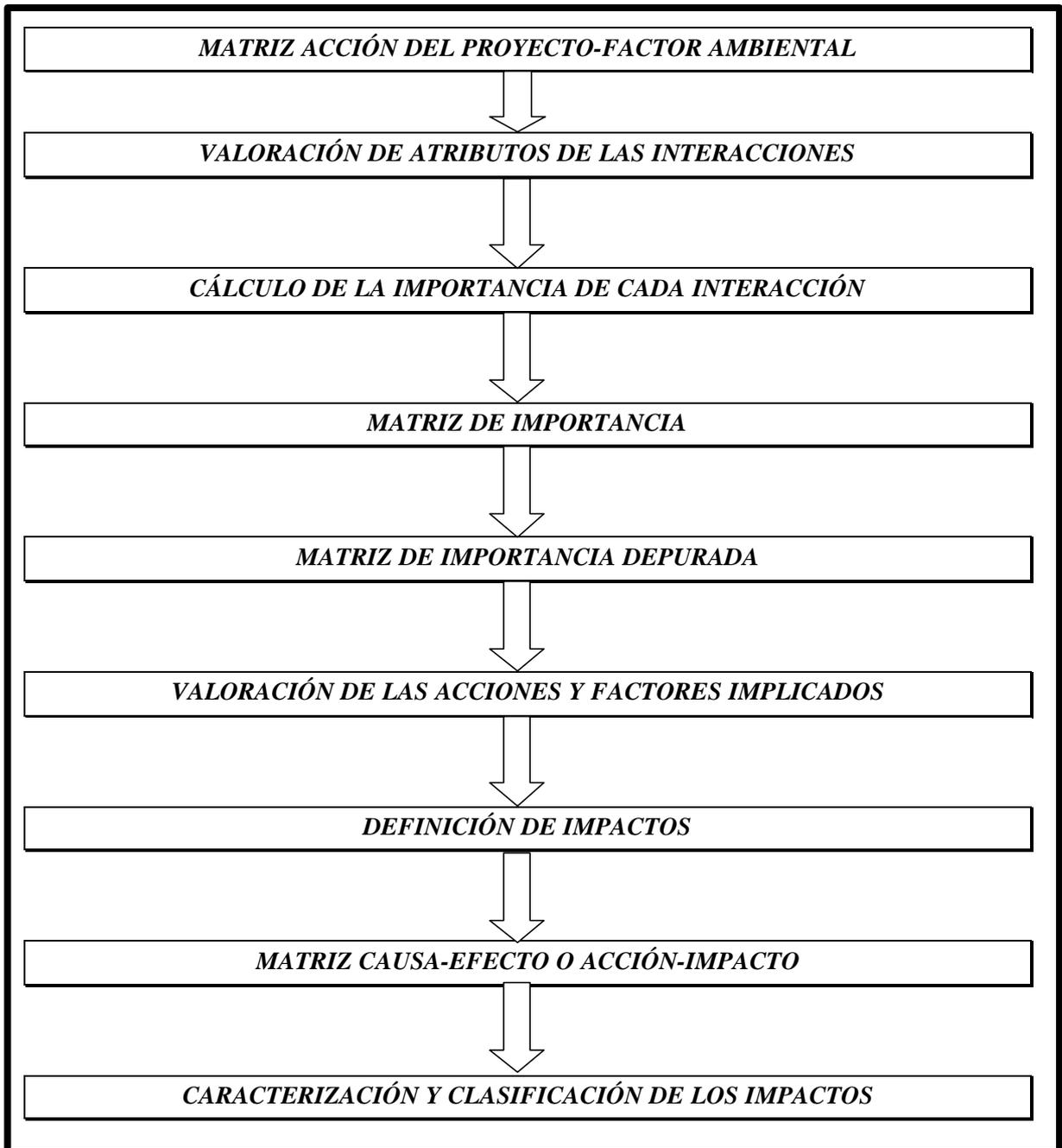


Figura 5.4.1. Esquema del método de evaluación de impacto ambiental



<p><i>SIGNO</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacto beneficioso +1</li> <li>- Impacto perjudicial -1</li> </ul>	<p><i>INTENSIDAD (I)</i> (Destrucción)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja 1</li> <li>- Media 2</li> <li>- Alta 4</li> <li>- Muy alta 8</li> <li>- Total 16</li> </ul>
<p><i>EXTENSIÓN (E)</i> (Área de influencia)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Puntual 1</li> <li>- Parcial 2</li> <li>- Extenso 4</li> <li>- Total 8</li> <li>- Crítico <math>\leq 8</math></li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Factor 2</b></p>	<p><i>MOMENTO (M)</i> (ti-to)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Largo plazo 1</li> <li>- Medio plazo 2</li> <li>- Inmediato 4</li> <li>- Crítico (+1, +4)</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Factor 1</b></p>
<p><i>PERSISTENCIA (P)</i> (Permanencia del efecto)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fugaz 1</li> <li>- Temporal 2</li> <li>- Pertinaz 4</li> <li>- Permanente 8</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Factor 1</b></p>	<p><i>REVERSIBILIDAD (K)</i> (Reconstrucción)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corto plazo 1</li> <li>- Medio plazo 2</li> <li>- Largo plazo 4</li> <li>- Irreversible 8</li> <li>- Irrecuperable 20</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Factor 1</b></p>
<p><i>MEDIDAS CORRECTORAS</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- En proyecto P</li> <li>- En obra O</li> <li>- En funcionamiento F</li> <li>- Sin posibilidad N</li> </ul>	<p><i>IMPORTANCIA</i></p> <p style="text-align: center;"><math>\pm 1X (31 + 2E + M + P + R)</math></p>

Tabla 5.1. Importancia de impacto



A3

Figura 5.4.3. Matriz acción factor para proyectos de estabilización de dunas



A3

Figura 5.4.4. Matriz acción-factor para proyectos de dragado



A3

Figura 5.4.5. Matriz acción-factor para proyectos de muros y diques



A3

Figura 5.4.6. Matriz acción-factor para proyectos de regeneración de playas

atributos de la pareja acción-factor en activo. Cada árbol mencionado puede desplegarse hasta cuatro niveles, de lo general a lo particular. Por ejemplo, en acciones de un proyecto genérico se consideran en el primer nivel tres apartados: fase de construcción, fase de funcionamiento y fase de prospección; en los factores, se consideran cuatro: medio físico, medio biológico, paisaje y medio humano.

Al desplegar los árboles, aparece un botón en la columna derecha de la pantalla que permite deshabilitar la acción o factor seleccionado. Con esto se eliminan del estudio de impacto conjuntos enteros de acciones que se consideran despreciables o inexistentes y/o de factores no presentes en el proyecto. Al llegar al último nivel de ambos árboles, se presenta una tabla en las columnas derecha donde rellenar el valor de los atributos de la pareja acción-factor en activo (figura 5.4.7), con vistas a calcular de manera automática la importancia de impacto. Esta operación de rellenar cada atributo debe realizarse con todas las acciones y factores no descartados; se trata de un proceso laborioso que el ordenador facilita en cierta medida.

A lo largo del proceso de introducción de datos, el programa calcula de forma automática las importancias de impacto normalizadas. En cualquier momento es posible pulsar el botón de ejecución correspondiente al módulo para obtener la lista de impactos; esta lista puede ordenarse de mayor a menor importancia de impacto, o viceversa. Se puede abandonar un proyecto sin perder la información introducida hasta ese momento, con vistas a dividir el trabajo en varias sesiones o a modificar posteriormente aspectos controvertidos.

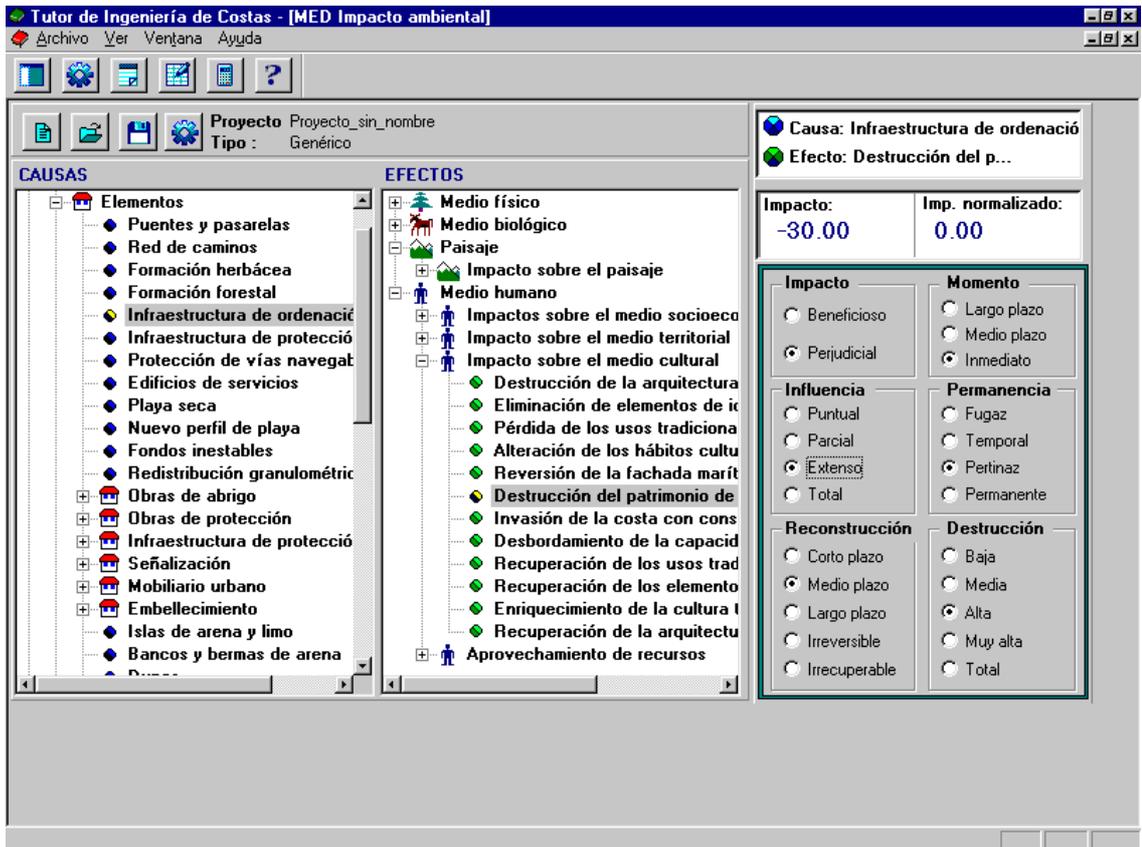


Figura 5.4.7. Aspecto genérico de un proyecto de impacto ambiental

---

## **BIBLIOGRAFÍA**



## **Bibliografía**

Ahrens, J.P. (1989). “*Stability of Reef Breakwaters*”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol 115, No. 2, March 1989, pp. 221-234.

