

HIDRICOS: Una herramienta de investigación y desarrollo en ingeniería costera

Ronnie Torres Hugues

Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba

e-mail: ronnie@cih.cujae.edu.cu

Luis Córdova López

Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba

e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Francisco Fernández Rodríguez

Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba

e-mail: franciscom@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

A partir de la situación de deterioro actual en que se encuentran las costas cubanas se implementa una herramienta informática que cumple con una serie de exigencias técnicas y económicas nacionales. Esta herramienta tiene como objetivo proveer al especialista de una visión integradora de los elementos necesarios para resolver un problema determinado. En el presente trabajo se presentan los aspectos que le dieron origen, sus características fundamentales y la aplicación a varios estudios de caso.

Palabras clave: costas, herramienta computacional, hidroinformática, ingeniería marítima..

HIDRICOS: A tool for research and development in coastal engineering

ABSTRACT

Given the present situation of deterioration of Cuban coasts an informatic tool is implemented which includes a series of national technical and economical requirements. This informatic tool has the objective to provide the designer with an integral view of relevant elements to solve a given problem. In the present work are included the aspects that originated the tool, its main features and its application to several case studies.

Keywords: coasts, computational tool, hydroinformatics, maritime engineering.

INTRODUCCIÓN

Para determinar cuál actividad de ingeniería puede servir en una situación dada, todos los aspectos relevantes del sistema costero deben ser estudiados. Los procesos costeros pueden ser divididos en:

- Naturales: por ejemplo, el transporte de sedimentos.
- Socio-económicos: por ejemplo, zonificación y desarrollo económico de una zona costera.

Para los especialistas de la Ingeniería Costera, el estudio de los procesos naturales es un punto focal. El estudio de los procesos socio-económicos tiende a ser incluido en el estudio del manejo de la zona costera. Esta es una actividad multidisciplinaria, en la cual el ingeniero en costas debe jugar un rol activo.

En general, las actuaciones llevadas a cabo para la protección y para el desarrollo económico de estas zonas, deben ser ejecutadas por un personal capacitado en el campo de la Ingeniería Costera para garantizar el éxito y la seguridad de las mismas.

Para enfrentar un problema en la costa, ya sea por penetración del mar o erosión en playas, entre otras, se debe caracterizar la zona de estudio a partir de una serie de datos, así como también definir aquellos aspectos que rigen las condiciones de trabajo y diseño. Posteriormente se procede a establecer el balance sedimentológico para realizar un diseño objetivo y funcional, que resuelva el problema a plantear, teniendo en cuenta los fenómenos que afectan a este tipo de soluciones. En la concepción del diseño pueden aparecer varias alternativas, de las cuales hay que seleccionar la definitiva, para lo cual se pueden emplear diversas técnicas, como el Análisis Multicriterio o Técnicas de Escala y Peso. Este proceso se ilustra en la figura 1.

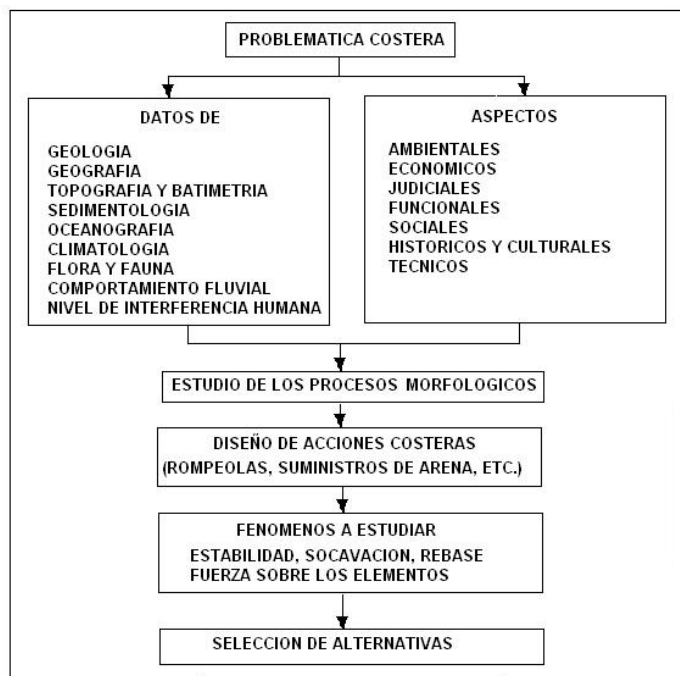


Figura 1. Proceso para la solución de una problemática costera.

