

FACULTAD DE MATEMÁTICA-FÍSICA-COMPUTACIÓN

TESIS DE DIPLOMA

Propagación del Oleaje en la Bahía de Cienfuegos bajo Condiciones Climatológicas Extremas.

Autora. Amelia Sánchez Pérez.

Tutor. DrC. Alain Muñoz Caravaca.

Cotutor. DrC. Rolando Cárdenas Ortiz.

Santa Clara, Cuba 2017

DEDICATORIA.

A mis padres, quienes con sus consejos me ayudan a tomar las decisiones correctas, quienes con su esfuerzo han hecho que no me falte nada, nunca podré pagar sus desvelos ni aún con las riquezas más grandes del mundo. Sabiendo que no existirá una forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudó a conseguirlo fue su apoyo. Para ustedes todo mi agradecimiento, respeto y amor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por creer siempre en mí.

A mis hermanas por quererme y soportarme a pesar de nuestros desacuerdos.

A mi tío que desde la distancia siempre me ha apoyado y ayudado muchísimo.

A mi novio por darme fuerzas en los momentos en que pensé que no podía continuar.

A mi tutor Alain por ser paciente, guiarme en todo momento y por su dedicación en el asesoramiento de este trabajo.

A Lester por enseñarme a hacer uso de mi imaginación.

A todos mis compañeros de clase; en especial a Maibelin y Leticia por compartir conmigo alegrías y fracasos.

A los profesores de la carrera que de una forma u otra ayudaron en la realización de este proyecto, especialmente al profesor Rolando Cárdenas.

Y también a los que nunca creyeron en mí, ellos hicieron que me esforzara cada día más.

ÍNDICE

Introducción	1
Problema Científico	5
Objetivo General	5
Objetivos específicos	5
Justificación práctica	6
Estructura de la Tesis	6
Capítulo I. Estado del arte	8
Teoría lineal de ondas y teorías no lineales	8
Teoría lineal de onda (teoría de Airy)	10
Generalidades sobre ondas	3
Velocidad de onda	13
Velocidad de grupo y dispersión de la onda	14
Energía de la onda	15
Propagación de la energía de la onda	15
Atenuación de la energía de la onda	16
Refracción	16
Difracción	17
Reflexión	18
Modelos teóricos de propagación de ondas	19
Estudios de oleaje realizados en el mundo, Cuba y Cienfuegos	25
En Cuba	26
En Cienfuegos	27
Capítulo 2. Materiales y métodos.	29
Áreas de estudio	29

Bahía de Cienfuegos	29
Playa Rancho Luna	30
Características del viento en condiciones climáticas habituales y extremas	30
Aplicación del Sistema de Modelado Costero SMC	34
Modelo batimétrico	36
Capítulo III. Resultados	39
Propagación del oleaje en el canal de la bahía de Cienfuegos	39
Propagación del oleaje en el interior de la bahía de Cienfuegos.	40
Propagación del oleaje en playa Rancho Luna	43
Conclusiones	46
Recomendaciones	47
Anexo A	48
Referencias	51

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1. Perfil vertical de dos ondas oceánicas sucesivas idealizadas que muestra las
dimensiones lineales de la onda
Figura 1.1. Rango de validación de las teorías de ondas
Figura 1.2. Comparación de ondas en diferentes teorías
Figura 1.3. Representación de una onda de Airy
Figura 1.4. Mapa descriptivo de la bahía de Cienfuegos y ubicación de las estaciones de muestreo del oleaje
Figura 2.1. Rosa de vientos característica del municipio Cienfuegos en el período 1991 - 2009
Figura 2.2. Representación esquemática del SMC
Figura 2.3. Malla de cálculo correspondiente al canal de entrada y sector central de la Bahía de Cienfuegos
Figura 2.4. Malla empleada para la propagación del oleaje en el interior de la Bahía de Cienfuegos
Figura 2.5. Malla correspondiente al estudio del sector costero Playa Rancho Luna 37
Figura 3.1. Propagación de ola de altura 6 m (a). Frente de onda, ola de 6 m (b). Ambos correspondientes a un Huracán C1, desde el exterior de la bahía
Figura 3.2. Magnitud y dirección de las corrientes. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1;
(b) onda 3 m, huracán categoría3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5, desde el exterior de la bahía
Figura 3.3. Áreas de mayor impacto de las olas provenientes del Sur en el interior de la
Bahía de Cienfuegos y profundidad existente en la misma

Figura 3.4. Altura de onda. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1; (b) onda 3 m, huracán
categoría3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5
Figura 3.5. Magnitud y dirección de las corrientes. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1; (b) onda 3 m, huracán categoría 3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5
Figura 3.6. Transporte potencial. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1; (b) onda 3 m, huracán categoría 3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5
Figura 3.7. Altura de onda. (a) onda de 6 m, huracán categoría 1; (b) onda 10 m, huracán categoría3; (c) onda 16 m, huracán categoría 5
Figura 3.8. Magnitud y dirección de las corrientes. (a) onda de 6 m, huracán categoría 1; (b) onda 10 m, huracán categoría 3; (c) onda 16 m, huracán categoría 5
Figura 3.9. Frente de onda (a); transporte potencial (b) y erosión-sedimentación, ola de 6m correspondiente a un Huracán categoría 1

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Resultados de las mediciones del oleaje realizadas en la bahía de Cie	nfuegos,
en cuatro estaciones entre el 16 y 20 de diciembre del 2010	28
Tabla 2.1. Características de las olas propagadas para el estudio del oleaje en l	los sitios
seleccionados	38

RESUMEN

Se aplica la modelación físico-matemática para caracterizar la propagación del oleaje y las

corrientes generadas por este en condiciones extremas en la bahía de Cienfuegos y el sector

costero correspondiente a playa Rancho Luna. La zona de la bahía constituye, un elemento

concluyente en el desarrollo industrial de toda la región del país, en su márgen se ubican

numerosas instalaciones de gran valor para el desarrollo petroquímico, industrial y

portuario del lugar; además de la mayor parte de la ciudad. Al mismo tiempo, la playa

Rancho Luna constituye el espacio de recreación privilegiado del municipio cabecera, al

cual arriban en el verano ciudadanos de toda la región central del país. También se

encuentra en el contexto de desarrollo del polo turístico Cienfuegos – Trinidad, con lo cual

se significa el arribo de turistas extranjeros en una cifra creciente y por lo tanto su

importancia socioeconómica.; en ella también se encuentran infraestructuras de gran valor

como hoteles, restaurantes, entre otras. Estas instalaciones se encuentran en áreas

expuestas al impacto destructivo del oleaje extremal, por lo que es de vital importancia

conocer la magnitud del mismo, así como la dirección de las corrientes que genera, para

implementar medidas de protección y prevención.

En el conjunto de investigaciones realizadas hasta este trabajo en estas aéreas en relación a

la caracterización del oleaje, queda por resolver cual es la interacción entre este fenómeno,

el oleaje y las corrientes generadas por el mismo y aquellas que se producen por la marea y

los aportes fluviales, principales motores del movimiento en estos sistemas. Por lo cual el

objetivo de este trabajo es la realización de una modelación físico-matemática que permita

caracterizar estos fenómenos, obteniéndose información sobre las principales magnitudes

que los caracterizan como altura de onda, magnitud y dirección de las corrientes, etc.

Para lograr esto se aplica la herramienta informática Sistema de Modelado Costero (SMC),

con el cual se logra determinar las variables de interés que permiten conocer el

comportamiento del oleaje y las corrientes que este provoca en función de la intensidad del

huracán que afecte la zona.

Palabras Claves: Modelación, costas, oleaje, Cienfuegos, Rancho Luna.

VIII

SUMMARY

Physical-mathematical modeling is applied to characterize the propagation of the waves in the sea and the currents generated by these in extreme conditions in the bay of Cienfuegos and the coastal sector corresponding to Rancho Luna beach. The area of the bay is a conclusive element in the industrial development of the entire region of the country. There are numerous facilities of great value for the petrochemical, industrial and port development of the area; in addition to most of the city. At the same time, the Rancho Luna beach constitutes the privileged recreation area of the Cienfuegos municipality, to which the citizens of the entire central region of the country arrive in the summer. It is also in the context of the development of the Cienfuegos - Trinidad tourist center, which means the arrival of foreign tourists in a growing number and therefore their socioeconomic importance. In it are also infrastructures of great value as hotels, restaurants, among others. These installations are located in areas exposed to the destructive impact of extreme waves, so it is of vital importance to know the magnitude of the same, as well as the direction of currents generated, to implement protection and prevention measures.

In the set of research carried out up to this work in these areas in relation to the characterization of the waves, it remains to be resolved what is the interaction between this phenomenon, the waves and the currents generated by it and those produced by the tide and the fluvial contributions, the main engines of movement in these systems. Therefore, the objective of this work is the realization of a physical-mathematical modeling to characterize these phenomena, obtaining information on the main magnitudes that characterize them as wave height, magnitude and direction of currents, etc. In order to achieve this, the computer tool Coastal Modeling System (SMC) is applied, with which it is possible to determine the variables of interest that allow to know the behavior of the waves and the currents that this provokes depending on the intensity of the hurricane that affects the zone.

Keywords: Modeling, coast, waves, Cienfuegos, Rancho Luna.

Introducción

Las ondas constituyen el fenómeno físico de la propagación de una perturbación a través de un medio. Las ondas mecánicas precisan de un medio material para propagar la perturbación a lo largo de la extensión del mismo; el medio perturbado puede ser de índole muy diversa como por ejemplo aire, un trozo de metal o agua, (Brown et al. 1999).

Según viajen dentro del cuerpo del material o sobre su superficie las ondas se pueden clasificar en ondas de cuerpo u ondas de superficie. Las ondas de superficie son las que se propagan en el límite entre dos o más cuerpos como pueden ser la atmósfera y el océano. Dentro de las primeras podemos encontrar las ondas de sonido y las sísmicas, y en las segundas los tsunamis, mareas y las ondas de viento, (Caravaca, 2011).

Entre las ondas mecánicas, poseen gran importancia por su impacto en la naturaleza y el hombre, las ondas en el mar, (Brown et al., 1999), éstas ponen de manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la interface agua-atmósfera que constituye la superficie del mismo. Los mecanismos que tributan esta energía son de diferente naturaleza: viento, perturbaciones meteorológicas, terremotos, atracción planetaria, etc., (G.I.O.C. 2000).

Las ondas en los océanos son originadas por diversas causas pero el viento es el que genera las más usuales y de superior densidad energética. Por lo que se suele decir que la energía que poseen las ondas de mar son un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua le transfiere energía y la pone en movimiento, provocando ondulaciones en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas de los continentes. Entonces se puede decir que el oleaje designa un término físico muy preciso como son las oscilaciones de la elevación de la superficie del mar generadas por el viento, (Nieto 2011)

Específicamente las olas son ondas superficiales de gravedad producidas por el viento, éstas se propagan desde el lugar donde se originan y van perdiendo paulatinamente energía por fricción con la atmósfera y por viscosidad molecular, hasta que finalmente se disipan cuando alcanzan la costa debido a los procesos de rotura, (G.I.O.C. 2000).

El movimiento del aire cercano a la superficie marina le trasmite a ésta la energía asociada a la perturbación. La tensión del viento es la fuerza que saca de su estado de equilibrio a

las partículas de la superficie. Las fuerzas restauradoras que operan sobre las partículas para llevarlas a su posición de equilibrio son, la fuerza de tensión superficial entre las moléculas del líquido, y la fuerza de gravedad, (Brown et al., 1999). La primera domina como fuerza restauradora en ondas capilares que son las que presentan longitudes de onda de 1,7 cm o inferiores; por encima de ese valor la fuerza restauradora dominante en las interacciones es la de gravedad, por lo tanto, las ondas con longitudes por encima de 1,7 cm son conocidas como ondas de gravedad, (Brown et al., 1999).

El oleaje se debe a las oscilaciones periódicas que perciben las partículas de agua cerca de la posición de equilibrio. Estas oscilaciones son ocasionadas por una modificación del equilibrio de la superficie del agua y la capacidad de esta para restablecer el equilibrio alterado, estableciéndose como la causa elemental en la formación de olas la acción del viento, ya que este actúa sobre la superficie del agua y saca sus partículas del estado de equilibrio, obligándolas a moverse por sus órbitas en la dirección de las agujas del reloj a igual velocidad formándose las llamadas olas forzadas y las que siguen manteniéndose después que la fuerza productora perdió su energía se les llama olas libres.

Las ondas se caracterizan por tres elementos: a la parte superior se le llama cresta o pico, la parte más profunda la base o valle y entre la cresta y la base se halla la pendiente. Igualmente se definen de acuerdo a dos aspectos: el primero es por tener dimensiones espaciales en un instante de tiempo fijo, éstas son: la altura de onda (H) que se refiere al cambio vertical total en altura medido desde el valle de la onda hasta su cresta; la longitud de onda (L), es la distancia entre dos picos (o dos valles) continuos; la amplitud de la onda (a) es la mitad de su altura y por último la pendiente o peralte (*steepness*) de la onda que es la razón de la altura de la onda entre su longitud (H/L), (Omar G. Lizano R 2003). El segundo aspecto que las describe son las dimensiones en el tiempo para un punto fijo en el espacio; las cuales son: su período (T) que es el intervalo de tiempo medido en segundos transcurrido entre dos picos (o valles) sucesivos y la frecuencia (f) que se define como el número de oscilaciones pico a pico (o valle a valle) de la superficie de la ola por segundo, visto por un observador fijo, y es el inverso del período, es decir, f=1/T, (Caravaca, 2011).

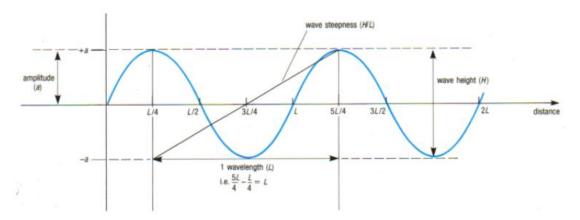


Figura I.1. Perfil vertical de dos ondas oceánicas sucesivas idealizadas que muestra las dimensiones lineales de la onda. **Fuente.** (Caravaca 2011).

Las ondas poseen además, velocidad, que es la distancia que recorre en una unidad de tiempo la cresta de la misma y la velocidad de propagación (c) de una onda viene dada por el cociente entre la longitud L y el período T, es decir, c=L/T, (Omar & Lizano, 2003); (Caravaca 2011).

Una particularidad esencial de cualquier tipo de onda es que junto a la perturbación se propaga energía. La energía de las olas se compone de dos elementos: energía de las partículas que se mueven por las órbitas (energía cinética), la que cuando hay suficiente profundidad permanece constante y la energía de la masa de agua elevada sobre el nivel del mar (energía potencial), que se traslada junto con la forma de la ola.

Asimismo, es importante destacar que las ondas tienen cuatro particularidades significativas:

- 1. la energía se propaga a grandes distancias,
- 2. la perturbación viaja a lo largo del medio sin trasmitirle al medio como un todo algún desplazamiento permanente.
- 3. la perturbación se propaga sin distorsión significativa de la forma de la onda y,
- 4. con una velocidad constante, (Brown et al. 1999).

Según la velocidad del viento, se forman desde las pequeñas crestas que acarician la playa hasta las encrespadas olas que se producen durante las tormentas; pudiendo variar desde los tranquilos mares de fondo que se acercan a las playas tropicales hasta los movimientos extremadamente caóticos y violentos producidos por los huracanes, los cuales juegan el rol principal en la transformación de la superficie oceánica siendo capaces de generar movimientos ondulatorios en su trayectoria sobre las aguas profundas, los cuales pueden afectar regiones alejadas, produciendo grandes inundaciones.

