



# Canal de Oleaje Virtual

Dra. Gabriela Medellín Mayoral  
Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería.

ISC Gonzalo Uriel Martín Ruiz  
Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería.

Dr. Alec Torres Freyermuth  
Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería.

Sisal, Yucatán México  
Marzo de 2024

**Financiamiento:**

Número de proyecto: PAPIIT IA101422 Estudio de efectos e impactos de tormentas en islas de barrera de la costa norte de Yucatán

Responsable del proyecto: Gabriela Medellín Mayoral

**Cita:**

Medellín, G., Martín, G. U., Torres Freyermuth, A. (2024) Canal de oleaje virtual. Aplicación. <https://lipc.unam.mx/canal-virtual/>



# ÍNDICE DE PRÁCTICAS

1.	Longitud y celeridad de onda .....	5
1.1.	Teoría .....	5
1.2.	Objetivo .....	5
1.3.	Procedimiento en el laboratorio .....	5
1.4.	Análisis de datos .....	6
2.	Velocidades y trayectorias inducidas por el oleaje .....	7
2.1.	Teoría .....	7
2.2.	Objetivo .....	9
2.3.	Procedimiento en el laboratorio .....	9
2.4.	Análisis de datos .....	10
3.	Reflexión del oleaje en playas .....	11
3.1.	Teoría .....	11
3.2.	Objetivo .....	13
3.3.	Procedimiento en el laboratorio .....	13
3.4.	Análisis de datos .....	13
4.	Reflexión del oleaje en una barrera parcialmente sumergida .....	15
4.1.	Teoría .....	15
4.2.	Objetivo .....	16
4.3.	Procedimiento en el laboratorio .....	16
4.4.	Análisis de datos .....	16
5.	Asomeramiento y rotura del oleaje .....	18
5.1.	Teoría .....	18
5.2.	Objetivo .....	20
5.3.	Procedimiento en el laboratorio .....	20
5.4.	Análisis de datos .....	20
6.	Rotura de oleaje irregular.....	22
6.1.	Teoría .....	22
6.2.	Objetivo .....	22
6.3.	Procedimiento en el laboratorio .....	23
6.4.	Análisis de datos .....	23

7.	Variación del nivel medio .....	25
7.1.	Teoría .....	25
7.2.	Objetivo .....	26
7.3.	Procedimiento en laboratorio .....	26
7.4.	Análisis de datos .....	26
A.	Anexo: Instalación de la aplicación .....	28
B.	Anexo: Tutorial para la ejecución de los casos.....	31

# 1. Longitud y celeridad de onda

Experimento basado en el capítulo 12 de Dean & Dalrymple (1991).

## 1.1. Teoría

La ecuación de la dispersión, la cual se obtiene a partir de las condiciones de contorno de superficie libre, relaciona el periodo  $T$ , la profundidad  $h$ , y la longitud de onda,  $L$ . Esta ecuación describe la manera en la cual un campo de ondas consistiendo en muchas frecuencias se separa o dispersa debido a sus distintas celeridades, y está dada por

$$\sigma^2 = gk \tanh kh$$

$$k = \frac{2\pi}{L}, \quad \sigma = \frac{2\pi}{T}, \quad C = \frac{L}{T}$$

donde  $k$  es el número de onda,  $\sigma$  es la frecuencia angular, y  $C$  es la celeridad de la onda.

Si la onda se propaga en aguas someras o profundas, la ecuación de la dispersión puede simplificarse ya que cuando  $kh > \pi$ ,  $\tanh kh = 1$ , mientras que cuando  $kh < \pi/10$ ,  $\tanh kh = kh$ .

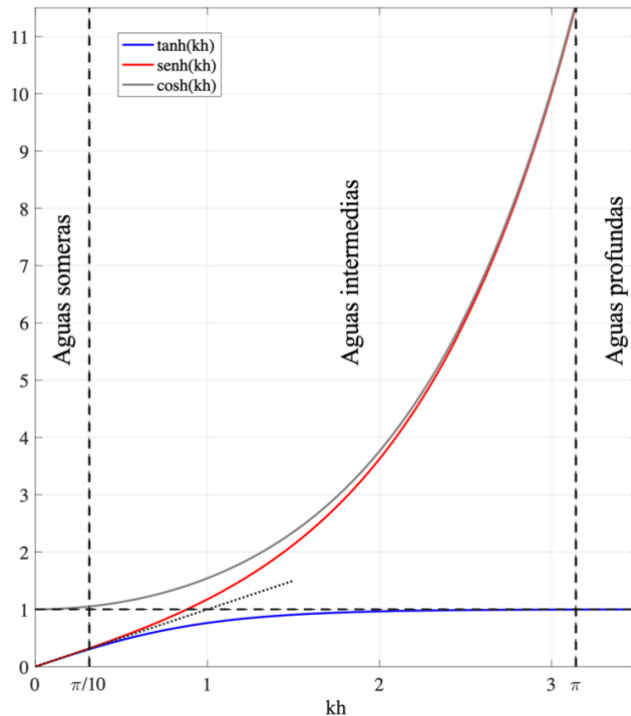


Figure 1.- Variación de las funciones hiperbólicas en función de la profundidad relativa  $kh$ . (Elaboración propia).

## 1.2. Objetivo

Comparar la longitud de onda y la celeridad de onda medidas con las estimadas a partir de la teoría lineal.

## 1.3. Procedimiento en el laboratorio

- Utilizar el canal numérico de oleaje a una profundidad  $h$  de 60 cm.
- Generar oleaje regular con  $H = 15$  cm, y  $T = 2$  s y 4 s.
- Para cada periodo medir la longitud de onda  $L$  utilizando dos sensores de superficie libre, ajustando su posición hasta que las señales de superficie libre de los dos sensores estén en fase.
- Cambiar la profundidad  $h$  a 40 cm.
- Generar oleaje regular con  $H = 10$  cm y  $T = 2$  s y 4 s.
- Repetir el procedimiento para medir la longitud de onda en cada caso.

#### 1.4. Análisis de datos

- Calcular la longitud de onda resolviendo numéricamente la ecuación de la dispersión mediante el método de Newton-Raphson
- Comparar la longitud de onda calculada con las mediciones en el canal.
- Calcular el error relativo porcentual para cada caso.
- Indicar si el oleaje se propagaba en aguas someras, intermedias, o profundas ( $h/L$ ).
- Discutir los resultados.

Caso	Observador	$h$ (m)	$H$ (m)	$T$ (s)	$L_{medida}$ (m)	$L_{calculada}$ (m)	error	$h/L$
1		0.6	0.15	2				
2				4				
3		0.4	0.10	2				
4				4				

**El reporte de la práctica deberá contener las siguientes secciones:**

- (i) Introducción
- (ii) Objetivo
- (iii) Metodología
- (iv) Resultados
- (v) Discusión
- (vi) Conclusiones
- (vii) Referencias
- (viii) Anexo 1: Códigos para el análisis de datos

**Referencia:**

Dean, R.G., and Dalrymple, R.A., 1991, Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced series on ocean engineering, Vol. 2. World Scientific.

## 2. Velocidades y trayectorias inducidas por el oleaje

Experimento basado en el capítulo 12 del libro de Dean & Dalrymple (1991).

### 2.1. Teoría

Las componentes de velocidad de las partículas en una onda progresiva o estacionaria, se derivan de su respectivo potencial de velocidad,  $\phi$ , expresado en términos de la altura de ola,  $H$ , la profundidad,  $h$ , el número de onda,  $k = 2\pi/L$ , la frecuencia angular,  $\sigma = 2\pi/T$ ,

$$\phi(x, z, t) = -\frac{H g \cosh k(h+z)}{2 \sigma \cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (1a)$$

$$\phi = \frac{H g \cosh k(h+z)}{2 \sigma \cosh kh} \cos kx \sin \sigma t \quad (1b)$$

donde  $x$  y  $z$  representan la posición horizontal y vertical de la partícula, respectivamente,  $t$  es el tiempo y  $g$  la aceleración de la gravedad. De esta manera, las componentes  $u$  y  $w$  están dadas por las siguientes expresiones para ondas progresivas (ec. 2a) y estacionarias (ec. 2b),

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t)$$
$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{H}{2} \sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (2a)$$

$$u = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin kx \sin \sigma t$$
$$w = -\frac{H}{2} \sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos kx \sin \sigma t \quad (2b)$$

Las velocidades, tanto en una onda progresiva como estacionaria, aumentan al alejarse del fondo (Fig. 1), donde  $k(h+z) = 0$ , ya que los términos hiperbólicos que involucran  $z$  tanto en  $u$  como en  $w$  tienen el valor mínimo, 1 y 0, respectivamente (ver ec. 2a y 2b). En el caso de las ondas estacionarias, los valores extremos de  $u$  y  $w$  en el espacio ocurren debajo de los nodos y antinodos de la superficie libre (Fig. 1b), donde  $u$  y  $w$  son cero debajo de los antinodos y nodos, respectivamente.

Por otra parte, el desplazamiento máximo de una partícula de agua  $|\zeta|$  y  $|\xi|$  en dirección  $x$  y  $z$ , respectivamente, puede ser expresado como función de la altura de ola ( $H$ ) incidente y reflejada, la posición media de la partícula en la onda (horizontal y verticalmente), el periodo de la onda ( $T$ ) y la profundidad ( $h$ ) (ver Fig. 2).

