

## **ESTUDIO HIDRODINÁMICO EN LA COSTA DEBIDO A LA INTERACCIÓN DEL OLEAJE CON ESTRUCTURAS COSTERAS**

*Mario Guzmán G.<sup>1</sup>, Mauricio Villagrán V.<sup>2</sup>, Rafael Aránguiz M.<sup>3</sup>*

### **RESUMEN**

Debido a la gran extensión de costa y modelo económico de Chile, ha sido importante su crecimiento en obras costeras. Es por ello que para este proyecto se realizó un análisis hidrodinámico de tres playas con pendiente distinta, las cuales se encuentran interactuando con diferentes tipos de estructuras. Los tipos de estructuras que se usaron para los modelos fueron del tipo espigón y muelle abierto. Para este último se utilizaron diferentes casos dependiendo de la separación entre sus cepas (d). Además, se incluyeron otras variables al análisis como lo son la dirección del oleaje, su altura y su periodo. Esto con el fin de comprar las variables que afectan de mayor o menor forma en la hidrodinámica de las playas, ya que es importante su estudio porque esto en cierta medida puede alterar la evolución de las costas. Para la comparación de los datos se utilizaron dos criterios, las cuales fueron el cambio de energía de las playas antes y después de la construcción de las estructuras y el área que afecta la construcción de las mismas. Para la propagación de oleaje se utilizó el software Delft3D con su paquete de herramientas WAVE.

### **ABSTRACT**

Due to the great coast extension and economic model of Chile, has been important its growth in costal buildings. Therefore, for this project has been made an analysis hydrodynamics for three beaches with different slope, which they're interacting with different type of structures. The types of structures that were used for model be: groing and pier. For the pier were used different cases according to pile separation (d). Further, other variables were included for the analysis, as they're wave direction, height and period. This in order to compare the variables that more or less affect the hydrodynamic of the beaches, since its study is important because this to some extent can alter the evolution of the coasts. For the comparison data two criteria were used, which were the change of energy in the beaches before and after the construction of the structure and the affected area. For the propagation of waves it was used the software Delft3D with its toll WAVE.

**KEYWORDS:** Wave propagation, Hydrodynamics, Pile.

---

<sup>1</sup> *Opta al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, mguzman@ing.ucsc.cl.*

<sup>2</sup> *Profesor Guía, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, mvillagran@ucsc.cl.*

<sup>3</sup> *Profesor Informante, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, raranguiz@ucsc.cl.*



## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a las condiciones geográficas de Chile, éste posee una gran zona costera, además la creciente necesidad del fortalecimiento comercial con el resto del mundo, es que se genera la necesidad de la construcción y mantención de obras y defensas costeras. Estos elementos pueden llegar a alterar fuertemente la dinámica litoral, dependiendo del tipo de estructura y su conformación, ya que generan variaciones en la hidrodinámica natural del sector, puesto que alteran el oleaje incidente sobre ellas. Esto puede ocasionar cambios en la altura y dirección del oleaje, en la energía de transporte de sedimento, entre otras variables, lo cual en ocasiones puede provocar cambios importantes en la morfología de la costa, posterior a la construcción de este tipo de obras. Las estructuras bloquean la energía del oleaje de llegar a la playa, produciendo difracción en los bordes de estas. Esto reduce el impacto de las olas mediante disipación por rotura y/o rotación (decrecimiento por el realineamiento de olas de corrientes litorales) (Díaz, 2015).

Para este proyecto en particular se analizarán estructuras del tipo “muelles abiertos” y “espigones”, lo cual permitirá generar un contraste entre ambos tipos de obras. Además de ello se considerarán variables ambientales (tal como el clima de oleaje), estructurales (como la separación de cepas) y de terreno (batimetría). Lo anterior con el fin de poder estudiar y analizar los fenómenos hidrodinámicos asociados a la presencia de este tipo de infraestructura, y no solo desde un punto de vista estructural como tradicionalmente se ha llevado a cabo. Con ello se pretende estudiar como afecta la configuración de las cepas, y así poder minimizar la zona de influencia y el impacto energético cercanas a este tipo de obras.

Dicho proyecto se ejecutó mediante la modelación numérica en el Software Delft3D, específicamente con la herramienta WAVE, la cual tiene por objetivo principal ayudar con la propagación de oleaje desde aguas profundas a zonas bajas.

## 2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proyecto se analizaron playas bases con los cuales se trabajaron a lo largo del estudio. Estos casos se diferencian básicamente en el grado de inclinación de la playa, la cuales están dadas de la siguiente manera: la primera playa consta de una pendiente de 1%, la segunda de 5% y la tercera de 3%, como se muestra en la Figura 1. La superficie que se abarca es igual para las tres playas la cual consta de aproximadamente 180km<sup>2</sup>, con un largo de playa de 15km, mientras que su ancho comprende aproximadamente 12km. La orientación utilizada para las playas es de Norte-Sur, y las estructuras utilizadas en el estudio son perpendiculares a estas.

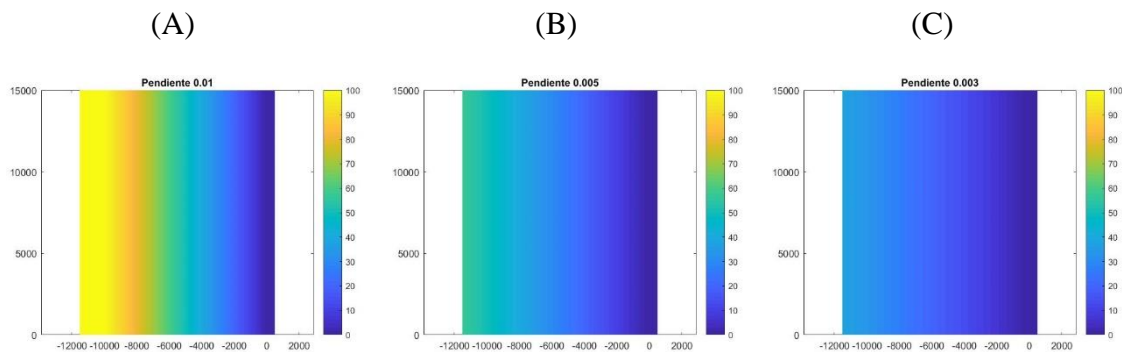


FIGURA 1. REPRESENTACIÓN DE LAS PENDIENTES UTILIZADAS: (A) PENDIENTE 1%; (B) PENDIENTE 5%; (C) PENDIENTE 3%.

Para creación de estas superficies se utilizó el software MATLAB, para generar una superficie discreta y posteriormente con el paquete de herramientas QUICKIN del software Delft3D se genera una superficie continua.

### 2.1. MODELACIÓN NUMÉRICA

La simulación de la propagación de oleaje se realiza a través del modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), presente en el software Delft3D. El modelo SWAN se basa en la ecuación de equilibrio de acción espectral discreta y es completamente espectral (Ec.1). Permite la interacción entre las olas con las corrientes y con el fondo (refracción), también representa los procesos de generación de olas por la acción del viento, la disipación debido al whitecapping, fricción con el fondo y a la rotura de la ola inducida por la profundidad, la interacción ola-ola no lineal, propagación del oleaje a través de bloqueos, reflexión en los mismos y la difracción (e.g., Hasselmann et al (1973)).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{EC.1})$$

Donde:

$\frac{\partial}{\partial t} N$  : Variación local en el tiempo de la densidad de la acción.

$\frac{\partial}{\partial x} c_x N$  ;  $\frac{\partial}{\partial y} c_y N$  : Variación en las coordenadas geográficas.

$\frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N$  : Variación debido al desplazamiento de frecuencia por profundidad y corrientes.

$\frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N$  : Variación debido a la refracción (por profundidad o por corriente).

$\frac{S}{\sigma}$  : Contribución dada por la generación de oleaje, la disipación del mismo y la interacción ola-ola.

- Disipación

La disipación de energía está constituida por la sumatoria de tres diferentes componentes: whitecapping, fricción con el fondo y la rotura inducida por el fondo.

Whithecapping está controlado principalmente por la inclinación de las olas. Whitecapping se basa en la formulación de Hasselman 1974.

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (\text{EC } 2)$$

Donde  $\Gamma$  es un coeficiente que depende de la pendiente,  $k$  es el número de olas,  $\tilde{\sigma}$  y  $\tilde{k}$  indican la frecuencia media y el número de olas medias respectivamente.

La disipación inducida por el fondo es causada principalmente por la fricción con el fondo (e.g., Bertotti y Cavaleri (1994)), que generalmente se puede representar como:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (\text{EC } 3)$$

Donde  $C_{bottom}$  es el coeficiente de fricción con el fondo.

La expresión que utiliza SWAN para representar la rotura de la ola inducida por el fondo es:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (\text{EC } 4)$$

Donde  $E_{tot}$  y  $D_{tot}$  es la tasa total de disipación de energía debido a la ruptura.

