

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS



FOCALIZACIÓN DEL OLEAJE CON ESTRUCTURAS
SUMERGIDAS PARA FINES RECREATIVOS EN
PLAYA HERMOSA, BAJA CALIFORNIA.

T E S I S

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA
COSTERA

Presenta:

EMILIANO NELSON GORR POZZI

Ensenada, Baja California, México Septiembre del 2015

RESUMEN

El oleaje producido por el viento al soplar sobre la superficie del mar se propaga grandes distancias desde la zona de generación hasta alcanzar la costa. Al acercarse a la costa, debido a su interacción con el fondo, su amplitud, longitud y dirección se modifican y finalmente rompe al encontrarse en aguas poco profundas. Las características del oleaje y de la morfología de la playa determinan el tipo y la forma del rompimiento haciendo a las olas aptas o no para la práctica del surf. En años recientes se han construido, con diferentes grados de éxito, arrecifes artificiales para modificar las características de la rompiente y hacerla más apta para la práctica del surf. En este trabajo se analiza el efecto focalizante de diferentes formas estructurales y su capacidad para mejorar las condiciones para la práctica del surf en Playa Hermosa, Ensenada, Baja California, México. Para ello, se realizaron una serie de experimentos numéricos con los modelos REF/DIF y FLOW-3D en los que se estudió el enfoque de la energía del oleaje causado por diferentes estructuras sumergidas y se variaron sus dimensiones para determinar la configuración arrecifal óptima. En las simulaciones se utilizaron como forzamientos en la frontera datos de oleaje para la zona de estudio obtenidos de una climatología de 1994 a 2012. La configuración arrecifal óptima se obtuvo con una estructura con una longitud de 2 veces la longitud de onda incidente, una sección transversal equivalente a la longitud de onda y con una altura de 2 metros. De esta forma, se consiguió un aumento de la altura en la zona de ruptura del oleaje de hasta un 73.95% y una ampliación de la zona de surf de 80.58 m. Además, esta estructura causa que la ola rompa con un ángulo de ruptura de 45° y con una forma entre *derramante* y *en tubo* lo que la hace idónea para surfistas con un nivel de destreza intermedio.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

**FOCALIZACIÓN DEL OLEAJE CON ESTRUCTURAS
SUMERGIDAS PARA FINES RECREATIVOS EN
PLAYA HERMOSA, BAJA CALIFORNIA.**

T E S I S

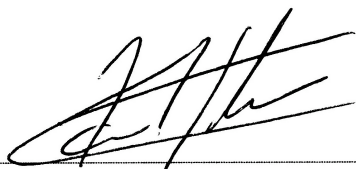
QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS
NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

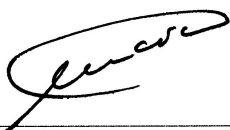
EMILIANO NELSON GORR POZZI

Aprobada por:



Dr. Héctor García Nava

Director de tesis



Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu

Sinodal



Dr. Rafael Hernández Walls

Sinodal

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

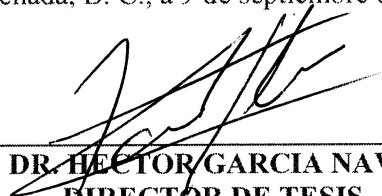
DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA
COORDINADOR DE POSGRADO
E INVESTIGACION, F.C.M.
Presente.-

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Emiliano Nelson Gorr Pozzi** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

FOCALIZACIÓN DEL OLEAJE CON ESTRUCTURAS SUMERGIDAS PARA FINES
RECREATIVOS EN PLAYA HERMOSA, BAJA CALIFORNIA.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 9 de septiembre de 2015



DR. HECTOR GARCIA NAVA
DIRECTOR DE TESIS

c.c.p. Expediente

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

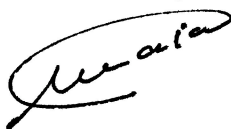
DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA
COORDINADOR DE POSGRADO
E INVESTIGACION, F.C.M.
Presente.-

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Emiliano Nelson Gorr Pozzi** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

**FOCALIZACIÓN DEL OLEAJE CON ESTRUCTURAS SUMERGIDAS PARA FINES
RECREATIVOS EN PLAYA HERMOSA, BAJA CALIFORNIA.**

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 9 de septiembre de 2015



DRA. AMAIA RUIZ DE ALEGRIA ARZABURU
SINODAL

c.c.p. Expediente

ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

DR. LUIS ANTONIO CUPUL MAGAÑA
COORDINADOR DE POSGRADO
E INVESTIGACION, F.C.M.
Presente.-

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Emiliano Nelson Gorr Pozzi** para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

**FOCALIZACIÓN DEL OLEAJE CON ESTRUCTURAS SUMERGIDAS PARA FINES
RECREATIVOS EN PLAYA HERMOSA, BAJA CALIFORNIA.**

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 9 de septiembre de 2015



DR. RAFAEL HERNANDEZ WALLS
SINODAL

c.c.p. Expediente

DEDICATORIA

A mi familia.

Que a pesar de la distancia siempre están presentes en mi corazón.

Y especialmente a mi abuela, Mary.

Estés donde estés quiero que sepas que nada de esto hubiera sido posible sin vos, en cada paso queda inmortalizada tu huella...

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Héctor García Nava, mi director de tesis, por su amistad y creer en mi desde el primer día, por apoyarme incondicionalmente en este trabajo y en todo lo que me he propuesto. Gracias por transmitirme esa positividad y esas “ganas”, me enorgullece poder decir que fui su alumno y que mucho de lo que aprendí fue gracias a usted.

A mi comité de tesis, la Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu y al Dr. Rafael Hernández Walls por su dedicación, paciencia, comentarios y aportaciones a esta tesis.

Al Dr. Manuel Gerardo Verduzco Zapata de la Universidad de Ciencias Marinas de Colima (UCOL) por su gran apoyo y dedicación durante la estancia de investigación en Manzanillo.

Al Dr. Fernando Marván por introducirme y abrirme las puertas para que todo esto haya sido posible.

Por todo el apoyo económico y técnico científico para el desarrollo de esta investigación, se extiende el más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la Beca CONACyT Nacional 2013 proporcionada, al Posgrado en Oceanografía costera de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), al Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) y a la Universidad de Ciencias Marinas de Colima (UCOL).

Deseo agradecer especialmente a mi familia por todo su apoyo y comprensión a través de los años, a la invaluable labor de mis Padres que supieron enseñarme y transmitirme desde mis primeros años a amar y

respetar el mar; a ellos le debo mi gran amor, vocación e inspiración. A mi hermano Alejandro por su incondicional apoyo, amistad y excelente revisión de este trabajo, esta tesis no sería la misma sin vos. Al más pequeño, el Gabo, por regalarme tanta música, sonrisas y alegría para que todo esto haya sido más fácil. Al Abuelitus por ser un ejemplo a seguir en todo sentido. Los amo!

Finalmente, a mi familia elegida y a todos mis compañeros de ruta y posgrado, especialmente a la Rebe, Paulette, Ele, Amparo, Frida, Gordinha, Pau, AnRa, El Compaye, Fer, Mateo, Vinzen, Issa, Fulli, Rodri, Diego y a los que me olvido.

A todos MUCHAS GRACIAS !!!

*“Una vez que el mar suelta su hechizo,
lo atrapa a uno en su red de dudas para siempre”.*

Jacques Cousteau

Índice

I. Introducción	1
I.1. Beneficios del uso de arrecifes artificiales.	3
I.2. Antecedentes.	7
II. Objetivos	11
II.1. Objetivo general.	11
II.2. Objetivos específicos.	11
III. Área de estudio	12
III.1. Oleaje.	13
III.2. Nivel del mar.	14
III.3. Batimetría.	15
IV. Método	17
IV.1. Campo del oleaje en aguas profundas.	17
IV.2. Campo del oleaje en la Bahía de Todos Santos.. . . .	19
IV.3. Diseño estructural.. . . .	21
IV.4. Determinación de la focalización del oleaje.	23
IV.5. Determinación del rompimiento del oleaje.	30
V. Resultados y discusiones	33
V.1. Condiciones de oleaje para las simulaciones.	33
V.2. Focalización del oleaje.	37
V.2.1. Influencia de la altura estructural en la altura de ruptura.	37

V.2.1.1. Influencia de la altura estructural en la distancia de ruptura. .	45
V.2.2. Influencia del largo estructural en la altura de ruptura..	49
V.2.2.1. Influencia del largo estructural en la distancia de ruptura. . . .	53
V.2.3. Influencia del ancho estructural en la altura de ruptura.	57
V.2.3.1. Influencia del ancho estructural en la distancia de ruptura. . .	61
V.2.4. Influencia del largo y el ancho estructural en la altura de rup- tura.	65
V.2.4.1. Influencia del largo y el ancho estructural en la distancia de ruptura.	69
V.3. Ruptura del oleaje.	73
VI. Conclusiones	81

Lista de tablas

I.	Parámetros del oleaje en el nodo externo (aguas oceánicas).	34
II.	Parámetros del oleaje en el nodo interno (aguas someras).	36
III.	Ángulo de rotura en función de la altura de ola significativa y el nivel de destreza del surfista propuesto por Hutt <i>et al.</i> , (2001). . .	77

Lista de figuras

1. Representación en planta del aumento en la distancia de ruptura debido a la presencia de la estructura arrecifal. X_{reef} es el punto donde la ola comenzará a romper por influencia de la estructura arrecifal, X_{beac} distancia de ruptura en ausencia de estructura y ΔX es el aumento neto de la distancia de ruptura. XXI
2. Representación en perfil de la distancia de ruptura sobre una estructura arrecifal en comparación con la batimetría natural sin estructura en forma de plano uniforme de la playa. XXIII
3. Representación esquemática del ángulo de rotura propuesta por Walker (1974). α es el ángulo de rotura, $\vec{V}_w$ es la celeridad de la onda, $\vec{V}_s$ la velocidad que experimenta el surfista y $\vec{V}_p$ la velocidad de ruptura. XXVII
4. Diferentes ángulos de rotura para el famoso *spot* peruano de Chicama. Se puede observar el vector celeridad de onda ($\vec{V}_w$) en cian; el vector velocidad de rotura longitudinal del frente ($\vec{V}_p$); la velocidad de desplazamiento del surfista ($\vec{V}_s$); y *ángulo de rotura* ó *peel angle* (α). . . . XXVIII
5. Perfiles de distintos tipos de rompientes obtenidos a partir de fotografías instantáneas generadas por Galvin (1968).. . . . XXIX
6. Localización del área de estudio 13
7. Dominio del área de estudio y batimetría. Se aprecia la estructura ubicada partir de la cota de -5 metros de profundidad. D, A y W son la altura, el ancho y el largo de la estructura, respectivamente. 23
8. Estructuras arrecifales replicadas con el programa Google SketchUp que dieron mejores resultados a nivel global. Panel A- Jumeirah Reef (Dubái, EAU), panel B- Brevard Florida (Florida, EE.UU), panel C- Cable Station (Perth City Coast, Australia), panel D- Lyall Bay

	(Wellington, Nueva Zelanda), panel E- Mount Maunganui (Tauranga, Nueva Zelanda) y panel F- Narrowneck (Gold Coast, Australia).	27
9.	Dominio del área de estudio y batimetría. La línea gruesa de color rojo indica las celdas que representan la frontera. Modelo numérico REF/DIF versión 2.5.	29
10.	Campo de oleaje de la Bahía Todos Santos para la condición media de verano.	34
11.	Campo de oleaje de la Bahía Todos Santos para la condición media de invierno.	35
12.	Campo de oleaje de la Bahía Todos Santos para la condición máxima de la serie de tiempo.	36
13.	Resultado numérico del modelo REF / DIF que muestra la elevación instantánea de la superficie para un arrecife de $2 \lambda_{\text{reef}}$ tanto en su ancho como en el largo y una altura de 2 m. A medida que la ola se propaga hacia la costa sobre el arrecife, su cresta comienza a curvarse. Las líneas negras representan los contornos batimétricos. La línea blanca con asteriscos denota la línea de ruptura del oleaje.	38
14.	Altura de ruptura del oleaje (H_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la media de verano. Cada línea representa estructuras, con el mismo ancho (W).	39
15.	Altura de ruptura del oleaje (H_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la media de invierno. Cada línea representa estructuras, con el mismo ancho (W).	40
16.	Altura de ruptura del oleaje (H_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para el oleaje máximo de la serie. Cada línea representa estructuras, con el mismo ancho (W).	41
17.	Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{\text{rel}} = D/h_{\text{reef}}$), para las condiciones promedio de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W).	43

18. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{\text{rel}} = D/h_{\text{reef}}$), para las condiciones promedio de invierno. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W). 44
19. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{\text{rel}} = D/h_{\text{reef}}$), para la condición máxima de la serie. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W). 45
20. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W). . . 46
21. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la condición media de invierno. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W). 47
22. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la condición la condición máxima de la serie. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W). 48
23. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la longitud relativa ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo alto (D). 50
24. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la longitud relativa ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de invierno. Cada línea representa estructuras con la mismo altura (D). 51
25. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la longitud relativa ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición máxima. Cada línea representa estructuras con la mismo altura (D) 52
26. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo relativo ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para es escenario de la media de verano. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). . 54
27. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en

- función del largo relativo ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para el escenario de la media de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 55
28. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo relativo ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para es escenario máximo de la serie. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). . 56
29. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 58
30. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 59
31. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición máxima. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 60
32. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{rel}}$), para el escenario de la media de verano. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). . 62
33. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{rel}}$), para el escenario de la media de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 63
34. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{rel}}$), para el escenario máximo. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 64
35. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{\text{rel}} = D/h_{\text{reef}}$), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo largo y ancho (Λ, W) 66
36. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{\text{rel}} = D/h_{\text{reef}}$), para la condición media de invierno. Cada línea

- representa estructuras con el mismo largo y ancho (Λ, W). 67
37. Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{\text{rel}} = D/h_{\text{reef}}$), para la condición máxima. Cada línea representa estructuras con el mismo largo y ancho (Λ, W). 68
38. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo y ancho estructural relativo ($\Lambda_{\text{rel}}, W_{\text{rel}}$) para el escenario medio de verano. Cada línea representa estructuras con la misma (D). . . 70
39. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo y ancho estructural relativo ($\Lambda_{\text{rel}}, W_{\text{rel}}$) para el escenario medio de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma (D). 71
40. Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo y ancho estructural relativo ($\Lambda_{\text{rel}}, W_{\text{rel}}$) para el escenario máximo. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). . . . 72
41. Ángulo del rotura (α) en función del ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de verano determinado mediante el modelo numérico FLOW-3D. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 74
42. Ángulo del rotura (α) en función del ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de invierno determinado mediante el modelo numérico FLOW-3D. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D). 75
43. Ángulo de rotura en función de la altura de ola y el nivel de destreza del surfista propuesto por Hutt *et al.*, (2001). El asterisco rojo y verde denota el escenarios de la media de verano e invierno, respectivamente. . 77

Definición de parámetros

Para definir los parámetros relacionados a la focalización del oleaje mediante el uso de estructuras arrecifales, se compararon diversos escenarios de rotura del oleaje sobre las estructuras, y otros sin influencia de éstas. Estos parámetros fueron definidos con la finalidad de cuantificar el grado de focalización del oleaje por causa del uso de dichas estructuras, donde se incluyeron la amplificación de altura de las olas y el aumento en la distancia de ruptura.

Parámetros que describen la amplificación de la altura de las olas

Se comparó la transformación del oleaje en el centro de las estructuras y los patrones de ruptura producidos por éstas, en función a la condición natural en la zona de surf sin estructuras. Para un oleaje incidente de forma normal sobre una batimetría regular en forma de plano inclinado, sólo el efecto de asomeramiento afectará la altura de las olas incidentes (H_0). De esta manera, la altura de ruptura en ausencia de estructura (H_{beach}) está dada como:

$$H_{beach} = K_{beach} H_0 \quad (1)$$

Donde K_{beach} es el factor de amplificación del oleaje en la playa. En el caso que las ondas incidan de forma oblicua o la batimetría sea irregular, la refracción y difracción del oleaje también podrán influir en la altura de las olas.

La altura de ruptura del oleaje está considerada como uno de los parámetros más importantes en una rompiente o *spot*, ya que condiciona el nivel de destreza requerido para surfear. La estimación de la altura de ola puede resultar subjetiva ya que cada grupo de surfistas desarrolla su propio método para medir las olas (Battalio, 1994). A pesar de las distintas escalas utilizadas por los practicantes del surf, se recomienda el uso de la medida oceanográfica de la altura de ola (distancia vertical entre el valle y la cresta) ya que ésta puede ser medida por los diferentes instrumentos comúnmente empleados y es un estándar entre la comunidad científica. Los límites surfeables en la altura de ola se encuentran entre 1 y 20 m (Mack, 2003), aunque alturas de ola menores pueden propulsar a personas de peso reducido o a aquellas con un alto nivel de destreza. La mejora en la hidrodinámica de las tablas de surf, así como el empleo de motos de agua para remolcar al surfista, ha hecho que en los últimos años se hayan incrementado el límite superior de altura de ola surfeable. El límite superior, o la altura de ola máxima surfeable, no está claramente establecido, aunque se asume que para un nivel de destreza intermedio este umbral se sitúa entre los 4 o 5 m (Espejo *et al.*, 2015).

Una columna de agua relativamente poco profunda sobre la estructura arrecifal provocará un asomeramiento prematuro del oleaje. De este modo, se espera que la altura de las olas lleguen a su máximo más lejos de la costa que en ausencia de la estructura. Por otro lado, las variaciones en la profundidad paralelas a la línea de costa harán que el oleaje tienda a focalizarse. La ola, al propagarse sobre el arrecife, experimentará su máxima altura precozmente, produciéndose la ruptura más lejos de la costa. Por lo tanto, debido a la focalización del oleaje, se espera que la altura de ruptura con el uso de

estructuras sumergidas sea mayor que sin éstas. La diferencia entre la altura de ruptura con y sin estructuras (ΔH) es:

$$\Delta H = H_{\text{reef}} - H_{\text{beach}} \quad (2)$$

Dónde H_{reef} es la altura de ruptura de la ola al propagarse sobre la estructura arrecifal y H_{beach} es la altura de ruptura sin estructura en estado natural de la costa (Fig. 1). El efecto relativo de focalización que experimenta el oleaje a causa de la estructura arrecifal (K_{focus}), está dado por la relación:

$$K_{\text{focus}} = \frac{H_{\text{reef}}}{H_{\text{beach}}} \quad (3)$$

Dónde K_{focus} es el factor de focalización del oleaje. Por lo tanto, un valor igual a 1 significa que la estructura no produce ningún efecto en el enfoque de la energía del oleaje, por lo que la altura de ruptura será igual que en estado natural sin el arrecife. Un valor de K_{focus} mayor a la unidad significará que existe focalización.

Cuando se compara el oleaje que se propaga en forma normal sobre un lecho plano e incide sobre una estructura arrecifal sumergida donde sólo el efecto de asomeramiento afecta a la H_{beach} , el efecto de la focalización (K_{focus}) se puede escribir también como:

$$K_{\text{focus}} = \frac{H_{\text{reef}}}{K_{\text{beach}} H_0} \quad (4)$$

Por lo tanto, una onda que viaja hacia la costa se verá afectada tanto por el efecto de la batimetría, así como por la focalización causada por la estructura arrecifal. De esta forma, la altura de ruptura sobre el arrecife (H_{reef}) será:

$$H_{\text{reef}} = K_{\text{focus}} K_{\text{beach}} H_0 \quad (5)$$

Parámetros que describen la ruptura de la ola

De igual manera que para la amplificación de la altura de las olas, la distancia de ruptura producida por las estructuras arrecifales también se ha comparado en relación a un estado de la playa sin arrecife. Con una batimetría en forma de plano uniforme, el oleaje que se propaga de manera normal hacia la costa viajará de forma paralela a los contornos batimétricos produciendo de esta manera líneas de ruptura de forma recta y paralela a la costa (Fig. 1).

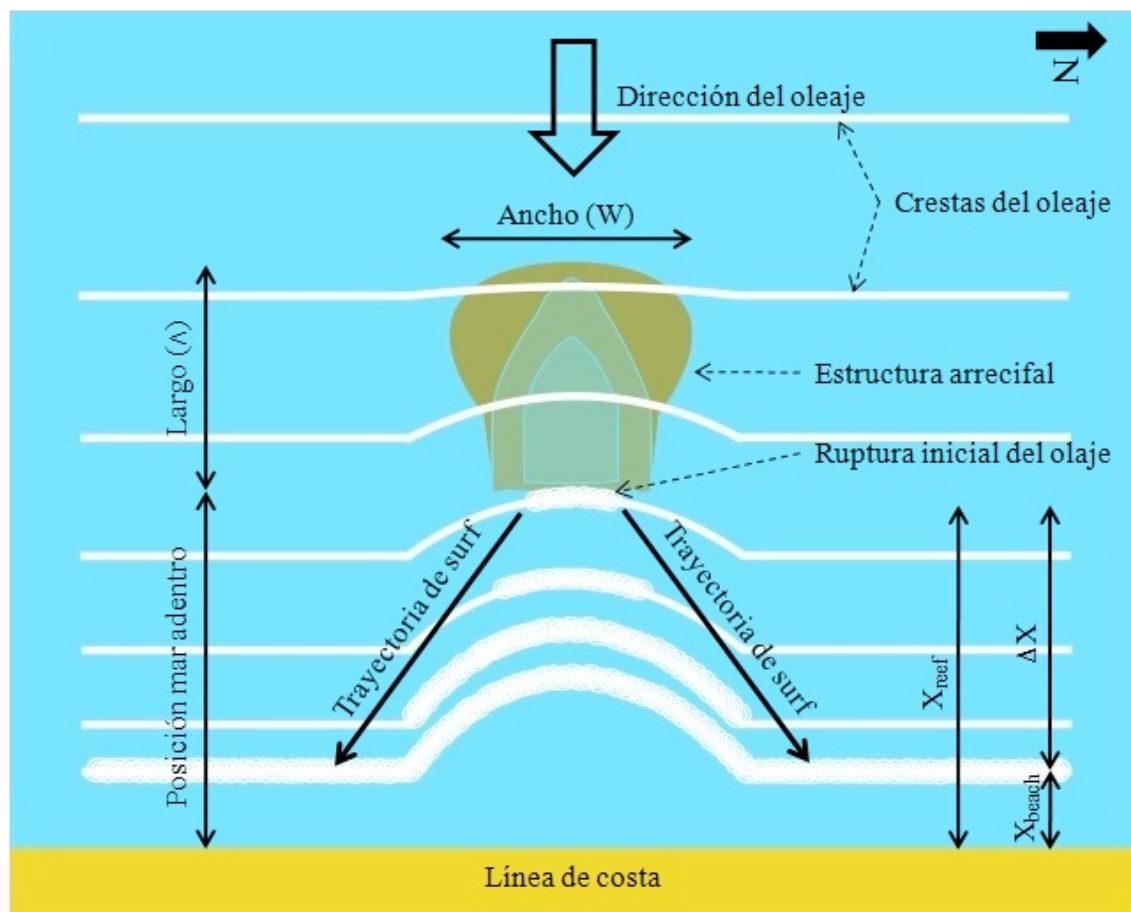


Figura 1: Representación en planta del aumento en la distancia de ruptura debido a la presencia de la estructura arrecifal. X_{reef} es el punto donde la ola comenzará a romper por influencia de la estructura arrecifal, X_{beac} distancia de ruptura en ausencia de estructura y ΔX es el aumento neto de la distancia de ruptura.

Para una batimetría en forma de plano inclinado, la distancia desde la línea de ruptura hasta la costa (X_{beach}) es la relación que existe entre la profundidad de ruptura en ausencia de estructura (h_{beach}) y la tangente del ángulo (β) de la playa (Fig. 2).

$$X_{\text{beach}} = \frac{h_{\text{beach}}}{\tan \beta} \quad (6)$$

Para un oleaje incidente de forma normal, X_{beach} puede expresarse como:

$$X_{\text{beach}} = \frac{K_{\text{beach}} H_0}{\gamma \tan \beta} \quad (7)$$

Donde γ es el criterio de ruptura, según la razón entre H_{beach} y h_{beach} .

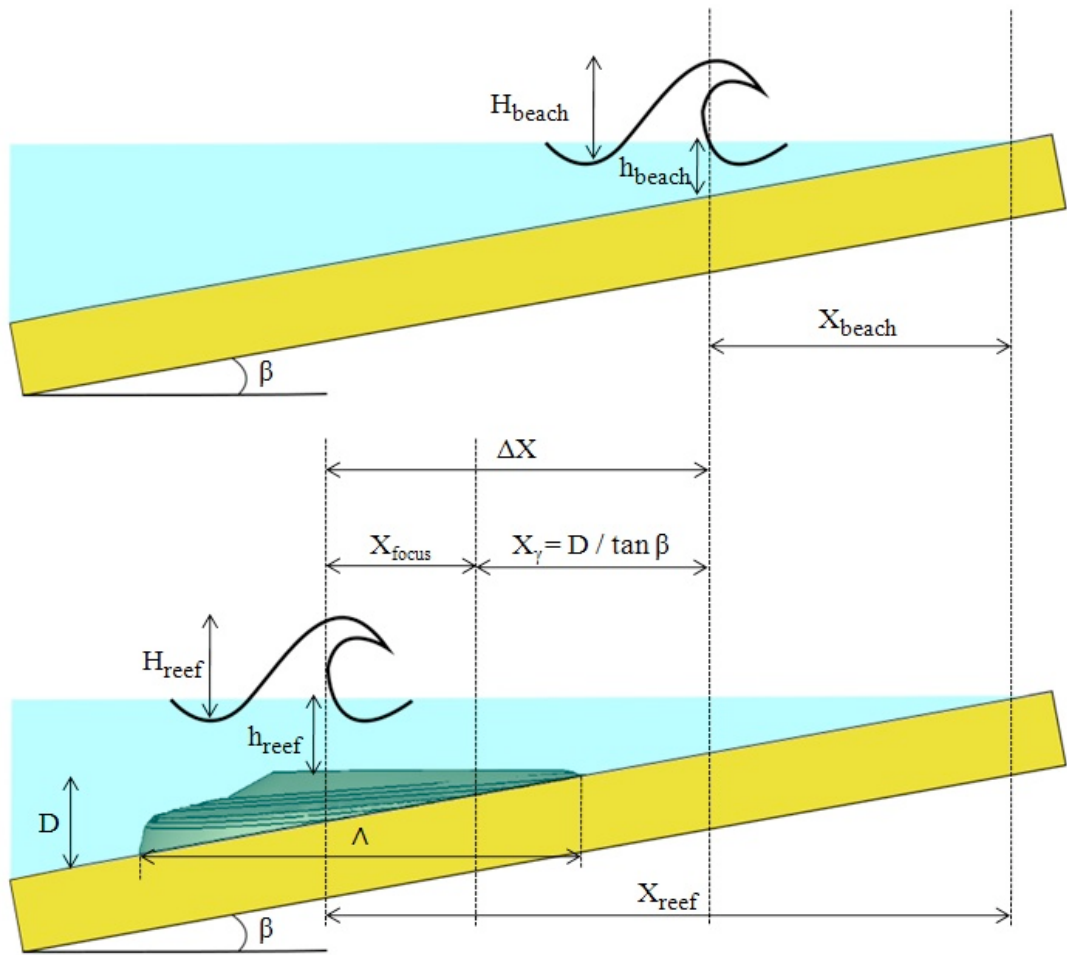


Figura 2: Representación en perfil de la distancia de ruptura sobre una estructura arrecifal en comparación con la batimetría natural sin estructura en forma de plano uniforme de la playa.

El punto de ruptura, donde la ola comenzará a romper por influencia de la estructura arrecifal es X_{reef} y se espera que sea mayor que X_{beach} debido a que los arrecifes causan que el oleaje rompa de manera prematura. La diferencia entre la distancia de ruptura con el arrecife (X_{reef}) y la ruptura natural de la playa sin arrecife (X_{beach}) es el aumento en la distancia de ruptura (ΔX) (Fig. 1).

$$\Delta X = X_{reef} - X_{beach} \quad (8)$$

Con la finalidad de determinar la contribución relativa que provoca la ruptura precoz del oleaje por el efecto del forzamiento tanto por asomeramiento sobre las estructuras como por la focalización de la energía, estos dos efectos deben ser considerados por separado. Debido a que la profundidad de la columna de agua sobre el arrecife es la misma que para una isóbata más cercana a la costa, esto genera que la distancia de ruptura del oleaje se produzca más lejos de la orilla. Esta distancia (X_γ), producto del efecto de asomeramiento sobre la estructura arrecifal, se define como la razón entre la altura de la estructura (D) y la tangente del ángulo (β) de la pendiente de la playa (Fig. 2).

$$X_\gamma = \frac{D}{\tan \beta} \quad (9)$$

De esta manera, la distancia de ruptura anticipada neta (ΔX) queda definida como:

$$\Delta X = X_\gamma + X_{\text{focus}} \quad (10)$$

Donde X_{focus} es la distancia causada por el efecto de la focalización (Fig. 2) descripta como:

$$X_{\text{focus}} = X_{\text{reef}} - \frac{D + h_{\text{beach}}}{\tan \beta} \quad (11)$$

Otros parámetros asociados a las dimensiones estructurales

Las dimensiones óptimas de las estructuras, teniendo en cuenta el conjunto de criterios elegidos para su diseño, dependerán de los parámetros del oleaje. Las olas comenzarán a romper cuando alcancen una cierta

profundidad en la columna del agua (h_{reef}) que dependerá, a su vez, de la altura (D) que posean los arrecifes. Por lo tanto, la razón entre la altura de la estructura (D) y la profundidad de la columna de agua en el punto de ruptura (h_{reef}) se define como la altura relativa (D_{rel}):

$$D_{\text{rel}} = \frac{D}{h_{\text{reef}}} \quad (12)$$

La altura de las olas y su distancia de ruptura son influenciadas no sólo por la altura de las estructuras, sino también por su ancho. Un arrecife muy estrecho, colocado perpendicularmente a la costa, no tendrá prácticamente ningún efecto sobre el oleaje que se propague sobre él. La pregunta que se genera es qué tan ancha necesita ser la estructura para tener suficiente influencia sobre el oleaje o, en otras palabras, cuál es la anchura mínima que debe tener una estructura para focalizar las ondas que se propaguen sobre éstas.