Las olas son modeladoras del litoral, ya que el continuo golpear desgasta o reconstruye las playas. El oleaje representa una de las fuentes dominantes de energía en gran parte de las zonas costeras, interviniendo de manera significativa en la circulación, el transporte de sedimentos y el modelado de las costas, entre otros factores, (Wright & Coleman 1973). Con su constante accionar en el tiempo favorece la rehabilitación, desarrollo o desaparición de las barreras que forman los arrecifes de coral, seibadales y manglares. Por otra parte es necesario tener en cuenta su comportamiento para la navegación, la pesca, el desarrollo portuario, industrial y urbano; ya que puede frenar, afectar o beneficiar estas actividades. Por lo que al diseñar muelles, puentes, canales o muros de contención sobre el mar o cerca de éste, es preciso realizar previamente estudios que aporten datos sobre el régimen de oleaje existente en la zona. Con la información obtenida se puede incluir en la arquitectura de la obra, los requerimientos necesarios que garanticen su fortaleza, estabilidad y operatividad frente a oleaje de cualquier magnitud y frecuencia de ocurrencia, (Caravaca 2011).

Actualmente se han alcanzado grandes progresos en el estudio de las olas, facilitándose útiles pronósticos que permiten desde impedir tragedias hasta el aprovechamiento del oleaje como fuente de energía. A ello ha favorecido el diseño de nuevos aparatos y modelos artificiales a escala de las olas, que simulan los procesos de interés.

A nivel global, para buscar información de ondas marinas, se cuenta con cinco métodos: mediciones permanentes (boyas), campañas de mediciones no permanentes, observaciones visuales, mediciones de satélite que permiten recoger datos en unos 40000 lugares de la atmósfera y del océano cada día, y modelación matemática numérica. En las costas de EUA, Europa, Canadá y Japón se encuentran la mayor parte de los sistemas de mediciones permanentes, (Holthuijsen 2007).

En Cuba no se halla ninguna boya permanente para la medición de oleaje. Los equipos y recursos para las campañas son costosos y están expuestos a daños y roturas propios de su actividad. El acceso a los registros satelitales también tiene un costo elevado y se accede a ellos mediante internet, lo que para el país es un poco limitado. El Instituto Nacional de Meteorología se vale diferentes modelos matemáticos para la caracterización y pronóstico del oleaje en aguas profundas y costeras del archipiélago cubano, (Caravaca 2011).

La bahía de Cienfuegos por su ubicación geográfica y su potencialidad portuaria constituye, un elemento concluyente en el desarrollo industrial de toda la región del país (Seisdedo & Moreira 2007). En sus márgenes se localizan significativas industrias como: la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes" y la Refinería de Petróleo "Camilo

Cienfuegos"; así como también se desarrollan otros usos, como, la pesca, el turismo, deportes náuticos y el urbano, (Seisdedo & Moreira 2007).

A partir del año 2008 se comenzó a utilizar por especialistas del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) el modelo SWAN, (Caravaca 2011). Este ha sido utilizado hasta el presente en modo estacionario y como primera aproximación en los estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) que se vienen desarrollando en Cuba desde 2005, (Gómez et al. 2011). En este caso el objetivo con SWAN fue determinar los campos de oleaje y la sobre-elevación del mar provocado por oleaje generado por huracanes en la costa de toda la provincia. Los resultados permitieron estimar valores de oleaje en toda la costa de la provincia Cienfuegos, así como la contribución del oleaje a la sobre-elevación total del mar, elaborándose mapas de peligro por inundaciones costeras.

Recientemente y a partir de simulaciones numéricas se determinó la variación del patrón de circulación y la sobre-elevación del nivel del mar al paso de huracanes, considerando además como forzantes los aportes fluviales y la marea. Este valioso resultado sin embargo no incorpora la formación de olas en estas circunstancias y por lo tanto no logra estimar cuál es la contribución del oleaje al patrón de circulación, (Marín 2017).

Entonces en el conjunto de investigaciones realizadas hasta este trabajo en relación a la caracterización del oleaje en la bahía de Cienfuegos, queda por resolver cual es la interacción entre este fenómeno, el oleaje y las corrientes generadas por el mismo y aquellas que se producen por la marea y los aportes fluviales, principales motores del movimiento en este sistema natural, (Muñoz, 2012). En ese contexto es que se define el problema científico de este trabajo de diploma.

Problema Científico

Es limitado el conocimiento sobre el aporte del oleaje al sistema de corrientes en la bahía de Cienfuegos, en condiciones climatológicas extremas.

Objetivo General

Aplicar la modelación físico-matemática para caracterizar la propagación del oleaje y las corrientes generadas por este en condiciones extremas en la bahía de Cienfuegos.

Objetivos Específicos

1. Evaluar la transformación de la onda a su paso por el canal de entrada para olas de diferentes alturas de acuerdo a condiciones climatológicas extremas.

- 2. Estudiar y aplicar los diferentes modelos de propagación del oleaje.
- Implementar la herramienta informática Sistema de Modelado Costero (SMC) para el estudio del comportamiento del oleaje en la bahía y playa Rancho Luna para condiciones climatológicas extremas.
- 4. Fundamentar las condiciones límites para la formación de olas en la bahía de Cienfuegos en condiciones extremas.

Justificación práctica

En ausencia equipamientos que permitan caracterizar el oleaje y de estudios que justifiquen su comportamiento físico así como el de las corrientes que este genera, resulta de gran importancia modelarlo matemáticamente para cuando existen condiciones climatológicas extremas en la bahía de Cienfuegos y el sector costero de Playa Rancho Luna. De esta forma se podría obtener información para la toma de medidas de protección e ingeniería de costas para reducir los daños que pueden provocar estos fenómenos.

Estructura de la Tesis.

- Introducción
- Capítulo 1. Estado del arte
- Capítulo 2. Materiales y métodos
- Capítulo 3. Análisis y resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Referencia bibliográfica
- Anexos

Capítulo 1. Se puntualiza concisamente la teoría general de las ondas marinas, así como los parámetros que las definen y sus características principales. Asimismo, se exponen los fundamentos físico-matemáticos de la teoría de las ondas en el mar en la que se afirman los modelos más utilizados a nivel mundial hoy en día. Finalmente se ilustran varios modelos matemáticos numéricos que hacen uso de esta teoría para generar y propagar oleaje. Además, se hace una revisión de la aplicación de algunos de estos modelos a nivel mundial, en Cuba y en la provincia de Cienfuegos.

Capítulo 2. En este capítulo se expone la metodología seguida para aplicar y resolver el problema científico planteado en la bahía de Cienfuegos y el sector costero de Playa

Rancho Luna. Se describen cómo se construyó la malla de cálculo, así como las condiciones iniciales para cada caso de estudio.

Capítulo 3. Se exponen los resultados de la aplicación del modelo matemático numérico seleccionado sobre la bahía de Cienfuegos y el sector costero de Playa Rancho Luna. Se discuten y analizan los resultados obtenidos.

Capítulo I. Marco teórico

Teoría lineal de ondas y teorías no lineales

Las teorías referentes a la generación y propagación de ondas pueden ser clasificadas en dos grupos: las teorías sobre ondas de pequeña amplitud, la cual es considerablemente usada para describir ondas gravitatorias, sobre todo en aguas profundas; y en segundo lugar las teorías de ondas largas, más adecuadas para su aplicación en aguas someras, (Guisado et al. 2010).

La teoría más simple sobre generación de oleaje es la Teoría de Airy o teoría lineal de ondas, que abarca desde aguas profundas a aguas someras. Por otra parte podemos encontrar el régimen de Stokes, y sus soluciones de segundo, tercer y cuarto orden, en las cuales se toman en cuenta los procesos que sufren las ondas en las cercanías de la costa, donde dominan las interacciones no lineales. No obstante, a pesar de que la teoría de Stokes es aplicable a ondas de amplitud finita a todas las profundidades y proporciona una buena descripción de los movimientos de las olas, en ocasiones es necesario recurrir a las teorías de onda larga aplicables a aguas someras, (Guisado et al. 2010).

Las ecuaciones de Boussinesq, aproximación para ondas largas débilmente no lineales, son prácticas para modelar la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas, (Peregrine 1967), por su parte la Onda Cnoidal, teoría aplicable a ondas de amplitud finita en profundidades reducidas, tiene en cuenta tanto los efectos de dispersión como los no lineales y enaltece por su buena aplicación a olas de crestas escarpadas separadas por grandes valles, representativas de aguas someras. Por último, la onda solitaria se identifica por no ser una onda de traslación y no oscilatoria; este tipo de ondas largas se asocian a maremotos o deslizamientos, (Guisado et al. 2010).

Para que el uso apropiado de las distintas teorías del oleaje quede garantizado se debe establecer un rango de validez para cada una de ellas. Las teorías no lineales, describen mejor el transporte de masa, la reflexión, rotura de ola, transmisión de energía y otras características no lineales.

(Dean 1974) presentó un análisis en el que definió las regiones de validez de las distintas teorías en función de los parámetros H/T^2 y d/T^2 donde T^2 es proporcional a la longitud de onda. (Le Méhauté & Hanes 1990) mostraron un análisis ligeramente diferente para ilustrar los límites aproximados de validez de varias teorías de ondas, incluyendo las

teorías de tercer y cuarto orden de Stokes. Tanto Le Méhauté como Dean recomiendan la teoría Cnoidal para aguas poco profundas de baja pendiente, y las teorías de orden superior de Stokes para aguas profundas. La teoría lineal se recomienda para pequeñas pendientes H/T^2 y valores pequeños de U_r , donde U_r es el número de Ursell y se define como $U_r = \frac{L^2 H}{d^3}$, (López & Tinoco 2014).

Siendo:

H: Altura de la onda.

T: Período.

d: Profundidad.

Para ondas de pequeño peralte en aguas profundas y de transición, la teoría lineal es apropiada, pero en esta región se pueden utilizar otras teorías. La teoría de Fenton, particularización de la teoría de 5^{to} orden de Stokes, se ajusta para la mayor parte del dominio, aunque no se observa en el gráfico de Le Méhauté por ser posterior a la confección del mismo. Para valores conocidos de H, d y T el gráfico de Le Méhauté (figura 1.1) se puede emplear como guía para seleccionar la teoría apropiada, (López & Tinoco 2014).

El valor del número de Ursell, Ur (a veces designado como número de Stokes), se puede emplear para establecer los límites de las regiones de uso de cada teoría. Una opción, es el denominado parámetro Universal (Up) sugerido por (Goda et al.1978) para la clasificación de las teorías de ondas. Los valores para las regiones de validación de las teorías no lineales de órdenes superiores fueron establecidos por, (Cokelet 1977) y (Williams 1981).

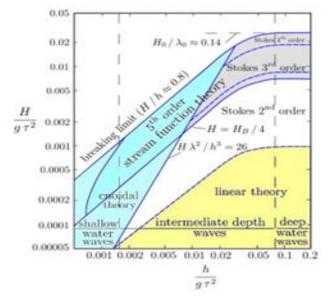


Figura 1.1. Rango de validación de las teorías de ondas.

Fuente. (Le Méhauté & Hanes 1990).

En la figura 1.2, se puede comparar la forma de las diferentes ondas, en función de sus teorías.

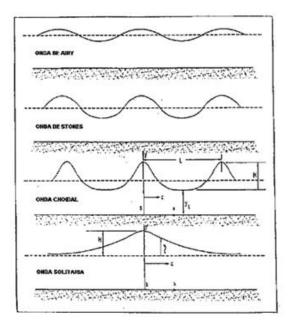


Figura 1.2. Comparación de ondas en diferentes teorías.

Fuente. (G.I.O.C 2002)

De las diferentes teorías que se han desarrollado para investigar la generación y propagación de ondas en el mar se pueden obtener modelos analíticos y descripciones de las características para la mayoría de los tipos de olas, lo que permite su análisis y estudio. Pese a esto aún existen aspectos teóricos relacionados con las ecuaciones de gobierno del movimiento ondulatorio y las ecuaciones de contorno, sobre todo en condiciones no lineales dominantes, que dificulta la obtención de soluciones analíticas completas. Con respecto a esto, en los últimos años se ha producido un perfeccionamiento, lográndose importantes avances en el desarrollo computacional de soluciones numéricas para las ecuaciones diferenciales que gobiernan las teorías del oleaje, lo cual se traduce en la aparición de modelos de simulación más complejos y precisos capaces de resolver las ecuaciones de gobierno y dar una aproximación más real al problema de la propagación de oleaje en las proximidades de la costa, (Guisado et al. 2010).

Teoría lineal de onda (teoría de Airy)

La teoría lineal de ondas en el mar es la más simple. Esta fue desarrollada por Airy en 1845, es fácil de aplicar, y da una aproximación sensata de las características de las ondas para una amplia gama de los parámetros de las mismas.

Se conoce como teoría para olas de pequeña amplitud y cubre el rango desde aguas profundas hasta aguas someras. Aunque hay restricciones a su aplicabilidad, la teoría lineal aún puede ser útil siempre que las suposiciones hechas al elaborarla no sean infringidas inmensamente, (González 2013).

Las hipótesis simplificadoras de partida son las siguientes (López & Tinoco 2014); (Almazán & Palomino 2000):

- 1. El agua es homogénea e incompresible; lo que implica que la densidad, ρ , es constante.
- 2. Los efectos de la viscosidad, tensión superficial y turbulencia son despreciables.
- 3. El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser asimismo despreciado.
- 4. La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- 5. El flujo es irrotacional, no existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.
- 6. El fondo marino constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- 7. El fondo es profundo y de profundidad constante.
- 8. La amplitud de onda es pequeña con relación a la longitud de onda y al fondo.
- 9. La forma de la onda es invariable en el tiempo y en el espacio o sea la onda es regular y bidimensional.

Acorde con la primera hipótesis se concluye que las líneas de corriente de un fluido incompresible son paralelas. Esto se logra demostrar a partir de la ecuación laplaciana de conservación de la masa, (López & Tinoco 2014):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0, \tag{1.1}$$

donde ρ es la densidad y \vec{u} el vector de velocidad.

Ahora, si el fluido es incompresible, la densidad es invariable y por tanto su derivada es cero, entonces la ecuación (1.1) se puede escribir:

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0. \tag{1.2}$$

Esto quiere decir que la diferencia de la velocidad es nula, o lo que es lo mismo, que las líneas de flujo son paralelas, pero no significa que tengan que ser rectas, (López & Tinoco, 2014).

La hipótesis de que el flujo es irrotacional involucra que el campo correspondiente deriva de un potencial, es decir, que puede escribirse, para la velocidad horizontal (u) y vertical (v) las siguientes ecuaciones:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x},\tag{1.3}$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial z} \,. \tag{1.4}$$

Ambas implican que si se conoce el potencial $\phi(x, z, t)$ en todo el espacio de estudio, se pueden conocer también las velocidades de las partículas.

La formulación de la teoría lineal se desenvuelve normalmente en términos de función potencial, ϕ . Según Airy se corresponde con una perturbación de primer orden, $\phi = \varepsilon \phi_1$, en la que las condiciones de contorno tienen que cumplirse en z=0, obteniéndose, (Almazán & Palomino 2000), (López & Tinoco 2014), así:

1. El fondo es impermeable, no hay movimiento de agua a través del mismo, por lo tanto:

$$v = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0,\tag{1.5}$$

$$z = -d. (1.6)$$

Siendo d la profundidad máxima.

2. El agua siempre está encerrada dentro de su superficie, de tal forma que las partículas se mueven a la misma velocidad con que cambia de forma la superficie del mar.

$$\frac{\delta y}{dt} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = v, \quad en \quad z = y \tag{1.7}$$

3. En la superficie, la presión (p) se obtiene a través de la ecuación de Bernoulli como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz. \tag{1.8}$$

4. Finalmente se supone que la pendiente de la ola es pequeña (H/L<1) y que la profundidad del agua es mucho mayor que la altura de la ola (d/H>>1).