Ahrens, J.P. and B.L. McCartney (1975). “*Wave Period Effect on the Stability of Riprap*”. Proc. of Civil Engineering in the Oceans/III, American Society of Civil Engineers, pp. 1019-1034.

Andersen, O.H. and J. Fredsoe (1983). “*Transport of Suspended Sediment Along the Coast*”. Progress Report No. 59. ISVA, Techn. Univ. of Denmark, pp. 33-46.

Bernabeu, A.M., R. Medina y M. González (1997). “*Perfil de Equilibrio en Playas Reflejantes*”. IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Universidad de Cádiz.

Bijker, E.W. (1971). “*Longshore Transport Computations*”. Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Volume 97, WW4, pp 687-701.

C.E.R.C., (1984). “*Shore Protection Manual*”. 2 Vol. Coastal Engr. Research Center. Department of the Army. Waterways Exp. Station. Vicksburg Mississippi.

Castillo, E. (1988). “*Extreme Value Theory in Engineering*”. Statistical Modeling and Decision Science. Academic Press, Inc. 389 p.

Castillo, E. (1993). “*Introducción a la Estadística Aplicada con Mathematica*”. Apuntes de la Asignatura Estadística I de la E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Univ. de Cantabria. España, 370 p.

Conesa V. (1993). “*Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental*”. Edic. Mundi-Prensa. 276 p.

D’Angremond, K., J.W. Van der Meer and R.J. De Jong (1996). “*Wave Transmission at Low-Crested Structured*”. Coastal Engineering, Vol. 2, pp. 2.418 - 2.427.

Dally, W., and R.G. Dean (1984). “*Suspended Sediment Transport and Beach Profile Solution*”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Vol. 110, No. 1, pp. 15-33.



Dally, W.R. (1992). “*Random Breaking Waves: Field Verification of a Wave-by-Wave Algorithm for Engineering Application*”. Coastal Engineering, 16, pp. 369 - 397.

Dean, R. G. (1977). “*Equilibrium Beach Profiles: U. S. Atlantic and Gulf Coasts*”. Ocean Engr. Rpt. No. 12, Univ. of Delaware, Newark.

Dean, R.G. and R.A. Dalrymple, (1984). “*Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*”. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 353 pp.

Donelan, M.A. (1980). “*Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods and Directions*”. Proceedings of the Canadian Coastal Conference National Research Council, Canada, pp. 385 - 394.

Escoffier, F.F. (1940). “*The Stability of Tidal Inlets*”. Shore and Beach, Vol. 8, No. 4, pp. 114 - 115.

Eysink, W.D. (1990). “*Morphologic Response of Tidal Basins to Changes*”. Proc. 22nd Coastal Engineering Conf., ASCE, New York, pp. 1948 - 1961.

Fenton, J.D. (1985). “*Wave Forces on Vertical Walls*”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 693 - 717.

Fenton, J. D. (1985). “*A fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves*”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 216 - 233.

Franco, L., M. de Gerloni and J.W. Van der Meer (1995). “*Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters*”. Delft Hydraulics, February 1995.

Fredsoe, J., R. Deigaard (1992). “*Mechanics of Coastal Sediment Transport*”. Advanced Series on Ocean Engine. Vol. 3, 369 p.

Goda, Y., H. Takeda and Y. Moriya (1967). “*Laboratory Investigation of Wave Transmission over Breakwaters*”. Report of the Port and Harbour Res. Inst., No. 13.  
Goda, Y. (1970). “*A Synthesis of Breaker Indices*”. Proc. ISCE, No. 180, pp. 39-49. (in Japanese)

Goda, Y. (1975). “*Irregular Wave Deformation in the Surf Zone*”. Coastal



Engineering in Japan, Vol. 18.

Goda, Y. (1985). "*Random Sea and Design of Maritime Structures*". Univ. Tokyo Press, 323 p.

Goda, Y. (1988). "*On the Methodology of Selecting Design Wave Height*". Coastal Engineering. ASCE. pp. 899 - 913.

González, E.M., (1995). "*Morfología de Playas en Equilibrio: Planta y Perfil*". Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente, E.T.S.I.C.C.P., Univ. de Cantabria, España.

Gravens, M.B., N.C. Kraus, and H. Hanson (1991). "*GENESIS: Generalized model for Simulating Shoreline Change, report 2, Workbook and User's Manual*". Technical Report CERC-89-19, Report 2 of a Series, U.S. Army Eng. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Hallermeier, R.J. (1978). "*Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion*". Proc. Int. Coastal Engr. Conf., ASCE pp. 1493 - 1512.

Hayes, M.O. (1991). "*Geomorphology and Sedimentation Patterns of Tidal Inlets: a Review*". Proc. Coastal Sediments Conf., pp. 1343 - 1355.

Hsu, J.R.C., Y. Tsuchiya and R. Silvester (1979). "*Third-Order Approximation to Short-Crested Waves*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 90, part. I, pp. 179 - 196.

Hsu, J.R.C., and C. Evans (1989). "*Parabolic Bay Shapes and Applications*." Proc., Institution of Civil Engineers, London, England, Vol. 87 (Part 2), 556 - 570.

Holland, K.T. and R.A. Holman (1993). "*The Statistical Distribution of Swash Maxima on Natural Beaches*". Journal of Geophysical Research, Vol. 98, No. C6, pp. 10.271 - 10.278.

Holman, R.A. (1986). "*Extreme Value Statistics for Wave Run-up on a Natural Beach*". Coastal Engineering, 9, pp. 527 - 544.

Horikawa, K. (1988). "*Nearshore Dynamics and Coastal Processes*". Univ. of Tokio Press.

Houston, J.R. (1996). "*Beach-Fill Design*". Advances in Coastal Engineering, Vol. 2. Philip L-F Liu (Editor), pp. 199 - 229.



Hudson, R.Y. (1953). “*Wave Forces on Breakwaters*”. Transactions of the American Society of Civil Engineers, American Society of Civil Engineers, Vol. 118, p. 653.

Hudson, R.Y. (1959). “*Laboratory Investigations of Rubble-Mound Breakwaters*”. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, American Society of Civil Engineers, Waterways and Harbors Division, Vol. 85, No. WW3, Paper No. 2171.

Hudson, R.Y. (1961a). “*Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters*”. Transactions of the American Society of Civil Engineers, American Society of Civil Engineers, Vol. 126, Pt IV.

Hunt, J.N. (1979). “*Direct Solution of Wave Dispersion Equation*”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. WW4, pp. 457 - 459.

James, W.R., (1974). “*Borrow Material Texture and Beach Fill Stability*”. Proc. of the 14th ICCE, ASCE, Vol. II, pp. 1334-1344.

Jenkins, G.M. and D.G. Watts (1986). “*Spectral Analysis and Its Applications*”. Holden-Day, San Francisco.

Kaminsky, G. M. and N. C. Kraus (1993). “*Evaluation of Depth-Limited Wave Breaking Criteria*”. Proc. Waves 93, ASCE.

Kamphuis, J.W. (1991). “*Alongshore Sediment Transport Rate*”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 117, No. 6. pp. 624 - 640.

Komar, P.D., and D.L. Inman (1970). “*Longshore Sand Transport on Beaches*”. J. Geophys. Research, 75, no. 30: 5914-27.

Komar, P.D. and M. K. Gaughan (1972). “*Airy Wave Theory and Breaker Height Prediction*”. 13<sup>th</sup> Proceedings Coastal Engineering, pp. 405 - 418.

Kraus, N.C., M. Isobe, H. Igarashi, T.O. Sasaki and K. Horikawa (1982). “*Field Experiments on Longshore Sand Transport in the Surf Zone*”. Coastal Engineering 1982, pp. 969-988.

Leopold, L.B y cols (1971). “*A Procedure for Evaluation Environmental Impact*”. Washington, USA

Longuet-Higgins, M.S. (1970). “*Longshore Currents Generated by Obliquely Incident*



*Sea Waves*". 1, 2, 5 Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778-6801.

Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart (1964). "*Radiation Stresses in Water Waves - A Physical Discussion with Applications*". Deep-Sea Res., Vol. 11, pp. 529-562.

Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart (1962). "*Radiation Stress and Mass Transport in Gravity Waves, with Application to 'Surf Beat'*". 5, Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.

Longuet-Higgins, M.S. (1983). "*On the Joint Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field*". Proc. Royal Society, London, England A389, pp. 241-258

Losada, M.A. (1992). "*Recent Developments in the Design of Mound Breakwaters*". Handbook of Coastal and Ocean Engineering, J. B. Herbich, Ed. Capítulo 21, pp. 939-1050.

Marino, J.N. and A.J. Mehta (1987). "*Inlet ebb Shoals Related to Coastal Parameters*". Proc. Coastal Sediments Conf., pp. 1608 - 1623.

Martín, F. (1995). "*Estudio Hidrodinámico de la Interacción de Ondas de Gravedad con Estructuras Reflejantes*". Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, España, 194 pp.

Massel, S.R. (1996). "*Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction*". Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 11, 491 p.

Masselink, G., and A.D. Short (1993). "*The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model*". Journal of Coastal Research, 3, pp. 785 - 800.

Medina R., M.A. Losada, I.J. Losada and C. Vidal (1994). "*Temporal and Spatial Relationship Between Sediment Grain Size and Beach Profile*". Marine Geology, Vol. 118 pp. 195 - 206.

Mei, C.C. (1983). "*The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*". World Scientific, Singapore, 734 p.

Muñoz - Pérez, J.J., L. Tejedor and R. Medina (1997). "*Equilibrium Beach Profile Model for Reef-Protected Beaches*". Journal Coastal Research, In press.



Nielsen, P. and D.J. Hanslow (1991). "*Wave Run-up Distributions on Natural Beaches*". Journal of Coastal Research, 7 (4), pp. 1139 - 1152.

O'Brien, M.P. (1931). "*Estuary Tidal Prisms Related to Entrance Areas*". Civil Engineering, Vol. 1, No. 8, pp. 738 - 739.