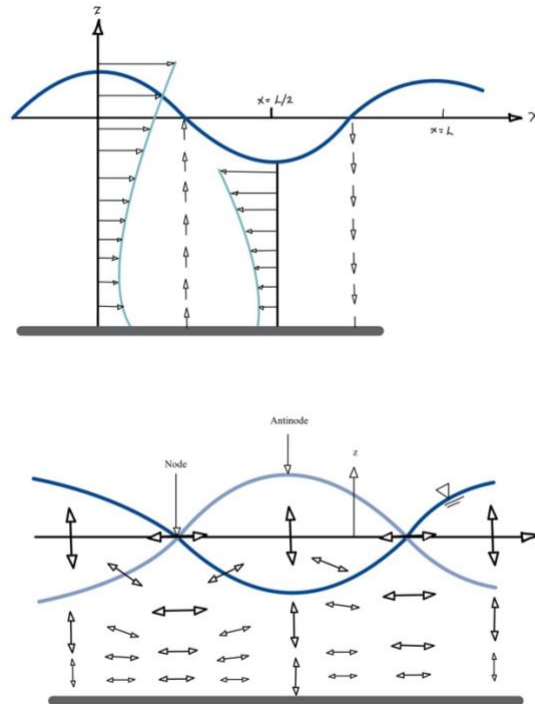


Figura 1. Velocidades de las partículas de agua en (a) una onda progresiva y (b) una onda estacionaria. (Elaboración propia).

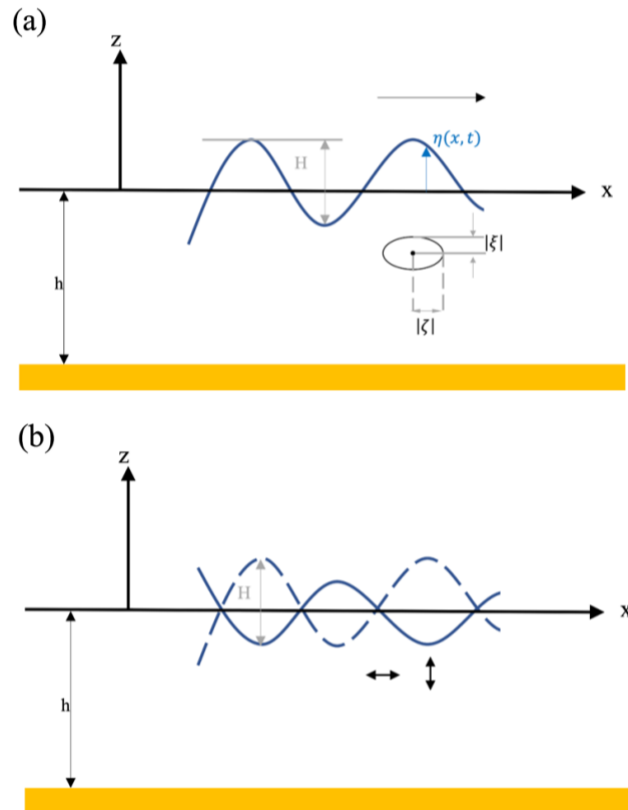


Figura 2. Trayectorias de partículas en: (a) Onda progresiva; (b) onda estacionaria. (Elaboración propia).

El desplazamiento horizontal y vertical máximo de las partículas de agua se puede calcular teóricamente (según la teoría de pequeña amplitud) integrando los componentes de la velocidad,  $u$  y  $w$ , respecto al tiempo, obteniendo así las siguientes expresiones para ondas progresivas (ec. 2a) y ondas estacionarias (ec. 2b):

$$|\zeta| = \frac{H \cosh k(h+z)}{2 \sinh kh}$$

$$|\xi| = \frac{H \sinh k(h+z)}{2 \sinh kh} \quad (3a)$$

$$|\zeta| = \frac{H \cosh k(h+z)}{2 \sinh kh} \sin kx$$

$$|\xi| = \frac{H \sinh k(h+z)}{2 \sinh kh} \cos kx \quad (3b)$$

## 2.2. Objetivo

Comparar las velocidades y trayectorias medidas y calculadas con teoría lineal de las partículas de agua en ondas progresivas y estacionarias

## 2.3. Procedimiento en el laboratorio

En el canal numérico selecciona la opción del menú: *Velocidades y trayectorias inducidas por el oleaje*. Dentro de esta opción, existe una simulación de oleaje para ondas progresivas ( $H = 0.075$  m,  $T = 2$  s) y una para ondas estacionarias ( $H = 0.15$  m,  $T = 2$  s), ambas realizadas a una profundidad de 0.6 m.

### Ondas progresivas:

- Antes de generar el sistema de ondas progresivas, indica la posición de la partícula en  $x$  y  $z$ . El sensor de nivel será colocado en la posición  $x$  seleccionada.
- Comienza la generación de ondas progresivas y observa el movimiento de la partícula, así como el desplazamiento de la superficie libre y las velocidades horizontales,  $u$ , y verticales,  $w$ , en la posición de la partícula.
- Exporta las variables medidas para calcular posteriormente las magnitudes de las velocidades  $u$  y  $w$  y desplazamientos máximos  $|\zeta|$  y  $|\xi|$  observados en el canal.
- Realizar la medición en dos profundidades distintas. Sugerencia: medir en  $z = -h/2$  y  $z = -h$ .
- Observar y reportar las características de las trayectorias de acuerdo a su profundidad relativa y su posición  $z$ .

### Ondas estacionarias:

- Establecer un sistema de onda estacionaria utilizando una barrera vertical como reflector. En el canal numérico, la barrera se encuentra en  $x = 30$  m y se implementa automáticamente al seleccionar la opción de *Ondas estacionarias*.
- Calcula la longitud de onda para conocer las posiciones de los nodos y antinodos. Nota: la posición de la barrera ( $x = 30$  m) corresponde a un antinodo.
- Indica la posición en  $x$  que corresponda a un antinodo y realiza la simulación para dos posiciones en  $z$  (sugerencia: medir en  $z = -h/2$  y  $z = -h$ ).

- Comienza la generación de ondas estacionarias y observa el movimiento de la partícula, así como el desplazamiento de la superficie libre y las velocidades horizontales,  $u$ , y verticales,  $w$ , en la posición de la partícula.
- Exporta las variables medidas para obtener posteriormente las magnitudes de las velocidades  $u$  y  $w$  y desplazamientos máximos  $|\zeta|$  y  $|\xi|$  observados en el canal.
- Indica la posición en  $x$  que corresponda a un nodo y realiza la simulación para dos elevaciones en  $z$  (sugerencia: medir en  $z = -h/2$  y  $z = -h$ .) y repite los pasos 4 y 5.

#### 2.4. Análisis de datos

- Calcula las velocidades y trayectorias para los casos de ondas estacionarias y progresivas simulados en el canal de acuerdo a la teoría lineal (ecuaciones 2a, 2b, 3a, y 3b).
- Compara las velocidades y trayectorias medidas en el canal virtual con las calculadas mediante la teoría lineal.
- Describe las diferencias entre los distintos casos de acuerdo a la posición de las partículas y al tipo de onda.
- Calcula el error relativo porcentual y discute sobre sus posibles fuentes.
- 

**El reporte de la práctica deberá contener las siguientes secciones:**

- (i) Introducción
- (ii) Objetivo
- (iii) Metodología
- (iv) Resultados
- (v) Discusión
- (vi) Conclusiones
- (vii) Referencias
- (viii) Anexo 1: Códigos para el análisis de datos

#### **Referencia:**

Dean, R.G., and Dalrymple, R.A., 1991, Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced series on ocean engineering, Vol. 2. World Scientific.

### 3. Reflexión del oleaje en playas

Experimento basado en el capítulo 12 del libro de Dean & Dalrymple (1991).

#### 3.1. Teoría

Los sistemas de onda incidente y reflejada de la playa pueden ser representados esquemáticamente como se muestra en la Figura 1 y 2, donde, de acuerdo a la teoría de onda de pequeña amplitud, los sistemas de onda incidente y reflejada son

$$\eta_i = \frac{H_i}{2} \cos(kx - \sigma t)$$
$$\eta_r = \frac{H_r}{2} \cos(kx + \sigma t + \delta)$$

donde  $H_i$  y  $H_r$  son la altura de onda incidente y reflejada, respectivamente, y

$$k \equiv \frac{2\pi}{L}$$
$$\sigma \equiv \frac{2\pi}{T}$$

El sistema de onda combinado  $\eta_c$  es

$$\eta_c = \eta_i + \eta_r$$

y el desplazamiento vertical total,  $2|\eta_c|$ , del sistema de onda combinado puede ser mostrado como

$$2|\eta_c| = \sqrt{H_i^2 + 2H_iH_r \cos(2kx + \delta) + H_r^2}$$

La ecuación anterior define una cantidad referida como “envolvente de altura de onda” como una función de la distancia a lo largo del canal. El máximo y mínimo de esta expresión son

$$2|\eta_c|_{\max} = H_i + H_r$$

y

$$2|\eta_c|_{\min} = H_i - H_r$$

los cuales ocurren en posiciones a lo largo del canal separadas por  $L/4$ .

La reflexión de la playa puede ser definida en términos de un coeficiente de reflexión,

$$\kappa_r = \frac{H_r}{H_i} = \frac{2|\eta_c|_{\max} - 2|\eta_c|_{\min}}{2|\eta_c|_{\max} + 2|\eta_c|_{\min}}$$

Los valores mínimo y máximo del coeficiente de reflexión son 0 y 1, respectivamente.