Se asume que las soluciones para este problema son armónicas en el tiempo y se obtiene por separación de variables; teniendo la siguiente forma, (p. ej. (Wehausen & Laitone 1960)):

$$\phi(t,x,z) = \frac{Hg}{2w} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (z+d))}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - wt), \tag{1.9}$$

Donde:

 $\frac{H}{2}$: semiamplitud de onda.

 $w = \frac{2\pi}{T} = 2\pi$: frecuencia angular.

 $k = \frac{2\pi}{L}$: número de onda.

La elevación de la superficie correspondiente es, (Almazán & Palomino 2000):

$$y(t,x) = H_0 \cos(kx - wt), \tag{1.10}$$

Donde la frecuencia (k) está determinada por la relación de dispersión, (Almazán & Palomino 2000):

$$w^{2}(k) = kg \tanh(kd), \text{ en la que } k = \frac{2\pi}{L}.$$
 (1.11)

Como se aprecia, la solución de la superficie del agua puede ser representada por sus variables x (espacial) y t (temporal) o por su combinación (fase), definida como (kx-ωt). Tal cual se representa en la figura (1.3), una onda periódica de forma constante propagándose sobre un fondo horizontal puede ser íntegramente descrita por su altura (H), su longitud de onda (L) y la profundidad (d), (López & Tinoco 2014).

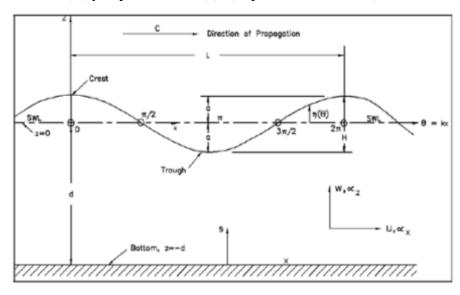


Figura 1.3. Representación de una onda de Airy.

Fuente. (CEM 2002)

Generalidades sobre ondas

La complejidad de los fenómenos de propagación de ondas sobre fondos de batimetría irregular ha sido la causa de que se estudien a fondo aspectos significativos de las mismas, tales como: procesos de refracción, difracción, reflexión, disipación de energía, entre otros.

Velocidad de onda

Igualmente conocida como velocidad de fase o celeridad, la velocidad de onda puede deducirse del tiempo que tarda una longitud de onda en pasar un punto fijo.

Al ser la distancia recorrida por la onda durante un período equivalente a la longitud de la misma, la celeridad se puede obtener como, (López & Tinoco 2014):

$$c = L/T (1.12)$$

Una expresión que relaciona la velocidad de onda, su longitud y la profundidad del agua, (Caravaca 2011) es:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tan h\left(\frac{2\pi d}{L}\right)},\tag{1.13}$$

Siendo:

g = 9,8 m/s, la aceleración de la gravedad.

L: longitud de onda (m) y

d: profundidad del agua (m).

La función trigonométrica tanh(x) tiene la propiedad de que para valores pequeños de x (inferiores a 0,05) $tanh(x) \approx x$, y para valores de x mayores a π entonces $tanh(x) \approx 1$.

Cuando d es mayor que la mitad de L (d>L/2, aguas profundas) la velocidad de onda es proporcional a la longitud de onda, o sea que la única variable que afecta la velocidad de onda es la longitud, (Holthuijsen 2007), entonces:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}. ag{1.14}$$

Por otra parte cuando la profundidad es considerablemente más pequeña que la longitud (d<L/2, aguas muy superficiales), depende sólo de la primera, entonces es d la única variable que afecta la velocidad de onda, (Caravaca 2011), y la ecuación anterior se aproxima a:

$$c = \sqrt{gd}. (1.15)$$

Por lo tanto para calcular la velocidad de onda es preciso conocer su longitud y la profundidad. Por ende en aguas someras donde se cumpla que d < L/2, para las ondas de longitud tal que se cumpla esta relación esas ondas viajarán a una misma velocidad.

Velocidad de grupo y dispersión de la onda

Las ondas de mayor longitud y período en aguas profundas viajan a superior velocidad, rebasando progresivamente a las de menor longitud, aislándose y dispersándose así unas de otras, (Brown et al., 1999). Por esta razón las de mayor longitud son las primeras en alcanzar regiones distantes del área de formación. Esta separación de las ondas en virtud de su diferente razón de movimiento se conoce como dispersión y la ecuación (1.12) es conocida como relación de dispersión en términos de velocidad y longitud de onda (CEM 2003). Otra forma de expresar la relación de dispersión pero en términos de la relación entre ω y k o equivalentemente entre longitud de onda y período, (Pond & Pickard 1995) es:

$$w^2 = gk \tanh(kd). \tag{1.16}$$

La cual se deriva de la ecuación del movimiento (LeBlond & Mysak 1978). Teniendo en cuenta (1.16) y que la velocidad de onda también puede formularse como c=ω/k se obtiene la otra relación de dispersión (1.12), (Pond & Pickard 1995).

Las ondas oceánicas existentes no son ondas sinusoidales puras sino la resultante de la suma de ondas sinusoidales con un rango de longitudes de onda y sus correspondientes períodos y amplitudes. Se forman grupos de onda por la superposición de varias ondas y en cada grupo las ondas individuales se mueven apareciendo por su parte trasera y avanzando hacia la parte delantera donde desaparecen. La energía de onda viaja a la velocidad del grupo.

Al viajar las ondas individuales a una velocidad próxima al doble de la del grupo que conforman, es más significativa la velocidad de grupo que la de las ondas individuales.

Teniendo en cuenta el caso más simple, un grupo formado por dos ondas, la expresión para la velocidad de grupo c_{g.} (Pond & Pickard 1995),está dada por:

$$c_g = \frac{w_1 - w_2}{k_1 - k_2} = \frac{\Delta w}{\Delta k} \,. \tag{1.17}$$

En aguas someras la velocidad de onda es regida por la profundidad, por lo que al llegar a ellas los trenes de ondas, todas las ondas individuales toman una misma velocidad y por tanto los trenes de onda toman esa misma velocidad.

Energía de la onda

La energía de la onda está entendida de dos formas: en la primera la energía cinética, inherente al movimiento orbital de las partículas de agua y la segunda la energía potencial que poseen las partículas cuando son desplazadas de su posición de equilibrio, (CEM 2003). La energía total (E) por unidad de área de una onda es:

$$E = \frac{1}{8(\rho g H^2)},\tag{1.18}$$

donde ρ es la densidad del agua (kg/m³), $g = 9.8 \text{ m/s}^2 \text{ y}$ H es la altura de la onda (m). La energía se da entonces en Joule por metro cuadrado (J/m²), (Pond & Pickard 1995). Esta ecuación muestra que la energía de la onda es proporcional al cuadrado de la altura de la onda.

Propagación de la energía de la onda

En aguas profundas las ondas viajan en grupos, con áreas de mínima perturbación entre ellos. En el interior del grupo se contiene la energía y viaja a la velocidad de grupo sin trasmitirse energía entre los mismos. La trasmisión de energía es máxima en las zonas del grupo donde las ondas adquieren mayor altura, (Caravaca 2011).

La razón a la que la energía es propagada por unidad de longitud de cresta de onda es conocida como potencia de la onda:

$$P = c_q E$$
,

Donde c_g es la velocidad de grupo y E es la energía de la onda por unidad de área, (Brown et.al 1999).

Atenuación de la energía de la onda

Coligado a la atenuación de la energía de la onda tenemos la pérdida o dispersión de energía, lo que resulta en una reducción de su altura. La energía se disipa en cuatro formas fundamentales, (Brown et.al 1999):

- La resistencia del aire que actúa sobre ondas que en un principio tienen una pendiente muy elevada, al dejar el área de generación entran en zonas calmas o de vientos en contra.
- 2. La atenuación viscosa que es solo significativa para ondas capilares de frecuencias muy altas y trae consigo disipación de energía en calor por la fricción entre las moléculas.
- 3. El *whitecapping*, que involucra transferencia de la energía de la onda a la energía cinética del agua en movimiento, fortaleciendo las corrientes inducidas por viento.
- 4. Interacciones no lineales onda-onda. Un poco más complicado que únicamente la combinación lineal de las frecuencias para producir grupos de onda.

Otros de los mecanismos que dan lugar a la disipación de energía en el proceso de la transformación de las ondas es la fricción por fondo estimulada por los esfuerzos tangenciales que se producen en la capa límite cercana al fondo. Ésta es mucho más notable que la que se produce por la percolación que tiene lugar en lechos muy permeables, (G.I.O.C. 2000).

En aguas de poca profundidad el principal mecanismo disipador de energía es la rotura. Este fenómeno está enteramente controlado por la profundidad y se origina cuando la altura alcanzada por la onda coincide aproximadamente con la profundidad. Es entonces cuando el perfil de la onda deja de ser estable y rompe disipando una gran cantidad de energía en forma de turbulencia principalmente, (G.I.O.C. 2000).

Refracción

Al aproximarse el oleaje a la costa comienza a notarse el efecto del fondo. A medida que se propagan las ondas en el mar, el movimiento oscilatorio de las partículas que forman la superficie libre tiene tendencia a generar un movimiento en el fluido, cuya dirección es perpendicular al plano de propagación y su sentido es elíptico. Es este movimiento oscilatorio el que "conecta" la superficie con el fondo del mar, (Modesto 2009).

De la teoría lineal de ondas se deduce que una onda empieza a sentir la presencia del fondo cuando la profundidad en la que se encuentra es $h < \frac{L}{2}$ donde L es la longitud de la onda y h la altura, (G.I.O.C. 2000). Cuando la profundidad no es suficientemente alta la corriente fricciona con las partículas del fondo, intercambiando energía y disminuyendo así la velocidad del tren de ondas.

Mientras más someras son las aguas, mayor es el efecto que el fondo produce sobre la superficie. No obstante cuando las aguas son lo suficientemente profundas, el movimiento de la superficie libre no es capaz de afectar a las partículas de fluido más cercanas al fondo por lo que su velocidad no se ve alterada. Por esto, si la batimetría del fondo no es constante la velocidad de los distintos grupos de ondas que generan la superficie será desigual en cada punto del dominio de propagación. La consecuencia física es que éstos tenderán a girar para alcanzar una dirección de avance lo más paralela posible a la línea de máxima pendiente del fondo. Este efecto es conocido como **refracción** de las ondas en el mar, (Modesto 2009).

La refracción puede provocarse también por las variaciones en la velocidad estimuladas por la presencia de una corriente. Esta corriente puede inducir un retraso de parte del frente con el consiguiente cambio de dirección. Por tanto, la refracción puede ser debida al efecto del fondo o a la presencia de una corriente.

Difracción

A medida que las ondas en el mar se propagan hacia profundidades más reducidas encuentra la presencia de islas, cayos, cabos u otras estructuras naturales y artificiales.

Si la onda es muy larga en comparación con la dimensión del cuerpo con el que se topa, el área de sombra, respecto el área de incidencia, es menor. Es en esta situación donde los altos gradientes energéticos entre ambas zonas provocan una propagación perpendicular al avance del frente de olas incidente, (Modesto 2009), cuando la amplitud presenta una discontinuidad o grandes variaciones, (G.I.O.C., 2000). Este efecto es la llamada difracción del oleaje.

La difracción es la causante de que un fragmento de la energía transportada por la onda se transmita a las zonas de sombra creadas por estos obstáculos.

Las zonas de sombra, no son más que aquellas zonas adyacentes asociadas a toda estructura en el mar, donde el oleaje no tiene efecto tras incidir en él. Al no haber

propagación en estas áreas su energía es baja en comparación con los puntos de incidencia, de ahí que tales áreas se conozcan con este nombre, (G.I.O.C., 2000).

Además de producirse cuando las ondas se encuentran con una estructura, la difracción también es provocada cuando efectos acentuados de la refracción llevan a singularidades en la amplitud de la onda. Tiene especial importancia en el diseño portuario, en el estudio de propagaciones de las ondas, especialmente cuando se dan zonas de alta concentración de energía.

En propagaciones que abarcan extensas áreas pueden producirse discontinuidades en las alturas de las ondas a lo largo de un frente dado, por efectos acusados de la refracción. La naturaleza, para evitar estas discontinuidades asocia a los acusados efectos de la refracción una cesión lateral de energía que suaviza las discontinuidades. Por ello los procesos de refracción y difracción van casi siempre asociados, (G.I.O.C., 2000).

Reflexión

Cuando una onda al propagarse incide sobre cierto contorno y éste refleja total o parcialmente la energía de una onda incidente se produce la <u>reflexión</u> del oleaje, un cambio de dirección de propagación que depende directamente del ángulo de incidencia. Del mismo modo todo objeto tiene coligada una zona de sombra. Si las dimensiones del obstáculo son considerablemente mayores que la longitud de la onda que le incide, la zona de sombra es casi total y el efecto más evidente es la reflexión, (Modesto 2009).

La onda a la vez que se acerca hacia la costa es susceptible de verse transformada por la reflexión que tiene lugar en estructuras naturales y artificiales. La reflexión en playas, acantilados y diques puede cambiar totalmente el campo de ondas inducido por las ondas incidentes. En playas reflejantes donde los efectos de la reflexión son de gran importancia, la hidrodinámica en las zonas de rompientes, así como la morfodinámica asociadas puede verse muy afectada por efectos de la reflexión.

La reflexión puede dar lugar al traslado de la zona de rotura, cambios en el nivel de disipación en la playa, así como en el *set-up*, sistemas de corrientes y el transporte de sedimentos asociados. Por tanto la determinación del campo de ondas existente frente a una estructura reflejante natural o artificial será de significativa importancia si se desea determinar correctamente los flujos en sus proximidades, su morfodinámica o su estabilidad. Tiene gran importancia dado que las ondas reflejadas, que habitualmente viajan en dirección mar abierto pueden quedar atrapadas por efecto de la refracción, (G.I.O.C., 2000).

Modelos teóricos de propagación de ondas

Desde épocas remotas los navegantes y pescadores han dependido del conocimiento del comportamiento del oleaje, no obstante las afirmaciones que se realizaron durante el siglo XVIII respecto a las mismas manifestaban el gran desconocimiento que de ello se tenía.

Los primeros estudios relacionados con el oleaje, iniciados en el siglo XIX, se concentraron en el análisis de trenes de ondas monocromáticas regulares, formulándose los principios básicos de la mecánica de ondas de superficie y facilitando como resultado diversas teorías de ondas, según los tipos de desarrollo y condiciones de contorno impuestas. Sin embargo, los trenes de ondas regulares no son la aproximación más exacta del oleaje real. La ingeniería oceanográfica de hoy en día precisa representaciones más reales de la superficie libre del mar y de la cinemática y dinámica asociada a dicho movimiento, (Montoya & Osorio 2007).

Gerstner, un matemático de Praga dio a conocer la teoría trocoidal de olas para aguas profundas en 1802, y en 1845, Airy en Inglaterra desarrolló su teoría para ondas de amplitud pequeña, o teoría lineal de ondas, (Montoya & Osorio 2007). Luego en 1847, formulando las ecuaciones de Navier-Stokes, para flujo bidimensional irrotacional no viscoso como una serie de Fourier (Stokes 1847) presentó una teoría para olas de amplitud pequeña en aguas profundas, la cual extendió a olas de profundidad intermedia. Actualmente esta solución se conoce como la teoría de ondas de Stokes.

