



# Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ciencias Marinas.



Amplificación del oleaje con estructuras sumergidas para su  
aplicación en extracción de energía del oleaje.

Tesis para obtener el grado de Lic. en Oceanología

Presenta:

Abraham Bennett Carreño

# **Amplificación del oleaje con estructuras sumergidas para su aplicación en extracción de energía del oleaje.**

Tesis para obtener el título de Oceanólogo

Presenta:

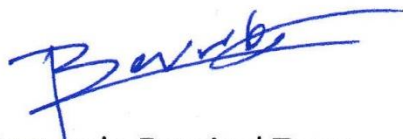
**Abraham Bennett Carreño**

Aprobada por:



Dr. Héctor García Nava

Director de tesis



Dr. Bernardo Esquivel Trava

Sinodal



Dr. Rafael Hernández Walls

Secretario

## 1. Agradecimientos

Agradezco al Dr. Héctor García Nava que me ha brindado sus conocimientos y paciencia, los cuales me han hecho crecer como científico.

Agradezco a los doctores. Rafael Hernández Walls y Bernardo Esquivel Trava por tomarse el tiempo de para ser mis sinodales y brindarme sus conocimientos

Agradezco a mis padres Julián y Silvia que han apoyado sin importar la situación en la que ellos de encontraran.

Dedico este trabajo a mis abuelas que fueron las primeras que creyeron en mí al momento de querer dedicarme a la ciencia.

No menos importante le dedico este trabajo a Ileana Sarahi Ramos Mendoza que ha sido mi musa y me ha dado la inspiración para resolver varios problemas que se presentaron a través de este trabajo, por brindarme toda su paciencia y ayudarme en esos momentos difíciles en los cuales estuve a punto de rendirme.

## 2. Índice

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 1. AGRADECIMIENTOS.....                                      | 3  |
| 2. ÍNDICE.....                                               | 4  |
| 3. TABLA DE FIGURAS .....                                    | 5  |
| 4. INTRODUCCIÓN .....                                        | 8  |
| 5. ANTECEDENTES .....                                        | 9  |
| 6. OBJETIVO.....                                             | 10 |
| 7. ÁREA DE ESTUDIO .....                                     | 10 |
| 8. METODOLOGÍA.....                                          | 11 |
| 8.1. Modelo Ref/Dif .....                                    | 12 |
| 8.2. Modelo Swash .....                                      | 13 |
| 8.3. Descripción de Estructuras:.....                        | 13 |
| 8.5. Fondo Sauzal.....                                       | 15 |
| 8.6. Variables utilizadas en las simulaciones numéricas..... | 16 |
| 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                               | 17 |
| 9.1. Fondo plano .....                                       | 17 |
| 9.2. Comportamiento del modelo Swash con fondo plano.....    | 27 |
| 9.3. Caso de estudio: Puerto de El Sauzal .....              | 32 |
| 9.3.1. Resultados con el modelo Ref Dif. ....                | 32 |
| 9.3.2. Resultados con el modelo Swash. ....                  | 35 |
| 10. CONCLUSIONES.....                                        | 38 |
| 11. BIBLIOGRAFÍA .....                                       | 39 |

### 3. Tabla de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>FIGURA 1.- A) REPRESENTACIÓN DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA Y B) BATIMETRÍA DE BAHÍA DE TODOS SANTOS. ....</b>                                                                                                                          | <b>10</b> |
| <b>FIGURA 2.- ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DE DOS ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN ESTE ESTUDIO (NOTE QUE LA ESCALA VERTICAL ESTÁ EXAGERADA PARA EFECTOS DE VISUALIZACIÓN). ....</b>                                                                        | <b>12</b> |
| <b>FIGURA 3.- VISTA SUPERIOR DE UNA ESTRUCTURA ELIPSOIDAL SOBRE UN FONDO PLANO. LOS COLORES Y CONTORNOS INDICAN LA PROFUNDIDAD. ....</b>                                                                                                       | <b>15</b> |
| <b>FIGURA 5.- EJEMPLO DE LA AMPLIFICACIÓN OBSERVADA CON EL MODELO REFDIF. A) PROFUNDIDAD DEL FONDO UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN, B) FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE LA ONDA INCIDENTE. ....</b>                                                       | <b>18</b> |
| <b>FIGURA 6.- RELACIÓN DE AMPLIFICACIÓN MÁXIMA CON EL PERIODO <math>T_0</math> Y ALTURA <math>H_0</math> DE LA ONDA INCIDENTE PARA UNA ESTRUCTURA CON UNA RAZÓN DE ASPECTO <math>DL=0.88</math> Y UNA ALTURA DE 5M RESPECTO AL FONDO. ....</b> | <b>19</b> |
| <b>FIGURA 7.- COMPORTAMIENTO DE LA AMPLIFICACIÓN MÁXIMA (AMP) COMO FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE DESPLANTE (DH) PARA: A) ONDAS INCIDENTES CON DIFERENTES ALTURAS Y B) DIFERENTES PERIODOS. ....</b>                                             | <b>20</b> |
| <b>FIGURA 8.- COMPORTAMIENTO DE LA AMPLIFICACIÓN RESPECTO A LA ALTURA DE LA ESTRUCTURA <math>L_z</math> PARA UNA ESTRUCTURA CON DIMENSIONES HORIZONTALES FIJAS. ....</b>                                                                       | <b>20</b> |
| <b>FIGURA 9.- A) AMP CAUSADA POR UNA ESTRUCTURA COMO FUNCIÓN DE LAS DIMENSIONES HORIZONTALES DE LA ESTRUCTURA (<math>L_x</math> Y <math>L_y</math>) (FIGURA SUPERIOR) Y B) DE LA RAZÓN DE ASPECTO (DL)(FIGURA INFERIOR). ....</b>              | <b>21</b> |
| <b>FIGURA 10.- AMP COMO FUNCIÓN DE LA RAZÓN DE ASPECTO (DL) PARA ESTRUCTURAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES (Z). ....</b>                                                                                                                          | <b>25</b> |
| <b>FIGURA 11.- AMP COMO FUNCIÓN DE LAS DIMENSIONES HORIZONTALES (<math>L_x</math> Y <math>L_y</math>) DE LAS ESTRUCTURAS PARA ESTRUCTURAS EN FONDOS CON DIFERENTES PROFUNDIDADES (Z). ....</b>                                                 | <b>27</b> |

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 12.- A) AMP CAUSADA POR LA ESTRUCTURA (PANEL INFERIOR) Y B) FONDO CORRESPONDIENTE (PANEL SUPERIOR), PARA UNA ONDA INCIDENTE CON $H_0=0.5$ Y $T_0=16$ . ..... | 28 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 13.- SERIES DE ESPECTROS DE FRECUENCIA EN CORTES LONGITUDINALES DEL DOMINIO EN DISTINTAS POSICIONES A LO LARGO DEL EJE "Y". A) CORTE SOBRE EL CENTRO DE LA ESTRUCTURA, $Y=200$ (FIGURA SUPERIOR IZQUIERDA); B) EN LA PARTE SUPERIOR DE LA ESTRUCTURA $Y=250$ (FIGURA SUPERIOR DERECHA); C) EN EL BORDE DE LA ESTRUCTURA $Y=300$ (FIGURA INFERIOR IZQUIERDA); Y D) FUERA DE LA ESTRUCTURA $Y=350$ (FIGURA INFERIOR DERECHA). ..... | 29 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 14.- SERIES DE ESPECTROS DE FRECUENCIA DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN EL CENTRO DE LA ESTRUCTURA EN CORTES LONGITUDINALES DEL DOMINIO. PANELES SUPERIORES VELOCIDAD LONGITUDINAL (U), PANELES INFERIORES VELOCIDAD TRANSVERSAL (V). ..... | 30 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 15.- VELOCIDAD SUPERFICIAL PROMEDIO (PANEL IZQUIERDO) Y LÍNEAS DE CORRIENTE (PANEL DERECHO) SOBRE UNA ESTRUCTURA ELIPSOIDAL. LOS CONTORNOS SON LA PROFUNDIDAD Y LAS LÍNEAS SEGMENTADAS SON CORTES TRANSVERSALES QUE SE MUESTRAN EN LA FIGURA 17. .... | 31 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 16.- VELOCIDAD SUPERFICIAL PROMEDIO A LO LARGO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES QUE SE MUESTRAN EN LA FIGURA 15. .... | 32 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 17.- AMPLIFICACIÓN CAUSADA POR LA ESTRUCTURA (PANEL INFERIOR) Y FONDO CORRESPONDIENTE (PANEL SUPERIOR), PARA UNA ONDA INCIDENTE CON $H_0=0.5$ Y $T_0=16$ . .... | 33 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 18.- COMPORTAMIENTO DE AMP COMO FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE DESPLANTE (DH) PARA: A) ONDAS INCIDENTES CON DIFERENTES PERIODOS (PANEL IZQUIERDO) Y B) DIFERENTES ALTURAS (PANEL DERECHO). .... | 34 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 19.- AMPLIFICACIÓN CAUSADA POR UNA ESTRUCTURA CON $L_x=4$ , $L_y=4$ Y $L_z=21M$ COMO FUNCIÓN DEL PERIODO $T_0$ Y LA ALTURA DE LA ONDA INCIDENTE $H_0$ . .... | 34 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 20.- A) AMP CAUSADA POR UNA ESTRUCTURA EN FONDO CON PENDIENTE COMO FUNCIÓN DE LAS DIMENSIONES HORIZONTALES (PANEL IZQUIERDO) Y B) LA RAZÓN DE ASPECTO HORIZONTAL, DL (PANEL DERECHO). .... | 35 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 21.-COMPORTAMIENTO DE LA AMPLIFICACIÓN $DL_z$ . .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 35 |
| FIGURA 22.- A) AMPLIFICACIÓN DE UNA ONDA INCIDENTE $H_0=0.5$ M Y $T_0=16$ S (PANEL INFERIOR) CAUSADA POR B) UNA ESTRUCTURA CON DIMENSIONES $L_x=4$ $L_y=5.5$ (PANEL SUPERIOR).....                                                                                                                                            | 36 |
| FIGURA 23.- SERIES DE ESPECTROS DE FRECUENCIA EN CORTES LONGITUDINALES DEL DOMINIO EN DISTINTAS POSICIONES A LO LARGO DEL EJE “Y”. A) CORTE SOBRE EL CENTRO DE LA ESTRUCTURA, $Y=200$ , B) EN LA PARTE SUPERIOR DE LA ESTRUCTURA $Y=250$ , C) EN EL BORDE DE LA ESTRUCTURA $Y=300$ Y D) FUERA DE LA ESTRUCTURA $Y=350$ . .... | 38 |

## 4. Introducción

La demanda energética mundial se estima en alrededor de 2TW (IEA, 2013) y aumenta progresivamente debido al incremento poblacional y a la tecnificación de la vida cotidiana. Los métodos tradicionales de generación de energía eléctrica han contribuido a los problemas ambientales que enfrentamos en la actualidad. Con el fin de disminuir los efectos negativos del uso de los combustibles fósiles, se ha considerado a las fuentes de energía renovable como una verdadera alternativa para la producción de electricidad (Hernández-Escobedo *et al.* 2010, Hernández-Escobedo, *et al.* 2014).

El sector energético en México ha dependido históricamente de los hidrocarburos para satisfacer la demanda de energía eléctrica del país. Sin embargo, la producción nacional de hidrocarburos ha disminuido constantemente desde el 2004, debido al declive del yacimiento de Cantarell. Aunado a esto, se ha registrado un incremento en el consumo nacional de energía eléctrica por varios años (Secretaría de Energía, 2018).

Lo anterior evidencia los riesgos que enfrenta el sector productivo mexicano ante una tendencia que puede hacer vulnerable la seguridad energética en los siguientes años. Hoy en día los gobiernos alrededor del mundo están concentrados en promover el uso sustentable y la implementación de nuevos tipos de energía, sin afectar aspectos claves del crecimiento económico, la seguridad energética y la adaptación al cambio climático de cada país (Secretaría de Energía, 2018).

En México desde hace algunos años se realizan acciones para el aprovechamiento sustentable de la energía que contribuyan a la seguridad energética y económica del país, promoviendo la eficiencia energética en los diversos sectores tanto productivos como de consumo de energía (Secretaría de Energía, 2018).

En este sentido, las energías renovables pueden convertirse en una opción viable para satisfacer parte de la demanda global de energía, permitiendo reducir los efectos de los gases de efecto invernadero al utilizar tecnologías con bajas emisiones de carbono (Silva *et al.*, 2018).

En este sentido, en décadas recientes, se ha volteado a ver a las energías marinas como una fuente importante para el suministro de energía eléctrica. A pesar de los retos tecnológicos que implica su utilización y los altos costos asociados a la construcción de estructuras marinas (Manzano-Agugliaro, 2013).

En particular, la energía contenida en el oleaje, energía undimotriz, tiene un alto potencial para contribuir a la demanda del suministro eléctrico mundial. Las características del oleaje son un factor decisivo para seleccionar ubicaciones

adecuadas para realizar la extracción de energía desde un punto de vista técnico (Portilla *et al.* 2016). Por otro lado, la variabilidad del oleaje desempeña un papel importante en la rentabilidad; los rendimientos financieros de las granjas extractoras de energía pueden estar íntimamente relacionados con la variabilidad climática (Guanche *et al.* 2014). Además, la explotación de este recurso depende en gran medida de la eficiencia de los convertidores de energía del oleaje (CEO) (Akpınara *et al.* 2016). En los últimos años, esto ha sido estudiado por diversos autores desde diferentes puntos de vista. Por citar algunos ejemplos, Mavrakos y colaboradores (2004) probaron el rendimiento de un CEO en diferentes tipos de ondas, Iver y Porter (2016) investigaron los efectos causados por un CEO en forma de cilindro, Schay *et al.* (2013) examinaron la eficiencia de un CEO frente a una pared vertical con ondas regulares e irregulares y Loukogeorgaki (2020) analizó el rendimiento de una serie de CEOs semisumergidos. Además, se ha investigado el uso de estructuras aledañas al CEO, tanto para generar disipación en la parte posterior de los CEOs como para focalizar la energía para facilitar su extracción (ver sección Antecedentes).

En este trabajo se analiza la capacidad de focalización de estructuras sumergidas elípticas con diferentes dimensiones. Esto permitirá determinar la posibilidad de utilizar este tipo de estructuras para concentrar la energía del oleaje en un área, facilitando así su extracción con una menor inversión en infraestructura.

## 5. Antecedentes

En las últimas décadas se han propuesto diferentes técnicas para lograr la focalización de las olas. Entre los mecanismos propuestos para focalizar se encuentran: el uso de interferencia constructiva (McCormick, 2007), el uso de reflexión de Bragg (Elandt *et al.*, 2014) y el uso de estructuras que causan focalización por reflexión (Cheung y Lee, 1996) o por refracción del oleaje incidente (Griffiths y Porter, 2012, Weng *et al.*, 2013). Este último tipo de estructuras comúnmente se denominan como “lentes” en analogía al uso de lentes para refracción de la luz en óptica.

