

Campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador¹

Extreme wave field offshore El Salvador

Francisco José Gavidia Medina

Licenciatura en Oceanología, Universidad Autónoma de Baja California
Maestría en Oceanografía Física del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada
Especialista en Oceanografía de la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales,
del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
fgavidia@marn.gob.sv

Fecha de recepción: 7 de febrero de 2020

Fecha de aprobación: 17 de julio de 2020

DOI:



¹ Agradecimientos: al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN), por el apoyo en el desarrollo del presente estudio de casos.

RESUMEN

Las series temporales de simulaciones del oleaje se descomponen en series de eventos del campo medio y extremo, caracterizadas por métodos estadísticos de corto y largo plazo. Generalmente los eventos del campo extremo tienen una alta variabilidad en intensidad y frecuencia. El modelo WAM simula parámetros del oleaje: altura significativa, período del componente más energético, dirección de propagación. Para caracterizar el campo extremo frente a la costa de El Salvador, se procesaron y analizaron series temporales (febrero de 1968–diciembre de 2009), en tres localidades de simulaciones realizadas con el modelo WAM. El oleaje extremo que arribó a la costa del país entre el 2-4 de mayo de 2015 tuvo una potencia máxima de $73 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$, la cual tiene un período de retorno de cinco años y una probabilidad de ocurrencia de 67 % para cinco años, 89 % para diez años y 100 % para 25 años de vida útil.

Palabras claves: análisis de valores extremos, oleaje, El Salvador.

ABSTRACT

The time series of wave simulations are broken down into series of medium and extreme field events, characterized by short and long-term statistical methods. Generally extreme field events have a high variability in intensity and frequency. The WAM model simulates wave parameters: significant height, period of the most energetic component, direction of propagation. To characterize the extreme field off the coast of El Salvador, time series (February 1968 – December 2009), were processed and analyzed in three locations from simulations carried out with the WAM model. The extreme swell that arrived on the country's coast between May 2-4, 2015 had a maximum power of $73 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$, which has a return period of five years and a probability of occurrence of 67 % for five years, 89 % for ten years and 100 % for 25 years of useful life.

Keywords: extreme value analysis, waves, El Salvador.

Introducción

Entre el dos y cuatro de mayo de 2015, arribó a la costa de El Salvador un oleaje extremo que transportó grandes volúmenes de sedimentos, erosionando y acrecentando el fondo del mar y las playas. Como resultado de lo anterior, se registraron daños en infraestructura en el mar (muelles y puertos) y en las playas (restaurantes, hoteles, casas de habitación y de recreación).

Para la vigilancia del oleaje y viento en el mar, en la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (DGOARN), del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), la línea de costa se ha dividido en secciones con base a su geomorfología, que se caracteriza por dos planicies (occidental y central – oriental, esta última dividida por el estuario del río Lempa), dos elevaciones (cordillera del Bálsamo y sierra de Jucuarán) y el golfo de Fonseca (bahía de La Unión), donde está una de las tres lagunas costeras del país, siendo las otras dos la bahía de Jiquilisco y el estero de Jaltepeque (DGOARN /MARN, 2007).

Las olas de este oleaje extremo fueron rápidas (entre 65 y 75 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) y altas (entre 2.4 y 2.7 m), siendo mayor en occidente que en oriente por el efecto sombrilla de la islas Galápagos, que refractan y difractan el tren de olas del oleaje proveniente del sur-suroeste. Este oleaje es del tipo mar de leva generado por las tormentas extra-tropicales del hemisferio sur frente a la Antártida. La potencia de este oleaje fue de 60 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ en la planicie costera occidental, 73 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ en la cordillera del Bálsamo, 59 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ en la planicie costera central, 43 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ en la planicie costera oriental y 35 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ en golfo de Fonseca (DGOARN /MARN, 2015).

El objetivo del presente trabajo es caracterizar el campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador, para responder preguntas como: ¿cuándo arribará otro oleaje con características similares al de mayo del 2015? y ¿cuál es la probabilidad de que esto ocurra?

Método

Las series temporales de mediciones o simulaciones de las variables dinámicas que controlan los procesos costeros (marea, oleaje, viento y corrientes asociadas), se pueden descomponer en series de eventos del campo medio y extremo, los cuales se pueden caracterizar por métodos estadísticos de corto y largo plazo. Los eventos del campo extremo, que pueden generar grandes impactos, por lo general tienen una alta variabilidad en intensidad y frecuencia. Por definición son considerados raros o poco frecuentes (Thompson, 2002).