- Propagación a través de una estructura

El modelo SWAN puede estimar la transmisión de olas a través de una estructura. Dicho obstáculo afectará de dos maneras el campo de la ola, la primera reducirá la altura de la ola local a lo largo de toda su longitud, y en segundo lugar causará difracción alrededor de la estructura. La expresión utilizada por SWAN está tomada de Goda et al. (1967), la cual es:

$$K_t = 0.5 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{F}{H_i} + \beta \right) \right) \right] \quad (\text{EC 5})$$

$$\text{Para } -\beta - \alpha < \frac{F}{H_i} < \alpha - \beta$$

Donde  $F$  es la superficie libre de la estructura,  $H_i$  es la altura significativa de la ola incidente,  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes que depende de la forma de la estructura (Seeling, 1979).

**TABLA 1.** VALORES DE LOS COEFICIENTES ALPHA Y BETA.

| <b>Case</b>          | $\alpha$ | $\beta$ |
|----------------------|----------|---------|
| Vertical thin wall   | 1.8      | 0.1     |
| Caisson              | 2.2      | 0.4     |
| Dam with slope 1:3/2 | 2.6      | 0.15    |

## 2.2. VARIABLES DE ENTRADA

Para la modelación del proyecto se requirió la utilización del paquete de herramienta WAVE del software Delft3D, para la propagación de oleaje. Para ellos se requieren una serie de parámetros de entrada, los cuales se irán presentando a continuación.

- Grilla

Las áreas modeladas constan de 3 grillas de detalle, por las cuales posteriormente se propagará el oleaje desde aguas profundas hacia zonas más bajas. Estas grillas varían tanto en su tamaño como en la dimensión de sus celdas, estas se definen de la siguiente forma: La primera grilla es la más grande y abarca la totalidad de la superficie de las áreas de estudio (180km<sup>2</sup>) y el tamaño de sus celdas es de 200x200m; la segunda grilla es de un tamaño intermedio de 67.3km<sup>2</sup> y el tamaño de sus celdas es de 66.7x66.7m (esto porque se dividió las celdas de la primera grilla en tres partes, para ambas direcciones); y finalmente la grilla más pequeña y de mayor detalle posee una superficie de aproximadamente de 6.2km<sup>2</sup> y sus celdas son de 7.4x7.4m (esta vez las celdas de la grilla más grande se dividió en 27 partes, para ambas direcciones). Ver Figura 2. Estas grillas se anidaron de las más pequeñas a las

más grandes, esto con el fin de optimizar los tiempos de modelación, ya que el cálculo de la grilla grande se ejecuta primero y los cálculos de las grillas más finas usan estos resultados como condiciones de borde.

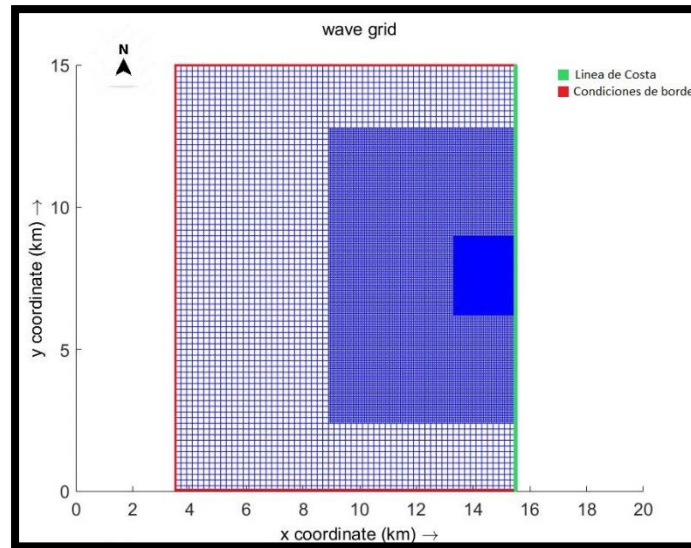


FIGURA 2. TAMAÑO Y UBICACIÓN DE LAS GRILLAS.

- Condiciones de Borde

En este apartado se definen las condiciones de la ola incidente en la primera cuadrícula de la grilla, para luego ser propagada a través de la grilla como se ve en la Figura 2.

Se establecieron tres bordes, para las direcciones Norte, Sur y Oeste, haciendo referencia a que el oleaje viene de esas tres direcciones. Para este proyecto se propuso estudiar el comportamiento de la zona de sotamar de la estructura, para diferentes condiciones de clima de oleaje, por lo cual se establecieron distintos valores para la altura ( $H_s$ ), periodo ( $T_p$ ) y direcciones del oleaje ( $\theta$ ). Se estableció un caso base (donde:  $H_s=1\text{m}$ ;  $T_p=9\text{s}$ ;  $\theta=225^\circ$ ), al que posteriormente se le fueron modificando cada una de las variables por separado. Los casos modelados fueron nueve, los que se presentan en la Tabla 2. Esto se replicó para todas las estructuras ( $d=0\text{m}$ ,  $d=10\text{m}$ ,  $d=15\text{m}$ ,  $d=20\text{m}$ ,  $d=30\text{m}$ ) y las pendientes ya mencionadas (1%, 5%, 3%) lo cual da como resultado 135 modelaciones con estructura, además de las modelaciones sin estructuras para obtener la energía base (sin perturbación).

**TABLA 2.** CASOS APLICADOS EN LA MODELACIÓN.

| Modelos            | Casos | Hs (m) | Tp (s) | $\theta$ (°) |
|--------------------|-------|--------|--------|--------------|
| Base               | 1     | 1      | 9      | 225          |
| Cambio en $\theta$ | 2     | 1      | 9      | 180          |
|                    | 3     | 1      | 9      | 202,5        |
|                    | 4     | 1      | 9      | 247,5        |
|                    | 5     | 1      | 9      | 270          |
| Cambio en Tp       | 6     | 1      | 8      | 225          |
|                    | 7     | 1      | 10     | 225          |
| Cambio en Hs       | 8     | 3      | 9      | 225          |
|                    | 9     | 5      | 9      | 225          |

### 2.3. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

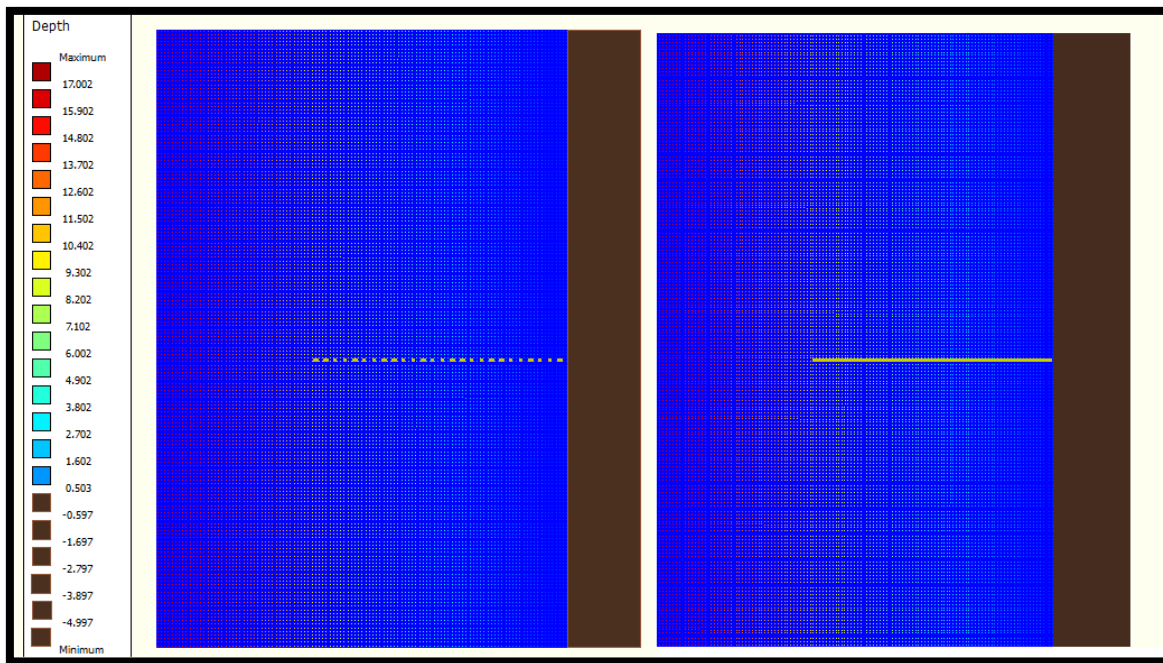
Para el desarrollo de la modelación se consideraron dos tipos de estructuras base para su comparación, estas son: del tipo espigón y muelle abierto. Dichas obras se presentan de manera perpendicular a la línea costa, tal como se muestra en la Figura 3. Las estructuras antes mencionadas presentan una longitud de 1km y se ubican en la línea de costa en medio de la superficie de estudio.

