

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE
RUN UP Y RUN DOWN MEDIANTE MODELADO FÍSICO BAJO
LAS CONDICIONES TÍPICAS DE OLEAJE EN EL LITORAL
PACÍFICO COSTARRICENSE.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de
Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil para optar al grado y título de
Maestría Académica en Ingeniería Hidráulica

MANUEL ALEJANDRO CORRALES GONZÁLEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2020

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Hidráulica.”

**ALBERTO
SERRANO
PACHECO (FIRMA)** Firmado digitalmente por
ALBERTO SERRANO PACHECO
(FIRMA)
Fecha: 2020.03.27 10:06:04
-06'00'

[Dr. Alberto Serrano Pacheco]
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**

**HENRY ALFARO
CHAVARRIA
(FIRMA)** Firmado digitalmente por
HENRY ALFARO CHAVARRIA
(FIRMA)
Fecha: 2020.03.27 08:44:49
-06'00'

[Dr. Henry Alfaro Chavarría]
Director de Tesis

**RAFAEL EDUARDO
MURILLO MUÑOZ
(FIRMA)** Firmado digitalmente por
RAFAEL EDUARDO MURILLO
MUÑOZ (FIRMA)
Fecha: 2020.03.27 15:45:13
-06'00'

[Dr. Rafael Murillo Muñoz]
Asesor

**GEORGES ANDRE
GOVAERE
VICARIOLI (FIRMA)** Firmado digitalmente por
GEORGES ANDRE GOVAERE
VICARIOLI (FIRMA)
Fecha: 2020.03.27 15:07:46
-06'00'

[Dr. Georges Govaere Vicarioli]
Asesor

**HENRY HERNANDEZ
VEGA (FIRMA)** Firmado digitalmente por HENRY
HERNANDEZ VEGA (FIRMA)
Fecha: 2020.03.27 13:46:57 -06'00'

[M.Sc. Henry Hernández Vega]
Representante del director del Programa de Posgrado en Ingeniería Civil

**MANUEL ALEJANDRO
CORRALES
GONZALEZ (FIRMA)** Firmado digitalmente por
MANUEL ALEJANDRO
CORRALES GONZALEZ (FIRMA)
Fecha: 2020.03.27 16:16:02
-06'00'

[Manuel Alejandro Corrales González]
Candidato

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y a Dios primeramente por siempre acompañarme 24/7 durante el periodo en que desarrollé este trabajo, ellos que son prioridad en mi vida. Además, doy gracias a mis amigos de trabajo de iMARES, Diego, María José, Felipe, Coco, Kimberly, Andrés y Ronald; ya que de diferentes formas me ayudaron con el desarrollo de mi trabajo final de graduación y siempre aportaron comentarios y críticas de éste.

Agradezco a Rafael Murillo por ampliar mis conocimientos en el área de la Ingeniería Hidráulica, incentivar en clases mi gusto por esta rama de la hidráulica, y por colaborar con sus revisiones en este trabajo. A mis amigos del INII, Michael y Alex les agradezco por el apoyo con los insumos audiovisuales que requirió este trabajo. Ambos ofrecen gran profesionalidad y confianza con la ayuda brindada.

Le agradezco especialmente a Henry Alfaro por permitirme crecer en el ámbito de la ingeniería marítima y por haberme ampliado el panorama de los conocimientos en esta materia. Henry es un gran maestro, un gran compañero de trabajo y le deseo muchos más éxitos en su carrera profesional y en su familia.

A Georges Govaere le agradezco por compartir sus conocimientos técnicos y teóricos que él ha aprendido a lo largo de sus experiencias académicas e investigativas, y merece reconocérsele como una persona que constantemente busca la competencia a nivel mundial en cuanto al tema de la ingeniería costera y marítima. Georges es alguien que se esmera desde sus labores como investigador para llevar a Costa Rica a un futuro mejor.

Gracias a mis hermanos por su apoyo y, en especial a Jenny por facilitarme su computadora para tener dos frentes de trabajo. Se agradece también al apoyo financiero brindado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

Por último y no menos importante, le quiero agradecer a Inés por su apoyo incondicional; sus constantes ¡ánimos! y ¡enhorabuenas!, cariño, y ayuda de todo tipo, que me motivaron a completar con éxito este trabajo.

Dedicado a mis padres.

Resumen

Un alto porcentaje del oleaje que arriba a las costas centroamericanas proviene desde el litoral Este neozelandés. Dicho conjunto de olas atraviesa el océano Pacífico y durante su trayectoria ocurre una transferencia de energía de unas olas a otras, generando así peculiaridades en el oleaje.

La caracterización de esas condiciones de oleaje es esencial para las actividades de navegación y pesca, de operación en puertos y de baño para quienes visiten las playas del litoral Pacífico. En Costa Rica se encuentra Puerto Caldera, la principal entrada de mercancías en el litoral Pacífico costarricense, la cual se enfrenta día a día con las condiciones de este oleaje.

Con la finalidad de ofrecer una operación segura de embarque y desembarque dentro de los recintos portuarios se establecen obras conexas de protección costera. Gracias a los avances investigativos en la actualidad se cuenta con formulaciones matemáticas para el diseño de las estructuras de protección costera. Sin embargo, esas formulaciones se han creado de manera empírica bajo condiciones de oleaje distintas a las que ocurren en el litoral Pacífico de la región centroamericana.

Por esa razón, en el presente trabajo de investigación se planteó una metodología de caracterización espectral del oleaje que arriba al litoral Pacífico costarricense, así como un procedimiento para evaluar de las ecuaciones que estiman los parámetros de diseño funcional de un rompeolas en talud, mediante el establecimiento de un modelo físico a escala reducida.

Los resultados obtenidos evidencian que varias de las ecuaciones existentes subestiman los parámetros del diseño funcional de rompeolas en talud, mientras que otras los sobreestiman, para las condiciones típicas del oleaje que se encuentra en el litoral Pacífico costarricense.

Abstract

A high percentage of the waves that reaches the Central American coasts come from the East coast of New Zealand. This set of waves crosses the Pacific Ocean producing an energy transfer from one group of waves to another, thus generating peculiarities in the wave.

The characterization of these waves conditions is essential for navigation and fishing activities, port operations and bathing for those who visit the beaches of the Pacific coast. In Costa Rica is Puerto Caldera the main entrance of goods in Costa Rica's Pacific coast, which deals day by day with the wave conditions.

Related works of coastal protection are established inside the port enclosures, that with the purpose of offering a safe operation of embarkation and disembarkation. Mathematical formulations are now available for the design of coastal protection structures due to research advances. However, these formulations have been created empirically under conditions of waves different from those that occur in the Pacific coast of Central America.

For that reason, in the present research work, a methodology of spectral characterization of the waves that reach the Costa Rican Pacific coast is proposed, as well as a procedure to evaluate the equations that estimate the functional design parameters of a slope breakwater, through the establishment of a physical model at a reduced scale.

The results showed several of the functionality design equations adequately estimate the parameters of the functional design of a slope breakwater while other equations overestimate them, under typical conditions of the waves on the Costa Rican Pacific coast.

Contenido

Índice de figuras	xi
Índice de cuadros	xiv
Lista de símbolos	xvii
1. Introducción.....	1
1.1. Importancia	2
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Antecedentes	5
1.5. Alcance	7
1.6. Metodología	8
2. Marco teórico.....	11
2.1. Introducción al análisis de oleaje.....	12
2.2. Instrumento de medición de oleaje	15
2.3. Análisis del oleaje	17
2.3.1. Análisis en el dominio del tiempo	17
2.3.2. Análisis en el dominio de la frecuencia.....	20
2.3.3. Espectros teóricos de densidad energética.....	27
2.4. Ascenso y descenso máximos sobre estructuras de protección	29
2.4.1. Ecuaciones para el cálculo de R_u y R_d	31
2.5. Introducción al modelado físico en el campo de la ingeniería marítima	40

2.5.1. Modelos físicos a escala con flujo con superficie libre	44
3. Caracterización espectral del oleaje	48
3.1. Introducción	49
3.2. Desarrollo metodológico.....	51
3.3. Resultados	52
3.3.1. Análisis del oleaje en el dominio de la frecuencia	52
3.3.2. Determinación de formas espectrales	55
3.3.3. Selección de estados de mar para ajuste de funciones de densidad espectral	57
3.3.4. Ajuste de formas espectrales a modelos teóricos	60
3.3.5. Determinación de los espectros de energía normalizados	70
3.4. Conclusiones	72
4. Cálculo de Run up y Run down.....	74
4.1. Introducción	75
4.2. Desarrollo metodológico.....	77
4.3. Generación de las series de oleaje a reproducir en el canal unidireccional de oleaje.....	78
4.4. Cálculo de Run up y Run down mediante ecuaciones de diseño.....	81
4.5. Cálculo experimental del Run up y Run down	89
4.5.1. Descripción del modelado físico	89
4.5.2. Forzamientos del modelo físico.....	108
4.5.3. Resultados.....	109
4.6. Análisis de resultados	114
4.6.1. Ecuación de Losada y Giménez-Curto (1981)	119
4.6.2. Método de cálculo propuesto por Van Der Meer (1992).....	120
4.6.3. Ecuación de diseño del EurOtop (2018).....	121
4.7. Validación de hipótesis de equivalencia	122

4.8. Conclusiones	127
5. Conclusiones y recomendaciones	130
5.1. Recomendaciones y futuras líneas de investigación	134
6. Referencias consultadas.....	136
Apéndices	142

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de la metodología.	9
Figura 2. Clasificación del oleaje según su frecuencia de onda.	12
Figura 3. Conformación del oleaje por trenes de ondas.	14
Figura 4. Ejemplo de una serie temporal de oleaje regular.	14
Figura 5. Registro de oleaje irregular medido en Cabo Blanco, Costa Rica.	15
Figura 6. Instrumento de medición de oleaje: a) instrumento con su base y cápsula que protege la batería b) instrumento colocado en campo.	16
Figura 7. Localización geográfica del instrumento de medición de oleaje.	16
Figura 8. Métodos de análisis de series de oleaje en el dominio del tiempo.	18
Figura 9. Espectro de energía obtenido a partir de un estado de mar.	22
Figura 10. Formas espectrales de la distribución frecuencial de energía.	22
Figura 11. Algunos espectros de energía teóricos.	23
Figura 12. Series de oleaje y su agrupamiento.	26
Figura 13. Ejemplos de espectros teóricos de energía.	29
Figura 14. Definición de ascenso máximo, descenso máximo y altura de bordo libre.	30
Figura 15. Métodos para el cálculo del ascenso máximo.	31
Figura 16. Determinación gráfica de A_u y B_u , en Losada (1979).	36
Figura 17. Determinación gráfica de A_d y B_d , en Losada (1979).	37
Figura 18. R_u respecto a H_s para distintos valores de I_r , en diferentes probabilidades de excedencia, de acuerdo con Van Der Meer J. et al.	38
Figura 19. Esquema de las pérdidas por fricción en modelos con superficie libre.	45
Figura 20. Pronóstico del modelo numérico WWIII en el océano Pacífico.	50
Figura 21. Esquema metodológico para la parametrización espectral del oleaje.	51
Figura 22. Serie temporal de T_p	52
Figura 23. Serie temporal de T_{02}	53
Figura 24. Serie temporal de H_{m0}	53
Figura 25. Rosas direccional de T_p	54
Figura 26. Definición de formas de los espectros modelo de energía.	55

Figura 27. Ejemplo de espectros de energía clasificados según espectros modelo propuestos.	56
Figura 28. Función de distribución acumulada de H_{m0} del registro	58
Figura 29. Serie temporal de H_{m0} y subconjunto de H_{m0} mayores al umbral $H_{m0\ 98\%}$	59
Figura 30. Histograma de frecuencias pico de espectros unimodales de los 200 estados de mar con mayor H_s	61
Figura 31. Ajuste de un espectro de densidad energética a una función de densidad energética JONSWAP.....	62
Figura 32. Espectro de energía seleccionado para la definición de los espectros sintéticos representativos del modelo 1.	63
Figura 33. Definición de posiciones en espectros de energía bimodales	64
Figura 34. Determinación de las frecuencias pico para los espectros de energía que se ajustan al modelo 2.	66
Figura 35. Determinación de las frecuencias pico para los espectros de energía que se ajustan al modelo 3.	66
Figura 36. Espectros de energía seleccionados para la definición de los espectros sintéticos representativos de los modelos 2 y 3.	69
Figura 37. Determinación de un espectro normalizado de densidad energética	71
Figura 38. Espectros de energía normalizados por H_s de los espectros modelo 1, 2 y 3.	72
Figura 39. Esquema del desarrollo metodológico.	77
Figura 40. GF para estados de mar que superan el umbral $H_{m0\ 98\ %}$	79
Figura 41. Representación esquemática del canal de oleaje unidimensional.	89
Figura 42. Fotografía del canal de oleaje: a) sección transversal, b) panorámica.	90
Figura 43. Montaje del modelo físico.....	90
Figura 44. Sensores de voltaje de la pala de generación de oleaje.	91
Figura 45. Curva de rendimiento del canal unidireccional, bajo un calado de 0.2 m.	92
Figura 46. Curva de rendimiento del canal unidireccional, bajo un calado de 0.3 m.	92
Figura 47. Espectros de densidad energética producidos por el generador de oleaje.	93
Figura 48. Composición de materiales que componen el rompeolas	95
Figura 49. Fotografía de rompeolas a escala, con pendiente de talud 1 en 2.	96
Figura 50. Croquis de la colocación de los rompeolas en talud inclinado.	97
Figura 51. Selección del color de los elementos de la coraza y coloración del agua.	103

Figura 52. Post proceso de imágenes de videocámara.	104
Figura 53. Colocación de las videocámaras para registro de Ru y Rd.	105
Figura 54. Medición de Rd y Ru mediante computadora.....	105
Figura 55. Canal de oleaje durante experimentación.	106
Figura 56. Prueba de video de Ru en una vista superior.	107
Figura 57. Espectros representativos del oleaje que arriba al litoral Pacífico de Costa Rica. .	108
Figura 58. Ascensos máximos registrados en las cuatro configuraciones del modelo físico bajo los tres tipos de oleaje.....	110
Figura 59. Descensos máximos registrados en las cuatro configuraciones del modelo físico bajo los tres tipos de oleaje.....	111
Figura 60. Probabilidad acumulada del Ru relacionado con la validación de la hipótesis de equivalencia.	125
Figura 61. Probabilidad acumulada del Rd relacionado con la validación de la hipótesis de equivalencia.	126

Índice de cuadros

Cuadro 1. Probabilidades conjuntas para caso ejemplificativo.	34
Cuadro 2. Registros de R_u y R_d para caso ejemplificativo.	35
Cuadro 3. Coeficientes de ajuste para el modelo de estimación de R_u y R_d , para pendientes permeables.	36
Cuadro 4. Parámetros de ajuste para el método de Van Der Meer.	38
Cuadro 5. Clasificación de los espectros de energía frecuencial según los espectros de energía modelo.	57
Cuadro 6. Estadística de la variable H_{m0} que supera el umbral $H_{m0\ 98\ \%}$	59
Cuadro 7. Clasificación de espectros de energía frecuencial para los 200 estados de mar seleccionados.	60
Cuadro 8. Resultados de ajuste a funciones espectrales JONSWAP para espectros de energía unimodales.	63
Cuadro 9. Valores estadísticos de las frecuencias asociadas a los picos de energía de los espectros bimodales analizados.	67
Cuadro 10. Resultados de ajuste a funciones espectrales JONSWAP para espectros de energía bimodales.	69
Cuadro 11. Parámetros de oleaje resultantes de las series de oleaje representativas.	81
Cuadro 12. Resultados de cálculo de R_u bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de cubos.	82
Cuadro 13. Resultados de cálculo de R_d bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de cubos.	83
Cuadro 14. Resultados de cálculo de R_u bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de rocas.	84
Cuadro 15. Resultados de cálculo de R_d bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de rocas.	85
Cuadro 16. Resultados de cálculo de R_u bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de cubos.	86

Cuadro 17. Resultados de cálculo de R_d bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de cubos.	87
Cuadro 18. Resultados de cálculo de R_u bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de rocas.	88
Cuadro 19. Resultados de cálculo de R_u bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de rocas.	88
Cuadro 20. Valores promedio de densidad y porosidad de las corazas de rompeolas ensayadas	95
Cuadro 21. Velocidades características y números de Froude del ensayo.	100
Cuadro 22. Números de Reynolds en el modelo físico.	101
Cuadro 23. Características de las cámaras utilizadas en los experimentos.	102
Cuadro 24. Parámetros estadísticos basados en las mediciones de R_u	112
Cuadro 25. Parámetros estadísticos basados en las mediciones de R_d	112
Cuadro 26. Comparación de estadísticos de R_u entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2H.....	114
Cuadro 27. Comparación de estadísticos de R_d entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2H.....	115
Cuadro 28. Comparación de estadísticos de R_u entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2H.....	115
Cuadro 29. Comparación de estadísticos de R_d entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2H.....	116
Cuadro 30. Comparación de estadísticos de R_u entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2.5H.....	117
Cuadro 31. Comparación de estadísticos de R_d entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2.5H.....	117
Cuadro 32. Comparación de estadísticos de R_u entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2.5H.....	118
Cuadro 33. Comparación de estadísticos de R_d entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2.5H.....	118
Cuadro 34. Comparación de resultados para R_u mediante ecuación de Losada y Giménez-Curto.	119

Cuadro 35. Comparación de resultados para R_d mediante ecuación de Losada y Giménez-Curto.	120
Cuadro 36. Comparación de resultados para R_u mediante ecuaciones de Van Der Meer.	121
Cuadro 37. Comparación de resultados para R_u mediante ecuación del EurOtop 2018.....	122
Cuadro 38. Medición en metros de R_u para diferentes combinaciones de altura de ola y período de ola.	122
Cuadro 39. Medición en metros de R_d para diferentes combinaciones de altura de ola y período de ola.	123
Cuadro 40. Ocurrencia porcentual de cada tipo de ola en un oleaje representativo tipo 3, bajo pendiente 1V: 2.5H y coraza de rocas.	124
Cuadro 41. Comparación de resultados de R_u al aplicar hipótesis de equivalencia	126
Cuadro 42. Comparación de resultados de R_d al aplicar hipótesis de equivalencia	127

Lista de símbolos

H: altura de ola.

T: período de ola.

f: frecuencia.

h: profundidad de agua o calado.

η : superficie libre del mar.

$H_{\text{máx}}$: altura máxima de ola.

H_{rms} : altura media cuadrática de ola.

H_m : altura media de ola.

H_s : altura significativa de ola.

$H_x \%$: Altura de ola con una probabilidad de excedencia del x %.

T_z , T_m : período medio de pasos ascendentes por cero.

$T_{\text{máx}}$: período máximo de ola.

T_p : período pico.

f_p : frecuencia pico.

ε : anchura espectral de Cartwright y Longuet-Higgins.

ν : anchura espectral de Longuet-Higgins.

Q_p : factor de apuntamiento de Goda.

m_n : momento de orden “n”.

S: densidad de energía espectral.

GF: factor de agrupamiento del oleaje.

H_{m0} : altura significativa espectral de ola.

T_{01} , T_{02} : período medio de ola.

$T_{m-1,0}$: período de energía de ola.

$T_{H1/3}$: período promedio de las alturas de ola asociadas a la altura de ola significativa.

R : Número de Reynolds.

R_u : ascenso máximo.

$R_{u\ 1/3}$, $R_{u\ s}$: promedio del tercio superior de una serie de ascensos máximos.

$R_{u\ rms}$: cálculo de la raíz media cuadrática de una serie de ascensos máximos.

$R_{u\ m}$: estadístico del ascenso máximo para el 50 % de los R_u de mayor magnitud.

$R_{u\ x\ %}$: ascenso máximo con una probabilidad de excedencia del $x\ %$.

R_d : descenso máximo.

$R_{d\ 1/3}$, $R_{d\ s}$: promedio del tercio superior de una serie de descensos máximos.

$R_{d\ rms}$: cálculo de la raíz media cuadrática de una serie de descensos máximos.

$R_{d\ m}$: estadístico del descenso máximo para el 50 % de los R_d de mayor magnitud.

I_r : número de Iribarren.

ξ_m : parámetro de rompimiento.

α : ángulo de inclinación del talud de rompeolas.

β : ángulo de incidencia del oleaje.

L_c : longitud característica de un modelo físico a escala.

L_0 : longitud de onda en aguas profundas.

$\varepsilon_{m-1,0}$: parámetro de rompimiento del oleaje utilizando período de energía de ola.

λ : escala de longitud (geométrica).

λ_t : escala de tiempo.

λ_M : escala de masa.

n : porosidad de la coraza de rompeolas.

Fr : número de Froude.

γ : factor de ajuste pico al espectro JONSWAP.

σ_a, σ_b : parámetros que definen la anchura del pico espectral en función JONSWAP3.

g : aceleración gravitacional de la Tierra, cuyo valor es de 9.807 m/s^2 .

g_m : aceleración gravitacional en el modelo a escala, cuyo valor medio es de 9.779 m/s^2 .

D_{n50} : Diámetro medio nominal de una roca o partícula que compone una matriz.

V_c : velocidad específica de un modelo físico a escala.



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Manuel Alejandro Corrales González, con cédula de identidad 304560533, en mi condición de autor del TFG titulado Evaluación de las ecuaciones para el cálculo del Run up y Run down mediante modelado físico bajo las condiciones típicas de oleaje en el litoral Pacífico costarricense.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Manuel Alejandro Corrales González

Número de Carné: A91966 Número de cédula: 304560533

Correo Electrónico: corrales_manuel@hotmail.com

Fecha: 8/mayo/2020 Número de teléfono: (+506) 8875 4581

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Henry Alfaro Chavarría

MANUEL
ALEJANDRO
CORRALES
GONZALEZ
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por MANUEL
ALEJANDRO CORRALES
GONZALEZ (FIRMA)
Fecha: 2020.05.08
17:33:22 -06'00'

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. Introducción

El presente documento corresponde al Trabajo Final de Graduación para optar por la Maestría Académica en Ingeniería Hidráulica, ofrecida por la Universidad de Costa Rica. El tema que se estudia forma parte de la rama de la hidráulica conocida como Ingeniería Marítima.

El trabajo consiste en un estudio realizado mediante modelado físico de la interacción oleaje-estructura. Para ello se han utilizado condiciones de oleaje representativas del litoral Pacífico costarricense y estructuras de protección costera en talud y de materiales sueltos, las cuales son utilizadas en el país.

1.1. Importancia

Costa Rica tiene el privilegio de ser uno de los países que cuenta con 2 costas, una frente al Mar Caribe y otra frente al océano Pacífico. Ambas costas se han explotado para múltiples actividades socioeconómicas como lo son la pesca, el cabotaje, el turismo, y el intercambio de mercancías a través de los puertos comerciales.

En la costa caribeña se ubican el Puerto de Limón, centro de intercambio comercial, así como de abordaje de navíos turísticos; el Puerto de Moín, que fue hasta el 2018 el principal puerto de intercambio comercial en esta región, y que vino a ser sustituido por la Terminal de Contenedores de Moín (TCM). Esta nueva terminal en la bahía de Moín es capaz de brindar servicio a embarcaciones con 8500 TEUs (acrónimo en inglés de Unidad Equivalente de Veinte Pies como medida de capacidad de transporte marítimo), 24 horas al día, 7 días a la semana, por los 365 días del año, y cuyo espacio físico de operación es de 80 hectáreas (APM Terminals, 2018).

Por otra parte, en la costa del Pacífico central se localiza Puerto Caldera, el cual es el principal puerto para el intercambio de mercancías del país hacia los países de oriente y la costa Oeste de los Estados Unidos.

De acuerdo con las estadísticas recopiladas y referentes al año 2017 por la Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica, un 81 % del volumen de las exportaciones se realizaron

mediante el medio de transporte marítimo (PROCOMER, 2018), y en la costa Pacífico el principal foco de transporte comercial marítimo corresponde a Puerto Caldera.

Los puertos dentro de la cadena del transporte son nodos en donde se cambia de un modo de transporte marítimo al terrestre. En dichos nodos se debe de procurar que este cambio sea eficiente, rápido y principalmente seguro. Para garantizar estas cualidades y principalmente la última, los puertos deben de contar con infraestructura que generen las condiciones de abrigo necesarias, para que las embarcaciones puedan ser atendidas y se les brinden sus servicios de atraque, carga, descarga y avituallamiento.

Las obras de infraestructura que generan zonas de abrigo son conocidas como diques o rompeolas. Estas estructuras se diseñan principalmente para soportar las condiciones de oleaje a las que se verán expuestas durante su vida útil. Las principales formulaciones para diseñar estas estructuras se basan en ecuaciones empíricas desarrolladas en laboratorios en Europa y por ende para las condiciones que en esas latitudes imperan.

El oleaje que incide en las costas del Pacífico de Costa Rica tiene su origen en el hemisferio austral (Goda, 1983). Esta particularidad, durante los aproximadamente 9000 km que debe recorrer para llegar a las costas de Costa Rica y también de la región centroamericana, se traduce en oleajes de mar de fondo (SWELL) cuyas representaciones energéticas son distintas a lo que sucede en otras latitudes del mundo (López, 2016).

Por esta razón es necesario estudiar las condiciones de oleaje en estas regiones para conocer cómo pueden afectar las zonas costeras, además de la interacción con las obras de protección o recintos portuarios.

Con base en lo anterior, surge también la idea de analizar si las expresiones numéricas de uso común desarrolladas para el estudio de la interacción oleaje – estructuras son realmente las adecuadas para aplicar en esta región del mundo, o si bien, requieren de ajustes o una implementación de un nuevo conjunto de ecuaciones que se adapten al entorno del oleaje característico en el Pacífico costarricense.

1.2. Justificación

Este trabajo pretende realizar una revisión de los fundamentos teóricos para el diseño funcional de un rompeolas en talud, mediante un modelo físico a escala, en el cual se reproducirán las condiciones de oleaje características del pacífico costarricense.

La principal razón por la cual se decide desarrollar este tema no solo es para aportar un producto innovador en el campo de la ingeniería marítima como rama de la ingeniería hidráulica, sino que también permitirá establecer expresiones predictoras y que sean adecuadas para calcular los ascensos y descensos máximos, conocidos como *Run up* (Ru) y *Run down* (Rd) respectivamente, sobre estructuras de protección costera en la costa pacífica de Costa Rica y también en la región.

Con el desarrollo de esta investigación se buscará describir las formas típicas de los espectros de energía del oleaje que arriban al litoral Pacífico costarricense.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Contrastar las ecuaciones para el cálculo de *run up* y *run down* en un rompeolas en talud, con modelos físicos a escala forzados con oleajes característicos que inciden en la costa del Pacífico costarricense.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar las condiciones de oleaje que ocurren con mayor frecuencia en el litoral Pacífico costarricense con base en análisis estadísticos aplicados a los registros de oleaje medidos en campo.

2. Construir 4 modelos a escala (2 pendientes y 2 tipologías de elementos para la coraza) de diques en talud para modelar el efecto del *run up* y *run down* sobre la estructura.

3. Comparar los resultados de los parámetros *run up* y *run down* obtenidos mediante la modelación física en cada uno de los 4 modelos establecidos respecto a los resultados que se estiman con las formulaciones analíticas existentes.

1.4. Antecedentes

Brindar seguridad en el embarque y desembarque de mercancías y/o personas es una de las razones por las que desde la mitad del siglo XX se ha estudiado el diseño de obras protección costera, el cual se aborda desde dos enfoques que están ligados como son el diseño funcional y por estabilidad.

En el año 1959, Hunt publica un manual de diseño de muros y rompeolas, mediante el cual el autor explica la teoría de ondas que está detrás de los diseños que se plantean. Posteriormente, en 1974, Battjes J. adquiere el compromiso de estudiar el proceso de ruptura de olas, ya que dicha ruptura es un proceso altamente no lineal. Su trabajo refuerza los conocimientos de esa naturaleza estocástica del oleaje y cómo puede ser estimada dicha variable.

Otro estudio pionero en la temática de las estructuras de rompeolas a talud es el de Thompson D. y Shuttler R. (1975). En este estudio se presenta un diseño para coraza del tipo escollera o elaborada con roca bajo la acción del oleaje producido por viento.

A través del *Shore Protection Manual* (USACE, 1975), un manual de diseño de estructuras costeras producido por la *U.S. Army Coastal Engineering Research Center* en 1975, se recopila información de varios autores que hace referencia al diseño de estructuras de protección costera a talud y, además, se presentan indicaciones de las inclinaciones y los materiales que se deben utilizar para el diseño de dichas estructuras.

En ese mismo año se publica el estudio de Ahrens J. y Mc Cartney B. (1975), titulado *Wave period effect on the stability of rip rap*. Este artículo explica la influencia las olas de distintos períodos sobre la estabilidad del talud de un rompeolas con coraza hecha de rocas.

Dos años más tarde, Günbak (1977) publica un artículo sobre su trabajo relacionado con la estabilidad del talud de un rompeolas e incluye un parámetro denominado Número de Iribarren cuyas siglas son Ir o ξ .

Por otra parte, Günbak en 1979 establece un procedimiento para el diseño de rompeolas con coraza elaborada de rocas. Este manual de procedimientos se basa en experimentación mediante modelos físicos. Asimismo, Giménez-Curto L. (1980) publica su tesis doctoral sobre el comportamiento de los diques de rompeolas bajo la acción del oleaje, donde se incluyen los avances en conocimientos científicos sobre la acción del oleaje en las distintas partes de un rompeolas.

Losada M. y Giménez-Curto presentaron el estudio *Flow Characteristics on rough, permeable slopes under wave action* en el año 1981. Este documento presenta las formulaciones matemáticas para estimar tanto R_u como R_d mediante un modelo que contiene 2 constantes que dependerán del tipo de elemento con que se construya la coraza del talud. Esa investigación se basó en el análisis de varias tipologías de elementos de coraza. Además, se tomaron en cuenta los coeficientes de reflexión del oleaje, que actualmente son de interés en el tema de la interacción del oleaje con estructuras de protección costera.

Posteriormente, en el año 1988 se publica la tesis doctoral de Van Der Meer J., la cual representa un documento detallado sobre el proceso de rotura de oleaje y diseño de estructuras a talud para disipación de energía del oleaje, así como en playas con altas rugosidades.

Dos años más tarde, Losada M. (1990) presentó el resultado del trabajo denominado *Recientes Desarrollos en el diseño de Rompeolas a talud*. En este documento se comentan las posibles causas de los daños en rompeolas, las características del oleaje regular e irregular y su interacción con las estructuras de rompeolas. Sumado a ello, presenta un análisis de estabilidad en rompeolas, así como recomendaciones para el proceso constructivo de estructuras de protección costera.

En el año 2002, Martin F., et. al. (2002) describen una nueva metodología para el proceso de ensayos y pruebas de escalamiento del material del núcleo de un rompeolas con coraza. Ese trabajo complementó los conocimientos ofrecidos en el trabajo de Van Der Meer J. (1988) y Van Gent M. (1995).