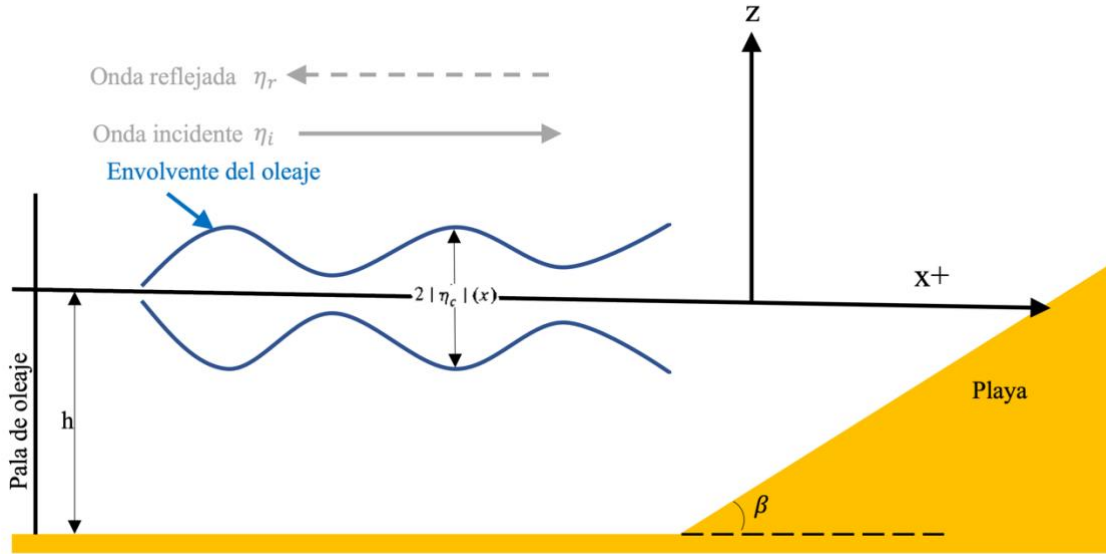


Figura 1. Arreglo experimental de la Práctica 3. (Elaboración propia).

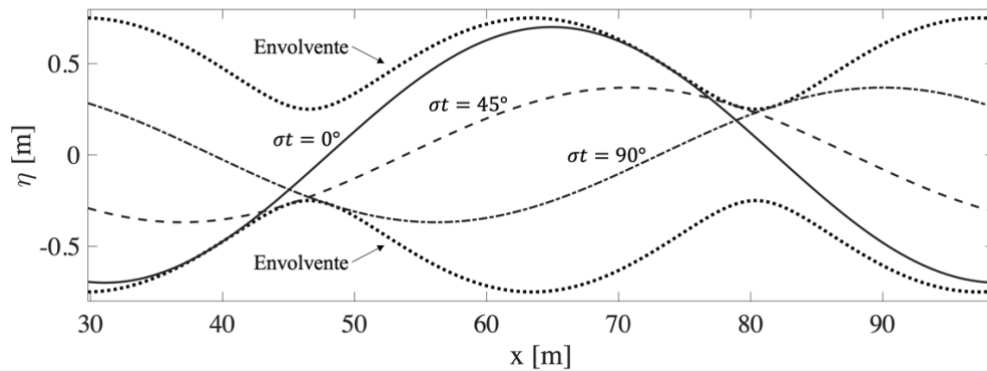


Figura 2. Desplazamiento instantáneo de la superficie del agua y envolvente en un sistema de onda estacionaria parcial. (Elaboración propia).

**Teoría de Miche.** Una teoría aproximada para el coeficiente de reflexión de una playa con pendiente plana fue desarrollada por A. Miche. Miche define una peralte crítico de la onda en aguas profundas  $(H_o/L_o)_{crit}$  en términos de la pendiente de la playa  $\beta$ :

$$\left(\frac{H}{L_o}\right)_{crit} = \left(\frac{2\beta}{\pi}\right)^{1/2} \frac{\sin^2 \beta}{\pi}$$

Los resultados de Miche predicen que el coeficiente de reflexión de la playa varía con el peralte de la onda en aguas profundas,  $H_o/L_o$ , de la siguiente manera:

$$\kappa_r = 1, \quad \frac{H_o}{L_o} \leq \left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{crit}$$

$$\kappa_r = \frac{(H_o/L_o)_{crit}}{H_o/L_o}, \quad \frac{H_o}{L_o} \geq \left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{crit}$$

La altura de onda en aguas profundas referida en estas ecuaciones es la correspondiente a la altura de onda incidente. La relación entre la altura de onda en aguas profundas y la altura de onda incidente es

$$H_0 = \sqrt{\frac{2C_G}{C_0}} H_i$$

donde  $C_G = nC$ ,  $n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$  y  $C_0 = \frac{L_0}{T}$

### 3.2. Objetivo

Estimar los coeficientes de reflexión para diferentes condiciones de oleaje incidente utilizando el canal virtual y comparar con la teoría.

### 3.3. Procedimiento en el laboratorio

Para tres periodos de onda:

- Calcula longitud de onda según el periodo y la profundidad
- Desplaza el sensor a lo largo del canal abarcando una distancia de al menos una longitud de onda (ver Figura 3).
- Exporta las mediciones para calcular el coeficiente de reflexión,  $\kappa_r$ , a partir de los valores mínimos y máximos de la envolvente,  $2|\eta_c|_{\max}$  y  $2|\eta_c|_{\min}$ .

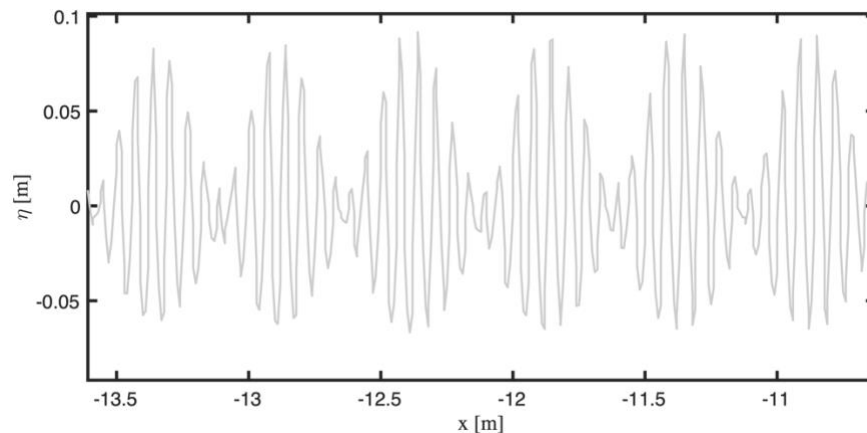


Figura 3. Ejemplo de mediciones de desplazamiento de la superficie del agua medido utilizando un carrito moviéndose lentamente para el caso de reflexión parcial. (Elaboración propia).

### 3.4. Análisis de datos

- Calcula para cada caso el coeficiente de reflexión,  $\kappa_r$ , a partir de los valores mínimos y máximos de la envolvente,  $2|\eta_c|_{\max}$  y  $2|\eta_c|_{\min}$ .
- Compara los coeficientes de reflexión de la playa obtenidos a partir de las envolturas con los obtenidos mediante la teoría de Miche.
- Discute las diferencias

**El reporte de la práctica deberá contener las siguientes secciones:**

- (i) Introducción
- (ii) Objetivo
- (iii) Metodología
- (iv) Resultados
- (v) Discusión
- (vi) Conclusiones
- (vii) Referencias
- (viii) Anexo 1: Códigos para el análisis de datos

**Referencia:**

Dean, R.G., and Dalrymple, R.A., 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced Series in Ocean Engineering, vol.2. World Scientific, 353 pp.

## 4. Reflexión del oleaje en una barrera parcialmente sumergida

Experimento basado en el capítulo 12 del libro de Dean & Dalrymple (1991).

### 4.1. Teoría

Cuando el oleaje se propaga hacia una barrera vertical parcialmente sumergida (Figura 1), una porción de la energía incidente del oleaje será reflejada en la barrera y una porción será transmitida por debajo de la barrera. Como una primera aproximación para determinar la altura de la componente de oleaje transmitido, se puede asumir que toda la energía de la onda progresiva propagada a niveles por debajo del límite de la barrera será transmitida más allá de la barrera y resultará en una onda transmitida. Si no hay pérdida de energía en el proceso de reflexión-transmisión, entonces

$$H_r^2 + H_t^2 = H_i^2 \quad (1)$$

y definiendo el coeficiente de transmisión como

$$\kappa_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (2)$$

entonces  $\kappa_r^2 + \kappa_t^2 = 1$ .