Para obtener un mayor número de casos para la comparación, se propuso crear cuatro configuraciones distintas para el caso del muelle. Es por ello que se consideraron 4 casos distintos para su comparación, estas configuraciones están dadas por la distancia (d) que existe entre las cepas de estos. Estas separaciones son de 7.4, 14.8, 22.2 y 29.6 m respectivamente. Esto se debe a que la grilla es de 7.4x7.4m y con ello las cepas de los muelles siempre quedarán en la misma posición en las celdas de la grilla. Para estas estructuras se definió un largo estándar de 1km y las cepas se definieron de un ancho de dos metros de diámetro para todos los muelles.

Para la selección del tipo de obstáculo, en Delft3D, se optó por el tipo “Dam”, ya que esta opción indica que el coeficiente de transmisión depende de las condiciones de las olas que inciden en el obstáculo, además de la altura que este posea (podría estar sumergida) y no es constante como lo es en el caso del obstáculo tipo “Sheet”.

En la selección del tipo de reflexión se optó por elegir difusa, debido a que no necesariamente la ola se reflejará con el mismo ángulo con el que incide al obstáculo, además se asignó a los coeficientes Alpha y Beta valores de 2.2 y 0.4 respectivamente, ya que son los valores

recomendados por el manual de usuario de la herramienta WAVE, tal como se observa en la Tabla 1. Estos valores son constantes que dependen del tipo estructura (Ec.5).



**FIGURA 3.** REPRESENTACIÓN Y UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN LA GRILLA MAS PEQUEÑA.

## 2.4. PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez ejecutados todos los modelos, se logró obtener una gran cantidad de datos. Estos resultados fueron necesarios procesarlos, y así agruparlos por variables en común.

Para la comparación de los datos, tanto para la energía como las zonas afectadas, fue necesario crear ciertos criterios, como los son, por ejemplo, que el estudio solo se centrará del lado de sotamar de la estructura.

Otro ejemplo se da al comparar, a nivel energético, un modelo con y sin estructura, el cual consiste en que cuando la diferencia entre las celdas de los modelos con y sin estructura son menor a un 5% del valor de la celda del modelo sin estructura, éste se considera sin efecto adverso. Esto consideraría que no existiría un cambio energético y por lo tanto se delimita de mejor manera la zona de influencia por dichas estructuras.

Para el cálculo de la variación energética se creó una nueva matriz, en la cual cada elemento de dicha matriz representa la diferencia entre el valor energético del modelo con estructura y el modelo sin estructura, esto considerando los criterios ya mencionados (Ver Figura 4).

Luego, para comparar la diferencia energética entre los modelos con estructura, estos se separaron dependiendo de las variables del oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ ) y también de las pendientes.

Posteriormente, se identificó la estructura que afectaba de mayor forma a cada modelo (de la Tabla 2) y luego se consideraba como objeto de comparación para el resto de los casos. Para esto se debió sumar el contenido energético de todas las celdas dentro de la zona afectada (para todos los casos) y así obtener la estructura base de comparación, es decir, que el resto de los casos serán una proporción de este, como se muestran en la Ec.6. Este proceso se debió repetir de igual forma para todas las pendientes.

$$\Delta E = \frac{E_s - E_{ic}}{\Delta E_{max}} \times 100 \quad (\text{Ec } 6)$$

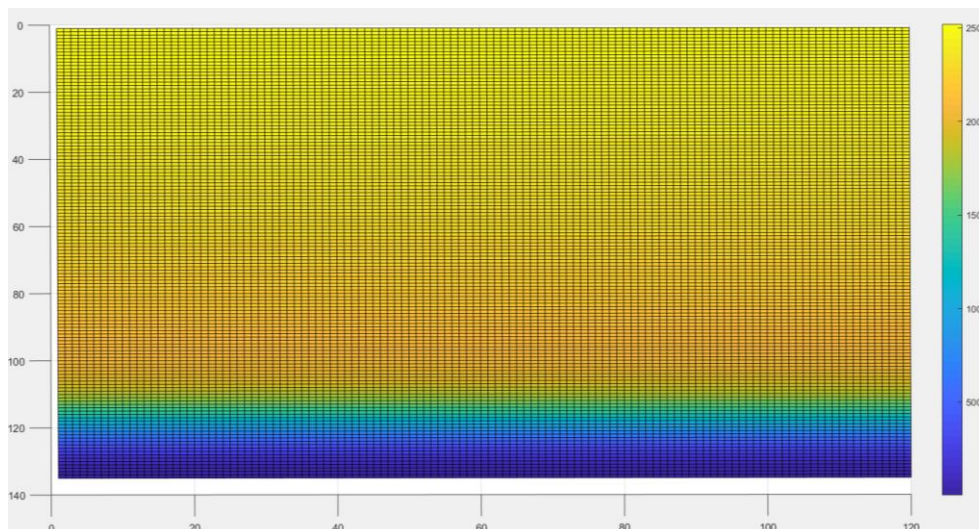
Donde,  $E_s$  es la energía disponible en el caso sin estructura,  $E_{ic}$  es la energía disponible para el caso con estructura (para todas las estructuras) y  $\Delta E_{max}$  es la variación máxima de energía.

Ahora, para el cálculo de la zona afectada se utilizó la misma matriz, pero esta vez se sumaron las casillas no nulas y posteriormente se multiplicaron por el tamaño de la celda, así se obtuvo una zona de influencia de las estructuras. De igual manera los modelos se separaron dependiendo del oleaje y la pendiente, para luego obtener la variable más influyente (en cuanto a área afectada) y ser el objeto de comparación (Ec.7).

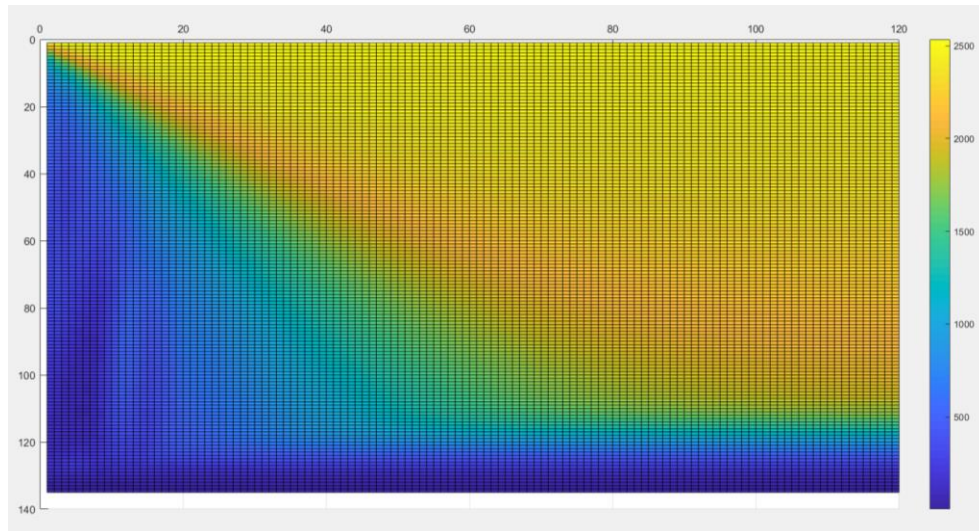
$$\Delta A = \frac{A_T - A_{ic}}{\Delta A_{max}} \times 100 \quad (\text{Ec } 7)$$

Donde,  $A_T$  es el área total sin afectar,  $A_{ic}$  es el área afectada por la estructura (para todas las estructuras) y  $\Delta A_{max}$  es el área más afectada.

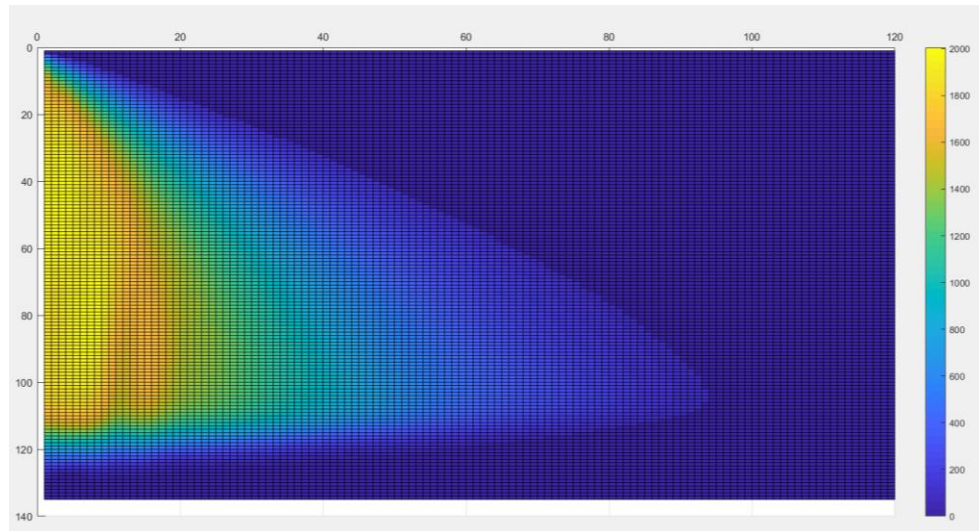
(a)



(b)



(c)



**FIGURA 4.** (A) ENERGIA DISPONIBLE, SIN ESTRUCTURA, (B) ENERGIA DISPONIBLE, CON ESTRUCTURA, (C) DIFERENCIA DE ENERGIA ENTRE (A) Y (B) (ZONA AFECTADA).