El uso de estructuras tridimensionales para generar refracción es mejor en comparación con el uso de estructuras planas (“lentes”), ya que las estructuras tridimensionales tienen una pendiente, logrando la focalización en un área más profunda, evitando así el rompimiento de las olas. En cambio, las estructuras planas, como las estudiadas por Bobinski y colaboradores (2015), generalmente inducen focalización sobre la estructura y la altura de las olas amplificadas está limitada por la profundidad a la que se coloca el lente.

Las estructuras tridimensionales, al igual que los lentes, concentran la energía del oleaje incidente, pero limitan menos la amplificación debido a que pueden focalizar en áreas más profundas. Existen pocos trabajos con estructuras tridimensionales. Peng y colaboradores (2015) analizaron la interacción del oleaje

con dos estructuras gemelas. Por otro lado, García-Nava y Silvestre-Morales (2017) analizaron tres tipos de estructuras tridimensionales y encontraron que, de los tipos de estructuras analizadas, las elipsoidales son las que generan una mayor amplificación.

En este trabajo se estudia la relación entre los parámetros de forma de una estructura elipsoidal, largo, alto y ancho, con la capacidad de focalizar la energía del oleaje incidente.

## 6. Objetivo

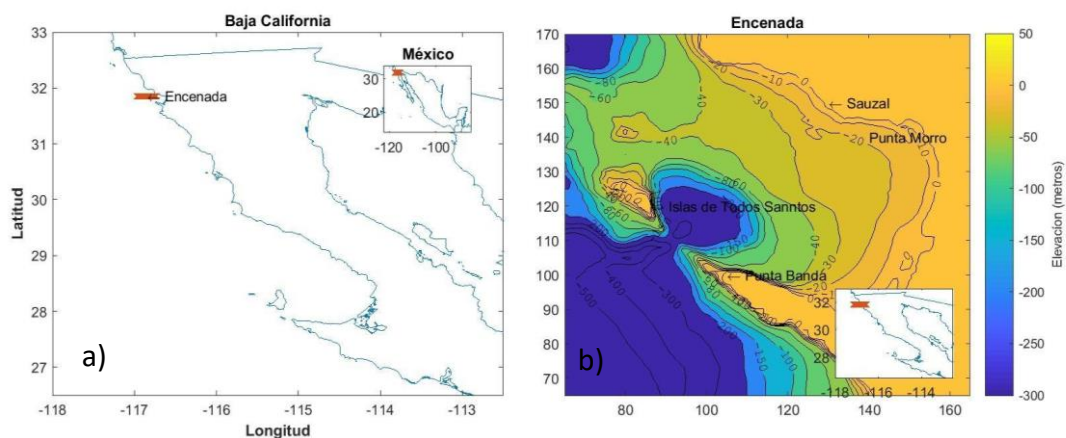
El objetivo general de este trabajo es caracterizar la amplificación del oleaje causada por estructuras elípticas sumergidas.

Los objetivos particulares son:

- Determinar las dimensiones óptimas de la estructura que favorecen la focalización del oleaje incidente en un fondo plano.
- Determinar la focalización causada con estructuras elípticas en un caso de aplicación en el área aledaña al puerto de El Sauzal, Baja California.

## 7. Área de estudio

La Bahía de Todos Santos (Figura 1) se localiza en la costa occidental de la península de Baja California, entre las latitudes  $31^{\circ}41'$  y  $31^{\circ}56'N$  y las longitudes  $116^{\circ}34'$  y  $116^{\circ}51'0$ . Los límites naturales son: Punta San Miguel al norte, Punta Banda al sur y las islas de Todos Santos en la porción central, que define dos entradas y salidas a la bahía que permiten una circulación continua de agua oceánica (Ulloa, 1989).



**Figura 1.- a) Representación de la Península de Baja California y b) batimetría de Bahía de Todos Santos.**

La línea de costa de la bahía está compuesta de una ribera rocosa que comprende Punta San Miguel, Punta El Sauzal, Punta Morro y Punta Ensenada.

con playas de bolsillo entre ellas. Las puntas de El Sauzal y Ensenada se prolongaron en forma de rompeolas para proteger el puerto de El Sauzal y el puerto de Ensenada, respectivamente. Una playa arenosa de 14 km de longitud inicia al sur del puerto de Ensenada y termina en la base de Punta Banda. Esta playa se interrumpe por una boca que determina la entrada a una laguna costera denominada como Estero de Punta Banda. La ribera rocosa de Punta Banda se caracteriza por ser una costa muy irregular, con cantiles casi verticales y playas pequeñas con escasa arena entre ellos (Álvarez-Borrego y Meillon-Menchaca, 1997).

La configuración batimétrica de la bahía es irregular. Los rasgos sobresalientes son: el bajo de San Miguel, con una profundidad mínima de 5.5 m, que se ubica entre Punta San Miguel y las islas de Todos Santos; una depresión submarina entre Punta Banda y las islas, con profundidades de hasta 550 m (Ulloa, 1989).

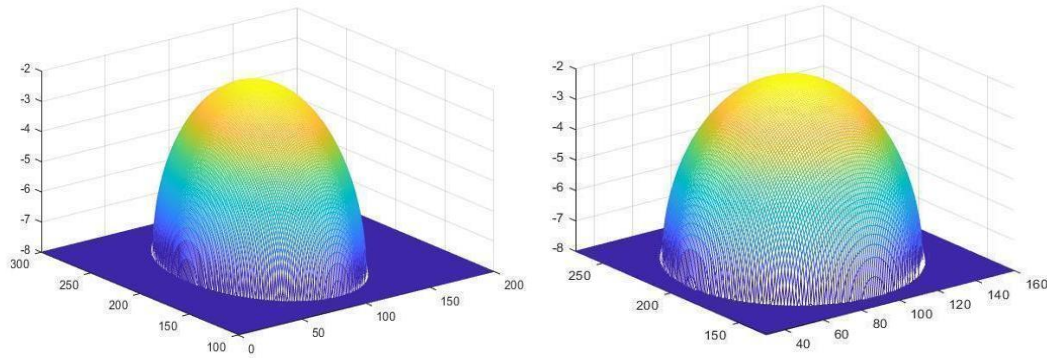
El Puerto del Sauzal se localiza a 8 km al Norte del Puerto de Ensenada en una zona declarada de uso industrial y ubicado justo en la conexión de las carreteras federales de Tecate - Ensenada y Tijuana – Ensenada. A tan sólo 4 km de donde se tiene contemplado que cruce el libramiento de la Ciudad de Ensenada con la carretera Tecate – Ensenada. Por lo anterior, varios expertos concuerdan que se tienen características adecuadas y se dispone de superficie necesaria para realizar una ampliación del área del puerto en un futuro próximo. Con lo que se pretende solucionar las deficiencias actuales del Puerto de Ensenada y cubrir los requerimientos portuarios del Noroeste de México en el futuro (API, 2010).

## 8. Metodología

García-Nava y Silvestre-Morales (2013) analizaron la capacidad de focalización de estructuras elipsoidales, biconvexas y en forma de lúnula. Determinaron que las estructuras elipsoidales son las que causan una mayor focalización.

Para este trabajo se seleccionaron las estructuras elipsoidales para realizar un análisis más detallado de su capacidad de focalización.

Para ello, se realizaron una serie de simulaciones numéricas variando tanto las características de la estructura como las características del oleaje incidente y las condiciones del fondo. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de dos de las estructuras utilizadas en las simulaciones.



**Figura 2.- Esquema tridimensional de dos estructuras utilizadas en este estudio (Note que la escala vertical está exagerada para efectos de visualización).**

Para el análisis de la capacidad de focalización de las estructuras se utilizaron los modelos numéricos RefDif (Kirby J. T. *et al.* 1983) y SWASH (DUT, 2019). Mismos que se describen a continuación.

### 8.1. Modelo Ref/Dif

RefDif (Refraction-Diffraction model) es un modelo débilmente no lineal basado en la ecuación de pendiente suave. Es un modelo combinado de refracción y difracción que incluye ambos efectos de forma explícita. Este modelo permite la modelación del oleaje en regiones con batimetría irregular y donde los efectos de la difracción son importantes. En particular para este trabajo es importante que el modelo es capaz de resolver situaciones en las que los rayos de las ondas incidentes tienen influencia de la refracción y se cruzan generando concentraciones locales que ocasionan la aplicación del oleaje, lo anterior sin predecir amplitudes infinitas (Kirby y Dalrymple, 1983).

Los modelos combinados de refracción y difracción son utilizados para el cálculo de la altura y la dirección del oleaje en áreas donde uno o los dos procesos están presentes. Algunos ejemplos incluyen el uso de estos son: la determinación de la altura del oleaje en una bahía, la determinación de la cantidad de energía del oleaje penetrando una cadena insular, la determinación de sitios de refugio y el estudio de las alteraciones al oleaje causados por una isla situada cerca de una costa (Kirby y Dalrymple 1993).

Los modelos de refracción y difracción como Ref/Dif, están basados en la expansión de Stokes para ondas superficiales e incluye la corrección de tercer orden para la rapidez de propagación del oleaje. La altura de ola se determina a partir de la solución a segundo orden (Liu y Tsay, 1984).

## 8.2. Modelo Swash

El modelo SWASH (Simulating WAVes till SHore) es una herramienta numérica de uso general para simular flujos no hidrostáticos, de superficie libre, rotacionales y fenómenos de transporte en una, dos o tres dimensiones. Las ecuaciones que rigen el modelo son las ecuaciones no lineales en aguas someras, incluida la presión no hidrostática que proporcionan una base general para las simulaciones (DUT, 2019).

El modelo se conoce como un modelo de flujo de onda y es esencialmente aplicable en las regiones costeras hasta la costa. La filosofía básica del código SWASH es proporcionar un modelo eficiente y robusto que permita aplicar una amplia gama de escalas de espacio-temporales de ondas superficiales y flujos de aguas poco profundas en entornos complejos. Como resultado, SWASH permite que todo el proceso de modelado se lleve a cabo en cualquier área de interés. Esto incluye aplicaciones costeras a pequeña escala, como olas que se acercan a una playa, penetración de olas en un puerto, olas de inundación en un río, intrusión salina en estuarios y sistemas oceánicos. Sistemas en plataformas continentales y costeros, a gran escala impulsados por Coriolis y fuerzas meteorológicas para simular olas de marea e inundaciones de marejadas (DUT, 2019). Algunos ejemplos de aplicación del modelo SWASH son:

- Simulación de la transformación del oleaje tanto en zonas de surf como en zonas de lavado (swash). La interacción de las olas con corrientes o con estructuras, la amortiguación del oleaje debido a la vegetación y de la rotura del oleaje y el escurrimiento en la costa.
- Simulación de flujos repentinos causados por cambios abruptos que resultan de la ruptura de diques, el arribo de tsunamis u olas de inundación a la costa.
- Simulación de flujos impulsados por la densidad en mares costeros, estuarios, lagos o ríos.

SWASH es un modelo en esencia cercana al modelo espectral del oleaje SWAN (Simulating WAVes Nearshore) con respecto a la practicidad empleado en el desarrollo del código. Por un lado, proporciona estabilidad numérica y robustez, y por otro lado da resultados precisos en un tiempo de respuesta razonable (DUT, 2019).

## 8.3. Descripción de Estructuras:

Las estructuras utilizadas en este estudio son de tipo elipsoidal. Estas estructuras se describen a través de

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

donde es el vector posición que describe la superficie del elipsoide,  $(x_0, y_0, z_0)$  es la posición del centro de la estructura y  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los semiejes.

La altura de la superficie del elipsoide  $z$ , se describe como una función de la posición horizontal .

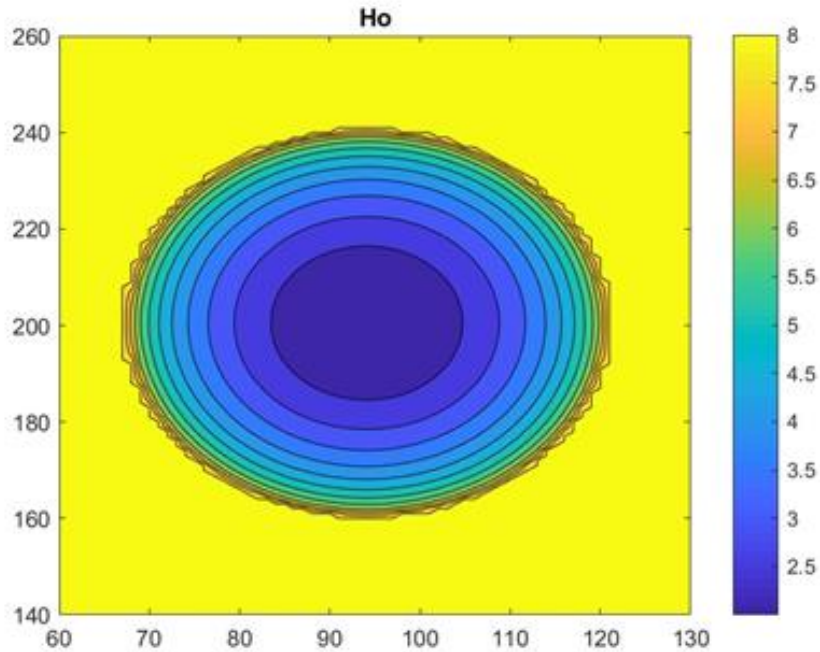
$$z = z_0 + c \left( 1 + \frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Con las raíces positivas de la ecuación 2 se puede crear una estructura elipsoidal usando donde  $h$  es la profundidad del fondo marino. Las dimensiones de la estructura dependen de los semiejes  $a$ ,  $b$  y  $c$ . La longitud de la estructura es  $L_x=2a$ , el ancho de las estructuras es  $L_y=2b$  y la altura máxima es  $L_z=2c$ .

Cuando  $a$  y  $b$  son iguales la estructura resultante es un elipsoide cuya base es circular, si además  $a=b=c$ , la estructura es una media esfera.

#### 8.4. Fondo plano

Para analizar la capacidad de focalización de las estructuras sin tomar en cuenta los posibles efectos de refracción o asomeramiento causados por variaciones en el fondo marino, se realizaron una serie de simulaciones numéricas variando el largo, ancho y alto de las estructuras sobre un fondo plano a 8 m de profundidad (Figura 3). Para cada estructura analizada el modelo se forzó con ondas regulares con diferentes combinaciones de altura inicial ( $H_0$ ) y periodo inicial ( $T_0$ ).  $H_0$  se varió de 0.5 m a 4 m en intervalos de 0.5 m y el  $T_0$  se varió de 1 a 20 s en intervalos de 1s.