En contraste, es posible que una anchura extremadamente grande no genere ningún efecto adicional en la focalización del oleaje. Una estructura muy amplia no ocasionaría un pico de ruptura del oleaje como se desea, sino más bien produciría en una sección extendida a lo largo de la cresta de la ola.

De esta manera, la anchura óptima para una estructura será alcanzada cuando se genere un equilibrio entre la mínima dimensión (por razones económicas) y la máxima eficiencia posible para enfocar la energía del oleaje. Lo más probable sea que encontrar la dimensión ideal dependa de la longitud de onda. Las estructuras de mayor anchura focalizarán el oleaje incidente en mayor grado que las estrechas hasta un cierto límite y, a su vez, esto provocará que las olas rompan a una mayor distancia de la costa, donde la longitud de onda es también mayor. La razón entre la anchura arrecifal (W)

y la longitud de onda en el al punto de ruptura (λ_{reef}) es lo que se denomina anchura relativa (W_{rel}):

$$W_{\text{rel}} = \frac{W}{\lambda_{\text{reef}}} \quad (13)$$

Al propagarse el oleaje hacia la costa éste comienza a sentir fondo a una cierta profundidad de la columna del agua, dependiendo del periodo de la ola, y, por lo tanto, de su longitud de onda. Cuanto mayor sea la longitud que posea la estructura, el oleaje será influenciado más pronto por ésta. La razón entre la longitud estructural (Λ) y la longitud de onda en el punto de rompiente (λ_{reef}) se denomina como longitud relativa (Λ_{rel}):

$$\Lambda_{\text{rel}} = \frac{\Lambda}{\lambda_{\text{reef}}} \quad (14)$$

Según Dally (1989) una ola surfeable es aquella sobre la cual un surfista puede mantener una velocidad superior o igual a la velocidad de avance lateral del vórtice sobre el frente de onda. Para que esto sea posible, la ola no debe romper simultáneamente a lo largo de todo el frente. Si esto sucede, se dice que la ola cierra, pues el *peel angle* es demasiado pequeño. Este parámetro fue propuesto por Walker y Palmer (1971) y quizás sea el parámetro más determinante en la surfeabilidad de una rompiente. El *ángulo de ruptura* (α) (o *wave peel angle*) se define como el ángulo entre la línea de rotura y la tangente del frente en el punto de rotura (Fig. 3). Ángulos pequeños producen olas que rompen longitudinalmente muy rápido, los valores próximos a $\alpha = 0^\circ$ producen olas en las que todo el frente rompe al mismo tiempo, imposibilitando el desplazamiento del surfista a través del mismo. Ángulos altos de rotura generan olas que rompen longitudinalmente más despacio. Si éste es próximo a los $\alpha = 90^\circ$ a, el surfista experimentará

una velocidad de desplazamiento demasiado lenta, de manera que la rompiente no resulta surfeable.

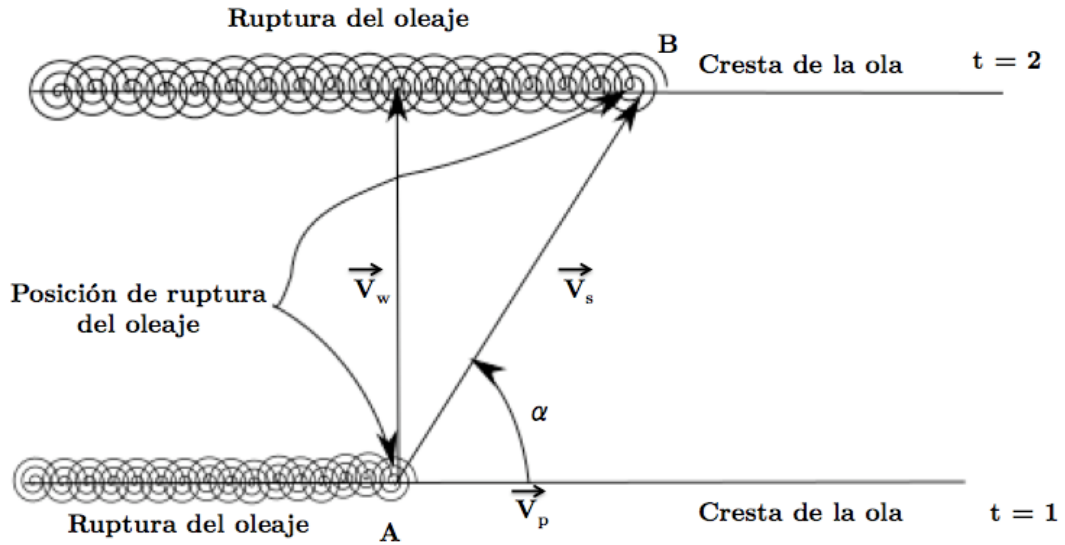


Figura 3: Representación esquemática del ángulo de rotura propuesta por Walker (1974). α es el ángulo de rotura, $\vec{V}_w$ es la celeridad de la onda, $\vec{V}_s$ la velocidad que experimenta el surfista y $\vec{V}_p$ la velocidad de ruptura.

Con la intención de explicar este parámetro se presenta la figura (4). En ella se ha señalado el vector de celeridad de la onda ($\vec{V}_w$) y la velocidad de rotura longitudinal del frente ($\vec{V}_p$). La suma de estos dos vectores indica la velocidad de desplazamiento que experimenta el surfista ($\vec{V}_s$) y el peel angle (α). En la imagen (4) se pueden apreciar 3 frentes de onda que rompen hacia la izquierda (según el punto de vista del surfista). Al observar el tramo de espuma blanca de las olas rotas, se distinguen tres secciones en función de los diferentes ángulos de rotura que las olas forman al avanzar hasta la línea de costa. El primer tramo, $\alpha_1 \approx 25^\circ$ a corresponde a la zona de inicio de la rotura; es una sección rápida que requiere alcanzar una alta velocidad. El siguiente tramo, $\alpha_2 \approx 45^\circ$ corresponde a la segunda sección, ésta mucho más

lenta y maniobrable que la anterior. El último tramo, $\alpha_3 \approx 30^\circ$ corresponde al final del recorrido, ya que el frente de ola a partir de este punto comenzará a alcanzar una dirección paralela al contorno de tierra con un α próximo a los 0° , por lo que la ola deja de ser surfeable.

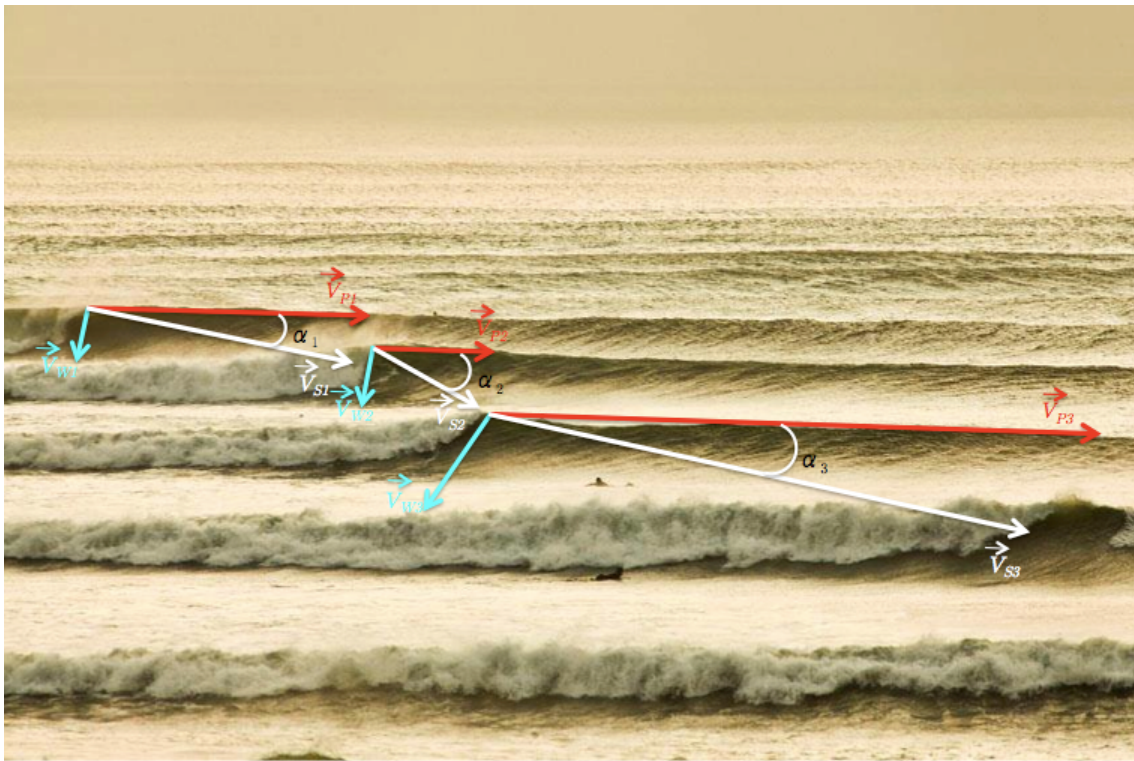


Figura 4: Diferentes ángulos de rotura para el famoso *spot* peruano de Chicama. Se puede observar el vector celeridad de onda ($\vec{V}_w$) en cian; el vector velocidad de rotura longitudinal del frente ($\vec{V}_p$); la velocidad de desplazamiento del surfista ($\vec{V}_s$); y ángulo de rotura ó peel angle (α).

Para finalizar, en relación a la forma de rotura, que una ola rompa con mayor o menor peralte depende fundamentalmente de la pendiente del fondo, la altura y el periodo asociados. Galvin (1968) describió y clasificó la rotura del oleaje en cuatro categorías (Fig. 5) de vital importancia desde el punto de vista del surfista, éstas son:

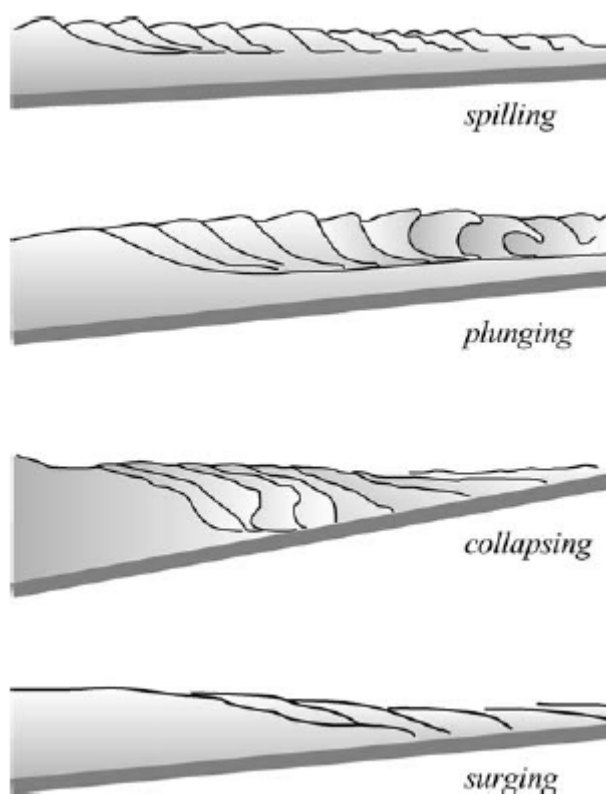


Figura 5: Perfiles de distintos tipos de rompientes obtenidos a partir de fotografías instantáneas generadas por Galvin (1968).

- Derramante o *spilling*: Este tipo de rotura ocurre cuando la cresta de la ola se desmorona sobre el frente, cuyo peralte es bajo, siendo frecuente cuando el fondo es muy tendido. Olas que rompen en *spilling* son surfeables, aunque su escaso peralte no permite alcanzar velocidades elevadas; por ello, son adecuadas para la iniciación en el surf. Los surfistas utilizan el adjetivo de olas *fofas* o *aguadas* para referirse a este tipo de rotura.

- Tubo o *plunging*: Este tipo de rotura ocurre cuando la cresta de la ola rompe sobre la base del frente generando la forma característica tubular (vórtice). El elevado peralte que alcanzan estas olas permite al surfista generar altas velocidades. Además, posibilita realizar la maniobra reina del surf, el tubo. Los surfistas conocen este tipo de rotura como *hueca*, siendo

ésta la forma preferida por la mayoría.

- Colapso o *collapsing*: Este tipo de rotura ocurre cuando la ola permanece peraltada hasta que su frente colapsa, formando una estructura turbulenta irregular. Este régimen es frecuente en los fondos de arrecife, cuando la marea está demasiado baja y el fondo no está suficientemente sumergido. Este tipo de rotura no se considera surfeable, aunque aquellas olas con rotura intermedia entre tubo y colapso son las preferidas en la modalidad de bodyboard.

- Oscilación o *surging*: Ocurre cuando la ola, debido a la elevada pendiente del fondo, no llega a romper, de manera que la superficie del agua simplemente oscila al llegar al contorno de tierra. Este régimen es no surfeable.

Galvin (1968) establece un parámetro que permite estimar la forma de rotura (G_b), al conocer previamente los parámetros del oleaje, mediante el estudio de las imágenes en movimiento en el canal de olas. Este, viene definido como:

$$G_b = \frac{H_{reef}}{g T^2 \tan \beta} \quad (15)$$

Donde H_{reef} es la altura de ola en el punto de ruptura, g es la aceleración de la gravedad, T es el período del oleaje y $\tan \beta$ es la pendiente del fondo. La interpretación física de este parámetro expresa que el tipo de rotura depende de la relación entre el peralte de la ola y la pendiente del fondo. El subíndice “b” denota la ola en el punto de ruptura. Los límites sugeridos para los tipos de ruptura son: surging cuando $G_b < 0.003$, plunging para $0.003 < G_b < 0.068$ y spilling con $G_b > 0.068$ (Walker, 1972). Cabe aclarar que estos valores fueron obtenidos experimentalmente para olas incidiendo sobre un

fondo plano, ortogonalmente sobre el mismo en un canal de olas. Sólo las olas que rompen en forma entre derramante y tubo son adecuadas para el surf (Walker, 1972), pero para que una ola sea clasificada como *world class*, ha de presentar secciones largas de tubo (Mead y Black, 2001c).

I. Introducción

Estudiar el oleaje resulta de sumo interés para la oceanología, así como para la ingeniería oceánica y costera. Entre sus principales objetos de análisis se encuentran la comprensión y predicción del clima, el estado del mar, y su interacción con el medio que lo rodea. La relación del oleaje con las actividades humanas es de vital importancia, y con frecuencia es pertinente modificar sus propiedades con diferentes finalidades, tales como la reducción de la erosión o el asolvamiento, la protección de estructuras costeras, la generación de zonas de calma y el enfoque de la energía del oleaje para aumentar el potencial energético de una zona o generar una rompiente adecuada para la práctica del surf. Uno de los métodos comúnmente utilizados para la modificación de las características del oleaje es la colocación estratégica de estructuras sumergidas que forman obstáculos a la propagación del oleaje.

El oleaje es producido por el viento al soplar sobre la superficie del mar. Éste puede propagarse grandes distancias desde las zonas de generación hasta alcanzar la costa. A medida que las olas se acercan al margen litoral, experimentan diferentes efectos como resultado de su interacción con el fondo.

Cuando el oleaje comienza a propagarse en aguas someras cercanas a la costa, ciertas propiedades físicas tales como su amplitud, su longitud de onda y su dirección se verán afectadas por el cambio en la profundidad. Este fenómeno es conocido como *asomeramiento*. En particular, al fenómeno que origina variaciones de la velocidad de fase y cambios en la dirección de propagación a lo largo de las crestas de las ondas armónicas, debido a la

variación de la velocidad con la profundidad, se le denomina *refracción* (Holthuijsen, 2010).

Durante el asomeramiento, producto de la fricción con el fondo, la longitud de onda disminuye y, por el principio de conservación de masa, la altura aumentará hasta un punto crítico donde la pendiente es demasiada aguda. Al pasar este punto crítico, el oleaje se inestabilizará y romperá. En otras palabras, la disminución de la velocidad de propagación es compensada con un aumento en la densidad de energía con el fin de mantener el flujo de energía constante. Con una batimetría uniforme, la velocidad disminuiría gradualmente y de forma homogénea a lo largo de toda la cresta. Con un fondo desuniforme, debido al principio de refracción, se generará una convergencia o divergencia del oleaje, lo cual inducirá en función de las características geomorfológicas de la costa, que la energía del oleaje se concentre en los cabos y salientes mientras que en las bahías se disperse (Longuet -Higgins y Stewart, 1964).

De forma análoga a la refracción que experimenta el oleaje, cuando un rayo de luz pasa de un medio de propagación a otro con diferentes propiedades ópticas, también puede ocurrir refracción. En estas circunstancias, la velocidad del haz de luz sufre variaciones y su trayectoria se modifica de acuerdo con el cambio experimentado. Bajo este principio, las lentes se construyen con materiales capaces de cambiar la trayectoria óptica de forma que, dependiendo de su diseño, pueden focalizar o difuminar un determinado rayo de luz incidente. De manera equivalente, las estructuras sumergidas o arrecifes que ocasionan convergencia de la energía del oleaje, se denominan arrecifes focalizantes.

Existen numerosos propósitos para la construcción de arrecifes artificiales; sin embargo, el uso principal de los arrecifes focalizantes ha sido mejorar las condiciones para la práctica del surf. En los últimos años, se han construido diferentes arrecifes con este propósito, tal como es el caso de Australia en Perth y en la Gold Coast (construido con el doble propósito de controlar la erosión costera y mejorar las condiciones de surf). Además, dichos arrecifes han demostrado ser efectivas estructuras de protección costera y, por ende, poseen un valor ecológico y económico adicional (Jackson *et al.*, 2007).

Los arrecifes focalizantes pueden ser construidos a mayor profundidad que el punto de rompiente natural, como pequeñas estructuras compactas, comparadas con los arrecifes convencionales, y ser ajustados o desmontados en respuesta a cambios en las condiciones climáticas cambiantes, lo cual sería ventajoso en zonas propensas a las tormentas para evitar impactos ambientales indeseables.

I.1. Beneficios del uso de arrecifes artificiales

Los arrecifes artificiales, situados dentro de la zona costera, tienen un gran potencial en relación al desarrollo de actividades acuáticas tales como la práctica del surf. Este deporte se presenta actualmente como una marca de identidad cuyo poder de atracción turística crece exponencialmente mientras que, comparativamente, existen pocos lugares con la disponibilidad de condiciones meteorológicas y oceanográficas favorables para su desarrollo. Este desbalance genera una alta presión sobre los sitios de surf, los cuales se ven agravados principalmente por la creciente popularidad en este deporte,

así como por la construcción de diversos proyectos marítimos y terrestres que convierten a las playas naturales en zonas inadecuadas para su práctica. Una solución viable para mitigar la creciente demanda es la creación de nuevas zonas surfeables, mediante la construcción de arrecifes artificiales.

Además, en relación a la práctica de otras actividades acuáticas, la implementación de arrecifes artificiales podría proporcionar zonas de baño más seguras para sus usuarios, debido a que la ruptura del oleaje se produciría a mayor distancia de la línea de costa, lo que conllevaría a un incremento en la disipación de la energía del oleaje que llega a la playa. Asimismo, se generarían zonas de calma en torno al área de surf, ya que la energía se concentrará en esta última. Además, luego de su colocación, podrían convertirse en un hábitat marino apropiado para el crecimiento de organismos marinos y el repoblamiento de zonas muertas (Mead y Black, 1999). El desarrollo de la vida marina apoyaría a su vez otras actividades, tales como la pesca deportiva y el buceo.

El surf ha pasado de ser un *hobby* de playa a una industria multimillonaria. Esta práctica ha registrado crecimientos records en los últimos veinte años y se estima que ha alcanzado escalas millonarias. Las cifras actuales sitúan a la población surfista mundial entre diez y veinte millones de individuos, con tasas de crecimiento anuales de entre 12 % y 16 % (Buckley, 2002). Además, hoy en día es un deporte reconocido por el Comité Olímpico Internacional y es probable que en un futuro se convierta en un deporte olímpico, por lo que su popularidad aumentaría incluso más. Por estas razones, los beneficios económicos asociados con el turismo del surf se están comenzando a considerar con seriedad.

Por otro lado, la construcción de estructuras arrecifales conlleva una gran rentabilidad vinculada al motor económico del turismo y, en particular, a la práctica de actividades tales como el surf. El turismo es el sector económico legítimo más grande del mundo, que supone el 10 % del PIB mundial y genera uno de cada doce empleos alrededor del globo (CREST, 2008). Diversos estudios han demostrado que la práctica de esta actividad contribuye significativamente a la economía local (Lazarow y Nelson, 2007). Por ejemplo, el verdadero valor económico neto anual que conlleva la visita de los 421,431 surfistas en Maverick (California, EE.UU) se estima en \$23.8 millones de dólares y en Mundaka (País Vasco, España) representa unos €4.5 millones por cada cuarenta mil deportistas.

Australia, Nueva Zelanda y Reino Unido son, hasta la actualidad, los países más desarrollados en cuanto al desarrollo del turismo del surf. Al menos tres arrecifes artificiales (Narrowneck, Cables y Bagarra) se han construido, así como un gran número de proyectos se encuentran en desarrollo a lo largo de la costa australiana con el objetivo de desarrollar el mercado turístico general como también surf. Se estima, por ejemplo, que el arrecife construido en Narrowneck tiene un impacto económico de 10 millones de euros al año en la zona y produjo la creación de 60 puestos de trabajo a tiempo completo y 30 a tiempo adicional (Bournemouth.gov, 2006). En el año 2002 se estimó que el arrecife artificial propuesto y dedicado al surf en el Monte Maunganui (Nueva Zelanda), generaría 500,000 dólares adicionales de gastos locales anuales si se atrae a 50 surfistas más por día en los que se puede surfear. Además, se estimó que el arrecife Opunake, en la región Taranaki al sur (Nueva Zelanda), obtendría un gasto extra de 129,920 dólares en el primer año, y de 288,120, en el quinto. Este arrecife se propuso como

posible medio para salvar el turismo costero que se encuentra en declive en la zona, y que en un período de entre 15 a 20 años observó pérdidas de 200 a 300 puestos de trabajos. (Tourism Resource Consultants, 2002).

Las tormentas asociadas a oleaje de alta energía pueden generar una intensa erosión costera y, a su vez, producen un retroceso de la línea de costa. Para la estabilización de playas y la conservación de infraestructuras, bienes, urbanizaciones y caminos, comúnmente se utilizan estructuras de protección costera tales como espigones y rompeolas en la zona litoral (Black, 1999). La utilización de arrecifes artificiales puede ser considerada como una alternativa viable de protección costera. Un arrecife artificial situado a poca distancia de la costa disiparía el oleaje entrante antes de que éste llegue a la línea de costa, lo que reduciría considerablemente el impacto de las olas sobre el litoral. Además, dichas estructuras son capaces de actuar como trampas de sedimento y, por lo tanto, pueden contribuir a la prevención de la erosión costera, y así generar una alta rentabilidad en playas que requieren de regeneración artificial. Tales argumentos se utilizaron, por citar un ejemplo, para justificar la construcción del arrecife artificial de surf Narrowneck en la Gold Coast de Australia (Jackson *et. al.*, 2007).

En general, los arrecifes pueden cumplir funciones semejantes a los espigones y rompeolas, pero son a su vez son más compactos y versátiles. Además, debido a que se encuentran por debajo de la superficie del mar, minimizan el impacto visual y conservan el valor turístico, tornándose más aceptables en la zona que se quiera proteger.

I.2. Antecedentes

La zona a partir de la cual el oleaje tiende a desestabilizarse y romper es conocida como *zona de surf*. El surf se desarrolla dentro de esta zona y estará condicionado principalmente por diferentes condiciones de marea, la configuración batimétrica y las características propias del oleaje. Los mejores lugares para la práctica del surf suelen estar vinculados a zonas con bruscos cambios batimétricos. Los proyectos de ingeniería costera pueden mejorar o perjudicar su práctica dependiendo de la magnitud, criterios y propósitos de diferentes diseños estructurales en los arrecifes.

Históricamente, se han producido controversias entre la comunidad surfista y diferentes obras de desarrollo costero, algunas de las cuales han mejorado el surf, mientras que otras han fracasado por causa de la erosión de las zonas donde se desarrollaba este deporte. Ejemplos exitosos de ingeniería costera relacionado con el surf son Delray Beach, Florida, donde se llevó a cabo la regeneración de playas mediante la generación de bancos de arena offshore e irregularidades en la batimetría de la zona de surf que mejoró de manera significativa las condiciones del oleaje natural (Pierro y Benedet, 2008); así como en Stacks, Baja California, México, donde mediante la construcción de un rompeolas portuario, sumado al dragado de un canal de navegación, nació un punto de ruptura de izquierda.

Desde los años 50's ha crecido considerablemente el interés hacia las actividades oceanográficas por parte de los científicos, investigadores e ingenieros que se han volcado al estudio de las olas, a fin de proporcionar criterios y métodos para el entendimiento y la previsión del oleaje (Losada, *et al.*, 1997).

El estudio de la variación de la altura del oleaje que se aproxima a la costa tiene gran importancia tanto científica como económica por su implementación en los diferentes campos de la oceanografía, ingeniería costera, procesos litorales, obras portuarias, protección de playas y estructuras costeras (Ayorzogoitia, 1994).

En países como Japón, Holanda y España, se han implementado estructuras como los rompeolas separados de la costa para la estabilización y protección en contra de la erosión. La interacción del oleaje contra la estructura provoca que la energía de la ola se refleje, disipe o transmita dependiendo de las características del oleaje, del tipo de rompeolas y de la geometría de la estructura (Téllez, 2003).

Nelsen (1996), a finales de los años '80 y junto a la Fundación Surfrider, propuso la construcción un arrecife de surf artificial llamado "Pratte" en Santa Mónica, California, finalizando su construcción en el año 2000. Este arrecife fue el primero en ser construido en EE.UU. y el segundo en el mundo. Su construcción se hizo mediante uso de geotextiles con forma piramidal y pendiente abrupta en la zona de barlovento y una pendiente más suave en el área de sotavento, con un área de aproximadamente total de 1250 m² y altura máxima de 6 m. Desafortunadamente este arrecife no cumplió con las expectativas de diseño esperadas y fue retirado en el 2010.

West (2002) trabajó con una estructura arrecifal con forma trapezoidal perpendicular a la dirección del oleaje, encontrando que debe tener mayor longitud lateral (crossshore) que transversal (alongshore) con medidas de 40 m de largo por 10m de ancho por 1.5 m de alto.

Pattiaratchi (2003) instaló en Kovalam, India, en el año 2010, un arrecife geotextil de cien metros de largo, mostrando resultados prometedores.

También se observan óptimos resultados en Cable Station, Australia, donde, a partir del año 1999, se modificó la estructura arrecifal mediante el uso de geotextiles. De esta forma, se mejoró la capacidad de surf en la zona con una mayor frecuencia de incidencia del oleaje el cual osciló entre 0.5 m y 3.5 m.

Las investigaciones realizadas acerca de obras de protección a nivel internacional son variadas, aunque en México han sido pocas. Uno de los primeros trabajos es el de García-Flores (1988), donde realiza un estudio experimental sobre rompeolas sumergidos en un tanque de olas en el que evalúa el comportamiento de dos prototipos rígidos (sección transversal trapezoidal) y uno impermeable (sección transversal rectangular).

Rodríguez (2006) desarrolló por primera vez en Ensenada el concepto de arrecife utilizado en este trabajo, analizó diferentes formas de lente para determinar la geometría más eficaz en convergencia y divergencia de la energía del oleaje relacionado con la protección de playas, mediante el uso de simulaciones numéricas en un campo bidimensional. Se utilizaron diferentes tipos de tamaños de rompeolas, tirantes de agua (3.5 y 4 m), períodos (3 a 8 segundos) y amplitudes (0.5 a 1.8 m). Los rompeolas con formas de lente biconvexos enfocaron mejor la energía en un punto, seguido del plano convexo, los de forma menisco cóncavo no enfocaron energía, mientras que los cóncavos presentaron una reflexión de energía muy grande, pudiéndose estos últimos utilizar en la restauración o conservación de playas.

Pijoan-Velasco (2008) realizó un análisis por medio de Indicadores Ambientales para conocer la aptitud del surf, concluyendo que Ensenada cuenta con una gran riqueza y diversidad de oleaje para el surf, destacando las rompientes de San Miguel, Tres Emes, Stacks e Isla Todos Santos.

A partir del presente trabajo, que analiza el efecto focalizante de

diferentes tipos y formas estructurales así como su capacidad para mejorar las condiciones para la práctica del surf en Playa Hermosa, se puede apreciar que el tema relacionado con los arrecifes artificiales es en sí mismo relativamente nuevo, comparado con los numerosos estudios sobre oleaje a lo largo del tiempo, como es el caso de la primera patente registrada para la conversión de energía eléctrica a partir del oleaje hace 214 años. Son muchas las personas que dedican gran parte de su día a día a la búsqueda de nuevos sistemas para crear olas cada vez más eficaces (Rivas, 1992).

II. Objetivos

II.1. Objetivo general

- ♦ Estudiar de forma numérica el enfoque de la energía del oleaje causado por estructuras sumergidas para fines recreativos en Playa Hermosa, Baja California.

II.2. Objetivos específicos

- ♦ Caracterizar la gama de dimensiones, posiciones y ubicaciones que produzcan un efecto significativo en la focalización del oleaje mediante el uso de arrecifes artificiales.
- ♦ Determinar la configuración arrecifal óptima y su efecto sobre el oleaje incidente para obtener la mayor rentabilidad práctica y económica en Playa Hermosa.
- ♦ Evaluar con alta resolución, los diferentes tipos de rompientes del oleaje que genera la estructura óptima elegida en Playa Hermosa.