Estas leyes constituyeron un paso de avance, pues lograron las primeras aproximaciones, pero todavía eran exiguos para representar realmente los parámetros esenciales que describen las ondas marinas, como la altura de onda significativa, la dirección de propagación y el período. No fue hasta la segunda mitad del siglo XX que se obtuvieron los primeros modelos matemáticos capaces de ofrecer una descripción completa del oleaje, (Montoya & Osorio 2007).

Las primeras ideas acerca del proceso de formación de las olas se publicaron en 1925; después de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron las técnicas iniciales de pronóstico de oleaje, en las décadas entre 1940 y 1950; utilizándose en ellas relaciones empíricas entre la velocidad del viento y la altura de la ola para obtener características del oleaje, (Sverdrup & Munk 1947), emergiendo más tarde cuantiosos estudios basados en los principios que explican las características y el comportamiento de las ondas marinas. El estudio de (Pierson et al. 1955) distinguió tres zonas en el análisis del oleaje: el área de generación, de propagación y de extinción en la costa, utilizando por primera vez el

concepto de espectro en la expresión de oleaje. Posteriormente, (Pierson & Moskowitz 1964) desarrollaron el espectro P-M que supuso un avance sobre la técnica de predicción de oleaje.

En 1957, Phillips y Miles, plantearon las teorías de formación de las olas que prevalecen hasta nuestros días. Phillips con su teoría planteaba que: "las fluctuaciones de presión del viento sobre la superficie del agua produce fluctuaciones en la superficie del agua y es lo que le da la rugosidad". Miles complementó está teoría diciendo: "que las fluctuaciones del agua produce fluctuaciones en el aire y que estas fluctuaciones se ponen en fase, haciendo crecer más las olas".

Hasselmann en 1967, añadió un concepto que constituye la teoría que hoy por hoy se acepta. Según Hasselmann, las olas interactuaban entre sí y compartían la energía. Por ello era posible el transporte de energía dentro del espectro entre algunas frecuencia determinadas, que explicaba el crecimiento al principio de la formación de las olas.

En las últimas dos décadas los adelantos en el conocimiento de los procesos del intercambio de momento de inercia en la interface aire-agua en los océanos ha fundado un perenne desarrollo de modelos que describen la física de dichos procesos, (Massel 1996). Conocer exactamente los procesos y transformaciones que sufren las ondas en el mar (somerización, refracción, difracción y reflexión y rotura) en su aproximación a la costa, así como los que se producen en aguas profundas es una tarea difícil y gracias a los modelos de simulación, se puede predecir y conocer estas transformaciones cuya importancia en el modelaje costero, en la dinámica de corrientes y sedimentos, así como en la morfodinámica los hace ineluctables en cualquier proceso de caracterización morfodinámica. Así los modelos numéricos de previsión de oleaje se han convertido en una herramienta considerablemente utilizada por ingenieros marítimos, oceanógrafos e investigadores.

Los modelos de propagación de ondas se pueden encontrar en función de las ecuaciones discretizadas y de los fenómenos que se trate de representar. Generalmente se pueden dividir en dos grandes grupos, (Andrew 1999):

- a) <u>Los modelos simples</u> (modelos analíticos, y empíricos), basados en la teoría de propagación de ondas, y que pueden ser usado de forma rápida y la mayoría de las veces en el mismo sitio de estudio.
- b) <u>Los modelos complejos</u> que necesitan del uso de modelos numéricos computacionales. Estos se clasifican a su vez, en función de cómo resuelven las distintas ecuaciones implicadas en la generación y propagación del oleaje en: modelos espectrales, modelos de

conservación del momento y modelos basados de ecuación de Boussinesq. Abordan el fenómeno de propagación de una forma mucho más amplia y con menores restricciones, estando directamente basados en principios más elementales de la dinámica de fluidos (conservación de masa y de momentum), lo que les permite tratar un rango mayor de problemas. El inconveniente de estos modelos es su alta complejidad y coste computacional, (Guisado et al. 2010); (G.I.O.C, 2000).

Modelos complejos

Existen diversas clasificaciones de los modelos de base física que figuran las condiciones de oleaje en la costa; por ejemplo: podemos encontrar la que toma en cuenta las ecuaciones que utilizan estos en la propagación de oleaje como: modelos basados en la ecuación de la conservación de la masa y basados en la ecuación de pendiente suave; también se encuentran las basadas en función del fenómeno que representan, como son: los modelos monocromáticos que calculan refracción y difracción o los modelos que calculan el espectro direccional, igualmente se pueden clasificar según la teoría de ondas en los que se fundamentan los cálculos matemáticos: teoría lineal de Airy, Stokes o las teorías de ondas largas basadas en la ecuaciones de Boussinesq. Finalmente, la clasificación más reconocida de los modelos para simular la evolución del oleaje es la que los considera en dos grandes grupos: de resolución de fase y los promedio de fase, (Battjes 1994); (Guisado et al. 2010). Los modelos de resolución de fase, se sustentan en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad de movimiento integradas en vertical, y son utilizados para un escenario en el cual el oleaje presenta condiciones muy variables en dominios pequeños y generalmente no consideran generación ni disipación de energía, (Ris 1997); (Massel 1996); (Monbaliu et al. 2000), siendo una de las principales ventajas su buena simulación de los procesos de difracción y refracción, (Guisado et al. 2010).

Por otra parte, los modelos promediados en la fase, se basan en la conservación de la energía espectral, y suponen que las propiedades de las olas cambian lentamente a escala de longitud de onda. En contraste con los modelos que resuelven la fase, toman en cuenta los fenómenos de generación, disipación de energía y las interacciones no lineales en los que la superficie del mar es descrita por un espectro de energía, (Bolaños 2004); (Guisado et al. 2010).

Entre los modelos de resolución de fase se encuentran los modelos basado en la ecuación de la pendiente suave, (Berkhoff 1972), y su versión parabólica de (Radder 1979), y los basados en las aproximaciones de Boussinesq, (Peregrine 1967); (Guisado et al. 2010).

(Kirby & Dalrymple 1983), desarrollaron el modelo REF/DIF, a partir de la transformación del modelo lineal parabólico de refracción y difracción de (Radder 1979). Se fundamenta en la ecuación de la pendiente suave (*Mild Slope equation*). La principal desventaja se halla en que se necesitan 5 datos de longitud de onda para solventar una onda, y por tanto, dada la densidad de datos REF/DIF usualmente se aplica a regiones pequeñas (del orden de kilómetros). Otra desventaja es que no modela campos de olas crecientes, (Andrew 1999); (Guisado et al. 2010).

En la década de los 80 a partir de la aproximación hiperbólica de la ecuación de la pendiente suave fue desarrollado el Modelo REFRAC basado en la conservación del momento; éste es un modelo numérico explícito que permite estimar la refracción y peraltamiento de oleaje lineal sobre batimetría regular e irregular, incluyendo el efecto de la interacción ola-corriente. Su principal desventaja su incapacidad para simular efectos de difracción, reflexión e interacción no lineales ola-ola, (Guisado et al. 2010).

Los modelos cimentados en las ecuaciones y aproximación de Boussinesq, se fundamentan en la ecuación de continuidad y conservación del momento de inercia para ondas de superficie libre en aguas poco profundas, modelando la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas.

Numerosas son las aproximaciones que se han elaborado a partir de las ecuaciones de Boussinesq lo que ha facilitado a un número de modelos que simulan los procesos más representativos que sufren las olas en las proximidades de la costa, algunos son: BOUSS 2D, (Nwogu & Demirbilek 2001), FUNWAVE 2D, (Wei et al., 1995) y COULWAVE, (Lynett & Liu 2004).

MIKE 21 (BW), es un modelo desarrollado por, (Madsen & SØrensen 1992), es uno de los modelos tipo Boussinesq más utilizados y es capaz de figurar flujos no estacionarios en dos dimensiones. Al contrario de otros modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq, modela la propagación de ondas por la acción del viento desde aguas profundas a aguas someras sobre una batimetría variable teniendo en cuenta los fenómenos de refracción, difracción, reflexión y las interacciones no lineales entre ondas. Presenta como desventaja el requerimiento de varios datos de entrada para resolver la ecuación de ondas y por esto solo son ajustables a pequeñas regiones costeras, además no simula la disipación de energía.

Por su parte los modelos de promediado de fase (modelos espectrales) simulan el espectro de energía de la ola, y por tanto la superficie irregular del mar se describe mediante una función espectral de energía. Los modelos espectrales tuvieron su desarrollo entre los años

50 y 60, con los significativos avances introducidos por el concepto de espectro de ola de (Pierson & Moskowitz 1964), siendo el trabajo de (Gelci et al., 1956) el primero en introducir el concepto de la ecuación de transporte espectral.

Dependiendo de cómo se resuelva numéricamente la ecuación de gobierno, los modelos espectrales se clasifican en primera, segunda o tercera generación.

Los modelos de primera generación propagan el oleaje conforme a condiciones paramétricas impuestas y el espectro se simboliza como un arreglo de paquetes de energía discretizados en 2 dimensiones: frecuencia y dirección. Cada uno de esos paquetes se propaga individualmente, (Ortega-Arango 2010); un ejemplo de este tipo de modelos es el VENICE, (Cavaleri & Rizzoli, 1981) para aguas someras, (Guisado et al. 2010).

Los modelos de segunda generación, son capaces de propagar individualmente el oleaje de viento y el de fondo, por lo que se les conoce como modelos híbridos acoplados, (Caravaca 2011) a pesar de que incorporan las interacciones no lineales mediante la parametrización y mediante la utilización del espectro de JONSWAP, sufren limitaciones en la transferencia no lineal de energía y no se comportan bien en condiciones extremas de vientos rápidamente variables, (Guisado et al. 2010).

Tanto los de primera como los de segunda generación eran modelos que imponían determinado tipo de restricciones a la forma del espectro. Además no son aplicables a todo tipo de campos de vientos, ni obtienen estimaciones realísticas para situaciones extremas como las de vientos de huracanes y tormentas, (WAMDI-group 1988).

Los modelos de tercera generación constituyen el principal avance hasta hoy para la predicción de oleaje generado por viento. En estos no se impone una forma definida del espectro, lo que permite calcular enteramente tanto la ecuación de transporte de energía como los términos no lineales. Permiten observar la evolución en el espacio y el tiempo del espectro de frecuencias y la altura de la ola significante (Hs), lo cual los hace más exactos, (Guisado et al. 2010).

Entre los modelos de tercera generación más utilizados por la comunidad científica se encuentran, además del WAM, el WAVEWATCH III, (Tolman 1992), y el TOMAWAC (Benoit et al., 1996) para aguas profundas y SWAN, (Booij et al., 1999);(Ris et al., 1999) STWAVE, (Smith et al., 2001) y MIKE21 *Spectral Wave (SW)*, (DHI 2005) para aguas someras.

WAM (WAve Model):

Fue el primero de estos modelos, fue desarrollado por especialistas del Centro Europeo de predicción del tiempo a plazo medio (ECMRWF por sus siglas en inglés), (Caravaca

2011), siendo en la actualidad uno de los más utilizados pues ha sido extensamente probado a escala global y mares confinados y acoplado a los modelos meteorológicos, (Guisado et al. 2010).

WAVEWATCH III:

Ha sido creado por especialistas de la *National Centers of Environmental Prediction/National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA/NCEP)*. En su versión actual asume que las propiedades del medio (corrientes marinas y nivel del mar) son variables en el tiempo. Igualmente se asume que el campo de ondas en general varía en escalas temporales y espaciales mayores que las de una onda solitaria. Ello involucra que las parametrizaciones no limitan de forma rígida a la evolución del oleaje en relación con la batimetría y que el modelo pueda manipularse con dominios anidados desde la costa. Presenta como limitación, que el modelo no refleja con efectividad el oleaje cuyo factor limitante más fuerte sea la profundidad del mar. Se considera que la propagación de la ola es lineal y se parametrizan los efectos no lineales. Es recomendado especialmente para la modelación del oleaje en el área de generación y su posterior propagación hacia la zona costera, (Caravaca 2011).

SWAN (Simulating WAves Nearshore):

Modelo espectral, euleriano, no estacionario y promediado en la fase, desarrollado por la Universidad de Delft para la predicción de olas de viento bajo condiciones de limitación de fetch y profundidad bajo condiciones estacionarias. Describe la evolución del espectro de energía del oleaje teniendo en cuenta las condiciones del viento, el oleaje, corrientes y batimetrías, calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales. Las principales ventajas son que modela la geometría, propagación y los procesos que sufren las olas en el viaje desde el área de generación hasta la costa, se pude acoplar con modelos meteorológicos y ha sido ampliamente validado tanto empíricamente como en laboratorio, (Caravaca 2011).

Sistema de Modelado Costero (SMC):

Entre 1995 y 2002 fue desarrollado el Sistema de Modelado Costero (SMC) versión 2.5, por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria en colaboración con la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar; éste es un conjunto de metodologías y modelos numéricos que permiten estudiar los procesos costeros y sus efectos en la costa debidos a eventos naturales o actuaciones humanas. Centralmente en este proyecto, se desarrollaron un conjunto de documentos técnico-científicos que

acumulan todas las metodologías de diseño y evaluación de procesos costeros implementados en el SMC, (IH Cantabria 2002).

Este software establece un sistema de libre distribución, el cual ha sido adaptado en diferentes países del mundo, con un considerable rango de aplicaciones, incluyendo diferentes tipos de usuarios entre los cuales se encuentran ingenieros, técnicos, investigadores, oceanógrafos, físicos, licenciados en ciencias del mar, entre otros.

El objetivo elemental del SMC es proporcionar un instrumento numérico, que facilite la preparación de estudios paso a paso, usando las técnicas de trabajo propuestas en los Documento Temáticos. Este sistema fue diseñado en un principio para España, sin embargo la transferencia de tecnología ha permitido que haya sido exportado a más de 50 países como por ejemplo: Estados Unidos, Costa Rica, México Colombia, Túnez (en francés), Taiwán (en inglés), etc., incluyendo sus correspondientes bases de datos locales (oleajes, niveles y batimetría) en función de la información disponible, (IH Cantabria 2002).

Estudios de oleaje realizados en el mundo, Cuba y Cienfuegos

A partir de la aparición de los modelos implementados computacionalmente y con el desarrollo acelerado de la computación y de las tecnologías para medir las variables oceánicas, cuantiosas han sido los estudios y publicaciones realizadas empleando este tipo de modelos. La puesta en práctica de estos modelos, han estado enfocados generalmente en la modelación del oleaje con fines de pronósticos meteorológicos, tareas de protección y manejo de costas, ingeniería costera e investigación. En particular el Sistema de Modelado Costero (SMC) desarrollado entre 1995 y 2002 constituye un conjunto de metodologías y modelos numéricos que permiten estudiar los procesos costeros y sus efectos en la costa debidos a eventos naturales o actuaciones humanas en la misma.

Entre los trabajos realizados a nivel mundial el efectuado en el tramo costero conocido como La Guardia La Restinga, Venezuela, muestra cómo se acoplan el SWAN y el SMC, específicamente, dentro del SMC se emplea el Modelado del Terreno para reproducir la batimetría y la línea de costa incluyendo las estructuras actuales y futuras, y el modelo MOPLA para el estudio del oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos; para investigar el comportamiento de estos en condiciones de calma y extremas, (Córdova & Torres 2013).

Otros ejemplos lo conforman, en primer lugar el estudio realizado en la laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina; en el cual utilizan junto al SMC el SWAN, el nivel de agua máximo es la esencia de este trabajo. La máxima sobre-elevación por tormenta se definió

por la acción conjunta del viento y del oleaje generado por el mismo. Para estas estimaciones se utilizaron programas específicos y formulaciones empíricas. Para propagar el oleaje sobre el perfil de playa, se reconstruyó la batimetría de la laguna, basada en técnicas de teledetección; dentro de los modelos numéricos que están implementados en el SMC usó el Software tutor de ingeniería de costas (TIC 2003), (Pagot et al. 2014). En segundo lugar, tenemos el estudio efectuado en una zona de la playa de Candeias, en la región metropolitana de Recife, Brasil, el cual se centra en la aplicación de SMC para investigar la erosión de esta playa tras la instalación y modificación de una estructura costera dura (rompeolas), así como en un escenario sin el rompeolas en el mismo lugar, (Gomes & Costa da Silva 2014).