**Figura 3.- Vista superior de una estructura elipsoidal sobre un fondo plano. Los colores y contornos indican la profundidad.**

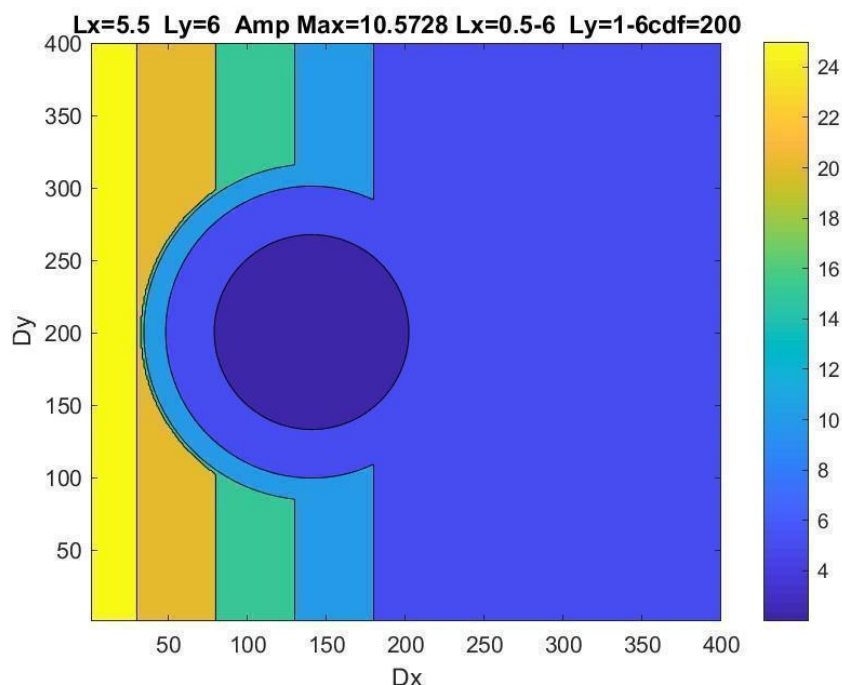
El modelo Ref/Dif es mucho más económico, en términos de tiempo de cómputo que el modelo SWASH, este modelo se utilizó para hacer una serie de simulaciones que permitieran conocer, de manera general, como las dimensiones de las estructuras afectan su capacidad de focalización.

La matriz experimental de las simulaciones con el modelo Ref/Dif consistió en variar el largo de la estructura entre  $0.5\lambda_0 < L_x < 6\lambda_0$ , el ancho entre  $0.5\lambda_0 < L_y < 5\lambda_0$  y el alto entre  $1\text{ m} < L_z < 7\text{ m}$ , donde  $\lambda_0$  es la longitud de la onda incidente en la frontera del dominio. En total se realizaron 272 simulaciones con diferentes dimensiones de la estructura y adicionalmente se realizaron simulaciones numéricas donde se varió el periodo ( $T_0$ ) y la altura ( $H_0$ ) de la onda incidente. Todas las simulaciones se repitieron modificando la profundidad del fondo plano  $z$  sobre el que descansa la estructura entre 8m y 38m.

Con el modelo SWASH se hicieron simulaciones que permitieron analizar de forma detallada la interacción de las olas con las estructuras además de las corrientes generadas por el oleaje. Estas simulaciones se realizaron variando las dimensiones de la estructura ( $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$ ) alrededor de las dimensiones que, de acuerdo con las simulaciones de Ref/Dif, generan las mayores amplificaciones.

### 8.5. Fondo Sauzal.

Para observar el comportamiento de las estructuras en un caso más realista, se repitieron las pruebas que se hicieron dentro del fondo plano en las simulaciones numéricas utilizando un fondo idealizado que representara la implementación de las estructuras en el área frente del puerto de El Sauzal. Para ello se utilizó un fondo homogéneo con pendientes adecuadas para el sitio (Figura 4).



**Figura 4.- Vista superior de una estructura elipsoidal sobre un fondo idealizado del área aledaña al puerto de El Sauzal. Los colores y contornos indican la profundidad en metros.**

#### 8.6. Variables utilizadas en las simulaciones numéricas

En esta sección se especifican las variables que se utilizan en la descripción de los resultados de las simulaciones numéricas. Para facilitar la interpretación de los resultados, así como su uso con forzamientos y dimensiones diferentes a los utilizados en este estudio, se utilizan principalmente variables adimensionales.

- Las dimensiones horizontales de la estructura, es decir el largo ( $L_x$ ) y ancho ( $L_y$ ), se adimensionaliza con la longitud de onda incidente por lo que se expresan como múltiplos y submúltiplos de  $\lambda_0$ .
- La razón de aspecto horizontal de la estructura está dada por la razón del largo entre el ancho  $dL=L_x/L_y$ .
- El alto de la estructura se expresa como la altura relativa  $HR = H_0/z$  donde  $H_0$  es la altura de la onda incidente y  $h$  es la profundidad. Para un mismo valor de  $H_0$  las estructuras más altas, cuya altura máxima está más cercana a la superficie, tendrán valores de  $HR$  mayores y viceversa. Se utiliza  $HR$  para caracterizar el alto de las estructuras debido a que se sabe que la razón de la altura de la ola entre la profundidad es el factor que determina el rompimiento de las olas en aguas someras.
- La cantidad de amplificación causada por la interacción de la onda incidente con la estructura se caracteriza por el factor de amplificación donde es la altura de la onda en el punto focal ( $P$ ).

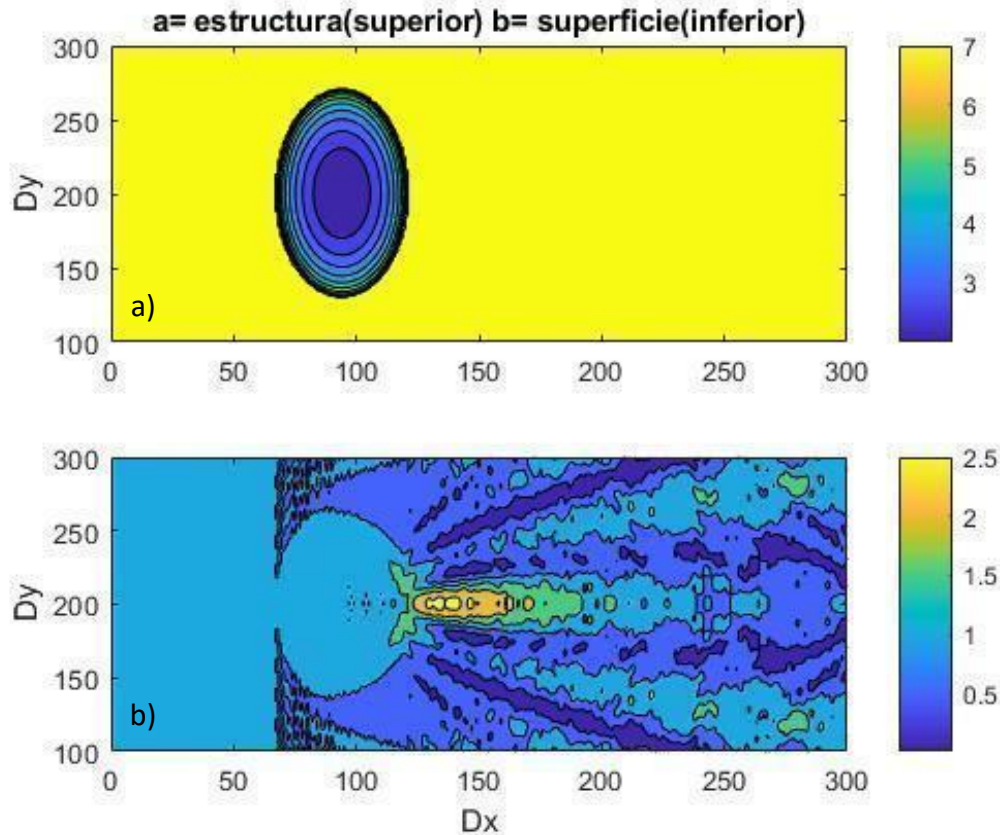
- El punto focal  $P$  es el punto donde se alcanza la amplificación máxima (Amp) dentro del modelo,  $P=(P_x, P_y)=\text{Amp}(X, Y)$ , donde  $P$  es el vector posición del punto focal respecto al centro de la estructura ( $c$ ), dado por  $P_x$  y  $P_y$ .

## 9. Resultados y discusión

### 9.1. Fondo plano

En la Figura 5-b se muestra la amplitud del campo de oleaje resultante con una amplitud incidente de 0.5 m con una amplificación máxima (Amp) de 2.5 debido a la interacción con una estructura elipsoidal con dimensiones de 1.5 veces la longitud de onda en el eje  $X$  ( $L_x$ ) y 2 veces la longitud de onda en el eje  $Y$  del dominio ( $L_y$ ) (figura 5-a), calculadas con el modelo Ref/Dif. En general en todas las simulaciones realizadas se observaron patrones similares al de la Figura 5, a partir del frente de la estructura la superficie libre presenta modificaciones leves hasta el punto focal, el cual se puede ubicar sobre la mitad posterior de la estructura o en la zona detrás de la estructura, dependiendo de la razón de aspecto de la estructura. Las estructuras más largas que anchas ( $dL > 1$ ) tienden a focalizar los trenes de onda sobre la estructura, mientras que las más anchas que largas ( $dL < 1$ ) focalizan en la zona posterior a la estructura. De forma similar, la forma del área focal cambia dependiendo de las dimensiones de las estructuras, en estructuras elipsoidales con  $0.25 < dL < 2$  y circular en estructuras con un  $dL$  cercano a 0.9. Las estructuras con proporciones  $dL < 0.1$  y  $dL > 4.5$  no presentaron amplificaciones significativas.

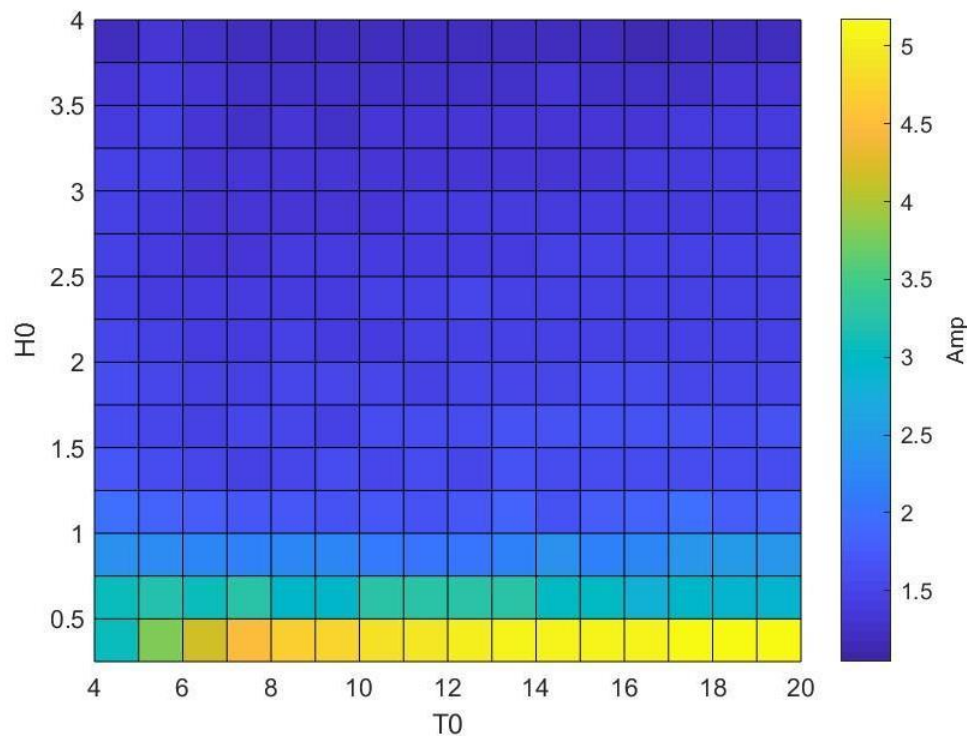
La influencia de la estructura en todos los casos genera refracción y focaliza la energía en un punto dentro de un área específica en la parte posterior de la estructura determinada por una amplificación de la onda incidente superior al 50% de Amp. En la parte posterior del punto máximo de amplificación se hacen presentes ondas periódicas que pueden ser el resultado del rompimiento de la linealidad de la onda causada por la concentración de la energía en un punto. Algo similar a lo observado por Pelinovsky *et al.* (2000) en la formación de olas excepcionales conocidas como “freak waves” y dadas por una superposición de ondas.



**Figura 5.- Ejemplo de la amplificación observada con el modelo RefDif. a) profundidad del fondo utilizado en la simulación, b) factor de amplificación de la onda incidente.**

En la mayoría de las estructuras la amplificación máxima (Amp) ocurre en la parte posterior de la estructura. Aunque también se generan zonas de amplificación secundarias, de menor intensidad, en los alrededores de la zona de Amp. Estas áreas de amplificación secundarias se forman en radios con diferentes ángulos respecto al centro de la estructura con respecto al eje longitudinal que pasa por el centro de la estructura y son un reflejo de la eficiencia de la estructura para concentrar la energía del oleaje incidente. Entre más eficiente es la estructura el ángulo entre el centro de la estructura y estas zonas de amplificación secundaria aumenta.

La Amp causada por una estructura depende tanto de sus dimensiones como del periodo ( $T_0$ ) y la altura ( $H_0$ ) de la onda incidente. En general los valores de Amp disminuyen al aumentar  $H_0$ , con la mayor influencia de la estructura en las olas con valores de  $H_0 < 1$  m. Por otro lado, los valores de Amp aumenta al tener  $T_0$  mas grandes (Figura 6).

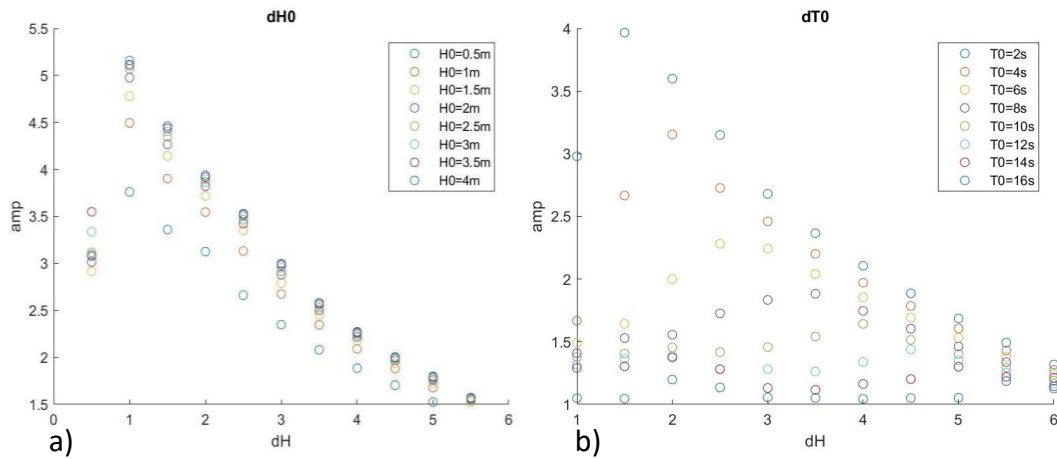


**Figura 6.- Relación de amplificación máxima con el periodo  $T_0$  y altura  $H_0$  de la onda incidente para una estructura con una razón de aspecto  $dL=0.88$  y una altura de 5m respecto al fondo.**

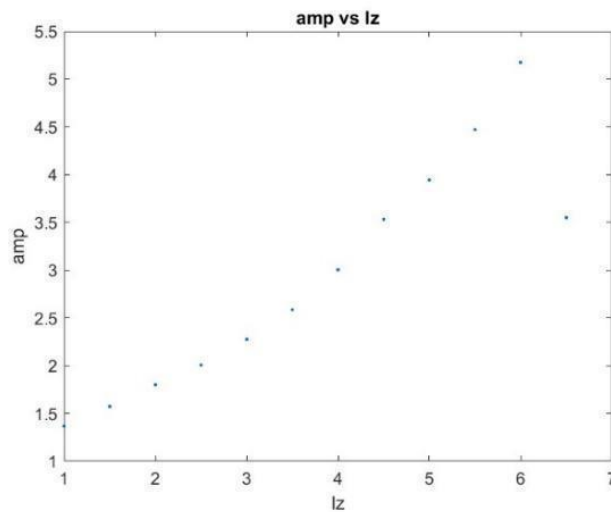
La relación de Amp con  $T_0$  y  $H_0$  en variación  $L_z$ . Sin embargo, al mantener las dimensiones horizontales de la estructura fijas y aumentar  $L_z$ , en todos los casos se alcanza una  $L_z$  límite a partir de la cual Amp comienza a reducirse (Figura 7). Esta  $L_z$  límite varía dependiendo de las características de la ola incidente. Para un  $T_0$  dado, Amp ocurre en una  $L_z$  que depende directamente de  $H_0$ ; mientras que, para una  $H_0$  fija, la  $L_z$  límite disminuye al aumentar  $T_0$ ; (Figura 7).