Renger, E. and H.W. Partenscky (1974). "*Stability Criteria for Tidal Basins*". Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, New York, pp. 1605 - 1618

Sainflou, M. (1928). "*Essay on Vertical Breakwaters*". Annals des Ponts et Chaussees, Paris (Translated by Clarence R. Hatch, Western Reserve University, Cleveland, OH).

Sarpkaya, T. and M. Isaacson (1981). "*Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*", Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 150 - 168.

Seeling, W.N. (1980). "*Two-Dimensional Tests of Wave Transmission and Reflection Characteristics of Laboratory Breakwaters*". CERC TR 80-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Seeling, W.N., P.E. and J.P. Ahrens (1995). "*Wave Reflection and Energy Dissipation by Coastal Structures*". Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures, ASCE, pp. 28 - 51.

Shuto, N. (1974). "*Nonlinear Long Waves in a Channel of Variable Section*". Coastal Engineering in Japan, Vol. 17, pp. 1-12.

Silvester, R. (1970a). "*Coastal Defense*". Proc. Inst. Civ. Eng., 45: 677 - 682.

Silvester, R. (1976). "*Headland Defense of Coasts*." Proc. 15 th. Conf. Coastal Eng., 2:1394 - 1406.

Silvester, R. (1978). "*Some Facts and Fancies on Beach Erosion*". Proc. 16 th int. conf. Coastal Eng., 2:1888 - 1902.

Stive, M.J.F. and H.G. Wind (1986). "*Cross-Shore Mean Flow in the Surf-Zone*". Coastal Engineering.

Sunamura, T. (1983). "*Determination of Breaker Height and Depth in the Field*". Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, No. 8, pp. 53-54.



Svendsen, I. A. (1984). “*Mass Flux and Undertow in a Surf-Zone*”. Coastal Engineering, 8, pp. 347 - 365.

Svendsen, I.A., H.A. Schäffer and J. B. Hansen (1987). “*The Interaction Between the Undertow and the Boundary Layer Flow on a Beach*”. Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. C11, PP. 11.845 - 11.856.

Svendsen, I.A. and J.B. Hansen (1988). “*Cross-Shore Currents in Surf-Zone Modelling*”. Coastal Engineering, pp. 23 - 42.

Takahashi, S. (1996). “*Design of Vertical Breakwaters*”. Reprinting of Coastal Structures (ICCE 96 Short Course), 25<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, Orlando, USA.

Van der Meer, J.W. and C.M. Stam (1992). “*Wave Run-up on Smooth and Rock-Slopes of Coastal Structures*”. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 118, No. 5. pp. 534 - 551.

Van der Meer, J.W. (1993). “*Conceptual Design of Rubble Mound Breakwaters*”. Delft Hydraulics, No. 483, 74 Pgs.

Van der Meer, J.W. and I.F.R. Daemen (1994). “*Stability and Wave Transmission at Low-Crested Rubble-Mound Structures*”. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. Vol. 120, No. 1 January/February, 1994, pp. 1-17.

Van der Meer, J.W. and J.P.F.M. Janssen (1995). “*Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes*”. Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures, ASCE, pp. 1-27.

Van Rijn, L.C. (1989).” *Handbook of Sediment Transport by Currents and Waves*”. Report H461, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Vellinga, P. (1982). “*Beach and Dune Erosion During Storm Surges*”. Coastal Eng., 6: 361-387.

Walton, T.L. and W.D. Adams (1976). “*Capacity of Inlet Outer Bars to Store Sand*”. Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, New York, pp. 1919 - 1937.

Wright, L.D. and A.D. Short (1984). “*Morphodynamic Variability of Surf-Zone and Beaches: a synthe*”. Marine Geology, 56, pp. 93-118.



**ANEJO I**

 **FICHAS DE LOS MÓDULOS**



<b>Módulo: DIN 1.1 - Teorías de ondas (Lineal, Stokes, Cnoidal)</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Teoría de ondas	Lineal onda progresiva Lineal onda estacionaria Stokes (orden 1 a 5) Cnoidal (orden 1 a 3)	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola	m	0.1 a 25
Prof. de propagación	m	0.01 a 10000
Periodo de la onda	seg	0.1 a 25
Corriente asociada <sup>(1)</sup>	m/seg	-5 a 5
Prof. objetivo (Profundidad objetiva)	m	-10000 a 0.001
Fase objetivo (Fase de onda objetiva)	grados	-360 a 360
<i>(1) Sólo se activa con teoría de Stokes</i>		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Longitud de onda	m	
Celeridad de onda	m/seg	
Número de onda	m <sup>-1</sup>	
Energía asociada	Julios	
Flujo de energía asociado	Wattios	
Sup. libre máxima	m	
Sup. libre mínima	m	
Prof. relativa	s.u.	
Peralte de la onda	s.u.	
Número de Ursell	s.u.	
Max. vel. hor. (perfil)	m/seg	
Max. vel. vert. (perfil)	m/seg	
Max. acel. hor. (perfil)	m/seg <sup>2</sup>	
Max. acel. vert. (perfil)	m/seg <sup>2</sup>	
Max. presión (perfil)	Pa	
Max. vel. hor. (sección)	m/seg	
Max. acel. hor. (sección)	m/seg <sup>2</sup>	
Max. vel. vert. (sección)	m/seg	
Max. acel. vert. (sección)	m/seg <sup>2</sup>	
Max. Presión (sección)	Pa	



<b>Módulo: DIN 1.1 - Teoría de ondas (Continuación)</b>	
<b>GRÁFICAS</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>
Superficie libre	
Perfiles	Vel. horizontal
	Vel. vertical
	Acel. horizontal
	Acel. vertical
	Presión
Secciones horizontales	Vel. horizontal
	Vel. vertical
	Acel. horizontal
	Acel. vertical
	Presión



<b>Módulo: DIN 2.1 - Análisis estadístico de un estado de mar</b>	
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>	
Ninguna	
<b>FICHEROS</b>	
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>
Datos con muestreo continuo	Obligatorio
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>	
Ninguna	
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>
Número de datos	
Intervalo de muestreo	seg
Media cuadrática del registro	m
Nº pasos ascendentes por cero	
Nº de crestas positivas	
Nº de crestas negativas	
Nº de senos positivos	
Nº de senos negativos	
Altura de ola media cuadrática	m
Altura de ola significativa	m
Altura de ola $H_{1/10}$	m
Altura de ola máxima	m
Periodo medio entre crestas	seg
Periodo significativo entre crestas	seg
Periodo $T_{1/10}$ entre crestas	seg
Periodo medio entre p.a.c.	seg
Periodo significativo entre p.a.c.	seg
Periodo $T_{1/10}$ entre p.a.c.	seg
Media cuadrática del registro	m
Parámetro de anchura espectral	s.u.
Coficiente de sesgo	s.u.
Coficiente de curtosis	s.u.



<b>Módulo:DIN 2.1 - Análisis estadístico de un estado de mar (Continuación)</b>	
<b>GRÁFICAS</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>
Superficie libre	
Funciones de probabilidad	Alturas de ola teórica
	Crestas teórica
	Períodos teórica
	Senos teórica
Funciones de distribución	Alturas de ola teórica
	Crestas teórica
	Períodos teórica
	Senos teórica
Histogramas	Períodos entre p.a.c.
	Períodos entre cresta máxima
	Altura de ola
	Crestas



<b>Módulo: DIN 2.2 - Análisis espectral de un estado de mar</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Filtro de suavizado	Rectangular	
	Triangular	
Tipo de segmentación	Registro segmentado	N° de datos de solape N° de segmentos
	Registro no segmentado	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Datos con muestreo continuo	Obligatorio	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Número de datos de solape <sup>(1)</sup>	0 a 1000	
Número de segmentos <sup>(1)</sup>	0.5 a 100	
Número de puntos de suavizado	0.5 a 1000	
<sup>(1)</sup> en el caso de registro segmentado		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Número de datos		
Frecuencia de muestreo	Datos/seg	
Número de segmentos		
Número de datos por segmento		
Número de datos de solape		
Grados de libertad		
Media cuadrática	m	
Altura de ola media cuadrática	m	
Altura de ola significativa	m	
Periodo medio T <sub>01</sub>	seg	
Periodo medio T <sub>02</sub>	seg	
Anchura espectral $\gamma$	s.u.	
Anchura espectral nu	s.u.	
Momento de orden 0	m <sup>2</sup>	
Momento de orden 1	m <sup>2</sup> /seg	
Momento de orden 2	m <sup>2</sup> /seg <sup>2</sup>	
Momento de orden 3	m <sup>2</sup> /seg <sup>3</sup>	
Momento de orden 4	m <sup>2</sup> /seg <sup>4</sup>	

**Módulo: DIN 2.2 - Análisis espectral de un estado de mar (Continuación)****GRÁFICAS**

<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>
Superficie libre	
Espectro de energía	



<b>Módulo: DIN 2.3 – Previsión de oleaje</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de fetch	Ilimitado	
	Restringido	
Profundidad relativa	Profundidades indefinidas	
	Profundidades reducidas	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero del fetch restringido	Opcional	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Velocidad del viento	m/seg	0.1 a 30
Duración del viento	horas	0.1 a 1000
Fetch geográfico <sup>(1)</sup>	m	1 a 1000
Ángulo de incidencia del viento <sup>(2)</sup>	grados	-360 a 360
Coordenada x del punto de inter. <sup>(2)</sup>	m	-10 <sup>6</sup> a 10 <sup>6</sup>
Coordenada y del punto de inter. <sup>(2)</sup>	m	-10 <sup>6</sup> a 10 <sup>6</sup>
Profundidad <sup>(3)</sup>	m	1 a 100
Velocidad del viento	m/seg	1 a 50
Duración del viento	horas	1 a 100
<sup>(1)</sup> Sólo en caso de fetch ilimitado <sup>(2)</sup> Sólo en caso de fetch restringido <sup>(3)</sup> Sólo en caso de profundidades reducidas		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Altura significativa prevista	m	
Periodo de pico previsto	seg	
Fetch equivalente <sup>(1)</sup>	m	
Ángulo crítico de generación <sup>(1)</sup>	grados	
Desv. Generación <sup>(1)</sup>	grados	
Limitaciones <sup>(2)</sup>	s.u.	
<sup>(1)</sup> Sólo en caso de fetch restringido <sup>(2)</sup> Oleaje limitado por fetch, por duración del viento o totalmente desarrollado		
<b>GRÁFICAS</b>		
Ninguna		