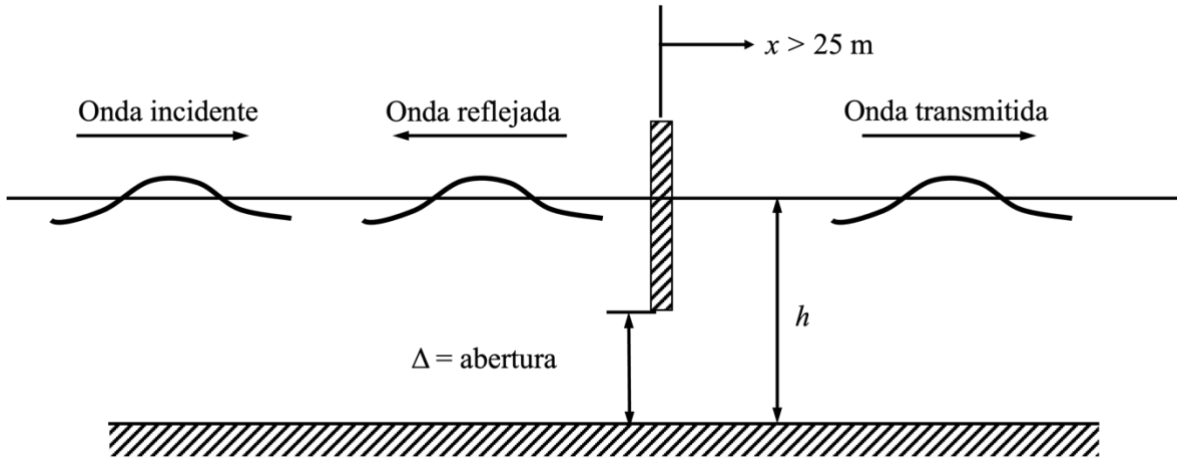


Figura 1. Arreglo experimental. (Elaboración propia).

Distintas teorías de oleaje han sido desarrolladas para predecir la transmisión de oleaje regular a través de barreras verticales. La teoría de transmisión de energía de Wiegel (1960) establece que, para determinar la altura de ola de la componente de oleaje transmitida, se puede asumir que toda la energía del oleaje propagada por debajo del límite de la barrera es transmitida. La energía del oleaje se integra desde el fondo ( $z = -h$ ) hasta el límite inferior de la barrera ( $z = -h + \Delta$ ) y durante un periodo de ola  $T$ , de la siguiente manera,

$$\frac{1}{T} \int_0^T \int_{-h}^{-h+\Delta} p_i u_i dz dt = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-h}^0 p_t u_t dz dt \quad (3)$$

donde  $p$  es la presión dinámica inducida por el oleaje y  $u$  es la velocidad horizontal inducida por el oleaje y los subíndices  $i$  y  $t$  se refieren a la componente incidente y transmitida, respectivamente. Asumiendo teoría lineal, Wiegel (1960) obtuvo que,

$$k_t = T_F^{1/2} \quad (4)$$

donde la función de transmisión,  $T_F$ , está dada por,

$$T_F = \frac{2k\Delta + \sinh 2k\Delta}{2kh + \sinh 2kh} \quad (5)$$

Esta teoría fue modificada por Kriebel y Bollmann (1996) para tomar en cuenta los efectos de reflexión en la presión y la velocidad horizontal debajo de la barrera que resulta en una mayor presión  $p_i + p_r$  y en una velocidad reducida  $u_i - u_r$ . Para la teoría modificada de transmisión de energía, la presión y la velocidad horizontal en el lado izquierdo de la ecuación (3) fue reemplazada por la contribución total de la onda incidente y reflejada, encontrando que,

$$\kappa_t = \frac{2T_F}{1 + T_F} \quad (6)$$

Estas dos teorías, basadas en teoría lineal de oleaje, han sido empleadas ampliamente como una solución ingenieril a pesar de sus limitaciones.

## 4.2. Objetivo

Medir la reflexión y transmisión en una barrera parcialmente sumergida y comparar con la teoría.

## 4.3. Procedimiento en el laboratorio

- Utiliza el canal numérico en presencia de una barrera sumergida ubicada en  $x = 25\text{m}$  con  $\Delta/h = \frac{1}{2}$ .
- Mide la envolvente de oleaje para  $x < 25$  m y la altura de la onda transmitida  $H_t$  para  $x > 25$  m para cada uno de los casos descritos en la Tabla 1.
- Exporta los datos obtenidos para cada caso.

## 4.4. Análisis de datos

- A partir de la envolvente, determina  $H_i$ ,  $H_r$  y  $\kappa_r$ .
- A partir de las mediciones de  $H_t$ , calcula  $\kappa_t$ .
- Calcula la suma de  $\kappa_r^2 + \kappa_t^2$  para tus experimentos individuales y determina el porcentaje de pérdida de energía en el proceso de reflexión-transmisión.
- Calcula el  $\kappa_t$  teórico en base a las ecuaciones (4), (5), y (6)
- Grafica para cada caso el  $\kappa_t$  teórico como una función de  $kh$  para un intervalo de  $\pi/10 < kh < \pi$ , incluyendo los valores de  $\kappa_t$  experimental en función de  $kh$ .
- Grafica  $H_r$  y  $H_t$  en función de  $T$ .
- Discute diferencias entre los datos del canal virtual y la teoría.

**Tabla 1.-** Casos simulados.

<b>Caso</b>	<b>H (m)</b>	<b>T (sec)</b>	<b>h (m)</b>	<b><math>\Delta</math> (m)</b>
<b>1</b>	0.10	1	0.60	0.30
<b>2</b>	0.10	1.5	0.60	0.30
<b>3</b>	0.10	2	0.60	0.30
<b>4</b>	0.10	3	0.60	0.30
<b>5</b>	0.10	4	0.60	0.30
<b>6</b>	0.10	5	0.60	0.30

**El reporte de la práctica deberá contener las siguientes secciones:**

- (i) Introducción
- (ii) Objetivo
- (iii) Metodología
- (iv) Resultados
- (v) Discusión
- (vi) Conclusiones
- (vii) Referencias
- (viii) Anexo 1: Códigos para el análisis de datos.

**Referencias:**

Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced Series in Ocean Engineering, vol.2. World Scientific, 353 pp.

Kriebel, D. L. and Bollmann, C. A., 1996. Wave transmission past vertical wave barriers. Coastal Engineering Proceedings 1(25).

Wiegel, R.L., 1960. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier. J. of the Waterways and Harbors Division, ASCE, 86 (WW1), 1-12.

## 5. Asomeramiento y rotura del oleaje

Experimento basado en el capítulo 12 del libro de Dean & Dalrymple (1991).

### 5.1. Teoría

El coeficiente de asomeramiento indica que la altura de ola se incrementa en aguas someras conforme se aproxima a la costa y tiende a infinito para profundidades muy pequeñas (cerca de la costa), lo cual es poco realista. En la naturaleza, el oleaje se volverá inestable y romperá a cierta profundidad. La rotura depende de la pendiente de la playa y de las características de la ola. Para pendientes muy suaves, el oleaje romperá en forma de descrestamiento (*spilling*), ocurriendo en un área amplia definida como la zona de rotura. La rotura en voluta ocurre en playas con mayor pendiente y se caracteriza por la cresta que se curva hacia delante impactando sobre el valle de la onda, atrapando el aire dentro del "tubo" que se forma que luego estalla de manera espectacular. La rotura tipo colapso ocurre en playas muy empinadas que se caracterizan por zonas de rompiente muy angostas o inexistentes (Dean & Dalrymple, 1991).

El gradiente de la playa y el peralte de la ola se relacionan según el *surf similarity parameter* (Battjes, 1974) o número de Iribarren dado por:

$$\varepsilon_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad \text{ó} \quad \varepsilon_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_b/L_0}}$$

donde  $\tan \beta$  es la pendiente de la playa,  $H$  y  $L$  son la altura y longitud de onda respectivamente, y los subíndices  $b$  y  $0$  indican condiciones de rotura o de aguas profundas, respectivamente. Los distintos tipos de rotura que se muestran en la Figura 1 están asociados a un intervalo de valores de este parámetro (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de rotura de oleaje según el *surf similarity parameter* (Battjes, 1974) para aguas someras y profundas.

Tipo de rotura	$\xi_0$	$\xi_b$
Colapso u oscilación ( <i>surging or collapsing</i> )	$\xi_0 > 3.3$	$\xi_b > 2.0$
Voluta ( <i>plunging</i> )	$0.5 < \xi_0 < 3.3$	$0.4 < \xi_b < 2.0$
Descrestamiento ( <i>spilling</i> )	$\xi_0 < 0.5$	$\xi_b < 0.4$