Lo anterior es importante al analizar el posible comportamiento de una estructura en un sitio dado ya que la variabilidad en las alturas y periodos de las olas incidentes afectarán la amplificación ocasionada por la estructura.

Por otro lado, existe una dependencia de la amplificación en la altura de las estructuras ( $L_z$ ). Al analizar de manera particular los efectos de las variaciones de la altura de la estructura, se observa que, al aumentar la altura de una estructura con dimensiones horizontales fijas, la amplificación aumenta hasta una  $L_z$  donde la Amp se reduce drásticamente (Figura 8). Esto ocurre debido a la reducción de la columna de agua sobre la estructura definida como  $dH=L_z-z$ , lo que induce un rompimiento de las ondas por asomeramiento después de cierto punto.

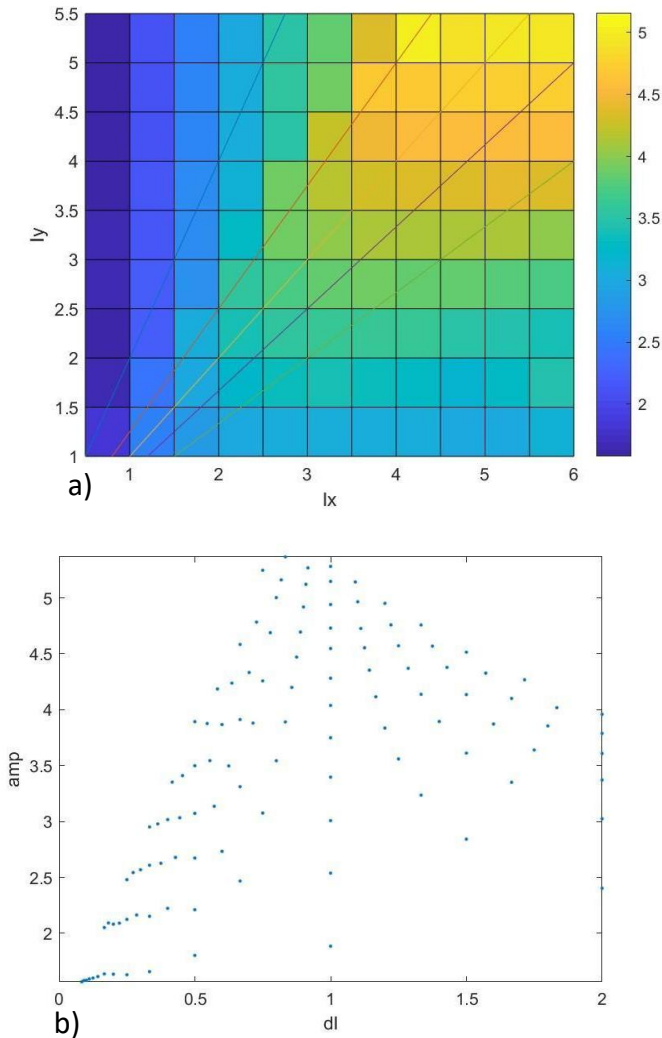


**Figura 7.- Comportamiento de la amplificación máxima (Amp) como función de la profundidad de desplante (dH) para: a) ondas incidentes con diferentes alturas y b) diferentes periodos.**



**Figura 8.- Comportamiento de la amplificación respecto a la altura de la estructura  $L_z$  para una estructura con dimensiones horizontales fijas.**

En general las estructuras mas grandes, con dimensiones horizontales mayores, causan una mayor amplificación. Además, causan una mayor amplificación las estructuras con una relación  $dL=0.9\pm0.1$  (figura 9-a). Aunque, como se mencionó anteriormente, la amplificación que causan las estructuras depende de su altura. Para estructuras con una altura dada Amp aumenta con  $dL$ , presentan un pico máximo alrededor de  $dL=0.8 \pm 0.1$  y luego disminuye.



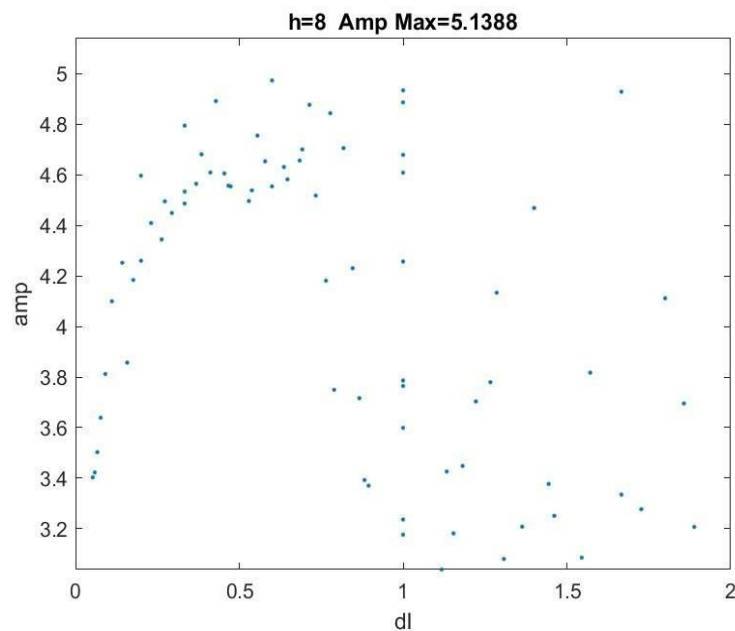
**Figura 9.- a) Amp causada por una estructura como función de las dimensiones horizontales de la estructura ( $L_x$  y  $L_y$ ) (figura superior) y b) de la razón de aspecto ( $dL$ )(figura inferior).**

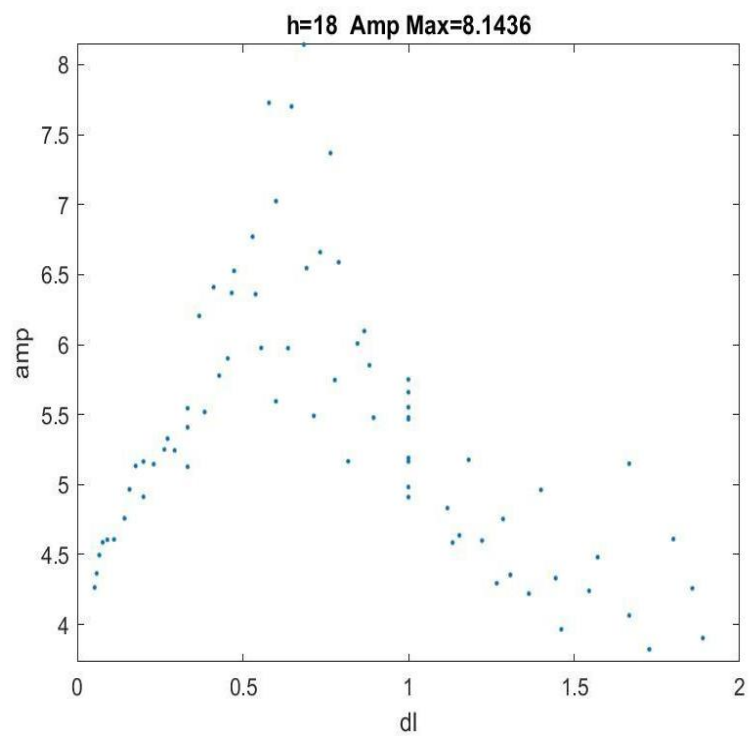
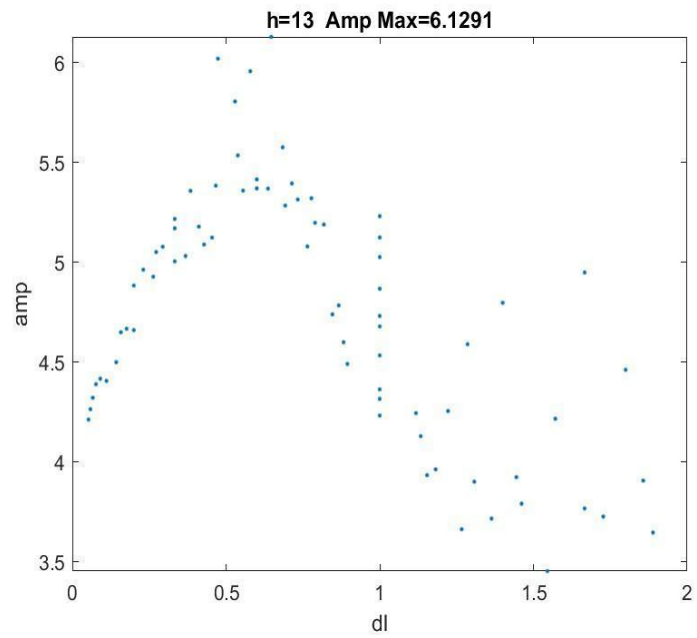
Al observar solo la amplificación máxima causada por una estructura con un  $L_z$  fijo, independientemente de sus dimensiones horizontales, se puede observar que Amp aumenta con  $L_z$  hasta que la distancia entre  $L_z$  y la superficie es de 1m, para estructuras con alturas mayores la Amp se reduce. De igual forma, al incrementar  $L_z$  el  $dL$  al que ocurre la amplificación máxima se modifica (figura 7-b). Por otro lado, si la estructura se encuentra cerca de la superficie ( $L_z \sim h$ ) la amplificación máxima ocurre en valores similares de  $dL$ . Sin embargo, las amplificaciones máximas obtenidas cambian dependiendo de las características de la onda incidente (Figura 9-b).

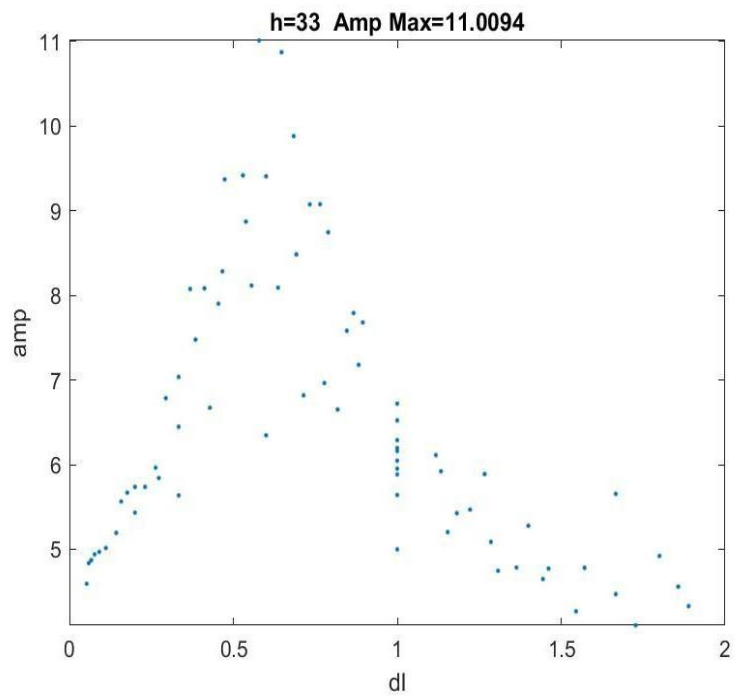
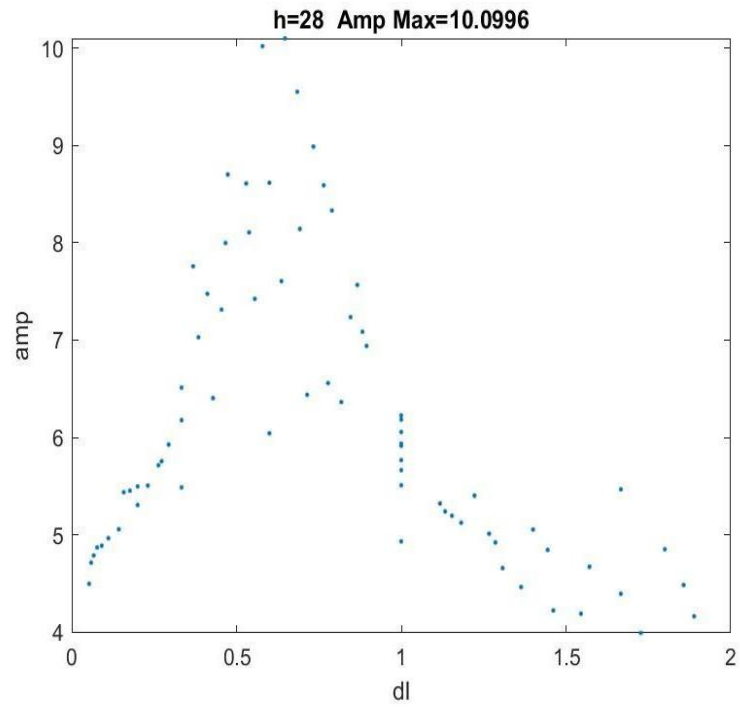
La dependencia de la amplificación con respecto a las dimensiones de la estructura cambia al modificar la profundidad del fondo plano sobre el que se encuentra la estructura. Esto modifica el comportamiento de Amp con respecto a

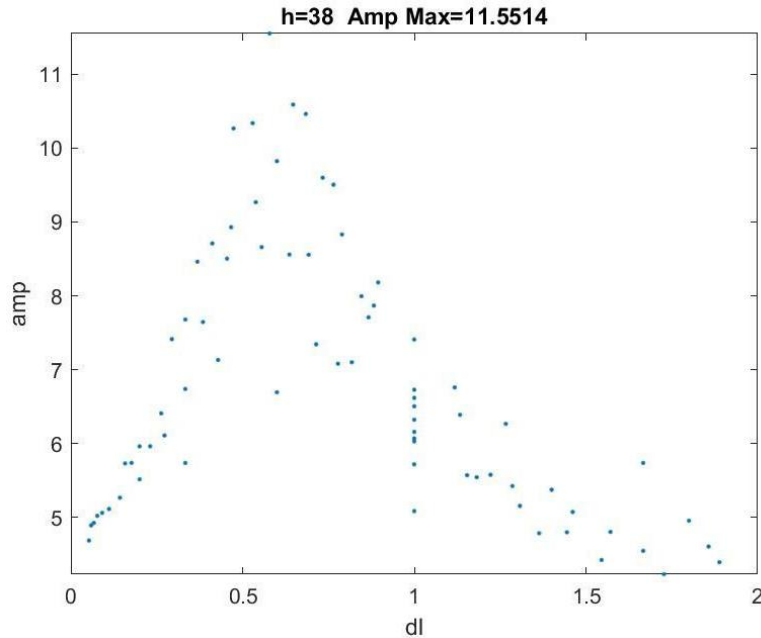
dL. Al disminuir la profundidad del fondo la amplificación máxima que ocurría alrededor de  $dL=0.8$  ocurre más cercana a  $dL=0.6$  y varía con la profundidad, pero, siempre entre los valores  $0 < dL < 1$ .