Módulo: DIN 2.4 – Regímenes extremales. Método POT		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
Ninguna		
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Valores extremos	Obligatorio	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola umbral	m	0.01 a 25
Número de temporales	n temp/año	0.1 a 1000
Periodo de retorno de cálculo	años	5 a 500
% Banda de confianza	s.u.	50 a 99.9
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Coeficiente Weibull I	s.u.	
Coeficiente Weibull II	s.u.	
Coeficiente Weibull III	s.u.	
Coeficiente Weibull IV	s.u.	
Coeficiente Gumbel	s.u.	
Función de mejor ajuste	s.u.	
Valor de nu	s.u.	
Coeficiente óptimo	s.u.	
Altura ola de cálculo sin banda de confianza	m	
Altura ola de cálculo con banda de confianza	m	
Parámetro de localización	s.u.	
Parámetro de escala	s.u.	
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Recta de ajuste	Datos	
	Recta de ajuste	
Curva $T_r - H$	Datos	
	Ajuste sin banda de confianza	
	Ajuste con banda de confianza	



<b>Módulo: DIN 2.5 –Regímenes extremales. Ajuste de colas</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de ajuste	Gumbel	
	Frechet	
	Weibull máximos	
	Weibull mínimos	
	Log-Normal	
Tipo de regresión	Mínimos cuadrados	
	Mínimos cuadrados ponderados	
Fórmula de punteo	i/ (N+1)	
	Blom	
	Hazen	
	Gringorten	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de alturas	Obligatorio	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Parámetro $\lambda$	arbitrarias	-10000 a 10000
Umbral de censura	arbitrarias	-10000 a 10000
Periodo de retorno	años	5 a 500
% Banda de confianza	s.u.	50 a 99.99
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Porcentaje censurado	s.u.	
Coeficiente de correlación	s.u.	
Coef. A de la recta de ajuste	s.u.	
Coef. B de la recta de ajuste	s.u.	
Parámetro $\delta^{(1)}$	arbitrarias	
Parámetro $\lambda^{(1)}$	arbitrarias	
Parámetro $\beta^{(1)}$	arbitrarias	
Parámetro $\sigma^{(2)}$	arbitrarias	
Parámetro $\mu^{(2)}$	arbitrarias	



<b>Módulo: DIN 2.5 –Regímenes extremales. Ajuste de colas (Continuación)</b>	
Valor cálculo sin banda de confianza	arbitrarias
Valor cálculo con banda de confianza	arbitrarias
<sup>(1)</sup> <i>Sólo si la función de ajuste no es de tipo Log-Normal</i> <sup>(2)</sup> <i>Sólo en caso de ajuste con función de prob. Log-Normal</i>	
<b>GRÁFICAS</b>	
<i><b>Nombre</b></i>	<i><b>Opciones</b></i>
Recta de ajuste	Datos
	Recta de ajuste
Distribución T <sub>r</sub> - H	Sin banda de confianza
	Banda de confianza superior
	Banda de confianza inferior



<b>Módulo: DIN 3.1 - Propagación de ondas</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de batimetría	Pendiente constante	
	Batimetría arbitraria	
Teoría de asomeramiento	Lineal	
	Shuto	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de perfil de batimetría	Opcional	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Pendiente media del fondo <sup>(1)</sup>	s.u.	0.001 a 0.5
Altura de ola inicial	m	0.1 a 25
Periodo de onda	seg	1.25
Distancia costa inicial	m	10 a 10000
Ángulo de incidencia inicial	grados	0.80
Profundidad objetivo	m	0.1 a 1000
<sup>(1)</sup> Sólo con batimetría de pendiente constante		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Altura de ola en rotura	m	
Profundidad en rotura	m	
Ángulo de incidencia en rotura	grados	
Longitud de de onda en rotura	m	
Altura de ola en prof. indef.	m	
Alt. de ola en prof. objetivo	m	
Long. onda en prof. objetivo	m	
Ang. incidencia prof. objetivo	grados	
Dist. a la costa prof. objetivo	m	
Número de Iribarren a rotura	s.u.	
Tipo de rotura	s.u. <sup>(1)</sup>	
<sup>(1)</sup> Decrestamiento, voluta colapso u oscilación		



<b>Módulo: DIN 3.1 - Propagación de ondas (Continuación)</b>	
<b>GRÁFICAS</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>
Gráficas de evolución	Batimetría
	Set-up
	Altura de ola
	Ángulo de incidencia



<b>Módulo: DIN 3.2 - Propagación de oleaje</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de batimetría	Pendiente constante	
	Batimetría arbitraria	
Teoría de asomeramiento	Lineal	
	Shuto	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de perfil de batimetría	Opcional	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
H <sub>s</sub> en profundidades indefinidas	m	0.1 a 25
T <sub>p</sub> en profundidades indefinidas	seg	1 a 25
Profundidad objetivo	m	0.1 a 1000
Distancia a la costa del punto inicial de propagación	m	10 a 10000
Pendiente media de la playa <sup>(1)</sup>	s.u.	0.001 a 0.5
<i><sup>(1)</sup> Sólo en caso de fondo de pendiente constante</i>		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Altura cuadrática media en punta objetiva	m	
Altura significativa en punta objetiva	m	
Altura máxima en punta objetiva	m	
Sobreelevación media en punta objetiva	m	
Distancia a la costa del punta objetiva	m	
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Gráficas de evolución	Batimetría	
	Altura de ola media cuadrática	
	Sobreelevación media	
	Altura de ola máxima	
	Altura de ola significativa	



<b>Módulo: DIN 3.3 - Rotura</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de cálculo	Calcular profundidad en rotura	
	Calcular altura de ola en rotura	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola en rotura <sup>(1)</sup>	m	0.1 a 20
Profundidad en rotura <sup>(2)</sup>	m	0.1 a 100
Periodo de la onda	seg	1 a 25
Altura de ola en prof. indef.	m	0.1 a 25
Pendiente media en Z.R.	s.u.	0.001 a 0.5
<sup>(1)</sup> Sólo en el caso de cálculo de la profundidad de rotura <sup>(2)</sup> Sólo en el caso de cálculo de la altura de ola en rotura		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i> <sup>(3)</sup>	<i>Unidades</i>	
Onda solitaria	m	
Weggel	m	
Goda	m	
Sunamura	m	
Kaminsky-Krauss	m	
Miche	m	
Ostendorf-Madsen	m	
Battjes	m	
Kamphuis	m	
Larson-Kraus	m	
<sup>(3)</sup> Se calculará, de acuerdo a cada uno de los criterios que se enumeran, bien la altura de ola en rotura o la profundidad de rotura según la opción de cálculo elegida.		
<b>GRÁFICAS</b>		
Ninguna		



<b>Módulo: DIN 3.4 - Run-up en playas</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Formulación de cálculo	Nielsen y Hanslow	
	Holman	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola significativa	m	0.1 a 25
Periodo de pico	seg	1 a 25
Pendiente media del frente de playa	s.u.	0.01 a 0.5
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Número de Iribarren	s.u.	
Run-up medio	m	
Avance medio de la línea de costa	m	
Run-up significativa	m	
Avance signif. de la línea de costa	m	
Run-up 2%	m	
Avance 2% de la línea de costa	m	
Run-up 1%	m	
Avance 1% de la línea de costa	m	
<b>GRÁFICAS</b>		
Ninguna		



<b>Módulo: DIN 3.5 - Corrientes longitudinales</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Teoría de cálculo	Longuet-Higgins sin mezcla turbulenta	
	Longuet-Higgins con mezcla turbulenta	
Tipo de batimetría	Pendiente constante	
	Batimetría arbitraria	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de perfil de batimetría	Opcional	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola en rotura	m	0.1 a 25
Periodo de la onda	seg	1 a 25
Ángulo de incidencia en rotura	grados	-60 a 60
Coeficiente de fricción de fondo	s.u.	0.001 a 10
Coeficiente Longuet-Higgins <sup>(1)</sup>	s.u.	0.1 a 10
<sup>(1)</sup> Sólo en el caso de teoría con mezcla turbulenta		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Punto de rotura	m	
Prof. del punto de rotura	m	
Máx. corriente longitudinal	m/seg	
Punto de máx. corriente. long.	m	
Prof. punto máx. corriente long.	m	
Corriente longitudinal media	m/seg	
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Gráficas de evolución	Batimetría	
	Velocidad longitudinal	



<b>Módulo: DIN 3.6 - Corrientes de retorno</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Formulación	Stive y Wind 1986	
	Svendsen 1987	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola	m	0.1 a 25
Periodo de la onda	seg	1 a 25
Profundidad media	m	0.1 a 1000
Profundidad del seno de la onda	m	0.1 a 1000
Diámetro medio del sedimento <sup>(1)</sup>	mm	0.06 a 10
<sup>(1)</sup> Sólo con la formulación de Svendsen 1987		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Corriente de retorno media	m/seg	
Corriente de retorno máxima	m/seg	
Corriente de retorno en el fondo	m/seg	
Tensión tangencial en el fondo <sup>(1)</sup>	Pa.	
Altura de la capa límite <sup>(1)</sup>	m	
Coef. de fricción de fondo <sup>(1)</sup>	s.u.	
<sup>(1)</sup> Sólo con la formulación de Svendsen 1987		
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Perfil de corriente de resaca		



<b>Módulo: DIN 4.1 - Marea meteorológica</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de batimetría	Pendiente constante	
	Batimetría arbitraria	
Causa de la sobreelevación	Viento	
	Presión	
	Viento y presión	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de perfil de batimetría	Opcional	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Pendiente media del fondo <sup>(1)</sup>	s.u.	0.001 a 0.5
Velocidad del viento <sup>(2)</sup>	m/seg	0 a 30
Ang. incidencia del viento <sup>(2)</sup>	grados	0 a 90
Presión centro borrasca <sup>(3)</sup>	Mb	900 a 1200
Radio de la borrasca <sup>(3)</sup>	Km	1 a 10000
Dist.centro borrasca <sup>(3)</sup>	Km	0 a 10000
<sup>(1)</sup> Sólo en caso de batimetría con pendiente constante <sup>(2)</sup> Sólo en caso de cálculo de sobreelevación por viento <sup>(3)</sup> Sólo en caso de sobreelevación por presión		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Coef. fricción por viento <sup>(1)</sup>	s.u.	
Sobreelev. por viento <sup>(1)</sup>	m	
Sobreelev. por presión <sup>(2)</sup>	m	
Sobreelev. total	m	
Avance de la línea de costa	m	
<sup>(1)</sup> Sólo en caso de cálculo de sobreelevación por viento <sup>(2)</sup> Sólo en caso,de sobreelevación por presión		
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Gráfica de sobreelevaciones	Batimetría	
	Distribución de sobreelevaciones	