III. Área de estudio

La Bahía de Todos Santos se encuentra ubicada en la costa Noroeste de la península de Baja California, entre los $31^{\circ}40'$ y $31^{\circ}56'$ de latitud Norte y $116^{\circ}36'$ y $116^{\circ}50'$ longitud Oeste. Posee una forma trapezoidal (de 18 km de largo por 15 km de ancho) y un área aproximada de 24,090 hectáreas. La delimitan unos límites naturales específicos que son: Punta San Miguel al Norte, las playas arenosas al Este, la Península de Punta Banda al Sur y las Islas Todos Santos al Oeste.

Playa Hermosa se encuentra a 7 km al Sur del centro de la ciudad de ensenada. Se extiende desde el espigón El Gallo hasta la boca del Estero de Punta Banda (Fig. 6). La playa consta de un pendiente suave, dimorfismo en el perfil de playa en contextos transgresivos-erosivos según la estación del año y campos de dunas bien desarrollados en la playa supramareal, producto del transporte eólico hacia tierra del material formador de la playa (Cruz-Falcón y Mancilla-Pereza, 1991).

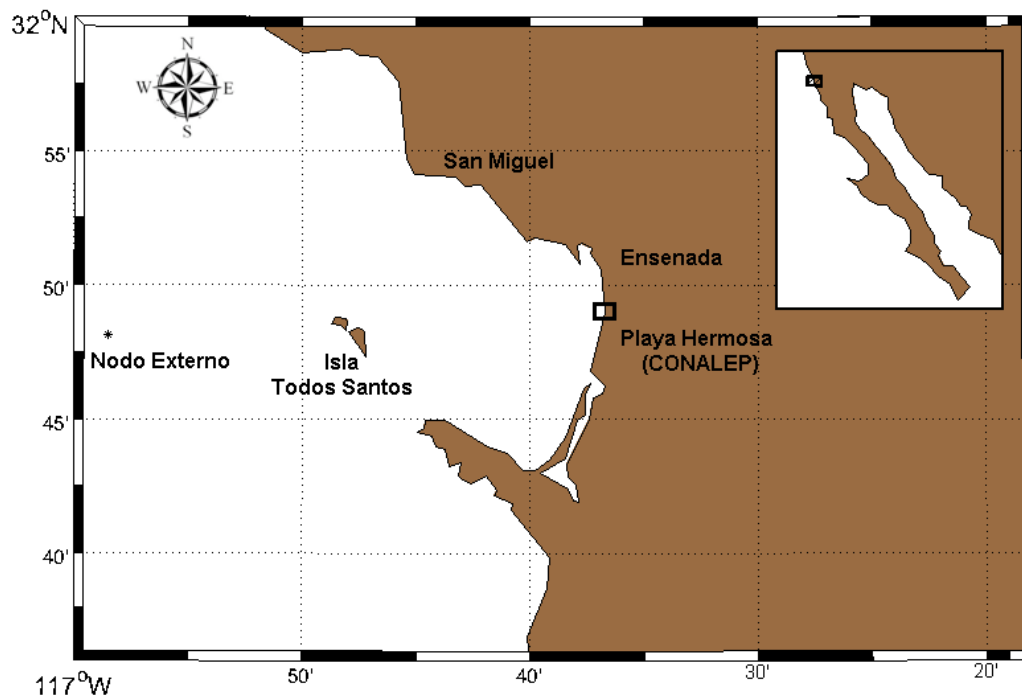


Figura 6: Localización del área de estudio

III.1. Oleaje

La Bahía de Todos Santos se encuentra expuesta al oleaje proveniente del mar abierto a través de una ventana de 30 grados en el Noroeste entre Punta San Miguel y la Isla Todos Santos y otra, de menor magnitud al Suroeste, entre Punta Banda y la Isla (Fig. 6).

El Pacífico mexicano se encuentra dominado por oleaje tipo swell que presenta un carácter estacional marcado, propagándose en invierno desde la zona de generación proveniente del Pacífico Norte Extratropical (ETNP) y en verano, desde el Pacífico Sur Extratropical (ETSP) hasta incidir en la costa bajacaliforniana (Alves, 2006).

De esta manera se puede encontrar, según su origen, tres clases diferentes de oleaje en Playa Hermosa:

- Oleaje originado en el hemisferio Norte predominando en los meses de invierno (octubre-marzo) que se produce por los vientos asociados a las tormentas extratropicales en altas latitudes (Golfo de Alaska); las tormentas subtropicales que se originan al Norte de Hawái (TENP) y que se desplazan a latitudes medias, así como los vientos fuertes en el Norpacífico Este. Durante los meses de verano disminuyen las tormentas extratropicales, pero se inicia la temporada de huracanes en la costa Oeste de México.

- Oleaje originado en el Pacífico Sur, por tormentas en latitudes altas. Éste oleaje domina durante los meses de verano (abril-junio), junto con el oleaje que generan los huracanes en la costa Este de México, es de menor altura que el originado en el hemisferio Norte ya que la zona de generación se encuentra más alejada, por lo que el oleaje de invierno es típicamente más energético.

- Oleaje local generado por las tormentas que se desplazan en la región, así como por los fuertes gradientes de presión que inducen vientos fuertes, brisas diurnas y eventos de vientos Santana que soplan de tierra a mar. El oleaje local puede ser energético aunque comúnmente es de menor magnitud comparado con los mencionados anteriormente.

III.2. Nivel del mar

Las variaciones en el nivel del mar más importantes a considerar en el diseño de una estructura sumergida son las mareas, la sobreelevación por tormenta (*storm surge*) y los cambios mensuales y anuales en el nivel medio del mar.

Las mareas son los cambios en el nivel del agua del océano causados principalmente por las fuerzas astronómicas de la luna y en menor medida del sol. La marea que se observa en Ensenada es de tipo mixta y el rango de marea máximo reportado es de 2.6 m, por tanto, Playa Hermosa es una playa meso-mareal (Plaza-Flores, 1979).

La sobreelevación por tormenta (*storm surge*) se define como la elevación en el nivel del mar que excede la predicción de la marea y se da localmente; este fenómeno ocurre principalmente debido a vientos de gran intensidad y, en menor grado, por la baja en los registros de presión barométrica generalmente asociados a tormentas. La variación registrada a este cambio en la región sur de California rara vez excede los 30 cm (Flick, 1998).

La elevación en el nivel del mar reportado mensual y anualmente se encuentra relacionada con la temperatura del agua y un pequeño efecto en la presión atmosférica por lo que estas variaciones son más altas en otoño que en primavera (Flick y Badán, 1989).

III.3. Batimetría

La Bahía de Todos Santos se caracteriza por la presencia de aguas poco profundas, con aproximadamente un 80% del área con profundidades menores a 50 metros. La entrada Noroeste cuenta con un cañón submarino de 12 kilómetros de anchura con profundidades próximas a 50 metros y bajos de 6 metros. La plataforma es rocosa, con depósitos de gravas y arena. La entrada Suroeste de 6 kilómetros de ancho cuenta con una pendiente pronunciada

acentuándose conforme nos acercamos a las islas. A un kilómetro de la isla Sur (en dirección de Punta Banda) la profundidad alcanza los 150 metros y a dos kilómetros se alcanzan 400 metros. En Punta Banda la isóbata de 50 metros se encuentra aproximadamente a 3 kilómetros de costa, a partir de la cual, conforme nos alejamos de costa, la pendiente varía bruscamente hacia el borde del cañón haciéndose muy pronunciada. (Ulloa-Torres, 1989).

IV. Método

En el presente trabajo se llevaron a cabo estudios de simulación numérica computacional para evaluar diferentes formas y dimensiones estructurales que han producido efectos significativos en la focalización del oleaje con la mayor rentabilidad práctica y económica y, además, se evaluó el efecto de éstas en relación a los diferentes patrones de ruptura del oleaje en Playa Hermosa, Baja California.

Con este propósito, se extrajo la climatología del oleaje en aguas oceánicas externas a la bahía de Todos Santos (nodo externo) del análisis retrospectivo IOWAGA, y se propagaron dichos parámetros hacia la zona de estudio (nodo interno) frente a Playa Hermosa mediante el modelo de oleaje para zonas costeras SWAN con la finalidad de realizar un gran número de simulaciones computacionales a través del modelo numérico REF/DIF, y determinar, de forma numérica, el enfoque de la energía del oleaje que causaron diversas estructuras sumergidas diseñadas con el programa Google SketchUp. Para finalizar, se eligió la configuración estructural que produjo mejores resultados y se estudió en alta resolución el rompimiento que generó por medio del modelo numérico FLOW-3D.

IV.1. Campo del oleaje en aguas profundas

Para caracterizar adecuadamente el oleaje, es conveniente contar con los datos correspondientes al mayor periodo posible. Esta caracterización de largo plazo es comúnmente conocida como climatología del oleaje, ya que

pretende describir las tendencias estadísticas del oleaje durante un periodo largo. La climatología del oleaje (periodo, altura y dirección) se empleó para identificar los regímenes de oleaje típicos de esta región, separándolos según la media de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo.

Los datos de oleaje empleados para generar la climatología del oleaje en el nodo externo (aguas profundas) se obtuvieron del análisis retrospectivo IOWAGA (Integrated Ocean wave for geophysical and other applications) desarrollado por el Ifremer (French Research Institute for Exploitation of the Sea). Para el análisis retrospectivo se utilizó el modelo numérico WAVEWATCH III® (Tolman, 2009), un modelo de oleaje de tercera generación desarrollado por la NOAA / NCEP que resuelve la ecuación de balance de acción para espectros direccionales de fase aleatoria (Ec. 16)

$$\frac{D}{Dt} N = \frac{1}{\sigma} (S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}) \quad (16)$$

donde $N = E / \sigma$ es la acción del oleaje, E es la energía del oleaje (energía), σ es la varianza de la superficie y los términos de la derecha representan el cambio en la acción del oleaje inducido por: el suministro de energía por el viento (S_{in}), las interacciones no lineales entre componentes del oleaje (S_{nl}), la disipación del oleaje por el rompiendo en aguas profundas (*white capping*) (S_{ds}) y, por la interacción de las olas con el fondo (S_{bot}).

En dicho modelo numérico, las parametrizaciones de los términos fuente de suministro de energía por el viento y de disipación del oleaje en aguas profundas son dadas por Ardhuin *et al.*, (2010), donde se incluye la corrección por disipación del swell propuesto por Rascle y Ardhuin (2013). Además, éste se forzó con vientos del CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) (Saha *et al.*, 2010) en un dominio en escala global con una

resolución de malla de 0.5° y un sistema de mallas múltiples (Tolman, 2008) para proporcionar una mayor resolución en diferentes regiones.

Para este trabajo se utilizó un nodo del domino PACE (submalla del Pacífico Este) que se extiende de Norte a Sur a lo largo de toda la costa del Pacífico Este y 200 km desde la costa hacia aguas oceánicas, con resolución espacial de 10', tanto en latitud como en longitud. Las series de tiempo contienen datos de salida cada 3 horas para el periodo comprendido del 01 de enero de 1999 al 31 de diciembre de 2012. Para obtener la climatología del oleaje en el área de estudio, se analizaron los datos de altura significativa, periodo del pico espectral y dirección del pico espectral de dicha serie de tiempo en el nodo situado a 20 km del Oeste de la isla Todos Santos (Baja California) localizado en los $31^\circ 48'$ de latitud Norte y $116^\circ 59'$ de longitud Oeste (Fig. 6) para la media de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo.

IV.2. Campo del oleaje en la Bahía de Todos Santos

Para la simulación computacional del campo de oleaje y su evolución espacio-temporal en la Bahía Todos Santos se utilizó el modelo numérico SWAN (Simulating WAVes Near-shore) Cycle IV, versión 40.72ABCD (Booij., 1999). Se trata de un modelo de tercera generación para obtener estimaciones realistas de los parámetros del oleaje en las zonas costeras con determinadas condiciones de viento, batimetría y corrientes. El modelo se basa en la ecuación de balance de acción de ola con sus respectivos términos fuentes y sumideros (Ec. 16).

De los términos fuentes, Battjes (1994) argumenta que la refracción, el asomeramiento, el rompimiento por asomeramiento de olas y las interacciones entre triadas, son los procesos que dominan en aguas someras. Por esta razón, el modelo puede ser utilizado en aguas someras.

Para este trabajo, el modelo SWAN se utilizó en modo estacionario bidimensional y de tercera generación. Para lograr una buena representación del campo de oleaje, se discretizó el dominio en mallas triangulares con resolución espectral variable en 72 direcciones, lo cual equivale a 5 grados de resolución por banda. La resolución en frecuencia sobre la que se trabajó, discretizando en forma logarítmica 41 frecuencias, fue de 2.5 a 25 segundos de período ($T=1/f$). Con base en la climatología del oleaje de aguas profundas obtenida del nodo externo, se generó el campo de oleaje de toda la Bahía Todos Santos para tres condiciones de oleaje: a) media de verano, oleaje de menor altura promedio; b) media de invierno; y c) la máxima de la serie de tiempo, evento extremo de altura máxima dentro de la serie de tiempo. Para los tres escenarios se obtuvieron los parámetros puntuales del oleaje para la coordenada localizada en los $31^{\circ} 49' 37.52''$ de latitud Norte y $116^{\circ} 36' 50.79''$ de longitud Oeste que representa la frontera para las simulaciones en Playa Hermosa.

IV.3. Diseño estructural

Las estructuras arrecifales fueron conceptualizadas y modeladas en alta precisión mediante la herramienta computacional de diseño y dibujo en 3D: Gooogle SketchUp 2014. Entre los distintos programas de dibujo en 3D, se eligió ésta como vehículo de aprendizaje, principalmente porque dispone de versiones de descarga totalmente gratuitas y, además, porque puede producir objetos en 3D de manera intuitiva, visual, rápida y fácil. Este programa, perteneciente a la compañía Google, dispone de una interfaz totalmente única, donde la creación, manejo y edición de elementos se hacen de manera diferente a cualquier otro software. Otra característica singular que lo hace un programa único es que no encaja dentro de la categoría de softwares de diseño asistido por computadoras o CAD (*computer-aided design*) como el Vectorworks, el ArchiCAD o el AutoCAD, por ejemplo; ni en la de los softwares 3D tradicionales (3D Studio, Maya, Cinema 4D y otros) y, además, es capaz de intercambiar datos entre varios programas del mismo segmento sin complicación alguna (Gaspar, 2014).

Gooogle Sketchup está escrito en el lenguaje *Ruby* y publica sus diferentes comandos para que los usuarios puedan escribir segmentos del programa para cambiar su funcionalidad. Sus resultados son conocidos como *plugins*. Existe una gran variedad de éstos con aplicaciones particulares. En nuestro caso, se ha utilizado el plugin *SketchUp STL*. Este formato de archivo informático de diseño asistido por computadora, ampliamente utilizado a través de diferentes interfaces de modelado, define geometrías de objetos en 3D y excluye información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD. Además, esta extensión proporciona funcionalidad de importación y exportación de archivos STL

hacia y desde SketchUp, para poder exportarlas fácilmente de SketchUp a STL, o importar un diseño STL y manipularlo dentro de SketchUp.

Otra extensión clave para el desarrollo del modelaje fue la herramienta *Sandbox*, que permite modificar objetos a través de una malla triangular irregular o TIN (*Terrain INterchangeably*, en la terminología de modelado de terrenos) (Google SketchUp, 2013).

De esta manera, mediante las herramientas descritas anteriormente, se replicaron a escala, según los planos de planta en 2D, diversos arrecifes artificiales que dieron mejores resultados a nivel global, dentro de los cuales se encuentran: *Brevard Florida* (Florida, EE.UU), *Cable Station* (Perth City Coast, Australia), *Jumeirah Reef* (Dubái, Arabia), *Lyall Bay* (Wellington, New Zealand), *Mount Maunganui* (Tauranga, New Zeland) y *Narrowneck* (Gold Coast, Australia) (Fig. 8)

Una vez diseñadas, se acoplaron a la batimetría del área de estudio para obtener un dominio único que se extendió desde los $31^{\circ} 49' 32.61''$ N a los $31^{\circ} 49' 42.45''$ N de latitud y de los $116^{\circ} 36' 39.35''$ W al $116^{\circ} 36' 50.79''$ W de longitud (malla batimétrica de 300 x 300 metros). Las estructuras fueron construidas a partir de la cota de -5 metros de profundidad (Fig. 7).

Con esto, posteriormente se corrieron los diferentes dominios en el modelo numérico de oleaje REF/DIF con los parámetros del oleaje determinados previamente con el modelo SWAN.

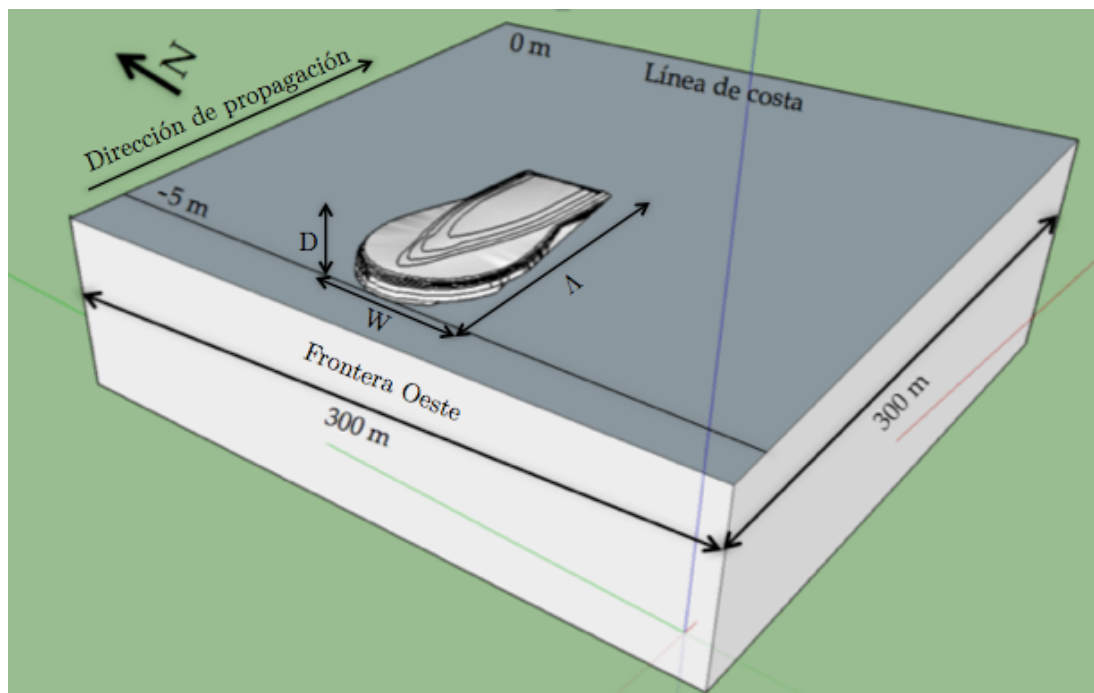


Figura 7: Dominio del área de estudio y batimetría. Se aprecia la estructura ubicada partir de la cota de -5 metros de profundidad. D, Λ y W son la altura, el ancho y el largo de la estructura, respectivamente.

IV.4. Determinación de la focalización del oleaje

Para determinar el efecto de las estructuras en el oleaje incidente, se utilizó el modelo numérico REF/DIF versión 2.5 desarrollado por el Departamento de Ingeniería Ambiental y Civil del Centro de Investigaciones Costeras Aplicadas de la Universidad de Delaware (Kirby y Dalrymple, 1994a).

El REF/DIF es un modelo numérico de estado estacionario basado en la solución por aproximación parabólica de la ecuación de pendiente suave. Este modelo predice patrones del oleaje cuando las ondas se ven afectadas por la refracción, difracción, asomeramiento, disipación de la energía por fricción y algunos efectos no-lineales.

De este modo, el oleaje puede ser modelado con REF/DIF en regiones donde la batimetría es irregular y la difracción es considerable. Por lo tanto, el modelo puede ser aplicado en áreas donde los rayos de las ondas convergen fuertemente debido al efecto de la focalización o cuando las zonas cóusticas son generadas por otros medios, y predecir de esta manera diferentes alturas de las olas. Sin embargo, cabe destacar que el modelo no incluye reflexión por lo que, en general, este fenómeno no es reproducido correctamente. Con esto, observamos que mediante el modelo REF/DIF se puede utilizar para observar cómo se comporta el oleaje al propagarse en aguas someras al interactuar con estructuras sumergidas como arrecifes artificiales para la práctica del surf.

La ecuación básica, en ausencia de la interacción del oleaje con la corriente, está dada por (Kirby y Dalrymple, 1983):

$$\frac{\partial A}{\partial y} i(\bar{k} - k) C_g A + \frac{\sigma}{2} A \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g}{\sigma} \right) - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left(C C_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma \frac{k^2}{2} D_{nl} |A|^2 A = 0 \quad (17)$$

Relación de dispersión lineal:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (18)$$

Es factible en REF / DIF describir al oleaje mediante la teoría de Stokes pero esto no es válido cuando el parámetro de Ursell (es decir, $U_r = H\lambda^2/h^3$, donde H , λ y h son la altura de ola, la longitud de onda y la profundidad del agua, respectivamente) es mayor a 40, es decir, cuando se propagan en aguas someras. Por lo tanto, la teoría de Stokes puede ser aplicada en REF/DIF, pero al utilizar la relación de dispersión desarrollada por Hedges, ésta ofrece una mejor aproximación en aguas poco profundas. La

celeridad de la onda bajo este contexto, según el modelo de Hedges, se aproxima al de una onda solitaria y en aguas profundas a la de una onda lineal. De esta manera, se puede combinar en REF/DIF ambos modelos dependiendo de la profundidad a trabajar; sin embargo, es recomendable utilizar el modelo de Hedges en aguas someras y el de Stokes en aguas profundas. Consecuentemente, en comparación con otras opciones, es con esta herramienta numérica que se puede abarcar una gama más amplia de profundidades, para proporcionar de esta forma una buena descripción de la propagación de las ondas antes de su ruptura.

En relación al criterio de ruptura, el modelo REF/DIF utiliza el propuesto por McCowan (1894) que ocurre cuando la relación entre de la altura de la ola y la profundidad de la columna de agua en la zona de rompiente es igual a 0.78. Después de iniciar la ruptura del oleaje, la energía disipada se da de la siguiente manera (Kirby y Dalrymple, 1986):

$$\omega = \frac{KC_g(1 - (\psi h/H)^2)}{h} \quad (19)$$

Donde K y ψ son las constantes empíricas igual a 0.17 y 0.4, respectivamente (Dally *et al.*, 1985). Al utilizar el modelo de disipación y la relación del índice de ruptura, REF/DIF es capaz de representar las ondas dentro y fuera de la zona de rompiente.

Este modelo numérico es muy económico en términos computacionales, por lo que se utilizó para realizar una gran cantidad de simulaciones en las que se variaron el tipo de estructura y sus dimensiones, con la finalidad de determinar la focalización de la energía que éstas producían en la costa. Inicialmente, se propagaron ondas de manera regular y uniformes sobre los diferentes arrecifes que dieron mejores resultados a nivel global, con el

propósito de comparar las transformaciones que provocaron el uso de múltiples formas estructurales sobre el oleaje incidente. Cabe destacar que para facilitar el análisis, se seleccionaron patrones del oleaje de manera regular y constante (altura significativa, el período y dirección del pico espectral) para los tres escenarios determinados. Posteriormente, se modificaron las condiciones del oleaje obtenidas en SWAN para determinar así la potencialidad que generó cada configuración arrecifal y, de esta manera, elegir sólo la óptima en relación a la rentabilidad práctica y económica. La propagación del oleaje se realizó frente al CONALEP puntualmente en la coordenada localizada en los $31^{\circ} 49' 37.52''$ de latitud Norte y $116^{\circ} 36' 50.79''$ de longitud Oeste (*nodo interno*).

De esta manera, para analizar cómo las dimensiones estructurales afectaron los diferentes parámetros del oleaje, se analizó la altura arrecifal (D), el largo (Λ , sección longitudinal perpendicular a la línea de costa), el ancho (W , sección transversal paralela a la línea de costa) y la acción de ambos (Λ , W) para la media de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo para los parámetros del oleaje H_{reef} , K_{focus} , X_{reef} y α .

Las simulaciones se llevaron a cabo sobre las 6 estructuras replicadas previamente, donde se determinó que todas presentaron un parentesco en relación a sus formas y en el modo en que focalizaron la energía del oleaje. Sin embargo, *Jumeirah Reef* fue la estructura que se utilizó como modelo debido a que, preliminarmente, focalizó mejor la energía del oleaje. De esta manera, se pudo representar a las cinco estructuras restantes como casos particulares de esta última en función a la relación de aspecto (Fig. 8).

Las dimensiones estructurales, W , Λ y D (Fig. 7) quedaron sujetas en función a la longitud de onda determinada junto antes de la estructura (λ_{reef}

$= 76$ m) con W y Λ comprendidos entre 0.5 a 3 veces λ_{reef} en intervalos de 0.5 λ_{reef} , y D en la gama de 1 a 4 metros en intervalos de 1 metro. Mientras se varió una dimensión estructural, las demás quedaron fijas ($\Delta W/\lambda$ con Λ cons-

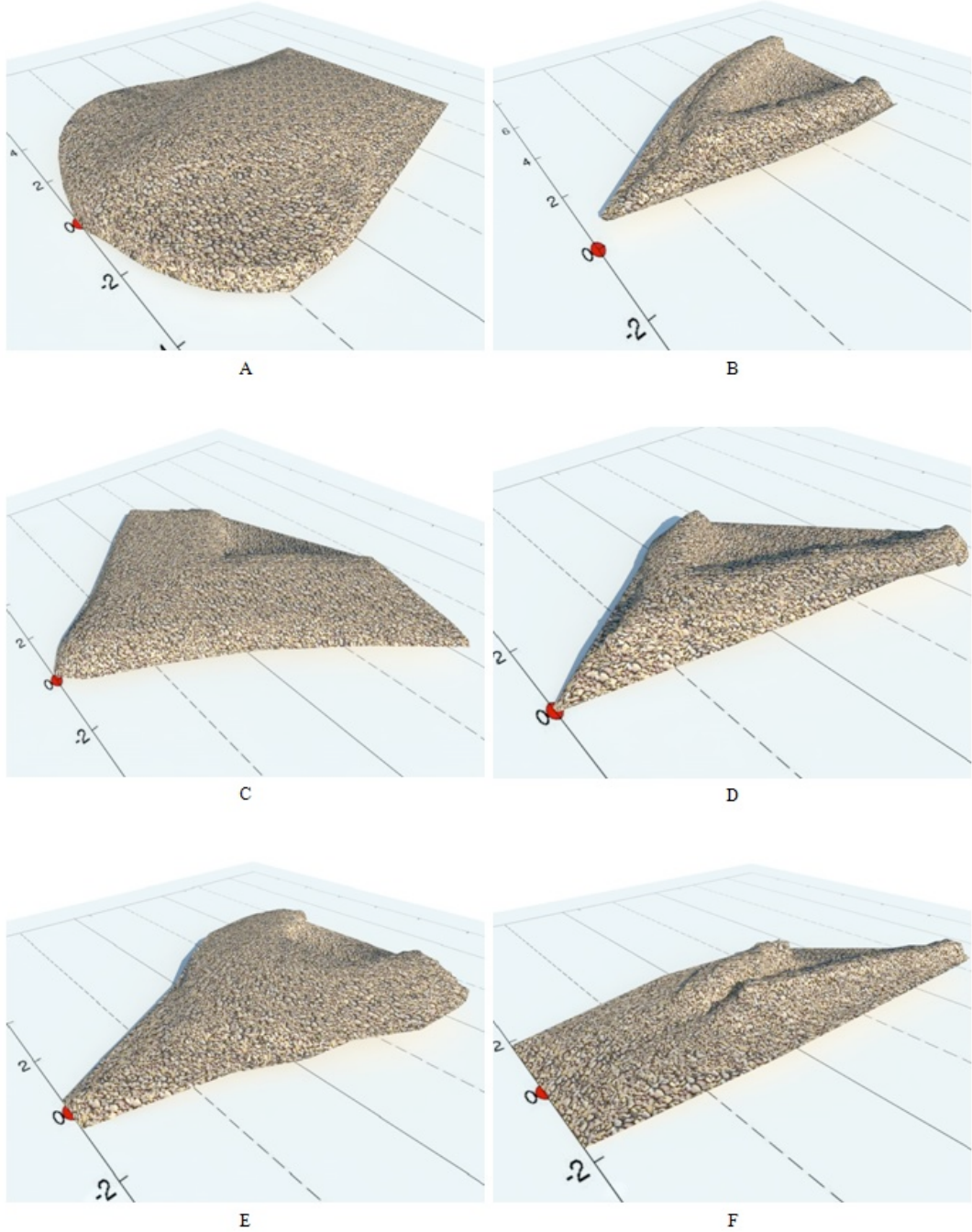


Figura 8: Estructuras arrecifales replicadas con el programa Google SketchUp que dieron mejores resultados a nivel global. Panel A- Jumeirah Reef (Dubái, EAU), B- Brevard Florida (Florida, EE.UU), C- Cable Station (Perth City Coast, Australia), D- Lyall Bay (Wellington, Nueva Zelanda), E- Mount Maunganui (Tauranga, Nueva Zelanda) y F- Narrowneck (Gold Coast, Australia).

tante o $\Delta \Lambda/\lambda$ con W constante) o se variaron ambas proporcionalmente ($\Delta \Lambda, W/\lambda$) para poder definir la influencia que tenía cada una por separado (Λ o W) o conjuntamente (Λ, W) y, a su vez, determinar si los arrecifes de éstas dimensiones influían en la focalización de la energía del oleaje. De esta manera, se realizaron 216 simulaciones variándoles su relación de aspecto. Con estos resultados, se escogió la estructura óptima que produjo la mayor rentabilidad práctica y económica.