Al aumentar la profundidad del fondo se observa un incremento en la amplificación máxima causada al variar las dimensiones de la estructura. Las amplificaciones máximas causadas por estructuras en un fondo con  $z=8$  m presentan máximos relativos de  $Amp=5.1$ , en  $dL=2.7$ ,  $Amp=5$  en  $dL=0.6$  y  $1$ , y  $Amp=3.1$  en valores de  $dL > 1$ . Con el fondo en  $z=13$  m se observó un comportamiento similar de la amplificación con  $dL$ , con una amplificación de  $6.1$  en  $dL=0.64$  y alrededor de  $3.5$  para  $dL < 1$ . Al aumentar la profundidad a  $18$  m y  $23$  m la  $Amp$  máxima aumenta a  $8.1$  y  $9$ , respectivamente; mientras que la amplificación con estructuras con  $dL > 1$  es alrededor de  $4$  en ambas profundidades. En profundidades mayores tanto el máximo de  $Amp$  como el valor de  $Amp$  en el rango de  $dL > 1$  aumentan con la profundidad. A  $28$  m de profundidad la  $Amp$  máxima es de  $10$  y ocurre en  $dL=0.61$ . A  $33$  m y  $38$  m de profundidad la  $Amp$  es de  $11$  y  $11.5$ , respectivamente y ocurre en  $dL=0.57$  (figura 10).





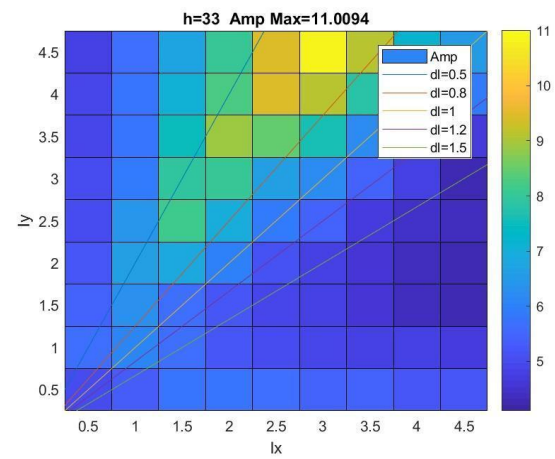
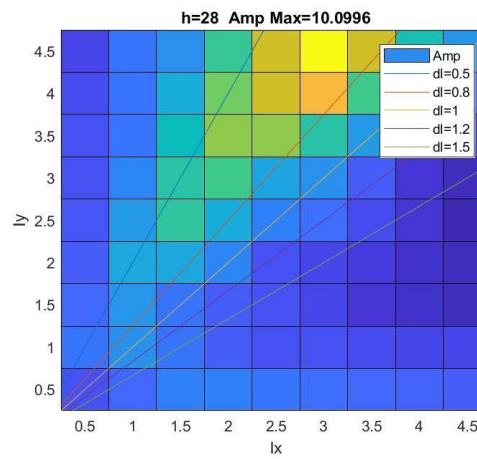
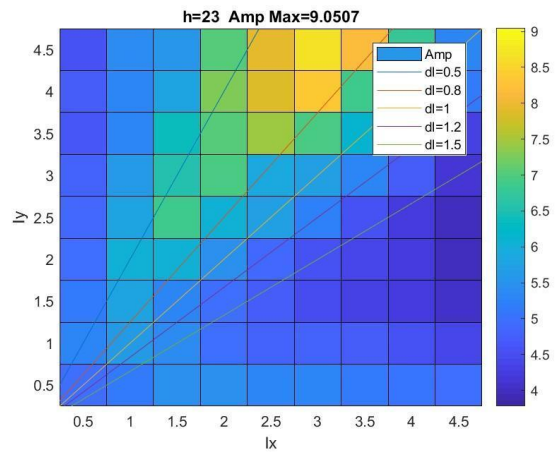
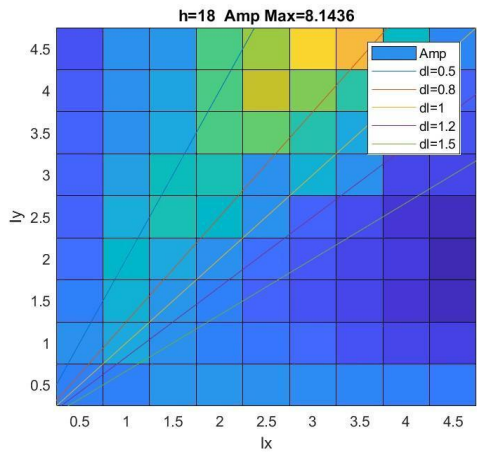
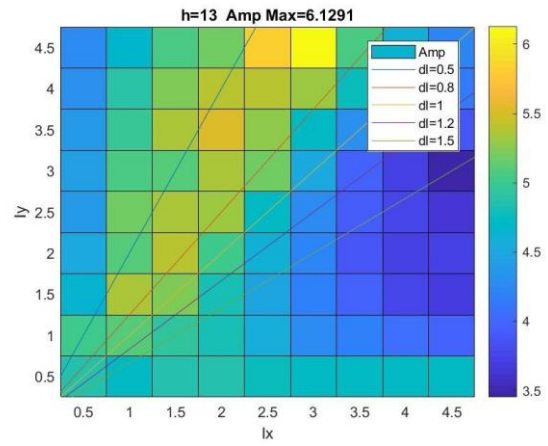
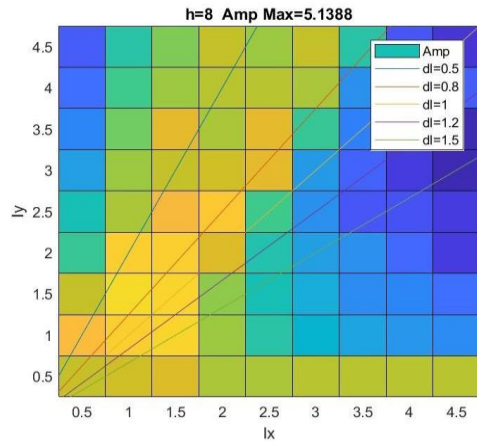


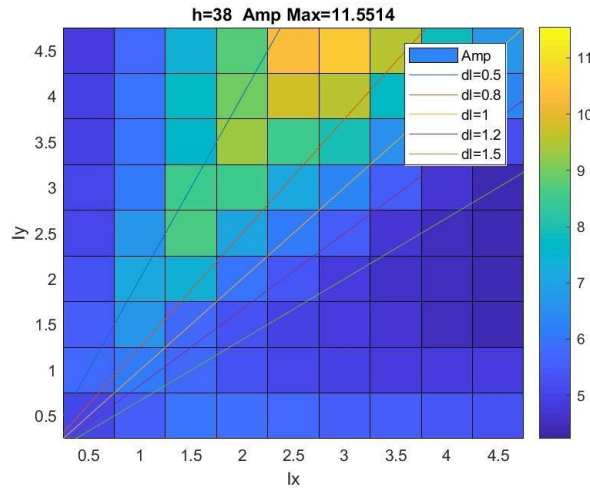


**Figura 10.- Amp como función de la razón de aspecto (dL) para estructuras a diferentes profundidades (z).**

A partir del análisis de las variaciones de Amp a diferentes profundidades se puede observar que; independientemente de la profundidad, las estructuras más anchas que largas ( $L_x > L_y$  y  $dL < 1$ ) siempre presentan una mayor amplificación que las estructuras que son más largas que anchas ( $L_x < L_y$  y  $dL > 1$ ). Esto es muy importante pues indica que, para una estructura fija, la dirección de incidencia del oleaje jugará un papel muy importante en la amplificación causada.

Otro factor importante a considerar es la altura de la ola incidente respecto a la profundidad, puesto que el rompimiento por asomeramiento determinará la Amp máxima que se pueda obtener al variar las dimensiones de una estructura. En general, para las estructuras con  $L_z$  fijo la amplificación máxima no ocurre en las estructuras más grandes analizadas. Las dimensiones de  $L_x$  y  $L_y$  a las cual se presenta Amp depende directamente de  $dH$ , entre mas cercano a 0 sea  $dH$  las proporciones en las cuales se presenta Amp son mas pequeñas tendiendo a una proporción de  $dL$  de 0.8 aparte de aumentar el valor de Amp con respecto la  $z$  va en aumento. Con el fondo en  $z=8$  m la amplificación máxima es de alrededor de 5 y ocurre en  $dL=0.57$ , al incrementar la profundidad en el rango  $13\text{ m} < z < 33\text{ m}$  la Amp máxima ocurre entre  $0.5 < dL < 0.8$  y aumenta a razón de 1 valor de Amp por cada 5 m de incremento en profundidad; a partir de  $z=33$  m la Amp máxima decrece a razón de 0.5 Amp por cada 5 m (Figura 11).





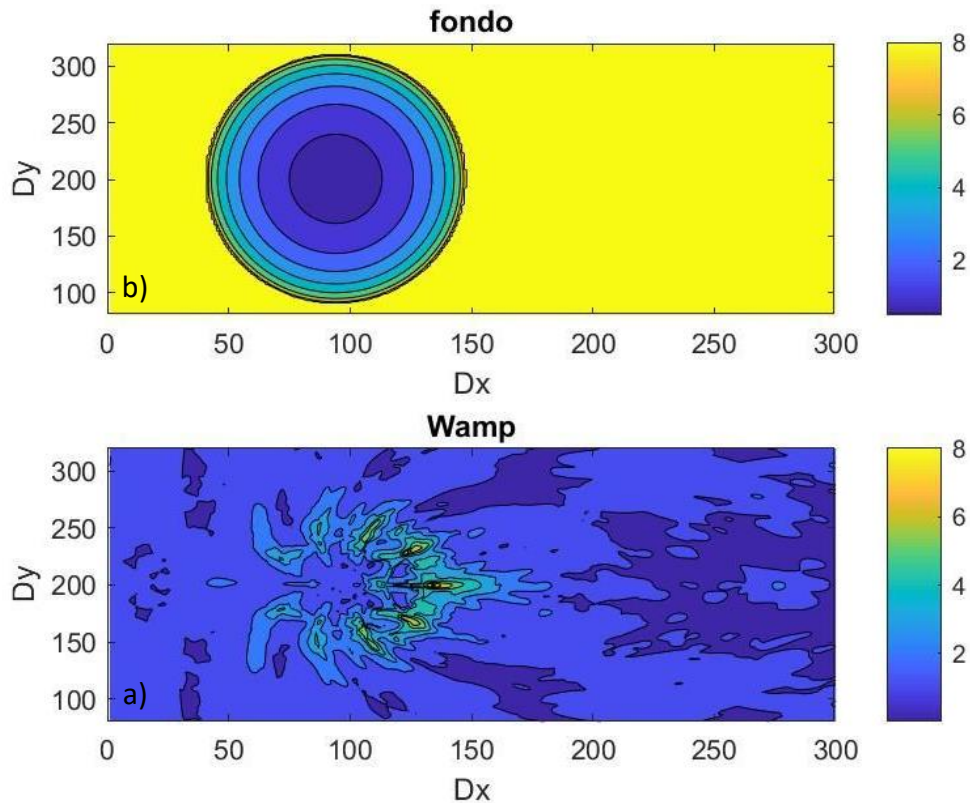
**Figura 11.- Amp como función de las dimensiones horizontales ( $L_x$  y  $L_y$ ) de las estructuras para estructuras en fondos con diferentes profundidades ( $z$ ).**

## 9.2. Comportamiento del modelo Swash con fondo plano

Las simulaciones con el modelo Swash permitieron analizar a detalle la interacción de las estructuras con el oleaje incidente. En general se observan los mismos patrones descritos para los resultados de RefDif con amplificaciones de ola muy similares, aunque con Swash, se detectaron variaciones de la concentración de energía hasta un 15% superior a lo calculado con RefDif. Esto es debido a que los dos modelos utilizados son muy diferentes y utilizan diferentes aproximaciones.

Con el modelo Swash se observó que las estructuras sobre fondo plano a 8 metros de profundidad, presentaron una amplificación máxima de un 10% menor a la calculada con el modelo RefDif a la misma profundidad y características de estructura.

En las simulaciones con Swash, al igual que en las simulaciones con RefDif, se observa que al concentrar el oleaje se genera un área focal en la parte posterior de la estructura pero, además, conforme  $L_z$  aumenta se presenta una mayor Amp y se reduce el área focal hasta una  $L_z$  en la que el área focal se divide con cierto ángulo de la estructura y se generan zonas radiales de amplificación secundaria y zonas de sombra donde la amplitud disminuye (Figura 12).