<b>Módulo: DIN 4.2 - Marea astronómica (Continuación)</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de datos	Registro de corta duración	
	Rías y estuarios	
	Registro de larga duración	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Datos con muestreo continuo	Obligatorio	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Días		0 a 1000
Horas		0 a 1000
Minutos		0 a 1000
<sup>(1)</sup> Uno/a por cada componente deseada		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Número de componentes	s.u.	
Incremento de tiempo	seg	
Número de datos	s.u.	
Duración del registro	días	
Nivel medio	m	
Error cuadrático medio	m	
Error medio	m	
Error máximo	m	
Nivel de cálculo	m	
Nombre de componente <sup>(1)</sup>	s.u.	
Frecuencia de componente <sup>(1)</sup>	grados/horas	
Amplitud de componente <sup>(1)</sup>	m	
Desfase de componente <sup>(1)</sup>	grados	
<sup>(1)</sup> Para cada una de las componentes		
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Ajuste de superficie libre	Sup. libre medida	
	Sup. libre ajustada	



<b>Módulo: SED 1.1 - Análisis granulométrico</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
Ninguna		
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de granulometrías	Obligatorio	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Densidad del sedimento <sup>(1)</sup>	kg/m <sup>3</sup>	1000-5000
Diámetro mínimo del sedimento <sup>(2)</sup>	mm	0.01-100
<sup>(1)</sup> Sólo si se desean calcular velocidades de caída de grano		
<sup>(2)</sup> Sólo si se desea aplicar pérdida de finos		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Diámetro D <sub>50</sub> <sup>(1)</sup>	mm	
Diámetro D <sub>84</sub> <sup>(1)</sup>	mm	
Diámetro D <sub>16</sub> <sup>(1)</sup>	mm	
Sesgo <sup>(1)</sup>	s.u.	
Curtosis <sup>(1)</sup>	s.u.	
Velocidad de caída media <sup>(1)</sup>	m/seg	
Clasificación según Wentworth <sup>(1)</sup>	s.u.	
Factor de relleno de James	s.u.	
Factor de realimentación	s.u.	
<sup>(1)</sup> Un valor por cada granulometría		
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Funciones de probabilidad <sup>(1)</sup>	Unidades métricas (mm)	
	Unidades $\phi$	
Funciones de distribución <sup>(1)</sup>	Unidades métricas (mm)	
	Unidades $\phi$	
Distribuciones de pesos <sup>(1)</sup>		
<sup>(1)</sup> Una gráfica por cada granulometría		



<b>Módulo: SED 2.1 - Formulación de Van Rijn</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de oleaje	Sea	
	Swell	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola de cálculo	m	0.1 a 25
Periodo de la onda de cálculo	seg	1 a 25
Corriente media	m/seg	0 a 10
Ángulo ola-corriente	grados	0 a 180
Profundidad	m	0.1 a 1000
Diámetro D <sub>50</sub> del sedimento	mm	0.01 a 100
Diámetro D <sub>90</sub> del sedimento	mm	0.01 a 100
Peso específico del sedimento	kg/m <sup>3</sup>	100 a 10000
Ángulo rozamiento interno sed.	grados	10 a 80
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Tipo de transporte	s.u.	
Caudal sólido total	m <sup>3</sup> /seg	
Caudal sólido por fondo	m <sup>3</sup> /seg	
Caudal sólido en suspensión	m <sup>3</sup> /seg	
Ángulo de transporte	Grados	
Tensión crítica	Pa.	
Tensión ola corriente	Pa.	
Tensión debida a la ola	Pa.	
Tensión debida a la corriente	Pa.	
Vel. orbital máximo en el fondo	m/seg	
Amplitud orbital en el fondo	m	
Rugosidad de grano de la ola	m	
Rugosidad de grano de la corriente	m	
Rugosidad de lecho de la ola	m	
Rugosidad de lecho de la corriente	m	
Rugosidad total debida a la ola	m	



<b>Módulo: SED 2.1 - Formulación de Van Rijn (Continuación)</b>	
Rugosidad total de la corriente	m
Parámetro Shields crítico	s.u.
Régimen de transporte	s.u.
Valor de $D^*$	s.u.
Tipo	s.u.
Dimensión vertical formas lecho	m
Longitud de onda de formas lecho	m
<b>GRÁFICAS</b>	
Ninguna	



<b>Módulo: SED 3.1 - Perfil de playa</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de ejecución	Calcular un perfil teórico	
	Ajustar un perfil real	
Perfil teórico	Dean	
	Perfil con difracción	
	Perfil con laja	
	Perfil con marea	
	De Vellinga	
Tipo de ajuste <sup>(1)</sup>	$y = a \cdot x^{2/3}$	
	$y = a \cdot x^m$	
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de perfil de batimetría	Opcional	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola significativa $H_{s12}$ <sup>(6)</sup>	m	0.1 a 25
Periodo de pico $T_{p12}$ <sup>(7)</sup>	seg	1 a 100
Coeficiente de propagación <sup>(7)</sup>	s.u.	0.01 a 10
Diámetro nominal de sedimento	mm	0.01 a 100
Dist. costa punto de difracción <sup>(2)</sup>	m	1 a 10000
Profundidad de la laja <sup>(3)</sup>	m	1 a 1000
Carrera de marea <sup>(4)</sup>	m	0 a 10
Altura significativa en profs. indefinidas <sup>(5)</sup>	m	0.1 a 25
Nivel de marea <sup>(1)</sup>	m	0 a 10
<sup>(1)</sup> Sólo en el caso de ajuste del perfil real <sup>(2)</sup> Sólo en el caso de perfil con difracción <sup>(3)</sup> Sólo en el caso de perfil con laja <sup>(4)</sup> Sólo en el caso de perfil con marea <sup>(5)</sup> Sólo en el caso de perfil de Vellinga <sup>(6)</sup> En todos los perfiles a excepción del de Vellinga <sup>(7)</sup> En todos los perfiles a excepción del de difracción y del de Vellinga		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Velocidad de caída de grano <sup>(1)</sup>	m/seg	
Parámetro A de Dean <sup>(1)</sup>	s.u.	
Profundidad de corte	m	
Error cuadrático medio <sup>(2)</sup>	s.u.	
Posición de mejor ajuste <sup>(2)</sup>	m	



<b>Módulo: SED 3.1 - Perfil de playa (Continuación)</b>	
A mejor ajuste <sup>(2)</sup>	s.u.
Exponente de mejor ajuste <sup>(3)</sup>	s.u.
<b>GRÁFICAS</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>
Perfil	Perfil de ajuste
	Perfil medido <sup>(2)</sup>
<sup>(1)</sup> Sólo en la opción de perfil teórico <sup>(2)</sup> Sólo en la opción de ajustar un perfil real	



<b>Módulo: SED 4.1 - Transporte longitudinal</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de batimetría	Pendiente constante	
	Batimetría arbitraria	
Formulación	Komar e Inman (CERC)	
	Kraus et al.	
	Kamphuis	
	Bijker	
Criterio de rotura	Onda solitaria	
	Weggel	
	Goda	
	Sunamura	
	Kaminsky-Krauss	
	Miche	
	Ostendorf-Madsen	
	Battjes	
	Kamphuis	
Larson-Kraus		
<b>FICHEROS</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Tipo</i>	
Fichero de perfil de batimetría	Opcional	
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola significativa en rotura	m	0.1 a 25
Periodo de pico de la onda	seg	1 a 100
Ángulo de incidencia en rotura <sup>(1)</sup>	grados	0 a 60
Densidad del sedimento	kg/m <sup>3</sup>	1000 a 5000
Diámetro nominal del sedimento <sup>(2)</sup>	m	0.1 a 10
Porosidad de la arena <sup>(3)</sup>	s.u.	0.1 a 0.8
Coeficiente K <sup>(4)</sup>	s.u.	0 a 10
Velocidad longitudinal media <sup>(5)</sup>	m/seg	0 a 10
Rugosidad del lecho <sup>(6)</sup>	m	0.001 a 1
Pendiente media <sup>(6)</sup>	s.u.	0.001 a 0.5



<b>Módulo: SED 4.1 - Transporte longitudinal (Continuación)</b>		
Pendiente media en rotura <sup>(7)</sup>	s.u.	0 a 0.5
Altura significativa en prof. indef. <sup>(8)</sup>	m	0.1 a 25
<p><sup>(1)</sup> Sólo con la formulación de Kamphuis</p> <p><sup>(2)</sup> Sólo con la formulación de Kamphuis y Bijker</p> <p><sup>(3)</sup> Sólo con las formulaciones de Komar e Inman y la de Kamphuis</p> <p><sup>(4)</sup> Sólo con la formulación Komar e Inman</p> <p><sup>(5)</sup> Sólo con la formulación de Kraus    <sup>(6)</sup> Sólo con la formulación de Bijker</p> <p><sup>(7)</sup> Sólo con las formulaciones de Komar e Inman y Kraus, con los criterios de rotura de Weggel, Goda, Sunamura, Kaminsky-Kraus, Ostendorf-Madsen, Battjes, Kamphuis y Larson y Kraus.</p> <p><sup>(8)</sup> Sólo con las formulaciones de Komar e Inman y Kraus, con los criterios de rotura de Kaminsky-Kraus y Larson y Kraus. También para las formulaciones de Kamphuis y Bijker con los criterios de rotura de Kaminsky-Kraus y Larson y Kraus.</p>		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Caudal sólido total	m <sup>3</sup> /seg	
Volumen diario	m <sup>3</sup>	
Volumen mensual	m <sup>3</sup>	
Volumen anual	m <sup>3</sup>	
Profundidad de rotura	m	
Velocidad longitudinal media	m/seg	
Caudal sólido por fondo	m <sup>3</sup> /seg	
Caudal sólido en suspensión	m <sup>3</sup> /seg	
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Distribución de transporte	Batimetría	
	Velocidad longitudinal	
	Altura de ola	
	Sobreelevación del nivel medio	
	Transporte longitudinal	