En el 2002 se presentó el documento llamado *Technical Report Wave Run up and Wave Overtopping at dikes* (TAW), creado por el Comité asesor técnico en defensa contra inundaciones de Los Países Bajos. Este documento incluye las ecuaciones para estudiar el Ru y Rd, así como el rebase bajo múltiples condiciones.

Las condiciones que se contemplan en el documento anterior son las profundidades, rugosidades de los elementos de la coraza, la influencia de diseño de taludes con bermas, el ángulo de incidencia del oleaje, o bien, los volúmenes de rebase por cada ola, entre otras.

En cuanto a la permeabilidad de la estructura de protección costera se cuenta con el estudio realizado por Kik R. (2011); en su trabajo describe los métodos para determinar lo que se denominada permeabilidad hipotética (P) y la correlación con la disipación de energía que pueda producirse. La permeabilidad está relacionada con la cantidad de flujo a través del medio poroso que se da en las capas internas del rompeolas.

En relación con la temática del estudio del Ru y Rd, actualmente existe un manual europeo para el diseño de estructuras de rompeolas tanto en su enfoque funcional como estructural. Este manual se denomina EurOtop y su segunda versión se publicó en el año 2018. En los distintos capítulos de este manual se muestran estudios y formulaciones que son recomendadas para los diseños funcionales y de estabilidad de estructuras de protección costera.

1.5. Alcance

Este trabajo describe la evaluación de las ecuaciones para diseño funcional de un rompeolas, específicamente a las aplicables al cuerpo del rompeolas bajo acción del oleaje perpendicular sobre la estructura.

El oleaje que se utiliza corresponde a registros de mediciones instrumentales realizadas cuasi continuas en un sitio en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. El periodo de registro abarca desde 23 de enero del 2014 a las 15:00 horas, hasta el 12 de mayo del 2018 a las 15:00 horas. Esta base de datos se analiza en el ámbito de las frecuencias y luego se seleccionan las formas espectrales de mayor ocurrencia y magnitud de energía.

Estos oleajes seleccionados se utilizan para forzar los cuatro modelos físicos. Los resultados de cada uno de los experimentos se comparan con los resultados obtenidos de la aplicación de formulaciones analíticas actuales para el cálculo del R_u y R_d , como son el método ola a ola utilizado en la ecuación de Losada M. y Giménez-Curto (1981), el método propuesto por Van Der Meer, J. (1988) y la expresión de diseño para ascenso máximo planteada en el EurOtop (2018).

1.6. Metodología

Para desarrollar este trabajo se plantean 3 fases que engloban una serie de actividades. La Figura 1 muestra una representación esquemática de la metodología que sigue este trabajo.

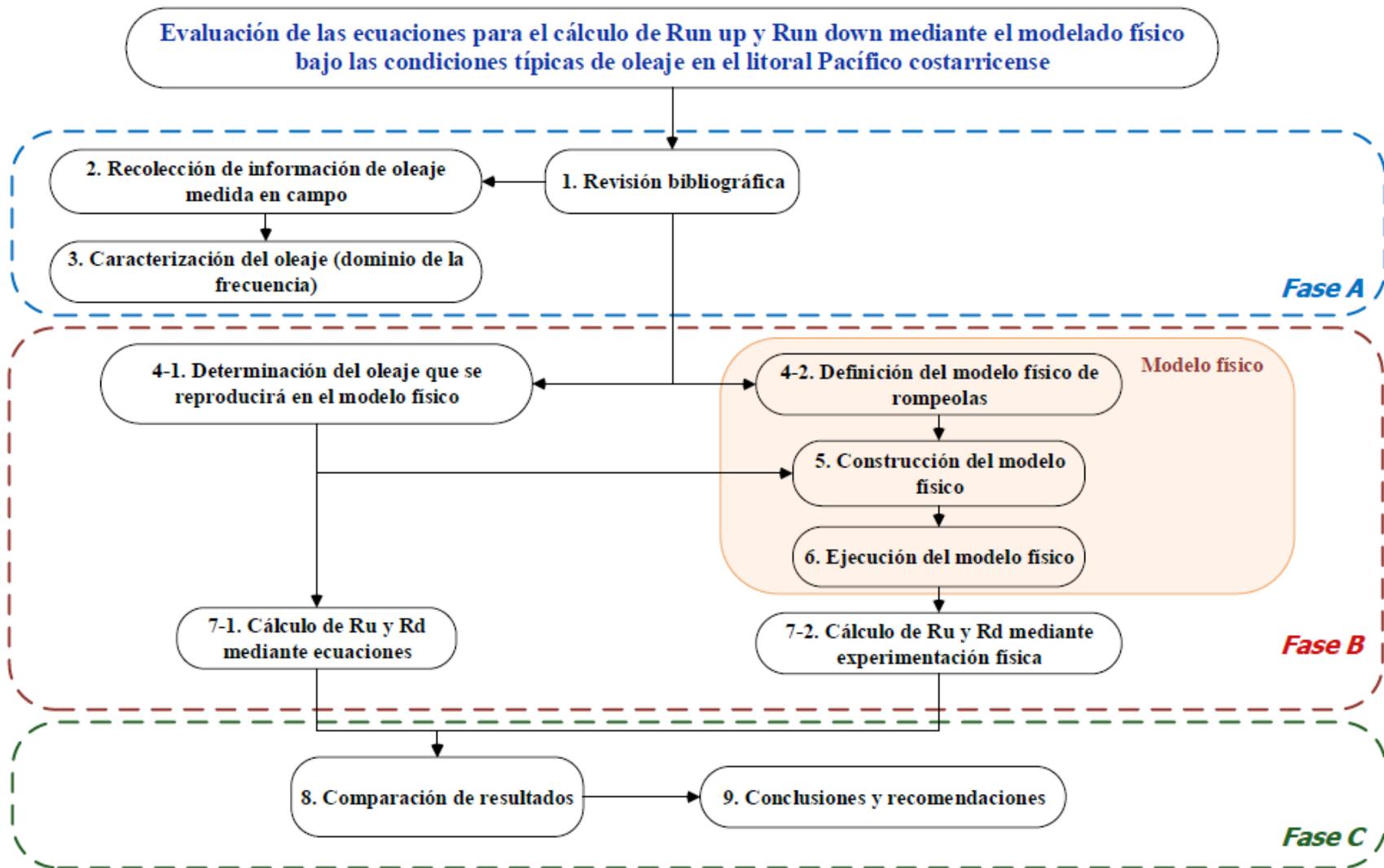


Figura 1. Esquema de la metodología.

Con base en la Figura 1 la fase A se inicia con la recopilación y lectura de la información bibliográfica relacionada con las temáticas de ingeniería marítima y modelos físicos hidráulicos.

Estas temáticas abarcan a su vez temas relacionados con la mecánica de ondas, análisis del oleaje, diseño estructuras de protección costera y su diseño, modelado físico y recopilación de información en laboratorio y análisis estadístico.

Una vez adquiridas y asimiladas las fuentes de consulta se procede con el estudio del oleaje. La caracterización del oleaje registrado consiste fundamentalmente en clasificar la información en distintos tipos de oleaje con características particulares.

A su vez, se estiman los parámetros estadísticos y espectrales del oleaje necesarios para asegurar una caracterización adecuada. Al llegar a este punto del análisis se procede a realizar una clasificación específica del oleaje.

La fase B da inicio con dos actividades que se realizan paralelamente, una de ellas es la definición del oleaje representativo del litoral Pacífico Costarricense, el cual se reprodujo en el modelo físico, mientras que la segunda actividad corresponde a la definición de las características físicas del modelo de rompeolas.

Es necesario definir tanto del oleaje que se desea reproducir en el modelo físico a escala, como de la selección de características físicas del dicho modelo. Posteriormente se ejecutan los experimentos de laboratorio y se registran las variables de interés, ascenso y descenso máximos. Con dichos registros se calculan los estadísticos que posteriormente se comparan con los cálculos mediante las ecuaciones teóricas, ambas series de cálculo se llevan a cabo paralelamente.

Luego de calcular los R_u y R_d utilizando las ecuaciones teóricas y producto de la experimentación física; se procede a comparar los resultados obtenidos, iniciando con esta actividad la fase C de la metodología. Por último, se presenta un capítulo que muestra las principales conclusiones y consideraciones para futuras líneas de investigación.

2. Marco teórico

2.1. Introducción al análisis de oleaje

El oleaje se define como los movimientos que tienen períodos entre los 0.1 segundos y 5 minutos generados por el viento y otras fuerzas generadoras que se propagan desde un área de generación y que conforme avanzan van perdiendo lentamente energía por fricción con la atmósfera y el fondo, así como por viscosidad molecular y que, finalmente, se disipan al alcanzar las costas donde se dan los procesos de rotura de las olas.

A medida que el oleaje se propaga fuera de la zona de generación, se produce un fenómeno de separación de los trenes de ondas que lo componen. Una parte de las olas, cuyos períodos son mayores se separan y se adelantan a las olas de períodos menores mediante una dispersión radial.

La Figura 2 muestra la clasificación de los diferentes tipos de oscilaciones que existen en el mar u océanos según su frecuencia de onda.

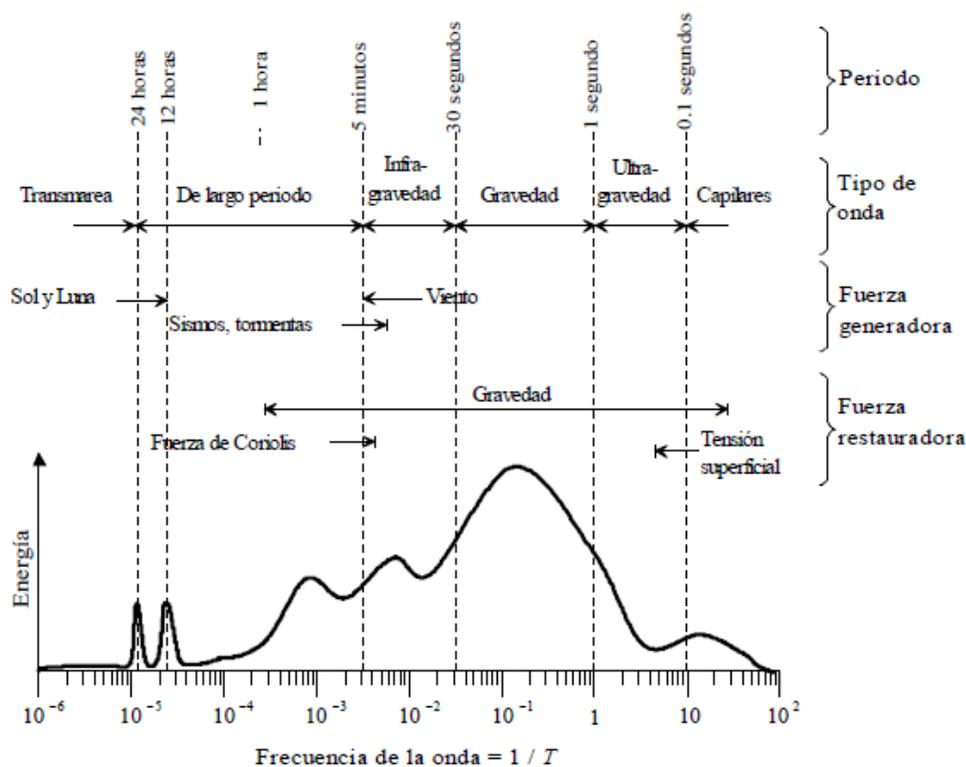


Figura 2. Clasificación del oleaje según su frecuencia de onda.

Fuente: Silva R., 2005.

El oleaje, cuyo contenido energético es el que presenta mayores magnitudes, se clasifica generalmente en dos grupos principales. Dentro del primer grupo está el oleaje de mar de fondo o *swell* (por su nombre en inglés), con longitudes de onda y períodos mayores. El otro tipo de oleaje denominado *sea* (por su nombre en inglés), es reconocido porque las distancias que recorren las olas son menores y presenta longitudes de onda y períodos menores.

Tanto el oleaje *swell* como el oleaje *sea*, al tratarse de variables aleatorias obedecen a un proceso estocástico. Por esa razón, se ha planteado una forma representativa de medir las principales características del oleaje para el análisis, conocida como estado de mar.

Un estado de mar se define con base en una categoría de procesos estocásticos estacionarios ergódicos. Con base en lo anterior es importante establecer un intervalo de tiempo de registros, como por ejemplo las mediciones en campo de oleaje, de forma tal que esa muestra registrada sea representativa y asegure la bondad de los cálculos estadísticos (GIOC, 2000).

La metodología que se sigue para el estudio del oleaje desde su enfoque espectral consiste en representar el oleaje como la superposición lineal de múltiples trenes de onda sinusoidales de amplitudes, frecuencias, direcciones, y fases diferentes (ver Figura 3).

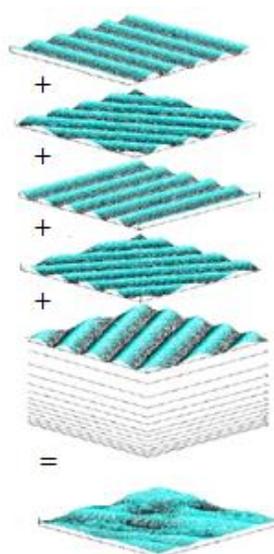


Figura 3. Conformación del oleaje por trenes de ondas.

Fuente: Alonso-Moñuyerro, 2005.

La condición de oleaje en la que las ondas presentan iguales amplitudes de onda, o alturas de ola H y período de onda u ola T de igual magnitud se conoce como oleaje regular. Por el contrario, cuando existen olas de diferentes amplitudes y períodos se conoce como oleaje irregular. La Figura 4 muestra a manera de ejemplo una serie temporal de oleaje regular.

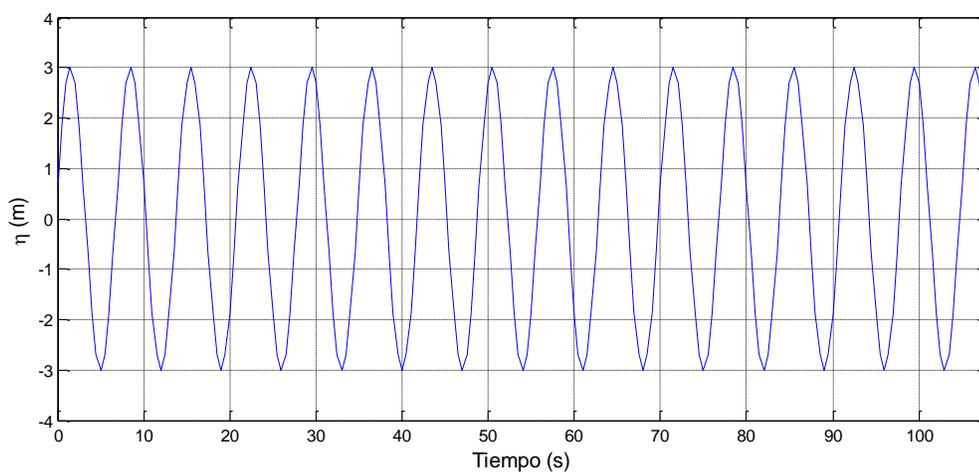


Figura 4. Ejemplo de una serie temporal de oleaje regular.

Por otra parte, la Figura 5 muestra un registro de la variación de la superficie libre del agua representativo de un oleaje irregular.

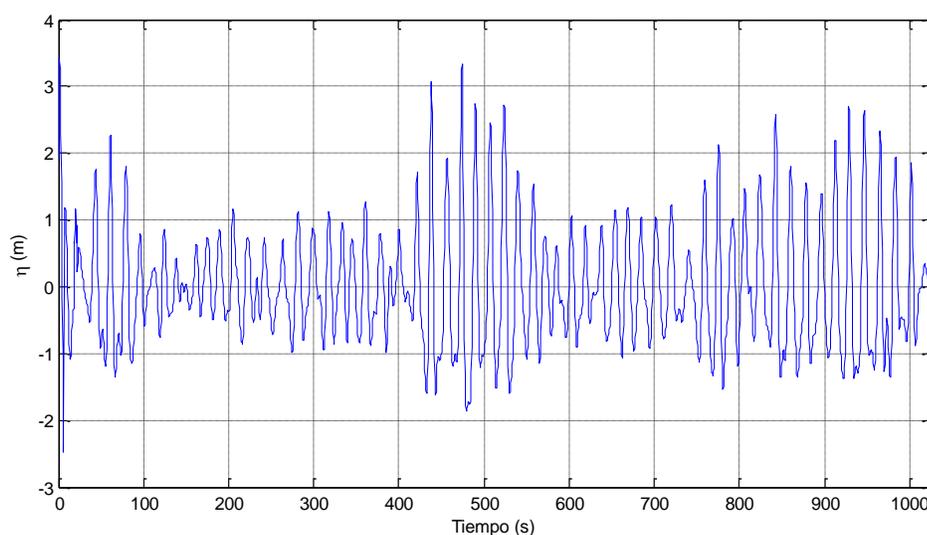


Figura 5. Registro de oleaje irregular medido en Cabo Blanco, Costa Rica.

2.2. Instrumento de medición de oleaje

Para realizar los registros de información de oleaje se utilizan diferentes instrumentos como boyas, perfiladores acústicos doppler y sensores de presión. Este trabajo utiliza datos medidos por un instrumento de medición de oleaje modelo AWAC, de la casa noruega NORTEK. El AWAC es un perfilador correntómetro acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés).

Este instrumento tiene la capacidad de medir directamente diferentes parámetros como altura de ola máxima del registro, altura de ola media de las 10 olas mayores del registro por medio del método de seguimiento acústico de la superficie AST (siglas en inglés de *Acoustic Surface Tracking*).

El AWAC es un equipo autónomo cuyo peso es de 6.1 kg el cual cuenta con cuatro haces acústicos, tres de ellos inclinados en ángulos de 45° y uno vertical (NORTEK, s.f.). Los AWAC requieren baterías alcalinas o de litio de 12 V, cuya duración está en función de la forma en cómo se configure el equipo para el registro de información. La Figura 6 muestra fotografías del AWAC.

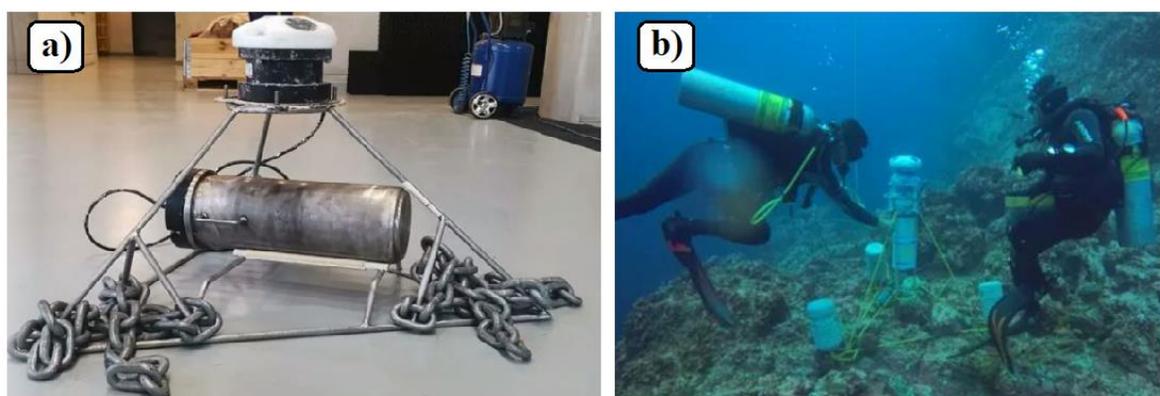


Figura 6. Instrumento de medición de oleaje: a) instrumento con su base y cápsula que protege la batería b) instrumento colocado en campo.

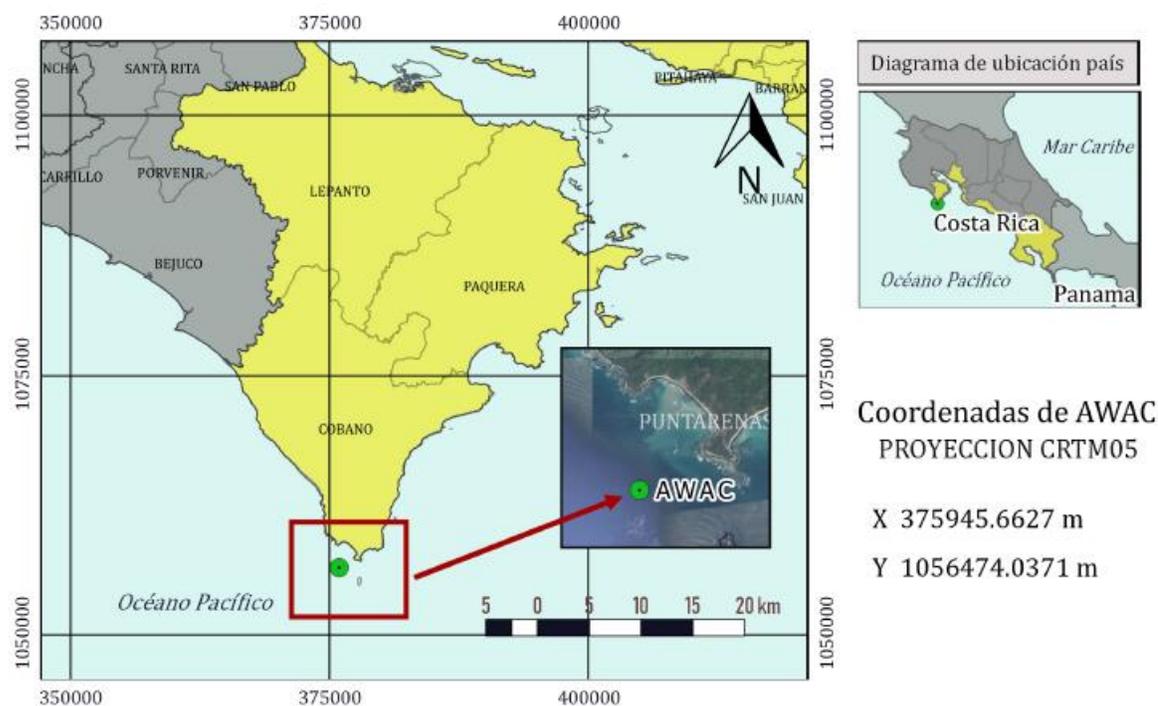


Figura 7. Localización geográfica del instrumento de medición de oleaje.

La localización geográfica donde fue instalado el AWAC se indica en la Figura 7. El AWAC ha sido configurado para tomar registros de oleaje a 2 Hz, durante un lapso de 17 minutos, lo que proporcionó 2048 datos en cada estado de mar.

Cada lapso presentó una frecuencia de repetición de 3 horas, lo que se considera registros representativos para la descripción del oleaje. El periodo total de medición inició el 23 de

enero del 2014 y finalizó 27 de octubre del 2014, posteriormente existió un espacio temporal sin información y se continuó con el registro desde el 21 de junio del 2015 al 22 de julio del 2016, y finalmente se realizaron registros desde el 16 de setiembre del 2016 hasta el 12 de mayo del 2018. En total se registraron 10272 estados de mar.

2.3. Análisis del oleaje

En el ámbito de la ingeniería marítima las series de superficie libre se procesan al punto de extraer de ellas parámetros del oleaje que son calculados bajo distintos enfoques y son necesarios para el diseño y análisis de obras de ingeniería en los litorales.

Esos enfoques de estimación de parámetros de oleaje se refieren al dominio estadístico o dominio del tiempo, y al dominio de la frecuencia. Ambos dominios de cálculo parten de una serie temporal de superficie libre, no obstante, calculan parámetros de oleaje que presentan diferentes aplicaciones, y que, para algunos de dichos parámetros, se permiten realizar comparaciones entre sí.

2.3.1. Análisis en el dominio del tiempo

Para realizar un análisis de oleaje en el dominio del tiempo se parte de un registro de superficie libre al cual se le pueden aplicar 3 procedimientos distintos para extraer de dicho registro las olas discretizadas. Al discretizar una ola se puede medir la amplitud o altura de esa ola, así como el período de ésta.

Los procedimientos para obtener las olas de un registro de superficie libre son el método de pasos ascendentes por cero (en inglés conocido como *zero upcrossing*), pasos descendentes por cero y el análisis de crestas. A manera de ejemplo la Figura 8 muestra la aplicación del método comúnmente utilizado: pasos ascendentes por cero.

- Altura media de ola (H_m)

Corresponde al promedio de todas las alturas de ola de un estado de mar.

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N} \quad (2)$$

donde N es el número de olas de un registro de oleaje.

- Altura significativa de ola (H_s)

Este parámetro estadístico es utilizado frecuentemente en el diseño de estructuras costeras.

Corresponde al promedio del tercio de las mayores alturas de ola de un estado de mar.

$$H_s = \frac{\sum_{j=1}^{\frac{N}{3}} H_j^*}{\left(\frac{N}{3}\right)} \quad (3)$$

siendo:

H_j^* el conjunto del tercio superior de alturas de ola.

N, la cantidad total de olas del registro.

- Altura media cuadrática (H_{rms})

La H_{rms} , está definida por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (4)$$

- Período de ola máximo ($T_{m\acute{a}x}$)

Dentro de un estado de mar, el $T_{m\acute{a}x}$ corresponde a la mayor magnitud de período en un estado de mar compuesto por “N” olas.

$$T_{m\acute{a}x} = máx\left(\sum_{i=1}^N T_i\right) \quad (5)$$

- Período medio de pasos ascendentes por cero (T_z)

Se define como el promedio de los períodos de ola de un estado de mar, analizado con el método de pasos ascendentes por cero. También se denomina como T_m .

$$T_z = T_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (6)$$

donde N es el número de olas de un registro de oleaje.

2.3.2. Análisis en el dominio de la frecuencia

En términos del análisis de frecuencia, interesa conocer el cálculo para desplazamiento en metros de la superficie libre del mar:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \cos[k_m(x \cos \alpha_n + y \sin \alpha_n) - 2\pi f_m t + \varepsilon_{mn}] \quad (7)$$

Donde:

x, y: posiciones de la onda en el eje X y Y, los cuales son ortogonales entre sí.

t: tiempo transcurrido.

a_{mn} : Amplitud resultante de las componentes “n” y “m”.

a_m : Amplitud de la componente “m”.

a_n : Amplitud de la componente “n”.

f_m : frecuencia de las componentes “n” y “m”.

ε_m : fase resultante de las componentes “n” y “m”.

k_m es el número de onda y puede determinarse a partir de la relación de la frecuencia angular ω_m .

A partir de la ecuación (7) el desplazamiento vertical de la superficie libre en un punto fijo puede expresarse de la forma:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(2\pi f_m t - \delta_m) \quad (8)$$

Siendo en este caso:

$$A_m = \sqrt{A_{cm}^2 + A_{sm}^2} \quad (9)$$

$$\delta_m = \tan^{-1}(A_{sm}/A_{cm}) \quad (10)$$

Donde A_{sm} y A_{cm} corresponden a las amplitudes de las ondas de la función seno y coseno, respectivamente.

Si el registro de oleaje viene dado por el tiempo, el espectro de energía en función de la frecuencia se puede calcular mediante la transformada rápida de Fourier y se define como:

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_0^t \eta(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2 \quad (11)$$

donde “S” corresponde a la función de densidad espectral en función de la frecuencia “f” en unidades de Hz.

El oleaje presenta la característica de que su contenido de energía se encuentra distribuido en olas de diferentes períodos y alturas de ola. Una representación gráfica y usualmente analizada corresponde a un espectro frecuencial de energía o espectro de energía. La Figura 9 muestra un ejemplo de un espectro de energía obtenido a partir de un estado de mar.

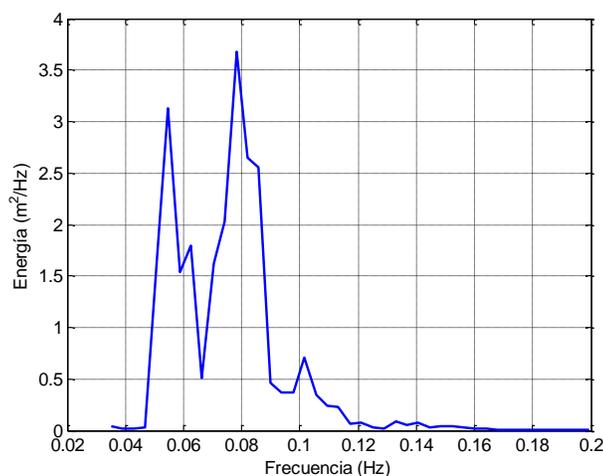


Figura 9. Espectro de energía obtenido a partir de un estado de mar.

De acuerdo con la forma de los espectros de energía, éstos se pueden categorizar en espectros unimodales, si presentan un único pico de energía fácil de reconocer; o en espectros bimodales si presentan dos picos de energía (ver Figura 10).

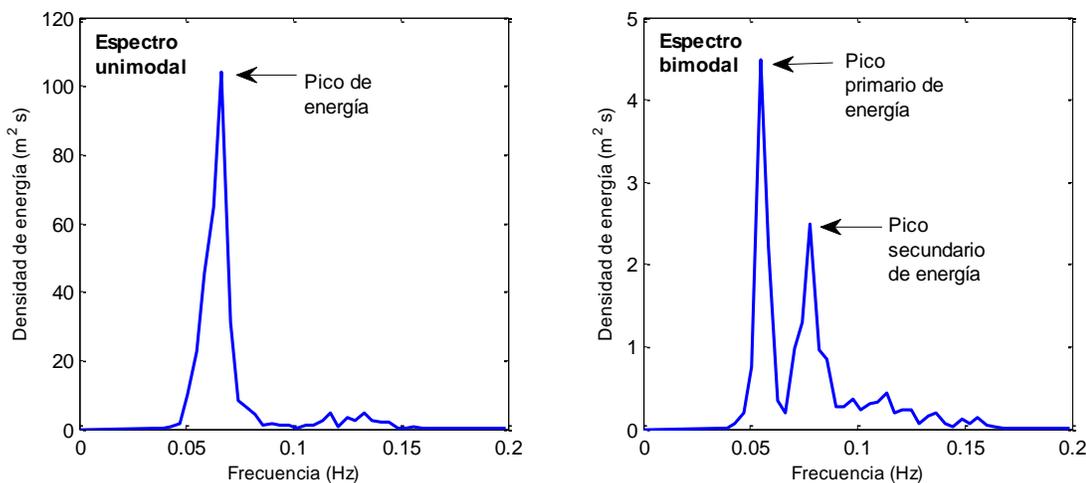


Figura 10. Formas espectrales de la distribución frecuencial de energía.

Los espectros bimodales pueden presentar el pico primario de energía (mayor magnitud de energía) en frecuencias menores que el pico secundario de energía (menor magnitud de energía), o viceversa. Por otra parte, los espectros multimodales corresponden a espectros en los cuales se logran distinguir más de 2 picos de energía.

Con la finalidad de incluir la parte más energética del espectro y hallar una manera de parametrizar los espectros de energía, se han desarrollado gran variedad de funciones de densidad espectral entre las cuales se mencionan la función JONSWAP, Donelan, Pierson-Moskowitz, TMA, Wallops, el espectro teórico de *swell*, entre otras funciones parametrizadas.