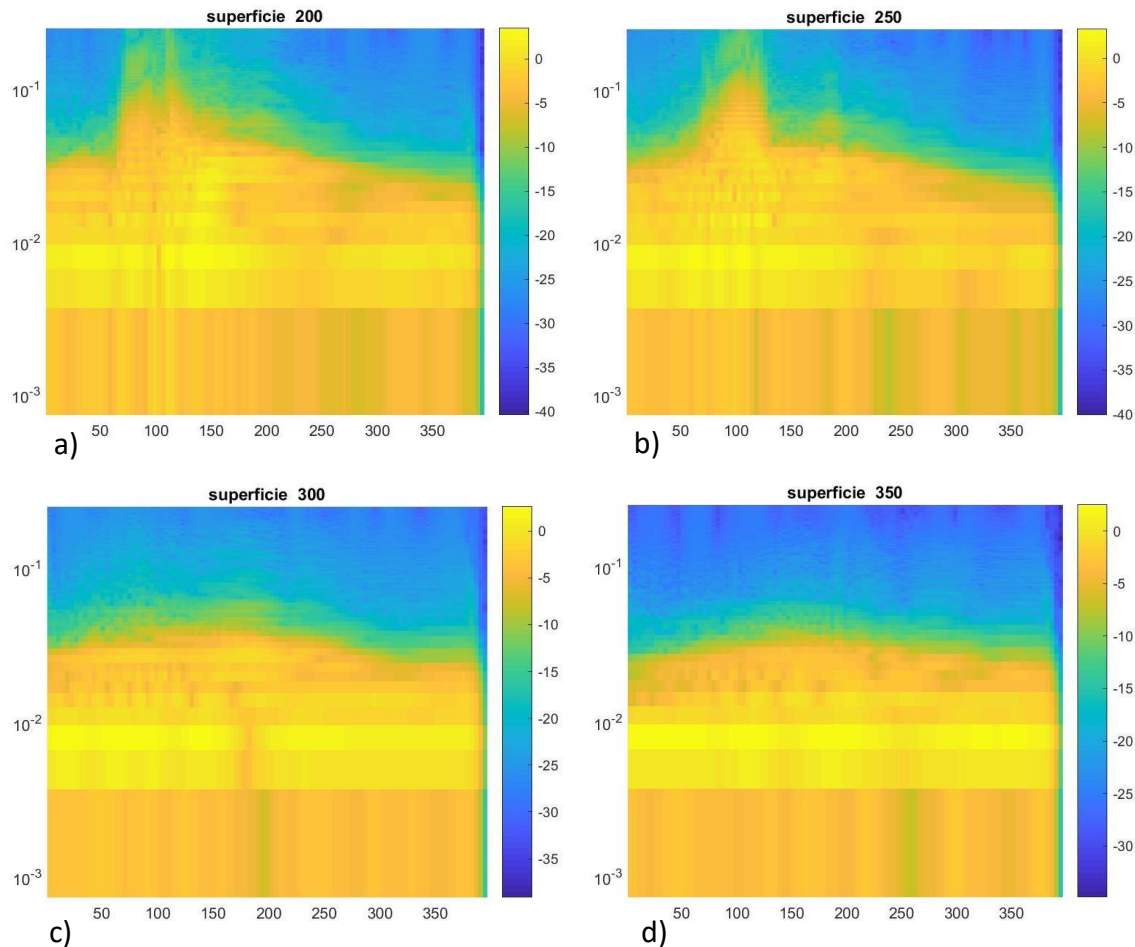


**Figura 12.- a) Amp causada por la estructura (panel inferior) y b) fondo correspondiente (panel superior), para una onda incidente con  $H_0=0.5$  y  $T_0=16$ .**

Una de las ventajas del uso del modelo Swash es que es posible hacer un análisis más amplio de las características del oleaje al interactuar con la estructura. Debido a que se conoce la evolución de la superficie libre como función del tiempo se puede utilizar el análisis espectral para observar la distribución de la energía como función de la frecuencia. En la Figura 13 puede observarse que antes de interactuar con la estructura el espectro del oleaje se encuentra bien definido con energía en una banda reducida de frecuencias siendo el máximo los valores de  $H_0$ , en el caso particular de la Figura 13  $H_0=0.5$  m. Sin embargo, al interactuar con la estructura las frecuencias relacionadas a la onda cambian su distribución hacia frecuencias más altas, esto representa una amplificación de la onda incidente y por lo tanto la energía almacenada en estas. Este tipo de análisis puede ser utilizado para observar las áreas en donde las estructuras tienen mayor influencia, y así, poder dar una opción de dónde colocar las diferentes estructuras recolectoras de energía para tener una mayor eficiencia según la eficiencia de cada recolector.

Al analizar la influencia del oleaje sobre todo el dominio se observa que existe una alta correlación entre las variaciones de la superficie libre y las velocidades en la columna de agua. Esto se debe a que la variabilidad de las corrientes es causada por las velocidades orbitales de las olas (Figuras 13 y 14).

En la Figura 13 se muestra la evolución del espectro de frecuencia del oleaje a lo largo del dominio. En esta Figura 13-a se puede observar que la banda principal de frecuencias del oleaje en realidad son series de bandas con unas frecuencias muy similares.

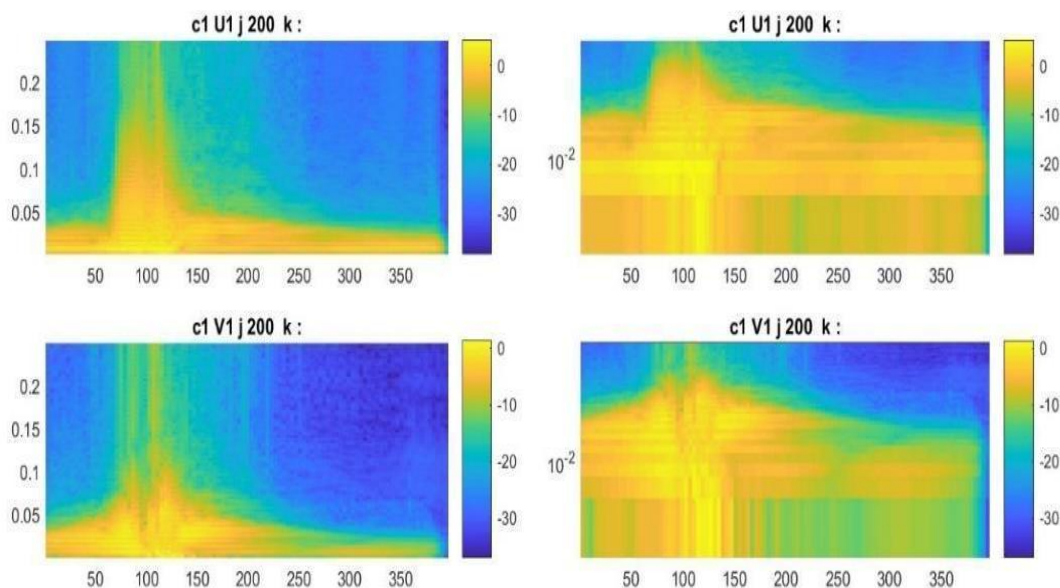


**Figura 13.- Series de espectros de frecuencia en cortes longitudinales del dominio en distintas posiciones a lo largo del eje “y”. a) Corte sobre el centro de la estructura,  $y=200$  (figura superior izquierda); b) En la parte superior de la estructura  $y=250$  (figura superior derecha); c) En el borde de la estructura  $y=300$  (figura inferior izquierda); y d) Fuera de la estructura  $y=350$  (figura inferior derecha).**

Al analizar la evolución de las frecuencias, el centro del dominio es donde se localiza la mayor amplificación al situando el área de amplificación alrededor de la posición 125 del dominio en el eje “x” y en el centro del dominio en el eje “y”, a partir de este punto central en el dominio en la posición y, el dominio se comporta como un espejo entre la parte superior e inferior del dominio para el eje Y, a partir del centro del dominio las frecuencias presenta una segunda zona de amplificación a

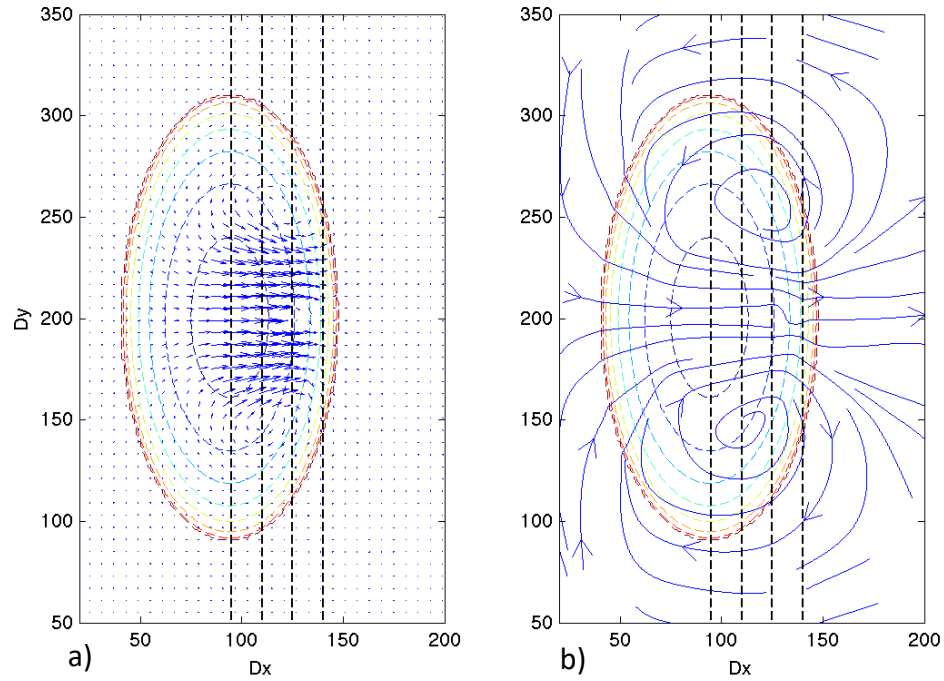
través del corte del dominio en la posición 150 y 250 del eje “y” y 100 en el eje “x”. A partir del borde de la estructura, en  $y > 300$ , la banda de frecuencias con energía se reduce y no hay mucha diferencia con el espectro incidente ( $x=40$ ).

En la figura 14 se muestran los espectros de frecuencia de la velocidad de la corriente, en escala lineal y escala logarítmica. Se observa que las bandas de frecuencia con alta energía coinciden con las bandas de frecuencia de los espectros de la superficie, esto es debido a que el oleaje es el único forzante del modelo y no hay influencias externas.

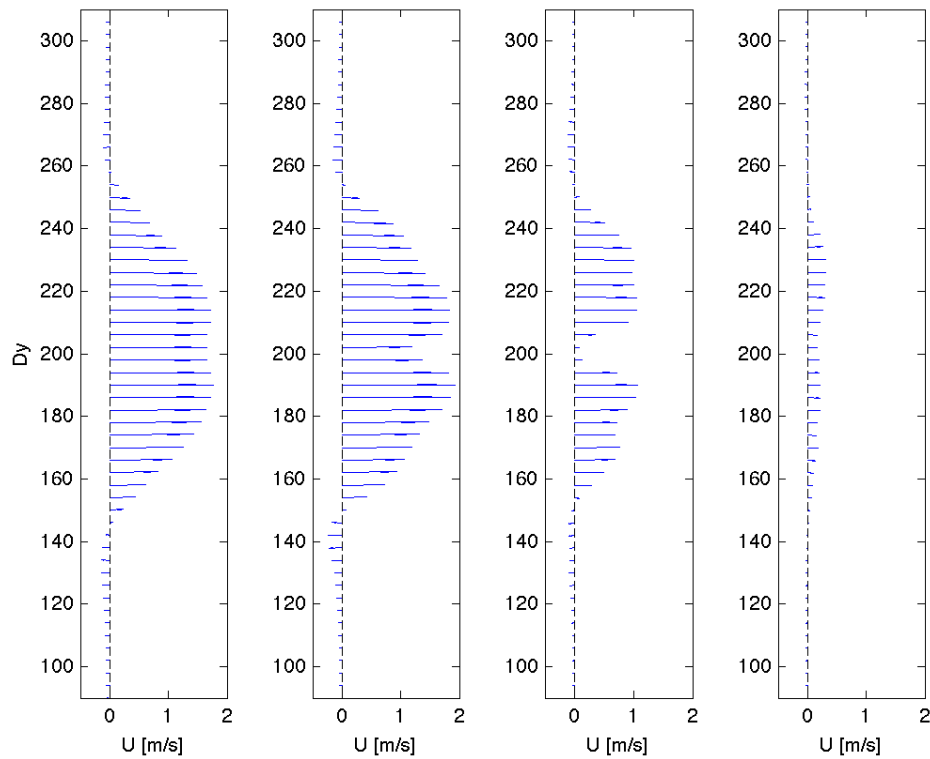


**Figura 14.- Series de espectros de frecuencia de la velocidad de la corriente en el centro de la estructura en cortes longitudinales del dominio. Paneles superiores velocidad longitudinal (u), paneles inferiores velocidad transversal (v).**

En términos generales las corrientes cerca de la estructura presentan una corriente intensa sobre la parte central de la estructura y se mueven con una forma de vórtices en la parte posterior, a ambos lados de la estructura (Figura 15). Esto es parecido a lo reportado por Córdova-López *et al.* (2017) quienes observaron que las estructuras sumergidas con una distancia moderada a la costa suelen formar vórtices y pueden causar deformaciones en la batimetría posterior a la estructura.



**Figura 15.- a) Velocidad superficial promedio (panel izquierdo) y b) líneas de corriente (panel derecho) sobre una estructura elipsoidal. Los contornos son la profundidad y las líneas segmentadas son cortes transversales que se muestran en la Figura 17.**



**Figura 16.- Velocidad superficial promedio a lo largo de las secciones transversales que se muestran en la Figura 15.**

En la Figura 16 se muestran cortes transversales de la corriente superficial en la parte central y hacia la parte posterior de la estructura. Se observa claramente la formación de una corriente en chorro en la parte central de la estructura y como este decae hacia ambos lados y termina por ocurrir una inversión de la corriente. Hacia la parte posterior de la estructura la corriente decae, en la zona central se forma una zona de calma relativa por lo que se generan dos núcleos de la corriente.

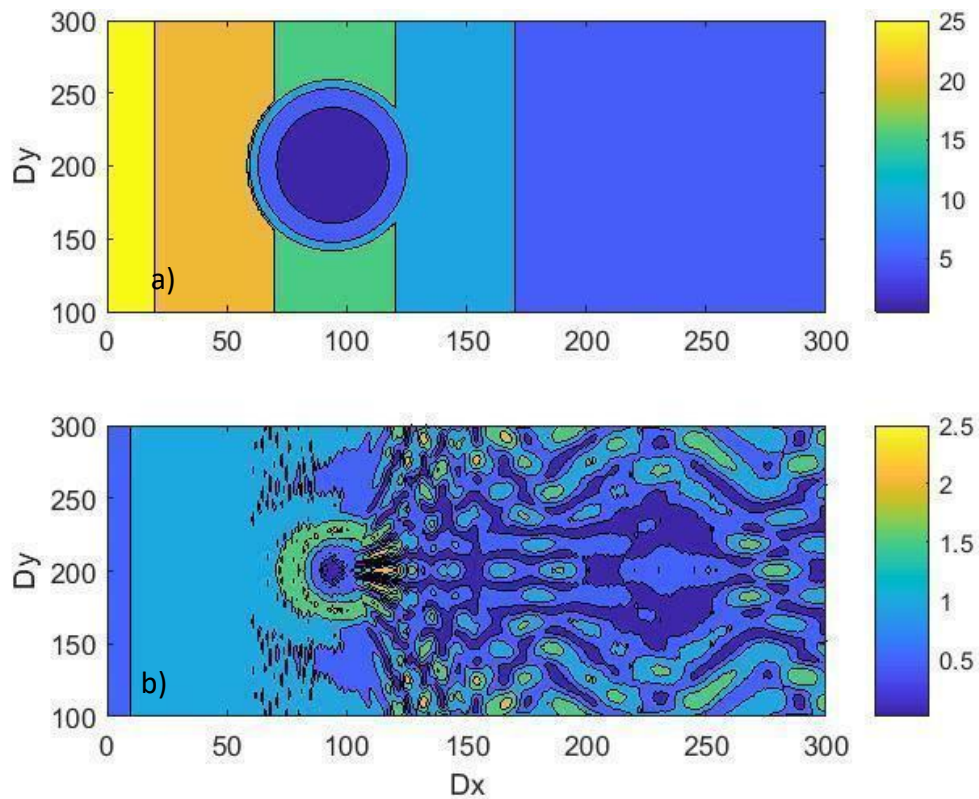
Una observación clave hecha por Córdova-López *et al.* (2017) es que la distancia de la estructura a la línea de costa determina la forma del vórtice. Para el caso de este estudio no hay una línea de costa, el dominio numérico termina con una condición de radiación y en una esponja que evitan la reflexión pero que podrían afectar la forma del vórtice. De acuerdo con las observaciones realizadas el dominio es de un tamaño adecuado para poder observar el vórtice generado por las estructuras sin embargo esto requiere de un estudio donde se varían las dimensiones del dominio y se comparan los resultados de las corrientes inducidas por las estructuras. Esto es importante puesto que son factores que se deben de considerar al colocar diferentes estructuras detrás de los lentes ya que las observaciones de Córdova-López *et al.* (2017) demuestran que dichas estructuras tienen una influencia fuerte en el fondo próximo de la estructura.