<b>Módulo: SED 4.2 - Forma en planta de equilibrio</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Caso de ejecución	Parábola de Hsu	
	Espiral logarítmica	
	Tómbolo	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Periodo de onda <sup>(5)</sup>	seg	0.01 a 25
Ángulo de incidencia <sup>(3)</sup>	grados	-60 a 90
Profundidad media <sup>(5)</sup>	m	0.1 a 1000
Radio del punto de paso <sup>(1)</sup>	m	1 a 10000
Ángulo del punto de paso <sup>(1)</sup>	grados	0 a 270
Radio máximo <sup>(2)</sup>	m	1 a 10000
Ángulo $\alpha$ <sup>(2)</sup>	grados	0 a 60
Distancia a la costa del dique <sup>(4)</sup>	m	1 a 10000
Semilongitud del dique <sup>(4)</sup>	m	1 a 1000
<sup>(1)</sup> Sólo en el caso de la parábola de Hsu <sup>(2)</sup> Sólo en el caso de espiral logarítmica <sup>(3)</sup> Sólo para el caso de la parábola de Hsu y de la espiral logarítmica <sup>(4)</sup> Sólo en el caso del tómbolo <sup>(5)</sup> Sólo para el caso de la parábola de Hsu y tómbolos		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Distancia Y <sup>(1)</sup>	m	
Parámetro Y/L <sup>(2)</sup>	s.u.	
Ángulo $\alpha_{\min}$ <sup>(1)</sup>	grados	
Coefficiente C <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	s.u.	
Coefficiente C <sub>1</sub> <sup>(1)</sup>	s.u.	
Coefficiente C <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>	s.u.	
Tipo de tómbolo <sup>(3)</sup>	s.u.	
Parámetro B/L <sup>(3)</sup>	s.u.	
Semianchura en tierra <sup>(3)</sup>	m	
Semianchura en dique <sup>(3)</sup>	m	



<b>Módulo: SED 4.2 - Forma en planta de equilibrio (Continuación)</b>	
Anchura mínima <sup>(3)</sup>	m
Longitud saliente <sup>(3)</sup>	m
<sup>(1)</sup> Sólo en el caso de la parábola de Hsu <sup>(2)</sup> Sólo en el caso de parábola de Hsu y tómbolos <sup>(3)</sup> Sólo en caso de tómbolos	
GRÁFICAS	
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>
Gráfico de la planta de equilibrio <sup>(1)</sup>	
<sup>(1)</sup> Sólo en el caso de parábola de Hsu y espiral logarítmica	



<b>Módulo: SED 5.1 - Estados morfodinámicos de playas</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
Ninguna		
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Carrera de marea	m	0 a 25
Altura de ola en indefinidas	m	0.1 a 25
Periodo de onda	seg	0.1 a 25
Coeficiente de propagación	s.u.	0.01 a 1
Diámetro nominal del sedimento	mm	0.001 a 100
Densidad del sedimento	kg/m <sup>3</sup>	100 a 5000
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Velocidad de caída de grano	m/seg	
Parámetro adim. de caída de grano	s.u.	
Carrera de marea adimensional	s.u.	
Clasificación por carrera de marea		
Estado de playa		
<b>GRÁFICAS</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Opciones</i>	
Gráfico del estado de playa		



<b>Módulo: SED 6.1 - Relaciones de equilibrio en estuarios</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de formulación	Tipo 1: Relación prisma de marea - área de la canal	
	Tipo 2: Relación prisma de marea - volumen de	
	Tipo 3: Relación área de la bahía - área de	
Formulaciones tipo 1	O'Brian	
	Johnson	
Formulaciones tipo 2	Bruun	
	Walton y Adams	
	Marino y Mehta	
Formulaciones tipo 3	Renger y Partenssky	
Tipo de desembocadura <sup>(1)</sup>	Sin diques	
	Con diques	
Condiciones de navegación <sup>(2)</sup>	Buenas (sin barras)	
	Regulares: inicio de barras	
	Malas (barra exterior)	
	Rotura en barra exterior	
Grado de exposición <sup>(3)</sup>	Estuario moderadamente expuesto	
	Estuario altamente expuesto	
<sup>(1)</sup> Sólo con formulaciones de tipo 1 <sup>(2)</sup> Sólo con formulación de tipo 2 y opción Bruun <sup>(3)</sup> Sólo con formulación de tipo 2 y opción Walton y Adams		
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Prisma de marea viva medio <sup>(1)</sup>	m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> a 10 <sup>10</sup>
Prisma de marea medio <sup>(2)</sup>	m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> a 10 <sup>10</sup>
Cociente anchura / profundidad <sup>(4)</sup>	s.u.	0.1 a 100
Área de la bahía <sup>(3)</sup>	km <sup>2</sup>	0.1 a 100
<sup>(1)</sup> Sólo con formulaciones de tipo 1 y opción O'Brien <sup>(2)</sup> Sólo con formulación de tipo 1 y opción Johnson y formulaciones de tipo 2 <sup>(3)</sup> Sólo con la formulación de tipo 3 <sup>(4)</sup> Sólo con formulación de tipo 2 y opción Marino y Mehta		



<b>Módulo: SED 6.1 - Relaciones de equilibrio en estuarios (Continuación)</b>	
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>
Área de la canal <sup>(1)</sup>	m <sup>2</sup>
Volumen de arena <sup>(2)</sup>	m <sup>3</sup>
Área de marismas <sup>(3)</sup>	km <sup>2</sup>
<sup>(1)</sup> Sólo con formulaciones de tipo 1 <sup>(2)</sup> Sólo con formulación de tipo 2 <sup>(3)</sup> Sólo con la formulación de tipo 3	
<b>GRÁFICAS</b>	
Ninguna	



<b>Módulo: OBR 1.1 - Run-up en diques en talud</b>	
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>	
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>
Teoría de cálculo	Van der Meer y Janssen
	Ahrens-McCartney
	Losada y Giménez-Curto
Tipo de talud <sup>(1)</sup>	Liso
	Rugoso
Piezas con la formulación de Ahrens-McCartney y talud rugoso	Rip-rap
	Escollera sin núcleo
	Dos capas de escollera con núcleo
	Cubos
	Tetrápodos
	Cuadrípodos
	Hexápodos
	Tribares
	Dolos
Piezas con la formulación de Losada y Giménez-Curto	Escollera sin clasificar
	Escollera clasificada
	Tetrápodos
	Dolos
	Cuadrípodos
	Cubos
Piezas con la formulación de Van de Meer y Janssen	Pendiente lisa (asfalto, hormigón, mampostería)
	Hierba (3 cm)
	Una capa de escollera
	Dos o más capas de escollera
	Bloques cúbicos (sup. cubierta = 1/25)
	Bloques cúbicos (sup. cubierta = 1/9)
	Bloques paralelepípedicos (sup. cubierta = 1/25)
	Cubos sólo por encima del SWL (sup. cubierta =
	Bloques alargados (esbeltez = 5; sup. cubierta = 1 / 4)
	Elementos alargados (esbeltez = 7)
<sup>(1)</sup> Sólo en la teoría de Ahrens - McCartney	
<b>FICHEROS</b>	
Ninguno	



<b>Módulo: OBR 1.1 - Run-up en diques en talud (Continuación)</b>		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola de diseño	m	0.1 a 25
Periodo de diseño	seg	1 a 100
Talud de la estructura	s.u.	0.5 a 10
Ángulo de incidencia <sup>(1)</sup>	grados	0 a 60
Profundidad a pie de dique <sup>(2)</sup>	m	0.1 a 10
<sup>(1)</sup> Sólo en la teoría de Van der Meer y Janssen <sup>(2)</sup> Sólo en el caso de la teoría de Van der Meer y Janssen y en la de Losada y Giménez-Curto		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Valor por run-up	m	
Número de Iribarren	s.u.	
<b>GRÁFICAS</b>		
Ninguna		



<b>Módulo: OBR 1.2 - Rebase en diques en talud</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de piezas	Pendiente lisa (asfalto, hormigón, mampostería)	
	Hierba (3 cm)	
	Una capa de escollera	
	Dos o más capas de escollera	
	Bloques cúbicos (sup. cubierta = 1/25)	
	Bloques cúbicos (sup. cubierta = 1/9)	
	Bloques paralelepípedicos (sup. cubierta = 1/25)	
	Cubos sólo por encima del SWL (sup. cubierta =	
	Bloques alargados (esbeltez = 5; sup. cubierta = 1 / 4)	
	Elementos alargados (esbeltez = 7)	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Ángulo de incidencia	grados	-60 a 60
Probabilidad rebase de cálculo	s.u.	$10^{-6}$ a 0.999
Altura significativa	m	0.1 a 25
Periodo de pico	seg	1 a 100
Talud del dique	s.u.	0.5 a 10
Francobordo del dique	m	-25 a 25
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 1000
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Caudal medio de rebase	$m^3/seg$	
Número de Iribarren	s.u.	
Volumen de rebase	$m^3$	
<b>GRÁFICAS</b>		
Ninguna		



<b>Módulo: OBR 1.3 - Transmisión en diques en talud</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Teoría de cálculo	Seelig	
	D'Angremond	
Piezas <sup>(1)</sup>	Rip-rap	
	Escollera sin núcleo	
	Dos capas de escollera con núcleo	
	Cubos	
	Tetrápodos	
	Cuadrípodos	
	Hexápodos	
	Tribares	
	Dolos	
Tipo de núcleo <sup>(2)</sup>	Permeable	
	Impermeable	
<sup>(1)</sup> Sólo en la teoría de Seelig <sup>(2)</sup> Sólo en la teoría de D'Angremond		
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola	m	0.1 a 25
Periodo de pico	seg	1 a 100
Talud del dique	s.u.	0.5 a 10
Francobordo	m	-25 a 25
Ancho de coronación	m	1 a 1000
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 1000
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Coeficiente de transmisión	s.u.	
Altura de ola transmitida	m	
Número de Iribarren	s.u.	
<b>GRÁFICAS</b>		
Ninguna		



<b>Módulo: OBR 1.4 - Reflexión en diques en talud</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de talud	Superficie lisa	
	Superficie rugosa	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola media cuadrática	m	0.1 a 25
Periodo de pico	seg	0.1 a 100
Talud de la estructura	s.u.	0.5 a 100
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 200
Diámetro nominal <sup>(1)</sup>	m	0.1 a 1000
Permeabilidad nocional <sup>(1)</sup>	s.u.	0.1 a 0.99
<i><sup>(1)</sup> Sólo con superficie rugosa</i>		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Coef. de reflexión	s.u.	
Altura de ola reflejada	m	
Número de Iribarren	s.u.	
<b>GRÁFICAS</b>		
Ninguna		