Una forma general de las funciones de densidad espectral es:

$$S(f) = Af^{-p}e^{-Bf^{-q}} \quad (12)$$

Donde “A”, “B”, “p” y “q” son parámetros libres y definidos para cada una de las funciones teóricas. La Figura 11 muestra un ejemplo de 3 de las funciones de densidad espectral:

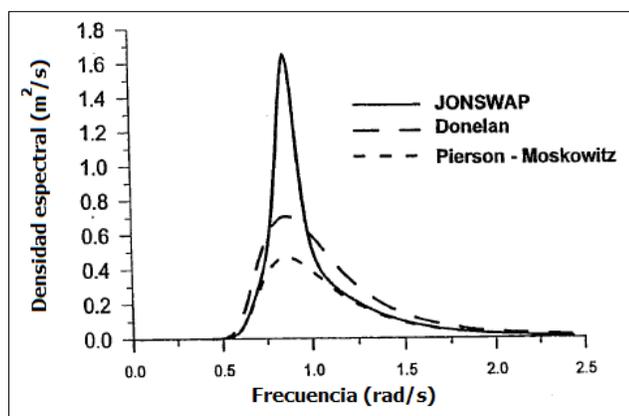


Figura 11. Algunos espectros de energía teóricos.

Fuente: GIOC, 2000.

La función JONSWAP representa una mejora de la función de densidad espectral de Pierson-Moscowitz (Alonso-Muñoyerro, 2005), cuya parametrización se basó en estudios de oleaje realizados en el Mar del Norte. Una función de densidad espectral puede tratarse como distribución estadística y, por lo tanto, se pueden derivar una serie de parámetros de oleaje, tal y como menciona Alfaro (2017).

Varios de los parámetros del oleaje que se estiman bajo el dominio de la frecuencia se calculan a partir del parámetro del momento de orden “n”. A continuación, se describe éste y los demás parámetros espectrales del oleaje que son función de los momentos de orden.

Momentos de orden “n” (m_n)

Los momentos de orden “n” se definen como la integral del producto de las frecuencias elevadas a la potencia “n” multiplicadas por su correspondiente valor de la función de energía espectral $S(f)$.

$$m_n = \int_{f=1}^N (f_i)^n \cdot S(f_i) df \quad (13)$$

Estos parámetros m_n son necesarios para el cálculo de otros parámetros descriptores del oleaje, como por ejemplo las anchuras espectrales y factor de apuntamiento.

- Anchura espectral de Cartwright y Longuet-Higgins (ε)

En el año 1956 se propone el parámetro que permite cuantificar el ancho que presenta un espectro a través de la expresión:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (14)$$

En caso de que ε tienda a 1 entonces se dice que el espectro es de banda ancha, mientras que si ε tiende a 0 el espectro es de banda angosta.

- Anchura espectral Longuet-Higgins (ν)

La anchura espectral ε puede acarrear errores al considerar el m_4 principalmente para oleajes en altas frecuencias. Por esta razón se propone otro parámetro descriptor de la anchura espectral que evita utilizar momentos de alto orden:

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (15)$$

- Parámetro de apuntamiento de Goda (Q_p)

Este parámetro espectral define la agudeza del pico de la forma del espectro de energía espectral:

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f S^2(f) df \quad (16)$$

Goda (1985) indica que para olas generadas por viento Q_p adopta un valor de 2.

- Altura de ola del momento de orden cero (H_{m0})

La altura del momento de orden cero corresponde a un parámetro espectral del oleaje, el cual se estima de la siguiente manera:

$$H_{m0} = 4.004 \sqrt{m_0} \quad (17)$$

Si un espectro de energía presenta la mayor cantidad de su energía concentrada en un pico estrecho de energía se establece que la altura H_{m0} es aproximadamente igual a la altura significante de ola H_s .

- Período medio de ola

El período medio de las olas se calcula con las siguientes 2 ecuaciones:

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (18)$$

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (19)$$

- Período pico (T_p)

Con base en el estudio de los espectros de energía frecuencial se puede establecer la frecuencia para la cual se da la mayor magnitud de energía espectral. Dicha frecuencia se denomina frecuencia pico f_p . El inverso de la f_p corresponde al T_p :

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (20)$$

- Factor de agrupamiento (GF)

A pesar de la naturaleza aleatoria del oleaje, se sabe que las olas de mayor magnitud no se dan de forma individual, sino que tienden a aparecer en grupos o paquetes de olas que poseen mayor energía (Silva R., 2005).

Johnson et. al. (1978) y Burcharth (1979), mostraron que el agrupamiento de oleaje adquiere relevancia en aspectos como la posibilidad de ocurrencia de resonancia en las estructuras o posibilidades de voltear embarcaciones y, además, puede llegar a afectar la estabilidad de las piezas del manto de rompeolas y el Ru en estructuras de protección costera.

La Figura 12 muestra dos series de oleaje, en una de ellas se identifica un oleaje regular donde tanto las crestas como los valles de la serie presentan uniformidad y valores muy similares en magnitud a lo largo del registro que se denomina oleaje con bajo agrupamiento, mientras que el oleaje que se presenta en conjuntos de olas que varían sus magnitudes en lapsos de la serie de oleaje se denomina oleaje agrupado, y dicho agrupamiento puede ser medido por un factor de agrupamiento GF.

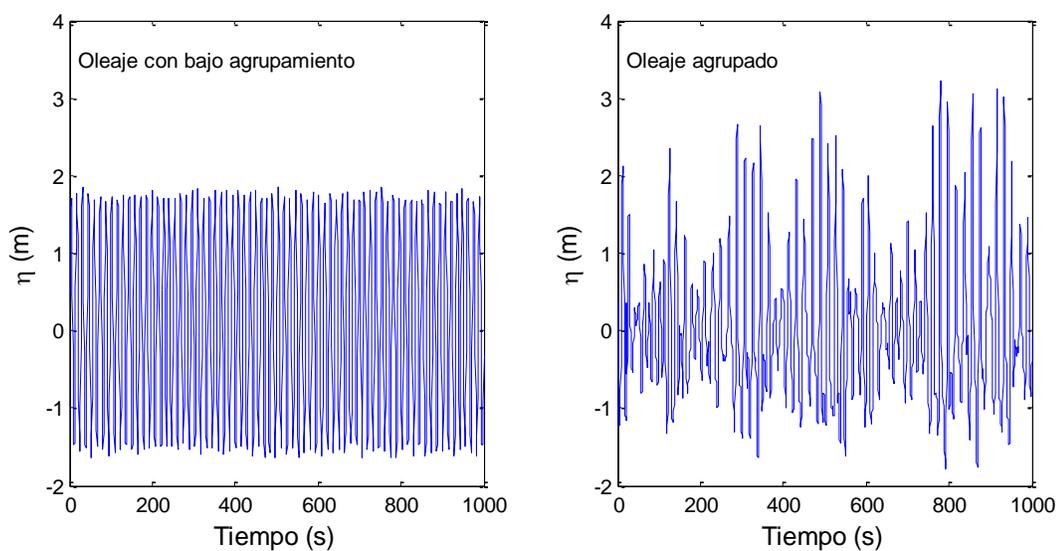


Figura 12. Series de oleaje y su agrupamiento.

Se dice que un oleaje presenta agrupamiento normal cuando se observan grupos de ondas definidos y constantes durante toda la serie temporal. Un espectro de energía puede ser generado por una o más series de superficie libre η . Esto responde a que el oleaje no ocurre siempre con el mismo agrupamiento o uniformidad. Por lo tanto, es necesario calcular el parámetro que permita medir esa uniformidad en el oleaje: el factor de agrupamiento GF.

Matemáticamente, el GF se define como la desviación estándar de la mitad de la envolvente cuadrada respecto a la variación del registro de η :

$$GF = \frac{\sigma[E(t)]}{\sigma^2[\eta(t)]} \quad (21)$$

Bajo un supuesto lineal, Hudspeth y Medina, mencionados por Lyyke T., y Frigaard P. (2014), han desarrollado una metodología para calcular la función SIWEH (en español conocida como la función Historial de Energía de Onda Instantánea Suavizada) y la función de GF.

El método se basa en un filtro temporal de Hilbert y este enfoque permite un aislamiento exacto de los sub armónicos de segundo orden que describen la parte de la señal de tiempo que varía lentamente.

2.3.3. Espectros teóricos de densidad energética

A partir de los espectros de densidad de energía se han establecido varias funciones paramétricas que estiman tanto la energía del oleaje, como otros parámetros de oleaje importantes en el ámbito de la ingeniería marítima. Algunas de las funciones de densidad espectral se presentan a continuación.

- Función de densidad espectral Pierson - Moscowitz

$$S_{PM}(f) = \frac{0.0081g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp \left\{ -0.74 \left(\frac{g}{2\pi U f} \right)^4 \right\} \quad (22)$$

Donde:

g: aceleración gravitacional en m/s^2 .

U: velocidad del viento medida a 19.5 m sobre el nivel medio del mar.

- Función de densidad espectral JONSWAP

$$S_J(f) = CH_s^2 T_p^{-4} f^{-5} e^{(-1.25 T_p f^{-4})} \gamma e^{\left(\frac{(-T_p f^{-1})^2}{2\sigma}\right)} \quad (23)$$

Donde:

C: constante en función de γ , y se calcula mediante la ecuación:

$$C = \frac{0.06238}{0.0336\gamma - \frac{0.185}{1.9 + \gamma}} \cdot 0.1094 - 0.01915 \cdot \ln(\gamma) \quad (24)$$

γ : corresponde al factor de ajuste pico al espectro de energía JONSWAP. Se define como la relación de la energía espectral en la f_p entre el espectro JONSWAP y el espectro de energía Pearson - Moskowitz (Pearson W., Moskowitz L., 1964):

$$\gamma = \frac{S_{JONSWAP}(f_p)}{S_{P.M.}(f_p)} \quad (25)$$

Goda (1983) propone que un oleaje tipo *swell* que haya viajado cientos o miles de kilómetros en aguas profundas, se puede representar por medio de espectros JONSWAP con un γ que varía entre 7 y 10. La idea anterior se refuerza con base en los resultados de la investigación de López, F. (2016) donde se indica que el oleaje unimodal que arriba a la costa pacífica de Costa Rica se representa con un factor γ igual a 7.

σ : parámetro que define la curvatura de las colas de la función de densidad espectral, y que está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 & \rightarrow f < f_p \\ \sigma_b = 0.09 & \rightarrow f \geq f_p \end{cases} \quad (26)$$

Adicionalmente, existen otros espectros de energía teóricos que permiten conocer la distribución de la energía en función de la frecuencia y otras variables del oleaje. La Figura 13 muestra algunos ejemplos los espectros teóricos existentes.

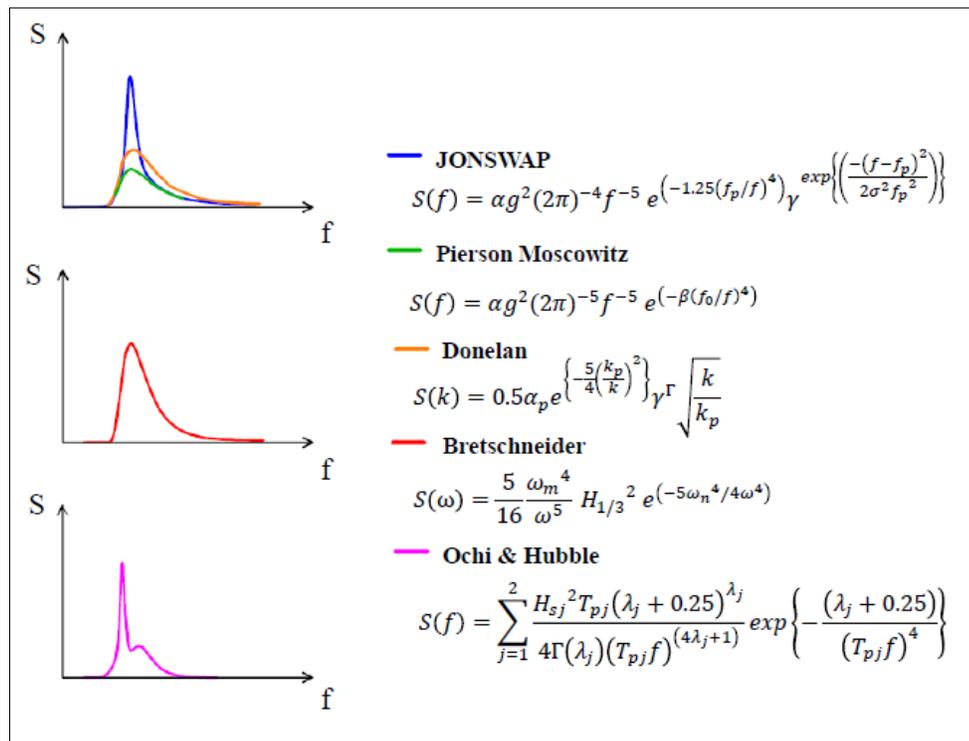


Figura 13. Ejemplos de espectros teóricos de energía.

2.4. Ascenso y descenso máximos sobre estructuras de protección

Existen diferentes estructuras que permiten disipar de manera parcial o total la energía del oleaje. Estas obras de la ingeniería, conocidas usualmente como rompeolas, se diseñan en función de la energía que se desea disipar, o bajo un caudal permisible de rebase sobre ellas. Para conseguir esos diseños es importante determinar la tipología de la obra de protección, la geometría, los materiales que la conforman, y las características del oleaje con que estará interactuando.

El diseño de un rompeolas debe cumplir 2 aspectos: la funcionalidad y la estabilidad. El primer aspecto se enfoca en la geometría de la obra, la manera en cómo el oleaje incidente

es disipado, la determinación de procesos como lo son la reflexión, la transmisión, el ascenso máximo (R_u) y el descenso máximo (R_d) del oleaje sobre el talud del rompeolas.

El segundo aspecto comprende la estabilidad de la estructura del rompeolas. Desde el ámbito hidráulico, la estructura debe garantizar un soporte ante eventos extremos de oleaje, durante su tiempo de vida útil.

El R_u se define como la distancia en vertical medida desde el nivel medio del mar hasta el punto más alto que el agua llega a alcanzar sobre el talud de un rompeolas. La distancia vertical que hay desde el nivel medio del mar hasta la corona del rompeolas se conoce como altura de bordo libre (F).

Por otra parte, el R_d corresponde a la distancia vertical medida desde el nivel medio del mar hasta el punto más bajo donde el agua retrocede sobre el talud de un rompeolas. La Figura 14 muestra un esquema descriptivo.

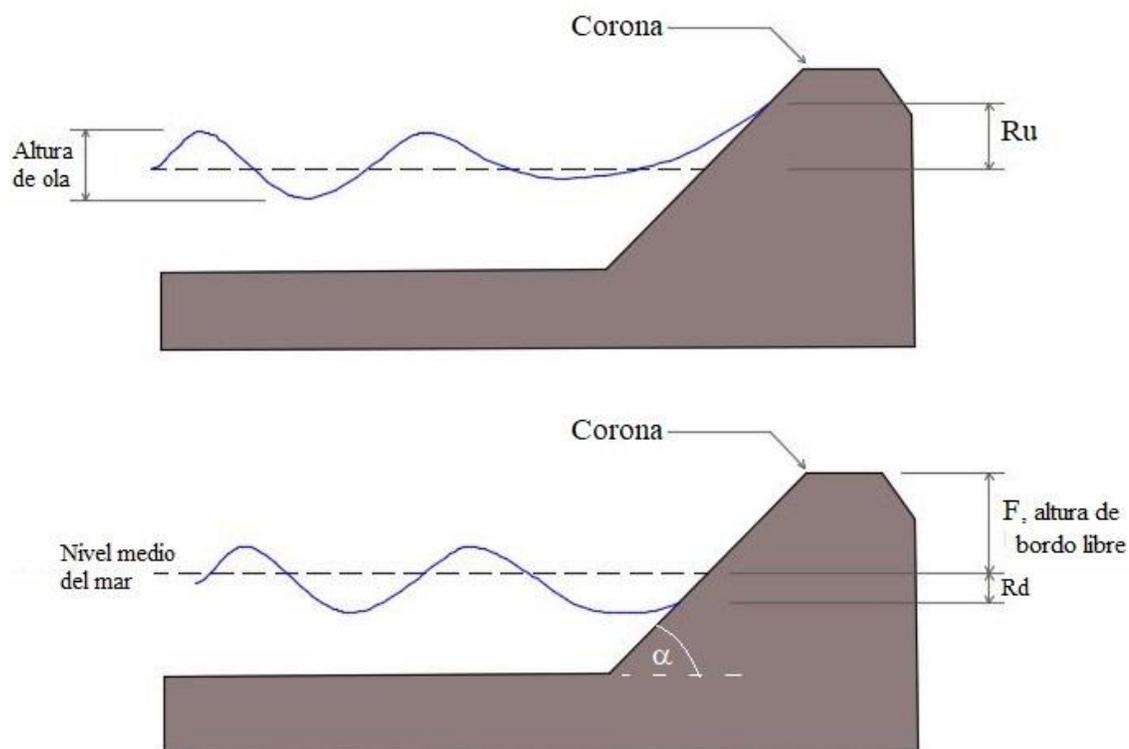


Figura 14. Definición de ascenso máximo, descenso máximo y altura de bordo libre.

En función de la rugosidad del material de protección de un rompeolas en talud, el R_u puede estimarse mediante diferentes ecuaciones. La Figura 15 muestra las formulaciones utilizadas para la estimación de R_u .

En el desarrollo de este trabajo se considera el cálculo de dicha variable bajo pendientes rugosas que utilizan en sus fórmulas factores de corrección.

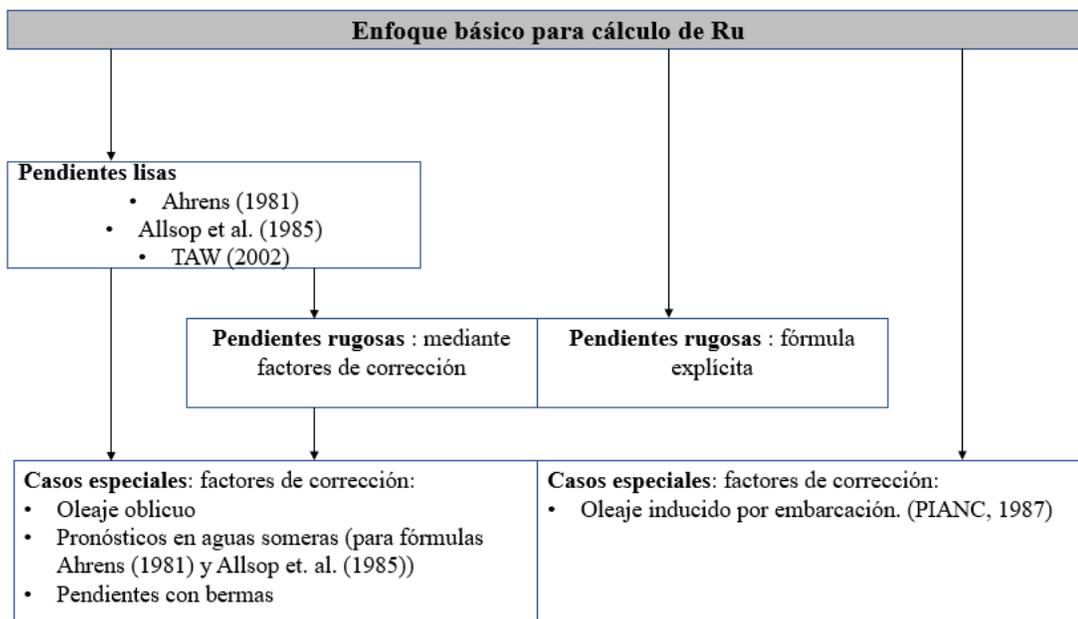


Figura 15. Métodos para el cálculo del ascenso máximo.

Fuente: CIRIA, CUR, CETMEF, 2007.

2.4.1. Ecuaciones para el cálculo de R_u y R_d

Existen diversas formulaciones para el cálculo de R_u y R_d . Estas ecuaciones fueron creadas a partir de métodos experimentales en laboratorio en los que los investigadores buscaron una manera de parametrizar el R_u y R_d en función de las características de las olas y del tipo de talud que el rompeolas presente.

Esas investigaciones recurren al parámetro I_r , o número de Iribarren, para diseño funcional de rompeolas.

$$Ir = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H}{1.56 T^2}}} \quad (27)$$

El parámetro Ir se define con base en la pendiente que presente el talud del rompeolas, de la altura de ola medida al pie del talud del rompeolas y del período de la ola.

Un parámetro similar al Ir corresponde al denominado parámetro de rotura ξ_m . El subíndice “m” de su símbolo indica que el período que se requiere en su ecuación corresponde al período medio de ola T_m . La siguiente expresión permite calcular el parámetro de rompimiento:

$$\xi_m = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{2 \pi H_s}{g T_m^2}}} \quad (28)$$

Debido a la tecnología de generación de oleaje en laboratorios con que se contaba en su momento, fue imposible generar cualquier tipo de oleaje en algunas de las investigaciones relacionadas con el modelado físico de oleaje sobre rompeolas. Por lo tanto, únicamente se producían series de oleaje regular durante la experimentación.

Sin embargo, los investigadores se apoyaron en una hipótesis denominada Hipótesis de Equivalencia que permite evaluar las condiciones de oleaje irregular basándose en experimentos con reproducción de oleaje monocromático o regular.

2.4.1.1. Hipótesis de Equivalencia

La Hipótesis de Equivalencia fue desarrollada inicialmente por Saville (1962), y en la actualidad continúa siendo utilizada y es de uso recomendado por el Shore Protection Manual (1984). Esta metodología, que se originó a raíz de un desarrollo empírico, es utilizada como herramienta ingenieril para el cálculo de parámetros de estabilidad de estructuras de protección costera, cálculo de fuerzas, R_u y R_d ; bajo entornos de oleaje irregular.

El objetivo de la Hipótesis de Equivalencia es simplificar los problemas aleatorios, debido a que ésta pretende llevar esos problemas a sistemas lineales. Los procesos aleatorios son prácticamente imposibles de predecir y en el tratamiento de éstos siempre se cometen errores. Por esta razón, la Hipótesis de Equivalencia resulta una herramienta adecuada para simplificar el estudio (Govaere, 1997).

Losada M. (1990) define la Hipótesis de Equivalencia de la siguiente manera:

“En un estado de mar, definido por su H_s , T y los parámetros espectrales ε y v , las variables tales como el tipo de rompiente, ascenso máximo, descenso máximo, altura de ola reflejada, altura de ola transmitida, poder ser consideradas variables aleatorias que adquieren un valor diferente para cada ola dentro de un estado de mar.

La función de distribución de esas variables aleatorias puede ser obtenida asignando a cada ola irregular individual el mismo valor que sería producido por un tren de ondas periódico de la misma altura de ola y del mismo período. Es importante resaltar la naturaleza estadística de esta hipótesis, la cual no necesariamente implica que cada onda individual genere la misma manifestación del fenómeno como el tren de ondas regular equivalente, pero es menos restrictivo; esto se refiere al promedio de muchos valores más que a ondas individuales.”

A continuación se describen las metodologías para el estudio de los parámetros de diseño funcional de rompeolas, R_u y R_d :

- Método experimental

El método experimental consiste en registrar el nivel de la superficie libre del agua sobre el talud del rompeolas, sobre el nivel medio del mar así como por debajo del nivel medio del mar, para registrar el ascenso y descenso máximos del agua.

Paralelo a ello, se registra la variación de la superficie libre en la localización al pie de talud del rompeolas para después calcular los parámetros del oleaje requeridos, tales como H y T .

De esta manera se pueden obtener los valores de R_u y R_d producidos por la serie del oleaje irregular y evaluar R_u y R_d estadísticamente.

Este método corresponde a la principal manera de evaluar el R_u y R_d sobre una estructura ya que es el que presenta mayor confianza en los resultados obtenidos. No obstante; el método experimental conlleva amplio trabajo en la construcción del escenario experimental y además, costos asociados a los materiales y al uso de equipos especializados de laboratorio.

- Método ola a ola

Este es uno de los métodos que permite evaluar los R_u y R_d que ocurren bajo condiciones de oleaje irregular. Primero se procesa la serie de oleaje irregular con el método de pasos ascendentes por cero para obtener las olas que conforman la serie. Posteriormente, para esas olas obtenidas, se clasifican de forma conjunta H y T para cada ola, y finalmente se les asigna una probabilidad de ocurrencia asociada P_{H-T} .

Para cada clasificación conjunta se reproduce el H y T representativos bajo un oleaje regular y con ello se registra el R_u y R_d mediante el modelado físico. Luego de completar todas las clasificaciones conjuntas y de haber registrado los R_u y R_d respectivos, se le asigna la probabilidad de ocurrencia P_{H-T} a las R_u y R_d medidos en cada clasificación.

Por último, los registros de R_u y R_d con su probabilidad de ocurrencia asociada se analizan de manera estadística. El Cuadro 1 y el

Cuadro 2 muestran un ejemplo del método ola a ola descrito:

Cuadro 1. Probabilidades conjuntas para caso ejemplificativo.

Intervalos	$0.0 < T \leq 2.0$	$2.0 < T \leq 4.0$	$4.0 < T \leq 4.0$...
$0.0 < H \leq 0.25$	$P_{H-T 1,1}$	$P_{H-T 1,2}$	$P_{H-T 1,3}$	$P_{H-T 1,4}$
$0.25 < H \leq 0.50$	$P_{H-T 2,1}$	$P_{H-T 2,2}$	$P_{H-T 2,3}$	$P_{H-T 2,4}$
$0.0 < H \leq 0.25$	$P_{H-T 3,1}$	$P_{H-T 3,2}$	$P_{H-T 3,3}$	$P_{H-T 3,4}$
$0.25 < H \leq 0.50$	$P_{H-T 4,1}$	$P_{H-T 4,2}$	$P_{H-T 4,3}$	$P_{H-T 4,4}$
\vdots	$P_{H-T i,1}$	$P_{H-T i,2}$	$P_{H-T i,3}$	$P_{H-T i,4}$

Cuadro 2. Registros de Ru y Rd para caso ejemplificativo.

Intervalos	$0.0 < T \leq 2.0$	$2.0 < T \leq 4.0$	$4.0 < T \leq 4.0$...
$0.0 < H \leq 0.25$	$R_{u,d 1,1}$	$R_{u,d 1,2}$	$R_{u,d 1,3}$	$R_{u,d 1,j}$
$0.25 < H \leq 0.50$	$R_{u,d 2,1}$	$R_{u,d 2,2}$	$R_{u,d 2,3}$	$R_{u,d 2,j}$
$0.0 < H \leq 0.25$	$R_{u,d 3,1}$	$R_{u,d 3,2}$	$R_{u,d 3,3}$	$R_{u,d 3,j}$
$0.25 < H \leq 0.50$	$R_{u,d 4,1}$	$R_{u,d 4,2}$	$R_{u,d 4,3}$	$R_{u,d 4,j}$
\vdots	$R_{u,d i,1}$	$R_{u,d i,2}$	$R_{u,d i,3}$	$R_{u,d i,j}$

Este trabajo utiliza las siguientes ecuaciones para estimar el Ru:

- i. Losada M. y Giménez-Curto L. (1981)
- ii. Método de cálculo propuesto por Van Der Meer (1992)
- iii. Ecuación de diseño del EurOtop (2018)

Las ecuaciones que plantean Losada M. y Giménez-Curto L. (1981) también permiten calcular el Rd.

2.4.1.2. Método ola a ola utilizando la fórmula de Losada M. y Giménez-Curto L.

Este método se basa en hacer uso de la ecuación desarrollada por Losada M, y Giménez-Curto L, en el año 1981. Las expresiones permiten estimar los parámetros Ru y Rd, con base en experimentación en laboratorio, y son aplicables bajo condiciones de oleaje regular y en rompeolas con talud rugoso.

Las expresiones establecidas para la estimación del Ru y Rd son las siguiente:

$$\frac{Ru}{H} = Au[1 - e^{Bu \cdot Ir}] \quad (29)$$

$$\frac{Rd}{H} = Ad[1 - e^{Bd \cdot Ir}] \quad (30)$$

Donde Au , Bu , Ad y Bd corresponden a parámetros que varían de acuerdo con la porosidad de cada tipo de elementos que conforman la coraza, tales como rocas, escollera, tetrápodos, dolos, cuadrípodos y cubos. Los valores de estos coeficientes de ajuste se muestran en el Cuadro 3 y en la Figura 16 y en la Figura 17.

Cuadro 3. Coeficientes de ajuste para el modelo de estimación de Ru y Rd , para pendientes permeables.

Tipo de elemento de coraza	Au	Bu	Ad	Bd
Rip-rap	1.80	-0.46	-1.10	0.30
Rubble mound	1.37	-0.60	-0.85	-0.43
Tetrápodos	0.93	-0.75	-0.80	-0.45
Dolos	0.70	-0.82	-0.75	-0.49
Cuadrípodos	0.93	-0.75	-0.80	-0.45
Cubos	1.05	-0.67	-0.72	-0.42

* Fuente: Losada, M. 1990.

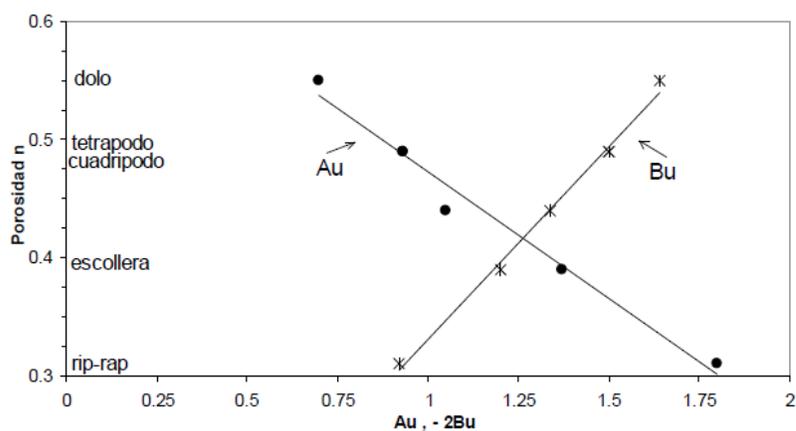


Figura 16. Determinación gráfica de Au y Bu , en Losada (1979).

Fuente: Govaere, 1997.

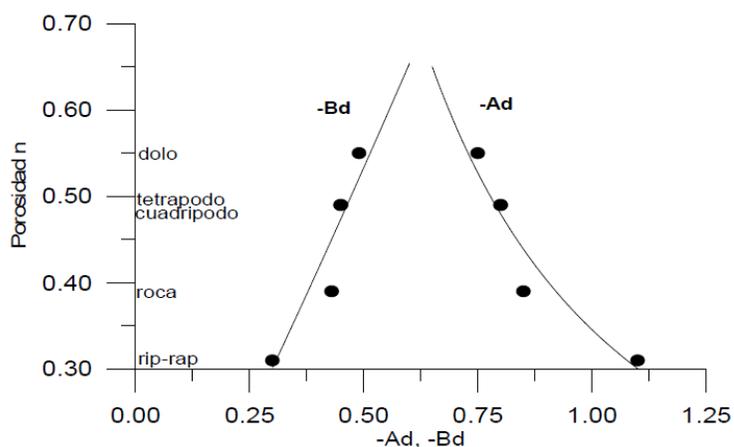


Figura 17. Determinación gráfica de Ad y Bd, en Losada (1979).