Los métodos estadísticos de largo plazo, deben estimar los parámetros de la función de distribución de probabilidad de los eventos del campo extremo, a partir de una pequeña muestra con una alta variabilidad. Por lo tanto deben ser capaces de extender la información disponible a un intervalo de

tiempo mayor y usar una pequeña muestra de valores extremos para obtener estimaciones sin sesgo y con algún nivel de confianza aceptable. Seleccionada la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta, se puede calcular el período de retorno y la probabilidad de ocurrencia de los eventos del campo extremo.

Las funciones de distribución de probabilidad para eventos del campo extremo se han desarrollado a partir del análisis de valores extremos que establece que los valores extremos de un conjunto de variables aleatorias pueden converger a tres tipos de funciones de distribución de probabilidad (Fisher y Tippett, 1928), cuyas expresiones matemáticas son funciones exponenciales de tres parámetros: localización (α); escala (β); forma (γ):

Nombre	Expresión matemática	
Tipo I o Gumbel	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-e^{\left[\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]-\frac{(x-\alpha)}{\beta}}\right]}$	$\gamma = 0$
Tipo II o Frechet	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\right] \left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{\left(-1-\frac{1}{\gamma}\right)}}$	$\gamma > 0$
Tipo III o Weibull	$F(x) = \left[\frac{1}{\beta}\right] e^{\left[-\left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\right] \left[1+\gamma\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right]^{\left(-1-\frac{1}{\gamma}\right)}}$	$\gamma < 0$

Tabla 1. Funciones de distribución de probabilidad para estadística de largo plazo
Fuente: Thompson, 2002.

El procedimiento para identificar la función de distribución de probabilidad consiste en generar series de eventos del campo extremo, estimar parámetros de las funciones de distribución de probabilidad y seleccionar la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a las series de eventos del campo extremo.

Para generar series de eventos del campo extremo hay dos métodos. El primer método selecciona los eventos del campo extremo que sobrepasan un umbral y que están separados un cierto intervalo de tiempo, creando series de valores de eventos extremos. El segundo método selecciona el valor extremo de cada año creando series de valores extremos anuales. La serie de valores de eventos extremos puede tener un número de valores diferente que el número de años de la serie temporal original, dependiendo del umbral seleccionado. La serie de valores de eventos extremos contiene información de todos aquellos eventos que sobrepasan el umbral, mientras que la serie de valores extremos anuales solo contiene información de los eventos máximos de cada año.

Para estimar los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad se deben considerar algunos supuestos. Las series de valores extremos son una muestra de un proceso cuya función de

distribución de probabilidad puede converger a alguna de las que se obtienen del análisis de valores extremos. No todos los valores de las series de valores extremos se aproximarán a una función de distribución de probabilidad. Las series de valores extremos para algunas variables hidrodinámicas, como la marea, se aproximarán a una función de distribución de probabilidad; mientras que para otras variables, como el oleaje, se aproximarán a un conjunto de funciones de distribución de probabilidad, por lo que se hace necesario seguir alguno de los métodos de ajuste.

Hay dos métodos para ajustar los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad a las series de valores extremos. El primer método consiste en graficar la serie de valores extremos en la gráfica de la función de distribución de probabilidad. Para facilitar la identificación de la función de distribución de probabilidad que mejor se ajuste a la serie de valores extremos, se recomienda transformar el eje de la probabilidad a escala logarítmica, para que la gráfica de la función de distribución de probabilidad se aproxime a una línea recta. El segundo método consiste en ajustar la serie de valores extremos a la función de distribución de probabilidad ya sea por el método de mínimos cuadrados o el método de máxima similitud. El método de mínimos cuadrados es recomendable para series de valores extremos sin valores atípicos y funciones de distribución de probabilidad de dos parámetros. El método de máxima similitud es recomendable para series de valores extremos con valores atípicos y funciones de distribución de probabilidad de tres parámetros.

Para seleccionar la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a las series de valores extremos se deben considerar algunos criterios. Un criterio es la inspección de la gráfica de la función de distribución de probabilidad acumulada con la probabilidad de no excedencia de la serie de valores extremos. Otro criterio de selección son pruebas estadísticas como la correlación entre la función de distribución de probabilidad acumulada y la probabilidad de no excedencia de la serie de valores extremos. Para que la selección sea más robusta, se debe calcular el intervalo de confianza de la estimación de los parámetros de la función de distribución de probabilidad.

Una vez seleccionada la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a la serie de valores extremos, se pueden calcular el período de retorno y la probabilidad de ocurrencia de los eventos del campo extremo (Liu y Burcharth, 1998). El período de retorno (T_r), es el intervalo de tiempo promedio que transcurre entre eventos del campo extremo cuyo valor sea mayor o igual que el valor de diseño (V_r).