En relación al área del dominio computacional, ésta se eligió de tal manera que la profundidad de la columna de agua en la frontera hacia el mar abierto (h_m) fuera suficiente para poder modelar el proceso de asomeramiento debido a la influencia de la batimetría. Sin embargo, la resolución de la malla batimétrica debe ser suficientemente detallada como para poder especificar el arrecife de la manera más precisa y, a su vez, simular el oleaje. Por lo tanto, se tiene que encontrar un equilibrio entre la resolución batimétrica y el área total representada por el dominio. Cabe destacar la dificultad a la hora de elegir la dimensión y resolución de una malla batimétrica adecuada para la simulación estructural, debido a que la gama de alturas y anchuras a ser modeladas no se conocen a priori. Por otro lado, el programa subdivide la malla batimétrica para asegurar que haya por lo menos 5 puntos nodales por longitud de onda. Las subdivisiones se pueden hacer tanto en las direcciones de los ejes x como y , con el fin de hacer más fina la malla computacional en comparación a la malla batimétrica. No obstante, las salidas (tales como, por ejemplo, la altura de ola) sólo pueden ser dadas por los puntos de la malla especificados en la cuadrícula batimétrica. El número de puntos y su espaciado dentro de la malla determinan el tamaño total de la zona a ser modelada. Debido a que la pendiente del lecho se fijó en 1:43.5, el tamaño de

la malla también determina h_{in} , que es 0.02 veces la distancia desde la frontera en alta mar hasta la línea de costa. Para los fines de este trabajo, se delimitó un dominio creado previamente con el programa Google SketchUp 2014 de 300 por 300 metros, con una resolución de la malla batimétrica de 3 metros, que generó un total de 100 por 100 puntos nodales en el dominio. Esto fue suficiente para especificar las diferentes gamas de dimensiones arrecifales. De esta manera, para que la pendiente utilizada en el modelo coincidiese con la observada en Playa Hermosa, se extendió la línea de costa desde una profundidad de 0 m hasta $h_{in} = 8.44$ metros linealmente (Fig. 9).

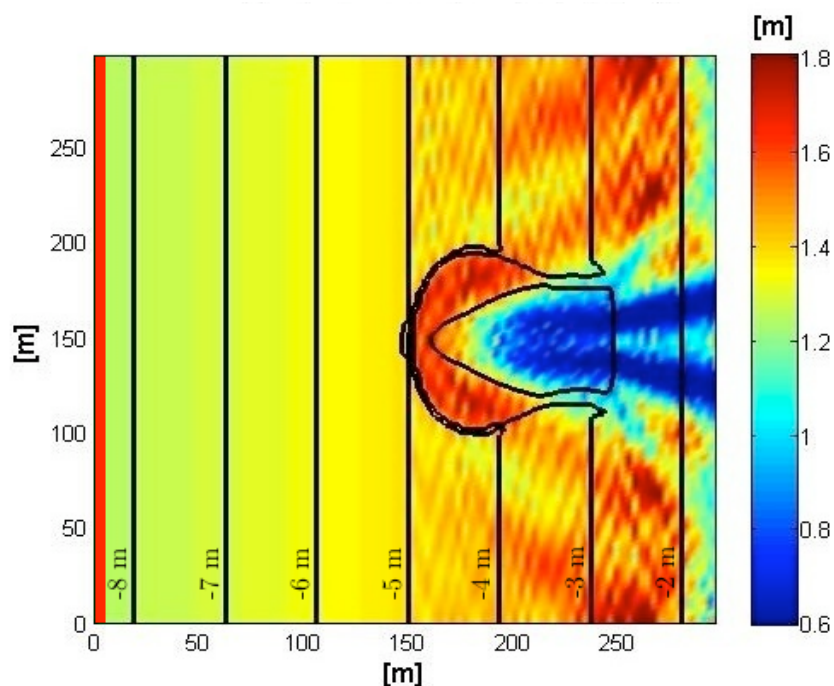


Figura 9: Dominio del área de estudio y batimetría. La línea gruesa de color rojo indica las celdas que representan la frontera. Modelo numérico REF/DIF versión 2.5

IV.5. Determinación del rompimiento del oleaje

En el modelo REF/DIF la disipación por efecto del fondo y, en particular el rompimiento por asomeramiento, se describen de forma aproximada y dependen de los valores que se le den a ciertos parámetros. Por ello, el modelo REF/DIF se utilizó únicamente para determinar el enfoque causado por las estructuras, debido a la refracción del oleaje; mientras que el estudio a detalle del rompimiento por asomeramiento se realizó a través de simulaciones de alta resolución con el modelo FLOW-3D (Flow Science Inc., 2008). Este modelo numérico hidrodinámico resuelve la ecuación de continuidad (Ec. 20) y las ecuaciones de movimiento en tres dimensiones (Ec. 21- 23) dentro del sistema de coordenadas cartesianas. Basado en el método FAVOR (acrónimo del inglés Fractional Area/Volume Obstacle Representation) (Hirt, 1985), todas las ecuaciones se formulan en términos de porosidad con una determinada área y volumen a fin de representar obstáculos complejos bloqueados parcial o totalmente de las celdas numéricas. Por otro lado, el método VOF (Volume of Fluid) (Hirt, 1981) se utiliza para resolver la superficie libre (Ec. 24).

$$\frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} = S_p \quad (20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x + S_u \quad (21)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y + S_v \quad (22)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z + S_w \quad (23)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) \right] = S_F \quad (24)$$

Donde:

- u, v, w: Componentes de las velocidades en las direcciones x, y, z.
- A_x, A_y, A_z : Fracción de área abierta a fluir en cada dirección.
- S_p, S_u, S_v , Funciones de entrada de energía con valores distintos de cero
- S_w y S_F : solamente en el límite de entrada y cerca de los obstáculos.
- G_x, G_y, G_z Aceleraciones del cuerpo en las direcciones x, y, z.
- ρ, p : Densidad del fluido y presión.
- b_x, b_y, b_z : Pérdida de líquidos en porosidad media en cada dirección.
- f_x, f_y, f_z : Aceleraciones viscosas en las direcciones x, y, z.
- V_F y F : Fracción de volumen abierto por celda y volumen de llenado.

En las simulaciones realizadas con FLOW-3D el oleaje se propagó de Oeste a Este, de mar abierto a costa, con una dirección de 272.5° respecto del azimut, sobre un dominio de 380 metros por 380 metros en x e y respectivamente, con una profundidad máxima de 8.44 metros en la frontera

Oeste hasta cero metros sobre la línea de costa Este, y con un peralte batimétrico regular de $\beta=1.315^\circ$ (1:43.5). Debido a que el período del pico espectral es de $T_p=11$ segundos para la media de la serie de tiempo en ambas estaciones y el arrecife se encuentra en aguas someras (profundidad $h=5$ metros), la longitud de onda justo antes del arrecife fue de $\lambda=76$ metros. En las simulaciones se utilizó un arrecife con una longitud estructural (Λ) constante de 2 longitudes de onda y se varió el ancho arrecifal (W) de 1λ a 2λ cada 0.25λ y la altura (D) de 2m, 2.5m y 3m utilizando los parámetros medios del oleaje de verano e invierno. De esta forma, se realizaron 30 simulaciones con una resolución de 1 metro en la vertical, 0.4 metros en la horizontal y un intervalo de tiempo (Δt) igual a 0.05.

V. Resultados y discusiones

A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos de las simulaciones a partir de los cuales se determinó la forma y dimensiones de la estructura que produjo efectos significativos en la focalización del oleaje con la mayor rentabilidad práctica y económica, además de evaluarse su efecto en relación a los diferentes patrones de ruptura del oleaje en Playa Hermosa, Baja California, según la metodología expuesta previamente.

V.1. Condiciones de oleaje para las simulaciones

A partir de la climatología del oleaje en el nodo externo a la bahía de Todos Santos, se plantearon 3 escenarios: condiciones medias de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo. Las dos primeras representan las olas típicas esperadas en la zona y la tercera es una condición extrema que permitirá evaluar el comportamiento de las estructuras en estas condiciones. En la Tabla I se presentan los parámetros característicos que caracterizan cada escenario tales como: altura significativa (H_s), dirección del pico espectral (d_p), período del pico espectral (T_{per}) y la dispersión angular (S_{pr}).

En promedio el oleaje tiene mayor altura en invierno que en verano. Además, en verano predomina una dirección del pico espectral proveniente del Suroeste, mientras que en invierno es Noroeste al igual que para el máximo de la altura significativa. El período del pico espectral es semejante para todos los escenarios. Por último, la menor dispersión se observa para la media de invierno seguido de la máxima de la serie de tiempo, por lo que supone una mayor cantidad de energía de las olas por unidad de área, en

comparación con la media de verano que presenta la mayor dispersión angular. Esto concuerda con lo analizado por Martínez *et al.*, (1989) que determinó que, para esta región, el oleaje de mayor altura se observa en los meses de diciembre a marzo proveniente del hemisferio Norte y, además, presenta alturas significantes superiores que el oleaje del Sur al Sur-Suroeste durante el invierno.

Tabla I: Parámetros del oleaje en el nodo externo (aguas oceánicas).

Condición promedio	H_s [m]	d_p (°)	T_{per} [seg]	S_{pr} (°)
Media Verano	1.19	219.26	14.26	50.39
Media Invierno	1.72	284.85	14.20	34.57
Máxima serie de tiempo	5.58	280	13.33	34.9

En las Figuras 10, 11 y 12 se pueden observar las simulaciones de la Bahía de Todos Santos con SWAN para los diferentes escenarios.

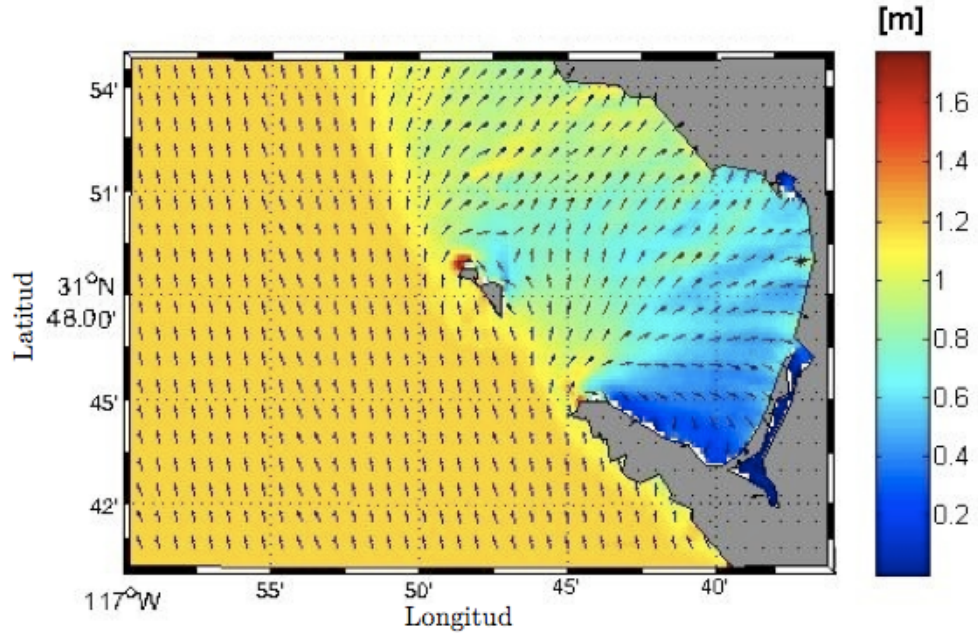


Figura 10: Campo de oleaje de la Bahía Todos Santos para la condición media de verano.

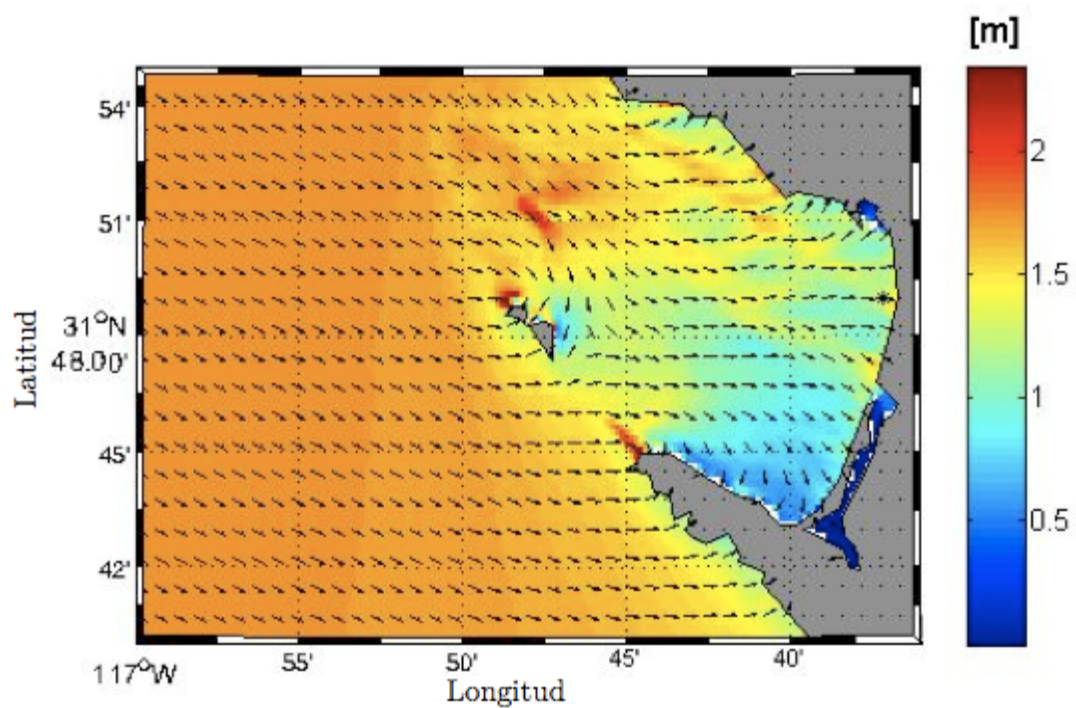


Figura 11: Campo de oleaje de la Bahía Todos Santos para la condición media de invierno.

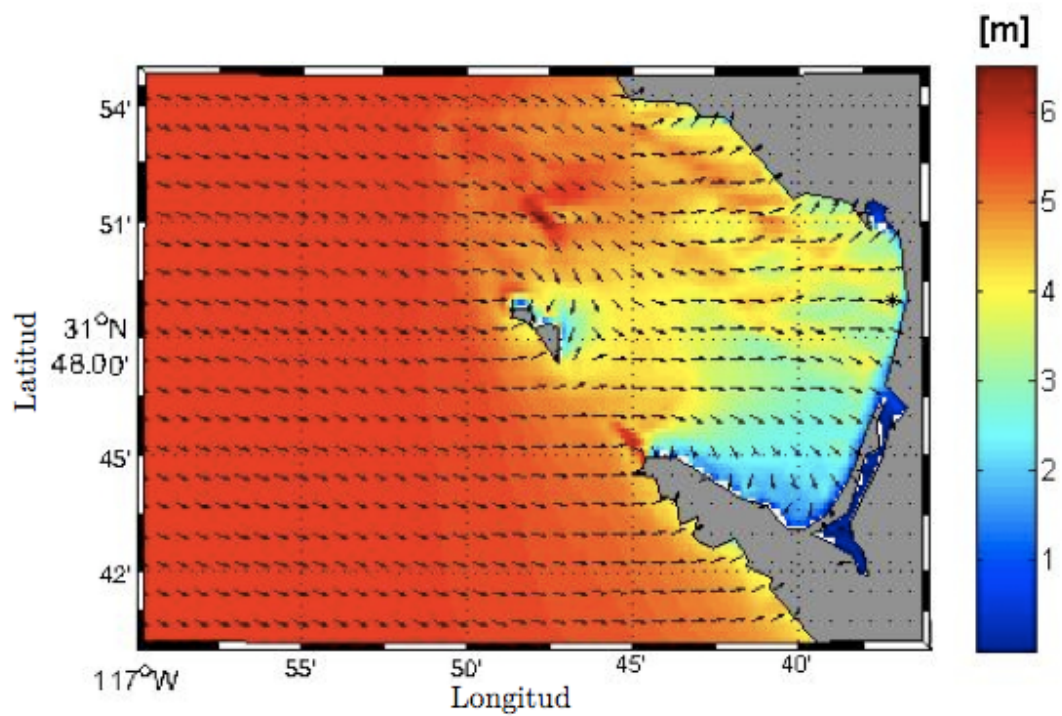


Figura 12: Campo de oleaje de la Bahía Todos Santos para la condición máxima de la serie de tiempo.

En la Tabla II se representan los resultados del modelo de aguas costeras SWAN obtenidos mediante de la propagación los parámetros característicos del nodo externo hacia el interior de la bahía de Todos los Santos (nodo interno), donde se encuentra la zona de estudio frente a Playa Hermosa. Al aproximarse el oleaje a la costa, debido a su interacción con el fondo, su amplitud, longitud y dirección se ven modificadas y finalmente rompe al encontrarse en aguas poco profundas. Al comparar las Tablas I y II, se puede observar que la H_s se ha reducido en un 78.5 %, 27.7 % y 32.5 %, para la media de verano, media de invierno y la máxima de la serie de tiempo, respectivamente. Cabe destacar que d_p fue igual para todos los escenarios, debido a que el oleaje al entrar en aguas intermedias experimenta cambios en su dirección de propagación por efecto de la refracción, lo que produce que sus crestas tiendan a ponerse paralelas a los contornos del fondo. Por otro lado, se observa en todos los casos que S_{pr} decrece en mayor medida para la media de verano, seguido de la máxima de la serie de tiempo y por último, para la media de invierno, traduciéndose como un incremento de energía por unidad de área para la zona de estudio, en comparación al nodo externo fuera de la bahía.

Con esto se puede observar que la *refracción* junto con el proceso de asomeramineto, son los agentes que determinan la climatología del oleaje y la distribución de energía a lo largo de la costa.

Tabla II: Parámetros del oleaje en el nodo interno (aguas someras).

Condición promedio	H_s [m]	d_p (°)	T_{per} [seg]	S_{pr} (°)
Media Verano	0.66	272.5	11.24	12.98
Media Invierno	1.24	272.5	11.2	14.31
Máxima serie de tiempo	3.77	272.5	11.36	14.35

V.2. Focalización del oleaje

V.2.1. Influencia de la altura estructural en la altura de ruptura

La Figura 14 describe la elevación de la superficie del agua para un arrecife de $2 \lambda_{\text{reef}}$ tanto en su largo (Λ) como en su ancho (W) con una altura (D) de 2 m, para las condiciones medias de invierno. Esta imagen en dos dimensiones detalla cómo las crestas de las olas se curvan cuando se desplazan sobre la parte superior del arrecife. La línea blanca muestra dónde se produce la ruptura del oleaje, produciéndose primero en el pico y, posteriormente, más lejos del pico cerca de la costa. Debido a que el oleaje se aproxima a la orilla en forma normal y la estructura arrecifal se diseñó en forma perpendicular (Λ normal) a la costa, el patrón de ruptura es simétrico a lo largo del eje del arrecife (Λ).

Puntualmente para ésta configuración arrecifal, el ángulo de ruptura en ambos lados de la estructura fue de aproximadamente 70° , calculado desde el punto de ruptura más lejos de costa hasta los 100 m y 200 m respectivamente a lo largo de la costa (Fig.13).

A 50 m a cada lado del eje Λ del arrecife (a lo largo de la costa), el efecto de la focalización del oleaje comienza a ser insignificante, por lo tanto la línea de ruptura se vuelve lineal y paralela a la línea litoral ($X_{\text{beach}} = 78$ m).

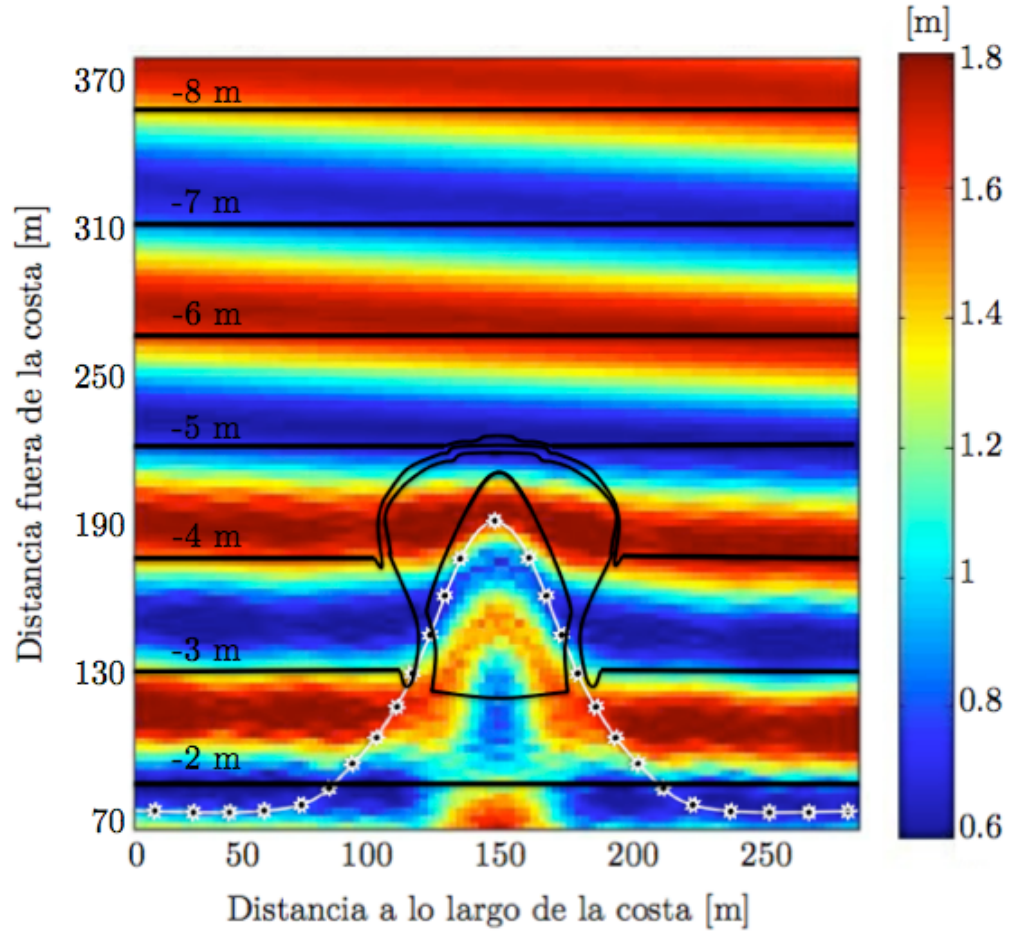


Figura 13: Resultado numérico del modelo REF / DIF que muestra la elevación instantánea de la superficie para un arrecife de $2 \lambda_{\text{reef}}$ de ancho y largo, con una altura de 2 m. A medida que la ola se propaga hacia la costa sobre el arrecife, su cresta comienza a curvarse. Las líneas negras representan los contornos batimétricos. La línea blanca con asteriscos denota la línea de ruptura del oleaje.

En las Figuras 14, 15 y 16, se presenta la altura de ruptura (H_{reef}) en función de la altura estructural (D) del mismo ancho estructural (W) para la media de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo, respectivamente. La anchura se expone en función de la longitud de onda justo antes de la estructura ($\lambda_{\text{reef}} = 76$ m). Cabe destacar que la profundidad de la columna de agua donde se instaló la estructura arrecifal para todos los casos analizados fue de 5 m, por lo que el rango de D varió entre 0 m y 5 m.

Tanto para la media de verano como de invierno con una $D = 1$ m, se observa que la H_{reef} es menor que la H_{beach} sin estructura ($D = 0$ m), atribuido a que no se produce focalización de la energía del oleaje sobre la estructura arrecifal. A partir de D igual a 1 m comienza a observarse una tendencia creciente en H_{reef} producto de la focalización del oleaje sobre la estructura, con un pico muy claro en $D = 3$ m que genera una $H_{\text{reef}} = 1.53$ m para la media de verano y otro en $D = 2$ m con una $H_{\text{reef}} = 2.22$ m para la media de invierno. Para valores mayores de D en ambos escenarios, la tendencia es a decrecer en H_{reef} .

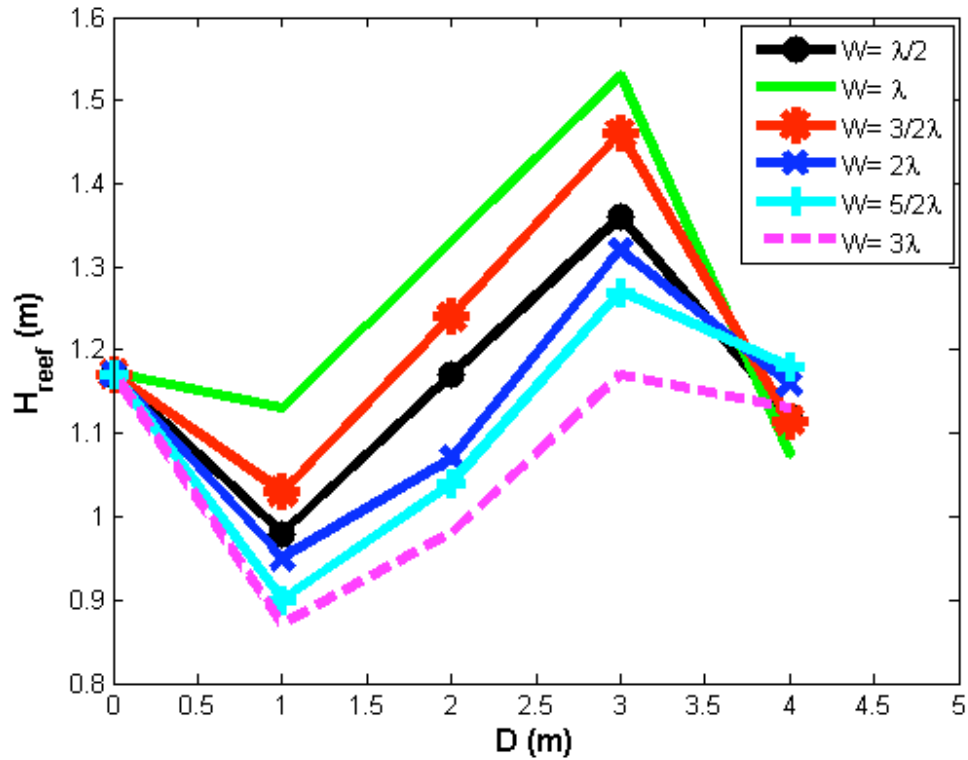


Figura 14: Altura de ruptura del oleaje (H_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la media de verano. Cada línea representa estructuras, con el mismo ancho (W).

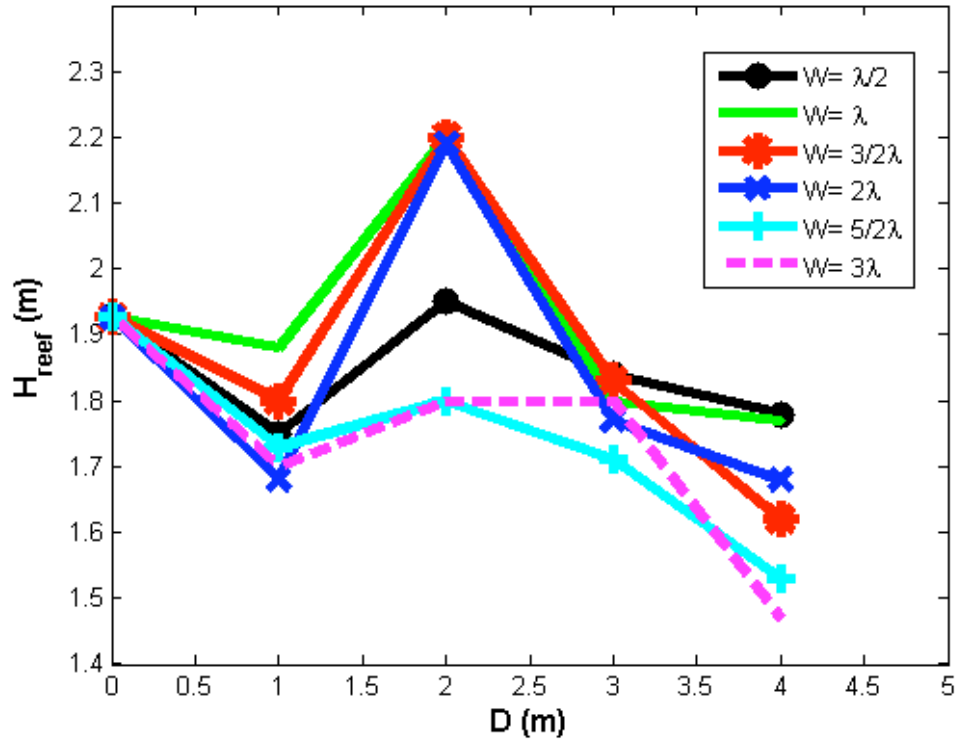


Figura 15: Altura de ruptura del oleaje (H_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la media de invierno. Cada línea representa estructuras, con el mismo ancho (W).

En la Figura 16, se observa que para el escenario máximo de la serie, cualquiera sea D , H_{reef} siempre fue menor que $H_{\text{beach}} = 4.70$ m. Esto se debe a que la ola es extremadamente grande, por lo que rompe antes que interactúe con la estructura. Cuanto mayor sea D , mayor será la protección que ejerza estructura sobre la costa. De esta forma, para cualquier D los arrecifes actúan como estructura de protección costera.