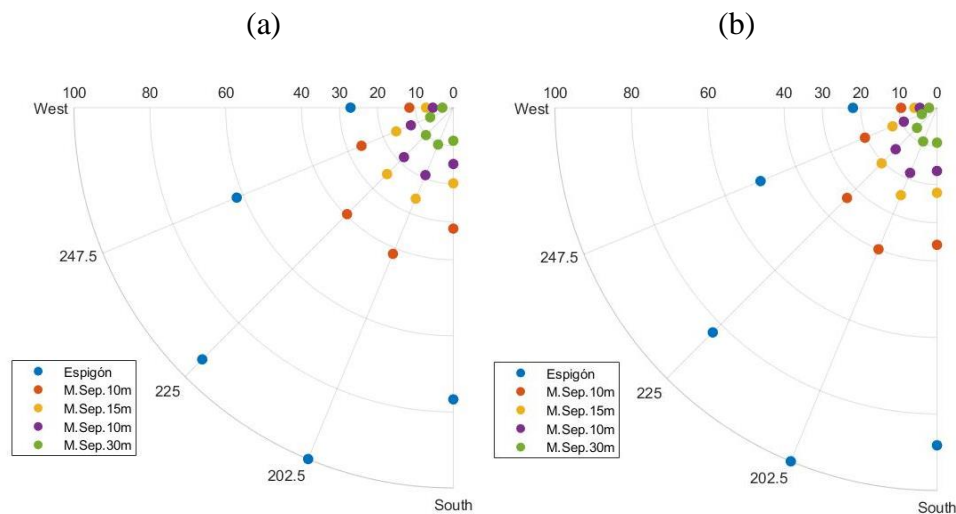
### 3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las comparaciones de los comportamientos tanto de contenido energético como las áreas de influencia, según diferentes variables de análisis.

#### 3.1. RESULTADOS ENERGÉTICO

En la Figura 5 se muestran 3 gráficos, los que representan las 3 pendientes estudiadas. Estos gráficos muestran el cambio porcentual del contenido energético, para cada dirección de oleaje y estructuras, las cuales se representan con un color diferente. El valor máximo representa el elemento que posee una mayor diferencia entre el caso con y sin estructura.

Se aprecia una clara preponderancia de la estructura tipo espigón, ya que para los tres casos de pendientes es el factor que más afecta la energía. También se puede apreciar que la dirección con mayor influencia es la proveniente de los  $202^\circ$  (SSW). A medida que va disminuyendo la pendiente la dirección  $225^\circ$  (SW) comienza a perder relevancia y la dirección sur ( $180^\circ$ -S) empieza a cobrar importancia. Además, se observa que para el resto de estructuras se sigue un patrón muy similar.



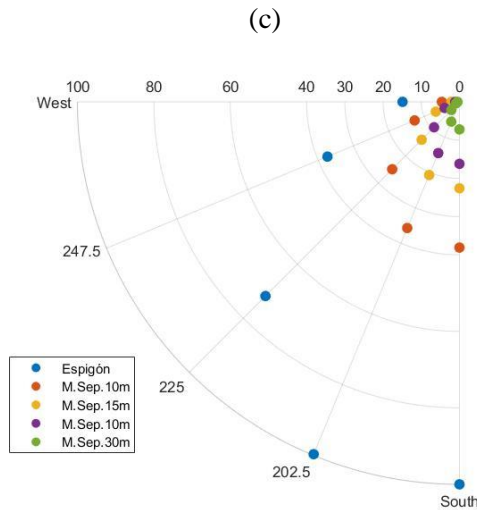


FIGURA 5.

En la Figura 6, se puede apreciar el cambio energético que existe dependiendo de las distintas estructuras estudiadas. Esta diferencia, como anteriormente se mencionó, es la diferencia de energía entre el modelo con y sin estructura. El 100% representa la mayor diferencia energética y el resto de resultados son una fracción de esta diferencia.

Se presenta solo una serie de datos (y no los tres correspondientes a  $T_p$ ) en el gráfico, ya que el cambio en  $T_p$  no incide de gran manera, lo mismo ocurre para las pendientes, por lo que solo se presenta un gráfico (esto no quiere decir que los valores de energía sean igual, solo que la relación existente es similar).

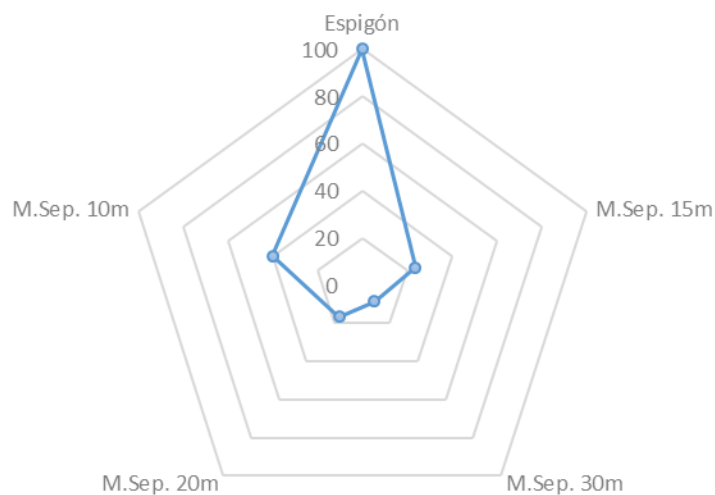
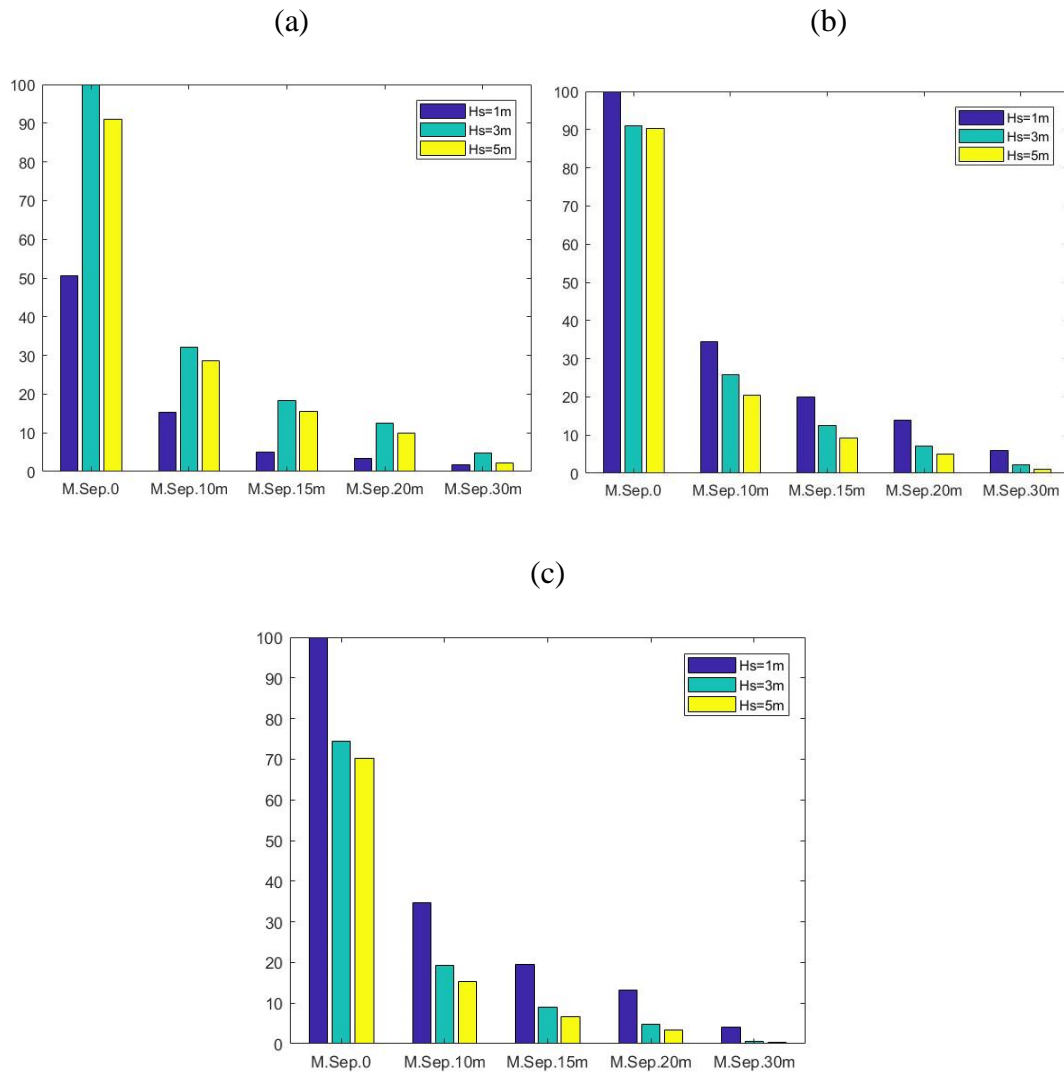


FIGURA 6. DIFERENCIA ENERGÉTICA (%) DEPENDIENTE TIPO DE ESTRUCTURA.