<b>Módulo: OBR 2.1 - Estabilidad en diques en talud no rebasables</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Teoría de cálculo	Hudson	
	Losada y Giménez-Curto	
	Van der Meer	
Piezas	Escollera	
	Cubos	
	Tetrápodos	
	Acrópodos <sup>(1)</sup>	
Avería <sup>(1)</sup>	Inicio de avería	
	Avería de Iribarren	
	Inicio de destrucción	
<i><sup>(1)</sup> Sólo con la formulación de Van der Meer</i>		
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
K <sub>d</sub> de Hudson <sup>(3)</sup>	s.u.	0.1 a 100
Coeficiente capa manto principal <sup>(1)</sup>	s.u.	0.5 a 1.5
Porosidad manto principal <sup>(1)</sup>	s.u.	0.1 a 0.8
Altura de ola de diseño	m	0.1 a 25
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 1000
Talud exterior	s.u.	0.5 a 5
Densidad de las piezas	Kg/m <sup>3</sup>	1000 a 5000
Número de capas manto principal		1 a 4
Densidad de manto secundario	Kg/m <sup>3</sup>	1000 a 5000
Número de capas manto secundario		1 a 4
Porosidad manto secundario	s.u.	0.1 a 0.8
Coeficiente de capa manto secundario	s.u.	1 a 2
Permeabilidad <sup>(3)</sup>	s.u.	0 a 1
Número de olas de diseño <sup>(2)</sup>	s.u.	100 a 10000
Periodo de pico <sup>(2)</sup>	seg	1 a 100
<i><sup>(1)</sup> Sólo con la formulación de Hudson    <sup>(2)</sup> Sólo con la formulación de Van der Meer</i>		
<i><sup>(3)</sup> Tabla HTML incluida con valores orientativos</i>		



<b>Módulo: OBR 2.1 - Estabilidad en diques en talud no rebasables (Contin.)</b>	
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>
Número de estabilidad	s.u.
Número de Iribarren <sup>(1)</sup>	s.u.
Diam.piezas manto principal	m
Peso piezas manto principal	Tn.
Espesor manto principal	m
Diam.piezas manto sec.	m
Peso piezas manto sec.	Tn.
Espesor manto sec.	m
Diam. Piezas del morro	m
Peso piezas del morro	Tn.
Diam. Piezas del pie del dique	m
Peso piezas del pie del dique	Tn.
<i><sup>(1)</sup> Sólo con la formulación de Van der Meer</i>	
<b>GRÁFICAS</b>	
Ninguna	



Módulo: OBR 2.2 - Estabilidad en diques en talud rebasables (método de Vidal et al)		
OPCIONES DE EJECUCIÓN		
Piezas	Escollera	
	Cubos	
	Tetrápodos	
Avería	Inicio de avería	
	Avería de Iribarren	
	Inicio de destrucción	
FICHEROS		
Ninguno		
VARIABLES DE ENTRADA		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura de ola	m	0.1 a 25
Periodo de pico	seg	1 a 100
Talud exterior	s.u.	0.5 a 5
Talud interior	s.u.	0.5 a 5
Francobordo	m	-25 a 25
Densidad del material	kg/m <sup>3</sup>	500 a 5000
VARIABLES DE SALIDA		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Diám. nominal piezas talud exterior	m	
Peso nominal piezas talud exterior	Tn.	
Diám. nominal piezas coronación	m	
Peso nominal piezas coronación	Tn.	
Diám. nominal piezas talud interior	m	
Peso nominal piezas talud interior	Tn.	
Diám. nominal piezas morro	m	
Peso nominal piezas morro	Tn.	
GRÁFICAS		
Ninguna		



<b>Módulo: OBR 2.3 - Estabilidad de espaldones (método de Martín et al)</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Piezas	Escollera sin clasificar	
	Escollera clasificada	
	Tetrápodos	
	Dolos	
	Cuadrípodos	
	Cubos	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Dimensión $a_1$ <sup>(1)</sup>	m	0.5 a 100
Dimensión $a_2$ <sup>(1)</sup>	m	0.5 a 100
Dimensión $h_1$ <sup>(1)</sup>	m	0.5 a 100
Dimensión $b_1$ <sup>(1)</sup>	m	0.5 a 100
Dimensión $b_2$ <sup>(1)</sup>	m	0.5 a 100
Peso específico	$\text{Kg/m}^3$	500 a 5000
Coeficiente de rozamiento	s.u.	0.2 a 1
Altura de ola	m	0.1 a 25
Período	seg	1 a 25
Peso de las piezas	Tn.	0.1 a 1000
Talud exterior	s.u.	0.5 a 5
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 1000
Anchura de la berma	m	0 a 100
Cota de la berma	m	0 a 100
Porosidad	s.u.	0.2 a 0.8
<sup>(1)</sup> Ver croquis en la descripción del módulo		



<b>Módulo: OBR 2.3 - Estabilidad de espaldones (método de Martín et al) (Cont.)</b>	
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>
Coef. seguridad a deslizamiento. Estado 1	s.u.
Coef. seguridad a deslizamiento. Estado 2	s.u.
Coef. seguridad a vuelco. Estado 1	s.u.
Coef. seguridad a vuelco. Estado 2	s.u.
Fuerza horizontal total. Estado 1	Tn.
Fuerza horizontal total. Estado 2	Tn.
Momento de la fuerza horizontal. Estado 1	Tn. · m
Momento de la fuerza horizontal. Estado 2	Tn. · m
Subpresión total. Estado 1	Tn.
Subpresión total. Estado 2	Tn.
Momento de subpresiones. Estado 1	Tn. · m
Momento de subpresiones. Estado 2	Tn. · m
Peso del espaldón. Estado 1	Tn.
Peso del espaldón. Estado 2	Tn.
Momento del peso del espaldón. Estado 1	Tn. · m
Momento del peso del espaldón. Estado 2	Tn. · m
Parámetro $\alpha$	s.u.
Parámetro S	s.u.
Parámetro reductor de subpresiones	s.u.
<b>GRÁFICAS</b>	
Croquis del espaldón	



Módulo: OBR 2.4 - Estabilidad de diques rebasables (método de Ahrens – Van der Meer)		
OPCIONES DE EJECUCIÓN		
Descripción	Opciones	
Tipo de dique	Deformable rebasable	
	Rígido rebasable	
Avería <sup>(1)</sup>	Inicio de avería	
	Avería de Iribarren	
	Inicio de destrucción	
<i><sup>(1)</sup> Sólo para el caso del dique rígido rebasable</i>		
FICHEROS		
Ninguno		
VARIABLES DE ENTRADA		
Nombre	Unidades	Rango
Área de la sección <sup>(1)</sup>	m <sup>2</sup>	1 a 100000
Peso de la escollera <sup>(1)</sup>	Kg.	0.1 a 100000
Talud del dique <sup>(2)</sup>	s.u.	0.5 a 5
Altura de ola significativa	m	0.1 a 25
Periodo de pico	seg	1 a 100
Francobordo	m	- 25 a 25
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 100
Densidad de la escollera	Kg/m <sup>3</sup>	500 a 5000
<i><sup>(1)</sup> Sólo en caso de dique deformable rebasable    <sup>(2)</sup> Sólo para el caso de dique rígido rebasable</i>		
VARIABLES DE SALIDA		
Nombre	Unidades	
Longitud de onda de pico	m	
Francobordo final <sup>(1)</sup>	m	
Número de Iribarren <sup>(2)</sup>	s.u.	
Diámetro de las piezas <sup>(2)</sup>	m	
Peso de las piezas <sup>(2)</sup>	Kg.	
Diámetro de no rebase <sup>(2)</sup>	m	
<i><sup>(1)</sup> Sólo para el caso de dique deformable rebasable    <sup>(2)</sup> Sólo para el caso de dique rígido rebasable</i>		
GRÁFICAS		
Ninguna		



<b>Módulo: OBR 3.1 - Estabilidad de diques verticales sin rotura</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Teoría de ondas empleada	Lineal	
	Nagai sin rotura	
	Sainflou	
Tipo de dique	Rebasable	
	No rebasable	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Altura del dique <sup>(1)</sup>	m	0.1 a 100
Altura de ola incidente	m	0.1 a 25
Periodo de incidente	seg.	1 a 100
Ángulo de incidencia <sup>(2)</sup>	grados	0 a 60
Coef. seguridad a deslizamiento	s.u.	0.5 a 10
Coef. seguridad a vuelco	s.u.	0.5 a 10
Longitud de cajón	m	1 a 1000
Profundidad exterior	m	0.1 a 1000
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 1000
Coefficiente de reflexión	s.u.	0.1 a 1
Densidad del dique	Kg./m <sup>3</sup>	100 a 5000
Coef. rozamiento banqueteta	s.u.	0.1 a 1.5
(1) Sólo en caso de dique rebasable    (2) Sólo en el caso de teoría lineal		



<b>Módulo: OBR 3.1 - Estabilidad de diques verticales sin rotura (Continuación)</b>	
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>
Long. onda a pie del dique	m
Altura de rebase <sup>(1)</sup>	m
Altura del dique	m
Ancho del cajón por deslizamiento	m
Ancho del cajón por vuelco	m
Ancho del cajón de diseño	m
Peso del cajón	Kg
Carga estática en el trasdós	Nwt
Carga dinámica en el trasdós	Nwt
Carga total en el intradós	Nwt
Carga de subpresiones	Nwt
Momento estático en el trasdós	Nwt · m
Momento dinámico en el trasdós	Nwt · m
Momento total en el intradós	Nwt · m
Momento de subpresiones	Nwt · m
<sup>(1)</sup> Sólo en caso de dique rebasable	
<b>GRÁFICAS</b>	
Croquis del dique	



<b>Módulo: OBR 3.2 - Estabilidad de diques verticales con rotura</b>		
<b>OPCIONES DE EJECUCIÓN</b>		
<i>Descripción</i>	<i>Opciones</i>	
Tipo de ejecución	Calcular anchura mínima del dique	
	Calcular coeficiente de seguridad	
<b>FICHEROS</b>		
Ninguno		
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>
Coef. seguridad a deslizamiento <sup>(1)</sup>	s.u.	0.5 a 10
Coef. seguridad a vuelco <sup>(1)</sup>	s.u.	0.5 a 10
Anchura del dique <sup>(2)</sup>	m	0 a 100
Altura de ola de diseño	m	0.1 a 25
Periodo incidente	seg.	1 a 100
Ángulo de incidencia	grados	0 a 60
Altura del cajón	m	0.1 a 100
Longitud del cajón	m	1 a 1000
Profundidad de apoyo de escollera	m	0.1 a 1000
Profundidad a pie de dique	m	0.1 a 1000
Profundidad a pie de banqueteta	m	0.1 a 1000
Profundidad exterior	m	0.1 a 1000
Anchura de la banqueteta	m	0 a 100
Densidad media del dique	Kg./m <sup>3</sup>	500 a 5000
Coef. rozamiento dique – banqueteta	s.u.	0.1 a 1.5
<sup>(1)</sup> Sólo para el caso del tipo de ejecución de calcular la anchura mínima del dique <sup>(2)</sup> Sólo para el caso del tipo de ejecución de calcular coeficientes de seguridad		
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	
Anchura por deslizamiento <sup>(1)</sup>	m	
Anchura por vuelco <sup>(1)</sup>	m	
Coef. seguridad a deslizamiento <sup>(2)</sup>	s.u.	
Coef. seguridad a vuelco <sup>(2)</sup>	s.u.	
Longitud de onda a pie de banqueteta	m	
Parámetro de Takahashi	s.u.	
Reducción ángulo incidencia	s.u.	
Peso del cajón	Tn.	
Peso escollera a pie de dique	Kg.	