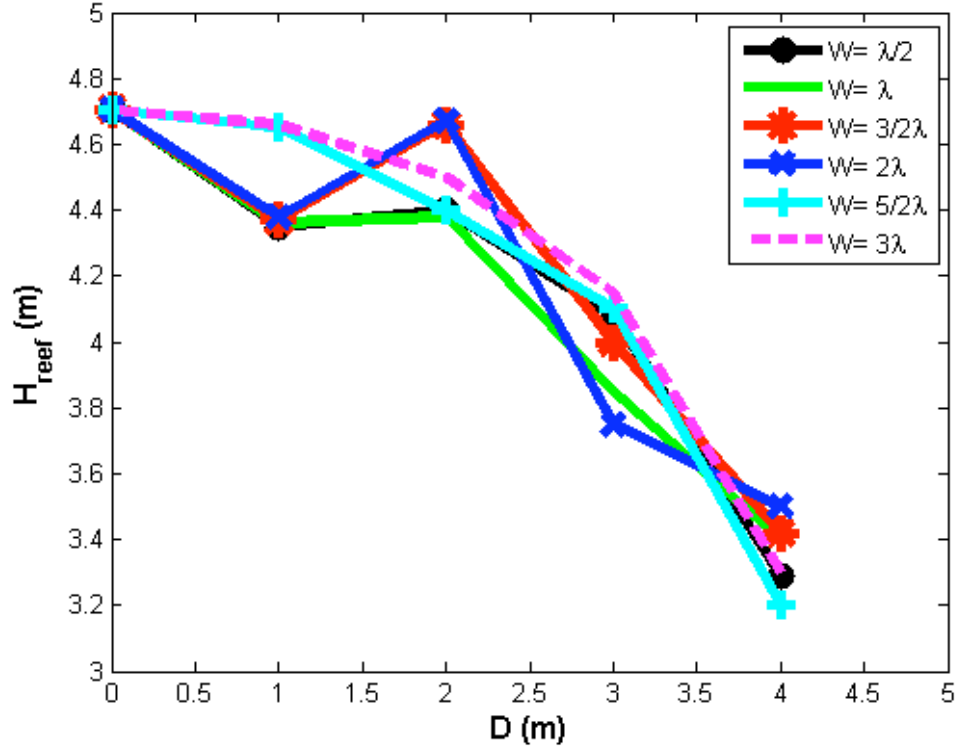


Figura 16: Altura de ruptura del oleaje (H_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para el oleaje máximo de la serie. Cada línea representa estructuras, con el mismo ancho (W).

Para una D igual a 3 m y 2 m en verano e invierno respectivamente, se puede observar que las mayores H_{reef} se generan con un ancho estructural igual a λ_{reef} (Fig. 14 y 15). En relación al costo que supondría la construcción de las estructuras, es un factor beneficioso, ya que esta estructura es relativamente angosta y supondría un menor cantidad de material. En contraste West (2002) que encontró que, para una D constante, se observan H_{reef} mayores a medida que aumenta el ancho estructural, ya que dH / dD aumenta para los arrecifes más amplios posiblemente, porque consideró arrecifes infinitamente largos ($\Lambda = \infty$).

A partir de estos resultados, es posible concluir que D modifica la focalización del oleaje y que, para las condiciones climatológicas del oleaje en la zona de estudio, la mayor focalización ocurre con D en $[2 \text{ m} < D < 3 \text{ m}]$.

En las Figuras 17, 18 y 19 se representa el factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función de la altura relativa (D_{rel}) según diferentes anchuras constantes (W) para la media de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo. Cabe destacar que tanto el factor de focalización del oleaje ($K_{\text{focus}} = H_{\text{reef}} / H_{\text{beach}}$) como la altura relativa ($D_{\text{rel}} = D / h_{\text{reef}}$) son parámetros adimensionales del oleaje.

En las Figuras 17 y 18 con una $D_{\text{rel}} = 0.25$ para todo W , se observa que el K_{focus} es menor a 1, lo que genera que no se produzca ningún efecto en el enfoque de la energía de las olas con estas configuraciones arrecifales y en consecuencia, la altura de ruptura del oleaje es menor que en estado natural sin el arrecife. Para una $D_{\text{rel}} > 0.25$, comienza a observarse una tendencia creciente en K_{focus} producto de la focalización del oleaje, con un pico muy claro en $D_{\text{rel}} = 1.5$ que genera un $K_{\text{focus}} = 1.32$ para la media de verano y otro en $D_{\text{rel}} = 0.66$ con un $K_{\text{focus}} = 1.15$ para la media de invierno. Para valores mayores de D_{rel} en ambos escenarios, la tendencia de K_{focus} es a decrecer.

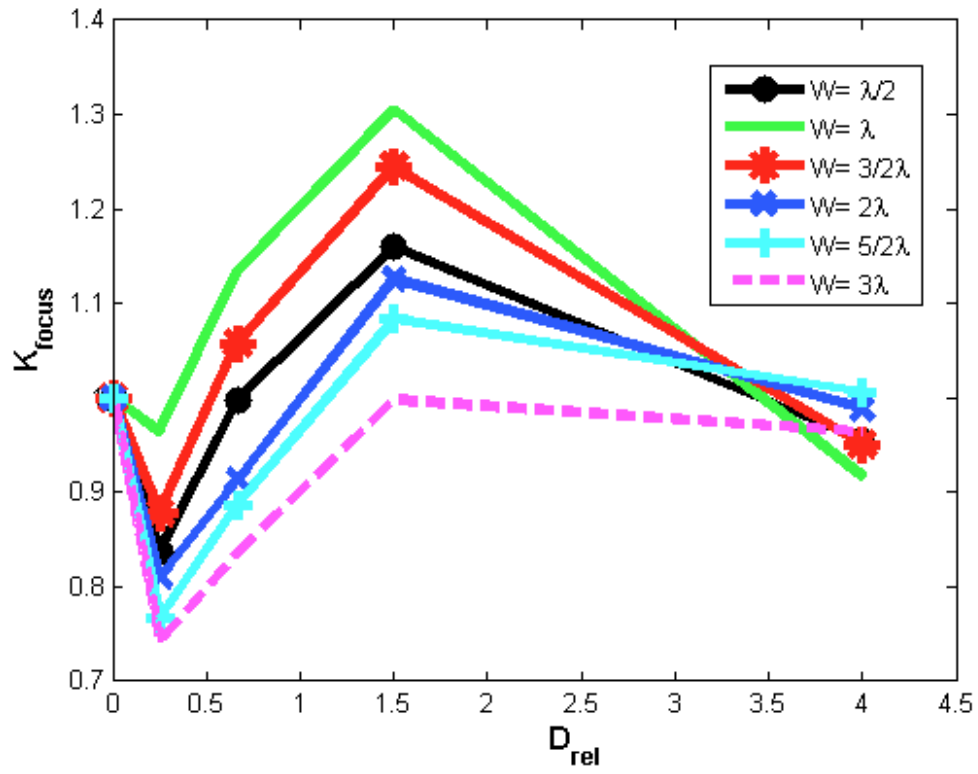


Figura 17: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{rel} = D/h_{reef}$), para las condiciones promedio de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W).

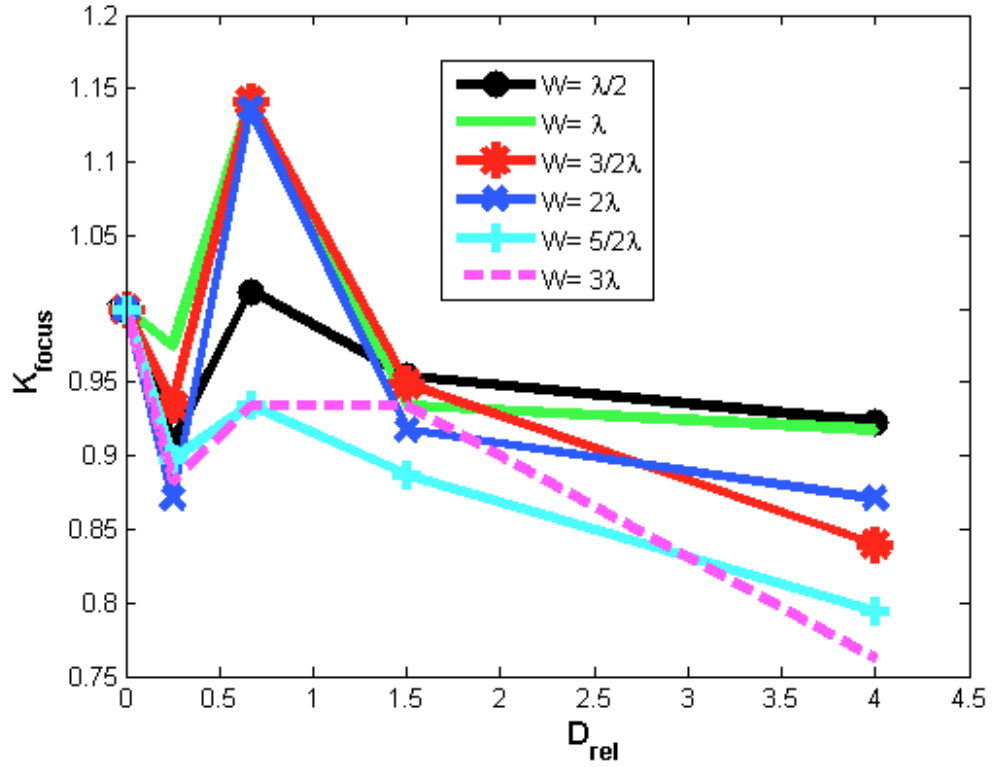


Figura 18: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{rel} = D/h_{reef}$), para las condiciones promedio de invierno. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W).

En la Figura 19, se observa que para cualquier D_{rel} , K_{focus} siempre fue menor que 1, ya que no se produce ningún efecto en el enfoque de la energía del oleaje debido a que, como se explicó anteriormente, se producirá la ruptura del oleaje antes que interactúe con la estructura, por lo que para cualquier D_{rel} los arrecifes actúan como estructura de protección costera.

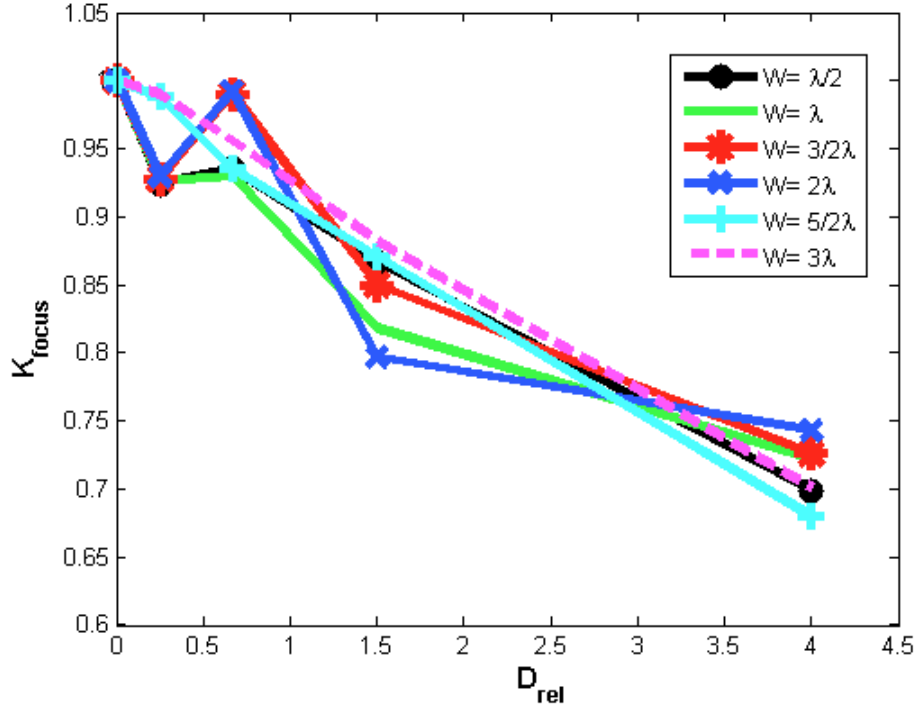


Figura 19: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{rel} = D/h_{reef}$), para la condición máxima de la serie. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W).

Además, el efecto relativo de la focalización máxima que experimentó el oleaje a causa de la estructura arrecifal fue igual a $K_{focus} = 1.32$, con una $D_{rel} = 1.5$ y $W = \lambda_{reef}$ para la media de verano y, $K_{focus} = 1.15$ con una $D_{rel} = 0.66$ y W entre λ_{reef} y $2\lambda_{reef}$ para la media de invierno.

V.2.1.1. Influencia de la altura estructural en la distancia de ruptura

En las Figuras 20, 21 y 22 se presenta la distancia de ruptura del oleaje por efecto de la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la altura (D) y el

ancho arrecifal (W) para la media de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo, respectivamente. Tanto para la media de verano como invierno con una $D = 1$ m se observa que la X_{reef} es menor que la X_{beach} sin estructura ($D = 0$ m), atribuido a que no se produce efecto de asomeramiento sobre la estructura arrecifal. A partir de D igual a 1 m, comienza a observarse una tendencia creciente en X_{reef} debido al efecto de asomeramiento sobre las estructuras, con un pico muy claro en $D = 3$ m que genera una $X_{\text{reef}} = 85.43$ m para la media de verano y otro en $D = 2$ m con una $X_{\text{reef}} = 122.84$ m para la media de invierno. Para valores mayores de D en ambas medias donde se producen las máximas X_{reef} , la tendencia es a decrecer en X_{reef} .

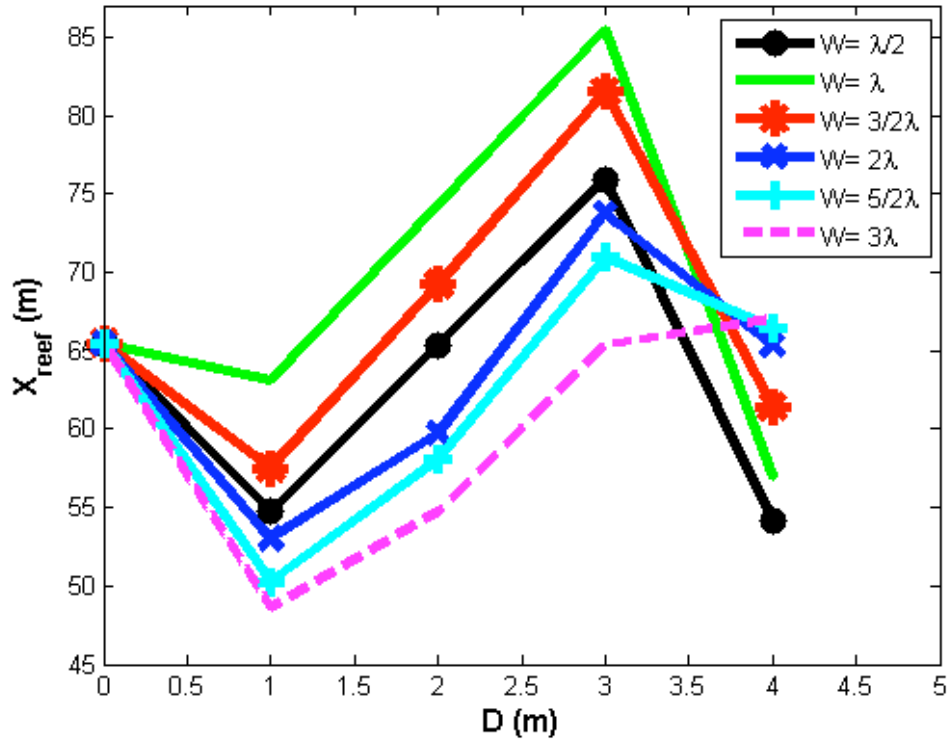


Figura 20: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W).

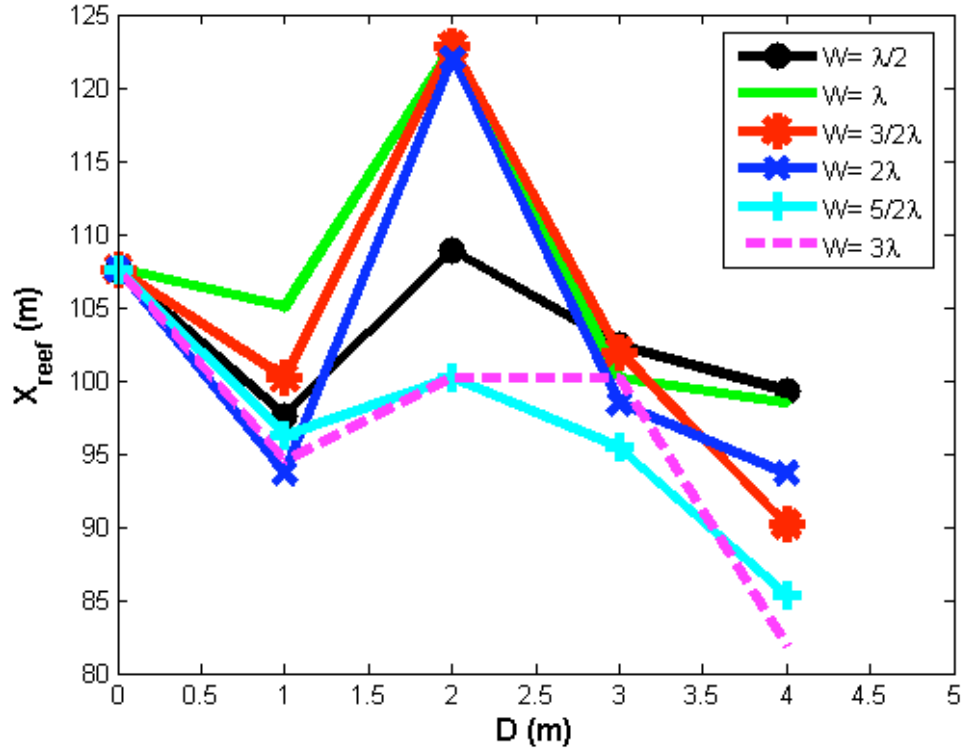


Figura 21: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la condición media de invierno. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W).

En la Figura 22, se observa que para cualquier D , X_{reef} siempre fue menor que X_{beach} igual a 262.76 m. Esto se debe a que la ola va a estar rompiendo antes que interactúe con la estructura. Cuanto mayor sea D , mayor será la protección que ejerza estructura sobre la costa. De esta forma, para cualquier D los arrecifes actúan como estructura de protección costera.

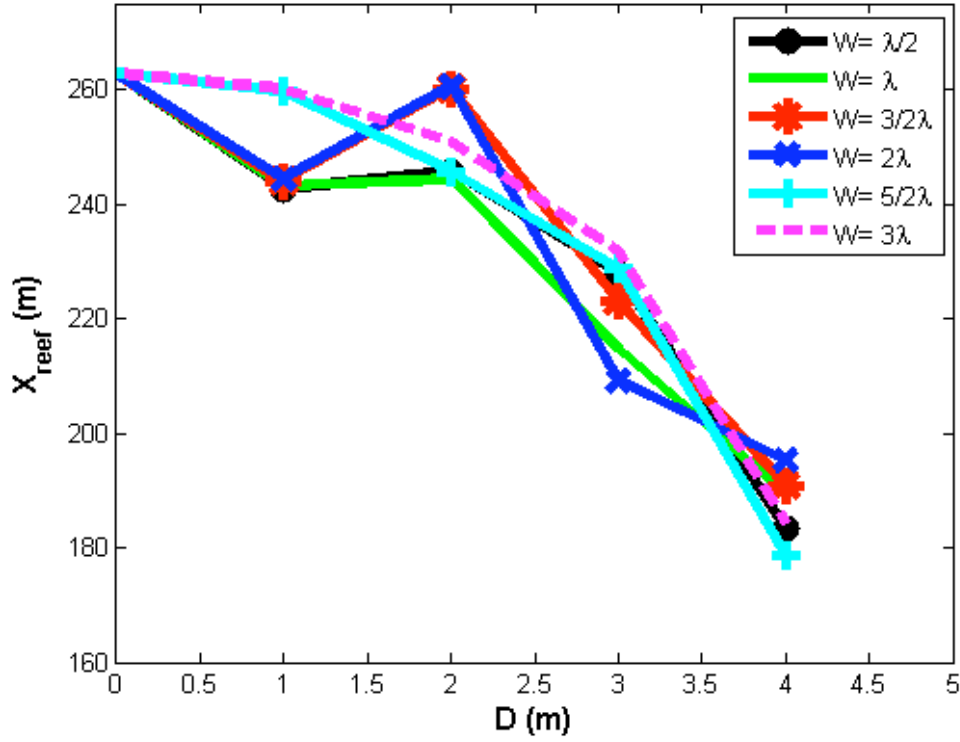


Figura 22: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la altura arrecifal (D), para la condición la condición máxima de la serie. Cada línea representa estructuras con el mismo ancho (W).

Tanto para la media de verano como de invierno, se puede observar que las mayores X_{reef} se generan con las estructuras entre $\lambda < W < 3/2 \lambda$ (Fig. 21 y 22). En la media de verano, la mayor distancia de ruptura con el arrecife se genera con una altura igual a 3 m y una anchura equivalente a la longitud de onda justo antes del arrecife (Fig. 20). Para la media de invierno, con una $D = 2$ m y W igual a λ y $3/2 \lambda$ se obtuvo el mismo valor máximo de X_{reef} (Fig. 21). En relación a lo que supondría el costo para que la construcción de las estructuras pudiera ser redituable, convendría escoger el W de menor longitud.

Las tendencias de las Figuras 20 y 21 descritas anteriormente, se contraponen a las determinadas por West (2002), que encontró que, para

cualquier D , X_{reef} siempre fue mayor que X_{beach} y que, para cualquier configuración con W constante, X_{reef} aumentó linealmente con el aumento de D debido al efecto de asomeramiento del oleaje sobre las estructuras arrecifal.

En base a estos resultados, se puede concluir que la estructura arrecifal induce un aumento en la distancia de ruptura máxima (ΔX), con un W igual a λ y una D igual a 3 m para la climatología media de verano y una $D = 2$ m para la de invierno, igual a 20 m y 15.20 m, respectivamente.

V.2.2. Influencia del largo estructural en la altura de ruptura

En las Figuras 23, 24 y 25 se representa el factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función al longitud relativa (Λ_{rel}) y la altura arrecifal (D) para los tres escenarios analizados. Cabe destacar que tanto el factor de focalización del oleaje ($K_{\text{focus}} = H_{\text{reef}} / H_{\text{beach}}$) como la longitud relativa ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda / \lambda_{\text{reef}}$) son parámetros adimensionales del oleaje y Λ se expone en función a la longitud de onda junto antes de la estructura (λ_{reef}) igual a 76 m.

En la Figura 23 se puede apreciar que para toda D , con un $\Lambda_{\text{rel}} = 0.5$, K_{focus} es menor a 1. Esto puede sugerir que la configuración arrecifal está ocasionando desfocalización y/o disipación de la energía sobre ésta. Debido a que la energía es finita, al enfocarse en una zona, en otra tiene que disminuir, pero no necesariamente sobre la estructura. En otras palabras, si se focaliza sobre la estructura, indirectamente se va a estar sustrayéndose energía de otro lado. La altura estructural de 4 m, para toda Λ_{rel} , presentó siempre esta característica. Sin embargo, para las D restantes, a partir de $\Lambda_{\text{rel}} = 0.5 \lambda$ se

observa una tendencia asintótica creciente en K_{focus} producto que efecto de la focalización de la energía del oleaje sobre la estructura es más evidente entre el rango de $0.5 \leq \Lambda_{\text{rel}} \leq 1.62$, ya que $dK_{\text{focus}} / d\Lambda_{\text{rel}}$ es mayor. Esto genera un máximo en K_{focus} cuando Λ_{rel} es igual a 2.36, para una $D = 2$ m y 3 m igual a 1.49 y 1.41, respectivamente. A medida que $\Lambda_{\text{rel}} > 2.36$ para $D = 1$ m, 2 m y 3 m, la tendencia es decrecer en K_{focus} .

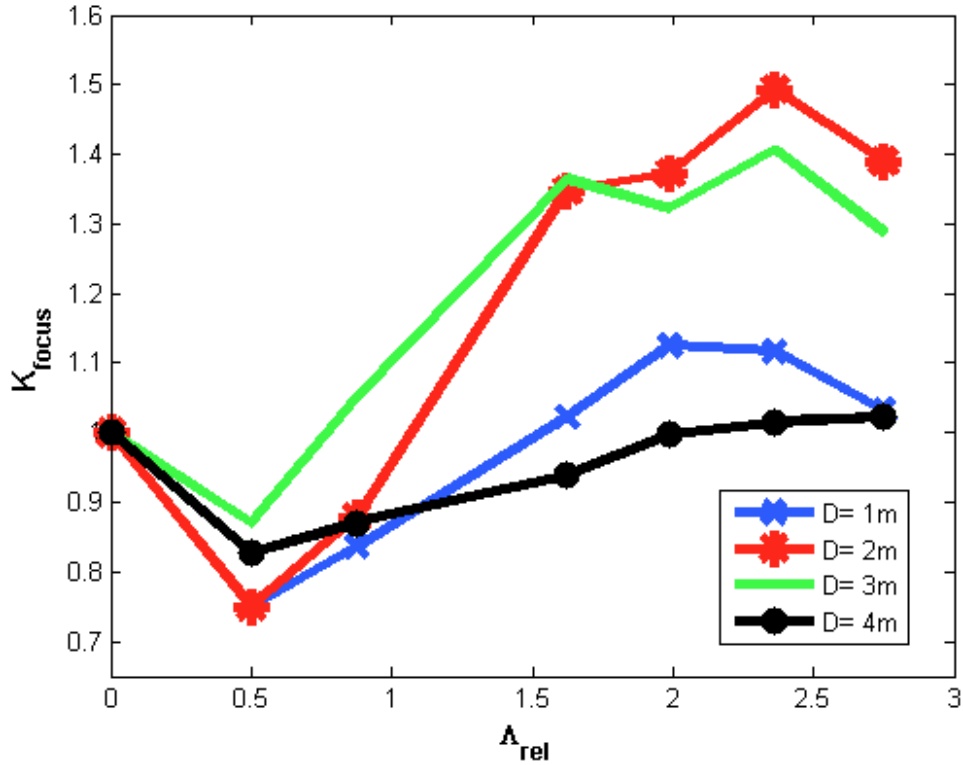


Figura 23: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la longitud relativa ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda / \lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo alto (D).

En la Figura 24 se observa que, para cualquier D comprendida entre $0 < \Lambda_{\text{rel}} \leq 0.88$, K_{focus} es menor a 1, ya que no se produce ningún efecto en el enfoque de la energía de las olas sobre la estructura con estas configuraciones arrecifales y, en consecuencia, la altura de ruptura del oleaje es menor que en estado natural de la playa sin el arrecife. Las alturas estructurales de 3 m y 4

m presentaron siempre esta característica, para toda Λ_{rel} . Sin embargo, para una D igual a 1 m y 2 m se observa una tendencia creciente en K_{focus} a partir de $\Lambda_{\text{rel}} > 0.88$ producto de la focalización del oleaje sobre el arrecife, con un K_{focus} máximo cuando $\Lambda_{\text{rel}} = 2.76$ igual a 1.21 y 1.31, respectivamente.

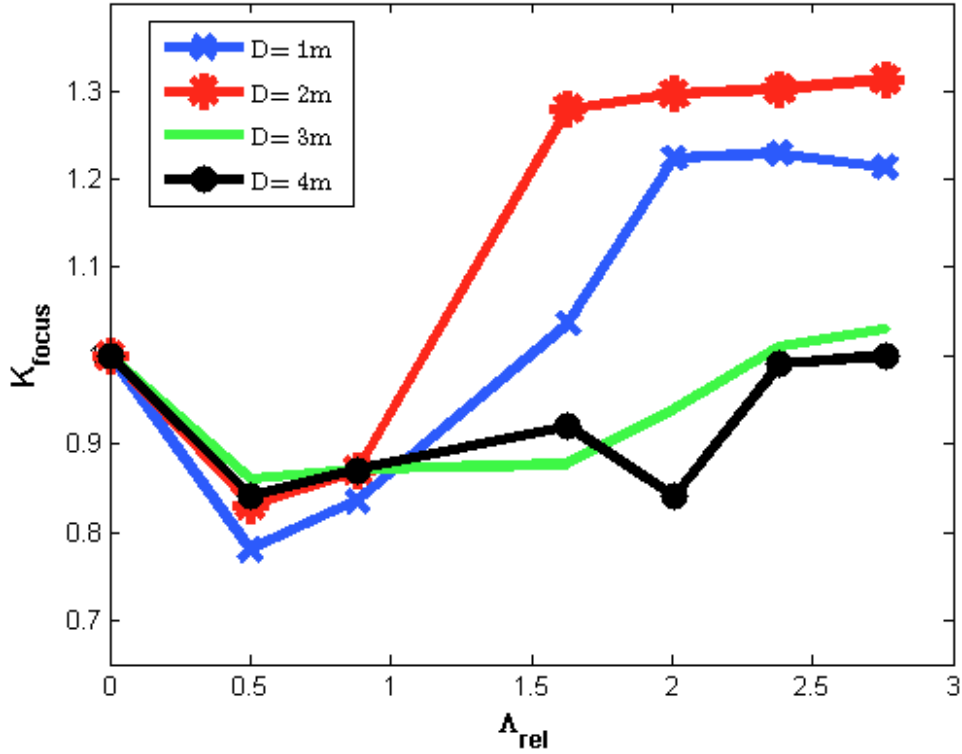


Figura 24: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la longitud relativa ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición media de invierno. Cada línea representa estructuras con la mismo altura (D).

Las tendencias de las Figuras 23 y 24 son contrarias a las determinadas por West (2002), que al representar gráficamente el efecto de la variación de Λ_{rel} sobre K_{focus} , encontró que K_{focus} aumentaba rápidamente para valores iniciales de Λ_{rel} , por lo que la relación de $dK_{\text{focus}} / d\Lambda_{\text{rel}}$ fue mayor para Λ_{rel} de menor longitud. A medida que Λ_{rel} se incrementaba hasta el infinito, la relación $dK_{\text{focus}} / d\Lambda_{\text{rel}}$ tendió a cero.