Fuente: Govaere, 1997.

Al utilizar las expresiones matemáticas (29) y (30) se puede estimar Ru y Rd para una determinada ola así como para un estadístico de oleaje como por ejemplo Hs.

2.4.1.3. Método de cálculo propuesto por Van Der Meer.

Van Der Meer J. (1992) realizó amplias investigaciones sobre la medición del Ru y del Rd así como estabilidad de piezas bajo oleaje irregular. En sus ensayos en laboratorio se utilizaron diferentes distribuciones espectrales, 4 ángulos de talud, coraza de rocas y núcleos de diques impermeables, permeables y diques homogéneos. Van Der Meer utilizó espectros de energía Pearson-Moskowitz para sus ensayos de laboratorio.

Luego del análisis de los datos obtenidos en el laboratorio, generó una curva con tres zonas que permiten establecer la probabilidad de ocurrencia de Ru y Rd. Dichas zonas se estiman con base en las siguientes expresiones:

$$\frac{Ru_x}{H_s} = a \cdot \xi_m \quad \text{para } \xi_m \leq 1.5 \quad (31)$$

$$\frac{Ru_x}{H_s} = b \cdot \xi_m^c \quad \text{para } \xi_m > 1.5 \quad (32)$$

$$\frac{Ru_x}{H_s} = d \quad Ru \text{ máximo} \quad (33)$$

Siendo Ru_x el ascenso máximo para una probabilidad de excedencia de $x \%$.

Los parámetros de ajuste a , b , c y d son dados en función a la probabilidad de excedencia. El Cuadro 4 muestra los valores de estos parámetros para diferentes probabilidades de excedencia ensayados por el autor.

Cuadro 4. Parámetros de ajuste para el método de Van Der Meer.

Nivel de probabilidad (%)	Parámetros			
	a	b	c	d
0.13	1.12	1.34	0.55	2.58
1	1.01	1.24	0.48	2.15
2	0.96	1.17	0.46	1.97
5	0.86	1.05	0.44	1.68
10	0.77	0.94	0.42	1.45

Con base en lo anterior, Van Der Meer planteó el gráfico mostrado en la Figura 18 para el diseño de estructuras de protección costera.

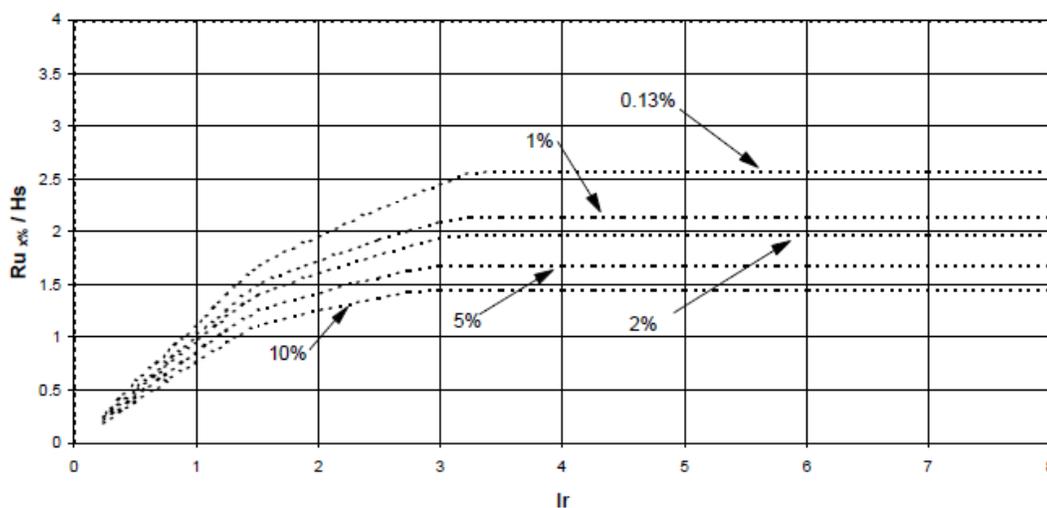


Figura 18. Ru respecto a H_s para distintos valores de I_r , en diferentes probabilidades de excedencia, de acuerdo con Van Der Meer J. et al.

Fuente: Govaere G. (1997)

2.4.1.4. Ecuación de diseño del EurOtop

En la segunda versión del EurOtop (Van der Meer, et. al., 2018) se establece que dicho documento corresponde a un manual de diseño basado en investigación en Europa sobre obras de protección costera y obras relativas al mar. Sin embargo, dicho manual es aplicado a nivel mundial.

En él se establecen gran cantidad de lineamientos de diseño, y principalmente para el rebase del oleaje en estructuras. En relación con el Ru, el manual europeo establece la siguiente expresión para su estimación:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = 1.65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \varepsilon_{m-1,0} \quad (34)$$

Siendo:

$\varepsilon_{m-1,0}$: parámetro de rompimiento del oleaje, que se estima según la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{m-1,0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{2\pi H_{m0}}{g T_{m-1,0}^2}}} \quad (35)$$

Siendo $T_{m-1,0}$ el período de energía de la ola.

γ_b : Parámetro de existencia de berma, que en caso de no existir una berma corresponde a 1. En caso de diseñar una berma un rompeolas con berma dicho parámetro puede adoptar un valor de hasta 0.6.

γ_f : Parámetro de ajuste respectivo a la rugosidad del talud, que para taludes rugosos corresponde a 0.4, con núcleo permeable (Schüttrumpf et. al., 2010).

γ_β : Parámetro de ángulo de incidencia β del oleaje. Si el oleaje incide perpendicularmente a la estructura de protección dicho parámetro adopta un valor de 1, de otra forma:

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0063|\beta| \quad \begin{cases} \text{Para } 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ \\ \text{Para } 80^\circ < |\beta| \end{cases} \quad (36)$$

$$\gamma_b = 1 - r_B(1 - r_{db}) \quad , \quad \text{para } 0.6 \leq \gamma_b \leq 1.0 \quad (37)$$

En el caso específico de la inexistencia de berma, el parámetro r_B , que hace referencia a la relación del ancho de la berma dividido entre el largo de la berma, adopta un valor de cero por lo que γ_b corresponde a 1.

El término r_{db} de la ecuación (37), permite correlacionar la profundidad a la que se encuentra la berma respecto al nivel medio del mar (Schüttrumpf et. al., 2010).

2.5. Introducción al modelado físico en el campo de la ingeniería marítima

A lo largo de la historia, la ciencia ha tratado de comprender la realidad mediante diferentes metodologías que se conocen como modelos. Cada uno de esos modelos consideran varias, pocas, o gran cantidad de variables que afectan el entorno del fenómeno o proceso que se desea estudiar.

Uno de los tipos de modelos que permiten comprender un fenómeno o proceso real es el modelado físico, en el cual se reproducen las variables representativas que alteran el entorno estudiado bajo ciertos criterios de semejanza, los cuales se exponen seguidamente.

Previo a la explicación de los modelos físicos aplicados al ámbito de la ingeniería marítima se definen los siguientes conceptos de acuerdo con Hughes S. (1993):

- Prototipo

El prototipo es la situación o evento que está siendo modelado. Generalmente interesa estudiar el efecto que produce el evento en estudio sobre alguna obra u estructura. Ese conjunto es parte del prototipo.

- Escala

Proporción constante de las características medibles que se da entre el modelo y el prototipo. Una escala corresponde a la razón de un valor medido en el prototipo respecto a un valor medido en el modelo, un parámetro medible determinado.

- Criterio de semejanza

Los criterios de semejanza o semejanzas son condiciones que funcionan como evaluación de los modelos y que permiten establecer relaciones entre el prototipo y el modelo. Los criterios de semejanza pueden determinarse mediante representaciones matemáticas o propiedades de los fenómenos estudiados.

- Similitud

Una similitud hace referencia a una condición que existe cuando de un modelo surge una respuesta similar a la del prototipo, incluso cuando el modelo no tiene una estricta semejanza con el prototipo.

- Efecto de escala

Los efectos de escala corresponden a las diferencias entre el prototipo y la respuesta del modelo debidos a la incapacidad de simular todas las fuerzas relevantes en el modelo, bajo una escala apta.

- Modelos matemáticos

Se definen como la representación matemática de los eventos reales que se desean explicar. Los modelos matemáticos se resuelven basados en las leyes y principios de la física. Sin embargo; para ciertas temáticas y dada su complejidad, se deben adoptar simplificaciones.

- Modelos numéricos

Los modelos numéricos son herramientas computacionales que, a través de rutinas programadas, permiten hallar la solución a los sistemas de ecuaciones que plantea el modelo matemático.

- Modelos físicos

Un modelo físico consiste en la representación y reproducción de un evento o fenómeno bajo cierta escala que permita evaluar su funcionamiento de la forma más realista.

Tal y como indica Gutiérrez (2005), “La necesidad de utilizar modelos físicos está determinada por la imposibilidad de dar respuesta a los múltiples problemas de la ingeniería marítima mediante el uso exclusivo de modelos numéricos. Esto debido a que

dada la complejidad de muchos problemas en este campo, se desconoce la manera de resolver el modelo matemático planteado”.

En algunos casos la complejidad radica en el funcionamiento del fenómeno físico como tal, y es por tal razón que los modelos físicos y numéricos deben ser complemento uno del otro para reducir la brecha del desconocimiento en la modelación de fenómenos o procesos físicos.

En el modelado físico se pueden predeterminar ciertas magnitudes derivadas en el campo de la mecánica de fluidos, a partir de las magnitudes medibles fundamentales: longitud, tiempo y masa. Dichas magnitudes fundamentales permiten establecer las semejanzas entre un prototipo y su modelo:

$$\begin{aligned} L_p &= \lambda L_m \\ t_p &= \lambda_t t_m \\ M_p &= \lambda_M M_m \end{aligned} \quad (38)$$

donde:

λ_i : corresponde a la escala en cada una de las magnitudes fundamentales “i”.

p: prototipo.

m: modelo.

De acuerdo con las relaciones mostradas en las ecuaciones (38), la primera expresión corresponde a la semejanza geométrica, la cual supone la relación entre dimensiones homólogas del sistema modelo -prototipo.

La segunda expresión corresponde a la semejanza cinemática, la cual se refiere a la similitud de movimientos entre el modelo y prototipo. La tercera expresión muestra la relación entre masas para dos sistemas geométrica y cinemáticamente semejantes.

En los ensayos de modelos hidráulicos a escala resulta imposible lograr mantener una semejanza dinámica, debido a que se deben cumplir las siguientes 2 relaciones entre fuerzas:

$$\frac{(F_i)_p}{(F_i)_m} = \frac{(F_g)_p}{(F_g)_m} = \frac{(F_\mu)_p}{(F_\mu)_m} = \frac{(F_\sigma)_p}{(F_\sigma)_m} = \frac{(F_e)_p}{(F_e)_m} = \frac{(F_{pr})_p}{(F_{pr})_m} \quad (39)$$

$$\frac{(F_i)_p}{(F_i)_m} = \frac{(F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_{pr})_p}{(F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_{pr})_m}$$

donde:

el subíndice “p” se refiere a prototipo, el subíndice “m” a modelo, el subíndice “g” a fuerzas de gravedad, el subíndice “μ” a fuerzas viscosas, el subíndice “σ” a fuerzas de tensión superficial, el subíndice “e” a fuerzas elásticas, y el subíndice “pr” a fuerzas de presión (Gutiérrez, 2005).

En función del experimento que se desarrolle cada término que compone la semejanza dinámica completa va a tener mayor peso que otro; sin embargo, estará siempre presente un efecto de escala intrínseco.

Sumado a lo anterior, existen otras semejanzas parciales como la Semejanza de Cauchy que se enfoca en reproducir con mayor fiabilidad las fuerzas elásticas; o la Semejanza de Weber que se concentra en las fuerzas de tensión superficial.

Por otra parte, existen modelos en los que no se logra conservar una escala en las tres dimensiones del espacio. En estos casos se dice que el modelo presenta distorsión. Por ejemplo, si en modelo físico de playas, ríos, estuarios, entre otros, las distancias horizontales son de mayor magnitud que las verticales.

Lo anterior dificulta la posibilidad de mantener una semejanza dinámica entre el prototipo y el modelo (Echávez, 1996). La relación que describe la distorsión de un modelo r se puede estimar de acuerdo con:

$$r = \frac{X_e}{Y_e} \quad (40)$$

donde:

X_e: corresponde a la dimensión del modelo en el eje horizontal

Y_e: es la dimensión del modelo en el eje vertical.

2.5.1. Modelos físicos a escala con flujo con superficie libre

Los modelos físicos que consideran flujo a superficie libre son los que se realizan mayoritariamente en el campo de la ingeniería marítima. En este trabajo la atención se centra en los modelos con frontera rígida y en los modelos donde la rugosidad influye.

De acuerdo con Echávez G. (1996), los modelos con superficie libre se agrupan en 3 categorías básicas que son:

- i. Dominado por la geometría
- ii. No hay influencia de la rugosidad (flujo laminar e hidráulicamente liso)
- iii. Influye la rugosidad (flujo en transición e hidráulicamente rugoso)

En función del fenómeno que se estudie, se le dará mayor importancia a alguna o varias de las categorías básicas en el modelo físico. En el estudio que se desarrolla en este trabajo interesa conocer los modelos físicos en donde influye la rugosidad.

En esta categoría la rugosidad del contorno con que interactúa el agua toma relevancia y, sumado a ello, se considera un fondo fijo y el flujo bajo un estado hidráulicamente rugoso. Relacionado con lo anterior, es necesario establecer como punto de interés la semejanza dinámica y que se puede expresar como:

$$\left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_{\text{prototipo}} = \left(\frac{V}{gL}\right)_{\text{modelo}} \quad (41)$$

siendo:

g: aceleración gravitacional de la Tierra

L: longitud característica (para flujos a superficie libre corresponde a la profundidad del flujo)

V: velocidad característica del flujo

Generalmente se analizan 3 magnitudes significativas como son el tiempo, la velocidad y la fuerza. Para cada una de ellas se ha establecido la escala entre el prototipo y el modelo bajo la condición de semejanza dinámica:

$$\begin{aligned}
 t_p &= \sqrt{\lambda} \cdot t_m \\
 V_p &= \sqrt{\lambda} \cdot V_m \\
 F_p &= \lambda^3 F_m
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

donde λ corresponde al factor de escala.

Por ende, las relaciones anteriores indican cómo varía cada una de las magnitudes si se hacen comparaciones entre el modelo y el prototipo.

Una de las variables que adquieren relevancia en algunos de los modelos físicos es la rugosidad entre el prototipo y el modelo. Echávez G. (1996) establece que para escalar la rugosidad se debe considerar que el flujo en el prototipo generalmente clasifica en los flujos hidráulicamente rugosos, mientras que el flujo en el modelo presenta números de Reynolds (R) menores y que cae en la zona de transición, por lo que se requiere hacer una compensación escogiendo una rugosidad en el modelo de tal forma que se obtenga el mismo coeficiente de pérdidas (f) en el modelo y en el prototipo (ver Figura 19).

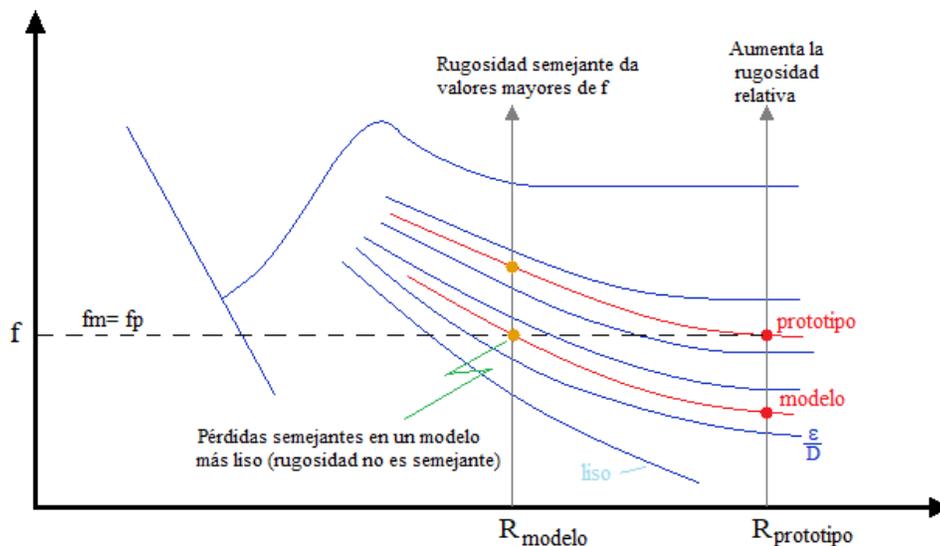


Figura 19. Esquema de las pérdidas por fricción en modelos con superficie libre.

Tomando en cuenta lo anterior, se estaría realizando una correcta simulación del efecto combinado de la rugosidad y viscosidad del flujo en modelos con superficie libre, aunque no se realiza una simulación correcta de ninguno de los 2 efectos en forma separada (Kobus, 1980).

Además, las fuerzas viscosas como la fricción y fuerzas de arrastre, así como las fuerzas de tensión superficial en el agua pueden presentar ciertos efectos de escala no deseados. Sin embargo; no se puede lograr reproducir una “ semejanza completa” en el modelo, ya que siempre existirán ciertas distorsiones en los modelos físicos (Gutiérrez, 2005).

Para evitar o reducir las distorsiones en el modelo se recomienda utilizar la menor escala posible. Además de que si se reduce el modelo puede llegarse a un estado del flujo que no sea turbulento y producir un flujo que impide mantener la semejanza cinemática y geométrica.

En cuanto a los modelos físicos de estructuras de protección costera, éstos son usualmente realizados debido a que son obras de gran magnitud y de alto costo económico. El costo relativo del modelo físico en comparación con el costo total de la obra y los costos de mantenimiento pronosticados a futuro hace factible un estudio mediante el modelado físico.

La selección de los materiales que conforman la estructura de rompeolas presenta alta importancia en cuanto a los parámetros de porosidad y permeabilidad de la estructura. En caso de elaborar un modelo de rompeolas a escala, los tamaños de los elementos de la coraza y capas inferiores son determinados en función del peso que debe tener cada elemento.

No obstante, difícilmente se logra obtener tamaños de las partículas de capas inferiores, como son los filtros finos o el núcleo, y que sean exactos al valor indicado en el escalamiento. Debido a ello, se deben seleccionar tamaños nominales de rocas o arenas similares que introducen un porcentaje de error en la permeabilidad de la estructura.

Por otra parte, la fricción entre el agua y una estructura costera puede producir efectos importantes. No obstante, no se considera la fricción de fondo con la superficie de la coraza del rompeolas dado que el talud de rompeolas es mucho menos extenso que el fondo del mar en la bahía donde se propaga el oleaje, acción que se toma como una simplificación en el modelo (Hughes, 1993). El efecto en el cambio de la cantidad de movimiento producto de la interacción con la estructura del rompeolas es la principal razón para que se produzca una disipación de energía.

Asimismo, uno de los aspectos que se consideran en el modelado físico es la determinación de las condiciones de contorno. En el caso específico de un canal unidireccional de oleaje se conoce que no se reproduce la realidad que ocurre en el mar, donde el oleaje puede provenir de varias direcciones. No obstante, esto no adquiere relevancia ya que interesa conocer la incidencia de forma perpendicular a la estructura del rompeolas.

Para estudios de variables como lo es el ascenso y descenso máximo de un rompeolas no toma importancia este efecto, ya que los grupos de olas al arribar a las costas presentan una dirección predominante que actúan perpendicularmente al cuerpo del rompeolas.

3. Caracterización espectral del oleaje

3.1. Introducción

El oleaje que arriba a la costa del Pacífico de la región y por ende también en Costa Rica, tiene su origen cerca del litoral Este neozelandés, por lo que recorre aproximadamente 9000 km. Durante este recorrido la distribución de energía del estado de mar va teniendo modificaciones, algunas debido a los diferentes procesos clásicos de propagación, y en este caso particular principalmente la transferencia de energía entre las distintas frecuencias, lo que motiva la aparición de sub y superarmónicos.

Sumado al recorrido que hacen las olas y debido al proceso natural de dispersión del oleaje cuando éste sale del área de generación, en el litoral Pacífico costarricense se ha detectado que la distribución energética del estado mar unimodal, como lo es por ejemplo un espectro tipo JONSWAP, únicamente se presenta en el 22.5 % del tiempo (López, 2016). Siendo los más frecuentes las formas espectrales bimodales o multimodales.

A estas singularidades se suma que el oleaje durante el trayecto se encuentra con las islas Galápagos, las que producen un efecto de transformación denominado difracción. La difracción del oleaje produce una disminución de la energía del oleaje que se manifiesta principalmente en cierto tramo de la costa de Costa Rica.

En la Figura 20 se presenta a manera de ejemplo una salida del modelo numérico global de generación y propagación de oleaje *Wave Watch III* (cuya sigla es WWIII), utilizado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés). En dicha figura es relevante notar los períodos pico de entre 20 s y 22 s que arriban a las costas del Pacífico de América Central, lo cual representa una condición de oleaje peculiar de esta región del planeta y diferente a la del resto del mundo.

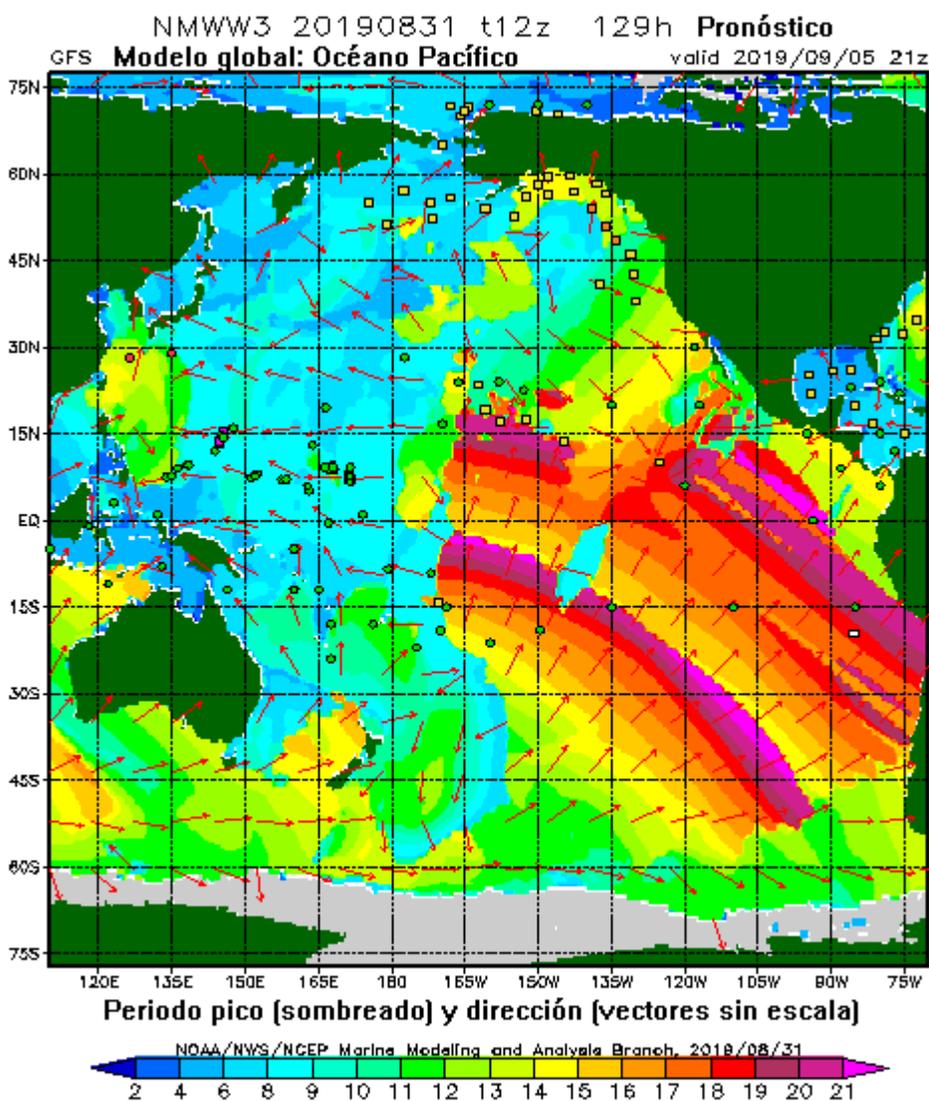


Figura 20. Pronóstico del modelo numérico WWIII en el océano Pacífico.

Fuente: NOAA, 2019. Modificado por Corrales M.

Con el fin de caracterizar la distribución energética de los estados de mar que inciden en la costa del Pacífico de Costa Rica, y complementar el trabajo realizado por López (2016), se presenta en este capítulo una metodología para parametrizar las formas del espectro frecuencial del oleaje. Los resultados obtenidos son insumo para los experimentos de laboratorio que se describen en el capítulo 4.

3.2. Desarrollo metodológico

La parametrización de los espectros frecuenciales de oleaje se realiza siguiendo la metodología que se esquematiza en la Figura 21.

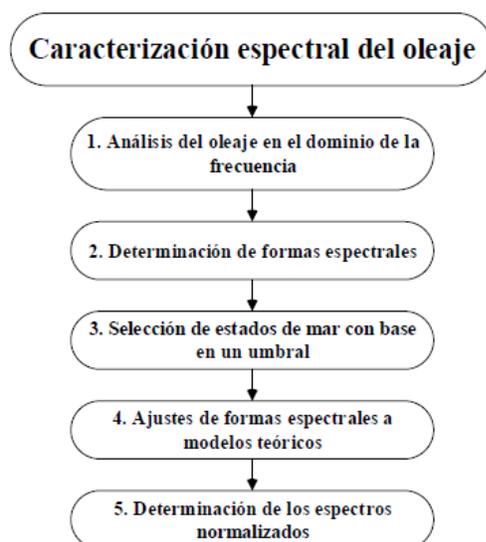


Figura 21. Esquema metodológico para la parametrización espectral del oleaje.

Esta metodología da inicio con el análisis del oleaje en el dominio de la frecuencia. Una vez generados los espectros de energía de la totalidad de estados de mar se clasifican de manera visual en unimodal, bimodal y multimodal.

Posteriormente se realiza una selección de estados de cuya finalidad es determinar los espectros de energía que contengan una alta energía y que posteriormente sean evaluados en el diseño funcional de un rompeolas en talud.

Definido el subconjunto de estados de mar de alta energía se prosigue con una metodología de superposición de espectros JONSWAP, similar a la metodología planteada por Guedes Nolasco (1992), descrito a detalle más adelante.

Por último se realiza un proceso de normalización de los espectros superpuestos JONSWAP, de forma tal que los espectros de energía normalizados presentan como resultado valores de H_{m0} igual a 1.

3.3. Resultados

3.3.1. Análisis del oleaje en el dominio de la frecuencia

Se realizó para cada estado de mar el análisis del oleaje en el dominio de la frecuencia mediante el uso de la transformada rápida de Fourier, seguidamente se calculan los diferentes momentos de orden m_n , para posteriormente estimar los parámetros del oleaje T_p , T_{02} , y H_{m0} . La Figura 22 muestra el resultado del cálculo del T_p .

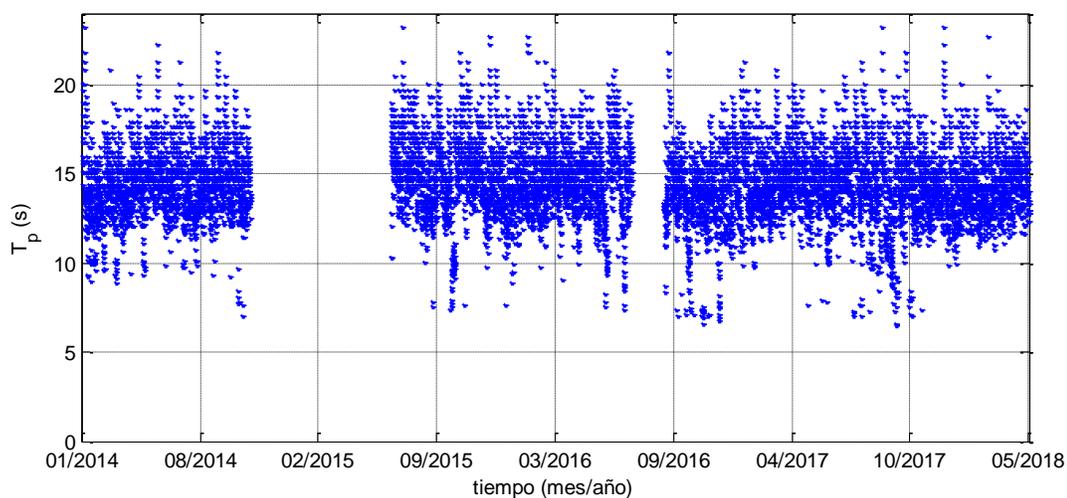


Figura 22. Serie temporal de T_p .

Otra de los parámetros espectrales del oleaje que son representativos corresponde al período medio T_{02} . La Figura 23 presenta la serie temporal de este estadístico:

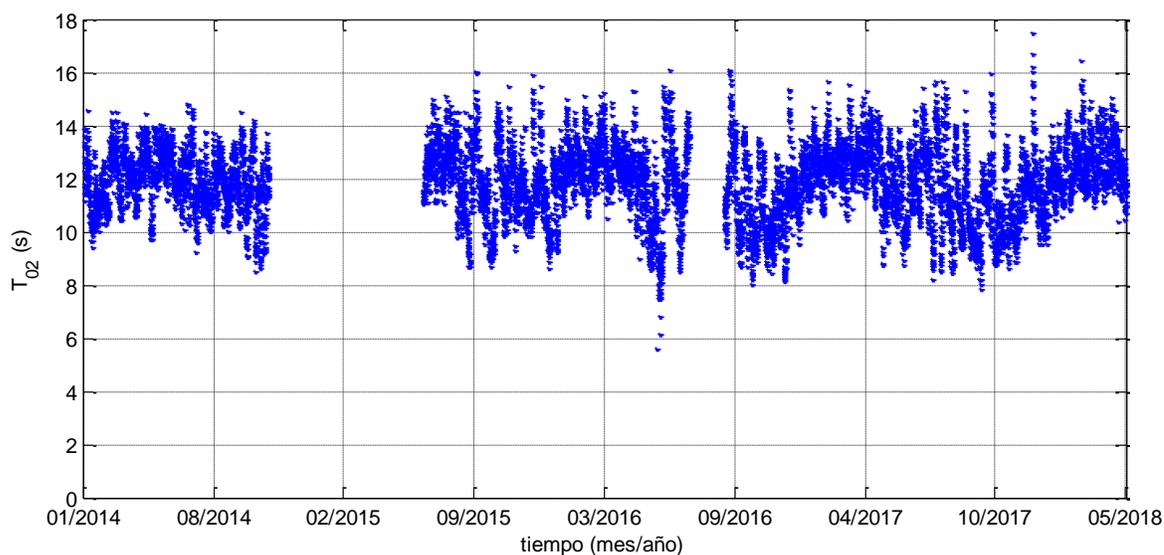


Figura 23. Serie temporal de T_{02} .