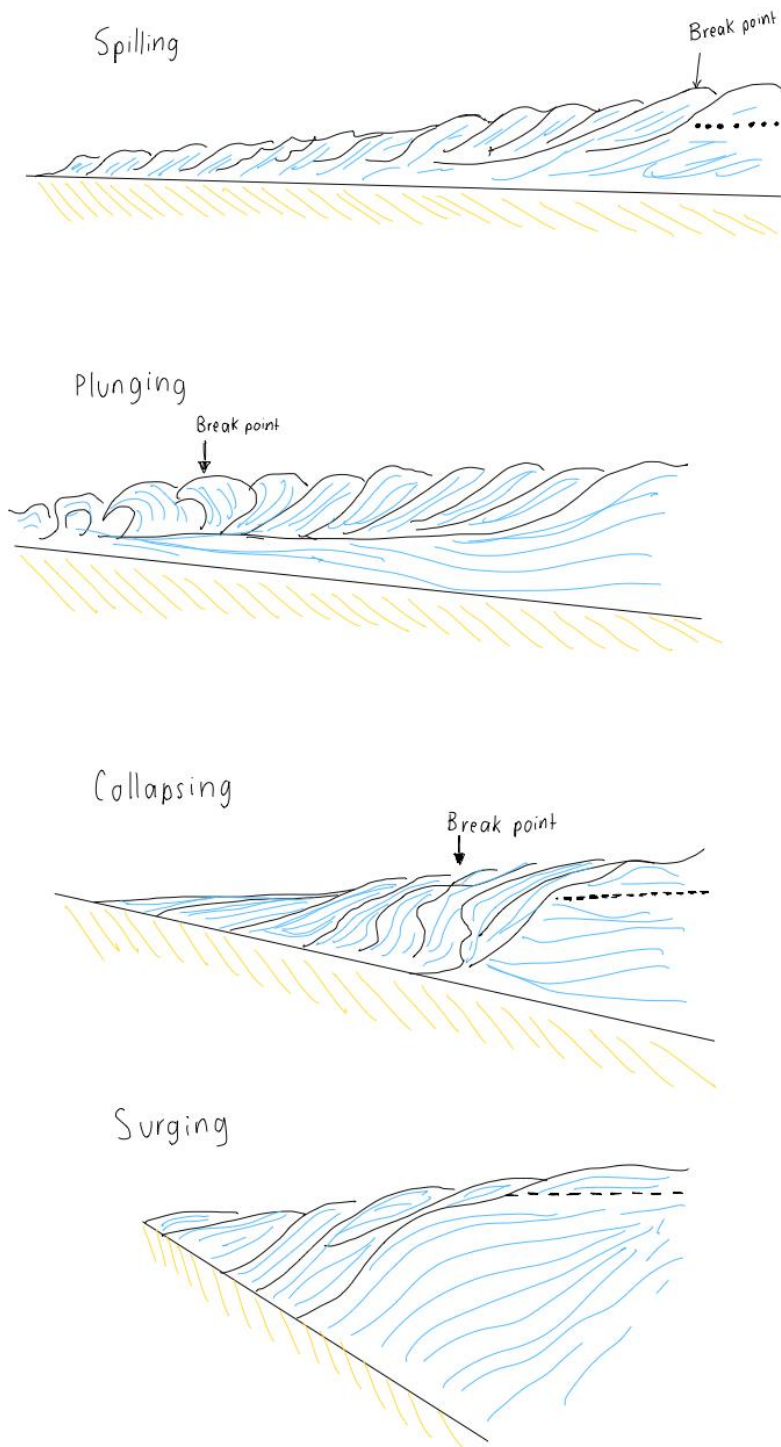


Figura 1. Tipos de rotura del oleaje según la pendiente de la playa: Descrestamiento (*Spilling*), Voluta (*Plunging*), Colapso (*Collapsing*), y Oscilación (*Surging*). (Elaboración propia).

Las observaciones en el campo y el laboratorio muestran que la altura de ola en rotura es proporcional a la profundidad. Existen diferentes criterios y modelos de rotura paramétricos, el criterio más antiguo y más sencillo es el propuesto por McCowan (1894) quien determinó que las olas rompen cuando su altura es igual a una fracción de la profundidad,

$$H_b = \kappa h_b$$

donde  $\kappa=0.78$  y el subíndice  $b$  denota el valor en rotura. Por lo tanto, cuando este criterio se excede, ocurre la rotura.

Para playas con pendientes pronunciadas en aguas someras, hay una dispersión considerable en los datos. Por lo tanto, no existe un valor universal del índice de rotura  $\kappa$ .

## 5.2. Objetivo

Estimar el asomeramiento y rotura del oleaje en un canal virtual y comparar con la teoría lineal.

## 5.3. Procedimiento en el laboratorio

Para tres periodos de oleaje distintos ( $T = 2, 4, 6$  s) y  $H=0.15$ m:

- Observar la transformación del oleaje al disminuir la profundidad (asomeramiento) e identificar de manera visual el punto de rotura para cada caso.
- Ubicar sensores de nivel a lo largo del canal, poniendo mayor resolución alrededor del punto de rotura.
- Medir la superficie libre en cada posición durante 60 s.
- Exporta los datos.

## 5.4. Análisis de datos

- A partir de las series temporales obtener  $H$  utilizando el método de cruces por cero.
- Graficar  $h$  y  $H$  en función de la posición  $x$ .
- Identificar la  $H_b$  y  $h_b$  y calcular el criterio de rotura para cada caso y comparar los resultados con el criterio de McCowan.
- Para cada caso estimar el número de Iribarren o *Surf Similarity Parameter* para definir el tipo de rotura.

**El reporte de la práctica deberá contener las siguientes secciones:**

- (i) Introducción
- (ii) Objetivo
- (iii) Metodología
- (iv) Resultados
- (v) Discusión
- (vi) Conclusiones
- (vii) Referencias
- (viii) Anexo 1: Códigos para el análisis de datos.

**Referencias:**

Battjes, J.A., 1974. Surf Similarity, *Proc. 14<sup>th</sup> Intl. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Copenhagen, 466-480.

Dean, R.G., and Dalrymple, R.A., 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced Series in Ocean Engineering, vol.2. World Scientific, 353 pp.

McCowan, J., 1894. On the highest wave of permanent type. *Philos. Mag. J. Sci.*, Vol. 38.

Short, A. D., 1999. Handbook of beach and shoreface morphodynamics. Chichester, John Wiley, 392 pp.

Weggel, J.R., 1972. Maximum Breaker Height, *J. Waterways, Harbors Coastal Eng. Div.*, ASCE, Vol. 98, WW4.

## 6. Rotura de oleaje irregular

### 6.1. Teoría

Cuando consideramos oleaje aleatorio o irregular, no existe un punto de rotura bien definido, en contraste con el oleaje monocromático. En este caso, las olas más grandes tienden a romper más lejos de la costa y las más pequeñas más cerca de la costa. Por lo tanto, en cada punto a través de la costa habrá olas rotas y no rotas, algunas veces, teniendo la misma altura. El porcentaje de olas rotas varía como una función de la posición.

A partir de una serie temporal de elevación de la superficie libre,  $\eta(t)$ , medida en un punto fijo, se pueden calcular dos parámetros (Xu *et al*, 1986): la tasa temporal de variación  $R(t)$  y la pendiente de la superficie del agua  $s(t)$  (Figura 1), expresados como,

$$R(t) = d\eta(t)/dt, \quad s(t) = R(t)/c$$

donde  $c$  es la velocidad de fase de las olas. Un aumento drástico de  $R(t)$ , también llamado salto, ocurre cuando la ola rompe (Longuet-Higgins and Smith, 1983). La máxima pendiente para oleaje regular progresivo es 0.586 (Longuet-Higgins and Fox, 1977), de tal manera que

$$s_{max} = 0.586, \quad R_{max} = 0.586c$$

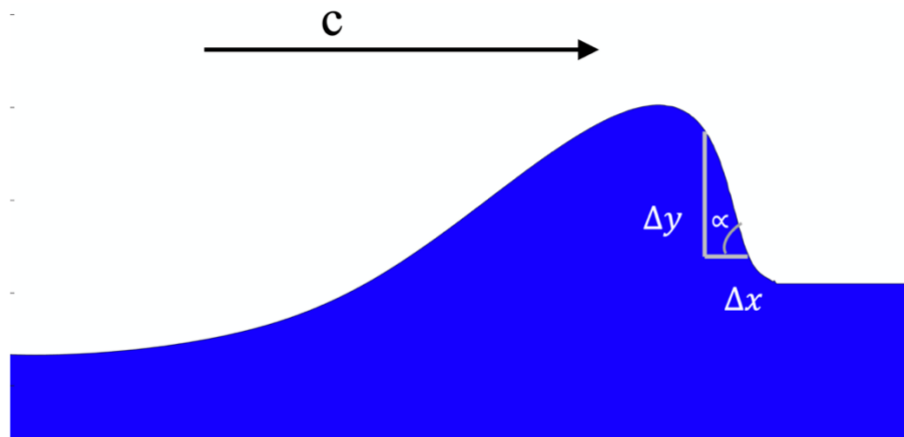


Figura 1. Interpretación de la tasa de aumento  $R$  para una onda progresiva,  $R=c \tan\alpha$ ;  $s = \tan\alpha$ . (Elaboración propia).

Por lo tanto, la ola se clasifica como rota si  $R(t) > R_{max}$  en cualquier punto entre los cruces por cero. En algunos casos, este criterio se cumple en más de un lugar a lo largo del perfil de una ola, pero sólo se cuenta una ola rota. Esta información es importante ya que algunos modelos de rotura (Thornton & Guza, 1983) intentan predecir la distribución de olas rotas y no rotas en la zona de rompientes por lo que requieren mediciones para su calibración.

### 6.2. Objetivo

Investigar las características de la rotura del oleaje irregular.

### 6.3. Procedimiento en el laboratorio

- En la aplicación del canal numérico, seleccionar la opción de “Rotura de oleaje irregular”.
- Observar las simulaciones de oleaje irregular en el canal de oleaje para los dos espectros de oleaje (Caso 1:  $H_s=0.125$  m,  $T_p=2.5$  s,  $\gamma=3.3$ ; Caso 2:  $H_s=0.1$  m,  $T_p=1.5$  s,  $\gamma=3.3$ ). Las simulaciones se realizaron a una profundidad de 0.6 m y tienen una duración de 300 segundos. Identificar visualmente la posición del inicio de la zona de rompientes.
- Colocar 10 sensores (WG) empezando en la zona sin rampa (playa) e intentando cubrir la mayor parte de la playa, con mayor resolución dentro de la zona de rompientes.
- Obtener la superficie libre a partir de los sensores colocados en el canal de oleaje (WG1...n) y su posición (xS) y profundidad (hS) en el canal.
- Exportar las variables que incluyen el tiempo (t), la posición de cada sensor (xS) y la superficie libre correspondiente a cada uno de los sensores (WG#) en un archivo.mat para cada caso.