En la Figura 25 se observa que para el escenario de la altura máxima, K_{focus} siempre fue menor o igual a 1, ya que la estructura no produce ningún efecto en el enfoque de la energía del oleaje, ya que el oleaje va a estar rompiendo antes que interactúe con el arrecife. Por lo tanto, todas las configuraciones arrecifales actuarán como estructura de protección costera.

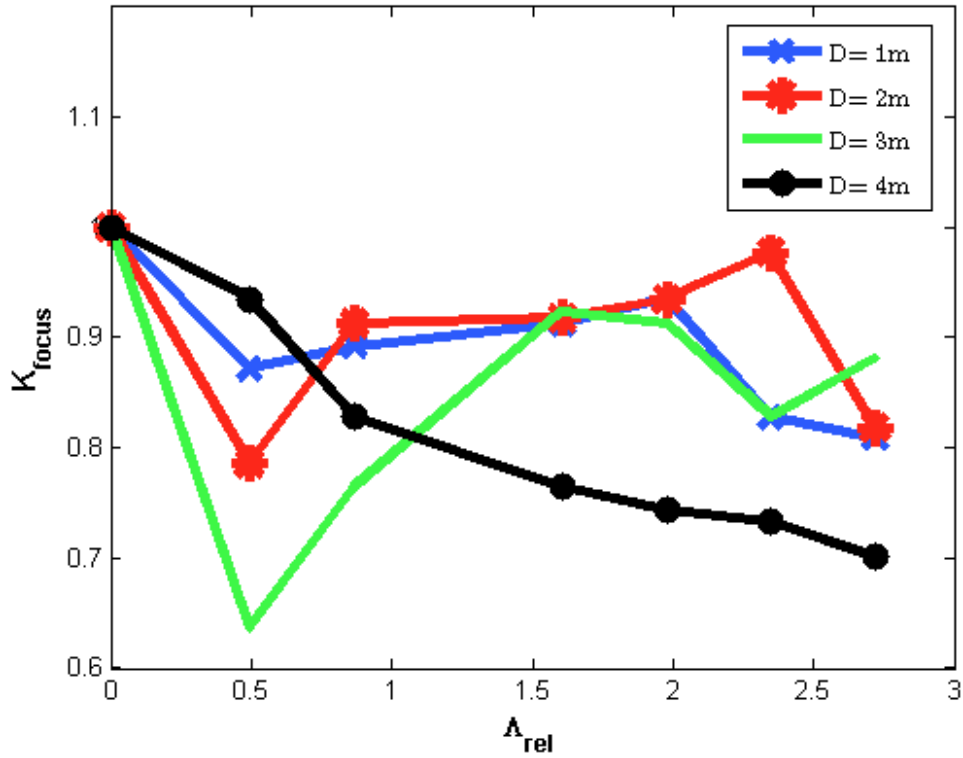


Figura 25: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la longitud relativa ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para la condición máxima. Cada línea representa estructuras con la mismo altura (D).

Con estos resultados, se puede concluir que el efecto relativo de la focalización máxima que experimentó el oleaje a causa de la estructura arrecifal con una $\Lambda_{\text{rel}} = 2.76$, fue igual a $K_{\text{focus}} = 1.49$ con $D = 2$ m –para la climatología del oleaje media de verano– y, $K_{\text{focus}} = 1.31$ y $D = 2$ m para la media de invierno.

V.2.2.1. Influencia del largo estructural en la distancia de ruptura

En las Figuras 26, 27 y 28 se representa la distancia de ruptura del oleaje por efecto de la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo relativo adimensional ($\Lambda / \lambda_{\text{reef}}$) y la altura estructural (D) para la media de verano, invierno y la máxima de la serie de tiempo, respectivamente.

En la Figura 26 se puede apreciar como para toda D , con un Λ igual a la mitad de la λ_{reef} , X_{reef} es menor que la X_{beach} ($\Lambda_{\text{rel}} = 0$ m) atribuido a que no se produce focalización de la energía del oleaje sobre la estructura arrecifal. Las estructuras con $D = 4$ m, para toda Λ_{rel} , presentó siempre esta característica. Sin embargo, las estructuras con $D < 4$ m, a partir de $\Lambda_{\text{rel}} = 0.5$ se observa una tendencia asintótica creciente en X_{reef} producto que efecto de la focalización de la energía del oleaje sobre la estructura es más evidente entre el rango de $0.5 \leq \Lambda_{\text{rel}} \leq 1.5$, ya que $dX_{\text{reef}} / d \Lambda_{\text{rel}}$ es mayor. Esto genera un máximo en X_{reef} cuando Λ_{rel} es igual a 2.5, para una $D = 2$ m y 3 m igual a 97.71 m y 92.14 m, respectivamente. A medida que $\Lambda_{\text{rel}} > 2.5$ para todas las D , la tendencia es decrecer en X_{reef} .

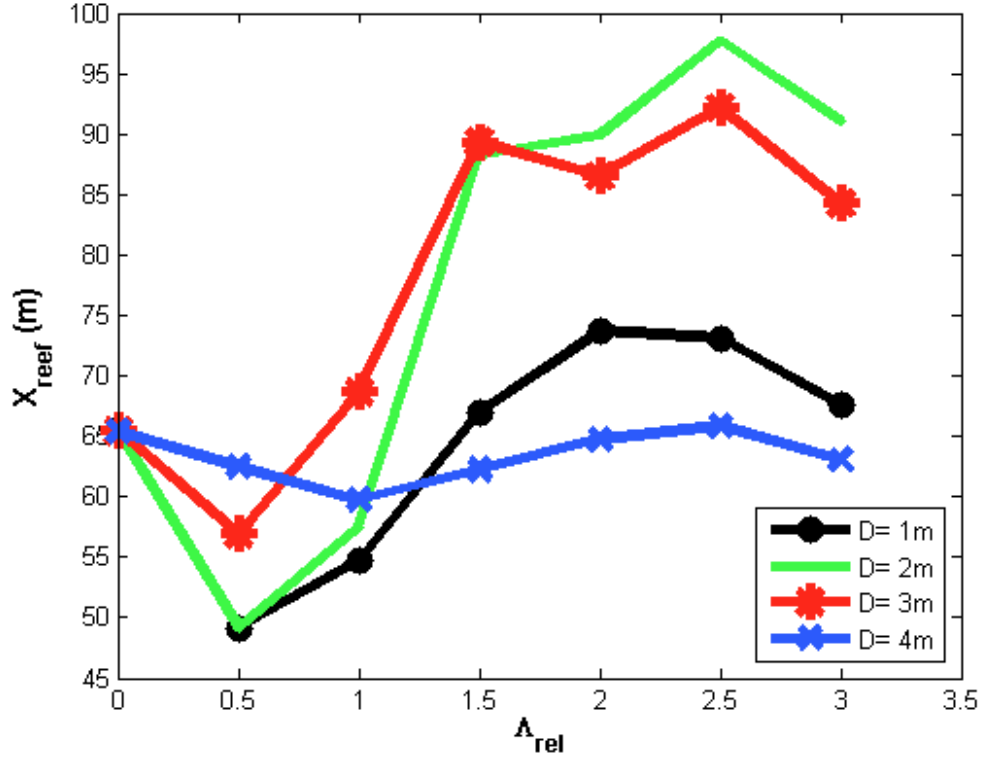


Figura 26: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo relativo ($\Lambda_{rel} = \Lambda/\lambda_{reef}$), para es escenario de la media de verano. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

Como se observa en la Figura 27, para cualquier D comprendida entre $0 < \Lambda_{rel} \leq 1$, X_{reef} es siempre menor que la X_{beach} ($\Lambda_{rel} = 0$ m) debido a que no se produce focalización de la energía del oleaje sobre la estructura. Las alturas estructurales de 3 m y 4 m, para toda Λ_{rel} , presentaron siempre esta característica. Sin embargo, para una D igual a 1 m y 2 m se observa una tendencia creciente en X_{beach} a partir de $\Lambda_{rel} > 1.5$ producto de la focalización del oleaje sobre el arrecife, con una X_{reef} máxima cuando $\Lambda_{rel} = 2.5$ con $D = 1$ m igual a 188.19 m y una $\Lambda_{rel} = 3$ con $D = 2$ m igual a 141.14 m.

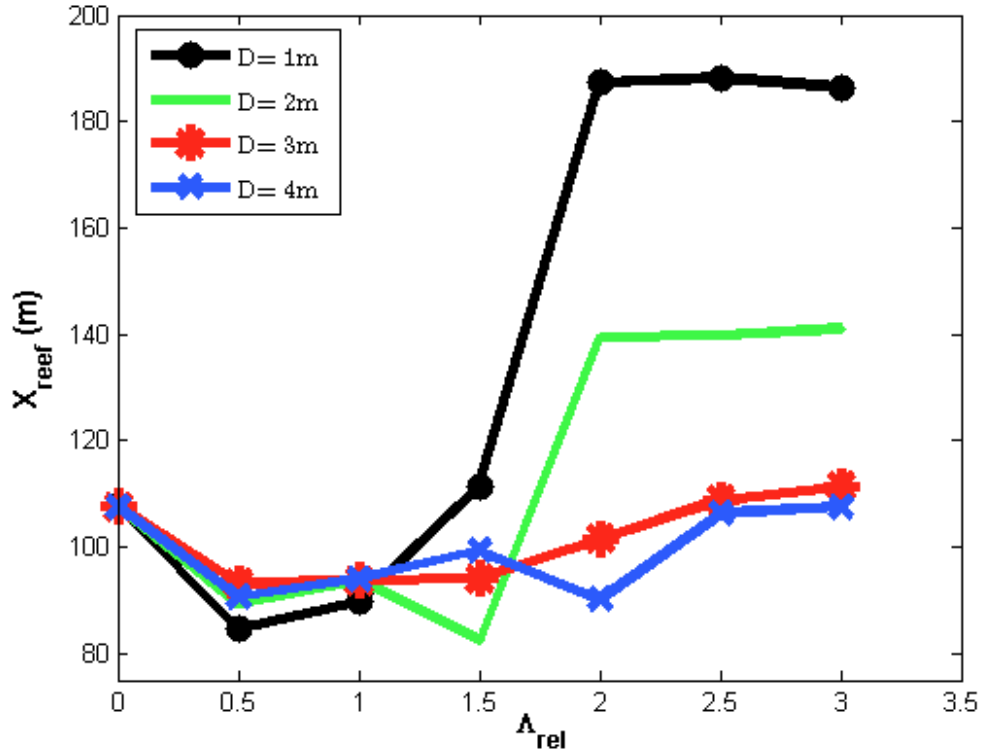


Figura 27: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo relativo ($\Lambda_{rel} = \Lambda/\lambda_{reef}$), para el escenario de la media de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

Las tendencias descritas en las Figuras 26 y 27 son contrarias a las determinadas por West (2002) que, al representar gráficamente el efecto de la variación de Λ_{rel} sobre X_{reef} , encontró que X_{reef} siempre fue mayor que X_{beach} y además, aumentó proporcionalmente con Λ_{rel} hasta un punto donde mantuvo constante. Esto puede deberse a que mantuvo la anchura y la altura arrecifal constante igual a $W = 5$ m y $D = 1.5$ m y además, Λ fue una extensión de la costa que varió hacia mar adentro.

En la Figura 28 se observa que para cualquier Λ_{rel} , X_{reef} siempre fue menor que X_{beach} igual a 262.76 m, ya que no se produce ningún efecto en el enfoque de la energía del oleaje, debido a que la ruptura del oleaje se produce

antes que interactúe con la estructura, por lo que para cualquier Λ_{rel} , los arrecifes actúan como estructura de protección costera.

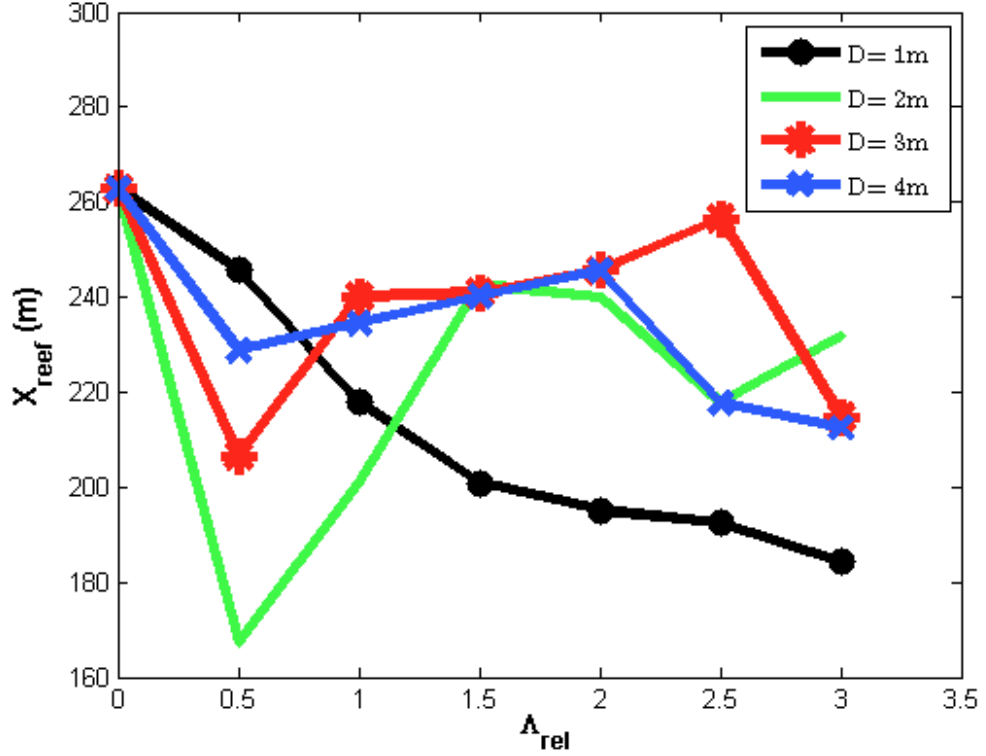


Figura 28: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo relativo ($\Lambda_{\text{rel}} = \Lambda/\lambda_{\text{reef}}$), para es escenario máximo de la serie. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

De estos resultados, se puede concluir que debido a la influencia de la estructura arrecifal se produce un aumento en la distancia de ruptura máxima (ΔX), con un Λ_{rel} igual a 2.5 y una $D = 2$ m para la climatología media de verano y una $D = 1$ m para la de invierno, igual a 32.26 m y 80.58 m, respectivamente.

V.2.3. Influencia del ancho estructural en la altura de ruptura

En las Figuras 29, 30 y 31 se presenta el factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la anchura relativa (W_{rel}) según diferentes alturas constantes (D) para los tres escenarios analizados. Cabe destacar que tanto el factor de focalización del oleaje ($K_{\text{focus}} = H_{\text{reef}} / H_{\text{beach}}$) como el ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W / \lambda_{\text{reef}}$) son parámetros adimensionales del oleaje.

En la Figura 29 puede observarse que, para cualquier $0 < W_{\text{rel}} \leq 2.85$, tanto $D = 1$ m como $D = 4$ m, presentan un K_{focus} menor a la unidad, con esto se observa claramente un déficit de energía sobre la estructura con respecto a la que habría sin ella. Se cree que esto puede ser causado por la disipación por rompimiento del oleaje o por una redistribución de su energía hacia otra parte ajena al arrecife. Cabe destacar que otra forma en que se puede disipar la energía del oleaje sería por la acción del viento y, las corrientes litorales o de retorno, sin embargo, no se utilizaron estos forzamientos en la modelación. Consecuentemente, bajo este contexto, la altura de ruptura del oleaje sea menor que en estado natural sin el arrecife. Sin embargo, para $D = 2$ y $D = 3$ m desde $W_{\text{rel}} > 0$, K_{focus} presenta una tendencia creciente en K_{focus} , producto de la focalización del oleaje, hasta $W_{\text{rel}} = 0.91$ donde se observa un pico marcado que coincide con K_{focus} máximo igual a 1.13 y 1.31, respectivamente; para valores de $D_{\text{rel}} > 0.9$ la tendencia es a decrecer en K_{focus} .

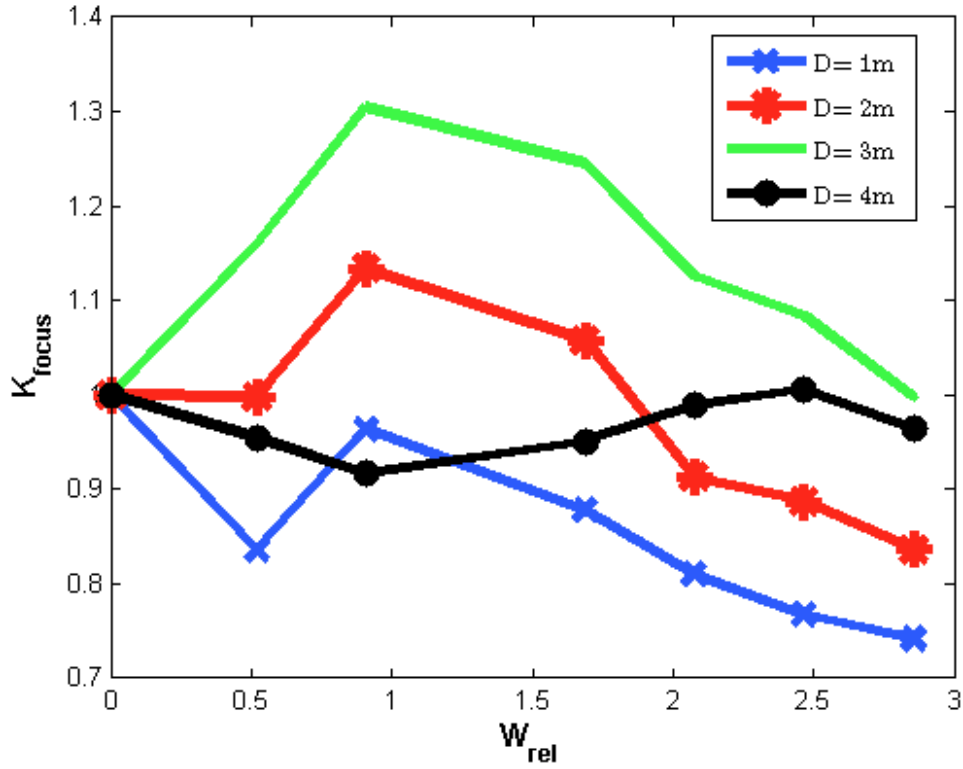


Figura 29: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función al ancho relativo ($W_{rel} = W/\lambda_{reef}$), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

En la Figura 30 se observa que, para $D = 2$ desde $W_{rel} > 0$, K_{focus} presenta una tendencia creciente en K_{focus} , producto de la focalización del oleaje, hasta $W_{rel} = 0.91$ donde se observa el máximo valor de K_{focus} igual a 1.14 hasta $W_{rel} \leq 1.69$; para valores de $D_{rel} > 1.69$ la tendencia es a decrecer en K_{focus} . Par todas las alturas arrecifales restantes, con $0 < W_{rel} \leq 2.85$, K_{focus} es menor a 1, ya que no se observa ningún efecto en la focalización de la energía de las olas sobre la estructura con estas configuraciones arrecifales y en consecuencia, la altura de ruptura del oleaje es menor que en ausencia de éstas.

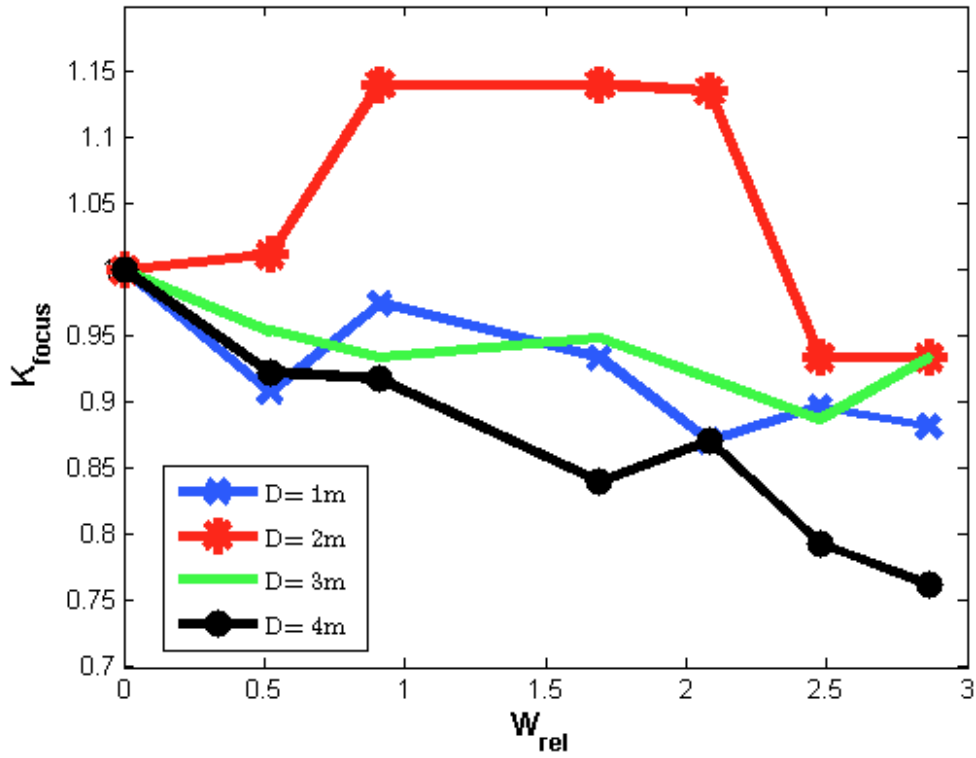


Figura 30: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función al ancho relativo ($W_{rel} = W/\lambda_{reef}$), para la condición media de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

Las tendencias de las Figuras 29 y 30 son contrarias a las determinadas por West (2002), que encontró un incremento lineal K_{focus} con W_{rel} para todas las estructuras arrecifales de altura constante y un aumento de dK_{focus} / dW_{rel} para los arrecifes de mayor altura, posiblemente debido a que consideró estructuras con una Λ infinita, para centrarse solo en el efecto de W_{rel} y D sobre K_{focus} .

En la Figura 31 se observa que para cualquier W_{rel} , K_{focus} siempre fue menor o igual a 1, ya que la estructura no produce ningún efecto en el enfoque de la energía del oleaje, ya que el oleaje va a estar rompiendo antes que interactúe con el arrecife; es por esto que para cualquier W_{rel} las configuraciones arrecifales actuarán como estructura de protección costera.

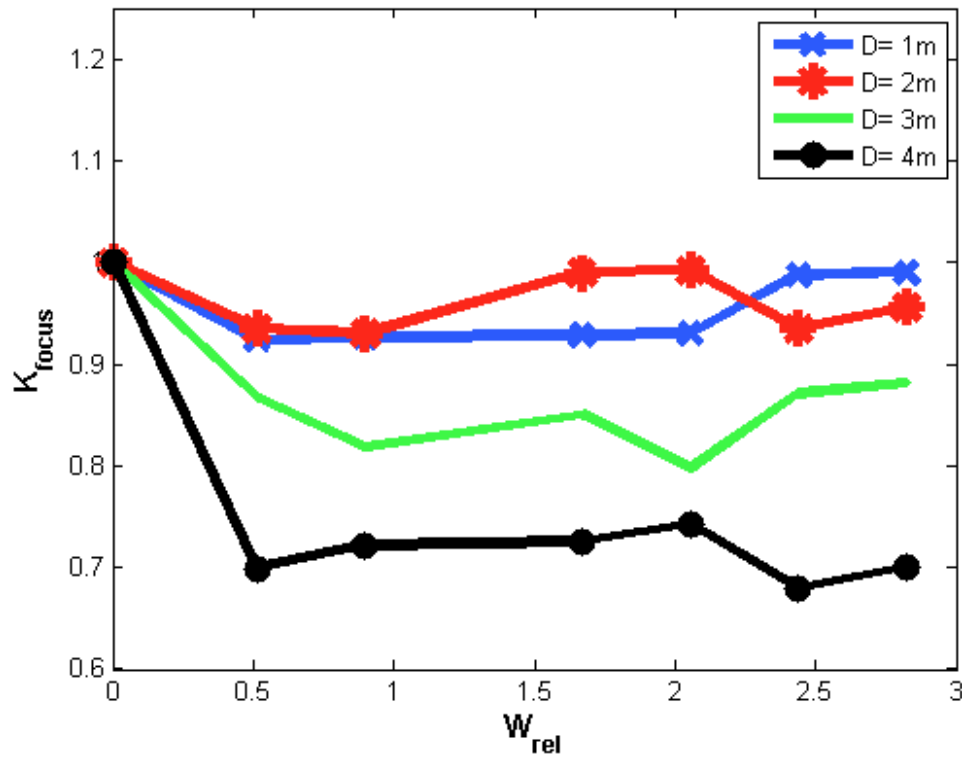


Figura 31: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función al ancho relativo ($W_{rel} = W/\lambda_{ref}$), para la condición máxima. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que el efecto relativo de la focalización máxima que experimentó el oleaje a causa de la estructura arrecifal con una $W_{rel} = 0.91$, fue igual a $K_{focus} = 1.31$ con $D = 3$ m, para la climatología del oleaje media de verano y, $K_{focus} = 1.14$ y $D = 2$ m para la media de invierno.

V.2.3.1. Influencia del ancho estructural en la distancia de ruptura

En las Figuras 32, 32 y 34 se presenta la distancia de ruptura del oleaje por efecto de la estructura arrecifal (X_{reef}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{reef}}$) y diferentes alturas estructurales constantes (D), para la climatología del oleaje media de verano invierno y la máxima de la serie de tiempo, respectivamente.

En la Figura 32 se puede apreciar como con un W igual a la mitad de la λ_{reef} y una D igual a 1 m y 4 m, X_{reef} es menor que la X_{beach} ($W_{\text{rel}} = 0$ m). Sin embargo, para una D igual a 2 m y 3 m se observa una tendencia creciente en X_{reef} a partir de $W_{\text{rel}} > 0$ m, con un máximo muy claro cuando W es igual a λ , que genera una X_{reef} máxima de 74.28 m y 85.43 m, respectivamente. A medida que $W > \lambda$ para estructuras con una D igual a 1 m, 2 m y 3 m, X_{reef} decrece, mientras que para $D = 4$ m la tendencia es a aumentar en X_{reef} .

A diferencia del aumento del X_{reef} en función de D , el incremento de X_{reef} en relación a W_{rel} no se debe al desplazamiento estructural hacia mar adentro ya que el efecto de asomeramiento sobre la estructura arrecifal (X_r) depende de D así como de la pendiente batimétrica y, como ambas variables se mantuvieron constantes, implica que X_r también lo sea (Ec. 9). Así, el aumento de X_{reef} por la influencia del ancho estructural, podría atribuirse a la focalización de la energía por parte de las estructuras arrecifales.

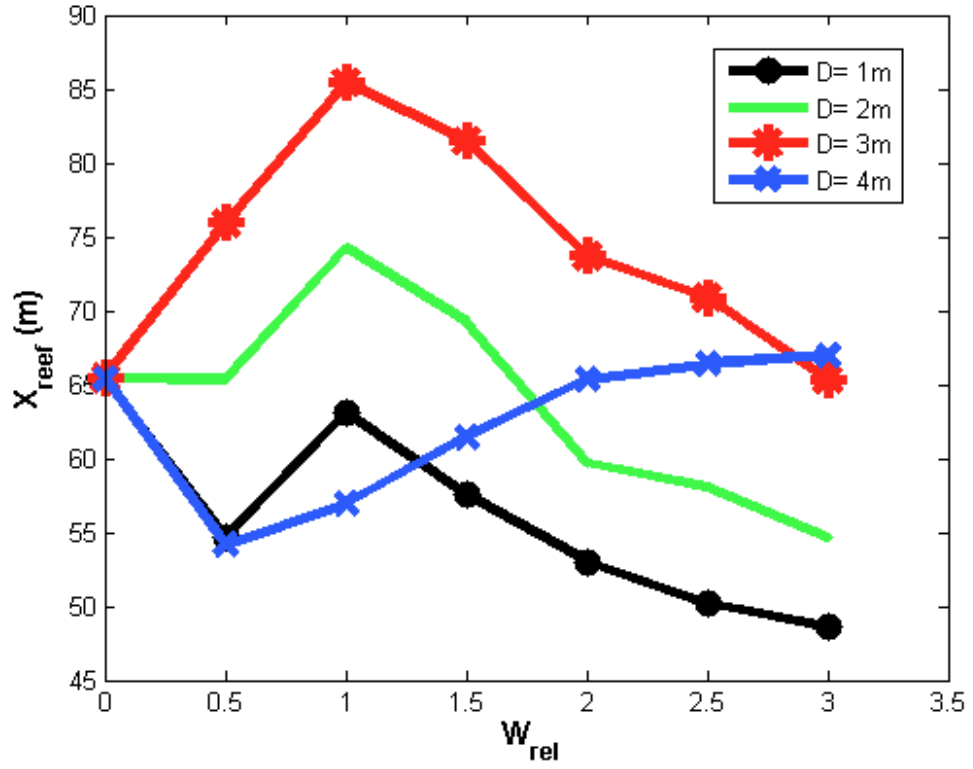


Figura 32: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función al ancho relativo ($W_{rel} = W/\lambda_{rel}$), para el escenario de la media de verano. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

En la Figura 33 se observa que cualquiera sea W_{rel} , con una D igual a 1 m, 3 m y 4 m, X_{reef} es siempre menor que la X_{beach} ($W_{rel} = 0$ m). Sin embargo, para una D igual a 2 m se observa una tendencia creciente a partir de $W_{rel} > 0$, con una X_{reef} máxima igual a 122.84 m entre $1 \leq W_{rel} \leq 1.5$; para valores mayores de $W_{rel} > 1.5$, la tendencia es a decrecer en X_{reef} .