Se muestra que la serie temporal de T_{02} se concentra alrededor de un valor promedio de 12.30 s, con una desviación estándar de 1.40 s. La Figura 24 por su parte muestra el parámetro H_{m0} para los 10272 estados de mar.

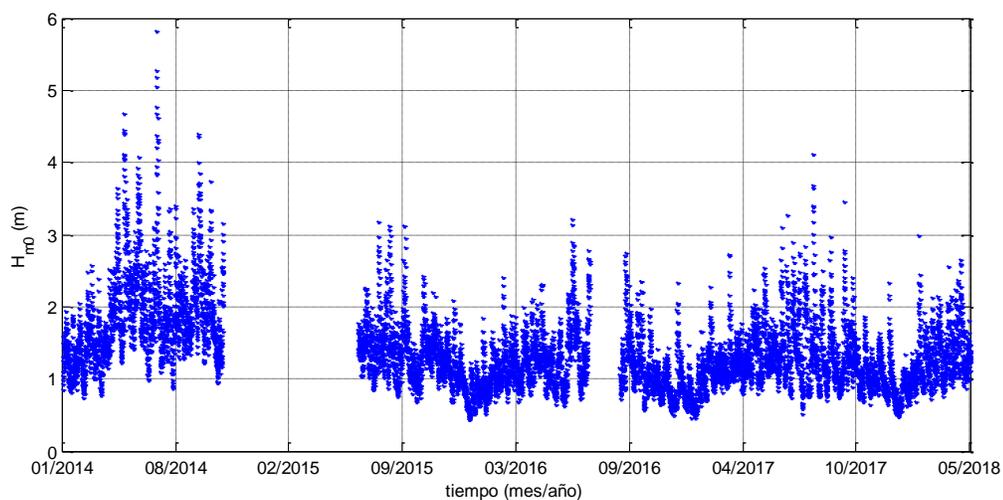


Figura 24. Serie temporal de H_{m0} .

De acuerdo con la Figura 24, se observa que existe un intervalo de la serie de H_{m0} con valores elevados de la variable, y en promedio para la totalidad de estados de mar se calculó un valor promedio de 1.38 m.

Debido a que el análisis en el dominio de la frecuencia se obvia la información direccional, pero como los datos contienen esta información, se incluye a manera de complemento esta información por medio de la rosa de direcciones.

La dirección predominante del oleaje en la localidad donde se realizan las mediciones en campo indica que poco más del 60 % del tiempo el oleaje proviene de la dirección sur-suroeste, mientras que el resto del tiempo el oleaje proviene de la dirección suroeste (ver Figura 25).

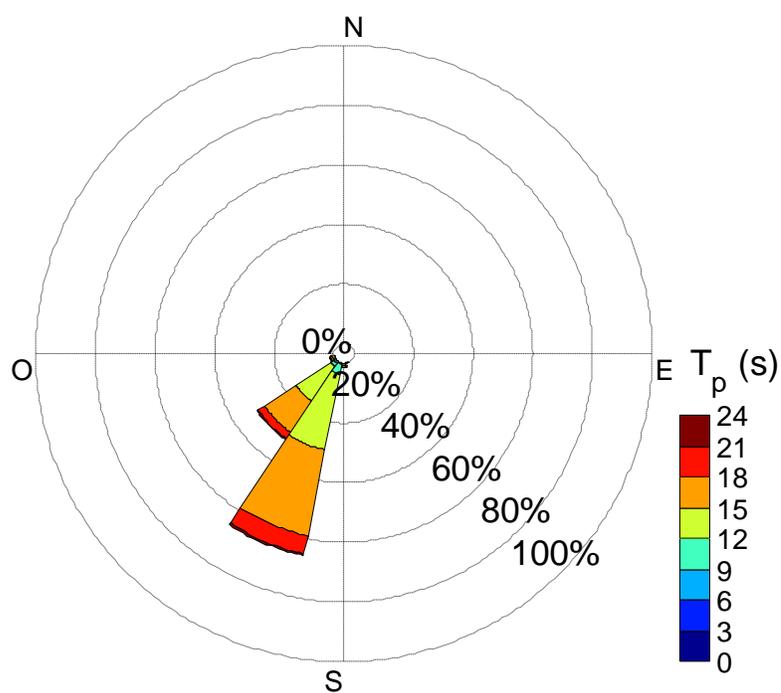


Figura 25. Rosas direccional de T_p .

3.3.2. Determinación de formas espectrales

Una vez que se determinan los espectros de energía de los 10272 estados de mar se realizó una clasificación de dichos espectros de acuerdo con su forma. El proceso de clasificación de los espectros de energía de cada estado de mar se realizó mediante un análisis visual de cada uno de ellos.

Se definieron 7 espectros modelo para realizar esa clasificación. Los espectros modelo se muestran en la Figura 26.

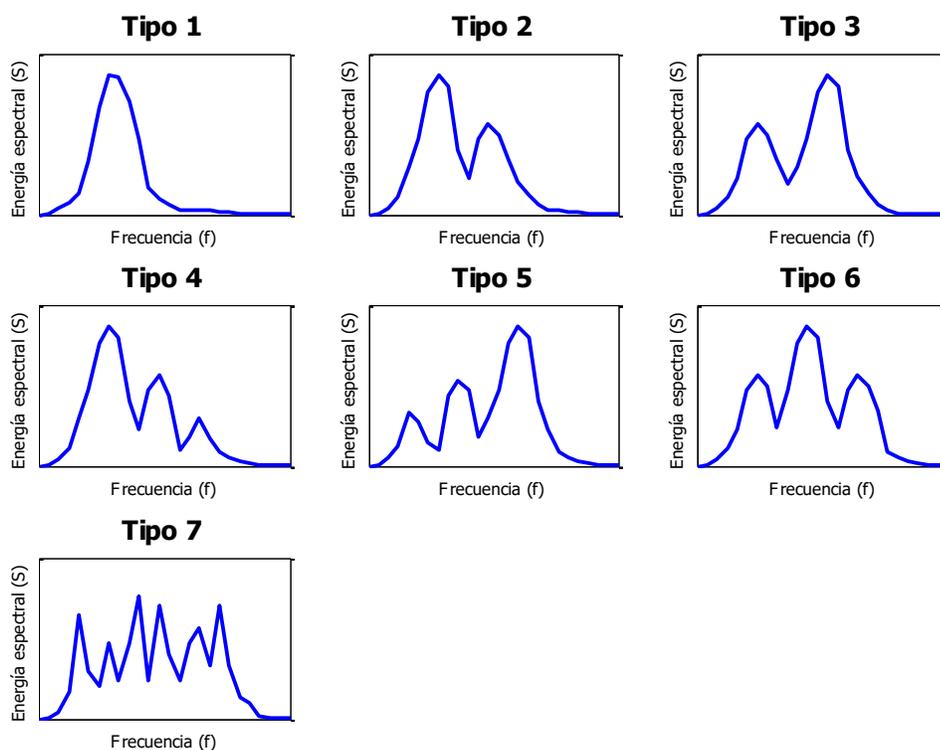


Figura 26. Definición de formas de los espectros modelo de energía.

Con base en la Figura 26, el modelo 1 corresponde a un espectro unimodal, en donde su máxima energía frecuencial se concentra en un único pico.

El modelo 2 corresponde a un espectro bimodal con el pico de mayor energía asociado a frecuencias bajas y el otro pico con menor magnitud de energía asociado a las altas frecuencias.

El modelo 3 también corresponde a un espectro bimodal pero a diferencia del modelo 2, el pico de mayor energía se asocia a las altas frecuencias y el pico de menor energía se asocia a las bajas frecuencias

El espectro modelo 4 presenta 2 picos secundarios en frecuencias altas, mientras que el pico primario de energía está en las altas frecuencias. Los espectros con 2 picos de energía secundarios en frecuencias menores a la frecuencia del pico primario de energía se clasifican como un espectro del modelo 5.

Por otra parte, si el pico primario de energía se localiza entre 2 picos secundarios de energía entonces el espectro se clasifica como un espectro modelo 6. Por último, si el espectro de un determinado estado de mar no muestra una similitud a alguna de las clasificaciones descritas anteriormente entonces se clasifica como multimodal y se le asigna la enumeración 7.

A manera de ejemplo, la Figura 27 presenta los espectros de energía de 4 estados de mar registrados y clasificados como espectros modelo 1, 3, 4 y 7:

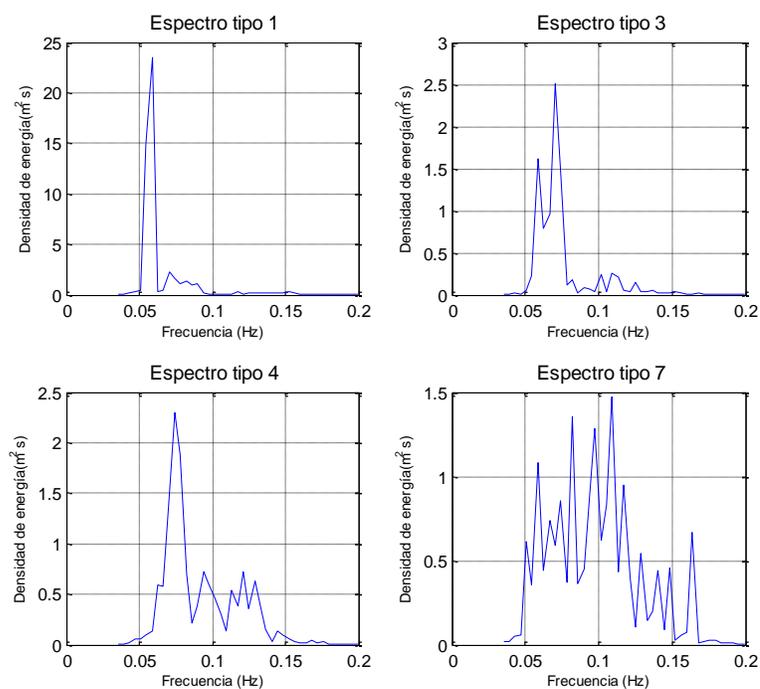


Figura 27. Ejemplo de espectros de energía clasificados según espectros modelo propuestos.

Como resultado de la clasificación visual se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Clasificación de los espectros de energía frecuencial según los espectros de energía modelo.

Tipo de espectro modelo	Cantidad de espectros	Porcentaje de espectros (%)
1	1785	17.4
2	3354	32.6
3	1121	10.9
4	1629	15.9
5	375	3.6
6	1965	19.1
7	43	0.4
Total	10272	100.0

De acuerdo con el Cuadro 5, aproximadamente un 17 % de los espectros frecuenciales de energía son unimodales, mientras que un 43.5 % son espectros bimodales. Espectros clasificados como tipo 4 y 6 también presentan altas presencias, con ocurrencias que van entre el 15 % y 20 % respectivamente.

Es importante mencionar que se evaluaron diferentes metodologías para la determinación de las formas espectrales en la totalidad de espectros de energía, entre ellas el análisis de conglomerado de puntos en gráficos de dispersión, superposición de los espectros, entre otras, sin embargo, no se observaron resultados adecuados. Por lo tanto, se procedió con el análisis visual de los espectros de energía como método más acertado en la clasificación presentada anteriormente.

3.3.3. Selección de estados de mar para ajuste de funciones de densidad espectral

El objetivo general de este trabajo se enfoca en el diseño funcional de obras de protección costera, por esa razón es necesaria una selección de estados de mar aptos para considerar en el diseño funcional.

En el caso del diseño funcional de estructuras de protección costera es común utilizar parámetros de oleaje bajo condiciones de extremo, ya que de esa forma se asegura que para un alto porcentaje del tiempo la estructura de protección costera se mantendrá bajo un rebase aceptable.

Es necesario delimitar una cantidad de estados de mar que presentan alta energía. Para ello se usa como criterio el parámetro H_{m0} asociado a una probabilidad de no excedencia del 98 %, el cual se considera una altura de ola de alta energía. De forma gráfica esta selección se muestra en la Figura 28.

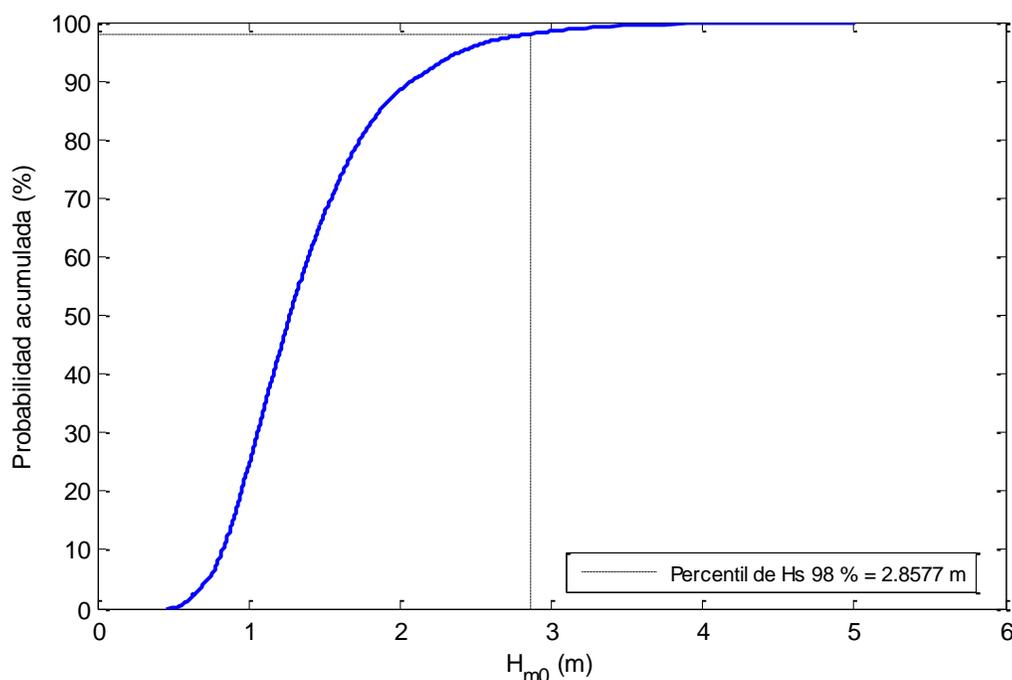


Figura 28. Función de distribución acumulada de H_{m0} del registro

El conjunto de estados de mar que superan dicho umbral comprende un total de 200 estados de mar. La Figura 29 muestra a través de una serie temporal las 200 H_{m0} que superan el umbral de la probabilidad de no excedencia del 98 %, mientras que el Cuadro 6 muestra los parámetros estadísticos asociados a dicho intervalo de 200 estados de mar.

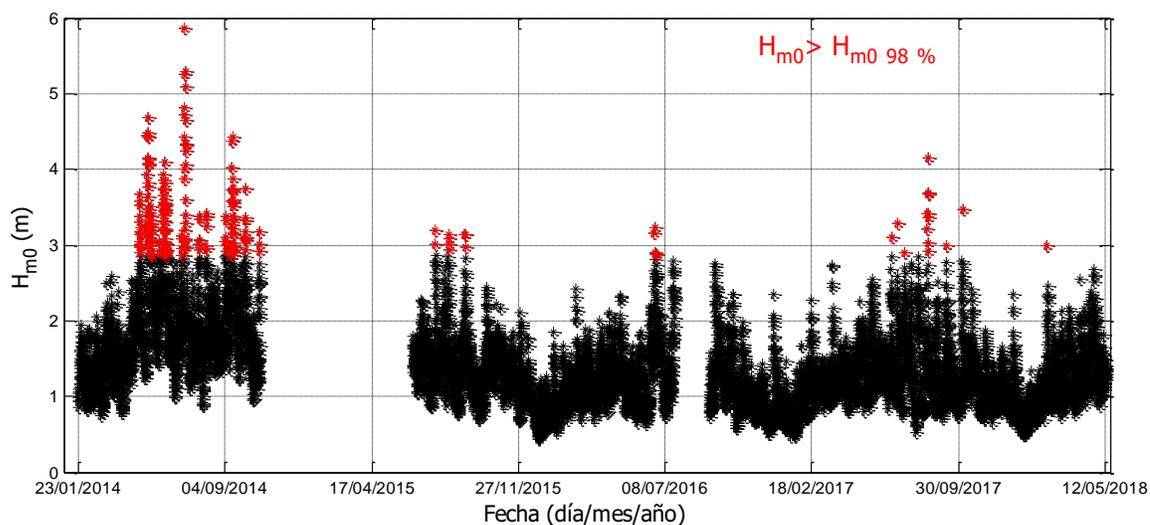


Figura 29. Serie temporal de H_{m0} y subconjunto de H_{m0} mayores al umbral H_{m0} 98%.

Cuadro 6. Estadística de la variable H_{m0} que supera el umbral H_{m0} 98 %.

Estadístico	Valor
Tamaño de la muestra, n	200
Media aritmética (m)	3.400
Mediana (m)	3.223
Varianza (m ²)	0.267
Desviación estándar (m)	0.516
Coefficiente de variación	0.152

Los 200 estados de mar correspondientes al subconjunto determinado anteriormente se clasifican de manera visual de acuerdo con la forma de sus espectros de energía. Como resultado se obtienen los porcentajes de ocurrencia mostrados en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Clasificación de espectros de energía frecuencial para los 200 estados de mar seleccionados.

Tipo de espectro modelo	Cantidad de espectros	Porcentaje de espectros (%)
1	47	23.5
2	90	45.0
3	26	13.0
4	24	12.0
5	0	0.0
6	13	6.5
7	0	0.0
Total	200	100.0

De acuerdo con en el Cuadro 7, los espectros de energía modelo 2 son los de mayor ocurrencia, con aproximadamente la mitad de los espectros clasificados. Los otros espectros modelo de mayor ocurrencia son los del tipo 1, 3 y 4.

De acuerdo con el Cuadro 7 la ocurrencia en conjunto de los espectros de energía 1, 2 y 3 suman 81.5 %. Se continuará el análisis con dichos tipos de espectros de energía. Este hecho deja abierta una línea de investigación para continuar con el estudio esos espectros de energía tipo 4, 5 y 6 los cuales, aunque presentan menor ocurrencia en el tiempo son capaces de producir efectos importantes en variables como lo son el ascenso y descenso máximos sobre un rompeolas en talud.

El siguiente paso corresponde a ajustar los espectros de energía de modelos 1, 2 y 3 a funciones de densidad espectral JONSWAP y superposición de las mismas funciones.

3.3.4. Ajuste de formas espectrales a modelos teóricos

Es necesario realizar un ajuste de los espectros de energía a funciones parametrizadas existentes, específicamente la función de densidad energética JONSWAP.

La función de densidad espectral JONSWAP describen espectros de energía con un único pico de energía, no obstante, para ajustar espectros multimodales, se utilizará un procedimiento similar al que plantean Guedes y Nolasco (1992).

El ajuste de espectros de energía a este tipo de espectro teórico se divide en dos grupos principales, el primero de ellos corresponde a los espectros unimodales y el segundo hace referencia a los espectros bimodales.

Se inicia por el espectro modelo 1 (ver Figura 26), que corresponde al oleaje unimodal. Para cada estado de mar del subconjunto que se ha estimado se ajusta al modelo 1, se determina mediante un histograma de frecuencias el valor de f_p de mayor ocurrencia de presentación tal y como el que se muestra en la Figura 30.

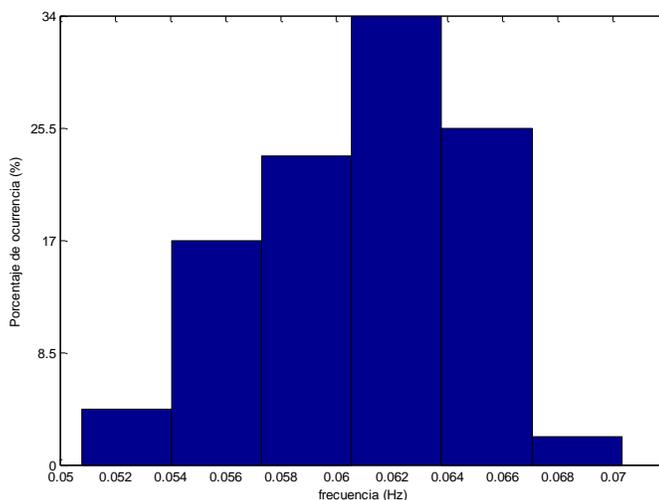


Figura 30. Histograma de frecuencias pico de espectros unimodales de los 200 estados de mar con mayor H_s .

De acuerdo con la Figura 30, la magnitud de f_p de mayor ocurrencia es de 0.0625 Hz.

Los resultados de la Figura 30 muestran que las f_p como 0.06 s y 0.06375 s tienen una ocurrencia superior al 30 %, por lo que es una deja abierta la posibilidad de evaluar esas otras frecuencias pico en investigaciones futuras. Se eligen 6 intervalos de la misma dimensión entre ellos. La cantidad de intervalos seleccionados es considerada estadísticamente adecuada ya que la cantidad de espectros de energía que se analizan es de 47, menor que 50.

Por otra parte, a cada espectro que se clasifique como modelo 1 se le calcula su m_0 . Seguidamente, se procede a crear un espectro JONSWAP el cual presenta ese mismo valor de m_0 y con f_p igual a 0.0625 Hz.

De esta manera se crea un espectro que conserva el mismo pico de energía y su misma cantidad de energía. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 31:

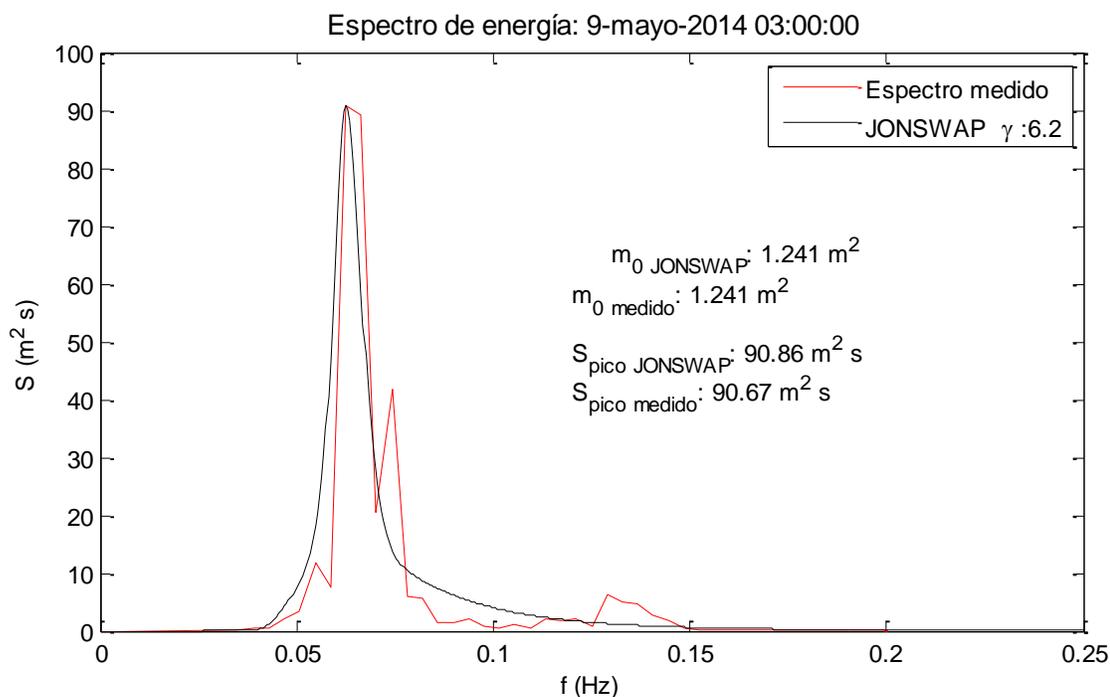


Figura 31. Ajuste de un espectro de densidad energética a una función de densidad energética JONSWAP.

Con base en la Figura 31, la función teórica JONSWAP utiliza un factor de ajuste γ de 7.1. El parámetro γ para este espectro unimodal se aproxima al resultado de γ igual a 7 para espectros unimodales registrados en el litoral Pacífico costarricense (López, 2016).

Como resultado de lo anterior, se selecciona un espectro que presente un ajuste adecuado entre el espectro unimodal medido y el espectro JONSWAP. La Figura 32 y el Cuadro 8 muestra el espectro seleccionado como representativo de los espectros de energía unimodal que son registrados.

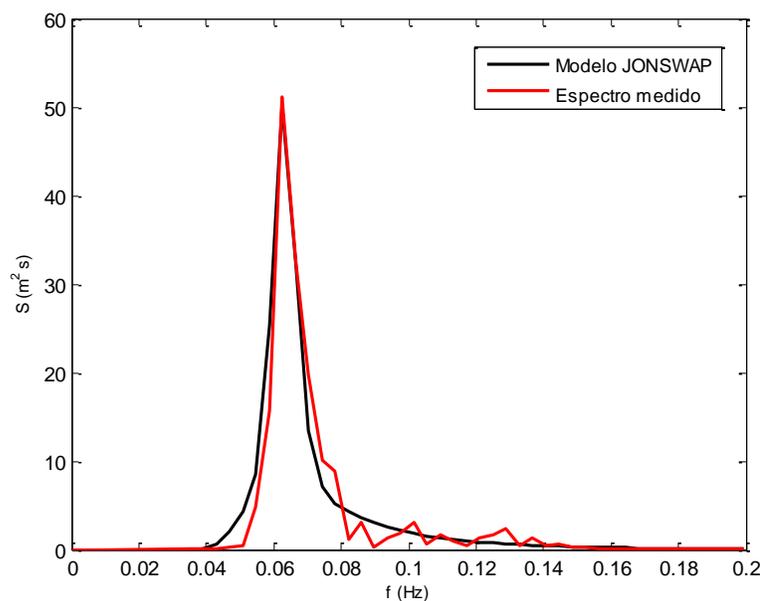


Figura 32. Espectro de energía seleccionado para la definición de los espectros sintéticos representativos del modelo 1.

Cuadro 8. Resultados de ajuste a funciones espectrales JONSWAP para espectros de energía unimodales.

Espectros modelo 1 (unimodal)	
f_p (Hz)	0.0625
m_0 medido (m^2)	0.6947
m_0 JONSWAP (m^2)	0.6947
γ	7.1
H_{m0} (m)	3.3373
R	0.946
Fecha:	11/05/2014
Hora:	03:00:00

En el caso de los espectros de energía bimodales la parametrización se basa en la suma de 2 espectros teóricos JONSWAP. Este procedimiento es similar al establecido por Guedes y Nolasco (1992), quienes también ajustaron a 2 espectros pero del tipo Pierson Moscowitz.

El proceso de parametrización de los espectros modelos 2 y 3 se desarrolla en dos pasos, el primero corresponde a la evaluación de las frecuencias f_i , f_{i+1} y f_{i-1} donde “i” indica el número de pico de energía en estudio y definido de la siguiente manera:

- f_1 : frecuencia asociada al S_1
- f_2 : frecuencia asociada al S_2
- f_{1-2} : frecuencia asociada a la menor energía entre los picos S_1 y S_2

En cuanto al valor del pico de la energía “S” se definen los siguientes términos:

- En el espectro modelo 2
 - S_1 : primer pico de energía
 - S_2 : segundo pico de energía
- En el espectro modelo 3
 - S_1 : segundo pico de energía
 - S_2 : primer pico de energía

Los términos descritos previamente aplicados en espectros de energía de modelo 2 y 3 se muestran de manera gráfica en la Figura 33.

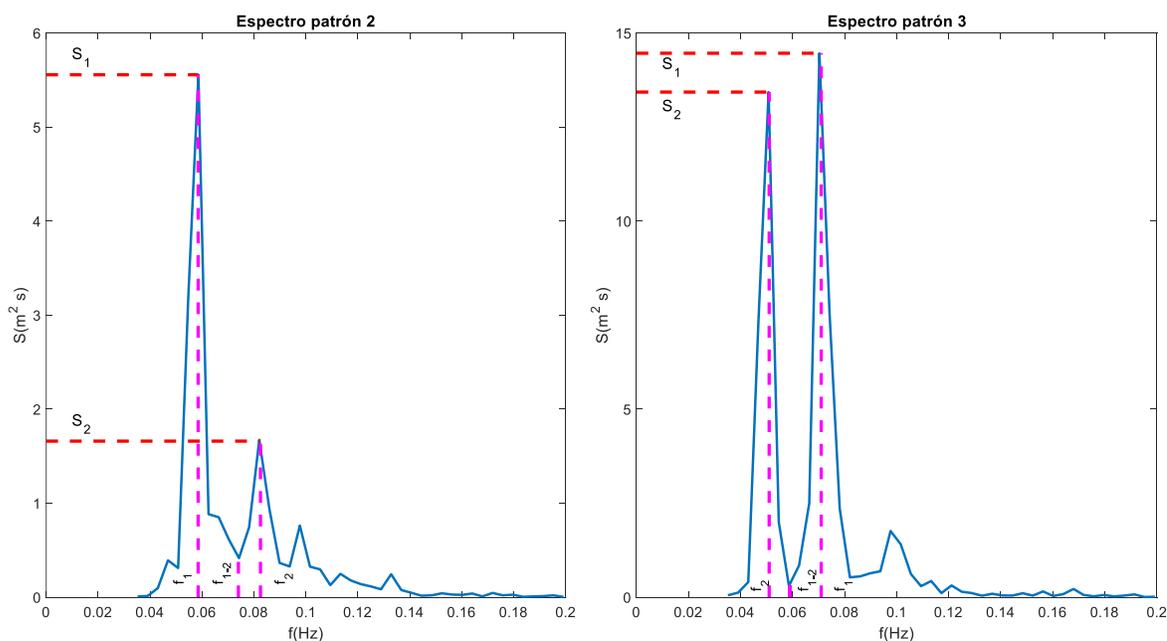


Figura 33. Definición de posiciones en espectros de energía bimodales

Ese primer paso localiza los valores de f_1 , f_{1-2} y f_2 de la totalidad de espectros de energía del modelo 2 y 3, para posteriormente estimar el promedio de cada uno de esos parámetros y por último encontrar un espectro de energía que se acerque lo máximo posible a esa condición promedio.

En el segundo paso se realiza una técnica de parametrización similar a la seguida por Guedes y Nolasco (1992). En este paso se superponen 2 espectros de energía teóricos JONSWAP para ajustar a un espectro bimodal. Cada espectro JONSWAP es ajustado mediante el parámetro de apuntamiento γ .

A continuación se describen detalladamente los dos pasos.