Con el objetivo de facilitar la resolución de este tipo de actividades, los ingenieros han recurrido a la adecuación, fabricación y empleo de diferentes tecnologías dentro de los que se

encuentran programas informáticos, modelos matemáticos y físicos, mapas, tablas, gráficos, sensores, maquinaria de construcción, etc. Las actividades de ingeniería tienen una influencia creciente en la costa debido a que las herramientas disponibles para intervenir en los procesos costeros se han hecho muy poderosas. Por lo que se impone la implementación de un manejo adecuado de la zona costera.

En Cuba, como consecuencia de determinadas acciones irreflexivas que el hombre ha llevado a cabo en estas zonas fundamentalmente en el pasado, tales como: el insuficiente tratamiento de los residuales, las obras costeras mal diseñadas, el dragado de arena para la construcción, la ubicación de instalaciones en la primera línea de playa, etc., se han producido importantes pérdidas de recursos naturales, lo que ha conllevado a la necesidad de fuertes inversiones para su recuperación. Para empezar a compensar estos daños se han llevado a cabo varias acciones. Estas van desde anuncios televisivos haciendo un llamado a la conciencia del pueblo, charlas ecológicas en las escuelas, señalizaciones en las zonas destinadas a la recreación, hasta la creación de organismos y grupos de trabajo estatales para llevar a cabo acciones concretas. Entre las más frecuentes están los vertimientos de arena, la creación de playas artificiales y la construcción de malecones, rompeolas y groines. En menor medida se encuentra la reforestación del área y el retroceso y reacomodo de estructuras.

En el caso puntual de la erosión en las playas de arena se ha aplicado con mucha efectividad el vertimiento de arena, como ejemplo más importante de esto se puede mencionar la playa de Varadero con un proyecto de un millón de metros cúbicos vertidos en la franja de la playa (García 2001). Esta variante ha sido empleada satisfactoriamente en decenas de proyectos en diversas partes del mundo.

Como muchos de los problemas en ingeniería son tipificables, ellos solamente requieren de la aplicación de algunos modelos. Continuas investigaciones se llevan a cabo para mejorar la calidad de estos modelos y resolver los casos particulares. Esto último resulta muy atractivo para los científicos, no siendo así para los ingenieros dedicados al diseño que sólo consultan estos avances cada cierto tiempo, por lo que, una herramienta informática que estructure los modelos y métodos necesarios para darle solución a un grupo de problemas determinados, será de mucha mayor utilidad, tanto para científicos como diseñadores, que los programas especializados debido a que para llevar a cabo cualquier actividad de ingeniería los factores tiempo y calidad juegan un rol importante. Según (UNESCO IHE 2000) este tipo de herramientas se llaman Sistemas de Ayuda (SA). Una propuesta de solución para este problema lo constituye la aplicación HIDRICOS con la filosofía de visión integradora (Torres 2007).

El soporte informático HIDRICOS, permite obtener resultados en menos tiempo que los sistemas de ayuda consultados, así como observar el comportamiento de un fenómeno de manera más integradora. HIDRICOS parte de una serie de exigencias técnicas y económicas a tener en cuenta en esta especialidad bajo las condiciones cubanas.

HIDRICOS

Conceptualización

En el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) se ha desarrollado por los especialistas del grupo de Hidráulica

Marítima una herramienta informática, que recibe el nombre de **HIDRICOS**. Este es el acrónimo de **Herramienta de Investigación y DesarRollo en Ingeniería COStera**. Se pretende que sea empleado en las empresas afines con el campo de acción como herramienta de ayuda a la hora de resolver problemas de ingeniería costera.