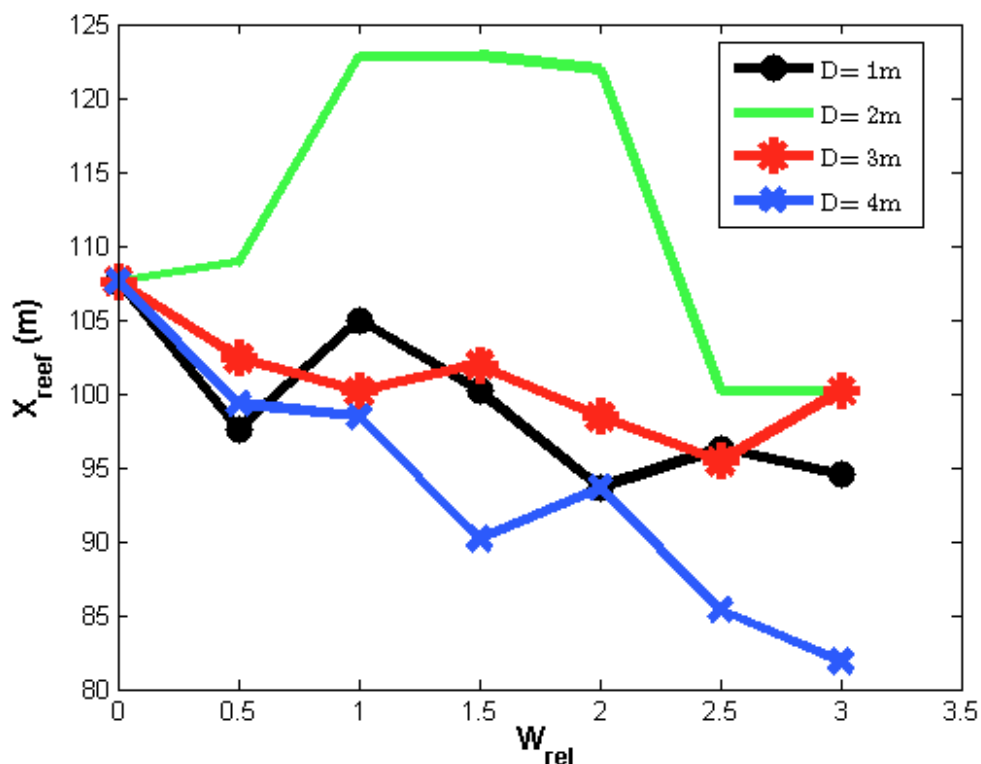


Figura 33: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función al ancho relativo ($W_{rel} = W/\lambda_{rel}$), para el escenario de la media de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

Las tendencias de las Figuras 32 y 33 descritas anteriormente, difieren a las determinadas por West (2002) que, al representar gráficamente el efecto de la variación de W_{rel} sobre X_{reef} , encontró en todas las simulaciones realizadas que las estructuras de D constante generaron siempre una X_{reef} mayor a X_{beach} y también, aumentó X_{reef} proporcionalmente con W_{rel} . Además, los arrecifes de mayor D produjeron un aumento en X_{reef} , debido al efecto de asomeramiento por el desplazamiento estructural hacia mar adentro.

En la Figura 34 se observa que para cualquier W_{rel} , X_{beach} siempre fue menor que X_{beach} igual a 262.76 m, ya que no se produce ningún efecto de asomeramiento sobre la estructura arrecifal, debido a que, como se explicó anteriormente, la ruptura del oleaje se produce antes que interactúe con la

estructura, por lo que para cualquier W_{rel} y cuando mayor sea la D , los arrecifes actúan en mayor grado como estructura de protección costera.

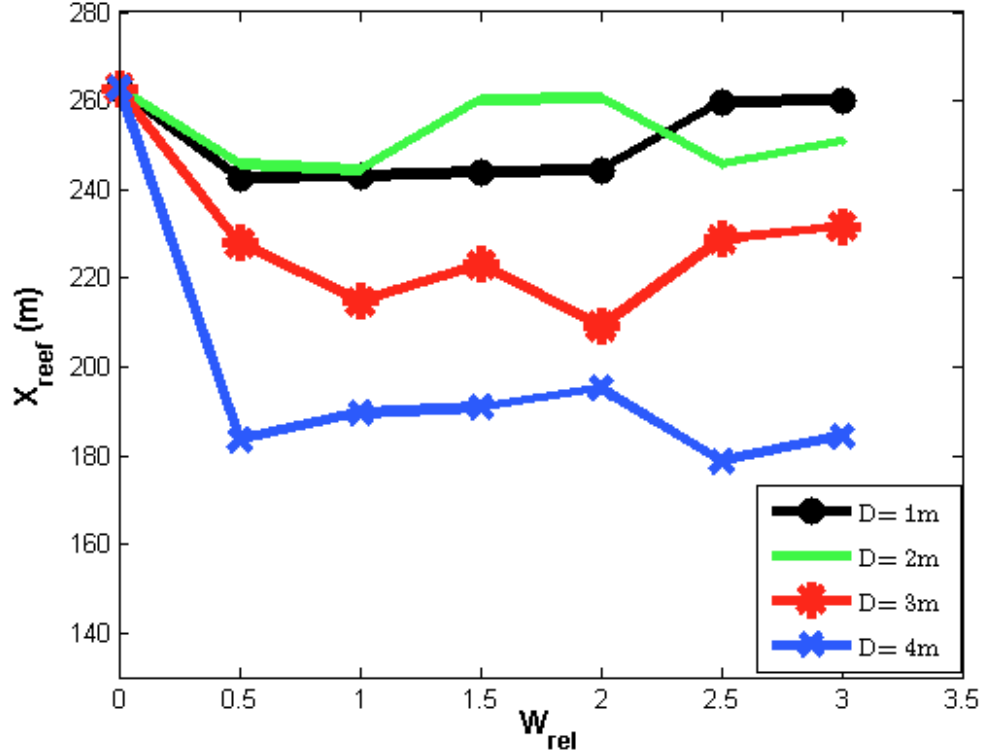


Figura 34: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función al ancho relativo ($W_{\text{rel}} = W/\lambda_{\text{rel}}$), para el escenario máximo. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

De esta manera, se puede observar que debido a influencia de la estructura arrecifal se produjo un aumento en la distancia de ruptura máxima (ΔX), con un W igual a λ y una D igual a 3 m para la climatología media de verano y una $D = 2$ m para la de invierno, igual a 20 m y 15.20 m, respectivamente.

V.2.4. Influencia del largo y el ancho estructural en la altura de ruptura

En las Figuras 35, 36 y 37 se representa el factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa (D_{rel}), según diferentes largos y anchos estructurales (Λ , W) para los 3 escenarios analizados.

En la Figura 35 se puede apreciar como con una $D_{\text{rel}} = 0.25$, para las estructuras más pequeñas de $0.5 \lambda \leq (\Lambda , W) \leq 1.5 \lambda$, K_{focus} es menor a 1 ($D_{\text{rel}} = 0$ m) atribuido a que no se produce enfoque de la energía del oleaje sobre estas configuraciones arrecifales, por lo que la altura de ruptura será menor que en estado natural sin el arrecife. Sin embargo, para las configuraciones restantes, K_{focus} es mayor que 1, ya que se produce focalización de la energía del oleaje sobre las estructuras, con una tendencia creciente en K_{focus} hasta $D_{\text{rel}} = 2/3$ donde se observa para las estructuras de mayores dimensiones (Λ , W) = 2.5λ y 3λ el máximo valor de K_{focus} igual a 1.44. Para todas las (Λ , W) con una $D_{\text{rel}} > 1.5$, la tendencia es decrecer en K_{focus} .

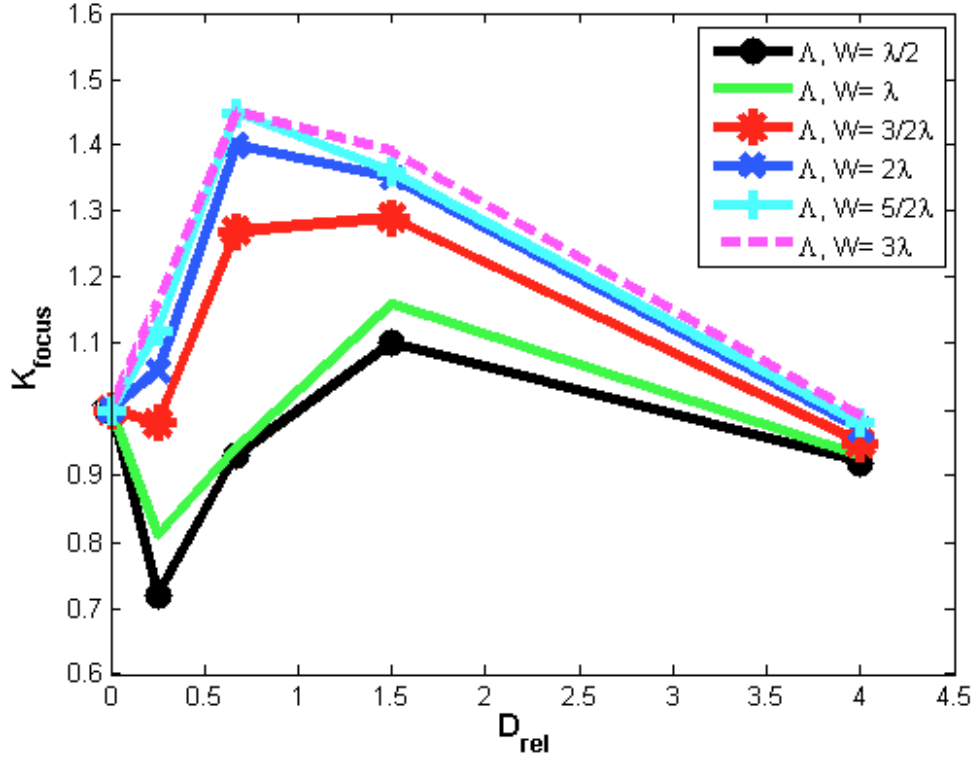


Figura 35: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{rel} = D/h_{reef}$), para la condición media de verano. Cada línea representa estructuras con el mismo largo y ancho (Λ, W).

Se puede observar en la Figura 36 como con una $D_{rel} = 0.25$, para las estructuras de dimensiones extremas de $(\Lambda, W) = (0.5, 1, 2.5 \text{ y } 3)\lambda$, K_{focus} es menor a 1 ($D_{rel} = 0 \text{ m}$) ya que no se produce focalización de la energía del oleaje sobre estas configuraciones arrecifales. Para las configuraciones restantes, K_{focus} es mayor a 1, debido al efecto focalizante de la energía del oleaje sobre las estructuras, con una tendencia creciente en K_{focus} hasta $D_{rel} = 2/3$ donde se observa un máximo marcado para $(\Lambda, W) = 5/2 \lambda$ con un valor máximo de K_{focus} igual a 1.35. Para valores mayores de D_{rel} , la tendencia es a decrecer en K_{focus} .

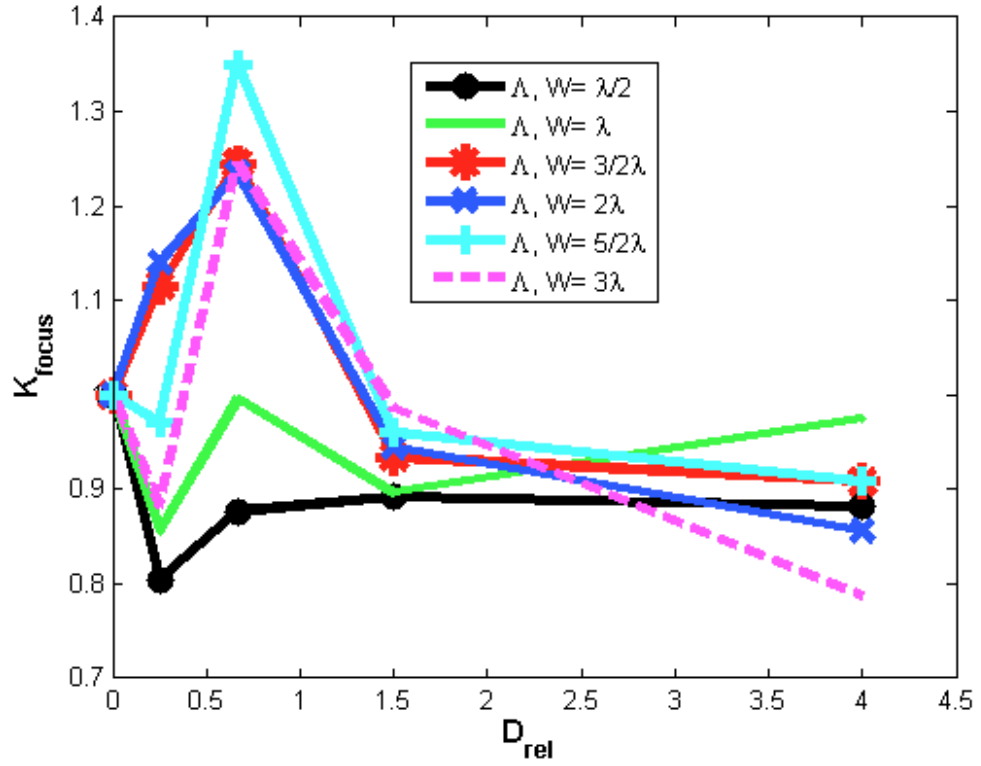


Figura 36: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{rel} = D/h_{reef}$), para la condición media de invierno. Cada línea representa estructuras con el mismo largo y ancho (Λ, W).

En la Figura 37 se observa que para cualquier D_{rel} , K_{focus} siempre fue menor que 1, ya que no se produce ningún efecto en el enfoque de la energía del oleaje, debido a que, como se explicó anteriormente, la ruptura del oleaje se producirá antes que interactúe con la estructura, por lo que para cualquier D_{rel} los arrecifes actúan como estructura de protección costera.

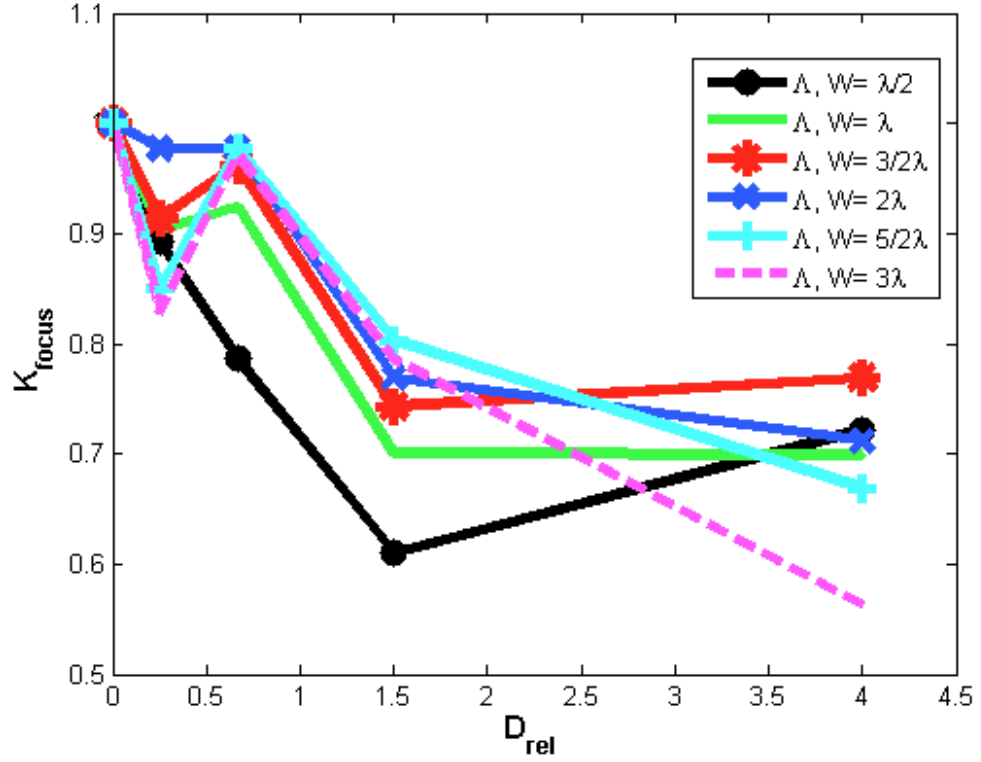


Figura 37: Factor de focalización del oleaje (K_{focus}) en función a la altura relativa ($D_{rel} = D/h_{reef}$), para la condición máxima. Cada línea representa estructuras con el mismo largo y ancho (Λ, W).

Consecuentemente, se puede observar que la máxima focalización de la energía del oleaje fue 6.25% mayor para la media de verano que la de invierno con una estructura de $(\Lambda, W) = 5/2 \lambda$ y $D_{rel} = 2/3$.

En las Figuras 35 y 36 se puede observar que al variar proporcionalmente el ancho y el largo, las estructuras más amplias $(\Lambda, W) = 2.5 \lambda$ producen una mayor focalización de la energía del oleaje, sin embargo esto se debe a que Λ posee un efecto focalizante más determinante que W y por lo tanto implícitamente H_{reef} se verá condicionada en mayor grado por Λ que por W .

V.2.4.1. Influencia del largo y el ancho estructural en la distancia de ruptura

En las Figuras 38, 39 y 40 se representa la distancia de ruptura del oleaje por efecto de la estructura arrecifal (X_{reef}) en función a la razón entre el largo y ancho estructural relativo ($\Lambda_{\text{rel}}, W_{\text{rel}}$), para los 3 escenarios analizados. Tanto para la media de verano como para la de invierno (Figs. 38 y 39), con una configuración arrecifal igual a la mitad de λ , con excepción de la $D = 3$ m de la media de verano, se observa que la X_{reef} es menor que la X_{beach} sin estructura, atribuido a que no se produce focalización de la energía del oleaje sobre las estructuras arrecifales. Con configuraciones mayores a la mitad de λ_{reef} , comienza a observarse una tendencia en forma sigmoide creciente en X_{reef} debido al efecto de la focalización de la energía de las olas sobre las estructuras, hasta $D = 2$ m y $(\Lambda, W) / \lambda = 2.5$ donde se produce la máxima $X_{\text{reef}} = 94.4$ m y 145.1 m. para la media de verano e invierno, respectivamente.

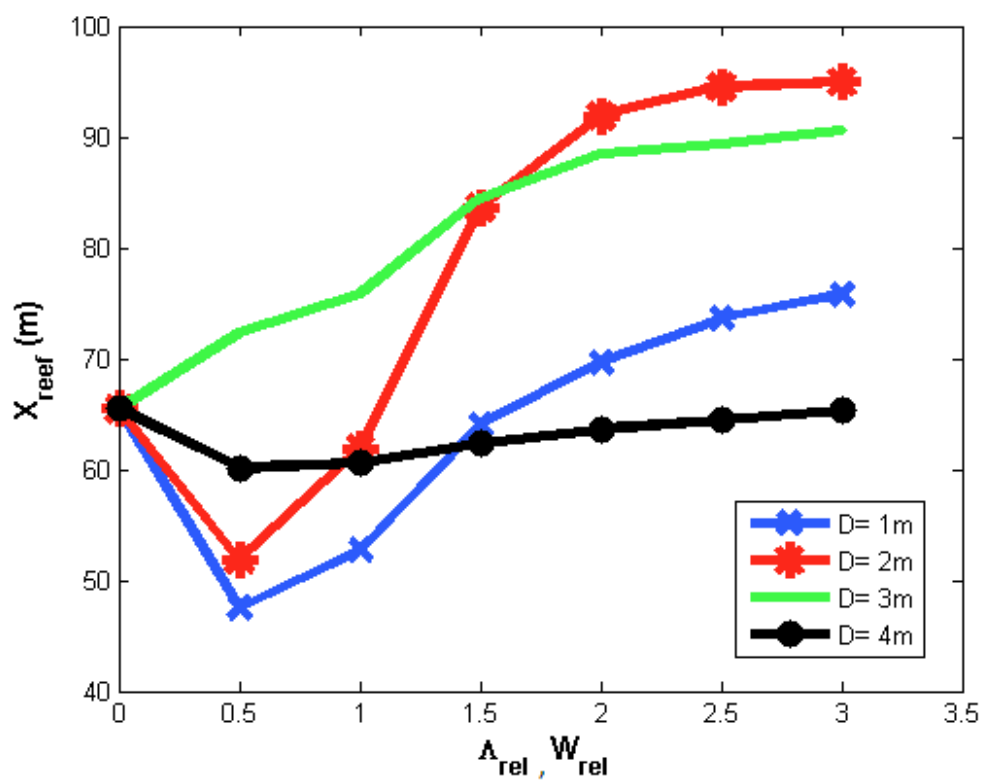


Figura 38: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo y ancho estructural relativo (Λ_{rel}, W_{rel}) para el escenario medio de verano. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

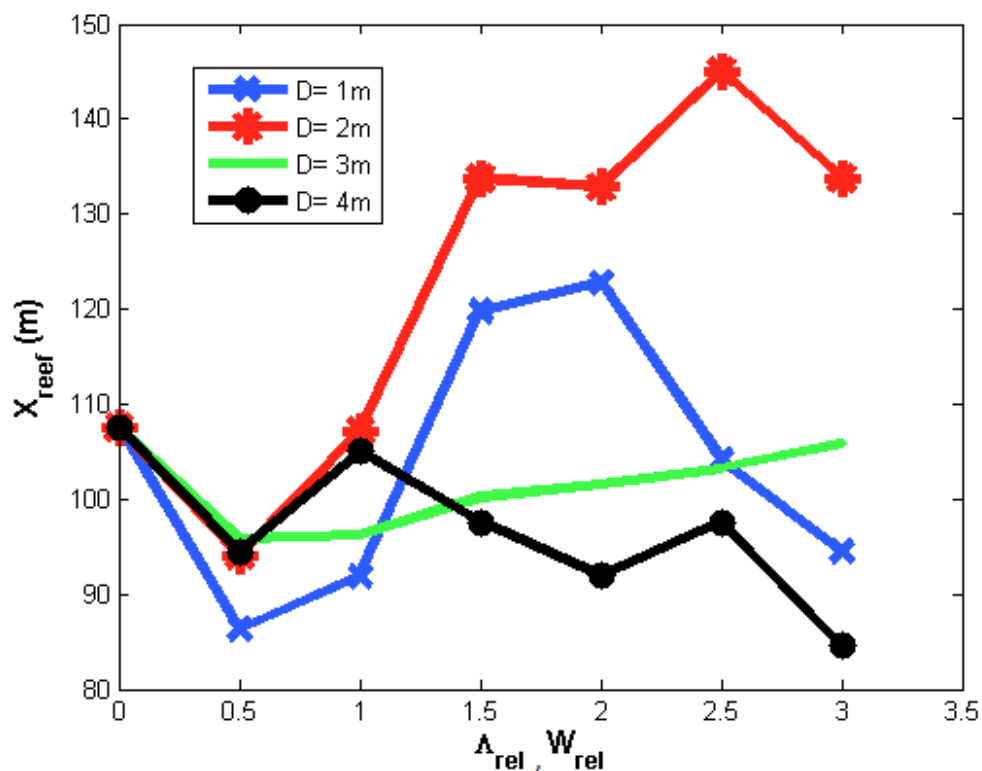


Figura 39: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo y ancho estructural relativo (A_{rel}, W_{rel}) para el escenario medio de invierno. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

En la Figura 40 se observa que, para cualquier D , X_{reef} siempre fue menor que X_{beach} igual a 262.76 m. Esto se debe a que la ola va a estar rompiendo antes que interactúe con la estructura. Cuanto mayor sea D , mayor será la protección que ejerza la estructura sobre la costa. De esta manera, para cualquier D los arrecifes actúan como estructura de protección costera.

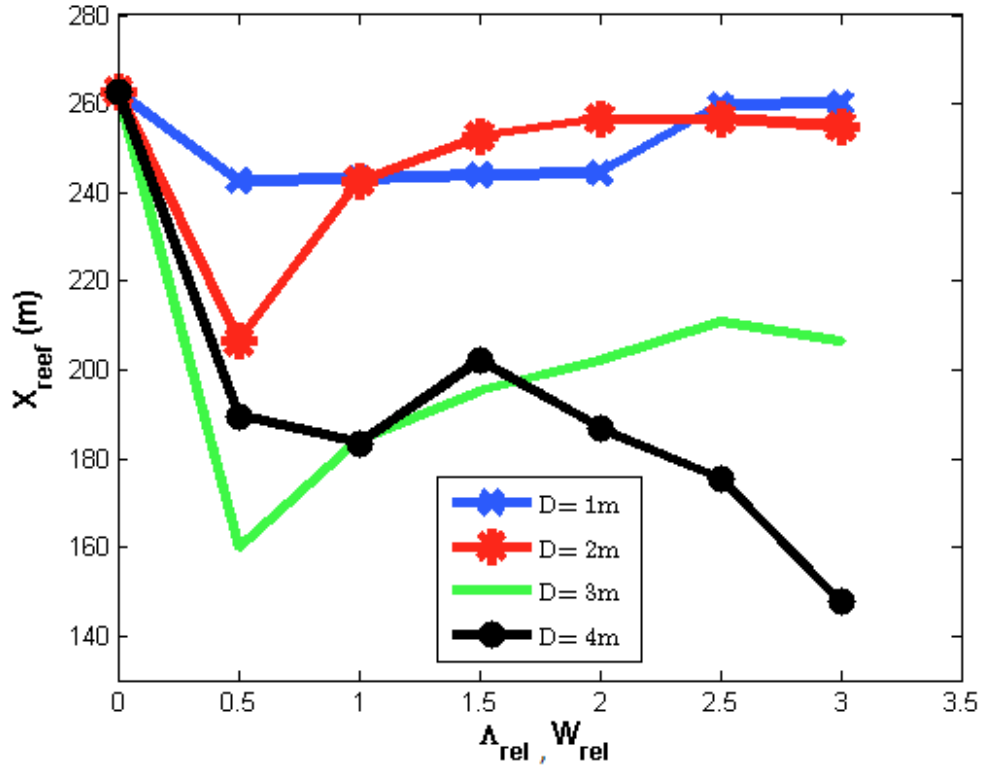


Figura 40: Distancia de ruptura del oleaje con la estructura arrecifal (X_{reef}) en función del largo y ancho estructural relativo (Λ_{rel}, W_{rel}), para el escenario máximo. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

Tanto para la media de verano como para la de invierno se puede observar que las mayores X_{reef} se generan con las estructuras de mayores dimensiones (Fig. 38 y 39). Sin embargo, esto se debe a que el efecto de Λ prevalece ante W en relación a la focalización de la energía del oleaje y, por consiguiente al aumento neto de la zona de surf (ΔX). A partir de esto, en relación a lo que conlleva el derrame económico para construir estructuras de forma redituable, es aconsejable escoger una estructura arrecifal con una $\Lambda = 2 \lambda$ (Figs. 26 y 27) y un W de tamaño igual a λ (Figs. 32 y 33), ya que ésta es la configuración más eficaz que se genera con la menor inversión de material.

De esta manera, se puede observar que debido a la influencia de la estructura arrecifal con un $(\Lambda_{\text{rel}}, W_{\text{rel}}) = 2.5$ y una $D = 2$ m, se produjo un aumento en la distancia de ruptura máxima (ΔX) igual a 28.95 m y 37.49 m, para la climatología media de verano e invierno, respectivamente.

V.3. Ruptura del oleaje

En el modelo REF/DIF la ruptura del oleaje se incluye de forma paramétrica, por lo tanto, no es del todo adecuado para el cálculo del ángulo de rotura del oleaje (α). Por ello, para investigar el efecto de las dimensiones estructurales en α , se realizaron simulaciones de alta resolución con el modelo FLOW-3D. El análisis preliminar de los datos del α obtenido de REF/DIF indicó que el ancho y la altura de la estructural determinan α en mayor medida que Λ . Por esto, en las simulaciones con FLOW-3D se mantuvo la longitud estructural constante de $\Lambda = 2 \lambda_{\text{ref}}$ y se varió el ancho relativo $W_{\text{rel}} = 1, 5/4, 3/2, 7/4, 2$ y la altura arrecifal en $D = 2, 2.5, 3$ m para las condiciones del oleaje medias de verano e invierno de la serie de tiempo.

Las Figuras 41 y 42 representan el ángulo del rotura (α) en función a al ancho relativo (W_{rel}), para los escenarios de la medias de verano e invierno, determinado mediante el modelo numérico FLOW-3D, respectivamente.

En la Figura 41 se puede observar que para toda D ocurre una tendencia decreciente en α a medida que se incrementa W_{rel} . Además, puede notarse que los valores máximos de α los genera una $D = 2.5$ m, y los valores más bajos lo produce $D = 2$ m. De esta manera, para cualquier valor de W_{rel} y D , α posee valores entre 31° y 53° .