Los gráficos de la Figura 7 muestran la diferencia energética debido al cambio en la altura del oleaje incidente. Se aprecia un claro incremento en la importancia de la altura  $H_s=1m$  a medida que la pendiente disminuye, ya que para la pendiente de 1% es la variable que menos influye, además la estructura que más incide en a nivel energético es el espigón para todos los casos.

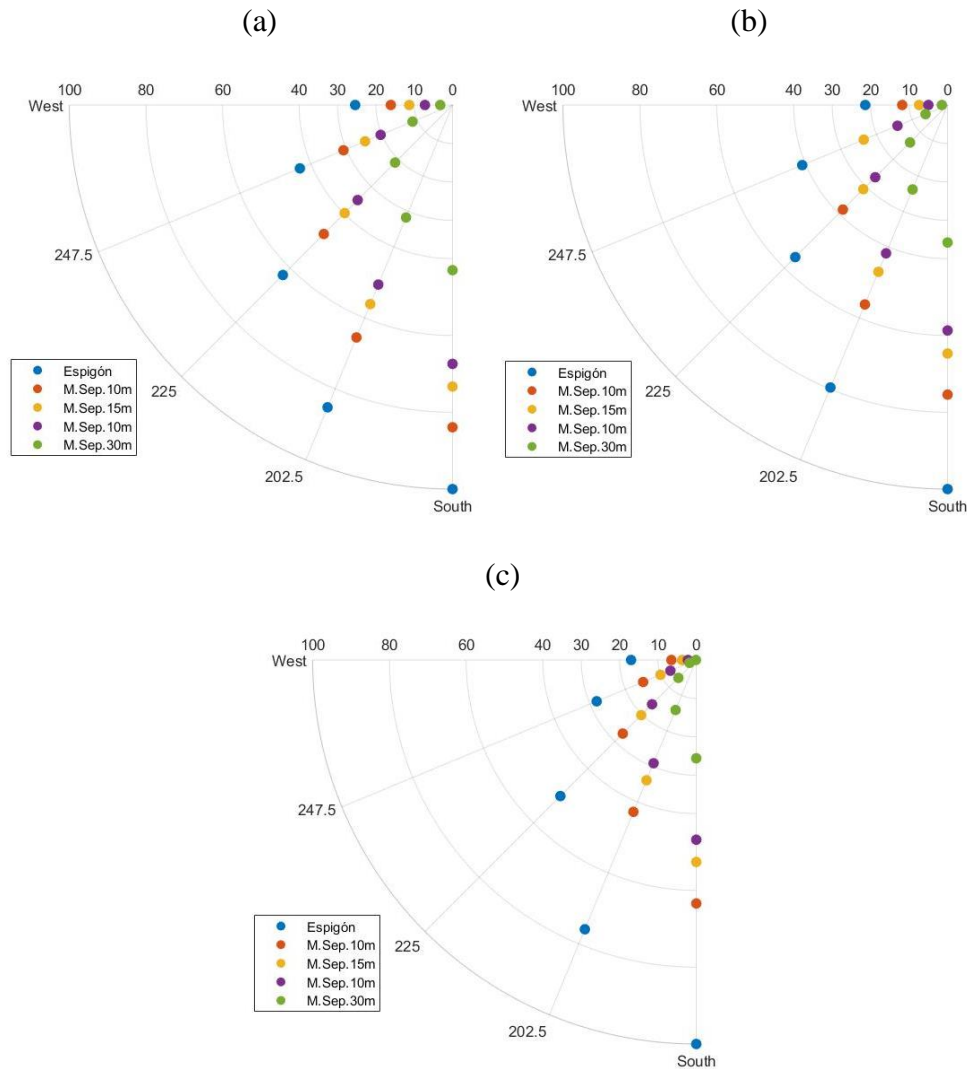


**FIGURA 7.** DIFERENCIA ENERGÉTICA DEBIDO A LA AHLTURA INICIAL DE OLA Y TIPO DE ESTRUCTURA. (A) HISTOGRAMA PARA PENDIENTE DE 1%, (B) HISTOGRAMA PARA PENDIENTE DE 5%, (C) HISTOGRAMA PARA PENDIENTE DE 3%.

### 3.2. RESULTADOS DE ZONA AFECTADA

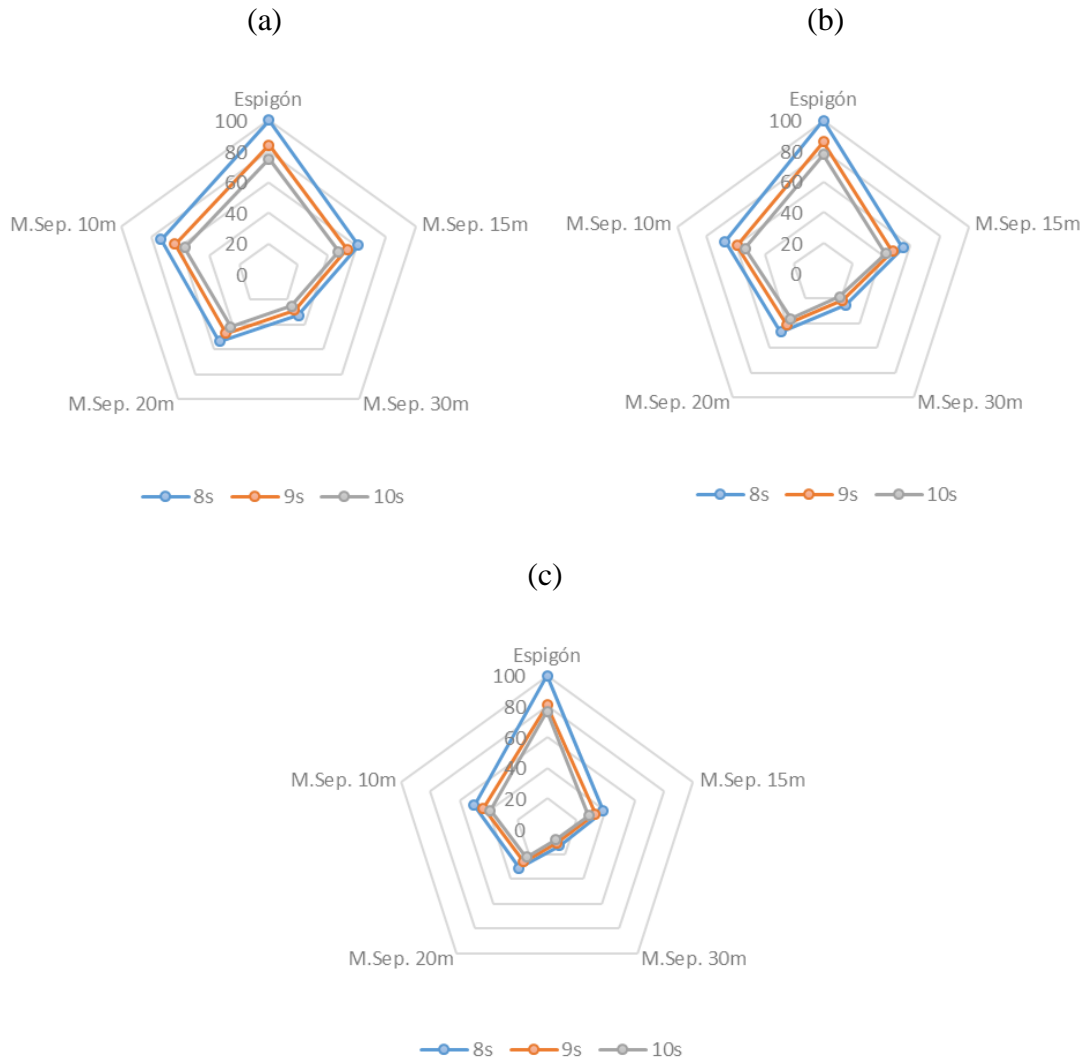
Posterior a obtener los resultados de diferencia energética se procedió a calcular las zonas afectadas por las diferentes variables, tanto estructurales como, de terreno y de clima de oleaje.

De la Figura 8 se observa claramente, al igual que en el caso de energía, que la estructura que más zona afecta es el espigón, pero a diferencia del otro caso es que la dirección que más influye es la dirección proveniente desde el sur ( $270^{\circ}$ -S), independientemente de la pendiente. También se ve que existe una menor diferencia (porcentual) en la zona afectada a mayor pendiente.