### 9.3. Caso de estudio: Puerto de El Sauzal

#### 9.3.1. Resultados con el modelo Ref Dif.

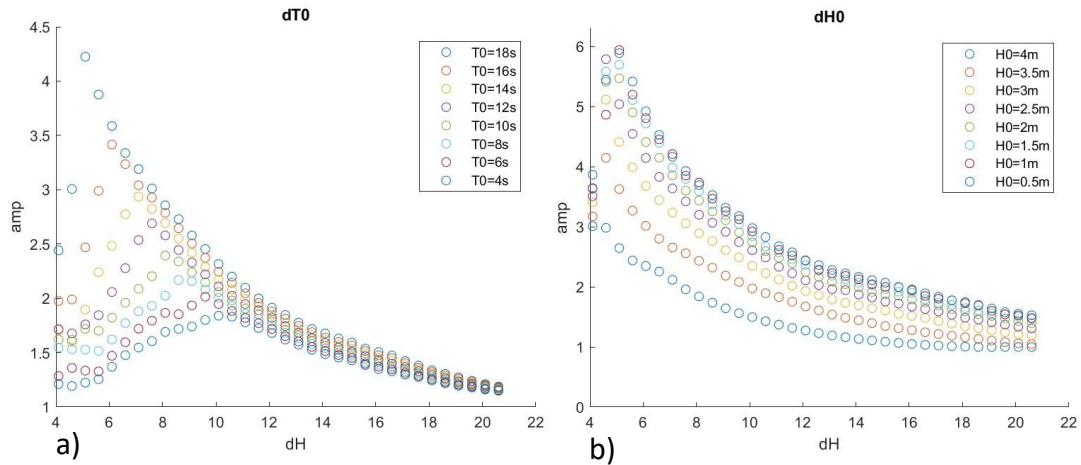
Para este caso se utilizó un fondo con pendiente  $M=1.1$ , que es similar a la batimetría en el área aledaña al puerto de El Sauzal. Los resultados de las simulaciones realizadas presentaron los rasgos característicos descritos para un fondo plano, obteniendo una zona de amplificación máxima por cada estructura con zonas de amplificación secundaria probablemente debidas a la superposición de ondas (Pelinovsky *et al.*, 2000). Por otro lado, en esta fase la amplificación causada por las estructuras fue mayor que la ocasionada con las mismas estructuras sobre un fondo plano. Esto debido a que además del efecto de la estructura existe un proceso de asomeramiento debido al cambio en el fondo circundante hasta el área de la estructura propiciando la refracción de los trenes de olas incidentes.

Sin embargo, con el fondo con pendiente se generaron pequeñas zonas de amplificación secundarias que son el resultado de la superposición de ondas y el asomeramiento (Figura 17).

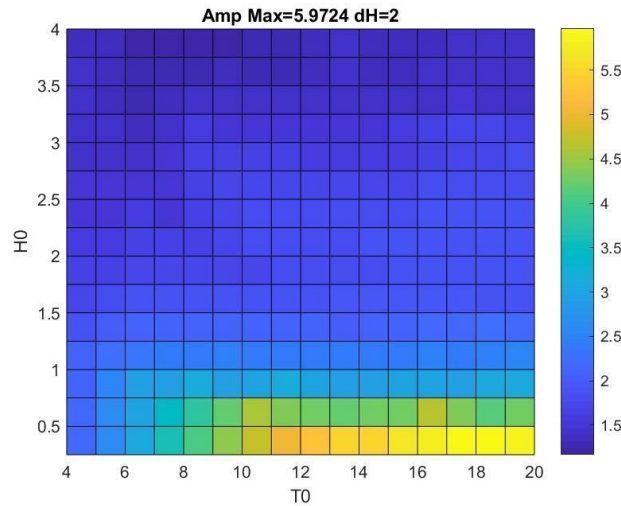


**Figura 17.- a) Amplificación causada por la estructura y b) fondo correspondiente (panel superior), para una onda incidente con  $H_0=0.5$  y  $T_0=16$ .**

La Amp causada por una estructura sobre el fondo con pendiente varía dependiendo de las características de la estructura y el oleaje incidente ( $H_0$  y  $T_0$ ). Al variar la profundidad de desplante ( $dH$ ), las estructuras alcanzan un máximo relativo en la Amp alrededor de  $dH=10m$  ( $L_z=13$ ) con  $T_0=2s$ . Al aumentar el periodo  $T_0$  los valores de Amp ocurren en valores más pequeños de  $dH$  (Figura 18-a). Al variar la altura de onda incidente  $H_0$ , los valores de Amp ocurrieron siempre en valores alrededor de  $dH=5$  (figura 18-b). Esto indica que, independientemente de la altura de la onda incidente, la amplificación máxima ocurre con estructuras que se encuentran más cerca de la superficie, con profundidades de desplante entre 4 y 5 m.



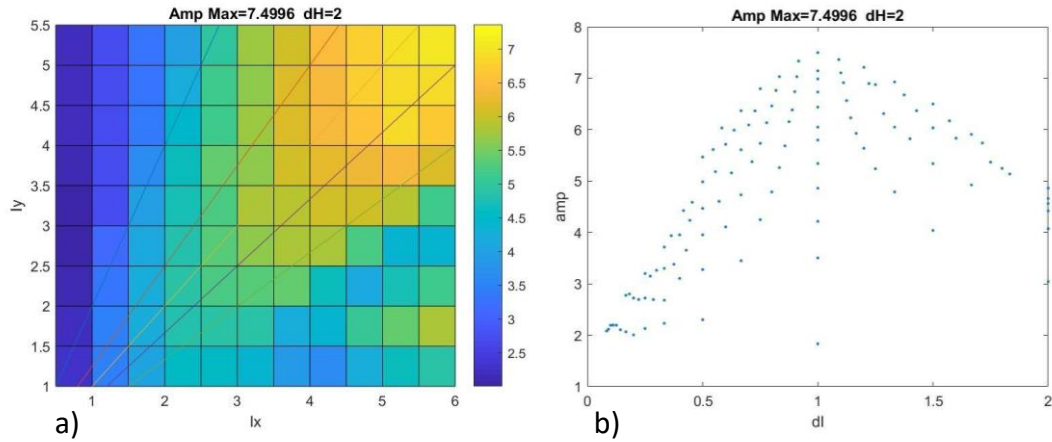
**Figura 18.- Comportamiento de Amp como función de la profundidad de desplante (dH) para: a) ondas incidentes con diferentes periodos (panel izquierdo) y b) diferentes alturas (panel derecho).**



**Figura 19.- Amplificación causada por una estructura con  $L_x=4$ ,  $L_y=4$  y  $L_z=21$ m como función del periodo  $T_0$  y la altura de la onda incidente  $H_0$ .**

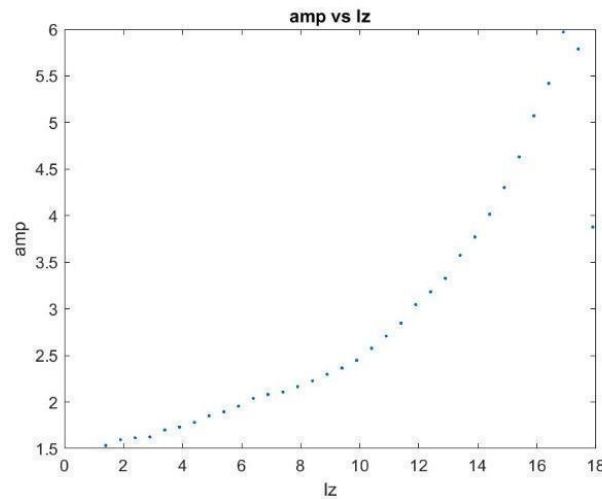
La Amp observada en estructuras con un  $L_z$  fijo presentó una relación diferente con relación a dL en comparación con las amplificaciones observadas con un fondo plano. Las mayores Amp ocurren con una razón de espectro  $dL=1+-0.1$ . Además, las amplificaciones máximas son menores a las obtenidas con los modelos con fondo plano (Figura 11). La amplificación máxima causada por una estructura en el fondo con pendiente es de 7.5 y ocurre con una estructura con  $L_z=23$  m ( $dH=2$ m) y una onda incidente con  $H_0=0.5$ m y  $T_0=18$ s (figura 20-a).

Al igual que los modelos anteriores la relación de dispersión entre Amp y dL genera una pirámide con un punto máximo bien definido (Figura 21), lo que nos indica una tendencia bien definida con respecto a la relación de estas variables.



**Figura 20.- a) Amp causada por una estructura en fondo con pendiente como función de las dimensiones horizontales y b) la razón de aspecto horizontal, dL.**

Al igual que los resultados anteriores, al mantener las dimensiones horizontales de las estructuras fijas la amplificación presenta un incremento al aumentar  $L_z$  (figura 20 a y b). El comportamiento de Amp a las variaciones de dL es muy similar al observado con fondo plano, con la diferencia que los valores máximos de Amp son mayores en presencia de un fondo con pendiente y, además ocurren con estructuras mas circulares ( $dL \sim 1$ ).

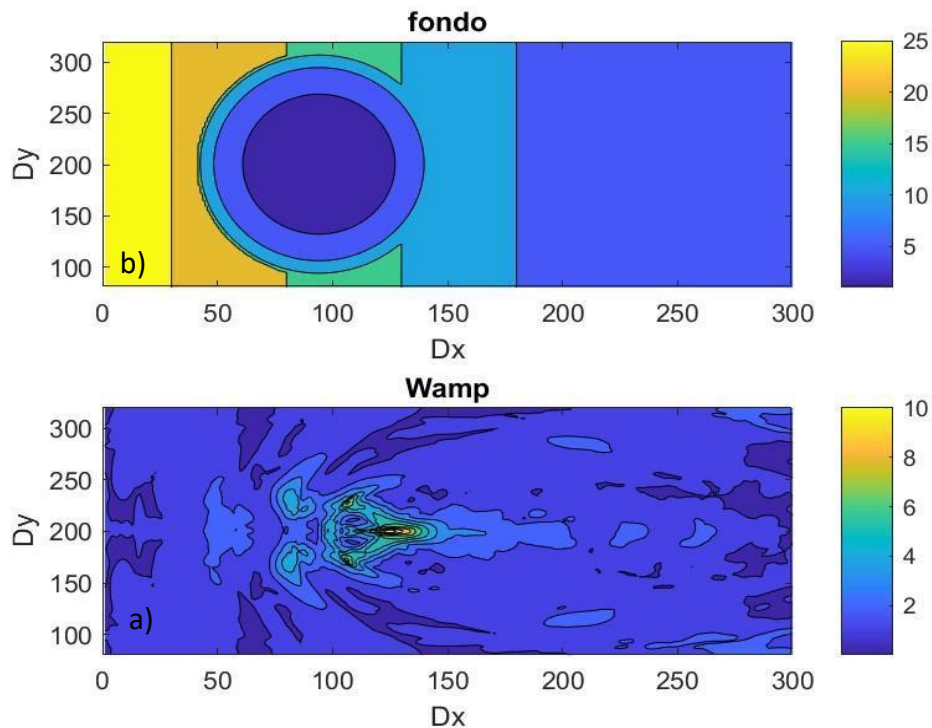


**Figura 21.-Comportamiento de la amplificación  $DL_z$ .**

### 9.3.2. Resultados con el modelo Swash.

En las simulaciones con un fondo variable se observó una amplificación máxima de 10 veces la onda incidente para las ondas con las características:  $H_0=0.5$  m,  $T_0=16$  s sobre una estructura con dimensiones  $L_z= 21$  m  $L_x=4$  y  $L_y=5.5$ , dicha estructura (figura 22-a) presenta un área de amplificación máxima y además

pequeñas zonas de amplificación encima del área de la estructura con valores de Amp del 50% de la amplificación máxima (figura 22-b).



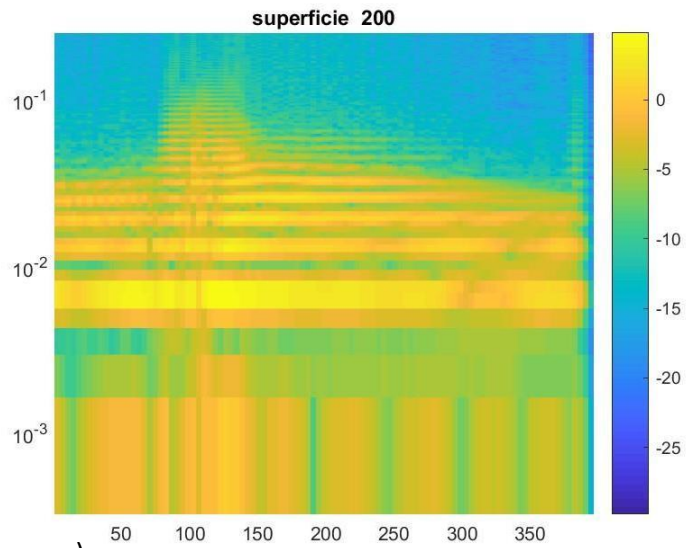
**Figura 22.- a) Amplificación de una onda incidente  $H_0=0.5$  m y  $T_0=16$  s (Panel inferior) causada por b) una estructura con dimensiones  $L_x=4$   $L_y=5.5$  (Panel superior).**

En estas simulaciones se observó que, para un tipo de onda incidente con características fijas, la amplificación máxima aumenta y el área de amplificación disminuye al incrementar la altura de la estructura  $L_z$ . Esto ocurre hasta una  $L_z$  donde  $dH=2.5$  m; para estructuras mayores, con  $dH$  más pequeños, la energía se divide en una zona de amplificación máxima con dos zonas de amplificación secundarias a ambos lados cerca del centro de la estructura. Estas zonas de amplificación secundaria aumentan la cantidad de energía que concentran al disminuir  $dH$ , es decir al acercar la cresta de la estructura a la superficie.