El período de retorno se puede calcular con la siguiente relación (fórmula 1):

$$T_r = \frac{t}{1 - P(V_r)}$$

Donde t es el intervalo de tiempo promedio entre eventos del campo extremo, y $P(V_r)$ es la función de distribución de probabilidad acumulada del valor de diseño (V_r).

La probabilidad de ocurrencia (P_o), es la probabilidad de que durante la vida útil de una infraestructura (L), ocurra al menos un evento que supere el valor de diseño (V_r), que corresponde a un determinado período de retorno (T_r).

La probabilidad de ocurrencia se puede calcular con la siguiente relación (fórmula 2):

$$P_o = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^L$$

Donde L es la vida útil de una infraestructura.

Resultados

El modelo WAM simula los parámetros del oleaje: altura significativa; período de la componente más energética; dirección de propagación (WAM-DI Group, 1988). Para caracterizar el campo extremo frente a la costa de El Salvador, fueron procesadas y analizadas series temporales (febrero de 1968 – diciembre de 2009), en tres localizaciones ($13^\circ \text{ N} - 90^\circ \text{ W}$; $13^\circ \text{ N} - 89^\circ \text{ W}$; $13^\circ \text{ N} - 88^\circ \text{ W}$) de simulaciones realizadas con el modelo WAM (Osuna, 2010), (mapa 1).



Mapa 1. Localizaciones de los nodos del modelo WAM. Nodo 1, $13^\circ \text{ N} - 90^\circ \text{ W}$ (90 km frente a punta Remedios). Nodo 2, $13^\circ \text{ N} - 89^\circ \text{ W}$ (60 km frente a la desembocadura del río Lempa. Nodo 3, $13^\circ \text{ N} - 88^\circ \text{ W}$ (30 km frente a Punta Amapala). Fuente: elaboración propia.

Un parámetro derivado de la altura (energía potencial), y del período (energía cinética), del oleaje es la potencia, la cual se puede estimar con la siguiente relación (fórmula 3):

$$\bar{P} = \bar{E}C_g \cong \frac{1}{2}T_p H_s^2$$

Donde \bar{E} es la energía y C_g es la velocidad de grupo del oleaje. Esta relación se obtiene de la teoría lineal del oleaje (Zeki y Linwood, 2008). Las unidades de la relación anterior son kW/m: flujo de energía por unidad de longitud del frente del oleaje.

En la caracterización del campo medio (clima), del oleaje frente a la costa de El Salvador (DGOARN /MARN, 2017), se propuso el percentil 95 como umbral de impacto bajo, el percentil 99 como umbral de impacto medio y el percentil 99.9 como umbral de impacto alto (gráfico 1).

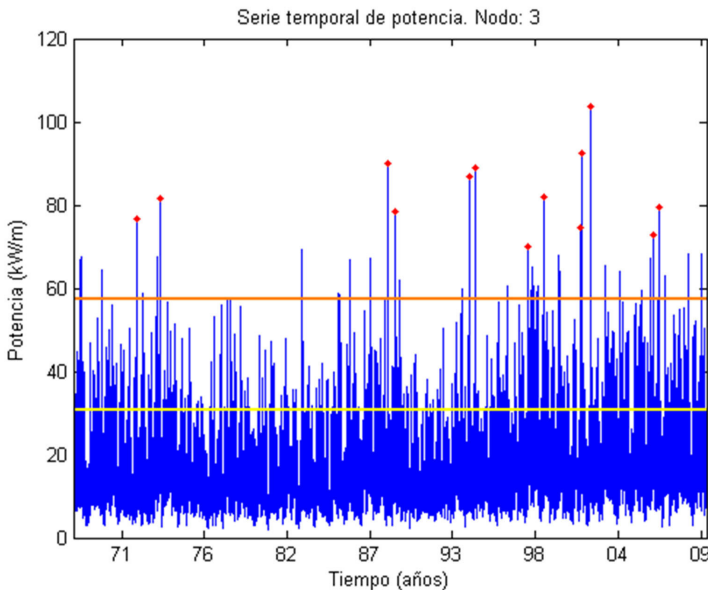


Gráfico 1. Series temporales de la potencia ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$) del oleaje. La línea amarilla indica el percentil 95. La línea naranja indica el percentil 99.9. Los puntos rojos son eventos del campo extremo que sobrepasaron el percentil 99.99.

Fuente: elaboración propia.

Para generar las series de eventos del campo extremo, se consideraron los máximos anuales (serie de valores extremos anuales) y los estados de mar² mayor o igual que el percentil 99.99 (serie de valores de eventos extremos).