El aspecto más importante de su concepción, que además, marca la principal diferencia con el resto de los Sistemas de Ayuda (SA), los cuales son CRESS, ACES y TIC, es la posibilidad de interconectar elementos, ya sean formularios o variables de los modelos matemáticos presentes en el sistema. A esto es lo que se le ha denominado “visión integradora”, que se pone de manifiesto a lo largo de la aplicación mediante:

- La transferencia automática de los datos del formulario principal (altura de la ola en aguas profundas, período de la ola, índice de rompiente, ancho de la zona de rompientes, altura de la ola en el punto de rompiente y en el interior de esta zona, ángulo de incidencia en el punto de rompiente, perfil de trabajo) al resto de los formularios según corresponda.
- La implementación de un análisis de sensibilidad dinámico a los parámetros, es decir, muestra el comportamiento de dos variables en estudio variando directamente cualquier otro parámetro que intervenga en el modelo. Este comportamiento puede ser cuantificado, además de la simple observación, con sólo desplazar el mouse por la curva descrita.
- La interacción simultánea de formularios. Esto posibilita utilizar varios formularios a la vez y observar el comportamiento de varios fenómenos simultáneamente.

Esta transferencia responde a la interrelación real que existe entre diversos enfoques teóricos empleados en la ingeniería costera que se encuentran agrupados en la aplicación. Entre otros se pueden citar:

1. Las escalas de viento: Beaufort, Douglas, cubana, etc. y otras escalas y clasificaciones de importancia: sures, ciclones, sedimentos, tipos de olas, etc.
2. El Global Wave Statistics (GWS) para la isla de Cuba como fuente de información del oleaje.
3. La generación del oleaje para varias condiciones.
4. Un conversor de unidades.
5. Varios modelos matemáticos que proporcionan las propiedades locales de las olas, transformación del oleaje, así como propiedades de las playas.
6. El modelo matemático que permite obtener el volumen de materiales para realizar el vertimiento de arena a partir de perfiles de equilibrio potenciales con cualquier valor del exponente n , cuestión que hasta el momento se realizaba para un sólo valor (2/3).
7. El modelo matemático que proporciona la configuración de playas espirales para comprobar su estado de equilibrio estático, así como el modelo (Kamphuis 2000) para la evolución de una playa con presencia de groines.
8. Las relaciones empíricas que proporcionan la respuesta de la línea de costa ante la presencia de un elemento sólido ubicado enfrente de esta.
9. El método de Escala y Peso para la selección de alternativas referente a la evaluación de impacto ambiental.
10. Modelos matemáticos para el estudio de los fenómenos hidráulicos presentes en las diferentes acciones.

Por otra parte, la interfaz gráfica del usuario es el medio por el cual este interactúa con el sistema, por lo que esta debe ser lo más amigable posible y lograr que se sienta identificado con

ella, ver figura 2. Para el diseño de la interfaz del sistema se tuvieron en cuenta los aspectos necesarios que garantizan la comodidad por parte del usuario, teniendo presente la organización de la información que se muestra y su distribución en la pantalla.