En Cuba:

A finales de los 70 y en la década de los 80 en Cuba se comenzó a utilizar métodos soviéticos para el cálculo de los elementos de ola en aguas nacionales. El primer trabajo, relacionado con el oleaje extremo generado por huracanes, fue realizado para el área de Juraguá, provincia de Cienfuegos, (Zotov 1977), donde se aplicó el método de Krilov a la manera recomendada en el manual (SNIP 1976). Más tarde, se calculó por primera vez el régimen extremo de los elementos de ola para el Malecón Habanero, tomando en cuenta además de los huracanes a los frentes fríos, (Mitrani et al., 1984), con aplicación de las recomendaciones dadas en el (SNIP 1982) y en el *Shore Protection Manual*, (SPM 1984); (González, 2013).

En 1987, el cálculo de los oleajes extremos se extendió para toda la isla,(Mitrani et al. 1984). Entre 1994 y 1996, se efectuó un estudio más integral para el malecón y se actualizó todo el estudio de régimen de olas para todo el país, (Mitrani 1994); (Mitrani 1996).

Ya en el siglo XXI se elaboró el primer método cubano de cálculo de los elementos de olas incluyendo el mar de fondo y basado en técnicas espectrales. A partir de este se confeccionó el Sistema MET-OLAS, que por corto tiempo se mantuvo activo en el INSMET y se aplicó en la simulación del oleaje del malecón habanero en presencia del posible cambio climático, (Juantorena et al. 2000); (Pérez 2011).

Además se ha logrado asimilar el modelo SWAN en el departamento de Meteorología Marina del INSMET; utilizándose para pronósticos del estado dinámico de la superficie del mar, para simulaciones de aplicación en el manejo costero; y junto a otros modelos en la elaboración del mapa de peligro por inundaciones costeras de la República de Cuba, (Mitrani et al., 2009).

El Sistema de Modelado Costero (SMC) ha sido implementado también en Cuba, ejemplo de esto lo constituye el artículo Aplicación del Sistema de Modelado Costero a un tramo crítico de la playa de Varadero: propuesta de solución, realizados por ingenieros del Centro de Investigaciones Hidráulicas de la CUJAE, (Vidal & Córdoba 2010); en el cual se realiza un estudio detallado en una de las zonas de la costa norte de Varadero con el objetivo de encontrar una alternativa y a su vez dar solución al problema de erosión que históricamente ha presentado esta playa.

Otra aplicación la establece el artículo Control de erosión en tramo costero de Varadero aplicando soluciones combinadas, (Córdova & Váldes 2011), de ingenieros hidráulicos igualmente del Centro de Investigaciones Hidráulicas de la CUJAE, donde se tiene como principal premisa la obtención de una solución para neutralizar los catastróficos efectos que ocasiona la erosión, tomando como objeto de estudio una zona costera de la playa de Varadero. Consiste en la aplicación de la solución combinada de rompeolas sumergidos y vertimientos de arena, utilizando el software en cuestión.

En Cienfuegos

Para determinar las características del oleaje en la bahía de Cienfuegos en presencia de condiciones climatológicas habituales, entre los días 16 y 20 de diciembre del 2010 fue medida la variación del nivel del mar en 4 posiciones en la misma para lo cual se utilizó un sensor de presión RBR TWR-2050, (Figura 1.3). El sensor fue dispuesto por 24 horas en cada estación registrando datos con una frecuencia de 4 Hz cada 20 minutos. Esta información fue suministra por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos para su utilización en este trabajo de diploma. La localización de las estaciones de muestreo respondió al interés de conocer las características del oleaje entorno a la ciudad de Cienfuegos y su zona portuaria, así como a garantizar la seguridad del equipamiento y las mediciones.

Como resultado de la implementación de la Directiva 1/05 y su posterior actualización en el 2010, se realizaron los estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgos, atendiendo en particular el peligro del oleaje. Tal como se indica en la Introducción de este documento de tesis, a partir del año 2008 se determinaron los campos de oleaje y de sobre-elevación de la mar provocada por este al paso de huracanes por la provincia, elaborándose mapas de peligro por inundaciones costeras, (Caravaca et al., 2010)



Figura 1.4. Mapa descriptivo de la bahía de Cienfuegos y ubicación de las estaciones de muestreo del oleaje. **Fuente.** (Muñoz, 2012); sin las estaciones de muestreo.

Tabla 1.1. Resultados de las mediciones del oleaje realizadas en la bahía de Cienfuegos, en cuatro estaciones entre el 16 y 20 de diciembre del 2010. **Fuente.** Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC).

Parámetro	Unidad	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4
Profundidad	m	10.00	5.00	5.29	9.86
Altura significante H _{1/3}	m	0.04	0.02	0.02	0.05
10% de la altura H _{1/10}	m	0.06	0.02	0.03	0.06
Altura máxima H _{max}	m	0.07	0.05	0.04	0.06
Altura promedio H _{avg}	m	0.02	0.00	0.01	0.02
Energía	J/m ²	0.79	0.20	0.25	1.34
Período T _{1/3}	S	5.27	14.25	3.96	6.46
Período T _{1/10}	S	5.19	15.03	4.05	5.75
Período T _{max}	S	5.25	21.75	4.00	6.00
Período T _{avg}	S	5.48	8.22	4.57	5.41

Capítulo II. Materiales y métodos.

Áreas de estudio

Este trabajo se desarrolla en dos áreas de estudios, la bahía de Cienfuegos y la playa Rancho Luna. Para la primera se consideran dos casos de estudios, el primero analiza la propagación del oleaje de tormenta en el canal y un segundo caso se refiere a la propagación en el interior de la bahía, focalizando la atención en el área de impacto que se corresponde con la zona urbanizada. La Playa Rancho Luna constituye el espacio de recreación privilegiado del municipio cabecera, al cual arriban en el verano ciudadanos de toda la región central del país. También playa Rancho Luna se encuentra en el contexto de desarrollo del polo turístico Rancho Luna - Pasacaballo y en un sentido más amplio Cienfuegos – Trinidad, con lo cual se significa el arribo de turistas extranjeros en una cifra creciente y por lo tanto su importancia socioeconómica.

Bahía de Cienfuegos

La bahía de Cienfuegos está situada en la provincia de igual nombre, en la región central y costa sur de Cuba, su forma es ovalada y está orientada de noroeste (NW) a sureste (SE), en los 22°09' latitud Norte y 80°27' longitud Oeste (Seisdedo & Moreira 2007). Es una bahía semi-cerrada con un área de 88.46 km², un volumen total de 810 km³ y cuya línea de costa ocupa 142 km de largo. Posee 19 km de longitud máxima y 7,5 km en su parte más ancha, con una profundidad promedio de 9,5 m, (Muñoz et al., 2012).

De forma natural está fragmentada en dos lóbulos (Lóbulo Norte y Lóbulo Sur), delimitados por la presencia de una cresta sumergida (bajo "Las Cuevas"), con una profundidad promedio de 1,5 m. En este sistema estuarino desembocan los ríos Caunao, Arimao, Damují, Salado y el Arroyo Inglés los cuales constituyen importantes fuentes de vertimientos residuales provenientes del sector urbano, industrial y agrícola, (Muñoz, 2012).

El intercambio de sus aguas con el Mar Caribe, ocurre a través de un estrecho canal de alrededor de 3 km de longitud, (Seisdedo & Moreira 2007), y un ancho 250 m, el cual alcanza profundidades entre 30 y 50 m en el centro, (Moreira et al. 2007). Este canal se encuentra limitado por dos puntas, al este por Punta Los Colorados situada a los 22°02'04' Latitud Norte y 80°26'29' Longitud Oeste y al oeste por Punta Sabanilla ubicada a los 22°02'28' Latitud Norte y 80°27'36' Longitud Oeste; presentando ciertos límites para la

navegación por la sinuosidad que forma Punta Pasacaballo; que forma un cañón con arrecife y costas acantiladas, y abrasiva con vegetación degradada hacia el sector Este, (Muñoz et al., 2012).

Playa Rancho Luna

Rancho Luna constituye la playa principal de la provincia Cienfuegos, en la zona central de la costa meridional de la isla de Cuba. Posee una longitud aproximada de unos 500 m y una disposición de su línea de costa de NW a SE. Se localiza entre los 22° 02' 13,5" de latitud norte y entre los 80° 25' 19,7" de longitud oeste, frente al mar Caribe y sobre una estrecha plataforma. En su extremo noroeste se encuentra un saliente rocoso natural en su extremo noroeste, sobre el cual se haya apoyada; tiene una barrera arrecifal protectora que la rodea completamente en su parte marina, expuesta a régimen de ondas de baja energía, que en ocasiones se alterna con ondas de alta energía producidas por huracanes. El régimen de mareas es semidiurno y micromareal. Según estudios realizados en 1993, las corrientes provocadas por la marea son de poca intensidad con dirección predominante 70°N durante el vaciante y de 310° N durante el llenante, (Castellanos & Satán 1993); (Gómez 2004). Esta playa tiene un importante uso turístico nacional e internacional (Hoteles Rancho Luna y Faro Luna). Presenta un uso intenso en época de verano, sobre todo en los meses de junio a agosto, (Caravaca et al. 2015).

Características del viento en condiciones climáticas habituales y extremas

El régimen normal de vientos en Cuba, está conformado fundamentalmente por la influencia del Anticiclón Subtropical Oceánico Azores - Bermudas, que genera los vientos de región Este y por los fenómenos de escala local, (Fernández 1995). En la provincia de Cienfuegos, el régimen de vientos es muy complejo, debido a que es el resultado vectorial de diversos procesos que interactúan estrechamente, entre los que se encuentran: la circulación del viento a escala sinóptica y el sistema de vientos locales que se manifiestan alrededor de la bahía y en la propia línea costera.

Atendiendo a las características de los eventos meteorológicos extremos más significativos en la región del Caribe y la configuración del territorio nacional, éste se ha dividido en tres zonas:

- Zona I (occidental) al Oeste del Meridiano 80°
- Zona II (central) entre los meridianos 77° y 80°
- Zona III (oriental) al Este del meridiano 77°

Teniendo en cuenta la clasificación anterior, Cienfuegos se sitúa en la Zona I de vientos máximos en Cuba, donde las direcciones del viento más frecuentes son del Primer

Cuadrante y los valores de frecuencia para estos rumbos en varios meses pueden alcanzar el 12 %. Una componente diurna y otra nocturna, se manifiesta en la provincia, asociadas al fenómeno de Brisa y Terral, debido a su proximidad con la costa. Los vientos de región NE constituyen el sector de mayor frecuencia en la dirección del viento, produciéndose con una frecuencia de 17,3 % y con una velocidad aproximada de 11 kmh⁻¹ (3 ms⁻¹), durante la noche y el invierno, mientras que los de dirección cercana al Sur imperan en los horarios diurnos, las tardes y el verano. La velocidad media del viento para todos los rumbos, se encuentra por debajo de los 11 kmh⁻¹ (3 ms⁻¹). El valor máximo de la velocidad media alcanza los 12 kmh⁻¹ (3,3 ms⁻¹), en los rumbos de SE al SSW para los meses de febrero a abril, debido a la acción de los "Sures". En marzo, el valor de la velocidad del viento predominante alcanza 15,5 kmh⁻¹ (4,3 ms⁻¹), con un rumbo NE y una frecuencia del 18,9 %, (Muñoz, 2012).

El régimen "normal" del viento definido es perturbado por la ocurrencia de los Frentes Fríos invernales y por los sistemas meteorológicos extremos, causantes de los valores máximos en la velocidad del viento en la isla.

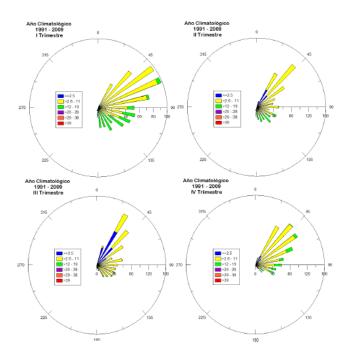


Figura 2.1. Rosa de vientos característica del municipio Cienfuegos en el período 1991 - 2009. **Fuente.** (Muñoz, 2012)

Uno de los eventos meteorológicos más significativos lo constituyen los huracanes, fenómenos atmosféricos muy difíciles de predecir y describir.

La provincia de Cienfuegos con frecuencia es afectada por ciclones tropicales que causan destrucción y pérdidas económicas en todo su territorio. Los fuertes vientos coligados a estos fenómenos, al actuar sobre el mar producen olas de alto poder energético que destruyen o dañan en su avance las estructuras marítimas y portuarias. Igualmente al llegar a la orilla y debido a la gran magnitud que adquieren, las olas pueden avanzar decenas de metros tierra adentro, destruyendo antes de disiparse cuanto encuentran a su paso, (Caravaca 2011). Muchos han sido los daños y destrucción que han causado en el interior de la bahía. Las experiencias de los huracanes Lili 1996, Michelle 2001 y Dennis 2005 así lo manifiestan. A continuación una breve síntesis de los tres últimos huracanes que se han aproximado a la provincia.

Huracán Lili

Se formó en el seno de una Onda Tropical en el Caribe occidental, muy cerca de Cabo Gracias a Dios. En la jornada del 17 de octubre adquiere la categoría 1 a 53 Km de Punta del Este en la Isla de la Juventud, con un rumbo próximo entre el norte noreste (NNE) y el noreste (NE). En la madrugada del día posterior inclina su movimiento cerca del este (E), aproximándose a Bahía de Cochinos, con una velocidad de traslación cercana a los 15 Km/h. El centro de mínima presión del vórtice de Lili ingresa al territorio insular cerca de las 8:00 am, específicamente entre Punta Perdiz y la Caleta del Rosario en la costa oriental de Bahía de Cochinos en Matanzas. Extiende su movimiento estable en dirección este noreste (ENE), sobre la ciénaga oriental de Zapata, Cienfuegos y Villa Clara, (Marín 2017).

El centro del huracán a las 9:00 am, se hallaba en el extremo occidental de la provincia de Cienfuegos, en los límites entre los municipios de Aguada y Abreus. En horas de la tarde se registró sobre la provincia una presión mínima central de 980,9 HPa alcanzándose una racha máxima de viento de 166 Km/h. En las provincias de Cienfuegos y Matanzas es donde se produce el mayor tiempo de permanencia de vientos huracanados, lo cual justifica las afectaciones ocurridas en la porción sur de estos territorios. Lili fue un huracán extenso (aproximadamente 250 Km de diámetro), intensamente lluvioso y de lento desplazamiento, por lo cual provocó fuertes afectaciones a la agricultura y a la vivienda, (Sardiñas et al., 2009); (Marín 2017).

Huracán Michelle

Este huracán se desarrolló a partir de la Depresión Tropical #15 de la temporada 2001, nacida en el seno de una Onda Tropical en el mar Caribe occidental el 29 de octubre. El 2 de noviembre en la mañana, Michelle adquiere la condición de huracán Categoría 1 y en la

tarde del mismo día la Categoría 2. A partir de entonces inclina el rumbo al NE, intensificándose muy rápidamente y el día 3 en la mañana ya es categoría 4 con un movimiento que lo aproximaba cada vez más a Cuba. Debido a fuertes corrientes del suroeste disminuye su organización, coligados a una onda superior en alturas de 8-10 Km, pero sin perder su condición de huracán de Gran Intensidad impacta en una zona muy próxima a Bahía de Cochinos alrededor de las 6:50 pm con vientos máximos de 210 Km/h. Ya en tierra Michelle inclina el rumbo más al este noreste (ENE), reduciendo en algo su fuerza y organización, el centro pasó sobre el municipio de Rodas en la provincia de Cienfuegos, para estar a las 10:00 pm en las cercanías de Lajas, muy próximo al límite entre las provincias de Cienfuegos y Villa Clara; sus vientos máximos fueron de 175 Km/h, por lo que era en ese momento un huracán categoría 2 (Marín 2017).