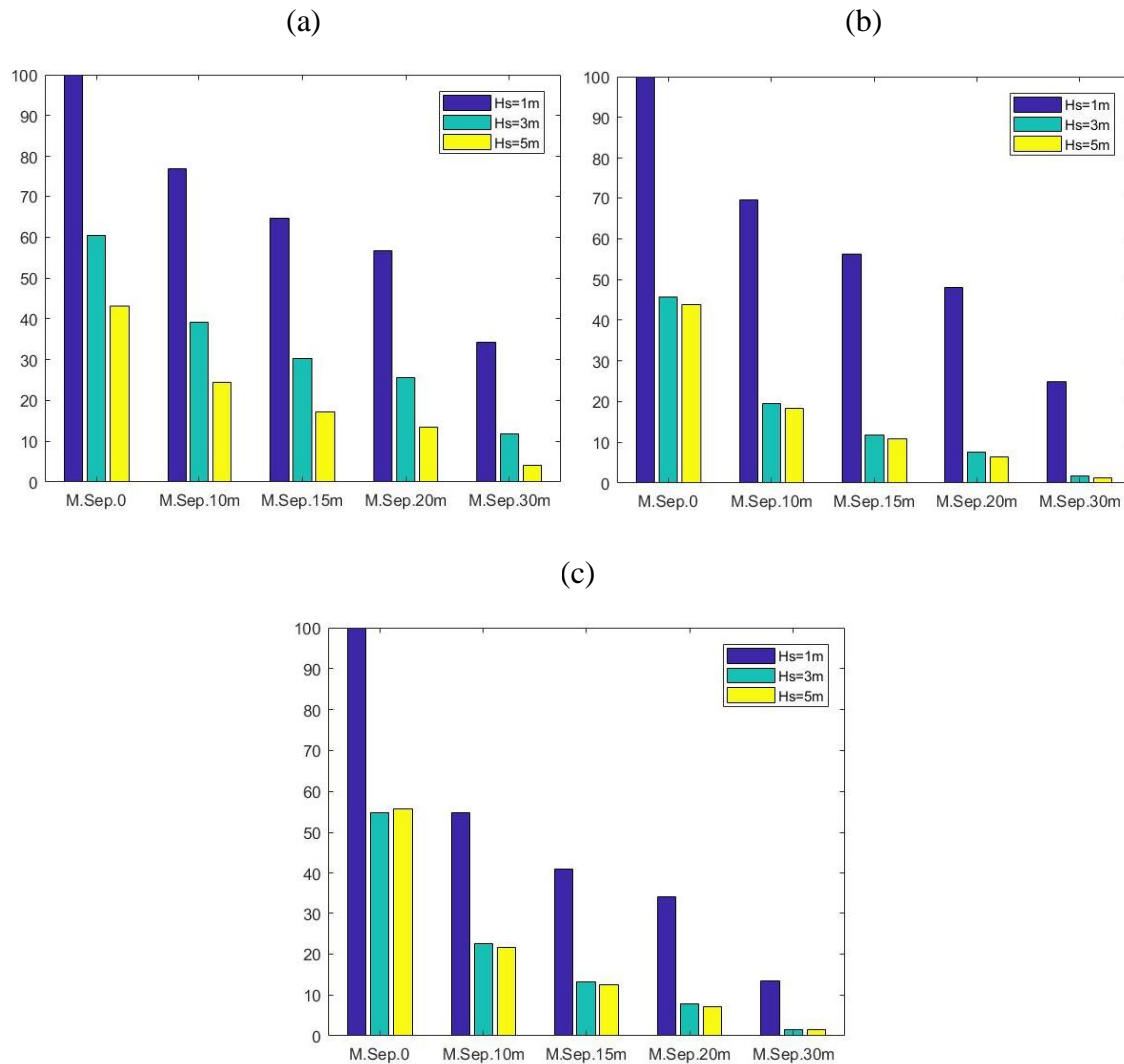
**FIGURA 8.** DIFERENCIA (%) EN LA ZONA AFECTADA DEBIDO A LAS DISTINTAS DIRECCIONES DE OLAJE Y TIPOS DE ESTRUCTURAS (A) PENDIENTE 1%, (B) PENDIENTE 5%, (C) PENDIENTE 3%.

De la Figura 9, se aprecia que para todos los periodos y pendientes el espigón sigue siendo la estructura más influyente, en cuanto a zona afectada, luego lo siguen los muelles con menor separación de cepas.



**FIGURA 9.** DIFERENCIA (%) EN LA ZONA AFECTADA DEBIDO A LAS DISTINTOS PERIODOS DEL OLAJE Y TIPOS DE ESTRUCTURAS  
 (A) PENDIENTE 1%, (B) PENDIENTE 5%, (C) PENDIENTE 3%.

En la Figura 10, se observa como las distintas alturas incidentes afecta la zona de sotamar, para las diferentes pendientes, se aprecia que claramente la altura de mayor influencia es la de 1m, mientras que la estructura que más afecta es el espigón, esto ocurre de igual manera para las tres diferentes pendientes.



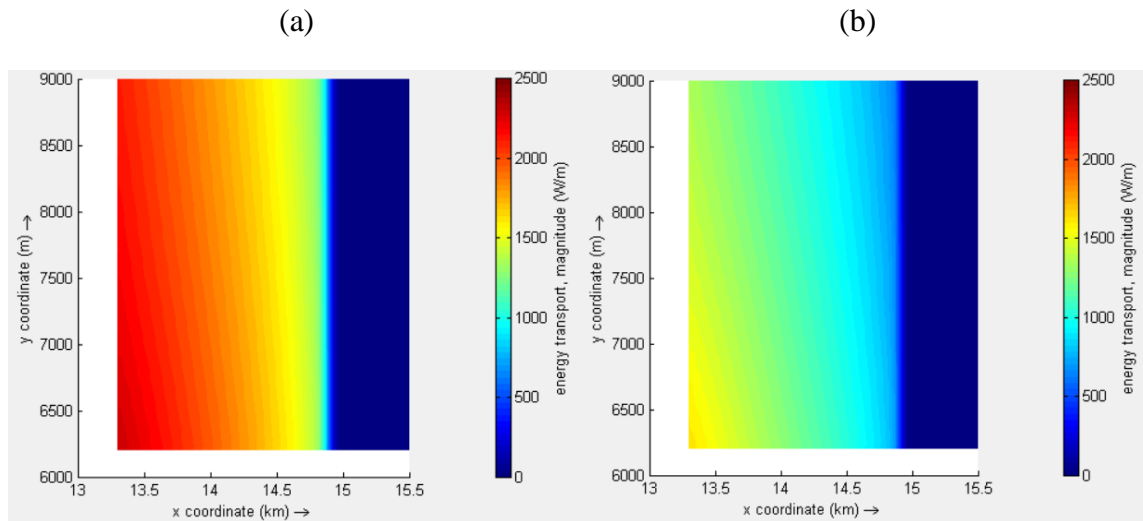
**FIGURA 10.** DIFERENCIA (%) EN LA ZONA AFECTADA DEBIDO A LAS DISTINTAS DIRECCIONES DE OLEAJE Y TIPOS DE ESTRUCTURAS (A) PENDIENTE 1%, (B) PENDIENTE 5%, (C) PENDIENTE 3%.

## 4. DISCUSIÓN

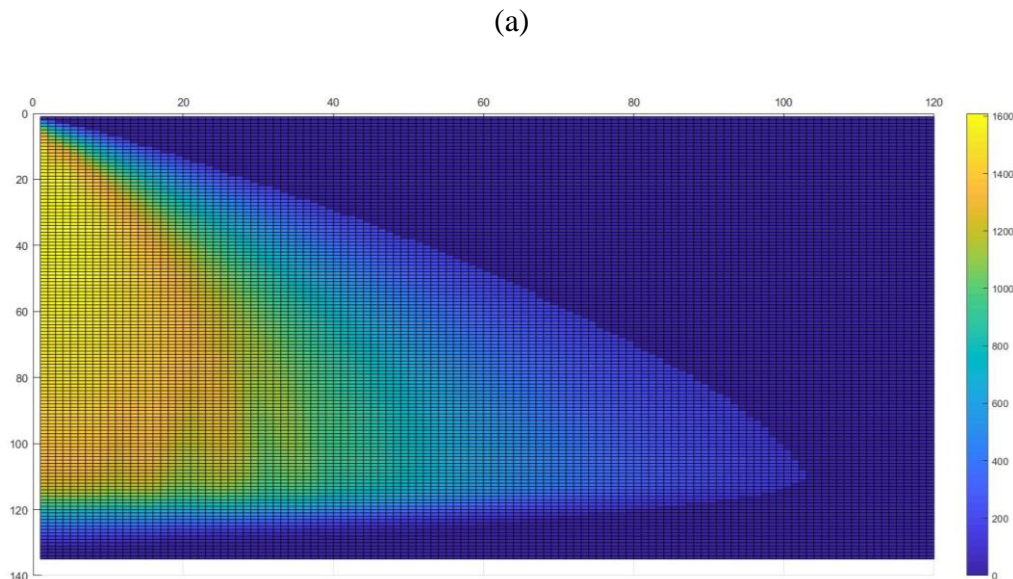
De los resultados presentados anteriormente se desprenden algunos análisis, tanto para la diferencia energética como para la zona afectada, y como cambian dependiendo de las variables analizadas.