- Paso 1:

Primeramente, se localizan los valores de f_1 , f_2 y f_{1-2} para todos los espectros de energía analizados. Posteriormente se calcula el promedio de cada una de esas variables para todos los espectros y se selecciona el espectro de energía que presente las menores diferencias de f_1 , f_2 y f_{1-2} con respecto a los valores promedio. Para los modelos 2 y 3 los espectros seleccionados son el número 26 y el 12 respectivamente.

Lo descrito anteriormente se muestra de manera gráfica en la Figura 34 y en la Figura 35 para espectros de energía modelo 2 y modelo 3, respectivamente:

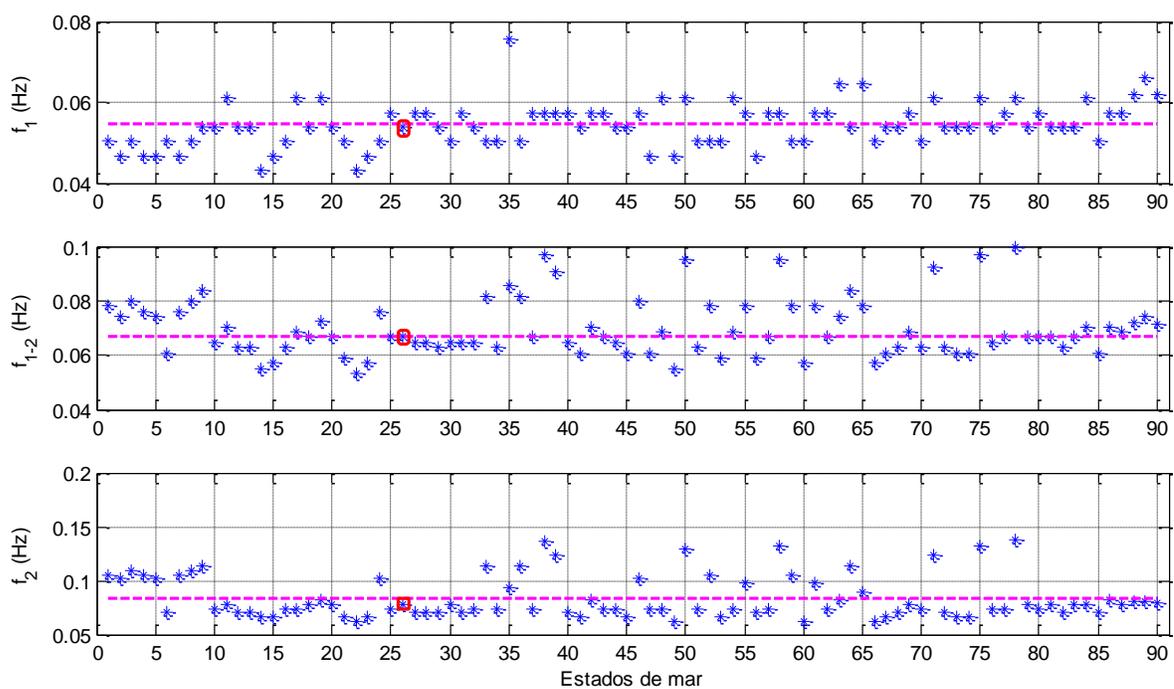


Figura 34. Determinación de las frecuencias pico para los espectros de energía que se ajustan al modelo 2.

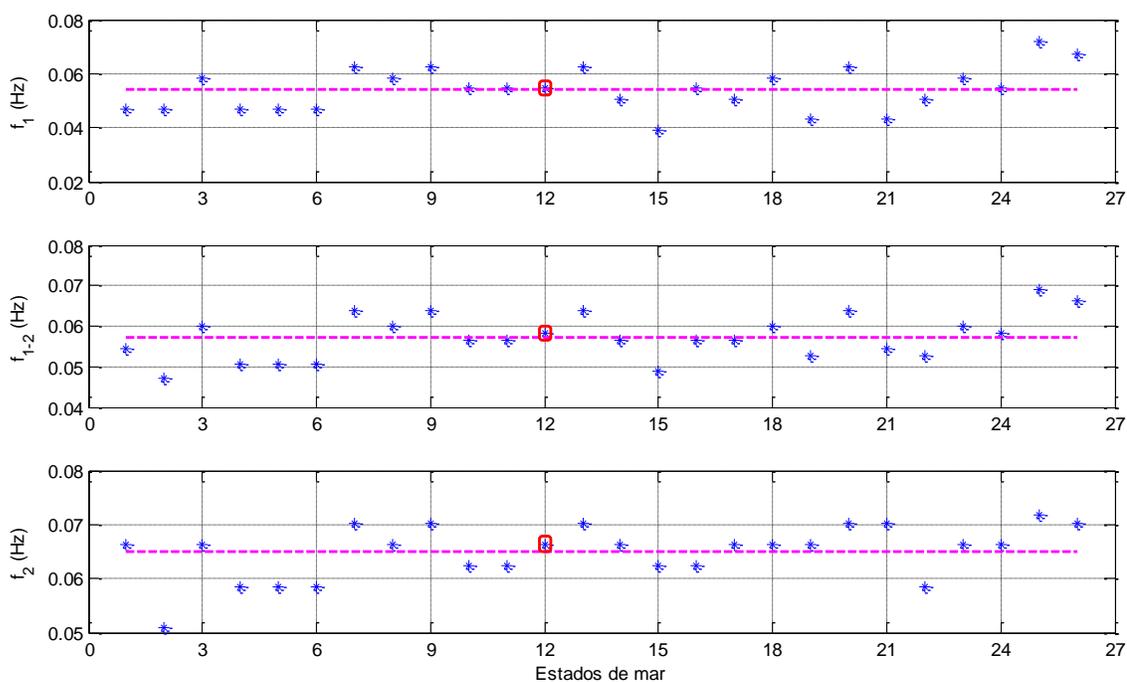


Figura 35. Determinación de las frecuencias pico para los espectros de energía que se ajustan al modelo 3.

El Cuadro 9 muestra los resultados de la estadística asociada a los valores de las frecuencias f_1 , f_{1-2} y f_2 presentadas en la Figura 34 y Figura 35.

Cuadro 9. Valores estadísticos de las frecuencias asociadas a los picos de energía de los espectros bimodales analizados.

Tipo de espectro de energía	Tipo 2			Tipo 3		
	f_1	f_{1-2}	f_2	f_1	f_{1-2}	f_2
Parámetro	f_1	f_{1-2}	f_2	f_1	f_{1-2}	f_2
Media aritmética (Hz)	0.0546	0.0685	0.0841	0.0542	0.0574	0.0651
Mediana (Hz)	0.0539	0.0653	0.0742	0.0547	0.0564	0.0664
Desviación estándar (Hz)	0.0055	0.0102	0.0195	0.0081	0.0056	0.0050

- Paso 2

Una vez seleccionados los espectros representativos de cada modelo, se leen los valores de f_1 y f_2 , así como el momento de orden $m_{0,i}$, donde el subíndice “i” toma el valor 1 si es el primer pico de energía o el valor 2 si corresponde al segundo pico de energía.

Se parte de la hipótesis de que la relación $m_{0,1}/m_{0,2}$ mantiene la misma proporción S_2/S_1 , es decir:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{m_{0,2}}{m_{0,1}} \quad (43)$$

Además, el m_0 del espectro de energía que se esté evaluando se puede considerar como la suma de los momentos de orden $m_{0,1}$ y $m_{0,2}$. Si se considera lo anterior y se utiliza el término $m_{0,2}$ despejado de la ecuación (43) se obtiene:

$$m_0 = m_{0,1} + \frac{S_2}{S_1} \cdot m_{0,1} \quad (44)$$

Despejando el término $m_{0,1}$ de la ecuación (44) se tiene:

$$m_{0,1} = \frac{m_0}{1 + \frac{S_2}{S_1}} \quad (45)$$

Por ende, el $m_{0,2}$ queda determinado por:

$$m_{0,2} = m_0 - m_{0,1} \quad (46)$$

Posteriormente, se estima la $H_{m_{0,i}}$, donde “i” se asocia a cada pico de energía, 1 para el primer pico y 2 para el segundo pico. La manera de calcular $H_{m_{0,i}}$ se muestra en la expresión (47):

$$H_{m_{0,i}} = 4.004\sqrt{m_{0,i}} \quad (47)$$

La ecuación (47) se fundamenta en que la forma del espectro de energía ajustado a cada pico es de banda estrecha, con lo cual se puede establecer que H_{m_0} es aproximadamente igual a la H_s (Silva, 2005).

Luego se aplica a cada uno de los picos la función JONSWAP (ver ecuación (23)). Para los parámetros de ajuste σ_a y σ_b que utiliza dicha función, se toman los valores 0.07 y 0.09 respectivamente, los cuales son establecidos como valores típicos (Alonso-Muñoyerro, 2005).

En cuanto al parámetro de apuntamiento γ , se utiliza como factor de ajuste, por lo que se aplica un procedimiento iterativo, barriendo valores que van desde 3 hasta 10 con un paso de 0.1, hasta obtener que la energía total del espectro medido sea igual a la energía total del espectro teórico (mismos m_0), y que la relación S_2/S_1 entre los espectros medidos y teóricos sea aproximadamente igual.

Como resultado de los procedimientos descritos se hallan las parametrizaciones de los espectros seleccionados para el espectro bimodal modelo 2 (Figura 36. A) y el espectro bimodal modelo 3 (Figura 36. B). Estos mismos resultados se muestran tabulados en el Cuadro 10.

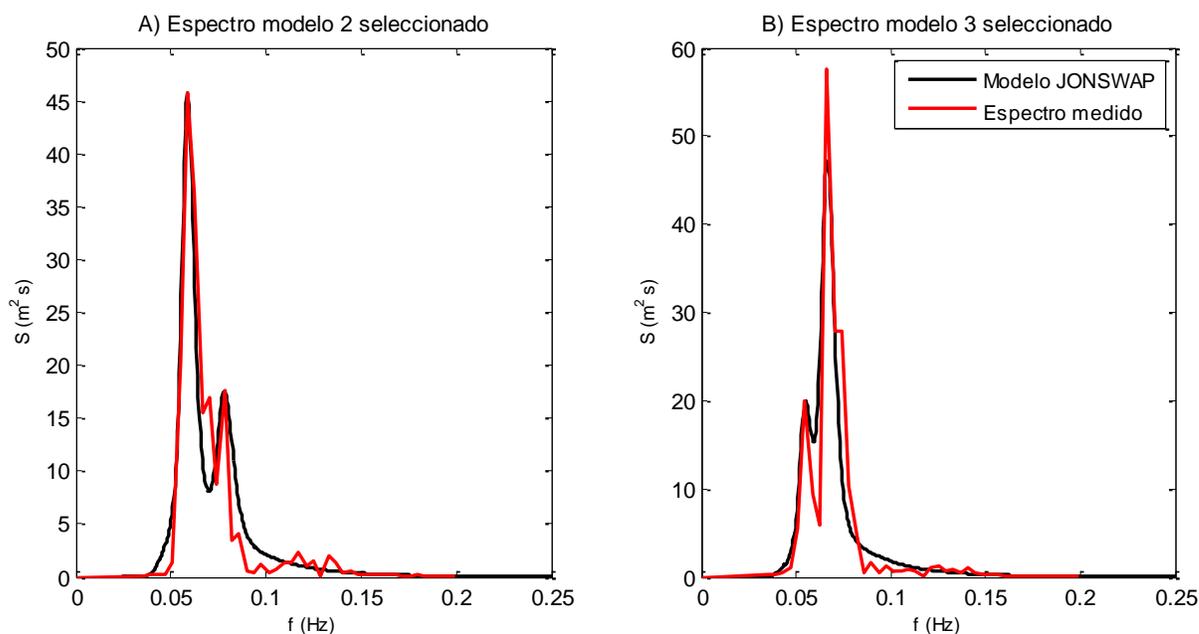


Figura 36. Espectros de energía seleccionados para la definición de los espectros sintéticos representativos de los modelos 2 y 3.

Cuadro 10. Resultados de ajuste a funciones espectrales JONSWAP para espectros de energía bimodales.

Espectro bimodal modelo 2		Espectro bimodal modelo 3	
f_1 (Hz)	0.0545	f_1 (Hz)	0.0468
f_2 (Hz)	0.0791	f_2 (Hz)	0.0602
f_{1-2} (Hz)	0.0703	f_{1-2} (Hz)	0.0517
S_2/S_1 medido	0.3854	S_2/S_1 medido	2.7279
S_2/S_1 sintético	0.3647	S_2/S_1 sintético	2.3906
γ_1	7.7	γ_1	7.9
γ_2	10	γ_2	10.8
H_{m0} medido (m)	3.5214	H_{m0} medido (m)	3.4834
H_{m0} sintético (m)	3.5214	H_{m0} sintético (m)	3.4834
R	0.8819	R	0.9062
Fecha:	10/05/2014	Fecha:	09/05/2014
Hora:	09:00:00	Hora:	12:00:00

3.3.5. Determinación de los espectros de energía normalizados

El siguiente paso de la metodología se basa en normalizar los espectros de energía de los tipos 1, 2 y 3. La normalización consiste en dividir cada punto del espectro de energía representativo por el cuadrado de la H_{m0} del espectro sintético.

Este paso descrito de forma matemática, indica que cada punto de densidad de energía (S) del espectro creado por la superposición de funciones JONSWAP se divide por el valor de la correspondiente H_{m0} elevado al cuadrado, de esa manera se puede construir un espectro normalizado, tal y como lo indica la relación (48):

$$S_{unitario} = \frac{S_{espectro\ i}}{(H_{m0})^2} \quad (48)$$

El subíndice “i” corresponde a cada punto que compone el espectro de energía.

En el caso de los espectros modelo 2 y 3, luego de establecer el espectro sintético bimodal, se divide entre la corresponde H_{m0} de dicho espectro y de esa forma se obtiene el espectro normalizado (ver Figura 37).

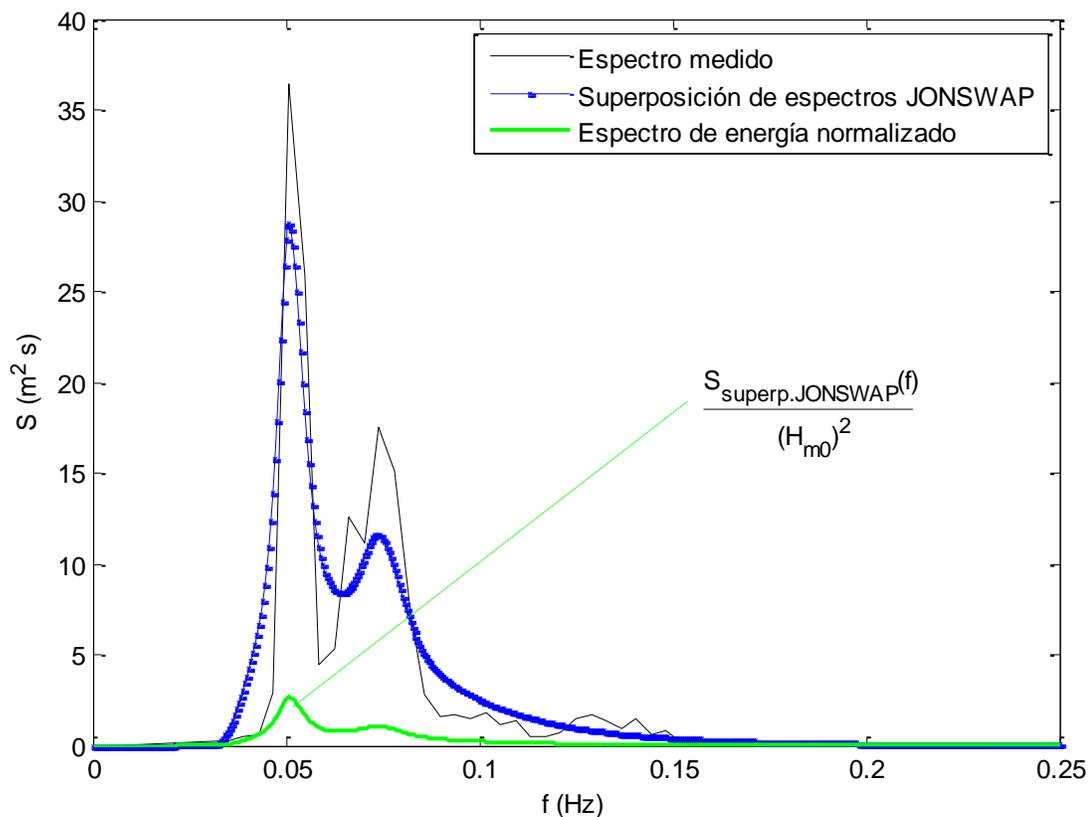


Figura 37. Determinación de un espectro normalizado de densidad energética

Por lo tanto, se ha producido un espectro de energía normalizado basados en una parametrización que toma en cuenta funciones de densidad espectral JONSWAP. Es importante mencionar que los espectros de energía normalizados son unitarios, o bien, el valor de H_{m0} de los espectros normalizados corresponden a 1.

Como resultado de aplicar los pasos de la metodología descrita en las secciones 3.3.2, 3.3.3 y 3.3.4, se determinan los espectros normalizados resultantes para los espectros de energía de los modelos 1, 2 y 3 tal y como se muestran en la Figura 38.

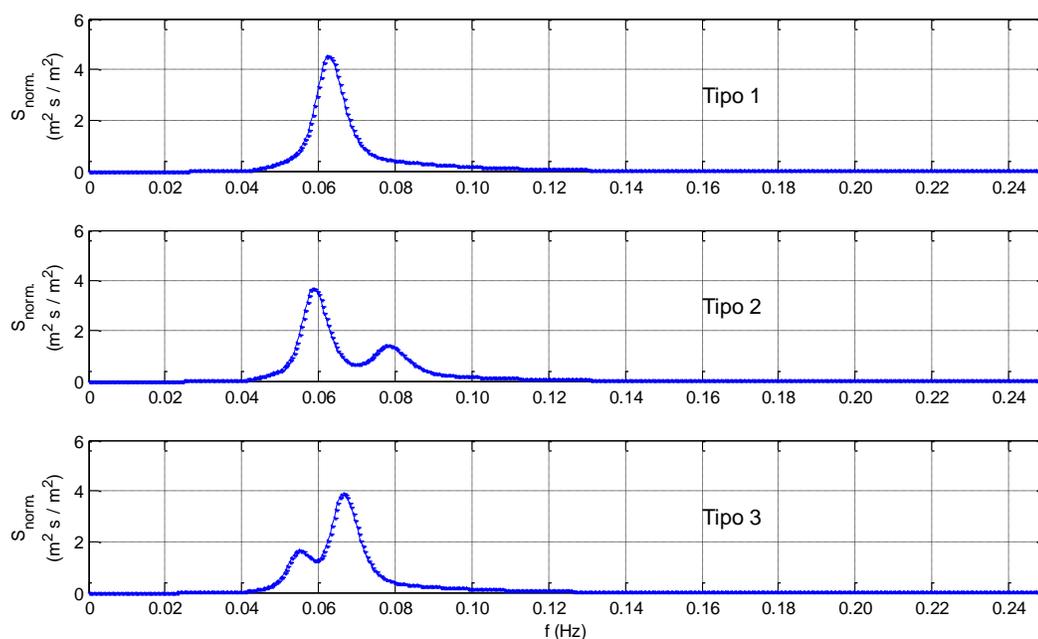


Figura 38. Espectros de energía normalizados por H_s de los espectros modelo 1, 2 y 3.

3.4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este capítulo se establecen las siguientes conclusiones:

- La dirección predominante del oleaje que arriba a las costas del litoral Pacífico de Costa Rica es sur-suroeste, en aproximadamente el 65 % del tiempo, y el restante 35 % el oleaje proviene del suroeste.
- El oleaje que arriba a las costas del Pacífico costarricense cuenta con más del 80 % de espectros de energía multimodales de acuerdo con los estados de mar registrados.
- Según los análisis visuales de los espectros de energía de la totalidad de estados de mar estudiados, se establece que el oleaje que arriba a las costas del Pacífico costarricense cuenta un alto porcentaje de oleaje multimodal: un 32.6 % corresponde a espectros de energía tipo 2 y un 10.9 % corresponde a un oleaje con espectros de energía tipo 3.

El espectro de energía tipo 4 presenta una ocurrencia de un 15.9 %; un 3.6 % de los estados de mar registrados son de espectros de energía tipo 5; un 19.1 % corresponde a un oleaje del espectro tipo 6; y oleaje con espectros de más de 3 picos presentan una ocurrencia del 0.4 %. Durante el periodo de mediciones de oleaje se encontró que un 17.4 % corresponde a oleaje cuyos espectros son unimodales.

- Para los estados de mar que superan el umbral del 98 % de probabilidad de excedencia de H_{m0} , existe una importante presencia de espectros frecuenciales de energía bimodales, que se aproximan a 58 %, mientras que un 23.5 % corresponde a espectros de energía unimodales.
- Con base en la clasificación visual de la totalidad de espectros y los que supera el umbral de H_{m0} asociados al 98 % de probabilidad de excedencia, se encontró que existe la predominancia de los modelos 1, 2 y 3.

4. Cálculo de Run up y Run down

4.1. Introducción

Debido a las condiciones particulares de oleaje, específicamente en cuanto a su distribución energética es importante evaluar las formulaciones de diseño funcional que se encuentran en la literatura y que son de uso frecuente, independientemente de las particularidades del oleaje.

Actualmente existen dos métodos para aproximar la interacción entre el oleaje y las estructuras, una es el modelado físico y el otro son las aproximaciones numéricas. Los modelos numéricos son herramientas de fácil uso que, a través de esquemas matemáticos y análisis numérico, permiten reproducir un fenómeno o evento. No obstante, las formulaciones matemáticas llevan consigo una serie de simplificaciones, por lo que no se reproduce el fenómeno de forma exacta tal y como ocurre en la realidad.

Otras herramientas utilizadas para lograr comprender un fenómeno son los modelos físicos, los cuales suelen ser modelos de mayor complejidad, costo económico y tiempos de cálculo. Los modelos físicos reproducen un evento físico real como el oleaje en escalas menores sin establecer simplificaciones como las que se utilizan en los modelos numéricos. No obstante, al igual que con el modelado numérico, el modelado físico siempre presenta algunas diferencias respecto del fenómeno reproducido.

Ciertas condiciones de oleaje generadas en el modelo físico pueden resultar de baja representatividad si no se tiene la instrumentación y tecnología adecuada para la generación de oleaje.

Sumado a lo anterior, un fenómeno puede ser evaluado por un modelo numérico o matemático, o bien, contrastando las mediciones en el ensayo con mediciones realizadas en la realidad del prototipo

La construcción de un modelo físico es un proceso al que se le debe prestar atención en cuanto a las características de materiales utilizados, las dimensiones del modelo, el control de variables que interfieren como, por ejemplo, el viento, la temperatura, el estado del agua que se utiliza, entre otros.

Cualquier cambio en los anteriores parámetros generaría cambios en las semejanzas entre el modelo y el prototipo, lo que significa una fuente de error en la ejecución del modelo.

En este trabajo interesa determinar los parámetros de ascenso y descenso máximos para unas condiciones de oleaje determinadas. Por lo tanto, se puede utilizar un modelo físico para representar el prototipo, siempre y cuando se mantengan ciertas semejanzas entre el prototipo y el modelo, como lo son la semejanza geométrica y la cinemática.

Los espectros de energía representativos resultantes del análisis presentado en el capítulo 3 son retomados en este apartado para ser reproducidos bajo una escala determinada. El objetivo principal consiste en evaluar el R_u y R_d sobre un modelo físico de rompeolas en talud y su posterior comparación con los cálculos de las ecuaciones de diseño funcional.

4.2. Desarrollo metodológico

La Figura 39 muestra un esquema de la metodología a seguir en este capítulo:

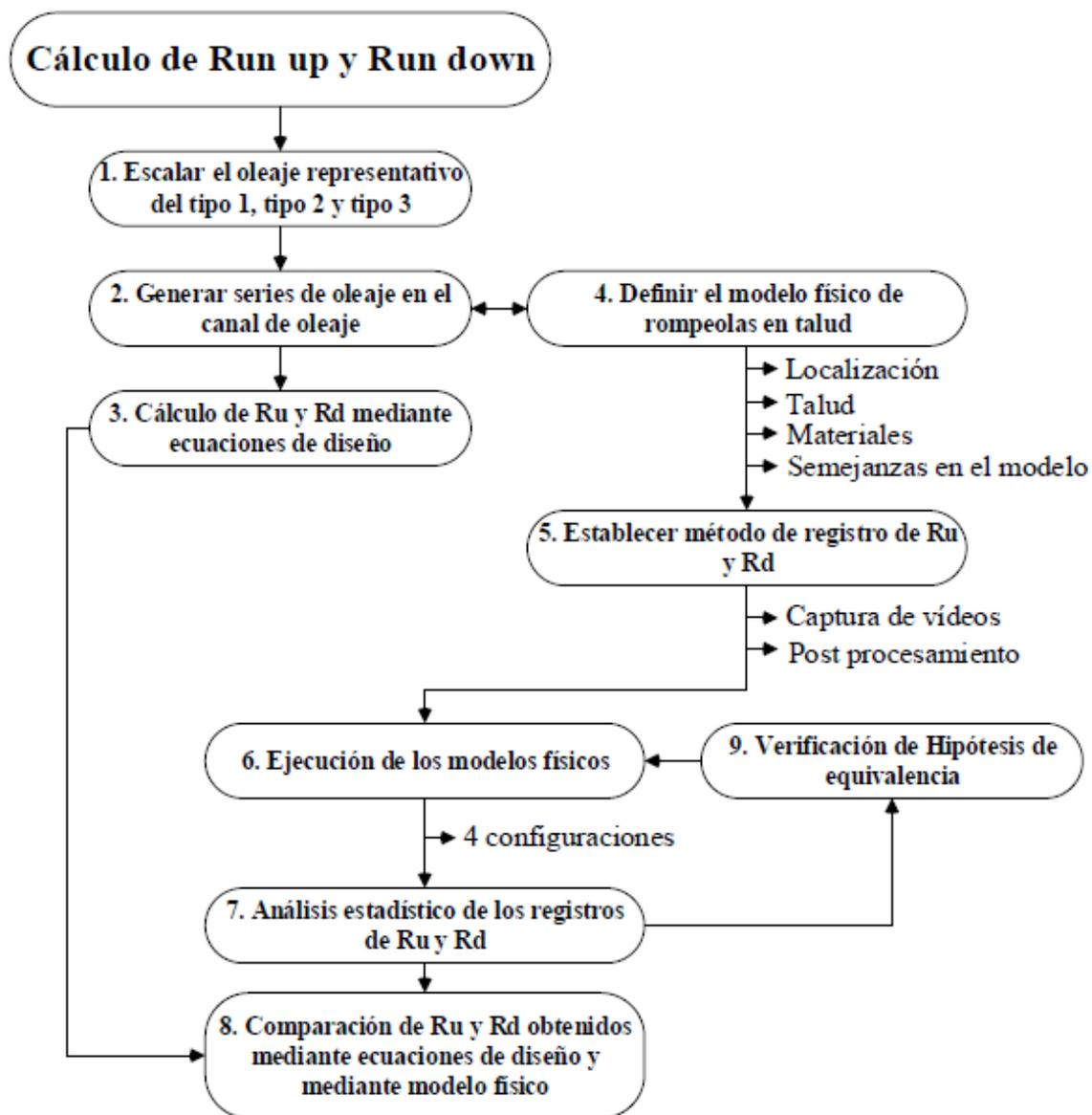


Figura 39. Esquema del desarrollo metodológico.

A continuación se realiza una descripción del proceso metodológico mostrado previamente.

4.3. Generación de las series de oleaje a reproducir en el canal unidireccional de oleaje

En este apartado se describe el procedimiento llevado a cabo para generar las tres series de oleaje que se utilizan en los experimentos en el modelo físico y cuyas distribuciones de energía se ajustan a las formas de los espectros de energía representativos que fueron determinados en el capítulo 3.

Se inicia con la determinación del factor de agrupamiento (GF) que se asigna a los espectros de energía representativos. El factor de agrupamiento se obtiene por medio del software AwaSys 7 que controla la pala de generación de oleaje, al introducir las 200 series temporales de superficie libre medidas en campo y correspondientes a los estados de mar cuyos H_{m0} presentan una probabilidad de excedencia superior al 98 %.

AwaSys en su versión 7, es el software que pone en marcha el funcionamiento de la pala de generación de oleaje. Este programa computacional fue desarrollado por un grupo de investigadores del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Costera de la Universidad de Aalborg en Dinamarca.

La Figura 40 muestra los valores de GF para los 200 estados de mar antes citados, así como el valor promedio que se estima en 0.95 y una desviación estándar de 0.12. Este valor promedio es el que se utiliza para asignarlo a los 3 espectro de energía modelo y reproducirlos en el laboratorio.

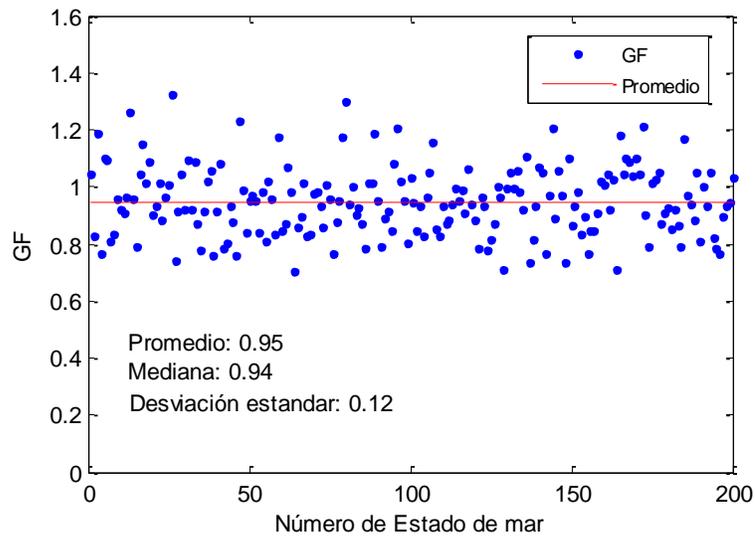


Figura 40. GF para estados de mar que superan el umbral $H_{m0\ 98\ \%}$

El software para la generación de oleaje utiliza un modelo de correlación de fases φ para hallar dicho agrupamiento para lograr producir la serie de superficie libre deseada bajo el agrupamiento requerido ($GF=0.95$). La expresión gobernante es la siguiente:

$$\varphi_{i+1} = C \cdot \varphi_i + (1 + C) \cdot r - k \cdot x \quad (49)$$

donde

C : coeficiente de agrupamiento (Lykke, Meinert, & Frigaard, 2018).

k : número de onda calculado mediante teoría lineal, considerando una profundidad de agua constante en el canal.

x : distancia desde la pala de generación de oleaje hasta el punto de agrupamiento deseado del oleaje.

i : contador de olas

r : número semilla aleatorio para estimar un factor de agrupamiento.