Michelle se debilitó grandemente al entrar a tierra, sobre la provincia de Cienfuegos pasó ciertamente como un Categoría 2. Esta atenuación se produjo debido a que transitaba por un proceso de pérdida gradual de características tropicales (o extratropicalización), lo que se hizo evidente al apreciar que los vientos del sector derecho fueron en general más débiles y menos extensos que los del sector izquierdo En la zona de Punta Castaño, Cienfuegos, el mar obtuvo alturas estimadas por encima de tres metros. Una vez que se implantaron los vientos del Suroeste con rachas superiores a 100 Km/h, entre las 9 y 10 de la noche se afectó toda el área del Malecón de Cienfuegos, desarraigando y tirando al suelo gran parte del mismo. Inundaciones costeras ocurrieron en los barrios de Reina, O`Bourke y Laredo. En la Bahía de Cienfuegos y la Laguna del Cura el nivel medio del mar aumento en 1,5 m, tomando como referencia a los muelles Real y el de GeoCuba, en Cayo Loco. (Sardiñas et al. 2009)

Huracán Dennis

El huracán Dennis se generó a partir de la cuarta Depresión Tropical, la cual se gestó en el seno de una fuerte onda tropical en la tarde del 4 de julio a unos 95 Km al este de Granada, grupo sur de las Antillas Menores. Fue moviéndose al oeste (W) por la periferia de la dorsal subtropical con ganancia en organización e intensidad. Al día siguiente en la mañana fue clasificado como la tormenta tropical Dennis, al mismo tiempo que inclinaba su trayectoria hacia el oeste noroeste (WNW). En su moviminto por aguas cercanas a Cuba fue ganando en intensidad llegando a ser un huracán categoría 4, reportándose una presión mínima de 951 HPa y vientos máximos de 220 Km/h.

El día 7 en la noche cruzó por la provincia Granma con movimiento entre el WNW y el NW a razón de unos 28 Km/h; allí se registraron vientos sostenidos con velocidades de

hasta 70 Km/h, superiores en rachas y con alturas de olas reportadas superior a los 6 m. al cruzar esta provincia se debilitó, pero recuperó su intensidad al trasladarse sobre la zona sur de Cuba, llegando a penetrar por un punto justo al W de Punta Mangles Altos, Matanzas con categoría 4 el día 8 a la 1:30 pm. Sobre el territorio matancero, se dirigió en un rumbo entre el WNW y el NW con una velocidad de traslación de 21 Km/h. Su centro pasó por la Ciénaga de Zapata muy cerca de los municipios cienfuegueros Abreus y Aguada de Pasajeros y del municipio matancero Jagüey Grande; además cruzó por Calimete y Unión de Reyes, (Marín 2017).

Los vientos huracanados del mismo al transitar cerca de Cienfuegos se dilataron en promedio hasta unos 40 Km a la derecha de la trayectoria afectando Cumanayagua, Cienfuegos, Abreus, Aguada de Pasajeros, además el sur de Rodas y de Palmira. En el resto de la provincia, se mantuvieron con fuerza de Tormenta Tropical. La estación meteorológica de Cienfuegos reportó una racha máxima de 158 Km/h (NE), Aguada de Pasajeros 192 Km/h (SE), Topes de Collantes 165 Km/h (E) en Trinidad 190 Km/h (SE), Santo Domingo 117 Km/h (ESE) y el Yabú 95 Km/h (E). Una estación meteorológica automática estacionada en Abreus reportó una racha máxima de 189,9 Km/h de región ENE. La presión mínima registrada en Cienfuegos fue de 982,1 HPa a la 1:00 pm y en Aguada de Pasajeros fue de 977,9 HPa a las 4:00 pm (hora local). El huracán Dennis afectó a 10 provincias cubanas, causando daños de consideración, especialmente en la provincias de Granma y Cienfuegos, afectando a 175615 viviendas, de las cuales destruyó 28082, una cifra superior al Huracán Michelle de 2001. También fue responsable de manera directa de 41 muertes, 22 en Haití, 16 en Cuba y 3 en los Estados Unidos, (Sardiñas et al. 2009)

Aplicación del Sistema de Modelado Costero SMC

Con el objetivo de evaluar la propagación del oleaje en estas zonas se aplicó el Sistema de Modelado Costero (SMC). De manera particular, dentro del SMC se empleó el modelo Mopla, una herramienta que permite propagar oleajes monocromáticos o espectrales desde profundidades indefinidas hasta zonas de playa en la costa; incluyendo deformaciones debido a la refracción, asomeramiento, difracción, disipación por rotura y pos-rotura. Este programa modela la evolución morfodinámica de playas a corto plazo, (Ramos 2013).

Con esta herramienta informática se efectúan estudios de casos reales de proyectos de ingeniería de costas, consintiendo el análisis de actuaciones en las diferentes etapas de un estudio: diagnóstico, prediseño, diseño e impacto ambiental.

El SMC permite desarrollar una gran multiplicidad de tareas, (G.I.O.C 2002); algunas son:

- Crear o abrir un proyecto de trabajo vinculado a una zona de estudio en la costa. El proyecto agencia toda la información generada dentro del estudio, almacenándola de manera estructurada en directorios que siguen una jerarquía.
- 2. Implantar proyectos a partir de imágenes (fotos, planos, cartas náuticas, etc.), mediante las cuales es posible examinar formas en planta de la costa en el largo plazo. Si se dispone de fotos de diferentes épocas, permitiría analizar situaciones pasadas, presentes y futuras.
- 3. Crear un proyecto a partir de desiguales batimetrías de una misma localidad, obtenidas en diferentes épocas. De forma análoga a como con las imágenes, es posible evaluar situaciones pasadas y presentes, como también predecir situaciones futuras a partir de nuevos escenarios propuestos.
- 4. Digitalizar y obtener la batimetría y línea de costa, a partir de una carta náutica o mapa referenciado de una zona.
- 5. Tener acceso a un programa que contiene una base de datos de oleaje visuales de barcos en ruta, el cual procesa dicha información para una zona específica del litoral. Permitiendo generar los datos de oleaje necesarios para la ejecución de los modelos numéricos del sistema.

El SMC ha sido dispuesto en cinco módulos principales (figura 2.1): "Pre-proceso", "Corto plazo", "Medio y largo plazo", "Modelado del terreno" y "Tutor". El módulo de "Pre-proceso" básicamente permite caracterizar y procesar información de entrada para los diferentes modelos numéricos. El módulo de "Análisis a corto plazo de playa" (Acordes) almacena las herramientas numéricas que permiten analizar la morfodinámica de un sistema costero, en una escala espacio/temporal de corto plazo. En el módulo de "Análisis a largo plazo de playas" (Arpa) aparecen las herramientas morfodinámicas que permiten modelar el sistema en una escala temporal espacial de medio y largo plazo. El módulo de "Modelado del terreno", admite modificar los contornos del fondo (batimetría) y laterales (acantilados, diques naturales y artificiales, etc.), lo que es fundamental para estudiar diferente escenarios dentro de un proyecto. En último lugar, se encuentra el "Tutor de ingeniería de costas" (Tic), el cual se ejecuta dentro del SMC como apoyo teórico, conceptual y de información básica para los diferentes modelos numéricos del sistema; (Ramos 2013); (Vidal & Córdoba 2010).

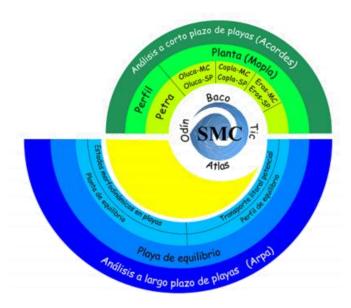


Figura 2.2. Representación esquemática del SMC. Fuente. (G.I.O.C 2002).

Parte del paquete SMC lo constituye Mopla, un modelo de evolución morfológica para zonas costeras de esquema 2DH de corto plazo basado en procesos. Está compuesto por tres módulos: un módulo de propagación y trasformación del oleaje (OLUCA), un modelo de cálculo de corrientes promediadas en la vertical (COPLA) y un módulo de transporte potencial de sedimentos y evolución morfológica (EROS), (Alvarez-Silva et al., 2012). Consta de seis modelos numéricos distribuidos en los tres módulos, para la simulación de la propagación del oleaje, cálculo del transporte de sedimentos, simulación del sistema de corrientes inducido por la rotura del oleaje, y la evolución de la batimetría, (Ramos 2013).

Modelo batimétrico

El modelo se corrió sobre la batimetría de la Bahía de Cienfuegos y parte de la región sur correspondiente a la misma donde se encuentra ubicada la playa Rancho Luna. Se construyeron tres mallas para el análisis de la propagación del oleaje y el comportamiento de las corrientes provocadas por la rotura del mismo; la primera correspondiente al sector central de la bahía incluyendo el canal de acceso, con dimensión de 250 x 125; la segunda sobre la zona norte de la misma abarcando la zona urbanizada, con igual dimensión y la tercera sobre la playa Rancho Luna de dimensión 84 x 86. Cada una de ellas con el objetivo de analizar los elementos físicos que fundamentan el comportamiento del oleaje en estas zonas para condiciones climatológicas extremas como el paso de un huracán.



Figura 2.3. Malla de cálculo correspondiente al canal de entrada y sector central de la Bahía de Cienfuegos.



Figura 2.4. Malla empleada para la propagación del oleaje en el interior de la Bahía de Cienfuegos.

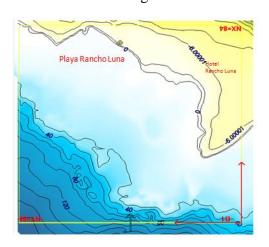


Figura 2.5. Malla correspondiente al estudio del sector costero Playa Rancho Luna.

Por las mallas correspondientes al sector central de la bahía y playa Rancho Luna se hicieron pasar ondas de 6 m, 10 m, 16 m provenientes del Sur; mientras que para la del interior de la bahía las ondas fueron de 2 m, 3 m, y 4 m con igual dirección; tomando como referencia el oleaje de tormenta caracterizado por Caravaca 2011.

La selección de la dirección de impacto de la ola, responde a que esta es representativa de los eventos extremos que se aproximan a la provincia, generalmente desde el Sur. En la tabla 2.1 se indican los datos principales de cada onda para la creación de los casos de estudio.

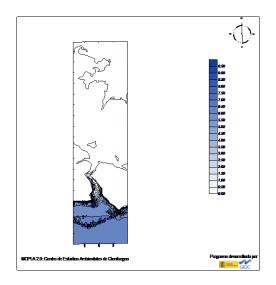
Tabla 2.1. Características de las olas propagadas para el estudio del oleaje en los sitios seleccionados.

Altura de ola	Período		
(m)	(s)		
2	7		
3	8		
4	9		
6	10		
10	12		
16	13		

Capítulo III. Resultados.

Propagación del oleaje en el canal de la bahía de Cienfuegos.

En el canal se observa como a medida que las ondas avanzan ocurre una disminución de su altura de manera rápida y gradual, apreciándose una atenuación de la energía considerable, incluso para las olas de mayor altura que son las de mayor densidad energética.



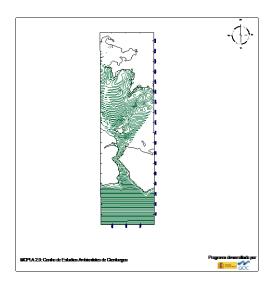


Figura 3.1. Propagación de ola de altura 6 m (a). Frente de onda, ola de 6 m (b). Ambos correspondientes a un Huracán C1, desde el exterior de la bahía

Aunque la amplitud se reduce a menos de 0,5 m, con independencia del valor inicial, ésta sigue avanzando tal como expresan los frentes de ondas descritos en la figura. Hay una transferencia de las características de la ola hacia el interior de la bahía, la señal se difracta ante la presencia del Cayo Carenas. Una parte de la señal toma rumbo el sector noroccidental y el otro al lado contrario, alcanzando la zona norte de la bahía.

Las corrientes más intensas se dan en los primeros metros desde la línea de costa, ello debido a que es la zona donde rompen las olas. Se localizan principalmente en la entrada del canal y zonas cercanas a él, debido a que su configuración estrecha no permite a las corrientes de mayor magnitud avanzar al interior de la bahía. Las corrientes provocadas por la rotura del oleaje reflejadas en la figura 3.2 (b) y (c), son más intensas, debido a que las ondas propagadas son de mayor altura, por lo que al romper ceden más energía y se generan corrientes de mayor magnitud.

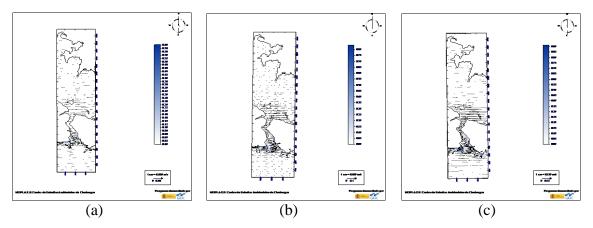


Figura 3.2. Magnitud y dirección de las corrientes. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1; (b) onda 3 m, huracán categoría3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5, desde el exterior de la bahía.

La configuración estrecha y sinuosa del canal de entrada hace que éste actué como un aislante, permitiendo que las grandes olas no entren a la bahía, dejando al interior de la misma apartada de las olas generadas en el exterior.

Se hace notar que este análisis tiene como punto de partida una simulación de carácter estacionario, con lo cual se entiende que se propaga la ola y no hay tras ella otra ola u otras, solo aquella que se propaga. Con ello se quiere reconocer que bajo la influencia de un huracán, la acción del viento es permanente durante su paso, y en consecuencia está generando olas todo ese tiempo bajo la fricción del viento sobre la superficie del mar, por lo que es de esperar la superposición de olas y otros fenémenos no desarrollados en este trabajo.

Dadas las características batimétricas del canal (más de 30 m), su profundidad, así como que en su fondo lo que se encuentra es un sedimento arenoso y rocas sueltas el transporte de sedimentos finos no tiene objeto. Sin embargo se hace notar que dadas la gran energía que ceden las olas al paso de huracanes es suficiente para extraer rocas sueltas de gran porte hacia la superficie generando en la mayoría de los casos afectaciones a la infraestructura construida, en particular las carreteras.

Propagación del oleaje en el interior de la bahía de Cienfuegos.

La batrimetría de la bahía es de poca profundidad con media de 9,5 m. Su configuración es alargada y estrecha; esto hace que la onda a medida que se propaga hacia la costa experimente un cambio brusco de profundidad (obsérvese figura 3.3), disminuyendo su energía cinética a la vez que aumenta la energía potencial y con ello su altura, provocando que la ola se haga cada vez más inestable y rompa disipando gran parte de su energía por fricción con el fondo y por la rotura propiamente, lo que limita el crecimiento del oleaje.

Las zonas que reciben mayor impacto de las olas provenientes la direccion analizada son todas aquellas cercanas al puerto, así como los repartos Reina y Punta Gorda; además de toda la zona perteneciente a la ensanada de Marsillán. Como ha quedado demostrado anteriormente, la bahía queda aislada de las grandes olas generadas en el Mar Caribe, y las ondas en su interior tienen que crecer desde cero, lo que hace que el oleaje alcance un menor desarrollo.