### 6.4. Análisis de datos

- Para cada una de las series temporales de superficie libre, realizar el método de cruces ascendentes/descendentes por cero para poder calcular los parámetros de cada ola (restar el nivel del agua en reposo antes de realizar el análisis).
- Calcular  $H_s$  ( $H_{1/3}$ ) y  $H_{rms}$
- Graficar  $H_{rms}$  y  $H_s$  en cada uno de los sensores (en función de  $x$  y  $h$ ) para determinar el índice de rotura para cada uno de ellos.
- Calcular  $R$  para identificar olas rotas y no rotas. Utilizar la ecuación de la dispersión para calcular  $c$ .
- Graficar los histogramas de  $H$  para cada uno de los sensores, sobreponiendo el histograma de olas rotas para cada posición.
- Graficar  $x$  vs % de olas rotas.

#### **El reporte de la práctica deberá contener las siguientes secciones:**

- (i) Introducción
- (ii) Objetivo
- (iii) Metodología
- (iv) Resultados
- (v) Discusión
- (vi) Conclusiones
- (vii) Referencias
- (viii) Anexo 1: Códigos para el análisis de datos y curvas de calibración.

## Referencias:

Longuet-Higgins, M.S. and Fox, M.J.H., 1977. Theory of the almost-highest wave: the inner solution. *J. Fluid Mech.*, 80(4), 721-741.

Longuet-Higgins, M.S. and Smith, N.D., 1983. Measurement of breaking waves by a surface jump meter, *J. Geophys. Res.*, 88(C14), 9823-9831.

Thornton, E.B., and Guza, R.T., 1982. Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach, *J. Geophys. Res.*, 87, 9499-9508.

Thornton, E.B. and Guza, R.T., 1983. Transformation of wave height distribution. *J. Geophys. Res.*, 88 (C10), 5925-5938.

Xu, D., Hwang, P.A., and Wu, J., 1986. Breaking of wind-generated waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 16, 2172-2178.

## 7. Variación del nivel medio

### 7.1. Teoría

Cuando el oleaje rompe en la playa, produce una disminución (*set-down*) y un incremento del nivel medio (*set-up*) con relación al nivel del agua en reposo. El *set-up* está confinado a la zona de rompientes o zona de *surf* hacia la costa a partir del punto inicial de rotura. Por otro lado, el *set-down* es una depresión en el nivel medio que ocurre antes de la rotura donde se encuentra su valor máximo. Según los trabajos teóricos de Longuet-Higgins and Stewart (1964) el exceso en el flujo de momentum debido al oleaje, o tensor de radiación, es el responsable del *set-down* y del *set-up*. Estos autores demostraron que la ecuación de la cantidad de movimiento integrada en vertical y promediada en el tiempo se reduce para el caso de flujo estacionario, playa uniforme longitudinal, tensiones de Reynolds despreciables, y ausencia de viento, a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = -\rho g(h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \quad (1)$$

donde  $S_{xx}$  es la componente transversal del tensor de radiación,  $h$  es la profundidad, y  $\bar{\eta}$  es el incremento del nivel del mar debido al oleaje. Por lo tanto, esta expresión representa el balance existente dentro de la zona de rompientes entre el tensor de radiación debido al oleaje y la variación del nivel medio del mar (Figura 1).

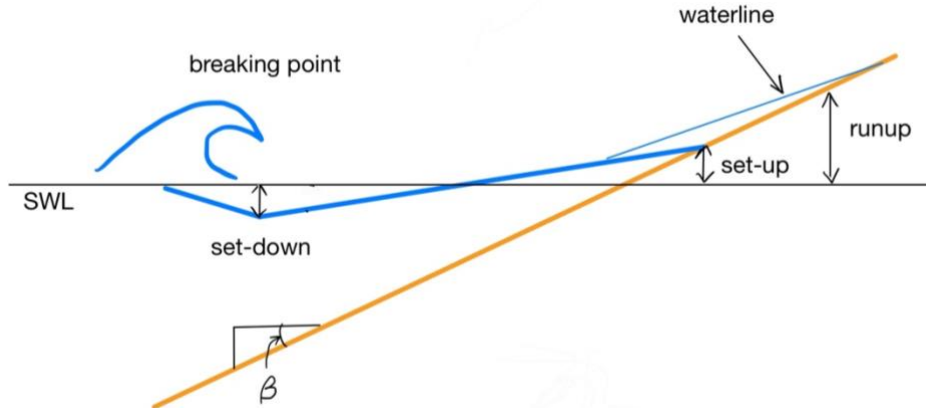


Figura 1.- Variación del nivel del mar en la zona de rompientes. (Elaboración propia).

Para evaluar la componente transversal del tensor de radiación se puede emplear la teoría lineal al segundo orden de aproximación, obteniéndose que  $S_{xx}$  está dado por (Longuet-Higgins and Stewart, 1964),

$$S_{xx} = \frac{E}{2} [1 + 2G] = E \left[ \frac{1}{2} + G \right] = E \left[ \frac{1}{2} (1 + G) + \frac{G}{2} \right] = \frac{ECg}{c} + \frac{EG}{2} \quad (2)$$

donde,

$$G = \frac{2kh}{\sinh 2kh} ; \quad Cg = \frac{c}{2} (1 + G) ; \quad n = \frac{Cg}{G} ; \quad E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

## 7.2. Objetivo

Investigar las variaciones del nivel medio en presencia de oleaje a través de la zona de surf y su relación con el gradiente del tensor de radiación.

## 7.3. Procedimiento en laboratorio

- En la aplicación del canal numérico, seleccionar la opción “Variación del nivel medio”.
- Observar las simulaciones de oleaje irregular en el canal de oleaje para los dos espectros de oleaje (Caso 1:  $H_s=0.125$  m,  $T_p=2.5$  s,  $\gamma=3.3$ ; Caso 2:  $H_s=0.1$  m,  $T_p=1.5$  s,  $\gamma=3.3$ ). Las simulaciones se realizaron a una profundidad de 0.6 m y tienen una duración de 300 segundos. Identificar visualmente la posición del inicio de la zona de rompientes.
- Colocar 10 sensores (WG) empezando en la zona sin rampa (playa) e intentando cubrir la mayor parte de la playa, con mayor resolución dentro de la zona de rompientes.
- Obtener la superficie libre a partir de los sensores colocados en el canal de oleaje (WG1...n) y su posición (xS) en el canal.
- Exportar las variables que incluyen el tiempo (t), la posición de cada sensor (xS) y la superficie libre correspondiente a cada uno de los sensores (WG#) en un archivo.mat para cada caso.

## 7.4. Análisis de datos

- Calcular el nivel medio en cada uno de los sensores (promedio de la serie temporal) e identificar la posición del set-up y del set-down.
- Realizar el método de cruces ascendentes/descendentes por cero para poder calcular los parámetros de cada ola ( $H_i$ ,  $T_i$ ).
- Calcular  $\bar{H}$  y  $\bar{T}$  a partir de las olas individuales.
- Graficar  $\bar{\eta}$  y  $\bar{H}$  en cada uno de los sensores (en función de la posición x). Ver Figura 2.
- Calcular el término del tensor de radiación  $S_{xx}$  utilizando  $\bar{H}$  y  $\bar{T}$  y graficar en función de x.
- Expresar la ecuación (1) en diferencias finitas y resolver para  $\bar{\eta}_{i+1}$ .
- Calcular la variación del nivel medio para toda x a partir de la ecuación calculada en el punto (6). Nota: Utilizar el valor del nivel medio obtenido en el primer sensor como condición de contorno  $\bar{\eta}_i$
- Comparar  $\bar{\eta}$  a partir del punto (1) con lo calculado en el punto anterior.

**El reporte de la práctica deberá contener las siguientes secciones:**

- (i) Introducción
- (ii) Objetivo
- (iii) Metodología
- (iv) Resultados

- (v) Discusión
- (vi) Conclusiones
- (vii) Referencias
- (viii) Anexo 1: Códigos para el análisis de datos

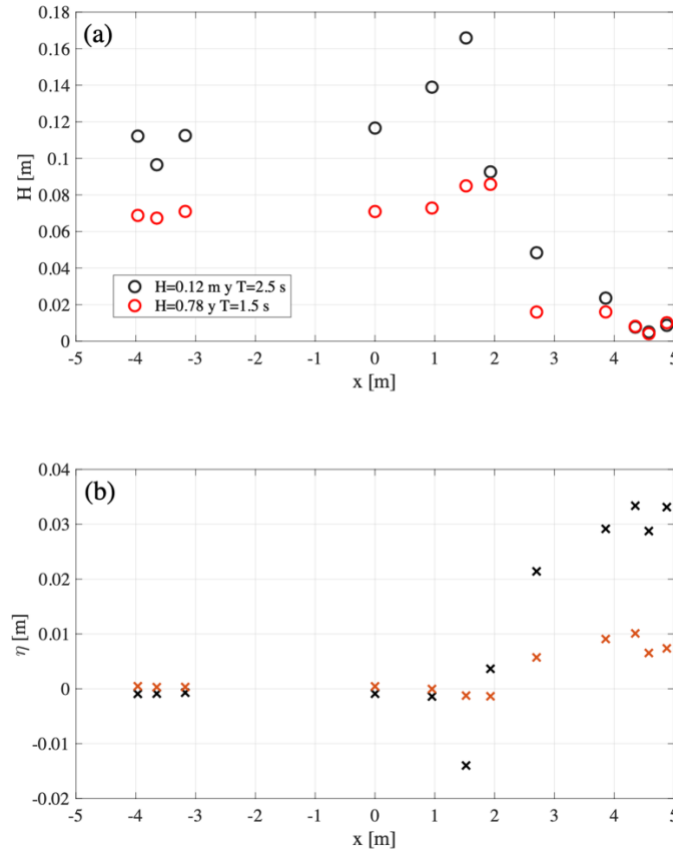


Figura 2. Variación de (a) altura de ola y (b) set-down y set-up para distintas condiciones de oleaje obtenidos a partir de mediciones en un modelo físico. (Elaboración propia).