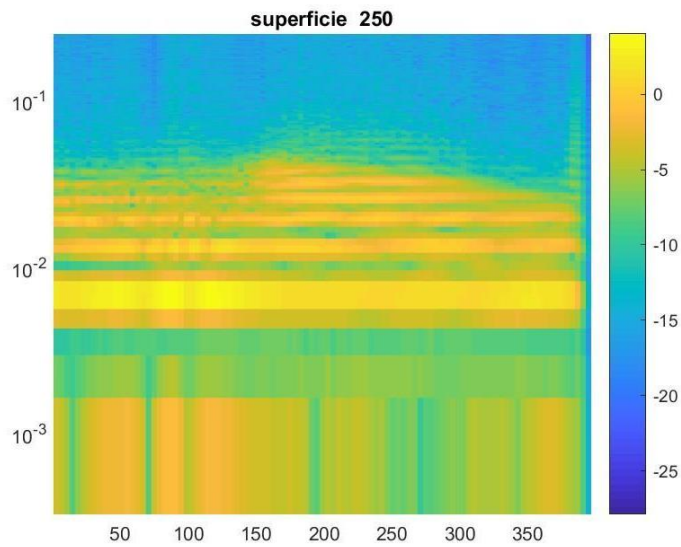
Al comparar con los resultados con fondo plano, observamos que la Amp máxima obtenida con SWASH con un fondo con pendiente fue mayor entre 0.5 y 2.5 más amplificación. Esto se debe a que la estructura se encuentra en aguas más profundas y el fondo presenta pendiente por lo que la onda incidente, al interactuar con el fondo, se comprime al sufrir asomeramiento además de la refracción causada por la estructura.

En las series de los espectros de frecuencia de la superficie libre a lo largo de cortes longitudinales en el dominio (Figura 23) se puede observar que, al igual que en el fondo plano, la estructura influye de manera considerable en la dispersión de energía a altas frecuencias. En este caso, a diferencia del fondo plano, es más

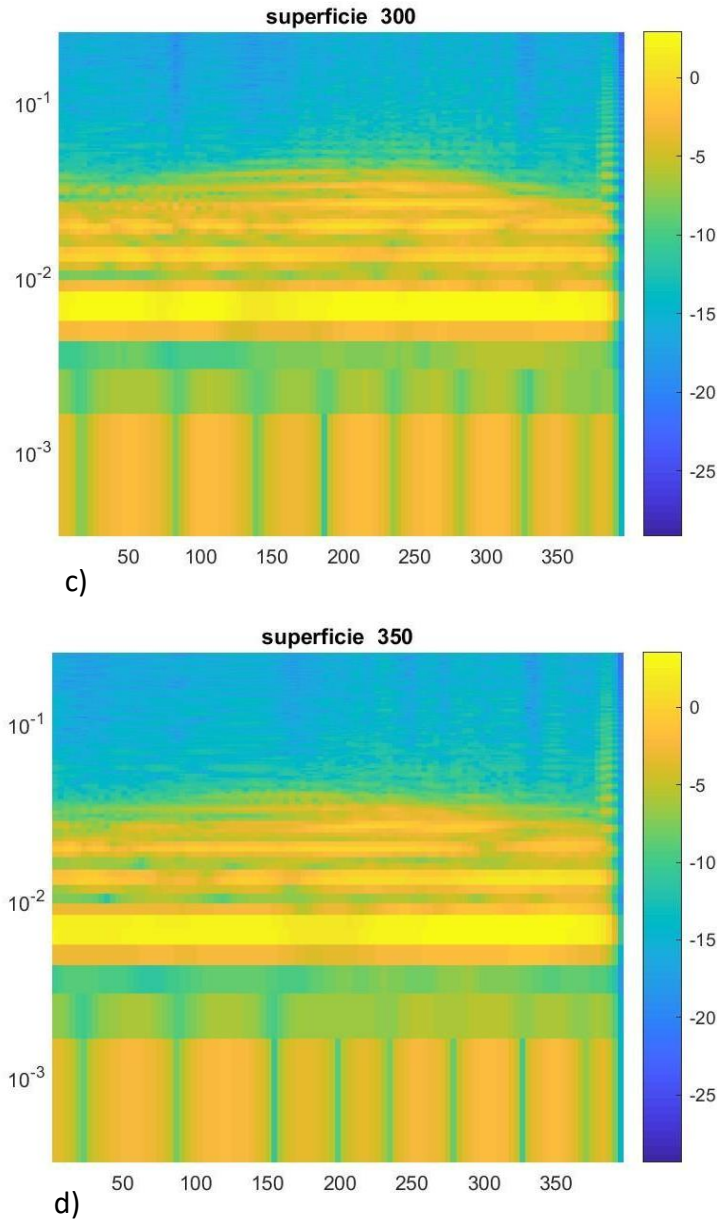
notorio que la energía del oleaje se distribuye en subarmónicos del armónico principal y que la interacción con la estructura incrementa la energía contenida en los subarmónicos. La presencia de subarmónicos es una indicación de que la onda incidente es una onda irregular. Está irregularidad se acentúa al interactuar con la estructura ya que aumenta la energía contenida en los subarmónicos así como la importancia de los mismos en comparación con el armónico principal.



a)



b)



**Figura 23.- Series de espectros de frecuencia en cortes longitudinales del dominio en distintas posiciones a lo largo del eje “y”. a) Corte sobre el centro de la estructura,  $y=200$ , b) en la parte superior de la estructura  $y=250$ , c) en el borde de la estructura  $y=300$  y d) fuera de la estructura  $y=350$ .**

## 10. Conclusiones

La amplificación del oleaje causada por las estructuras elipsoidales, depende tanto de las dimensiones horizontales de la estructura cómo de su altura y de la configuración del fondo. Asimismo, depende de las características de las olas incidentes. Por lo tanto, es crucial determinar las características de las olas que se

quieran amplificar para diseñar la estructura que magnifique la amplificación del oleaje en la zona de interés.

Cada una de las variables analizadas tiene una influencia sobre la amplificación que causa cada tipo de estructura:

La mayor amplificación se obtiene con alturas del oleaje incidente alrededor de un metro de altura. En olas con alturas mayores la amplificación es menor debido a que existe una limitante en la altura que una ola puede alcanzar debido a la profundidad y a la longitud de la onda.

El periodo de la onda incidente tiene un efecto significativo en la amplificación causada. Sin importar la altura de la ola incidente al aumentar el período ocurre una mayor amplificación.

La altura de la estructura tiene relevancia debido a que entre mayor sea la altura de la estructura mayor será la amplificación causada por esta. Esto hasta cierto punto que depende tanto de las dimensiones horizontales de la estructura como de las características de la onda incidente.

Por último, las estructuras que ocasionan una mayor amplificación tienen razones de aspecto horizontal entre 0.8 y 1.

Todos los factores anteriormente mencionados, tienen un limitante físico en la amplificación que pueden causar. Esto se debe a que un aumento desproporcionado de la altura de la onda incidente ocasiona un rompimiento de la misma, ya sea porque su pendiente es muy abrupta o por que la profundidad es poca para el tamaño de la ola. Sin embargo, en el modelo propuesto para las condiciones del Puerto de El Sauzal se observó una amplificación máxima de 10 veces la altura de la ola incidente con estructuras con dimensiones de cinco veces la longitud de la onda. Esto es posible debido a que la estructura es tridimensional y a pesar de que su punto de mayor altura este cerca de la superficie el punto focal ocurre en una zona más profunda.

La implementación de lentes en la obtención de energía del oleaje aún no se ha desarrollado a un nivel comercial, debido a que la tecnología de extracción de la energía del oleaje no está en el mismo nivel y a que, por sus dimensiones, se requiere de una gran inversión para su implementación. Sin embargo, los lentes pueden trabajar en sincronía con accidentes batimétricos que causen refracción del oleaje como pueden ser los bajos en el fondo marinos. Esto permitiría concentrar la energía modificando la estructura natural en combinación con los lentes, logrando así obtener una mayor cantidad de energía con menos recursos.

## 11. Bibliografía

● *Administración Portuaria Integral De Ensenada, S.A. De C.V. (Api) 2010 "Proyecto De Desarrollo Del Puerto De El Sauzal, Baja California", Lorax construcciones.*

● *Álvarez-Borrego J. y Meillon-Menchaca O. 1997 "Análisis del comportamiento espacial del oleaje en la Bahía de Todos Santos, Baja California, mediante imágenes de superficies marinas". Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California Ensenada, México vol. 23, núm. 1, 1997, pp. 23-41*

● *Akpınara, A. Bingölbalı, G.Ph. Van Vledderb y Long-term. 2016." Analysis Of Wave Power Potential In The Black Sea,Based On 31-Year SWAN Simulations". Uludağ University, Department of Civil Engineering, Gorukle Campus, Bursa, Turkey, Elsevier.*

● *Bittencourt Ferreira C., Boehme T., Davey T., Flinn J., Grant A., Huertas-Olivares C., Johnstone C., Ricci P., Neumann F., Villate J. L., Retzler,Hans C. , Scuotto M., Smith G. H., Smit H., Sorensen C,. Stallard T. y Zubiarte L., 2009. "Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in terms of Performance, Cost and Environmental Impact". Commission of the European communities.*

● *Brooke, J., 2003, "Wave Energy Conversion". 1ra Ed. Oxford. Elsevier, 187p.*

● *Cheung, K. F., J. W. Lee. 1996. Performance of submerged wave focusing structures in a current., International Journal of Offshore and Polar Engineering, 6(1).*

● *Delft University of Technology (DUT). 2019. "Swash user manual manual". Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Environmental Fluid Mechanics Section. The Netherlands. 2010-2019 Recolectado: <http://www.tudelft.nl/swash>*

● *Elandt R. B., M, Shakeri y M. Alam. Surface gravity-wave lensing, Physical Review E 89 (2014) 023012.*

● *García-Nava H. y R. Silvestre-Morales R. 2013. "Evaluación técnica del uso de estructuras sumergidas para enfocar el oleaje e incrementar su potencial energético". Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, Baja California.*

● *García-Nava H. y R. Silvestre-Morales R. 2017. Wave focusing with submerged structures. Proceedings of the 12th European Wave and Tidal Energy Conference, 1180-1:4. Cork, Irlanda.*

● *Griths, L. S. y R. Porter. 2012. Focusing of surface waves by variable bathymetry, Applied Ocean Research 34(2):150-163.*

● *Guanche R, Simal PD, Vidal C y Losada IJ. 2014 "Uncertainty analysis of wave energy farms financial indicators. Renew Energy 2014;68:570–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.046>.*

- Hernández-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro F. y Zapata-Sierra, A., 2010. "The wind power of Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*", 14 (9), pp. 2830-2840, DOI:10.1016/j.rser.2010.07.019
- Hernández-Escobedo, Q., Saldaña-Flores, R., Rodríguez-García, E.R. y Manzano-Agugliaro, F., 2014. "Wind energy resource in Northern Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*", 32, pp. 890- 914, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.043
- Iver, P. y Porter, R. 2016. "The motion of a freely floating cylinder in the presence of a wall and the approximation of resonances". *Fluid Mech.* 2016, 795, 581–610.
- Kirby J. T., y Dalrymple R. A., 1993. "ref/dif 1 version 2.5 documentation and user's manual". Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering. University of Delaware. Newark.
- Kirby J. T., y Dalrymple R. A., 1983 "A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography"., *Journal of Fluid Mechanics* 136 (1983) 543-566.
- Liu, P. L. F. y T. K. Tsay. 1984. "the damping of gravity water waves due to percolation" *Coastal Engineering*.
- Loukogeorgaki, E., Boufidi, I. y Chatjigeorgiou, I., 2020. "Performance of an array of oblate spheroidal heaving wave energy converters in front of a wall". *Water* 2020, 12, 188.
- Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A., Montoya, F.G., Zapata-Sierra, A. y Gil, C., 2013. "Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*", 18, pp. 134-143, DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.020
- Mavrakos, S. A., Katsaounis, G.M., Nielsen, K. y Lemonis, G., 2004 . "Numerical performance investigation of an array of heaving wave power converters in front of a vertical breakwater". *International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2004)*, Toulon, France, 23–28 May 2004.
- McCormick, M. E. 2007. *Ocean Wave Energy Conversion*, Dover Publications, Mineola, NY
- Reguero B.G., I.J. Losada y F.J. Méndez. 2015." A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term variability". *Environmental Hydraulics Institute, IH Cantabria, Universidad de Cantabria, Spain. Elsevier.* 148 (2015) 366–380
- Schay J., Bhattacharjee, J. y Soares C.G. 2013. "Numerical modelling of a heaving point absorber in front of a vertical wall". In *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, O shore and Arctic Engineering*, 9–14 June 2013; Volume 8. Paper No. OMAE2013-11491.

- Secretaría de Energía. 2019. "Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018". Primera Edición. México. Recuperado en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/224/PRONASEpendt.pdf>
- Silva D., Martinho P. y Guedes-Soares C. 2018 "Wave energy distribution along the Portuguese continental coast based on a thirty-three years hindcast". *Renewable Energy* 127 1064-1075.
- Ulloa, T.M.J. 1989. *Refracción lineal del oleaje en el puerto de Ensenada, B.C. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C., México.*
- Weng, W. K., J. G. Lin y C. S. Hsiao. 2013. *An experimental study of regular long-crested waves over a crescent type shoal, Journal of Marine Science and Technology* 21(2):222-228.
- Campo C., J.A., Díaz U., S., Ávila R., H. y Rivillas-Ospina, G.D. (2018). Estimación del potencial de disipación de energía del oleaje de estructuras sumergidas y flotantes. *Tecnura*, 22(58), 13-24. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.13387>
- García-Nava, B. Esquivel-Trava, R. Hernández-Walls, F. Ocampo-Torres, L. Quinn-Cervantes. 2018. "Focusing of wave energy by ellipsoidal and biconvex submerged structures". Instituto de investigaciones oceanográficas, UABC.
- Rodríguez-Rodríguez, G. 1995. Métodos De Análisis Espectral Del Oleaje Estudio Comparativo. Departamento de Física Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Lizano, O. G. 2016. "Fundamentos De Oceanografía". Escuela De Física. Universidad de Costa Rica.
- Córdova-López L. F., Hernández-Valdés K. y Benítez-Cristiá H. 2017. "Modelación matemática de procesos morfológicos en playas con rompeolas sumergidos". *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, Vol. Xxxviii, No. 1, Ene-Abr 2017, p. 59-71
- Peng, H., Ashim A. y Qiu, W. 2015," Hydrodynamic Interaction of Two Bodies in Waves". 30th International Workshop On Water Waves And Floating Bodies. 12-15th April, 2015, Bristol And Bath, Uk.
- Bobinski, T., A. Eddi, A. Maurel, V. Pagneux y P. Petitjeans. 2015. "Experimental demonstration of Epsilon-Near-Zero water waves focusing". *Applied Physics Letters* 107, 014101
- Pelinovsky E., Talipova T. y Kharif C., 2000."Nonlinear-dispersive mechanism of the freak wave formation in shallow water". Elsevier Science B.V, *Physica D* 147 (2000) 83–94.
- Kjeldsen S.P., 1990, "Breaking waves, in: O. Torum, O.T. Gudmestad (Eds.)", *Water Wave Kinematics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990, pp. 453–473.

- Campo C., J.A. (2018) *realizó* experimentos similares en un estanque más pequeño, sin embargo, el efecto de la relación dl aumento en H al aumentar Lz resaltando esta relación.