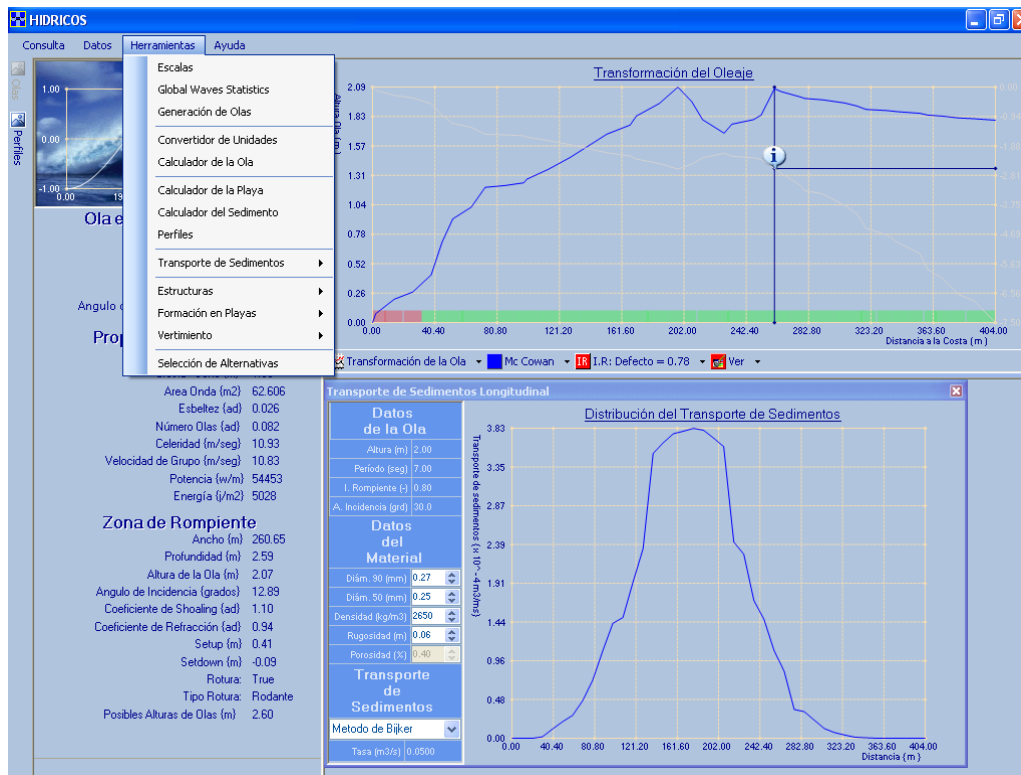


Figura 2. Ventana principal de HIDRICOS.

HIDRICOS contiene 41 herramientas; 32 de las cuales se corresponden con las que están presentes en varios sistemas de ayuda, 10 herramientas fueron incluidas por el autor con el objetivo de facilitar las posibilidades de solución de los problemas que se presentaron en las distintas acciones acometidas por el Grupo de Modelación Física de Obras Costeras y Marítimas. Hubo herramientas presentes en otros sistemas de ayuda que no han sido incluidas por el momento, ya que los fenómenos que representan no son de gran envergadura para la isla de Cuba.

Por otra parte, Torres (2010) establece que es necesario destacar aquellos modelos presentes en HIDRICOS que constituyen una novedad científica. Los mismos se pueden agrupar en tres grupos: los modelos actualizados, los modelos incluidos obtenidos a partir de ajustes de curvas y los modelos nuevos.

Dentro del primer grupo se encuentran:

1. El método para la determinación de los volúmenes de un vertimiento de arena, el cual ha sido generalizado para cualquier exponente en la ecuación de la ley potencial.
2. El método de Van der Meer (1993) para la determinación del diámetro y peso de elementos sueltos, con el cual se han tomado en cuenta nuevos criterios que garantizan la estabilidad del rompeolas para varias situaciones, por ejemplo, si el rompeolas es de baja cresta o si es sumergido.

3. El método para la determinación de la sobreelevación del mar por tormenta para el cual se ha tomado en cuenta el coeficiente de fricción entre el aire y el agua, con lo cual se representa mejor el fenómeno.
4. El método de los POT para la determinación de alturas de ola de diseño, el cual se ha vinculado con la norma española que establece la vida útil de una obra y el factor de riesgo.
5. El coeficiente de difusividad longitudinal en la cual la expresión original considera el método de transporte de sedimentos longitudinal del Cuerpo de Ingenieros de EUA, en estos momentos se ha implementado para cualquier otra expresión.
6. El método empleado por el Cuerpo de Ingenieros de EUA para la determinación de la tasa de transporte longitudinal de arena en el cual se ha tomado en cuenta la variación del coeficiente K del modelo con el diámetro medio del sedimento.
7. Los métodos de transporte de sedimentos mostrados en Kamphuis (2000) para la determinación de la tasa de transporte longitudinal de arena, en la cual las expresiones originales determinan la capacidad de transporte en el interior de la zona de rompientes, en estos momentos se ha implementado para que, además, describa el comportamiento de este a lo largo del perfil mediante la relación con la velocidad de la corriente litoral.
8. El coeficiente de sobrerrelleno, donde se ha implementado el modelo matemático que sustituye el gráfico inicial.
9. La determinación del estado de movimiento del grano, en el cual se ha implementado el modelo matemático que sustituye el gráfico inicial.

Dentro del segundo grupo se encuentran:

1. El coeficiente K del método del Huracán más Probable.
2. El parámetro θ en la ecuación de la playa espiral de Hsu y Evans (1989).
3. El coeficiente de las integrales de Einstein para el cálculo del transporte de sedimentos.
4. La expresión para el comportamiento de la velocidad de caída de arenas coralinas y esféricas con la variación del D_{50} .