En el caso de las direcciones se puede ver un cambio en la dirección preponderante, cuando se habla de diferencia energética, ya que la dirección sur ( $180^\circ$ ) comienza a ser más importante a medida que va disminuyendo la pendiente, siendo incluso, la dirección que más incide para la pendiente 3%. Esto contrasta con la zona afectada, porque para este caso la

dirección sur es siempre le predominante independiente de la pendiente. Esto puede deberse a que de por si la energía con la que llega a la costa, para la dirección es sur, es mucho menor debido a la refracción (Ver Figura 11), por lo cual se disipa menos energía debido a la estructura, pero el área afectada, como es lógico, es mayor (Ver Figura 12).



**FIGURA 11.** ENERGÍA DISPONIBLE (CASO SIN ESTRUCTURA Y PENDIENTE DE 1%) PARA LAS DIRECCIONES (A) 202.5° Y (B) 180°



(b)

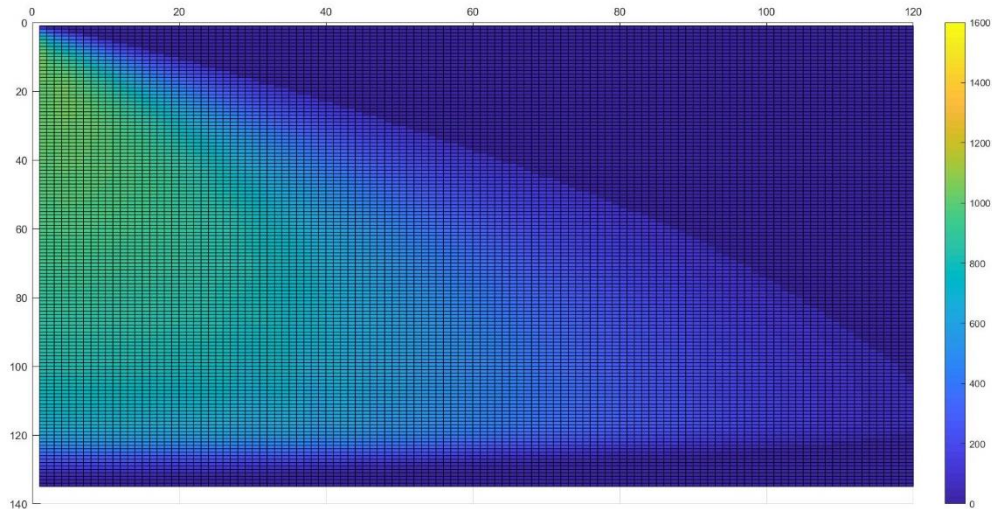
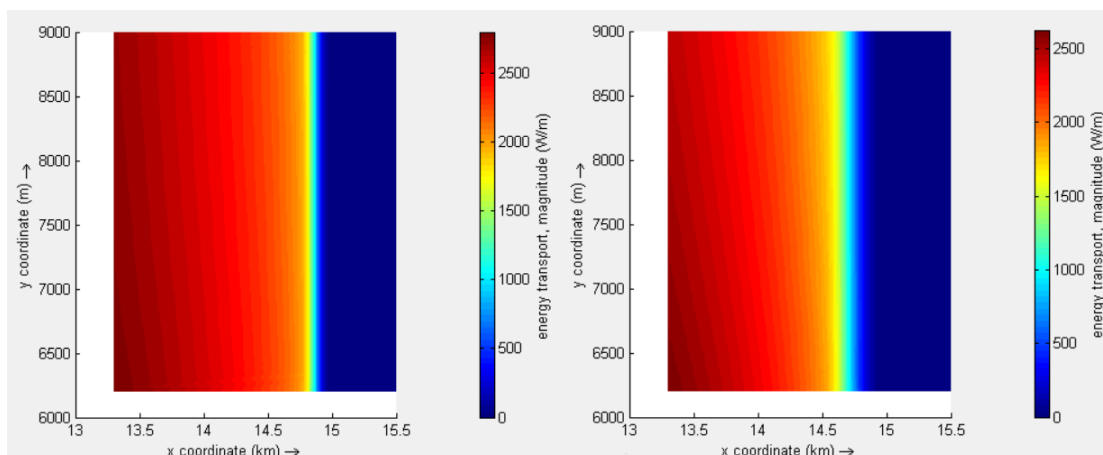


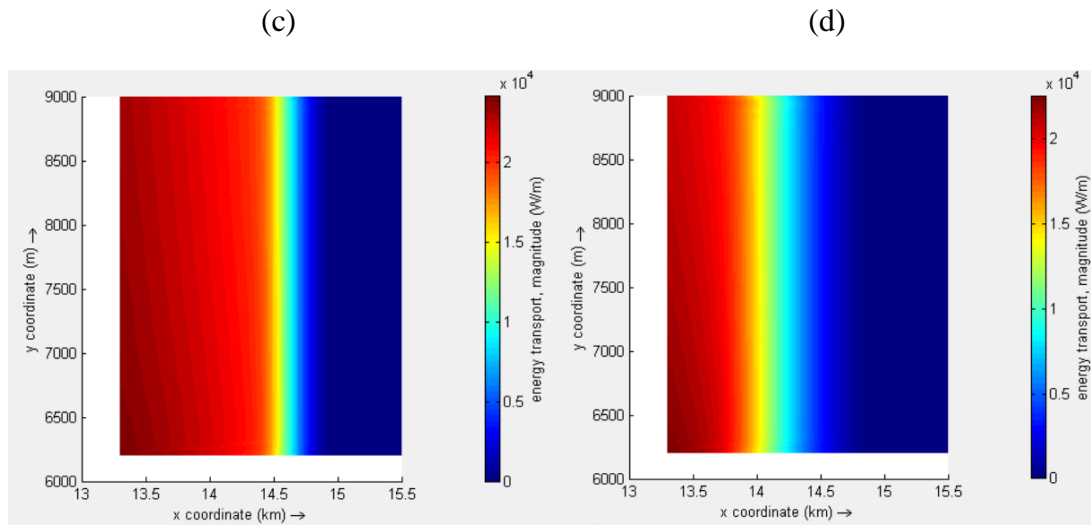
FIGURA 12. ÁREA AFECTADA (CASO CON PENDIENTE 1%) PARA LAS DIRECCIONES (A) 202.5° Y (B) 180°.

Para los casos de Hs, en el cambio energético, existe una clara alza en la importancia de la altura de ola de 1ma medida que disminuye la pendiente, ya que pasa de ser la menos a la más incidente, y aunque es extraño, esto podría explicarse debido a que la zona de rompiente para las olas de mayor tamaño se encuentra más adentro que las de menor tamaño (esto se ve al comparar (a) y (c) o (b) y (d) de la Figura 13), y esta se adentra más a medida que disminuye la pendiente (estos se puede apreciar al contrastar (a) y (b) o (c) y (d)), esto debido a la refracción del oleaje. Además, la zona de rompiente es más acotada para el caso de olas pequeñas y más difusa para olas más grandes (se ve al comparar (a) y (c) o (b) y (d) de la Figura 13).

(a)

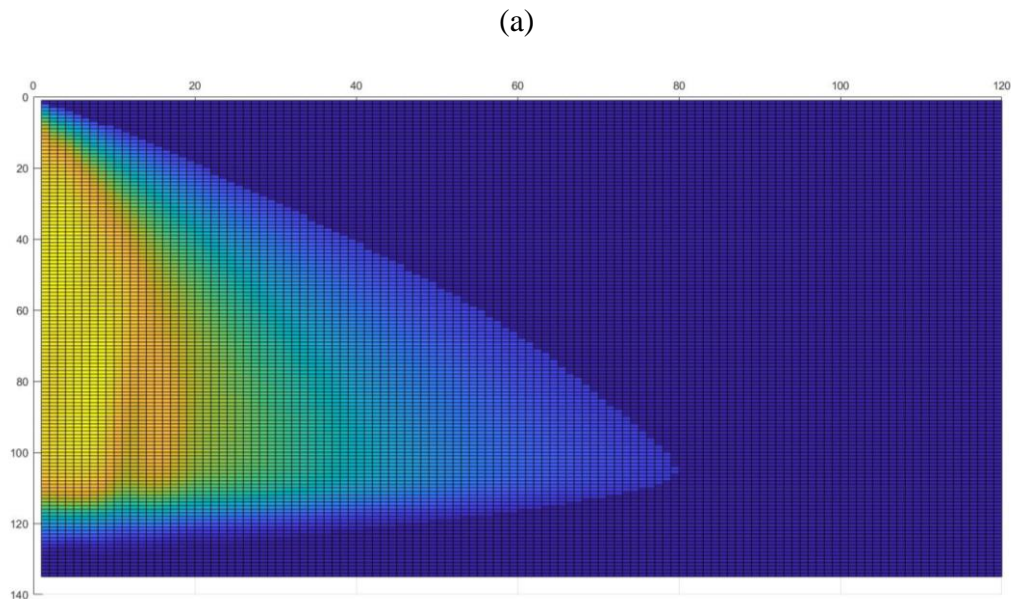
(b)