<b>Módulo: OBR 3.2 - Estabilidad de diques verticales con rotura (Continuación)</b>	
<b>VARIABLES DE SALIDA (Continuación)</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>
Fuerza presión dinámica	Tn.
Momento presión dinámica	Tn. · m
Fuerza subpresión dinámica	Tn.
Momento subpresión dinámica	Tn. · m
<sup>(1)</sup> Sólo para el caso de tipo de ejecución de calcular la anchura mínima del dique <sup>(2)</sup> Sólo para el caso de tipo de ejecución de calcular coeficientes de seguridad	
<b>GRÁFICAS</b>	
Croquis del dique	

## **ANEJO II**

---

### **TIPOS DE FICHERO**



## A.II TIPOS DE FICHERO

Se presentan en este anejo los tipos de ficheros compatibles con alguno de los módulos del Tutor de Ingeniería de Costas. En primer lugar se hace una descripción del contenido de cada fichero, módulos de aplicación y comentarios de interés. Finalmente aparece el formato de escritura seguido de un fragmento de fichero a modo de ejemplo. Los cinco tipos considerados son:

- Datos con muestreo continuo.
- Geometría de fetch reducido.
- Valores extremos.
- Perfil de batimetría.
- Granulometrías.



## **FICHERO DE DATOS CON MUESTREO CONTINUO**

**DESCRIPCIÓN:** contiene valores de una variable aleatoria tomados con frecuencia de muestreo constante.

### **MÓDULOS DE APLICACIÓN:**

DIN 2.1: Análisis Estadístico

DIN 2.2: Análisis Espectral

DIN 4.2: Marea Astronómica

**COMENTARIOS:** Ninguno

### **FORMATO:**

Comentario

Frecuencia de muestreo (nº de datos por segundo)

Valor 1

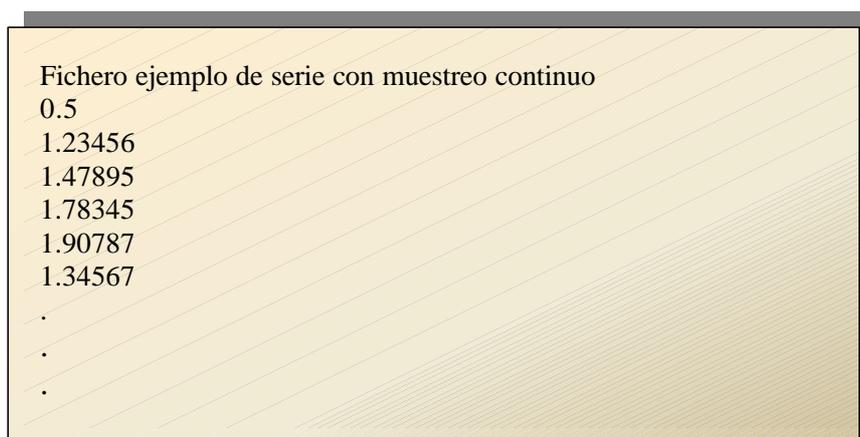
Valor 2

.

.

.

### **EJEMPLO:**



```
Fichero ejemplo de serie con muestreo continuo
0.5
1.23456
1.47895
1.78345
1.90787
1.34567
.
.
.
```



## **FICHERO DE GEOMETRÍA DE FETCH REDUCIDO**

**DESCRIPCIÓN:** Define en coordenadas polares (ángulo, distancia) la geometría de la línea de costa.

### **MÓDULOS DE APLICACIÓN:**

DIN 2.3: Previsión de oleaje - opción de fetch restringido

**COMENTARIOS:** El origen de coordenadas y el origen de medida de ángulos son arbitrarios; los ángulos se miden en el sentido de las agujas del reloj. El usuario debe ser consistente con el sistema de coordenadas elegido a la hora de especificar al ejecutar el módulo la dirección del viento y el punto de interés para el cálculo del fetch reducido. El programa siempre toma la dirección sur-norte como origen de ángulos para dibujar el gráfico de fetch y asume contorno cerrado, uniendo el último punto con el primero.

### **FORMATO:**

Comentario  
Ángulo 1 (°), Radio 1 (m)  
Ángulo 2 (°), Radio 2 (m)  
.  
.  
.

### **EJEMPLO:**

Fichero ejemplo de geometría de fetch restringido	
45	30000
90	60000
180	40000
270	30000
300	20000



## **FICHERO DE VALORES EXTREMOS**

**DESCRIPCIÓN:** Contiene una serie de valores extremos de una variable aleatoria seleccionados con un determinado criterio.

### **MÓDULOS DE APLICACIÓN:**

DIN 2.4: Análisis Extremal. Método de Goda

DIN 2.5: Análisis Extremal. Ajuste de Colas

**COMENTARIOS:** Los valores analizados no poseen una frecuencia de muestreo fija, sino que están seleccionados con un cierto criterio que hay que conocer (máximos anuales, excedencia de un umbral, etc.) Es posible censurar los datos del fichero dentro de cada módulo, es decir, analizar únicamente aquellos que superan cierto valor umbral.

### **FORMATO:**

Comentario

Valor 1

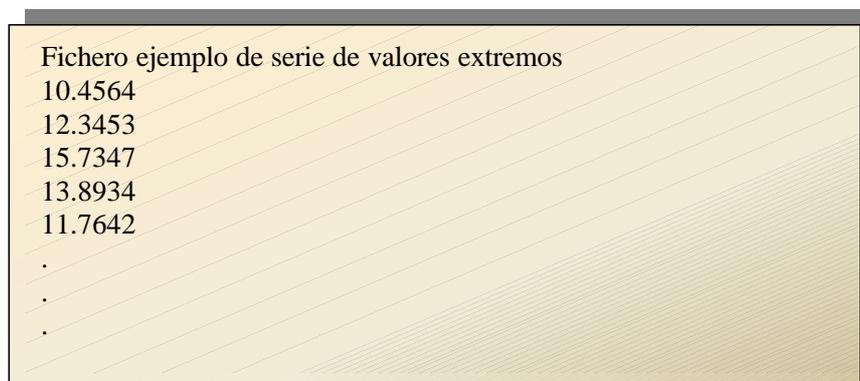
Valor 2

.

.

.

### **EJEMPLO:**



```
Fichero ejemplo de serie de valores extremos
10.4564
12.3453
15.7347
13.8934
11.7642
.
.
.
```



## **FICHERO DE PERFIL DE BATIMETRÍA**

**DESCRIPCIÓN:** define en coordenadas cartesianas (distancia a la costa, profundidad) un perfil de costa.

### **MÓDULOS DE APLICACIÓN:**

DIN 3.1: Propagación de Ondas - opción de fichero de batimetría

DIN 3.2: Propagación de Oleaje - opción de fichero de batimetría

DIN 3.5: Corrientes Longitudinales - opción de fichero de batimetría

DIN 4.1: Marea Meteorológica - opción de fichero de batimetría

SED 3.1: Perfil de Equilibrio - opción de ajustar perfil medido

**COMENTARIOS:** El origen de distancias a la costa es arbitrario. La cota cero corresponde al nivel del mar en reposo (SWL) y las profundidades se toman positivas (puntos emergidos del perfil en negativo). Los puntos no necesitan estar ordenados según su coordenada X.

### **FORMATO:**

Comentario

Distancia a la costa del punto 1, Profundidad del punto 1

Distancia a la costa del punto 2, Profundidad del punto 2

.

.

### **EJEMPLO:**

Fichero ejemplo de perfil de batimetría

4.0 -2.2

12.2 0.1

25.8 2.3

35.8 3.7

124.9 7.8

.

.



## **FICHERO DE GRANULOMETRÍAS**

**DESCRIPCIÓN:** Contiene dos granulometrías realizadas con una serie de tamices arbitrario.

### **MÓDULOS DE APLICACIÓN:**

SED 1.1: Análisis Granulométrico

**COMENTARIOS:** Los tamices empleados no tienen que pertenecer necesariamente a la serie UNE o ASTM, con la condición de que estén ordenados de mayor a menor y su abertura nominal esté expresada en milímetros. El programa asume que la primera granulometría corresponde a una muestra de arena nativa y la segunda a una de relleno, calculando los factores de alimentación y de sobrerrelleno de James correspondientes.

### **FORMATO:**

Comentario

Diámetro tamiz nº1 (mm), Peso retenido muestra nº1, Peso retenido muestra nº2

Diámetro tamiz nº2 (mm), Peso retenido muestra nº1, Peso retenido muestra nº2

.  
. .  
.

### **EJEMPLO:**

Fichero ejemplo de granulometrías		
2.00	6.4	4.6
1.19	34.9	12.5
0.84	60.8	54.8
0.59	196.5	162.7
0.42	315.1	219.1
0.297	102.4	82.0
0.250	162.5	98.9
0.210	78.6	69.6
0.177	21.9	44.0
0.149	15.9	66.8
0.125	2.9	98.0
0.105	0.3	62.4
0.074	0.1	23.0