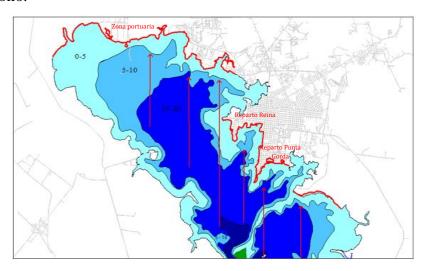


Figura 3.3. Áreas de mayor impacto de las olas provenientes del Sur en el interior de la Bahía de Cienfuegos y profundidad existente en la misma.

A pesar del incremento de la altura de la onda propagada, se observa que los valores finales a los que llegan son prácticamente los mismos debido a las características topográficas de la zona de estudio, la cual presenta áreas de muy baja profundidad. Esta es una condición límite al desarrollo del oleaje en esta bahía. Las órbitas de las partículas que componen las ondas son elipsiodales, al aproximarse a la costa los ejes de las elipses disminuyen a medida que se acercan al fondo, es decir el movimiento de esas partículas cambia a circulares y la altura de la ola disminuye con la profundidad, el movimiento es más horizontal; disipando una gran cantidad de energía por fricción con el fondo y por rotura del oleaje. Para las olas analizadas en este trabajo esto ocurre cuando se alcanzan profundidades menores de 10 m .

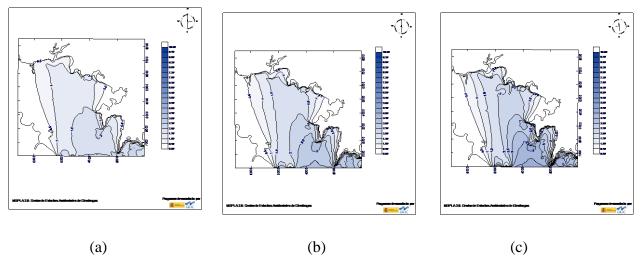


Figura 3.4. Altura de onda. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1; (b) onda 3 m, huracán categoría3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5.

Las corrientes más fuertes se localizan en las zonas cercanas a Punta Gorda, Reina, la desembocadura del Río Salado y el puerto, esto se debe en gran medida a que son poco profundas por lo que son zonas de rotura del oleaje. Cerca de la desembocadura del río Salado, la corriente genera un pequeño remolino, debido a irregularidades de la topografía de la zona de rotura. En el sector central del dominio, que se corresponde con la Ensenada de Marsillán y lugar donde se emplaza el malecón cienfueguero, se observa que las corrientes son intensas y ceden allí toda la energía de la ola durante su rotura. Esto también puede apreciarse al occidente de Punta Gorda y hasta la barrida de Junco Sur. Las corrientes más intensas corresponden a la onda propagada para un huracán categoría 5, alcanzando valores de hasta 0.54 cm.s⁻¹, principalmente próximo a Reina y la zona del puerto.

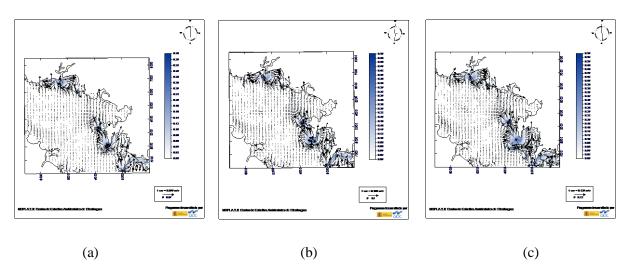


Figura 3.5. Magnitud y dirección de las corrientes. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1; (b) onda 3 m, huracán categoría 3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5.

Para la dirección del viento Sur, no se aprecian impactos notables en sectores costeros como la ensenada de Cotica donde se ubica la Central Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes y su base de tanques que almacenan hidrocarburos.

Todo lo hasta aquí descrito se corresponde con los efectos generados por los huracanes que han pasado por la provincia. En la zona del puerto por ejemplo los huracanes Dennis y Michelle provocaron cuantiosos daños a la insfraestructura portuaria, dejando en el mar las grúas y tolvas para la gestión de las cargas en buques.

El valor del transporte potencial es muy superior en la zona adyacente a Reina correspondiéndose con la zona de mayor intensidad de las corrientes de rotura del oleaje, aunque también aparecen al oeste y sureste de Punta Gorda en menor vigor. El movimiento de sedimentos concuerda con la dirección de las corrientes de rotura, siendo menos acentuado en la desembocadura del Río Salado y cerca del puerto.

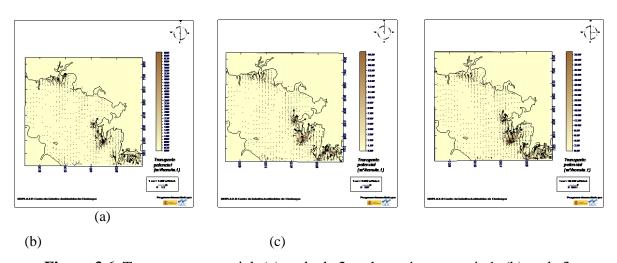


Figura 3.6. Transporte potencial. (a) onda de 2 m, huracán categoría 1; (b) onda 3 m, huracán categoría 3; (c) onda 4 m, huracán categoría 5.

Propagación del oleaje en el sector costero playa Rancho Luna

Debido a las características topográficas de esta zona ocurre una atenuación de la altura de la onda prácticamente igual para cada variante, llegando a la línea de costa valores de 0,5m. Se observa que esta atenuación ocurre de forma gadual y en un espacio reducido cerca de la costa y en los extremos de la playa un poco más alejado de ella, pues a partir de estos las aguas se van haciendo cada ves menos profundas y las partículas que la componen cambian de órbita, y se pierde una gran cantidad de energía. La ola empieza a romper a partir de los 15 a 10 m.

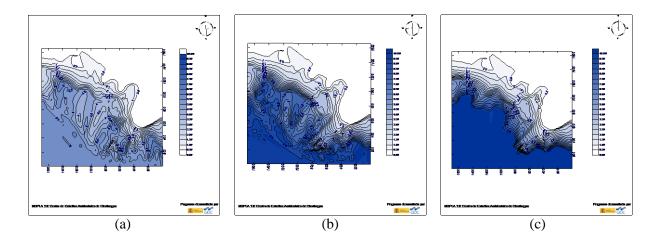


Figura 3.7. Altura de onda. (a) onda de 6 m, huracán categoría 1; (b) onda 10 m, huracán categoría 3; (c) onda 16 m, huracán categoría 5.

Se observa que no existe una dirección principal de la corriente, formándose vórtices o remolinos a lo largo de toda la playa lo que puede ser causado por características propias de la topografía de la zona de rotura; lo que da lugar a que ocurra el fenómeno de refracción en el que los sectores del frente de onda más próximos a la orilla se mueven más despacio que los más alejados, por lo que el frente de onda se desarrolla tratando de ocupar una posición paralela a la línea de costa.

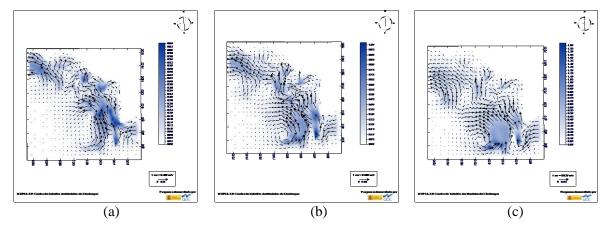


Figura 3.8. Magnitud y dirección de las corrientes. (a) onda de 6 m, huracán categoría 1; (b) onda 10 m, huracán categoría 3; (c) onda 16 m, huracán categoría 5.

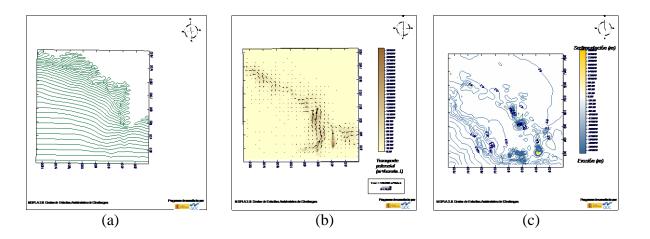


Figura 3.9. Frente de onda (a); transporte potencial (b) y erosión-sedimentación (c), ola de 6 m correspondiente a un Huracán categoría 1.

Se puede apreciar que los frentes de ondas viajan prácticamente de forma paralela a la línea de costa, lo que se corresponde con el fenómeno de refracción que experimentan las corrientes en esta zona; apreciándose un leve signo de difracción en la parte centro-este de la playa. Además se puede ver como se trasladan de forma equidistante hasta que se acercan a la costa donde se agrupan cada vez más, para finalmente desaparecer con el tiempo. Por otra parte se observa que el mayor transporte de sedimentos se corresponde con la zona donde las corrientes son más intensas y donde se forman los remolinos, debido a las características batimétricas de esta, lo que permite que estos se acumulen allí. En esta misma zona es donde predomina la erosión, apreciándose un gran vacío donde existe un gran flujo de corrientes como se apreció anteriormente, haciendo que se alcancen valores cero de erosión. Por otra parte se aprecia un pequeño espacio donde predomina la acreción hacia la parte norte, en tanto hay una gran erosión hacia la vertiente sur.

Los resultados obtenidos son comparables a los reportados en la literatura internacional, (Córdova & Torres, 2013), (Pagot et al., 2014), (Gomes & Costa da Silva, 2014); también con los realizados en nuestro país para distintas zonas de Varadero, (Vidal & Córdoba, 2010), (Pagot et al., 2014), (Córdova & Váldes, 2011). El SMC permite modelar el comportamiento del oleaje con gran confiabilidad, está diseñado para zonas cercanas a la costa, zonas portuarias y de playa, de hecho es muy usado en España, además de otros muchos países donde especialistas han adaptado a las características de las zonas que desean estudiar. Sin embargo no se tiene conocimiento de la calibración del mismo.

Conclusiones

En el orden metodológico se concluye que:

- Se aplica de manera exitosa la modelación físico-matemática para caracterizar la propagación del oleaje y las corrientes generadas por este en condiciones extremas en la bahía de Cienfuegos.
- 2. Fueron adquiridas habilidades para el uso del Sistema de Modelado Costero (SMC) en distintos escenarios.

En relación a los estudios de casos analizados se concluye que

- 3. Al paso de una onda por el canal de entrada a la bahía de Cienfuegos, para condiciones climatológicas extremas, este actúa como un aislante, que reduce la amplitud de la ola a menos de un metro, disipando su energía residual en el resto del sistema.
- 4. Cuando se alcanza profundidades menores de 10 m, para la peor condición evaluada, se inicia la rotura de la ola, su transformación y transmisión de energía.
- 5. Las corrientes provocadas por el oleaje extremo en la bahía de Cienfuegos impacta de manera directa áreas de gran importancia socioeconómica de la ciudad Cienfuegos.
- 6. Las características batimétricas de la playa Rancho Luna, determinan la configuración del patrón de corrientes en condiciones climatológicas extremas.

Recomendaciones

Se recomienda que:

- 1. Se realicen simulaciones con direcciones del viento del cuadrante SUR, como por ejemplo SW y SE.
- 2. Implementar modelos dinámicos que permitan visualizar fenómenos que no son posibles observar con los estacionarios.
- 3. Integrar modelos de corrientes, mareas y oleajes en un solo modelo para lograr una aproximación más realista.

Anexo A.

Ecuación de pendiente suave

La ecuación de pendiente suave o *mild slope equation* fue desarrollada en 1972, por Berkhoff, en esta la variable es el potencial escalar de velocidades del fluido. Esta ecuación es capaz de combinar los efectos de difracción y refracción de la onda tomando como hipótesis un fondo marino suave y poco inclinado, (Berkhoff 1972).

Además, sólo está formulada para el dominio de propagación, resultando una ecuación bidimensional que tiene en cuenta la batimetría sin que se haga necesario ampliar el espacio de resolución. Para ello, hace uso de un coeficiente no constante que incorpora la profundidad del fondo a través de una relación de dispersión de las ondas, (Modesto, 2009).

La ecuación *Mild Slope* ha sido, ha sido utilizada continuamente para modelar el comportamiento y la altura de la ola en puertos y zonas costeras. Su estudio, además, ha dado lugar a disímiles transformaciones de la ecuación encaminadas a modelar el oleaje con batimetrías no necesariamente suaves (un ejemplo puede consultarse en, (Suhet al., 1997)(Modesto 2009)

Forma elíptica

La ecuación de Berkhoff está basada en un problema de contorno elíptico el cual se vale de la teoría de ondas lineales de primer orden, lo que da lugar a un estudio frecuencial de la propagación del oleaje. O sea, la superficie libre del mar vista como un grupo de ondas que se puede descomponer en múltiples ondas individuales con una frecuencia única, (Modesto 2009). (Berkhoff 1972) con la hipótesis de que el fondo varía muy suavemente en una longitud de onda obtuvo su ecuación de la pendiente suave o mild slope, (G.I.O.C., 2000). Además para simplificar su uso hizo notar que la mayor parte de las propiedades de las ondas progresivas lineales podrían ser señaladas mediante un modelo ponderado integrado verticalmente, (G.I.O.C (UC) 2000)

Para introducir la ecuación *Mild Slope* (donde la hipótesis de base es suponer un fondo marino suave y poco inclinado), se considera sólo la propagación de ondas progresivas proporcionando un potencial complejo para una onda armónica simple de la forma:

$$\Phi(x,y,z,t) = \phi(x,y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-iwt}.$$
 (1)

Berkhoff multiplicó la ecuación de Laplace

$$\nabla^2 \phi = 0, \tag{2}$$

por la función de perfil f (z, h(x, y)) para la propagación sobre un fondo horizontal

$$f(z,h) = \frac{\cosh [k(z+h)]}{\cosh kh}.$$
 (3)

Donde k = k (h(x, y)) es el número de onda variable a través de la relación de dispersión:

$$kg \tan h(kh) = w^2, (4)$$

que muestra matemáticamente la dependencia entre k, w y h.

Y realizó la siguiente integración:

$$\int_{-h}^{\eta} f(z,h) \, \nabla^2 \phi dz = 0. \tag{5}$$

Mediante esta integración la ecuación de Laplace en tres dimensiones se transforma en la siguiente ecuación en dos dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(c c_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(c c_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k^2 c c_g \phi = 0. \tag{6}$$

O de forma más compacta:

$$\nabla(cc_a\nabla\phi) + k^2cc_a\phi = 0. \tag{7}$$

Haciendo $G = CC_G$ se puede expresar también esta ecuación como:

$$\nabla(G\nabla\phi) + k^2G\phi = 0. \tag{8}$$

Donde, c es la celeridad de la onda, c_g es la velocidad de grupo, k es el número de onda calculado de la profundidad de agua local dada por la relación de dispersión (4) y ∇ es el operador diferencial en la dirección horizontal. La cantidad ϕ representa la amplitud compleja de la fluctuación superficial del agua, (Isobe 1985).

Como se han considerado ondas armónicas simples y además $\eta = -\left(\frac{1}{g}\right)\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)$, se puede obtener una expresión alternativa en función de la superficie libre tal que:

$$\nabla(cc_a\nabla\eta) + k^2cc_a\eta = 0. \tag{9}$$

Para llegar a esta ecuación es preciso hacer la hipótesis de que la pendiente del fondo varía suavemente, es decir $\nabla h/(kh) \ll 1$, (G.I.O.C. 2000).

Aproximación parabólica

La ecuación (7) puede ser redefinida en las coordenadas curvilíneas (ξ, η) como:

$$\frac{1}{h_{\xi}h_{\eta}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(G \frac{h_{\eta}}{h_{\xi}} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(G \frac{h_{\xi}}{h_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \right\}. \tag{10}$$

La cual es una ecuación diferencial parcial tipo elíptica.