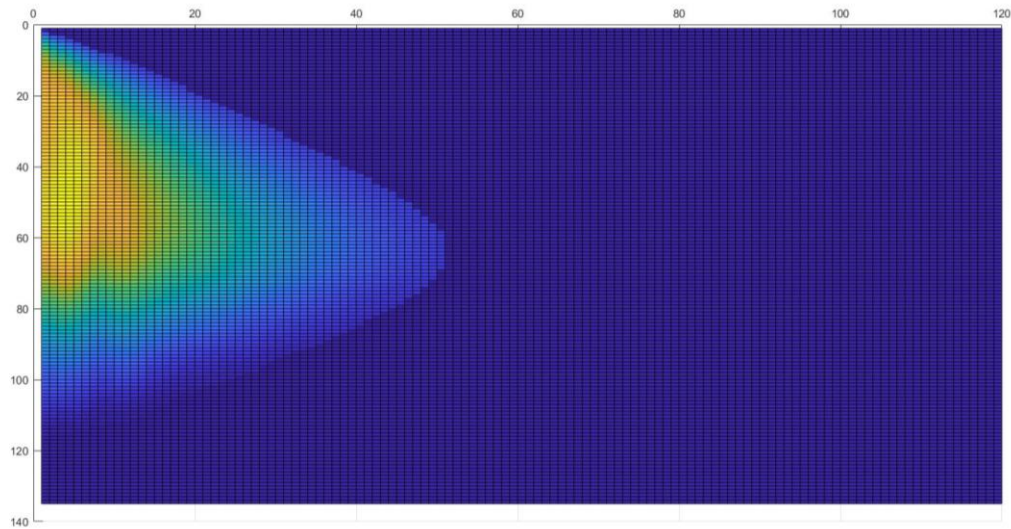


**FIGURA 13.** ZONA DE ROMPIENTE (A) PENDIENTE DE 1% Y HS=1M, (B) PENDIENTE DE 5‰ Y HS=1M, (C) PENDIENTE 1% Y HS=3M Y (D) PENDIENTE 5‰ Y HS=3M.

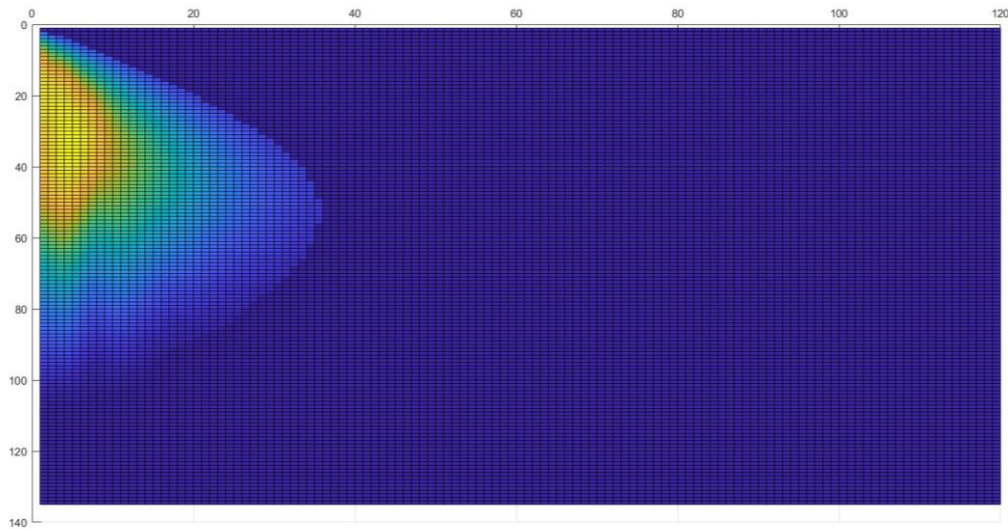
De forma similar ocurre para el caso de la zona afectada, ya que las olas de menor altura tienen una zona de influencia mayor que la de las olas más grandes, esto también se debe a la zona de rompientes, ya que a mayor pendiente esta zona está más adentro (Ver Figura 13). El comportamiento de la zona afectada dependiendo de  $H_s$  se puede ver representada en la Figura 14.



(b)



(c)



**FIGURA 14.** ZONA DE AFCTADA POR (A) HS=1M, (B) HS=3M, (C) HS=5M.

Para el caso de  $T_p$ , en cuanto a zona afectada, se puede ver de los gráficos de la Figura 9 que el periodo que afecta de mayor manera esta variable es el  $T_p$  más pequeño, independiente de la pendiente, además se puede ver que mientras más pequeña va siendo la pendiente, mas similares son los gráficos. Incluso para la pendiente de 3‰ se puede apreciar que la zona afectada del muelle con  $d=30m$ , es reducida casi a cero comparada con la zona afectada por el espigón.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación indican cuales fueron las estructuras que presentaron un mayor cambio tanto energéticamente como en la zona afectada. Estas estructuras son las que presentan una menor separación entre cepas y como es de esperar, es que en todos los casos el espigón es la estructura que presenta un mayor cambio (ya que esta estructura bloquea por completa la zona y no deja que se propague el oleaje). Esto se debe a que existe una mayor área de contacto con el oleaje incidente, lo cual provoca distintos fenómenos como lo son la reflexión y la disipación debido a la interacción con el obstáculo.

En cuanto a los resultados direccionales se puede concluir que el mayor cambio energético se ve para las direcciones que oblicuas y perpendicular (específicamente  $180^\circ$ ,  $202.5^\circ$  y  $225^\circ$ ). Además, para estas direcciones al comparar la energía entre el espigón y el muelle con  $d=10\text{m}$ , esta se ve reducida entre un 45 y 60%, para la pendiente 1%, para el caso de pendiente 5‰, esta diferencia energética es de entre 50 y 60% y para la pendiente 3‰, la diferencia se encuentra en un rango de entre 50 y 65%. Asimismo, se puede decir que a medida que la pendiente disminuye la diferencia energética, entre las estructuras con separaciones entre cepas, es cada vez se hace menor. En cuanto a la zona afectada, la dirección que predomina es la proveniente del sur ( $180^\circ$ ) y va disminuyendo la importancia a medida que se acerca a la dirección oeste ( $270^\circ$ ). La diferencia entre las zonas afectadas por las estructuras con  $d=10\text{m}$ ,  $d=20\text{m}$ , se mantiene en un rango de entre 5 y 18% para todas las pendientes, mientras que las diferencias entre la diferencia entre las estructuras con  $d=0$  y  $d=10$  entre un 9 y 37% esta aumenta a medida que disminuye la pendiente.

Con los resultados obtenidos de la modelación para el periodo se puede determinar que el modelo no es sensible a la variación de los periodos para la energía. Por otro lado, si lo es para zona afectada, porque para las diferentes batimetrías se obtuvo una diferencia en los resultados. Para los periodos más bajos se obtuvo una mayor área afectada, pero esta diferencia se ve disminuida al disminuir la pendiente.

Para el caso de los resultados de la modelación para la altura se concluye que  $H_s=1\text{m}$ , toma una gran importancia (en tema de energía) a medida que disminuye la pendiente, pasa de ser la variable de menor influencia a la de mayor. Cuando la pendiente es de 1% esta presenta entre un 50 y 75% menos de energía (para las diferentes estructuras) en comparación a la energía de  $H_s=3\text{m}$ . A diferencia de lo que pasa en las pendientes 5‰ y 3‰, donde la energía para  $H_s=1\text{m}$  a lo menos es mayor en un 25% al resto de casos. Para el caso del área afectada por la variación en la altura, el caso de  $H_s=1\text{m}$  es al menos mayor en un 20% al resto de los casos, incluyendo las diferentes pendientes.



## 6. REFERENCIAS

Díaz, S., 2015. Estimación del coeficiente de transmisión y análisis hidrodinámico para arrecifes tipo reef-cells para condiciones marinas del caribe colombiano mediante modelación CFD. Tesis final de magister, Universidad del Norte, Barranquilla.

Deltares, 2014. Delft3D-WAVE. User manual, 1-226.

Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouwns, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kuseman, A. Meeburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973. "Measurements of wind growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* (12).

Hasselmann, K., 1974. "On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping." *Boundary-Layer Meteorology* 6 (1-2).

Bartotti, L. and L. Cavaleri, 1994. "Accuracy of wind and wave evaluation in coastal regions." In *Proceeding 24th International Conference Coastal Engineering*, ASCE.

Goda, Y., H. Takeda and Y. Moriya, 1967. *Laboratory investigation of wave transmission over breakwaters*. Tech. Rep13, Rep. Port and Harbour Res. Institution. (from Seelig, 1979).

Seelig, W., 1979. "Effects of breakwaters on waves: laboratory test of wave transmission by overtopping." In *Proceeding Conference Coastal Structures*, vol. 79:2.