Para los tres espectros representativos que se produjeron en el laboratorio se realizó un proceso de evaluación de números semilla “ r ” para generar GF que se ajusten el valor promedio de GF de los 200 GF registrados en el litoral Pacífico de Costa Rica.

A partir de los espectros de energía de los tipos representativos de oleaje en conjunto con el valor de GF; se generaron series de superficie libre mediante el software AwaSys 7.

Para cada uno de los 3 espectros de energía modelo que se produjeron en el laboratorio, se realizó un proceso iterativo de generación de series de superficie libre, cuyo valor de número semilla se almacena en conjunto con el valor de GF, hasta obtener un valor de GF de 0.948, 0.949 y 0.952, bajo los oleajes representativo tipo 1, tipo 2 y tipo 3, respectivamente. Sobre estas pruebas se amplía más en la sección 4.5.1.2.

Otro aspecto importante es la determinación del intervalo de tiempo que dura cada experimento. De acuerdo con los estados de mar medidos en campo, se observó que de 85 a 89 olas fueron registradas en estados de mar con un período T_z de 11.51 s en promedio.

Por lo tanto, al trasladar el período de 11.51 s a una escala de 1:60 mediante la ecuación (42) se obtuvo que el período en el modelo es aproximadamente 1.48 s. Se propuso un intervalo de tiempo de 25 minutos para cada experimento, es decir, 1500 s. A partir de una extrapolación se estimó que, en los 1500 s, si todas las olas tuviesen períodos de 1.48 s, se podrían obtener un aproximado de 1009 olas.

Sin embargo, como lo que se reproduce en el laboratorio es oleaje irregular, los períodos T_z de las olas presentaron mayor variabilidad y como resultados de los registros de superficie libre se contabilizaron entre 844 y 729 olas, según el tipo de oleaje representativo. Esas cantidades de olas son consideradas adecuadas para obtener estadísticos del oleaje que requieren las ecuaciones de diseño funcional de rompeolas.

Finalmente, en el Cuadro 11 se muestran los resultados de los parámetros del oleaje para los 3 modelos que se reproducen en la pala del canal de oleaje.

Cuadro 11. Parámetros de oleaje resultantes de las series de oleaje representativas.

Parámetro	Tipo de oleaje representativo		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Tiempo (s)	1500	1500	1500
No. Olas	840	844	729
h (m)	13.08 (0.218)	13.08 (0.218)	13.08 (0.218)
H _m (m)	1.80 (0.030)	2.04 (0.034)	1.98 (0.033)
T _m (s)	11.52 (1.487)	11.74 (1.506)	11.74(1.516)
H _s (m)	3.27 (0.054)	3.27 (0.054)	3.26 (0.054)
T _{H1/3} (s)	16.52 (2.133)	15.43 (1.992)	17.82 (2.301)
H _{max} (m)	5.40 (0.090)	6.36 (0.106)	5.82 (0.097)
H _{1%} (m)	4.14 (0.069)	4.92 (0.082)	4.38 (0.073)
H _{2%} (m)	3.78 (0.063)	4.14 (0.069)	4.02 (0.067)
H _{5%} (m)	3.36 (0.056)	3.78 (0.063)	3.60 (0.060)
H _{10%} (m)	2.94 (0.049)	3.30 (0.055)	3.18 (0.053)
H _{1/100} (m)	4.62 (0.077)	5.52 (0.092)	4.98 (0.083)
H _{1/500} (m)	5.16 (0.086)	6.24 (0.104)	5.82 (0.097)
H _{rms} (m)	2.28 (0.038)	2.58 (0.043)	2.46 (0.041)
H _{m0} (m)	3.40 (0.057)	3.40 (0.057)	3.40 (0.057)
T _p (s)	17.63 (2.276)	15.48 (1.998)	17.15 (2.214)
T ₀₁ (s)	14.93 (1.928)	14.21 (1.835)	16.29 (2.103)
T _{m-1,0} (s)	15.97 (2.062)	14.95 (1.930)	17.35 (2.240)
T ₀₂ (s)	14.33 (1.85)	13.71 (1.770)	15.62 (2.016)
GF	0.948	0.949	0.952

Nota: Entre paréntesis se muestran los valores a escala 1:60, medidos en laboratorio.

4.4. Cálculo de Run up y Run down mediante ecuaciones de diseño

En este apartado se muestran los resultados de aplicar las ecuaciones de diseño de Losada Giménez Curto (1981), Van Der Meer (1992) y EurOtop (2018), junto con los tres tipos de oleaje mostrados en el Cuadro 11 en las 4 configuraciones de rompeolas propuestas. Los resultados mostrados corresponden a valores prototipos.

Los Cuadro 12 y Cuadro 13 presentan los resultados del cálculo de Ru y Rd para la configuración de rompeolas con pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de cubos.

Cuadro 12. Resultados de cálculo de Ru bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de cubos.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	Hs (m)	3.267	Hs (m)	3.290	Hs (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.430	T _{H1/3} (s)	17.824
	Ru_s (m)	3.329	Ru_s (m)	3.354	Ru_s (m)	3.348
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.820
	Ru_{max} (m)	5.670	Ru_m (m)	6.678	Ru_m (m)	6.111
Van Der Meer	H _{10 %} (m)	2.940	H _{10 %} (m)	3.300	H _{10 %} (m)	3.180
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{10 %} (m)	5.562	Ru_{10 %} (m)	5.958	Ru_{10 %} (m)	6.150
	H _{5 %} (m)	3.360	H _{5 %} (m)	3.780	H _{5 %} (m)	3.600
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{5 %} (m)	7.128	Ru_{5 %} (m)	7.626	Ru_{5 %} (m)	7.830
	H _{2 %} (m)	3.780	H _{2 %} (m)	4.140	H _{2 %} (m)	4.020
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{2 %} (m)	8.982	Ru_{2 %} (m)	9.396	Ru_{2 %} (m)	9.822
	H _{1 %} (m)	4.140	H _{1 %} (m)	4.920	H _{1 %} (m)	4.380
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{1 %} (m)	10.518	Ru_{1 %} (m)	11.682	Ru_{1 %} (m)	11.472
EurOtop 2018	Hm ₀ (m)	3.360	Hm ₀ (m)	3.449	Hm ₀ (m)	3.416
	Tm ₁₋₀ (s)	15.972	Tm ₁₋₀ (s)	14.950	Tm ₁₋₀ (s)	17.351
	Ru_{2 %} (m)	12.072	Ru_{2 %} (m)	11.400	Ru_{2 %} (m)	13.230

Cuadro 13. Resultados de cálculo de Rd bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de cubos.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	H _s (m)	3.267	H _s (m)	3.290	H _s (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.430	T _{H1/3} (s)	17.823
	Rd_s (m)	-2.124	Ru_s (m)	-2.094	Ru_s (m)	-2.154
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.820
	Rd_{max} (m)	-3.888	Rd_{max} (m)	-4.579	Rd_{max} (m)	-4.190

El Cuadro 14 y el Cuadro 15 muestran los resultados de los cálculos tanto de Ru como Rd, respectivamente. La información mostrada en dichos cuadros corresponde a una configuración de rompeolas bajo una pendiente de talud 1V:2H con una coraza hecha de rocas.

Cuadro 14. Resultados de cálculo de Ru bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de rocas.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	Hs (m)	3.267	Hs (m)	3.290	Hs (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.430	T _{H1/3} (s)	17.823
	Ru_s (m)	5.412	Ru_s (m)	5.376	Ru_s (m)	5.490
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.8200
	Ru_{max} (m)	9.720	Ru_m (m)	11.448	Ru_m (m)	10.476
Van Der Meer	H _{10 %} (m)	2.940	H _{10 %} (m)	3.300	H _{10 %} (m)	3.180
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{10 %} (m)	5.562	Ru_{10 %} (m)	5.958	Ru_{10 %} (m)	6.150
	H _{5 %} (m)	3.360	H _{5 %} (m)	3.780	H _{5 %} (m)	3.600
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{5 %} (m)	7.128	Ru_{5 %} (m)	7.626	Ru_{5 %} (m)	7.830
	H _{2 %} (m)	3.780	H _{2 %} (m)	4.140	H _{2 %} (m)	4.020
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{2 %} (m)	8.982	Ru_{2 %} (m)	9.396	Ru_{2 %} (m)	9.822
	H _{1 %} (m)	4.140	H _{1 %} (m)	4.920	H _{1 %} (m)	4.380
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{1 %} (m)	10.518	Ru_{1 %} (m)	11.682	Ru_{1 %} (m)	11.472
EurOtop 2018	Hm ₀ (m)	3.360	Hm ₀ (m)	3.449	Hm ₀ (m)	3.416
	Tm ₁₋₀ (s)	15.972	Tm ₁₋₀ (s)	14.950	Tm ₁₋₀ (s)	17.351
	Ru_{2 %} (m)	12.072	Ru_{2 %} (m)	11.400	Ru_{2 %} (m)	13.230

Cuadro 15. Resultados de cálculo de Rd bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2H y con coraza hecha de rocas.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	Hs (m)	3.267	Hs (m)	3.290	Hs (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.430	T _{H1/3} (s)	17.823
	Rd_s (m)	-2.928	Ru_s (m)	-2.850	Ru_s (m)	-3.006
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.8200
	Rd_{max} (m)	-5.940	Rd_{max} (m)	-6.996	Rd_{max} (m)	-6.402

Los cálculos de los estadísticos de Ru y Rd para la configuración de rompeolas con pendiente de talud 1V:2.5H con una coraza de cubos se muestran en el Cuadro 16 y en el Cuadro 17, respectivamente.

Cuadro 16. Resultados de cálculo de Ru bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de cubos.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	H _s (m)	3.267	H _s (m)	3.290	H _s (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.430	T _{H1/3} (s)	17.823
	Ru_s (m)	3.246	Ru_s (m)	3.264	Ru_s (m)	3.276
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.8200
	Ru_{max} (m)	5.670	Ru_m (m)	6.678	Ru_m (m)	6.111
Van Der Meer	H _{10%} (m)	2.940	H _{10%} (m)	3.300	H _{10%} (m)	3.180
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{10%} (m)	5.064	Ru_{10%} (m)	5.424	Ru_{10%} (m)	5.998
	H _{5%} (m)	3.360	H _{5%} (m)	3.780	H _{5%} (m)	3.600
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{5%} (m)	6.462	Ru_{5%} (m)	6.918	Ru_{5%} (m)	7.098
	H _{2%} (m)	3.780	H _{2%} (m)	4.140	H _{2%} (m)	4.020
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{2%} (m)	8.106	Ru_{2%} (m)	8.478	Ru_{2%} (m)	8.862
	H _{1%} (m)	4.140	H _{1%} (m)	4.920	H _{1%} (m)	4.380
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.741	T _m (s)	15.902
	Ru_{1%} (m)	9.450	Ru_{1%} (m)	10.494	Ru_{1%} (m)	10.308
EurOtop 2018	Hm ₀ (m)	3.360	Hm ₀ (m)	3.449	Hm ₀ (m)	3.416
	Tm ₁₋₀ (s)	15.972	Tm ₁₋₀ (s)	14.950	Tm ₁₋₀ (s)	17.351
	Ru_{2%} (m)	9.654	Ru_{2%} (m)	9.120	Ru_{2%} (m)	10.584

Cuadro 17. Resultados de cálculo de Rd bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de cubos.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	H _s (m)	3.267	H _s (m)	3.290	H _s (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.430	T _{H1/3} (s)	17.823
	Rd_s (m)	-1.992	Ru_s (m)	-1.974	Ru_s (m)	-2.040
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.820
	Rd_{max} (m)	-3.888	Rd_{max} (m)	-4.579	Rd_{max} (m)	-4.190

En cuanto a la utilización de las ecuaciones de cálculo de los estadísticos de diseño de Ru y Rd, se realizan los cálculos para la configuración de rompeolas con una coraza hecha de rocas y con una pendiente de talud 1V:2.5H. Los resultados se muestran en el Cuadro 18 y en el Cuadro 19.

Cuadro 18. Resultados de cálculo de Ru bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de rocas.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	Hs (m)	3.267	Hs (m)	3.2902	Hs (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.4300	T _{H1/3} (s)	17.824
	Ru_s (m)	5.124	Ru_s (m)	5.0940	Ru_s (m)	5.232
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.820
	Ru_{max} (m)	9.720	Ru_m (m)	11.448	Ru_m (m)	10.476
Van Der Meer	H _{10%} (m)	2.940	H _{10%} (m)	3.3000	H _{10%} (m)	3.180
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.7413	T _m (s)	15.902
	Ru_{10%} (m)	5.064	Ru_{10%} (m)	5.4240	Ru_{10%} (m)	5.998
	H _{5%} (m)	3.360	H _{5%} (m)	3.7800	H _{5%} (m)	3.600
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.7413	T _m (s)	15.902
	Ru_{5%} (m)	6.462	Ru_{5%} (m)	6.9180	Ru_{5%} (m)	7.098
	H _{2%} (m)	3.780	H _{2%} (m)	4.1400	H _{2%} (m)	4.020
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.7413	T _m (s)	15.902
	Ru_{2%} (m)	8.106	Ru_{2%} (m)	8.4780	Ru_{2%} (m)	8.862
	H _{1%} (m)	4.140	H _{1%} (m)	4.9200	H _{1%} (m)	4.380
	T _m (s)	14.516	T _m (s)	13.7413	T _m (s)	15.902
	Ru_{1%} (m)	9.450	Ru_{1%} (m)	10.4940	Ru_{1%} (m)	10.308
EurOtop 2018	Hm ₀ (m)	3.360	Hm ₀ (m)	3.4488	Hm ₀ (m)	3.416
	Tm ₁₋₀ (s)	15.972	Tm ₁₋₀ (s)	14.9497	Tm ₁₋₀ (s)	17.351
	Ru_{2%} (m)	9.654	Ru_{2%} (m)	9.1200	Ru_{2%} (m)	10.584

Cuadro 19. Resultados de cálculo de Ru bajo los tres tipos de oleaje representativo, bajo una pendiente de talud 1V:2.5H y con coraza hecha de rocas.

Tipo de oleaje	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Losada y Giménez C.	Hs (m)	3.267	Hs (m)	3.290	Hs (m)	3.249
	T _{H1/3} (s)	16.522	T _{H1/3} (s)	15.430	T _{H1/3} (s)	17.823
	Rd_s (m)	-2.664	Rd_s (m)	-2.616	Rd_s (m)	-2.754
	H _{max} (m)	5.400	H _{max} (m)	6.360	H _{max} (m)	5.8200
	Rd_{max} (m)	-5.940	Rd_{max} (m)	-6.996	Rd_{max} (m)	-6.402

4.5. Cálculo experimental del Run up y Run down

4.5.1. Descripción del modelado físico

Existen varios aspectos que se consideraron para la ejecución del modelo físico de rompeolas en talud. El entorno en donde se realiza el modelo físico, la generación del oleaje representativo a escala, la construcción de la estructura del rompeolas en talud, y el registro de las variables de diseño funcional de rompeolas son las principales consideraciones que tomaron en cuenta. A continuación se detalla cada una de ellas.

4.5.1.1. Descripción del canal unidireccional de oleaje

El canal donde se realizaron los experimentos presenta un ancho de 30 cm, un alto de 50 cm, y un largo de 10 m. En uno de sus extremos contiene una pala generadora de oleaje que cubre toda la sección transversal de canal por donde circula el oleaje producido.

La Figura 41 muestra las dimensiones del canal de oleaje, mientras que la Figura 42 presenta una fotografía del canal.

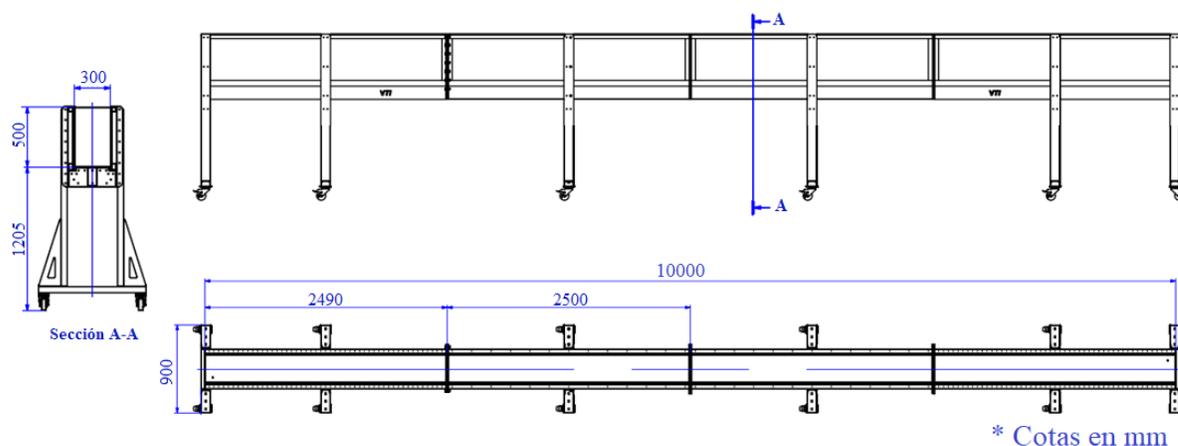


Figura 41. Representación esquemática del canal de oleaje unidimensional.

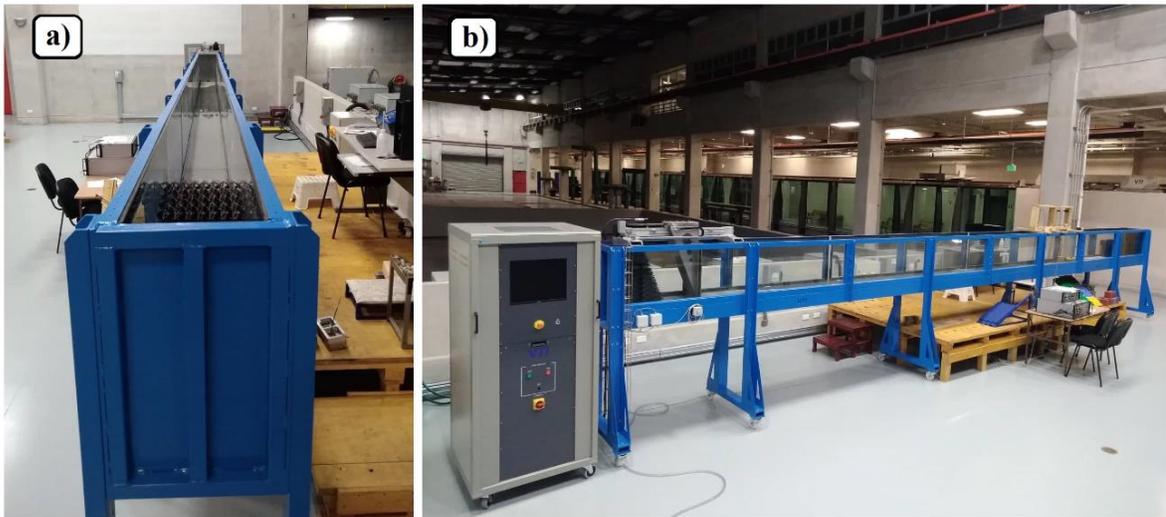
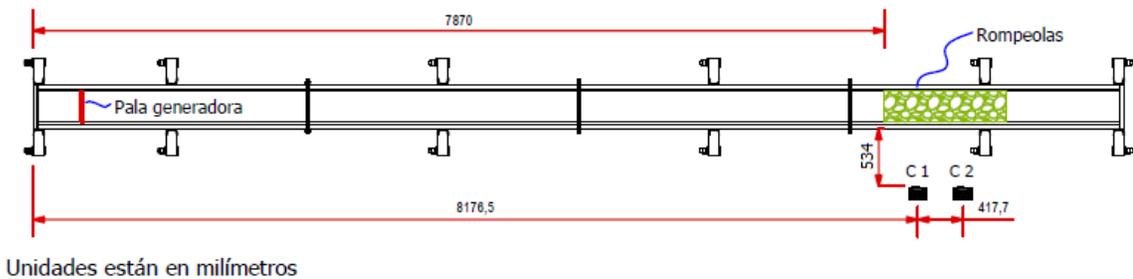


Figura 42. Fotografía del canal de oleaje: a) sección transversal, b) panorámica.

Por otra parte, la colocación de la instrumentación del modelo físico se muestra a manera de esquema en la Figura 43.



C 1: cámara 1, registro de run down

C 2: cámara 2, registro de run up

Figura 43. Montaje del modelo físico.

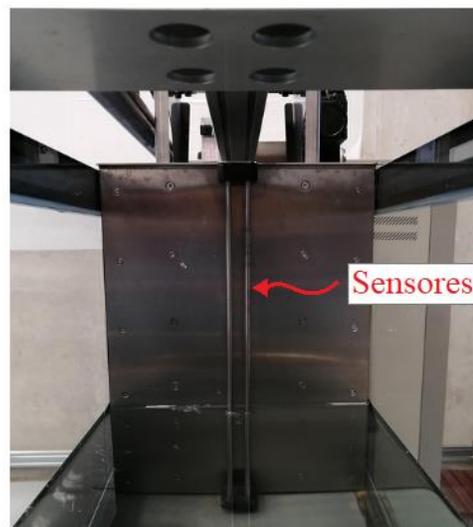
4.5.1.2. Generación del oleaje

La pala de generación de oleaje presenta la capacidad de reproducir oleaje del tipo regular o irregular. El mecanismo de generación de oleaje cuenta con una tecnología que permite que la pala absorba el oleaje reflejado hacia la pala de generación, en caso de que así se configure en el software AwaSys 7.

El oleaje que se desea reproducir es generado por el software controlador de la pala de generación del oleaje. La pala de generación cuenta con un sensor de nivel de superficie libre que registra el voltaje, (en voltios), cuya función es registrar variaciones de superficie libre del agua respecto al oleaje programado a generar, y así estimar cuanto oleaje se está reflejando. Previo a registrar la variación de superficie libre η , es necesario calibrar el sensor; lo cual para este experimento se realiza a través del mismo software.



Vista lateral



Vista frontal

Figura 44. Sensores de voltaje de la pala de generación de oleaje.

Tal y como se describió en la sección 3.3.5., el oleaje que se reprodujo en el modelo físico se planteó con base en los modelos de energía. En relación con lo anterior, se verificó la capacidad de la pala de generación, mediante las curvas de rendimiento (ver Figura 45 y Figura 46), para generar ese tipo de oleaje específico.

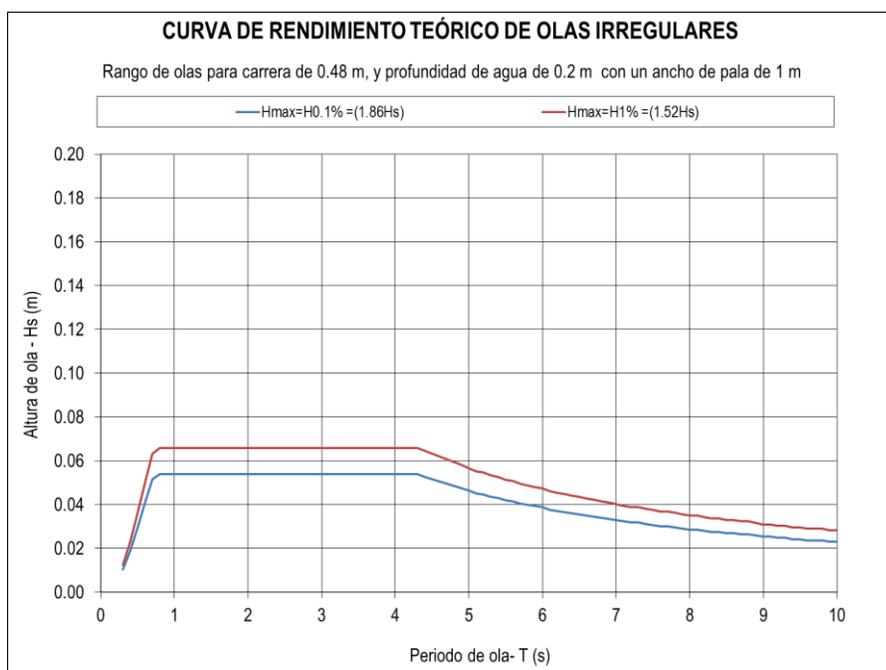


Figura 45. Curva de rendimiento del canal unidireccional, bajo un calado de 0.2 m.

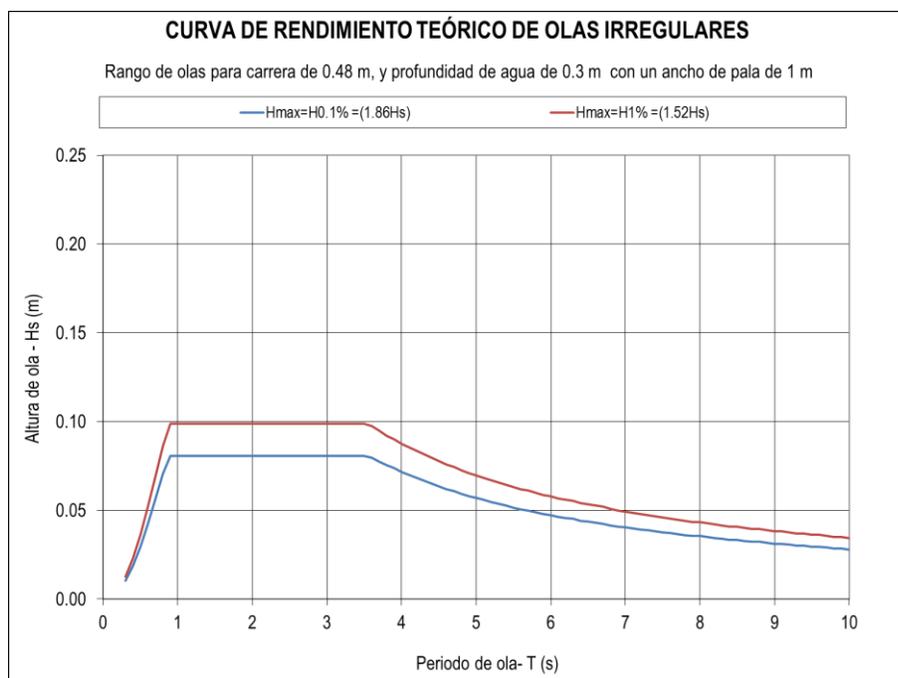


Figura 46. Curva de rendimiento del canal unidireccional, bajo un calado de 0.3 m.

De acuerdo con las figuras anteriores, las alturas de ola en combinación con los períodos de las olas de los registros de oleaje irregular se lograron recrear sin ningún problema tanto para la profundidad de 0.2 m como 0.3 m, por lo tanto para 0.218 m las combinaciones período y alturas de ola que han sido utilizadas se han generado de forma exitosa.

Se corroboró que la profundidad del agua no produjera rotura del oleaje antes de incidir en la estructura. Se consideraron los criterios de rotura de las olas de Miche y el criterio de rotura de olas de Le Méhauté y Koh, mencionados en Sierra J. & Lo Presti A. (1998).

En la Figura 47 se muestran los espectros de energía ingresados como información de entrada al software que controla la generación de oleaje (en color azul), mientras que en color negro se muestran los espectros que reprodujo la pala de generación de oleaje, bajos los tres tipos de típicos del litoral Pacífico obtenidos en el apartado 3.3.4 de este trabajo.

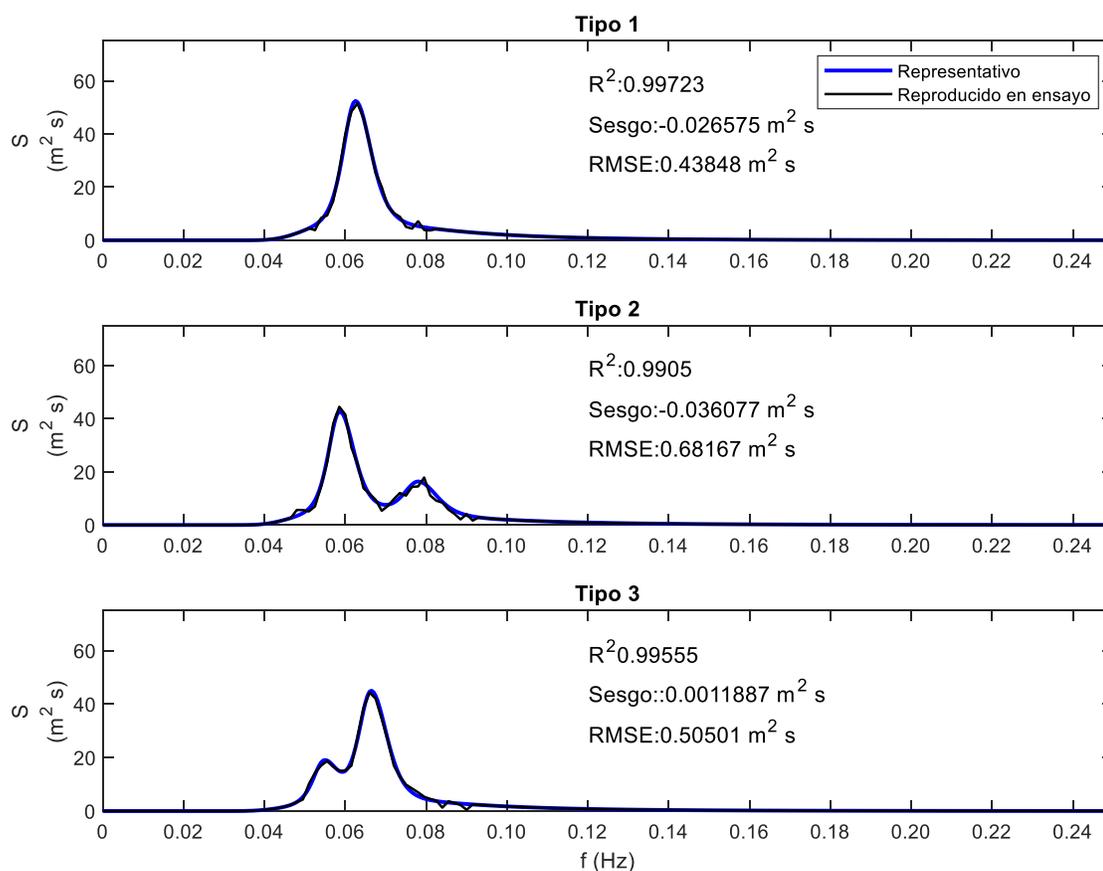


Figura 47. Espectros de densidad energética producidos por el generador de oleaje.

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, se observa que existen diferencias entre los tres espectros de energía del oleaje representativo y el oleaje reproducido en el laboratorio; sin embargo, se encontró que dichas diferencias son mínimas y que se puede observar en el coeficiente de determinación R^2 . Por lo tanto se estaría reproduciendo la misma energía en cada uno de los tipos de espectro.

4.5.1.3. Descripción del modelado físico a escala de rompeolas en talud

La escogencia de la escala se basó en las dimensiones del canal de oleaje utilizado, así como en las capacidades de reproducción de oleaje que se desean estudiar. Asimismo, tomando recomendaciones de ensayos de laboratorio con modelos físicos a escala se selecciona la escala entre el prototipo y el modelo de 1:60. Esa escala determina las dimensiones de las rocas y de los cubos que conforman la coraza de la estructura.