Seguidamente se aproximará la ecuación de pendiente suave (10) a una ecuación parabólica de acuerdo a la realizada por, (Radder 1979).

La ecuación (10) puede ser escrita nuevamente como:

$$\frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \right) = -\frac{1}{Gh_{\eta}} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial (Gh_{\eta})}{\partial \xi} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} - \left\{ \frac{1}{Gh_{\xi}} \frac{1}{h_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(G \frac{h_{\xi}}{h_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) + k^2 \right\} \phi. \tag{11}$$

Se asume que ϕ pude ser dividido en dos partes: las amplitudes complejas ϕ^+ y ϕ^- debido a ondas incidentes y reflejadas respectivamente.

$$\phi = \phi^+ + \phi^-. \tag{12}$$

$$\phi^{\pm} \sim a^{\pm} exp(\pm i \int k h_{\xi} d\xi). \tag{13}$$

De las ecuaciones (12) y (13) tenemos:

$$\frac{1}{h_{\xi}}\frac{\partial\phi}{\partial\xi} = ik\phi^{+} - ik\phi^{-}.\tag{14}$$

Entonces, podemos eliminar ϕ^- de las ecuaciones (12) y (14):

$$\phi^{+} = \frac{1}{2}\phi + \frac{1}{2ik}\frac{1}{h_{\varepsilon}}\frac{\partial\phi}{\partial\xi}.$$
 (15)

Tomando el gradiente de la ecuación (15) en la dirección de ξ y sustituyendo la ecuación (12) obtenemos:

$$\frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial \phi^{+}}{\partial \xi} = -\frac{1}{2ik} \left\{ \frac{1}{Gh_{\xi}} \frac{1}{h_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(G \frac{h_{\xi}}{h_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) + k^{2} \right\} \phi + \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2ik^{2}} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial k}{\partial \xi} - \frac{1}{2ik} \frac{1}{Gh_{\eta}} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial (Gh_{\eta})}{\partial \xi} \right\} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial \phi}{\partial \xi}.$$
 (16)

Sustituyendo la ecuación (12) y (13) se tiene una ecuación diferencial que contiene los términos $\phi^+ y \phi^-$. Asumiendo por lo tanto que:

$$|\phi^+| \gg |\phi^-|, |\phi^+ = |\phi, \phi^- = 0. \tag{17}$$

Se obtiene la siguiente ecuación parabólica para ϕ

$$\frac{1}{Gh_{\xi}} \frac{1}{h_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(G \frac{h_{\xi}}{h_{\eta}} \frac{\partial \xi}{\partial \eta} \right) + 2ik \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \left\{ \frac{i}{Gh_{\eta}} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(kGh_{\eta} \right) + 2k^2 \right\} \phi \tag{18}$$

Referencias

- Almazán, J.L. & Palomino, M.C., 2000. *Descripción, medida y análisis del oleaje.*, Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Available at: http://www.almazaningenieros.es/data/archivo/Descripcion, medida y analisis del oleaje.pdf.
- Alvarez, O., Osorio, .F. & Gómez-, A., 2012. Determination of the wave mean regime in the mouth of Leon river. *DYNA*, 79(0012-7353), pp.95–102.
- Andrew, C.J.F., 1999. Bibliographic review of Nearshore Wave Models. *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory*, Australia.
- Battjes, J.A., 1994. Shallow water wave modelling. In *Proceedings of the International Symposium on Waves-Physical and Numerical Modelling*. pp. 1–23.
- Benoit, M., Marcos, F. & Becq, F., 1996. Development of a third-generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing. *25th Int. Conf. Coastal Engineering*, *Orlando*, pp.465–478.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction. *Proc. 13th International Conference Coastal Engineering*, Vancouver.
- Bolaños, R., 2004. *Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Booij, N., Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal Geophysical Research*, 104, pp.7649–7666.
- Brown, J. et al., 1999. *Waves, Tides and Shallow Water Processes*. 2nd ed., Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Caravaca, L. et al., 2015. Comportamiento erosivo de playa Rancho Luna, Cienfuegos ,Cuba. *Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC)*.
- Caravaca, L. et al., 2010. Estudio de Peligro de Inundaciones Costeras por Penetraciones del Mar en la Provincia Cienfuegos. *XVI Fórum Provincial de Ciencia y Técnica*, pp.Cienfuegos, Cuba.
- Caravaca, L., 2011. *Modelación matemática del oleaje generado por huracanes en la bahía y costa de la provincia Cienfuegos*. Universidad de Cienfuegos.

- Castellanos, S. & Satán, O., 1993. Informe central del proyecto oceanográfico sureste de Cienfuegos: Instituto Cubano de Hidrografía. *Delegación Hidrografía Territorial Central*.
- Cavaleri, L. & Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal Geophysics Research*, 86, pp.10961–10973.
- CEM, 2002. Coastal Engineering Manual. In *Coastal Engineering Manual*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- CEM, 2003. Water Wave Mechanics. In Coastal Engineering Manual.
- Cokelet, E.D., 1977. Steep Gravity Waves in Water of Arbitrary Uniform Depth. *Philosophical Transaction of the Royal Society 286 (Serie A)*, pp.183–230.
- Córdova, L. & Torres, R., 2013. Protección del tramo de costa «La Guardia La Restinga» en Venezuela. 2: Dinámica Costera. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol 34,No1, pp.19–33. CIH, CUJAE, La Habana.
- Córdova, L. & Váldes, K., 2011. Control de erosión en tramo costero de Varadero aplicando soluciones combinadas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXII(3), pp.64–71.
- Dean, R.G., 1974. Evaluation and Development of Water Wave Theories for Engineering Applications. *Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, p.(Special Report No1).
- DHI, 2005. Mike 21 spectral wave module, Scientific documentation. *Danish Hydraulic Institute (DHI)*, p.http://www.mikebydhi.com/.
- Fernández, A., 1995. Guía climática de la provincia de Cienfuegos.,
- G.I.O.C, 2002. *Manual de usuario del SMC*. (Sistema de Modelado Costero versión 3.0), España: Universidad de Cantabria.
- G.I.O.C (UC), 2000. Manual de referencia Oluca-MC 3.0. *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.IO.C): Universidad de Cantabria (U.C)*.
- G.I.O.C., 2000. Documento de referencia. Dinámicas. *Grupo de Ingeniería Oceanográfica* y de Costas. *Universidad de Cantabria.*, p.27.
- Gelci, R., Cazale, H. & Vassal, J., 1956. Prediction of waves. The method of frequency-directional spectral densities. *Bulletin d'Information. Comite Central d'Oceanographie d'Etude des Cotes*, 9, pp.416–435.
- Goda, Y., Takayama, T. & Suzuki, Y., 1978. Diffraction Diagrams for Directional Random Waves. In *Proceedings of the Sixteenth Internation Conference on Coastal Engineering*. Hamburg, Germany: ASCE, pp. 628–650.

- Gomes, G. & Costa da Silva, A., 2014. Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil). *Journal of Coastal Research: Special Issue 71 Coastal Erosion and Management along Developing Coasts*, pp.30 40.
- Gómez, E., 2004. Estudio de la estructura y dinámica de la playa Rancho Luna. *Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos*.
- Gómez, R. et al., 2011. Estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por desastres de inundación por penetraciones del mar, inundación por intenas lluvias y afectaciones por fuertes vientos. *Delegación CITMA, Cienfuegos.*, p.provincia de Cienfuegos.
- González, J., 2013. *Aplicación del análisis espectral a mediciones directas del oleaje*. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Available at: http://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnh60s164e.pdf.
- Guisado, E., Malvárez, G. & Concha, F., 2010. Los Modelos de Propagación de Oleaje, Simulación Morfodinámica y las TIG. *Tecnologías de la Información Geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos [Recurso electrónico]: de lo global a lo local.*, pp.861–872.
- Holthuijsen, L.J., 2007. Waves in Oceanic and Coastal Waters., New York: Cambridge University Press.
- IH Cantabria, 2002. Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria).www.smc.ihcantabria.com/.
- Isobe, M., 1985. A parabolic refraction difraction equation in the ray -front coordinate system., pp.306–317.
- Juantorena, Y., Mitrani, I. & Beauballet, P., 2000. Las inundaciones por oleaje en el Malecón Habanero con el escenario actual y el previsto por posible cambio climático. Boletín SOMETCUBA 6(2 Publicación Electrónica), p.Available: http://www.met.inf.cu.
- Kirby, J.T. & Dalrymple, R.A., 1983. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 136, pp.453–466.
- LeBlond, P.H. & Mysak, L.A., 1978. Waves in the Ocean., Elsevier Publisher.
- López, I. & Tinoco, H., 2014. Ondas Superficiales en el Mar., pp.1–28.
- Lynett, P. & Liu, P.-F., 2004. Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth Integrated, Dispersive wave equations. *COULWAVE Code Manual*, Cornell Un, p.Long International Wave Modelling Package.

- Madsen, P.A. & SØrensen, O.R., 1992. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly varying bathymetry. *Journal of Coastal Engineering*, 18, pp.183–204.
- Marín, M.C., 2017. *Modelación de la surgencia en la bahía de Cienfuegos*. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez."
- Massel, S.R., 1996. Ocean Surface Waves: Their physics and Predictions. *Advanced Series On Ocean Engineering*, 11, p.491,Edit: World Scientific.
- Le Méhauté, B. & Hanes, D.M., 1990. *The Sea: Ocean Engineering Science.*, Harvard: Harvard University Press.
- Mitrani, I. et al., 2009. Asimilación de modelos a mesoescala, combinados para la predicción de la circulación atmosférica y el oleaje, en territorio cubano y mares adyacentes. , p.La Habana 2009.
- Mitrani, I., 1994. Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero.(inédito). *Informe Final de resultado Científico, Biblioteca del INSMET*.
- Mitrani, I. et al., 1984. Determinación del régimen de ola y viento en la costa norte de La Habana. *Centro de Divulgación y Documentación de las Brigadas Técnicas Juveniles, ACC*, p.15,ed. La Habana.
- Mitrani, I., 1996. El oleaje y la sobreelevación del nivel del mar en las costas de Cuba. *Boletín SOMETCUBA. Publicación Electrónica*, 2,No 1, p.INSMET, La Habana.
- Modesto, D., 2009. *Modelación numérica del oleaje en zonas costeras con batimetría no constante mediante Elementos Finitos*. Universitad Politécnica de Catalunya.
- Monbaliu, J. et al., 2000. The spectral wave model, WAM adapted for applications with high spatial resolution. *Coastal Engineering*, 41, pp.41–62.
- Montoya, R.D. & Osorio, A., 2007. Los Modelos de Generación del Oleaje de Viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, pp.47–74.
- Moreira, Á. et al., 2007. Composición y abundancia del fitoplacton de la bahía de Cienfuegos, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 28(2), pp.97–109.
- Muñoz, A., 2012. *Modelación hidrodinámica de la bahía de Cienfuegos análisis y aplicación a la gestión ambiental*. Universidad Martha Abreu de Las Villas.

- Muñoz, C... et al., 2012. The flushing time of Cienfuegos Bay, Cuba. *Natural Resource Modeling*, 25, pp.434–455.
- Nieto, J.C., 2011. El estudio del oleaje, su influencia en el conocimiento del clima y en las actividades humanas relacionadas con el mar. *análisis madri+d*.
- Nwogu, O. & Demirbilek, Z., 2001. *BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors.*, Washington, DC.
- Omar, G. & Lizano, R., 2003. Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica. Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) Universidad de Costa Rica, p.43.
- Ortega-Arango, S., 2010. Estudio de aprovechamiento de la energía del oleaje en Isla Fuerte (Caribe Colombiano). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Pagot, M. et al., 2014. Elevación máxima del agua en la laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. *Tecnologías y Ciencias del agua*, vol5,no.4.
- Peregrine, D.H., 1967. Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*, (27), pp.815–827.
- Pérez, A., 2011. Pronóstico del oleaje en las costas cubanas y mares Interamericanos, mediante el uso de los modelos numéricos MM5, WW3 y SWAN. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC).
- Pierson, W.J. & Moskowitz, L., 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *Journal Geophysical Research*, 69, pp.5181–5190.
- Pierson, W.J., Neumann, E. & James, R.W., 1955. *Practical methods of observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*, U.S. Navy Hydrographic Office Publication. No. 603.
- Pond, S. & Pickard, G.L., 1995. *Introductory Dynamical Oceanography* 2nd ed., Butterworth-Heinemann Ltd.
- Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation. *Journal of Fluid Mechanicsournal of Fluid Mechanics*, 95, pp.159–176.
- Ramos, S.M., 2013. Estudio morfodinámico de una playa lineal. Aplicación al caso de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ris, R.C., 1997. Spectral modelling of wind waves in coastal areas. (*Ph.D. Dissertation Delft University of Technology, Department of Civil Engineering*), *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, p.Report No. 97–4,160,The Netherlands.

- Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. & Booij, N., 1999. A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), pp.7667–7681.
- Sardiñas, B.S. et al., 2009. *Ciclones tropicales que han afectado la provincia Cienfuegos*. *período 1851-2008 (Tech. Rep.)*, Cienfuegos, Cuba.
- Seisdedo, M. & Moreira, A.R., 2007. Comportamiento de las características físico químicas de las aguas y del fitoplancton en la Bahía de Cienfuegos, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 28(3), pp.193–199.
- Smith, J.M., Sherlock, A.R. & Resio, D.T., 2001. STWAVE: Steady State wave model users manual for STWAVE V 3.0. ERDC/CHL SR-01-1, US. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.
- SNIP, 1976. Carga y efecto sobre las construcciones hidrotécnicas, (en ruso). *vol. SNIP-II-57-75. Moscú: Stroizdat*.
- SNIP, 1982. Carga y efecto sobre las construcciones hidrotécnicas, (en ruso). *vol. SNIP-* 2.06.04-82. *Moscú: Stroizdat*.
- SPM, 1984. Shore Protection Manual (SPM). Washington, DC 20314: U.S. Army Corps of Engineers, 1.
- Stokes, G., 1847. On the Theory of Oscillatory Waves. In *Transactions of the Cambridge Philosophical Society VIII*. pp. 197–229.
- Suh, D., Lee, C. & Sun Park, W., 1997. Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography. *Coastal Engineering*, 32, pp.91–117.
- Sverdrup, H.V. & Munk, W.H., 1947. Wind, sea and swell. In *Theory of relation to forecasting*. Washington, D.C.: Naval Oceanographic Office.
- Tolman, H.L., 1992. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind wave model. *Journal of Physic Oceanographic*, 22, pp.1095–1111.
- Vidal, D.F. & Córdoba, L.L., 2010. Aplicación del sistema de modelado costero a un tramo crítico de la playa de Varadero: propuesta de solución. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXI(2), pp.37–42.
- WAMDI-group, 1988. The WAM model a third generation ocean wave prediction model. *Journal, of Physic. Oceanographic*, 18, p.1775–1810.
- Wehausen, J. V., & Laitone, E. V., 1960. Surface Waves. In *Handbuch der Physik*. pp. 446–778.
- Wei, G. et al., 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1: Highly nonlinear, unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, pp.71–92.

- Williams, J.M., 1981. Limiting Gravity Waves in Water of Finite Depth. *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 302 (Serie(1466), pp.139–188.
- Wright, L.D. & Coleman, J.M., 1973. Variations in mor-phology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. , AAPG Bull., pp.370–398.
- Zotov, G.V.Z., 1977. Cálculo del régimen de ola y señalización de los planos de inundación en la región de la CEN, Cienfuegos, Cuba. *Soyuzmorniproyect*.