Dentro del tercer grupo aparecen:

1. El método para la transformación del oleaje (Fernández y Torres 2009).
2. La probabilidad de ocurrencia, la esbeltez y la cantidad de horas al año a partir de las observaciones dadas en el GWS.
3. El método para la determinación del rebase en estructuras con curvatura en la sección transversal (Córdova 1998).
4. Los métodos para la determinación de perfiles de equilibrio por autores cubanos.
5. La expresión para el cálculo de la ola a partir del Teorema Pi.
6. Por otra parte, presenta información variada enfocada para las condiciones de Cuba: zonas del GWS, datos de boyas del Golfo de México e información del INSMET.

Validación

La validación permite comparar los resultados de HIDRICOS, para un problema determinado, con los resultados arrojados por los demás programas CRESS-IHE, CRESS-RWS (UNESCO IHE 2000). En este sentido se realiza la prueba con los siguientes elementos, ver tabla 1.

Dadas determinadas condiciones se requiere determinar el diámetro y el peso de los elementos que serán colocados para que el rompeolas sea estable. Para ello se utilizan el método de Hudson

y el método de Van der Meer (VDM). Los resultados de la comparación se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Datos para el diseño de elementos sueltos

Altura Ola (m)	H	3
Período Ola (s)	T	10
Talud (-)	n	3
Densidad Agua (kg/m^3)	ρ_w	1025
Factor Daño (Hudson)	Kd	2
Valor Daño (VDM)	S	2
Permeabilidad (VDM)	P	0.5
Número de Olas (VDM)	N	2000

Tabla 2. Resultados para el diseño de elementos sueltos

Programa	Método	K_{si}	Rompe	$D50$ (m)	$W50$ (kg)
CRESS-IHE	Hudson	2.4	Si	1.31	3521
CRESS-RWS		2.4	Si	1.31	3521
HIDRICOS		2.4	Si	1.31	3521
CRESS-IHE	VDM	2.4	Si	1.17	2636
CRESS-RWS		2.4	Si	1.19	2636
HIDRICOS		2.4	Si	1.19	2636

En la tabla 2, K_{si} es el parámetro de similitud de rompiente, $D50$ es el diámetro medio y $W50$ es el peso asociado al diámetro medio.

Se puede observar una completa coincidencia entre el resultado aportado por HIDRICOS y el aportado por el CRESS en ambas versiones.

Dados los siguientes datos se necesitan determinar las propiedades del grano, ver tabla 3 y tabla 4.

Tabla 3. Datos para las propiedades del sedimento

Diámetro Medio (mm)	$D50$	0.2
Densidad Material (kg/m^3)	ρ_s	2650

Tabla 4.- Resultados para las Propiedades del Sedimento

Programa	Velocidad de caída (m/s)	Parámetro de Shields crítico	Parámetro de la partícula	Tensión crítica de corte (Pa)	Velocidad crítica de corte (m/s)
CRESS-IHE	0.025	0.05	5	0.415	0.01
CRESS-RWS	0.03	0.035	31	0.293	0.01
HIDRICOS	0.02	0.05	5	0.16	0.01

En este caso, se puede observar que existe cierta discrepancia entre los valores arrojados por el CRESS en ambas versiones. Sin embargo, HIDRICOS es consistente con el CRESS-IHE en 4 de 5 aspectos. Es de señalar que la tensión crítica de corte no ofrece coincidencias para ningún programa.

CASOS DE ESTUDIO

Varios sectores de la playa Varadero: el Varadero Histórico y la zona de los hoteles Meliá han presentado serios problemas de erosión que ponen en juego su estabilidad económica como zona turística. Mediciones realizadas indicaron un ritmo de regresión de 1,2 m/año. Por lo que se dispuso de un proyecto para analizar las causas de erosión en la misma y encontrar una vía para protegerla de la futura erosión estructural que actualmente afecta la zona.