² Estado del mar: estado de la superficie del mar durante un intervalo de tiempo en donde las condiciones (marea, oleaje, viento), se consideran constantes. Por lo general se acepta que el intervalo de tiempo es tres o seis horas.

Para estimar los parámetros de la función de distribución de probabilidad, se ajustaron las series de valores extremos a la función de distribución de probabilidad generalizada de valores extremos, con el método de máxima similitud y un intervalo de confianza del 95 % (tabla 2):

Nodo	Serie de valores extremos anuales			Serie de valores de eventos extremos		
	Localización (α)	Escala (β)	Forma (γ)	Localización (α)	Escala (β)	Forma (γ)
1	62.96	15.18	-0.12	84.53	5.37	0.42
2	58.46	17.25	0.05	81.71	7.53	0.71
3	56.94	13.53	-0.14	77.60	7.22	0.02
Promedio	59.45	15.32	-0.07	81.28	6.71	0.38

Tabla 2. Parámetros de la función de distribución de probabilidad generalizada de valores extremos. Fuente: elaboración propia.

El valor del parámetro de forma (γ) de la serie de valores extremos anuales (-0.07), sugiere que esta converge a la función de distribución de probabilidad de valores extremos del tipo III o Weibull, y que la serie de valores de eventos extremos (0.38) converge a la tipo II o Frechet.

Para seleccionar la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a la serie de valores extremos anuales, se graficó la probabilidad de no excedencia en la función de distribución de probabilidad generalizada de valores extremos acumulada (gráfico 2).

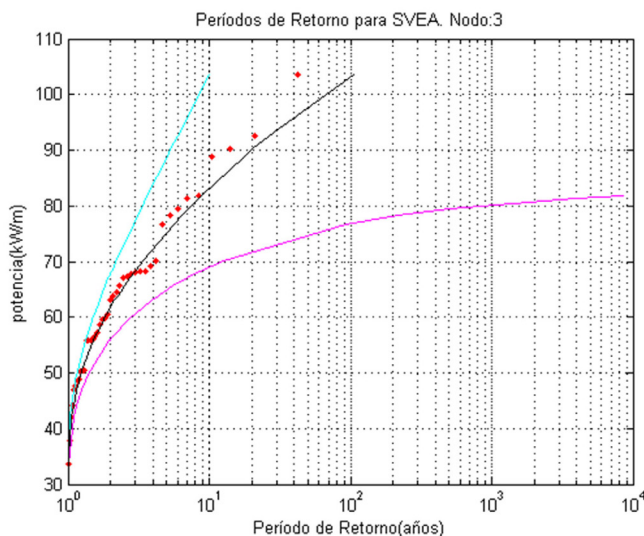


Gráfico 2. Períodos de retorno (años) para la potencia ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$) del oleaje. Los puntos rojos indican la probabilidad de no excedencia de la serie de valores extremos Anuales. La línea negra es la función de distribución de probabilidad generalizada de valores extremos acumulada, ajustada por el método de máxima similitud. Las líneas cian y magenta indican el límite superior e inferior del intervalo de confianza de 95 %. Fuente: elaboración propia.

Para seleccionar la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a la serie de valores de eventos extremos, se graficó la probabilidad de no excedencia en la función de distribución de probabilidad generalizada de valores extremos acumulada (gráfico 3).