### Referencias:

- Battjes, J. A. (1974) Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind generated waves, PhD Thesis, TU Delft.
- Davidson-Arnott, R. (2009). Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511841507
- Dean, R.G., and Dalrymple, R.A. (2002) Coastal Processes with Engineering Applications, Cambridge University Press, 475 pp.
- Longuet-Higgins, M.S., and Stewart, R.W. (1964) Radiation stresses in water waves; a physical discussion with applications. *Deep-Sea Res* 11:529–562
- Short, A. D., 1999. Handbook of beach and shoreface morphodynamics. Chichester, John Wiley, 392 pp.
- Svendsen, Ib. A. (2005) Introduction to Nearshore Hydrodynamics, Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 24, 744 pp.

## A. Anexo: Instalación de la aplicación

(1) Descarga la aplicación del siguiente vínculo:

Usuarios Windows (2.9 Gb):

[https://cloud.lipc.unam.mx/s/7CbDKxHajRkogPB/download/Canal\\_de\\_oleaje\\_virtual\\_WI\\_N\\_ES\\_v1.0.zip](https://cloud.lipc.unam.mx/s/7CbDKxHajRkogPB/download/Canal_de_oleaje_virtual_WI_N_ES_v1.0.zip)

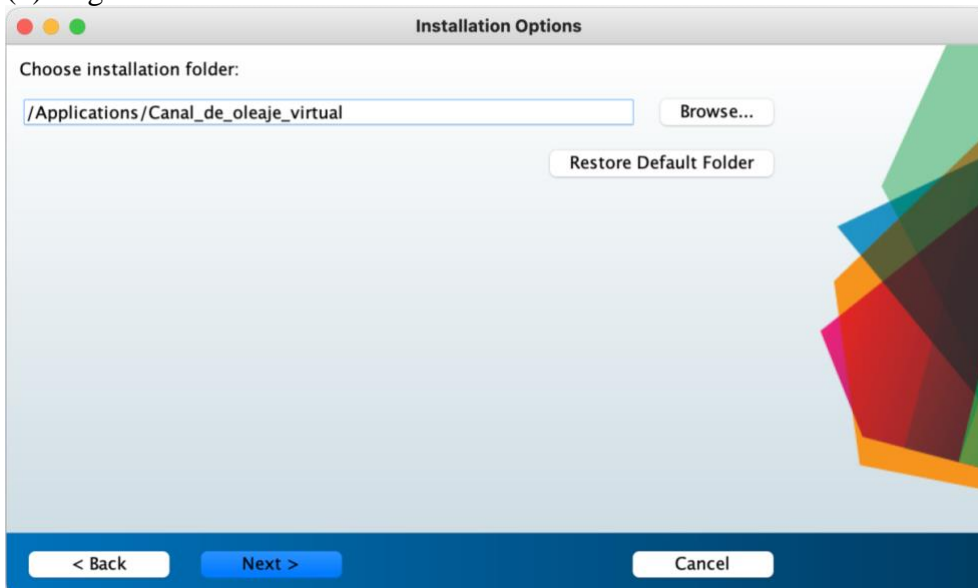
Usuarios MacOs (2.7 Gb):

[https://lipc.unam.mx/canal-virtual/#:~:text=2.9%20Gb\)%20o-,MacOS,-\(2.7%20Gb\).](https://lipc.unam.mx/canal-virtual/#:~:text=2.9%20Gb)%20o-,MacOS,-(2.7%20Gb).)

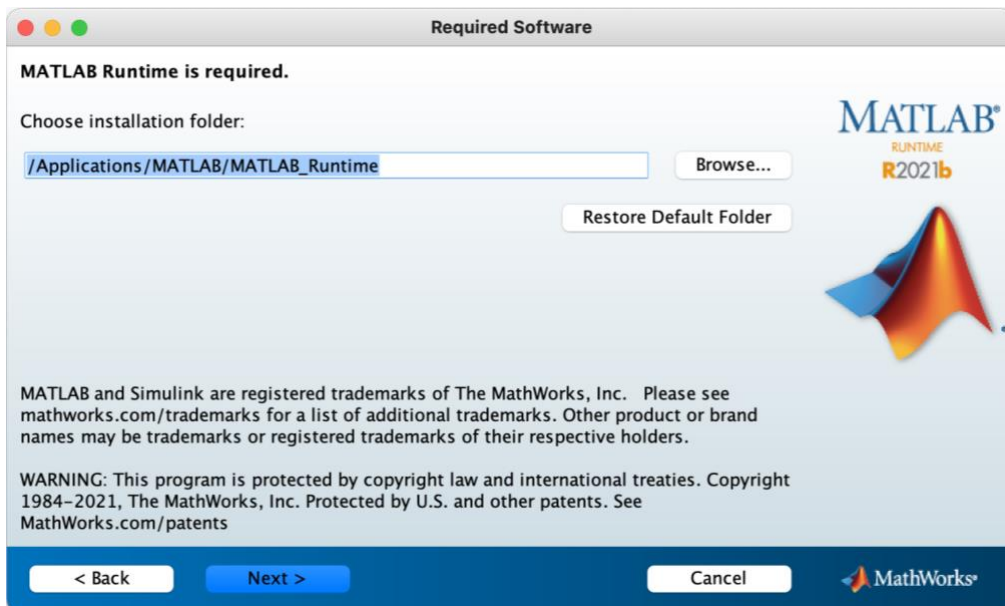
(2) Ejecuta la aplicación:



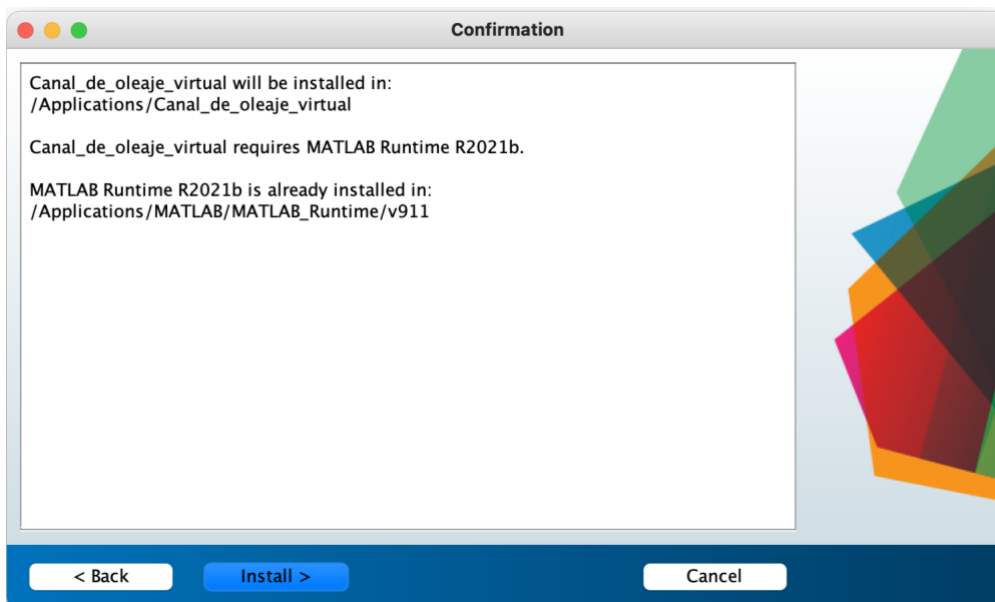
(3) Elige el directorio de instalación:



(4) Elige el directorio de instalación del motor de Matlab:

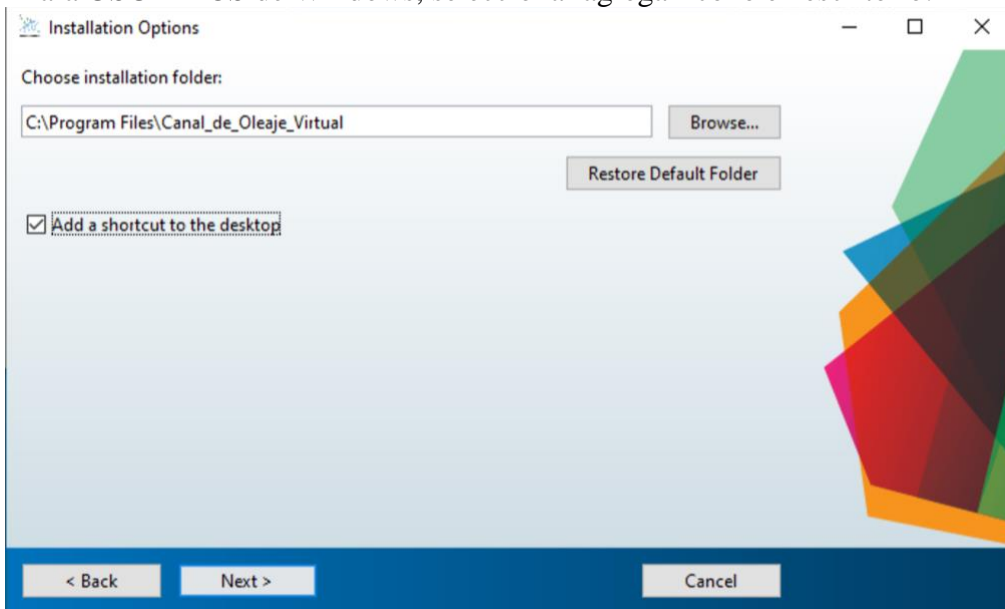


(5) Finaliza la instalación:

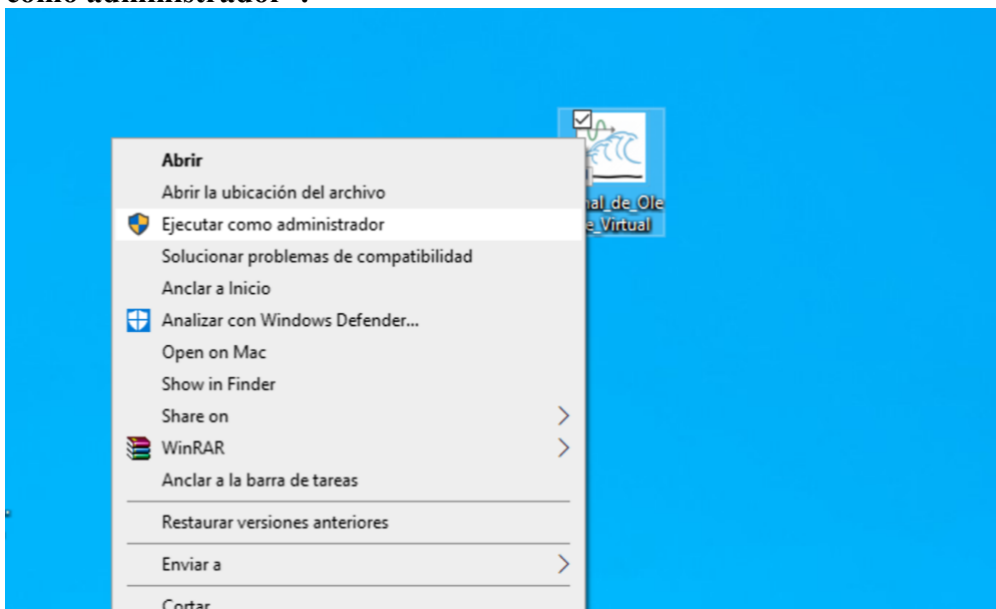


En este ejemplo podrá iniciar el programa desde:  
/Aplicaciones/Canal\_de\_oleaje\_virtual/application

\*Para USUARIOS de Windows, seleccionar agregar ícono en escritorio:



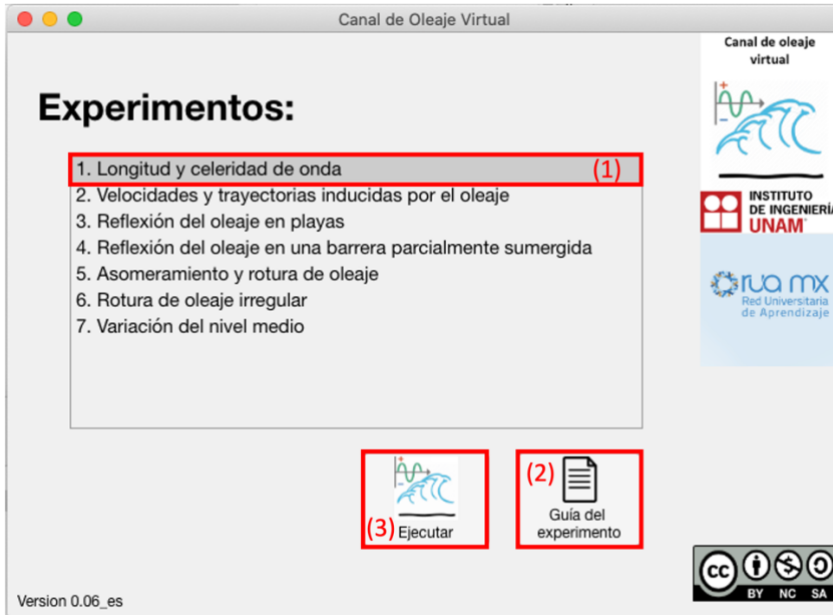
\*Para usuarios de Windows, ejecuta la aplicación por primera vez con la opción “Ejecutar como administrador”:



## B. Anexo: Tutorial para la ejecución de los casos

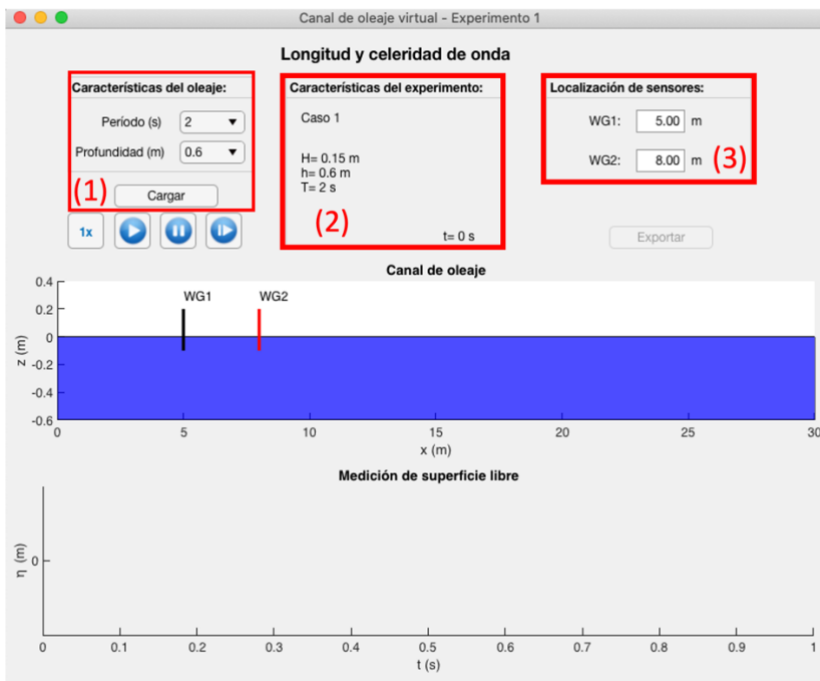
### Pantalla principal:

- (1) Seleccionar el experimento
- (2) Descargar la guía del experimento
- (3) Ejecutar el caso seleccionado

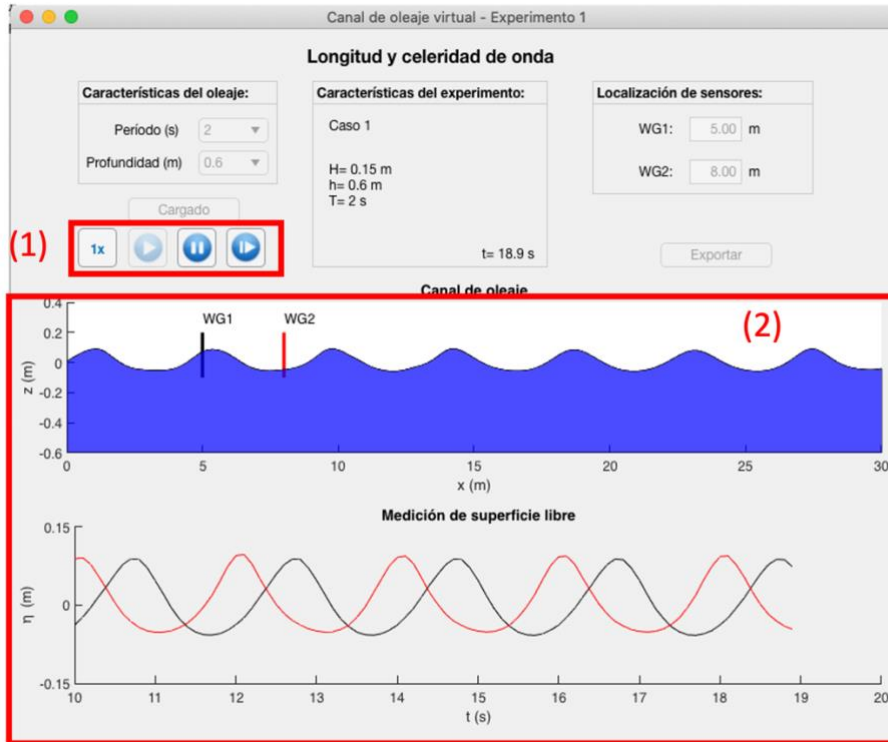


### Pantalla del experimento seleccionado:

- (1) Seleccionar las condiciones de oleaje
- (2) Consultar las condiciones de oleaje seleccionado
- (3) Definir localización de sensores en función de la práctica



- (1) Iniciar simulación, pausar, o adelantar con los botones de control
- (2) Visualizar la propagación del oleaje en el canal y las mediciones de los sensores en tiempo real



- (1) Al finalizar la simulación, procede a exportar las mediciones para su análisis