Para llevar esto a cabo, primeramente se realizó una extensa búsqueda de información para caracterizar la zona. En la misma se recopilaron datos de la batimetría y las características del sedimento, clima marítimo, geología, historia del lugar, población, actividades económicas, entre otras. Posteriormente se identificaron las causas para los problemas de erosión, siendo las mismas: los gradientes en el transporte de sedimentos longitudinal, el transporte de sedimentos debido al viento, el incremento global del nivel del mar, la extracción de arena en el pasado y la construcción de estructuras sobre la duna. Para contener la erosión se diseñaron alternativas duras y blandas, así como también se tuvo en cuenta la demolición de estructuras en la duna e incrementar el campo de algas en la zona. En un análisis multicriterio se sopesaron las alternativas teniendo en cuenta 15 variables de comparación que recogen la funcionalidad de la alternativa, el medio ambiente, los costos y las técnicas de construcción. Esto mostró que la mejor alternativa dura es un rompeolas sumergido alejado de la costa y la mejor alternativa blanda es un vertimiento de arena en la playa para el caso del sector Varadero Histórico. Para el sector de los Meliá se obtuvieron como mejores soluciones: el vertimiento de arena a ambos lados del macizo rocoso y el vertimiento de arena a ambos lados del macizo rocoso con rompeolas sumergidos.

Relacionado con los datos de oleaje, tanto para tormenta como en condiciones de calma, se analizaron a partir de la herramienta “Global Wave Statistics” que contiene HIDRICOS. Por otra parte, los perfiles topo-batimétricos recolectados y las características del grano fueron introducidos con el uso de la herramienta “Perfiles”, en la cual se determina la profundidad de cierre y la recta de mejor ajuste para el perfil. Para la determinación de las causas de erosión se emplearon varias herramientas: “Transformación del oleaje”, “Transporte de sedimentos longitudinal” y “Transporte de sedimentos eólico”. En el diseño de alternativas se tuvieron en cuenta soluciones duras, blandas y la combinación de ellas. El comportamiento de cada una se estudió mediante las herramientas “Fuerza”, “Rebase y Transmisión”, “Socavación”, “Elementos Suelos”, “Tómbolos”, “Playas Espirales”, “Groin”, “Perfil y Planta del Vertimiento de Arena” “Transición óptima del Vertimiento de Arena” y “Regresión por tormenta Vertimiento de Arena”. Para la selección de la mejor alternativa se empleó “Selección de Alternativas”.

Esta herramienta ha sido utilizada por los especialistas de la Unidad de Inversiones Costeras de Holguín en diferentes estudios y proyectos realizados.

Además, ha servido de base material de estudio para el curso de “Herramientas Informáticas en Ingeniería Costera” en las ediciones 1 y 2 del Diplomado de Ingeniería Costera y Marítima impartidos en Venezuela a especialistas del Ministerio del Ambiente, MINAMB. Así como también en el Proyecto Integrador de la edición 1 de dicho diplomado.

CONCLUSIONES

Las características de la herramienta informática HIDRICOS tales como: la inclusión un grupo de modelos matemáticos y tablas de uso frecuente en la especialidad, la interrelación entre ventanas y la posibilidad de trabajar con varias a la vez permite obtener parámetros para el diseño de obras y variables físicas de los procesos costeros en menor tiempo, lo cual es una ventaja en relación con los otros sistemas de ayuda.

Los estudios que se llevan a cabo con el programa responden en mayor medida a las características de la isla de Cuba al contar con modelos correspondientes a estudios realizados para dichas condiciones.

REFERENCIAS

- Córdova, L.** (1998). “Estudio del fenómeno de rebase en obras de defensa de costas para las condiciones de Cuba”, Tesis de doctorado, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.
- Fernández, F y Torres, R.** (2009). “Transformación del oleaje en el interior de la zona de rompientes mediante modelos empíricos”, Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXX, No. 1, pp. 48-52, CIH, CUJAE, La Habana.
- García, C.** (2001). “Recuperación de la playa de Varadero. Proyecto, ejecución y monitoreo”, X Forum de Ciencia y Técnica, FCT5602, La Habana, May.
- Hsu, J. y Evans, C.** (1989). “Coastal Stabilization”, Ed. World Scientific, Australia.
- Kamphuis, J.** (2000). “Introduction to Coastal Engineering and Management”, Ed. World Scientific, Queens.
- Torres, R.** (2007). “HIDRICOS. Una herramienta para la Ingeniería Costera”, Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.
- Torres, R.** (2010). “Sistema Integrado para la protección y rehabilitación de playas”, Tesis de Doctorado, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.
- UNESCO IHE** (2000). “CRESS – Help”, IHE Delft, TR0100, Delft, Mar.
- Van der Meer, L.** (1993). “Conceptual design of rubble mound breakwaters”, WL|DELFT HYDRAULICS, No. 483, Delft, Dec.