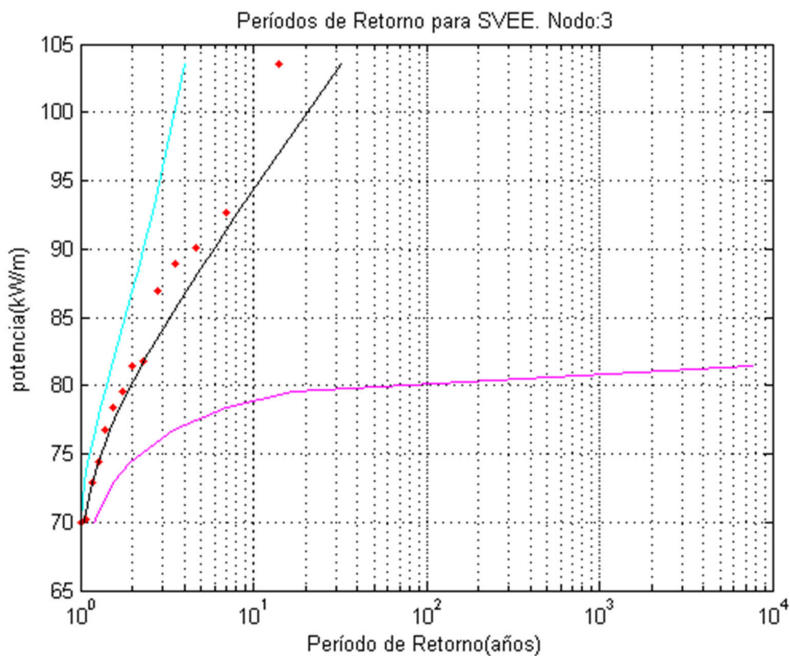


Gráfico 3. Períodos de retorno (años) para la potencia ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$) del oleaje. Los puntos rojos indican la probabilidad de no excedencia de la serie de valores de eventos extremos. La línea negra es la función de distribución de probabilidad generalizada de valores extremos acumulada, ajustada por el método de máxima similitud. Las líneas cian y magenta indican el límite superior e inferior del intervalo de confianza de 95 %. Fuente: elaboración propia.

Para calcular la potencia en función del período de retorno se empleó la función de distribución de probabilidad generalizada de valores extremos inversa (tabla 3):

	Serie de valores extremos anuales					Serie de valores de eventos extremos				
	Período de retorno (años)					Período de retorno (años)				
Nodo	5	10	25	50	100	5	10	25	50	100
1	84	93	103	110	117	96	105	121	137	159
2	85	100	118	133	148	102	124	175	242	352
3	75	83	92	98	103	89	94	102	107	113
Promedio	81	92	104	114	123	97	108	133	162	208

Tabla 3. Potencia ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$) en función del período de retorno. Fuente: elaboración propia.

Para calcular la probabilidad de ocurrencia se empleó la fórmula 2 (tabla 4):

	Serie de valores extremos anuales					Serie de valores de eventos extremos				
	Vida útil (años)					Vida útil (años)				
Período de retorno (años)	5	10	25	50	100	5	10	25	50	100
5	67	89	100	100	100	29	50	82	97	100
10	41	65	93	99	100	16	29	57	82	97
25	19	34	64	87	98	6	13	29	49	74
50	10	18	40	64	87	3	6	15	28	49
100	5	10	22	40	63	2	3	8	15	28

Tabla 4. Probabilidad de ocurrencia (%).
Fuente: elaboración propia.

Discusión

El oleaje extremo que arribó a la costa de El Salvador entre el dos y cuatro de mayo de 2015 tuvo una potencia máxima de $73 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$, la cual tiene un período de retorno de cinco años y una probabilidad de ocurrencia de 67 % para cinco años, 89 % para diez años y 100 % para 25 años de vida útil.

Estos hallazgos muestran que eventos del campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador, como el de mayo de 2015, deben ser considerados en acciones de un plan de gestión de la zona costera marina de El Salvador, como la planificación e implementación de proyectos de construcción, mantenimiento, modernización de infraestructura en el mar (tuberías, cables, muelles, puertos) o en línea de costa (centros habitacionales, turísticos, comerciales o industriales).

Referencias bibliográficas

El Salvador. Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales - DGOARN - / Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales -MARN- (2007) *Oceanografía en El Salvador: La zona costera marina de El Salvador*. Disponible en: <https://url2.cl/2pqdg>

El Salvador. Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales - DGOARN - / Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales -MARN- (2015) *Informe del oleaje extremo, tipo mar de leva incrementado, del 2 - 4 de mayo del 2015*. Disponible en: <http://mapas.snet.gob.sv/oceanografia/oleajeExtremo052015.pdf>

El Salvador. Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales - DGOARN - / Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales -MARN- (2017) *Variabilidad del campo medio del oleaje frente a la costa de El Salvador*. Disponible en: <https://url2.cl/vgIp4>

Fisher, R.A. y Tippett, L.H.C. (1928) Limiting forms of the frequency distribution of the largest and smallest member of a sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24, 180-190. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/S0305004100015681>

Liu, Z. y Burcharth, H.F. (1998) *Encounter probability of significant wave height*. Dinamarca. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Aalborg.

Osuna, P. (2010) *Implementación y validación del modelo WAM ciclo 4.5 en el océano Pacífico*. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.

Thompson, E.F. (2002) *Hydrodynamic analysis and design conditions. Chapter II-8. Coastal engineering manual*. Estados Unidos de América. Coastal and hydraulics laboratory. Engineer research and development center. US Army Corps of Engineers.

WAM-DI Group. (1988) The WAM model – A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), 1775–1810. Disponible en: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018%3C1775:TWMTGO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018%3C1775:TWMTGO%3E2.0.CO;2)

Zeki, D. y Linwood, C.V. (2008) *Water waves mechanics. Chapter II-2. Coastal and engineering manual*. US Army Corps of Engineers.