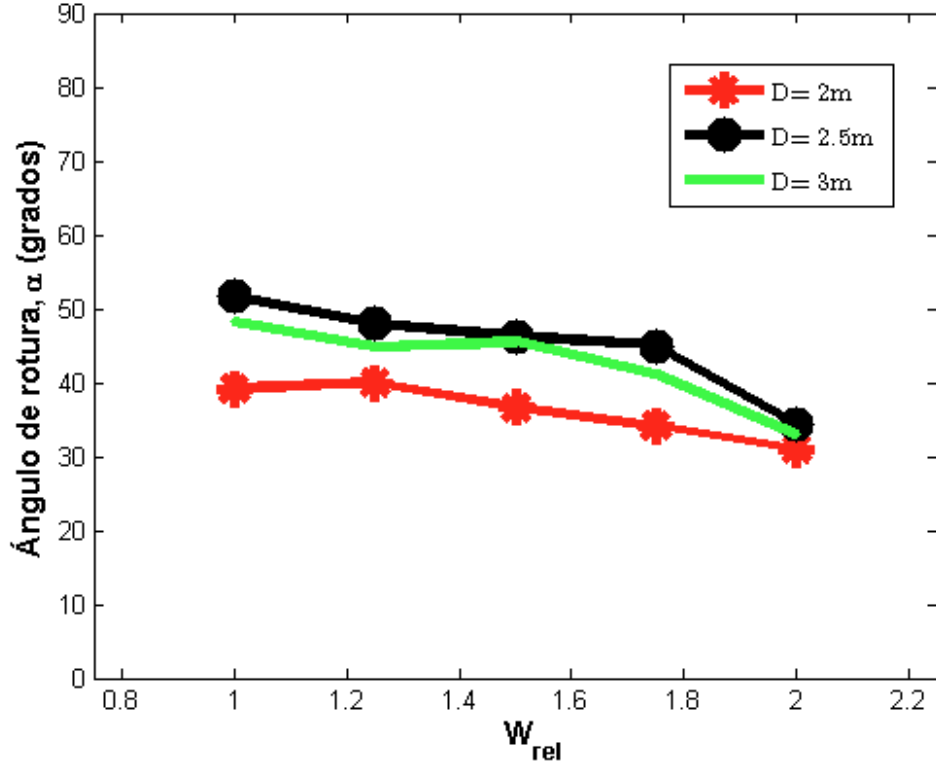


Figura 41: Ángulo de rotura (α) en función del ancho relativo ($W_{rel} = W/\lambda_{reef}$), para la condición media de verano determinado mediante el modelo numérico FLOW-3D. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

En la Figura 42 se distingue una tendencia decreciente en α a medida que se incrementa en W_{rel} . Asimismo, para cualquier $W_{rel} > 1.3$, el valor del ángulo de rotura aumenta conforme se incrementa D . Sin embargo, para $W_{rel} = 1$, el valor más alto de α lo genera $D = 2.5$ m. De esta forma, se puede observar que todas las estructuras analizadas generan un ángulo de rotura entre $30^\circ < \alpha < 68^\circ$.

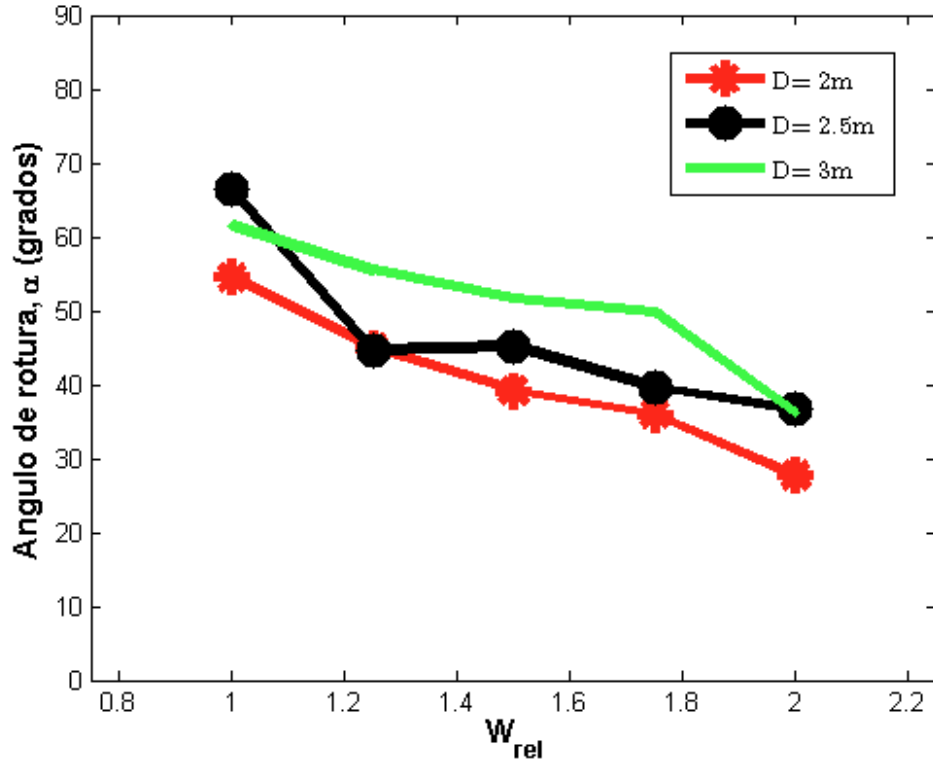


Figura 42: Ángulo de rotura (α) en función del ancho relativo ($W_{rel} = W/\lambda_{reef}$), para la condición media de invierno determinado mediante el modelo numérico FLOW-3D. Cada línea representa estructuras con la misma altura (D).

Estos resultados indican que el ángulo de rotura causado por un arrecife con $\Lambda = 2 \lambda_{reef}$ se encuentre dentro del rango de surfeabilidad establecido por Walker (1974) que es entre 30° y 60° .

Por otro lado, se observa que tanto en invierno como en verano, una $D = 2$ m produce valores de α menores o iguales que $D = 2.5$ m y $D = 3$ m, por lo que en relación al costo económico que supone la construcción arrecifal, $D = 2$ m podría ser más económica ya que D menores implican menores gastos de material. Además, tal como se esperaba, el aumento en W genera valores de α menores por lo que en términos de surfeabilidad, $W = 2 \lambda$ es el ancho que genera ángulos de rotura próximos a $\alpha = 30^\circ$. Con un $W = 2 \lambda$ y una D

$= 2$ m, la estructura clasifica dentro de la categoría *ruptura de clase mundial* en ambas estaciones. Sin embargo, en términos de rentabilidad práctica y económica, $W = \lambda$ es la anchura idónea ya que el costo de material se reduce en la mitad. Además, al escoger un anchura arrecifal menor no sólo se ve reflejado en el aumento de α , sino que también lo hace el número de usuarios debido a que pasa de ser una rompiente exclusiva para niveles expertos, a abarcar también niveles intermedios, lo que genera que la ola pueda ser surfada por un mayor número de deportistas.

Galvin (1968) describió y clasificó la ruptura del oleaje en cuatro categorías de vital importancia desde el punto de vista del surfista (Fig. 5). Con un período del oleaje igual 11.24 s y 11.20 s (Tabla II), una pendiente del fondo $= 1 : 43.5$ y una $H_{\text{reef}} = 1.62$ m y 2.54 m que genera la configuración óptima elegida, según la (Ec. 15), se determinó un G_b igual a 0.057 y 0.0896 para la climatología del oleaje medio de verano e invierno, respectivamente. Con estos valores, se puede caracterizar a las rompientes en forma de *tubo* para la condición media de verano y *derramante* para la de invierno. Por tanto, las rupturas de las olas producidas son adecuadas para la práctica del surf (Walker *et al.*, 1972).

Hutt (2001) investigó las relaciones existentes entre el ángulo de rotura, la altura de ola y el nivel de destreza del surfista obteniendo los resultados que se muestran en la (Tabla III).

Tabla III: Ángulo de rotura en función de la altura de ola significativa y el nivel de destreza del surfista propuesto por Hutt *et al.*, (2001).

Nivel de destreza	Descripción	Hs (m)	α°
1- Principiante	Principiantes, no se deslizan por la pared, surfean la sección rota de la ola	0.7- 1.0	--
2- Principiante	Capaz de deslizarse por la pared de la ola	0.65- 1.5	70
3- Principiante	Capaz de generar velocidad	0.6- 2.5	60
4- Intermedio	Capaz de realizar maniobras básicas ocasionalmente	0.55- 4.0	55
5- Intermedio	Capaz de realizar maniobras básicas consecutivamente	0.5 +	50
6- Intermedio/Avanzado	Capaz de realizar maniobras avanzadas ocasionalmente	0.45 +	40
7- Avanzado	Capaz de realizar maniobras avanzadas consecutivamente	0.40 +	29
8- Avanzado	Profesional	0.35 +	< 27

En la Figura 43 se muestra la relación que existe entre los niveles de destreza descritos en la (Tabla III), la altura de ola y el ángulo de rotura, Hutt (2001).

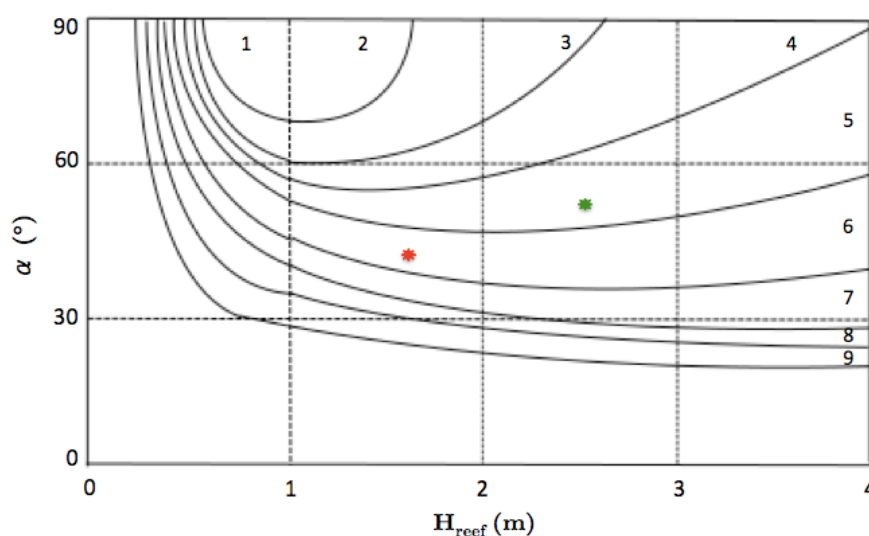


Figura 43: Ángulo de rotura (α) en función de la altura de ola (H_{ref}) y el nivel de destreza del surfista propuesto por Hutt *et al.*, (2001). El asterisco rojo y verde denota el escenarios de la media de verano e invierno, respectivamente.

Puede observarse como conjuntamente el efecto de la altura de ruptura y el ángulo de rotura condicionan el nivel de destreza del surfista. Con los resultados obtenidos, la configuración arrecifal óptima queda definida para las condiciones climatológicas del oleaje medias de verano e invierno, con dimensiones $\Lambda = 2 \lambda$, $W = \lambda$ y $D = 2$ m. Dicha relación de aspecto, según la condición media del oleaje de verano, genera una altura de ruptura igual a 1.62 m y un ángulo de rotura próximo a los 40° y, según lo propuesto por Hutt (2001), queda definido para niveles de destreza tipo 6 (Fig. 43), por lo cual, es apta para surfistas de condición intermedia capaces de realizar maniobras avanzadas ocasionalmente (Tabla III). Así mismo, para los parámetros del oleaje medios de invierno, la misma configuración elegida genera una $H_{\text{reef}} = 2.53$ m y un $\alpha = 55^\circ$, por lo que es adecuada para niveles de destreza tipo 5 (Fig. 43), idóneo para deportistas intermedios con la capacidad de efectuar maniobras básicas consecutivamente (Tabla III). Esta relación de aspecto ideal genera un oleaje con una altura de ruptura y un ángulo de rotura idóneo para que un gran número de usuarios de nivel de destreza intermedio, e incluso avanzados, puedan disfrutar del surf en Playa Hermosa. Además, en relación al costo que conlleva la construcción de la estructura arrecifal, se ha minimizado la cantidad de material utilizado en la construcción para generar los mejores resultados. Para trabajos afines futuros, se recomienda discretizar el dominio con una resolución mayor en el eje z , para poder observar en detalle la forma y tipo de rompiente que produce la estructura arrecifal diseñada en Playa Hermosa.

Otra cuestión a tener en cuenta es que al adjuntar la estructura arrecifal al perfil batimétrico, para simplificar el estudio, se consideró una batimetría homogénea en todo el dominio debido a que ésta, para la zona de

estudio determinada en el mes de junio del 2014, presentó una cierta regularidad, similitud y paralelismo en las isóbatas sin evidencias de barras sumergidas. Sin embargo, naturalmente Playa Hermosa presenta en término generales, una morfodinámica bastante disipativa con presencia de barras que migran estacionalmente. Dichas barras se encuentran entre 2 m y 4 m de profundidad y, aunque no son de gran tamaño, una vez que el oleaje rompa sobre el arrecife, podría volver a formarse la ola y romper por segunda vez al propagarse hacia la línea de costa por causa de la interacción con las barras. Este fenómeno solo se produce cuando el oleaje es muy grande en algunos lugares puntuales. El objetivo del trabajo fue determinar el efecto focalizante del oleaje al propagarse encima de la estructura arrecifal y, debido a que ésta se diseñó en una cota de 5 metros de profundidad, las barras pueden ser despreciadas. No obstante, la acción estructural, sí podría tener un efecto significativo en la formación de las barras, ya que las dimensiones estructurales son considerables próximas a los 200 metros. Por otro lado, para ampliar en detalle la modelación, se podría adjuntar la estructura ideal a diferentes perfiles de playa reales estacionales, para determinar de esta forma el efecto que produce la progradación y erosión costera sobre las estructuras arrecifales y, a su vez, evaluar cómo afecta directa o indirectamente el oleaje incidente a lo largo de un año.

Un fenómeno a tener en cuenta para próximos estudios, que no se ha considerado como forzamiento en los modelos utilizados, es la acción de la marea. Bermúdez-Zavala (1999) registró alturas de mareas en Ensenada, respecto al nivel de bajamar media inferior de 2.309 m para la pleamar máxima y de -0.587 m en la bajamar mínima registradas, lo cual da un rango mareal máximo de 2.896 m.

Una ventaja de haber trabajado con parámetros adimensionales, como se exhibe en las Figuras 17 y 18, es que se puede considerar a la columna de agua sobre la estructura (h_{reef}) directamente proporcional al rango mareal, por lo que en la estimación habría que adicionarle o sustraerle el valor de pleamar máxima y bajamar mínima, respectivamente. En otras palabras, bajo un contexto de pleamar, el aumento del nivel de mar actuará análogamente como si nos encontráramos con D menores y, recíprocamente en bajamar, con D mayores. Consecuentemente, cabría esperar que en pleamar, la marea produzca una menor influencia en la focalización de la energía del oleaje sobre la estructura, reflejado en valores de $K_{\text{focus}} < 1$, mientras que en bajamar, la estructura funcionará como un rompeolas.

Al incrementarse la zona de surf, es decir, cuanto mayores sea X_{reef} , se espera que la energía del oleaje que esté arribando a la línea de costa sea menor, ya que la ruptura anticipada del oleaje producirá un aumento en la distancia para que el oleaje se propague y disipe, lo que podría reflejarse en una mayor progradación de la playa. Se recomienda en futuras investigaciones, evaluar el impacto que pueda causar la estructura en sus alrededores, ya que podría generar problemas de erosión, cambios en el transporte de sedimento, corrientes de retorno y, en general, cambios en la morfología de la playa.

De esta manera, a la hora de planificar la implementación estructural en la zona costera, previamente es recomendable que se diseñe la configuración arrecifal según las características batimétricas y climatológicas de zona de estudio y, posteriormente, se realice un estudio de impacto ambiental en la zona a instalar la estructura.

VI. Conclusiones

A través de los capítulos anteriores se ha demostrado que es posible la utilización del concepto de focalización del oleaje mediante estructuras sumergidas para fines recreativos en playa Hermosa, Baja California. Las estructuras analizadas producen que el oleaje se focalice en un pico de la cresta de las olas, donde posteriormente da inicio su ruptura. Se verificó cómo los efectos de asomeramiento y focalización de la energía provocan una ruptura precoz del oleaje sobre las estructuras arrecifales, en comparación a una batimetría sin estructura. Esto proporcionará un tiempo mayor para que el surfista pueda fluir sobre la ola y se logrará generar una rompiente más surfable debido a que el ángulo de rotura aumentará respecto al estado de la playa natural sin arrecife.

La estructura arrecifal ideal que generó la mayor rentabilidad práctica y económica en Playa Hermosa, tuvo una forma elíptica definida con $D = 2 \text{ m}$, $\Lambda = 2 \lambda_{\text{reef}}$ y $W = \lambda_{\text{reef}}$. Al comparar estos resultados con las dimensiones estructurales instaladas en playas con características semejantes expuestas a condiciones de oleaje similares, se puede observar que la configuración arrecifal determinada para Playa Hermosa coincide con las del contexto internacional (ASR, 2008).

En relación al efecto de las dimensiones estructurales sobre los parámetros del oleaje, se determinó que el largo estructural posee una influencia mayor en H_{reef} , K_{focus} y X_{reef} que W y D para las mismas condiciones climatológicas del oleaje. Esto se debe a que Λ presentó un efecto más significativo en la focalización de la energía del oleaje sobre la estructura arrecifal, en comparación al resto de las dimensiones. Sin embargo, el ancho

estructural condiciona en mayor grado el ángulo de rotura, por lo que determina si la rompiente es más adecuada para la práctica del surf.

Además, se ha observado cómo el efecto relativo de la focalización que experimenta el oleaje sobre la estructura arrecifal —y por lo tanto H_{reef} — resultó ser más significativo para la condición media de verano de la serie de tiempo, en comparación con la de invierno.

En relación al escenario extremo registrado, no se ha observado para ninguno de los parámetros del oleaje analizados efectos de focalización de la energía sobre las configuraciones arrecifales diseñadas. Esto se debe a que la ruptura de las olas se ha producido antes de que interactúe con la estructura. Consecuentemente, durante un evento extremo se espera que el arrecife actúe como una estructura de protección costera, aunque quizás no sirva para la práctica del surf debido a que disipará la energía sobre éste.

Pese a que con el modelo REF / DIF se pudo determinar el ángulo de rotura del oleaje, se recomienda utilizar un modelo como el FLOW-3D, ya que en REF / DIF la rompiente se encuentra parametrizada, mientras que FLOW-3D utiliza las ecuaciones completas de Navier-Stokes y el método VOF. A pesar de que la resolución vertical de las simulaciones realizadas en FLOW-3D no permitió observar el tipo de rompiente, con los valores determinados de α en función a H_{reef} , se ha podido caracterizar a las rompientes en forma de *tubo* para la condición media de verano y *derramante* para la de invierno. Además, para los escenarios analizados, se puede clasificar el punto de surf creado con la estructura dentro del rango de surfeabilidad. Asimismo, la relación de aspecto óptima elegida, es indicada para que deportistas de niveles de destreza medios, e incluso avanzados, puedan disfrutar del surf en Playa Hermosa.

Otra de las ventajas que se ha observado es que, gracias a la focalización que generó la implementación de la estructura arrecifal sobre un punto de la cresta del oleaje, los surfistas podrán capturar las olas en el llamado *punto de despegue o take off* que, para la climatología del oleaje dada, se encuentra en una ubicación fija sobre el arrecife. En efecto, esto también logrará facilitar la surfeabilidad del deportista.

Actualmente, Playa Hermosa se encuentra en auge en relación al turismo relacionado al surf, contando con numerosas escuelas de surf y surfers que desarrollan a diario tal deporte. Sin embargo, a pesar de constar con oleaje apto para tal práctica durante la mayor parte del año, a lo largo de la costa se observa un común denominador en relación a que ola es muy *cerrada*; en otras palabras, el ángulo de rotura es muy pequeño. Esto genera que la ola se torne más difícil para ser corrida, reduciéndose sólo para niveles de surfistas avanzados, lo cual segrega a una gran parte de la comunidad de surfistas.

Con la implementación de la estructura arrecifal diseñada, no sólo se podrá incluir a un mayor número de usuarios, ya que el ángulo de rotura aumentará, sino que también se podrá estimular a surfers de niveles principiantes a experimentar nuevas olas y que den un salto hacia una rompiente más apta para la práctica del surf. Consecuentemente, los diferentes picos a lo largo de la playa se verán menos congestionados de deportistas y, además, el aumento del número de visitantes de todos los niveles producirá indirectamente una reactivación a nivel económico local.

Para finalizar, es menester señalar que antes de realizar pruebas de campo, se recomienda efectuar los correspondientes estudios acerca de los impactos ambientales en la zona del proyecto. La instalación de una

estructura sumergida puede que cumpla con los objetivos deseados, como es el caso de Narrowneck (Australia) donde se mejoró la ola y se pudo estabilizar el sedimento de la playa, o desafortunadamente no sólo no se consiga mejorar las condiciones de surf sino que también, se ponga en riesgo la seguridad e integridad de los usuarios, como sucedió en Boscombe (Inglaterra) donde hubo ahogados debido a que el arrecife artificial generó contracorrientes en la zona de surf (Jackson *et al.*, 2007).

Literatura citada

- Alves, J. H. (2006). Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modelling.*, **11**, 98–122.
- Ardhuin, F., and Coauthors. (2010). Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. part i: Definition, calibration, and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1917–1941.
- ASR. (2008). A Review of Existing Multi-Purpose Artificial Surfing Reefs and the Physical Properties behind their Function. *Marine Consulting and Research*. The Brevard County Natural Resources Management Office. 64 pp.
- Ayarzogoitia, P. A. (1984). Variación de la Energía del Oleaje en Aguas Someras. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, México. 74 pp.
- Battalio, B. (1994). Estimating breaking wave height at Ocean Beach, San Francisco. *Shore and Beach.*, **62**(4), 33–36.
- Battjes, J. A. (1994). Shallow water wave modeling. Proc. Of the Int. Symp.: Waves-Physical and Numerical Modeling. University of British Columbia. Vancouver., **1**, 1-23.
- Bermúdez-Zavala, R. D. (1999). Diseño de un rompeolas separado de la costa

como alternativa de protección en la zona de El Sauzal de Rodríguez, B.C.
Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas-UABC. 61 pp.
Ensenada, B.C. México

Black, K. (1999). Designing the Shape of the Gold Coast Reef: Sediment Dynamics, Proceedings. 14th Australian Conference on Coastal Engineering, page 58- 63.

Booij, N., Ris, R. y Holthuijsen, H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, **104**(C4), 7649-7666.

Bournemouth Council. (2006). Boscombe Surf Reef. www.bournemouth.gov.uk.
2007. Consulta: Abril 2014.

CREST, (2008). Comité de Investigación Científica y Técnica de la Unión Europea.

Cruz-Falcón, A. y Mancilla-Peraza, M. (1991). Variación estacional de perfiles de playa al sur del puerto de Ensenada B.C., como apoyo al estudio oceanográfico para la instalación de un emisor submarino. *Revista de Investigación Científica*, U.A.B.C.S., **2**(2): 46-55.

Dally, W. R., Dean R. G., y Dalrymple, R. A. (1985). Wave height variations across beaches of arbitrary profile. *Journal of Geophysical Research*, **90**, 11917-11927, 1985. Cited in: Kirby and Dalrymple 1994.

- Dally, W. R. (1989). Quantifying beach 'surfability' Proceedings of the Beach Technology Conference (Tampa, Florida). 47–58 pp. Essential Economics PTY LTD. (2002). Tourism and the Surf Coast Shire: An Overview of Visitor Numbers, Spending and Employment. Prepared for Surf.
- Espejo A., Losada I. J., Méndez F. J. (2014). Surfing wave climate variability. *Global and Planetary Change.*, pp. 19–25.
- Flick, R. y Badan, A. (1989). Coastal sea level during the january 1988 storm off the Californias. *Shore&Beach.*, **57**(4):28-31 pp.
- Flick, R. (1998). Comparision of California tides, store surges, and mean sea level during the El Niño winters of 1982-83 and 1997-98. *Sore&Beach. Special Issue.*, **66** (3): 7-11 pp.
- FLOW Science INC. (2008). Flow-3D User Manual, Version 9.3.1. www.flow3d.com. Consulta: Abril 2014
- Galvin, C. J. (1968). Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches, *Journal of Geophysical Research*, **73**(12), 3651–3659.
- Garcia-Flores, M. (1988). Rompeolas sumergidos, estudio experimental. Series del Instituto de Ingeniería. N.511 Instituto de Ingeniería, UNAM. 175 pp.
- Gaspar, J. (2014). Google Sketchup Pro 14- Nuevas funciones. VectorPro

Network, 2014.

Google SketchUp. (2013). Modeling Terrain and Organic Shapes. Disponible en: <http://help.sketchup.com/en/article/115432>. Consulta: Junio 2014.

Hirt, C. y Nichols, B. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics.*, **39**, 201-225.

Hirt, C. y Sicilian, J. (1985). A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes. Technical Report, Flow Science, Inc, 1-19.

Holthuijsen, L. H. (2010). Waves in Oceanic and Coastal Waters. Technische Universiteit Delft, The Netherlands

Hutt, J. A., Black K. P., Mead S. T. (2001). Classification of surf Research-Based breaks in relation to surfing skill, *Journal of Coastal Research*, Special Issue., **29**, pp. 66– 81.

Jackson, A. y Tomlinson, K. R. (2007). Black and E. Couriel, Proposed Surfing Reef for the Northern Gold Coast. Proceedings 1st International Surfing Reef Symposium.

Jackson, L. A., Corbett, B. B., McGrath, J. E., Tomlinson, R. B., y Stuart, G. (2007). Narrowneck Reef: Review of Seven Years of Monitoring.

American Shore & Beach Preservation Associati, **75**(4), 67–79.

Kirby, J. T. y Dalrymple, R. A. (1983). The propagation of weakly nonlinear waves in the presence of varying depth and currents,. Proceedings 20th Congress I.A.H.R, Moscow. Citado en: Kirby and Dalrymple 1994.

Kirby, J. T. y Dalrymple, R. A. (1986). Modeling waves in surf zones and around islands. *Journal of waterways, Ports, Coasts and Ocean Engineering.*, **112**, 78-93. Citado en: Kirby and Dalrymple 1994.

Kirby, J. T. y Dalrymple, R. A. (1994a). Ref/Dif 1, Version 2.5. *Research Report* no. CACR-94-22. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware Newark.

Kirby, J. T. y Dalrymple, R. A. (1994b). Modeling Waves in Surf Zones and Around Islands. *J. Water Ways, Ports, Coasts and Ocean Engineering.*, **112**, 78-93.

Komar, P. (1976). Beach processes and sedimentation. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.

Komen, G. J., Hasselmann S., y Hasselmann, K. (1984). On the existence of a Phillips, O.M. 1977. The dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 1. *J. Fluid Mech.*, **9**: 193-217.

Lazarow, N. y Nelson, C. (2007). The Value of Coastal Recreational

Resources: A Case Study Approach to Examining the Value of Recreational Sur Locales. Prepared for the Coastal Zone Conference.

Longuet-Higgins, M. S. y Stewart, R. W. (1964). Radiation Stresses in Water Waves; a Physical Discussion with Applications. *Deep-Sea Research.*, **11**, 529-562.

Losada, M., Tejedor, M. L., Corniero, M. A., Tejería, J. L. (1977). Métodos Espectrales de Previsión del Oleaje. Estudio Comparativo. *Revista de Obras Públicas*.

Mack, I. D. (2003). Quantitative Assessment of the Surfability of Pratte's Artificial Surfing Reef Santa Monica Bay, CA. Los Angeles, California, University of Southern California, Master's thesis, 111p.

Martínez-Díaz-de-León, A., Nava-Button, C. y Ocampo-Torres, F. J. (1989). Estadística del Oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C., de septiembre de 1986 a agosto de 1987. *Ciencias Marinas.*, **15**(3):1-20.

McCowan, J. (1894). On the highest wave of permanent type, London, Edinburgh and Dublin, Philos. Mag. J. Sci., Volume **38**. Cited in: Walker 1972.

Mead, S. y Black, K. (1999). A Multipurpose, Artificial Reef at Mount Maunganui Beach, New Zealand. *J. Coastal Management.*, **27** (4), 355-365.

- Mead, S. (2001). Incorporating high-quality surfing breaks into multi-purpose reefs, Coastal Marine Group, Department of Earth Sciences, University of Waikato, New Zealand, PhD thesis.
- Nelsen, C. (1996). Mitigation Through Surf Enhancement, A Coastal Management Case Study in El Segundo, California. (Master's thesis). DukeUniversity.http://www.beachapedia.org/Mitigation_Through_Surf_Enhancement. Consulta: Abril 2015.
- Pattiaratchi, C. (2003). Design Studies for an Artificial Surfing Reef: Cable Station, Western Australia. Report No. ED1483CP. 15 pp.
- Pijoan-Velasco, P. M. (2008). Importancia del surf en la ciudad de Ensenada, Baja California. Tesis de Maestría en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas y Costeras. Universidad Autónoma de Baja California.
- Pierro, T. y Benedet, L. (2008). Surfing Engineered Beaches. Coastal Planning & Engineering, Inc. 13 pp.
- Plaza-Flores, J. (1979). Cambios en la playa San Miguel debidos a un deslizamiento y a la adición de nuevo material vertido a la línea de costa. Tesis de Licenciatura FCM-UABC 64 pp.
- Rascle, N., and F. Ardhuin (2013). A global wave parameter database for geophysical applications. part 2: Model validation with improved source term parameterization. *Ocean Modell.*, **70**, 174– 188.

- Rivas, C. (1992). Conversión de Energía del Oleaje; Diseño Usos y Aplicaciones, Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, México 66pp.
- Rodríguez, R. G. (2006). Uso de rompeolas sumergidos para enfocar o desenfocar las energía del oleaje. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, México, 76 pp.
- Saha, S. y colaboradores. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91** (8), 1015–1057.
- Téllez, G. G. (2003). Diseño preliminar de un Rompeolas Sumergido Separado de la Costa y su Impacto Potencial Frente a los Cantiles Marinos de Punta Morro, Ensenada, B.C., México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, México, 68 pp.
- Tolman, H. L. (2008). A mosaic approach to wind wave modeling. *Ocean Modell.*, **25**, 35–47.
- Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB. Technical Note **276**, 194 pp.
- Tourism Resource Consultants. (2002). Samoa Tourism Development Plan 2002-2006. Apia : SVB and NZODA.

- Ulloa-Torres, M. J. (1989). Refracción lineal del oleaje en el puerto de Ensenada, B.C. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C.
- Walker, J. R. y Palmer R. Q. (1971). Surf Parameters; a General Surf Site Concept. Honolulu, Hawaii: Department of Ocean Engineering, University of Hawaii, LOOK Laboratory Technical Report No. 18, 48p.
- Walker, J. R., Palmer R. Q., y Kukea J. K. (1972). Recreational surfing on Hawaiian reefs, Proceedings 13th International Conference on Coastal Engineering, Chapter 151.
- West, A. (2002). Wave-Focussing Surfing Reefs a new Concept. MSc Thesis. Delft University of Technology. 91 pp.