Se toman en cuenta otros factores relacionados con el escalamiento del oleaje y la composición del rompeolas como lo son la permeabilidad y la porosidad de la estructura del rompeolas.

Inicialmente se procedió con el cálculo de la densidad de los elementos de la coraza, así como la porosidad de dichos elementos en conjunto. Para ello se hace uso de la ecuación (50) el caso de la densidad, y la ecuación (51) permite calcular la porosidad de la coraza.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad (50)$$

$$n = \frac{\text{volumen}_{\text{recipiente}} - \text{volumen}_{\text{coraza}}}{\text{volumen}_{\text{recipiente}}} \quad (51)$$

donde $\text{volumen}_{\text{recipiente}}$ corresponde al volumen de una caja de madera de 30 cm x 30 cm x 15 cm y el $\text{volumen}_{\text{coraza}}$ indica el volumen del conjunto de cubos de mortero o rocas colocadas de forma aleatoria y desordenada que completan el volumen del recipiente. Los resultados obtenidos para cada tipo de elemento de coraza se muestran en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Valores promedio de densidad y porosidad de las corazas de rompeolas ensayadas

Tipo de coraza	Densidad (kg/m ³)	Porosidad (%)	Tamaño medio (cm)
Cubos	1735.4	50.4	3.0 *
Rocas	2607.6	41.9	3.0

*Arista del cubo: 3 cm

En cuanto a la permeabilidad de la estructura de rompeolas, se hace uso de los estudios de Van Der Meer J. (1988), en los cuales se establece una composición de rompeolas que contiene un núcleo de material fino, una capa de material de filtro y una capa superior conformada por los elementos de la coraza. La configuración que establece Van Der Meer aporta una permeabilidad del 40 %, y su constitución se muestra en la Figura 48.

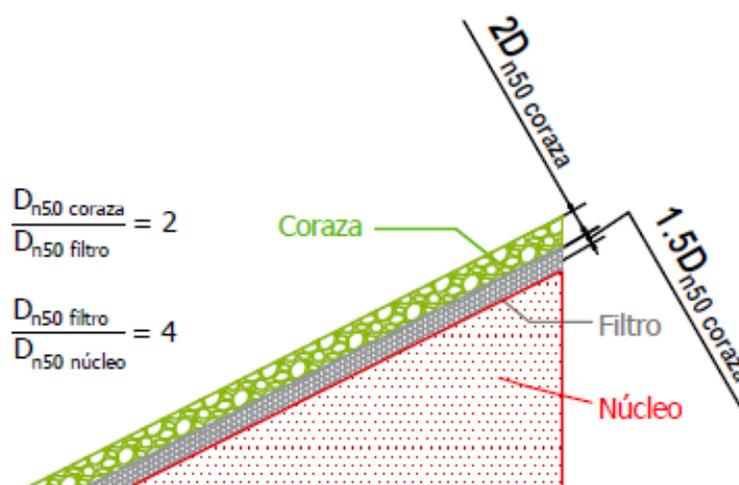


Figura 48. Composición de materiales que componen el rompeolas

La estructura del modelo de rompeolas queda determinada por una coraza que consta de 2 capas de elementos, de diámetro medio de 3 cm. Debajo de esta coraza se encuentra un filtro, cuyo espesor es de 4.5 cm, elaborado de rocas con un diámetro medio D_{n50} aproximado a los 1.25 cm.

Por debajo del filtro se coloca el material del núcleo, el cual está compuesto de material granular de un diámetro medio nominal aproximado a los 5 mm (ver Figura 49).



Figura 49. Fotografía de rompeolas a escala, con pendiente de talud 1 en 2.

La configuración coraza – filtro – núcleo funcionó como se esperaba, el filtro colocado impidió que los pequeños elementos del núcleo se pasaran hacia la capa de la coraza, mientras que los elementos en la coraza se mantuvieron en su lugar durante las corridas de los experimentos. Por esta razón, se mantuvo la misma porosidad de la capa de la coraza, tanto para la protección fabricada con cubos como para la elaborada con rocas.

Por otro lado, de acuerdo con la teoría del modelado físico a escala, es imposible mantener la semejanza total entre un modelo y un prototipo hidráulico (Gutiérrez, 2005). En este modelo físico no se cumple la semejanza dinámica total, no obstante, este hecho no presenta la mayor relevancia.

El término de las fuerzas de gravedad presente en la ecuación (39) son las que principalmente se ven afectados en este experimento, ya que solo para olas de ciertas características. En cuanto a los términos de fuerzas viscosas, de presión, de tensión superficial y fuerzas elásticas los efectos de no cumplir esas semejanzas parciales se pueden considerar como no significativas.

Al no evaluar la estabilidad del rompeolas no fue necesario escalar la masa de los elementos que conforman el rompeolas. Como consecuencia, fue necesario que los elementos de la coraza fueran pegados entre ellos con silicón, siempre bajo una configuración que mantuviera la aleatoriedad de esos elementos y se conservara así en todas las corridas del experimento.

El hecho de haber incorporado silicón entre las piezas de la coraza no afecta el R_u ni el R_d , así como el oleaje, por lo que se considera que ello no afecta a las variables de diseño funcional de un rompeolas en talud.

Se utilizan un talud de rompeolas bajo dos distintas inclinaciones, y para cada una de ellas se presenta su configuración en la Figura 50.

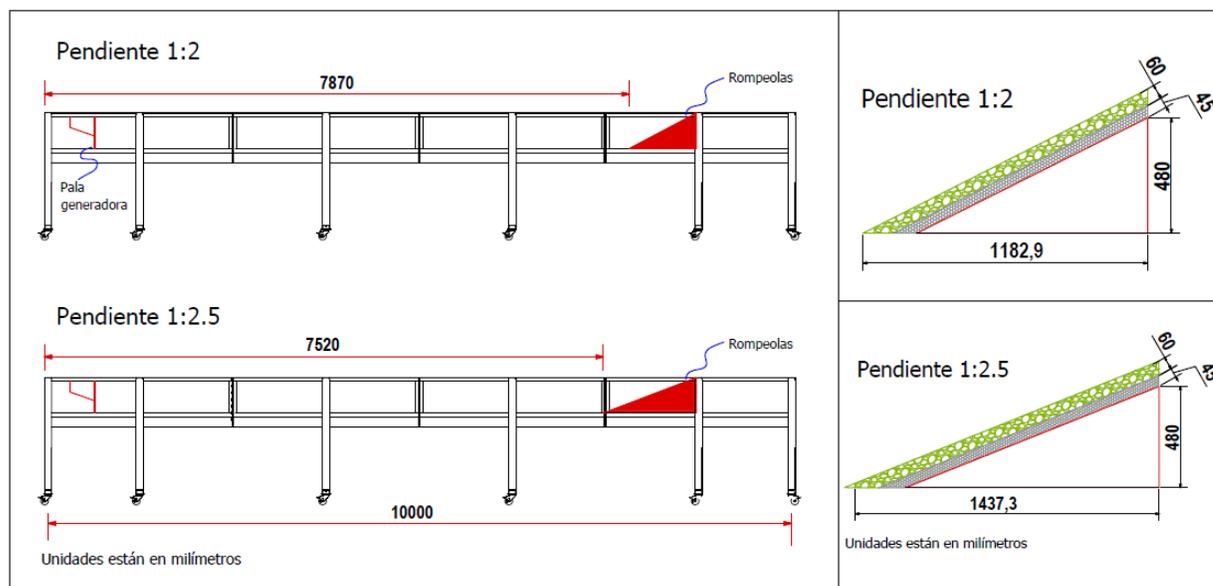


Figura 50. Croquis de la colocación de los rompeolas en talud inclinado.

Por otra parte, como se mencionó en la sección 2.5 de este documento, en un modelo físico a escala la semejanza dinámica completa no es posible mantener. En este ensayo hay 2 interfaces que fueron modeladas a escala, una es el oleaje, y la otra es la estructura del rompeolas.

Las semejanzas geométrica y cinemática se mantienen en el oleaje. Sin embargo, al trabajar con agua dulce en lugar del agua salada existe una disminución en el valor de su densidad, esto produce un ligero efecto de escala en la semejanza dinámica, específicamente los términos de las fuerzas de presión y tensión superficial de acuerdo con lo indicado en la ecuación (39).

En cuanto a las fuerzas de presión se tiene que:

$$(\rho gh)_{prototipo} = (\rho_m g_m \lambda h)_{modelo}$$

$$(1024 \cdot 9.81 \cdot h) = (998.2 \cdot 9.779 \cdot 60 \cdot 0.214)$$

$$h = 12.477 \text{ m}$$

Dado que en el modelo físico se trabajó con 21.4 cm, no existirían efectos de escala significativos por fuerzas de presión del agua al evaluar una condición prototipo cuya profundidad fuese de 12,477 m.

Por otra parte, en cuanto a la tensión superficial, es necesario definir el parámetro L_c , o longitud característica del modelo a escala. En el caso del agua L_c corresponde a un parte por cada sesenta. Otro parámetro corresponde a la velocidad característica V_c del modelo en el agua, la cual debe mantener la semejanza cinemática entre las velocidades del modelo y del experimento. Al ingresar esos datos en la semejanza de Weber se tiene que:

$$\left(\frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L} \right)_{prototipo} = \left(\frac{\rho_m L_c^2 V_c^2}{\sigma L_c} \right)_{modelo}$$

$$\left(\frac{1024 \cdot 60^2 \cdot V^2}{0.0728 \cdot 60} \right)_{prototipo} = \left(\frac{998.2 \cdot 1^2 \cdot V_c^2}{0.0728 \cdot 1} \right)_{modelo}$$

$$V = 7.647 V_c$$

De acuerdo con el resultado anterior, se observa que la relación no está cumpliendo que la semejanza cinemática, por un margen de error relativo del 1.28 %, donde la escala cinemática debe ser igual a la raíz cuadrática de la escala (cuyo valor es 60). Por lo tanto, existiría cierto efecto de escala bajo una incertidumbre asociada al error relativo en cuando a la tensión superficial.

El otro entorno que es modelado a escala es la estructura del rompeolas. En este entorno adquiere relevancia la semejanza geométrica, cinemática y dinámica. La primera de ellas se mantiene, de manera no distorsionada, bajo una escala de 1:60.

La semejanza cinemática se mantiene en la estructura siempre y cuando los términos de la ley de Darcy mantengan la escala de 1:60 en el flujo intersticial que escurre a través del cuerpo del rompeolas. No obstante, el análisis este evento queda por fuera del alcance de este trabajo.

Previo al inicio de los ensayos en el modelo físico se saturan de agua los poros dentro del rompeolas hasta alcanzar la profundidad de flujo requerida. Por otra parte, la semejanza dinámica es la que presenta los principales efectos de escala y son mencionados a continuación.

En el cuerpo de rompeolas, compuesto por la capa de la coraza, filtro y núcleo, las fuerzas elásticas, de tensión superficial y de presión no adquieren relevancia dado que lo que interesa es el estudio del ascenso y descenso del agua sobre el talud de la estructura, por lo que no generan efectos de escala importantes para el objetivo del ensayo.

Las fuerzas de gravedad que se pueden evaluar mediante la semejanza de Froude son importantes y se halló que para ciertas condiciones de oleaje se pueden presentar efectos de escala de acuerdo con:

$$\left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_{\text{prototipo}} = \left(\frac{V_c}{\sqrt{g_m L_c}}\right)_{\text{modelo}} \quad (52)$$

En donde L_c representa el diámetro medio nominal de los elementos de la coraza en el rompeolas, y la velocidad característica V_c como:

$$V_c = \sqrt[3]{g_m H_{ia}}$$

Donde H_{ia} , es la altura de ola de inicio de avería del rompeolas. En ensayos previos de pruebas del oleaje se realizó una estimación luego de 10 ensayos de condiciones de oleaje que produjeran inicio de avería en la coraza tanto de rocas como de piedras. Lo anterior para tener un margen de incertidumbre asociado.

Con esos valores se procedió a calcular las velocidades características del ensayo y obtener los números de Froude Fr del ensayo, resultados que son presentados en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Velocidades características y números de Froude del ensayo.

Parámetro	Elemento de coraza	
	Rocas	Cubos
V _c (m/s)	1.20 ±0.031	1.27±0.024
Fr	2.21±0.057	2.34±0.044

Al igualar Fr del modelo con el del prototipo, de acuerdo con la ecuación (52), se puede despejar la velocidad del prototipo “V”, que corresponde a la velocidad de grupo de las olas “C” en aguas intermedias (Gutiérrez, 2005):

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (53)$$

Si se considera la profundidad del agua “h” del prototipo cuyo valor es de 12.84 m, así como una longitud de onda media de 138.16 m se logran obtener rangos de períodos de ola en los cuales no existen efectos de escala en relación con la semejanza parcial de Froude, que son:

$$T = 11.32 \pm 0.583 \text{ s (rocas)}$$

$$T = 11.98 \pm 0.451 \text{ s (cubos)}$$

Es decir, para el oleaje cuyas olas presenten períodos de ola entre dichos rangos en su respectivo tipo de coraza no se producen efectos de escala significativos. No obstante, no todo el rango de períodos de ola T que se reprodujeron en este trabajo se encuentran dentro de dicho intervalo.

En cuanto a la semejanza de Reynolds, la literatura indica que, para los experimentos de diques en talud, si se producen números “R” mayores a 30000 los efectos de escala en cuanto a viscosidad se tornan no significativos. Si se plantea la relación de semejanza de Reynolds en este ensayo:

$$\left(\frac{LV}{\eta}\right)_{\text{prototipo}} = \left(\frac{L_c V_c}{\eta}\right)_{\text{modelo}} \quad (54)$$

Bajo las mismas velocidades características del ensayo utilizadas en la semejanza de Reynolds y considerando que la temperatura media del agua en el experimento fue de 20 °C se obtuvieron los resultados mostrados en Cuadro 22.

Cuadro 22. Números de Reynolds en el modelo físico.

Parámetro	Elemento de coraza	
	Rocas	Cubos
Vc (m/s)	1.20 ±0.031	1.27±0.024
R	35892.32±927.2	37986.04±717.8

De acuerdo con los resultados anteriores, no se presentan efectos de escala en relación con la viscosidad en el modelo del cuerpo del rompeolas. Por lo tanto, los efectos de escala que se dan en relación con el rompeolas se deben principalmente a que no se logra cumplir la semejanza dinámica parcial de Froude para todas las condiciones de oleaje ensayadas.

4.5.1.4. Registro y post procesamiento de Run up y Run down

Para la medición del oleaje se utilizaron dos cámaras de video. Una de las cámaras fue utilizada para registrar la variación del nivel de agua sobre en el talud y por encima del nivel medio del agua en reposo. La segunda cámara capturó la variación de la superficie libre del agua por debajo del nivel medio del agua para cada ensayo.

Cada video tiene una duración de 25 minutos, tiempo necesario para que se generen las olas requeridas para un adecuado análisis estadístico. En el Cuadro 23 se muestran las características principales de las cámaras utilizadas en el experimento.

Cuadro 23. Características de las cámaras utilizadas en los experimentos.

Marca cámara	Nikon	Sony
Modelo	Coolpix A	HDR-cx 110
Resolución utilizada	1080 x 720	1080 x 720
Frecuencia de imágenes	30 fps	30 fps
Registro de:	Run up (Ru)	Run down (Rd)
Fotografía		

Previo al registro de los resultados de los experimentos mediante las videocámaras se realizaron una serie de pruebas de visualización. La observación clara y definida del agua en movimiento sobre el talud del rompeolas fue un aspecto importante por evaluar. Se realizaron múltiples observaciones mediante videocámaras para escoger los colores de los elementos de la coraza, así como de la tonalidad y turbidez del agua para producir el mayor contraste entre el agua y el rompeolas (ver Figura 51).

Lo anterior también fue necesario con el fin de evitar que la tabla de agua sobre el ancho del talud generara confusiones para la medición, ya que se busca medir siempre en el punto más cercano al vidrio frontal del canal de oleaje.

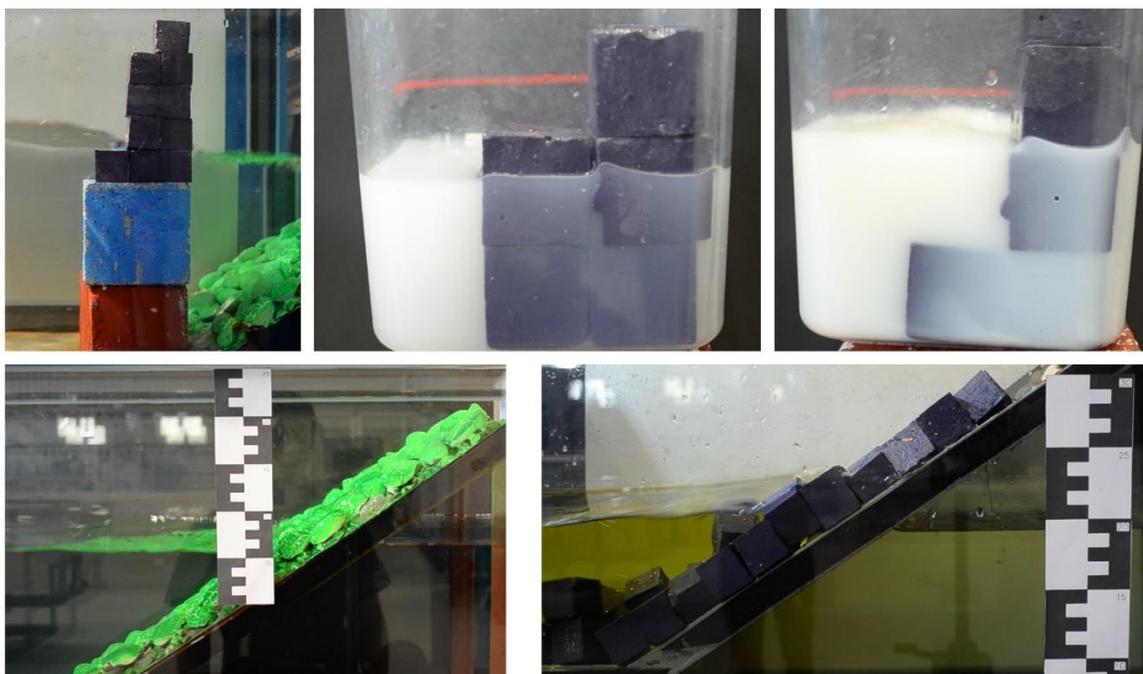


Figura 51. Selección del color de los elementos de la coraza y coloración del agua.

La selección final con que se trabajó el experimento, luego de un análisis económico y estudio del post proceso de las imágenes, consistió en teñir el agua con un colorante de alimentos de color amarillo, con una proporción de 200 ml del colorante en 654 l de agua, que corresponde al volumen total de agua usada en el experimento.

Los elementos de la coraza fueron pintados de color púrpura oscuro, debido a que esta tonalidad permite un contraste adecuado para el post procesamiento de las imágenes captadas por las cámaras.

La Figura 52 muestra una imagen capturada por una de las cámaras de video utilizadas. En dicha fotografía se muestra que línea de la superficie del agua es fácilmente notable, y que al ser transformada a una imagen en negativo, permite una medición precisa de píxeles en cada una de las imágenes.

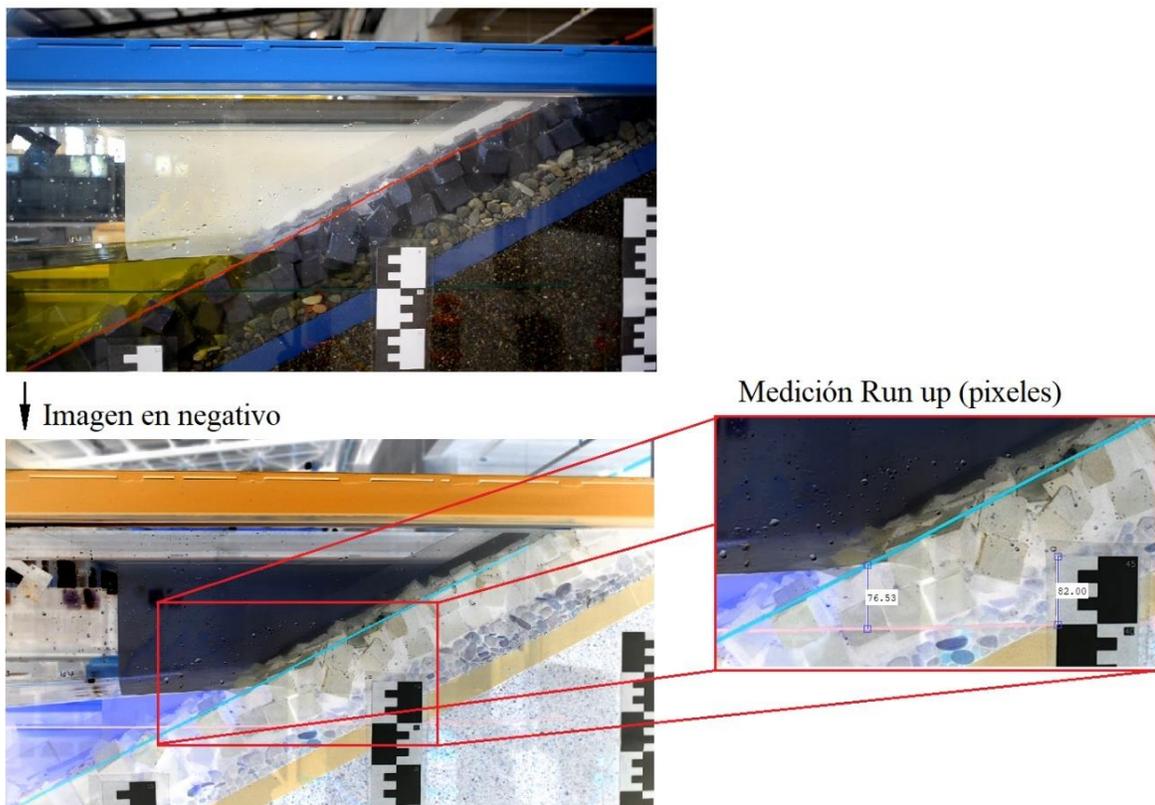


Figura 52. Post proceso de imágenes de videocámara.

Cada cámara se ha enfocado en la parte del talud que en donde se desarrollan los descensos por debajo del nivel medio del agua, y los ascensos sobre el nivel medio del agua. La Figura 53 muestra una fotografía de la colocación de las cámaras de video durante los ensayos.



Figura 53. Colocación de las videocámaras para registro de Ru y Rd.

En cada corrida de ensayo se toman 45000 cuadros de imagen, que corresponde a la cantidad de cuadros que se graban en 25 minutos de ensayo. En total, se analizaron 24 videos con una duración de 25 minutos cada uno.

Para cada video se registraron los Ru y Rd y, mediante el uso de herramientas computacionales se midieron dichas variables en pixeles (ver Figura 54). Posterior a este proceso, se tradujeron las mediciones en pixeles a metros utilizando semejanza de triángulos, conociendo cuántos pixeles corresponde a 5 cm, según la regla colocada en la pared del canal.

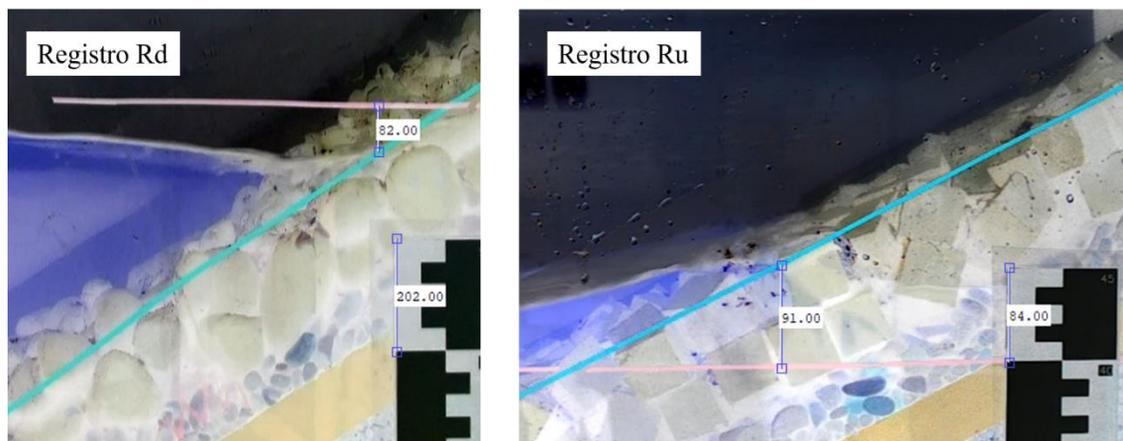


Figura 54. Medición de Rd y Ru mediante computadora

Con base en la resolución de ambas videocámaras y en la distancia de colocación entre la videocámara y la pared del canal, se ofrecen resoluciones tal que, para el caso del Rd, un píxel presenta una medición de 0.247 mm, mientras que para la videocámara que registra el Ru se muestra que 1 píxel representa una medición de 0.595 mm.

Pese a que las videocámaras presentan la misma resolución, el píxel de la videocámara que registra el Rd mide menos que el píxel medido en la videocámara que registra el Ru. Esto se debe al acercamiento por parte y además de que las dos videocámaras no se encontraron a la misma distancia horizontal medida desde el vidrio lateral del canal de oleaje.

Para los 12 ensayos las videocámaras se colocaron a la misma elevación y en el mismo lugar, esto para uniformizar los videos y facilitar así el post proceso de los videos. La Figura 55 muestra el entorno físico que rodea al experimento del rompeolas en talud:



Figura 55. Canal de oleaje durante experimentación.

La medición de Ru y Rd realizado mediante el post procesamiento de imágenes se concentra en el ascenso y descenso del agua que está en contacto con la pared lateral del canal. Sin embargo, a lo largo del ancho del canal ocurre más o menos ascenso y/o descenso del agua debido a la irregularidad de la coraza, lo que puede agregar cierto porcentaje de incertidumbre en los registros (ver Figura 56).



Figura 56. Prueba de video de Ru en una vista superior.

En la Figura 56, la línea continua indica el nivel de agua hasta donde ésta asciende sobre la superficie del talud del rompeolas, mientras que la línea recta punteada indica el nivel de ascenso máximo del agua observado desde un plano lateral del canal.

Se observaron notorias discrepancias entre ambas líneas. No obstante, los experimentos en modelos físicos de rompeolas consultados para el desarrollo de esta investigación realizan el registro en una vista lateral del rompeolas del canal. En este caso, para mantener una convergencia con este tipo de experimentos, los registros se realizaron tomando las imágenes de las videocámaras en la vista lateral del rompeolas.

Por otra parte, el post proceso de los videos que registraron el Ru y Rd se realizó mediante una rutina computacional parcialmente automática de revisión y medición del ascenso y descenso del agua en el rompeolas.

Esa manera de procesar la información, pese a que consumió alta cantidad de tiempo, aseguró por interpretación humana que lo medido fuesen los ascensos y descensos máximos según su definición.

4.5.2. Forzamientos del modelo físico

Una vez definidos los espectros de energía normalizados en el capítulo 3, dichos espectros son multiplicados por un valor representativo de oleaje de tormenta. Ese valor corresponde al promedio de las H_{m0} que superan el umbral de 98 % de probabilidad de excedencia, y el cual es de 3.4 m.

Ese valor promedio de H_{m0} se asocia una probabilidad de no excedencia del 99.4 %, cuyo periodo de retorno es de 166.7 años. Bajo esa condición de oleaje, existe un 25.98 % de riesgo de fallo, durante los 50 años de vida útil en una estructura de rompeolas. Esa información es detallada en el Apéndice A.

Como resultado se obtienen los espectros de energía que se muestran en la Figura 57, y los cuales son utilizados como forzamientos en el modelado físico.

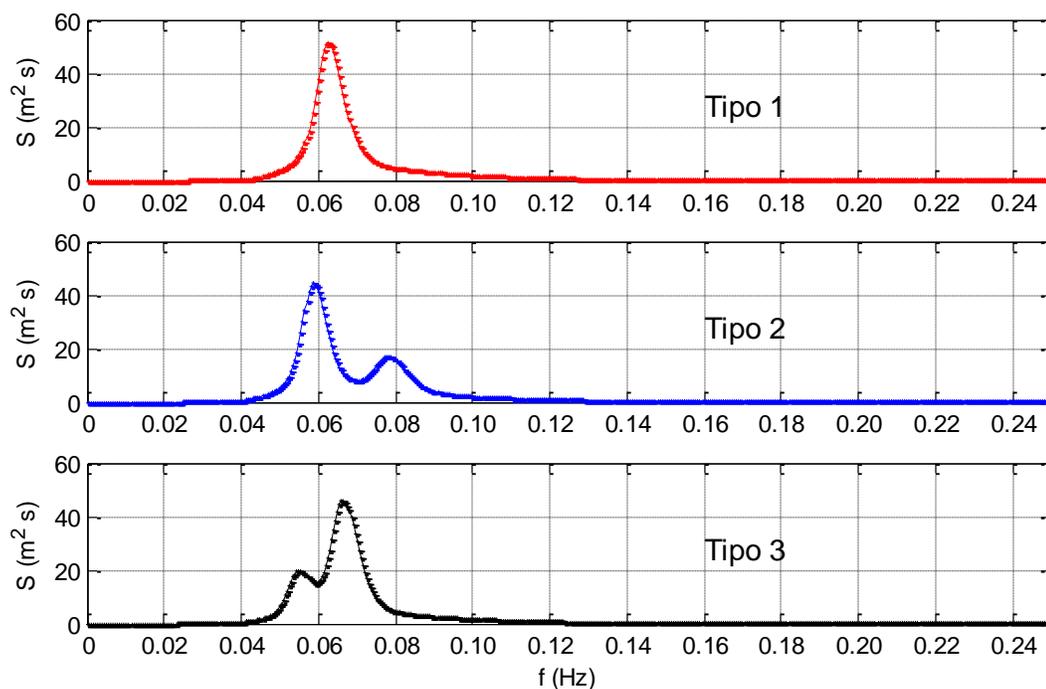


Figura 57. Espectros representativos del oleaje que arriba al litoral Pacífico de Costa Rica.

Para la reproducción de los espectros mostrados en la Figura 57 es necesario asignar un valor de GF a los tres espectros de energía del oleaje representativo, el cual, tal y como se

comentó en la sección 4.2., es de 0.95. Este agrupamiento se considera como un agrupamiento normal del oleaje.

De acuerdo con los parámetros I_r y ξ_m , mostrados en las ecuaciones (27) y (28) respectivamente, las variables de alturas de ola y períodos que se presentan en el denominador fueron obtenidas del software de la pala de generación de oleaje.

A esto se le suma el hecho de que al mantenerse constante la profundidad del agua a lo largo del canal desde la pala de generación hasta los 7 m aproximadamente, la superficie libre de agua se debe mantener en condiciones muy similares. Más allá de dicha localización del canal, los efectos de reflexión del oleaje son notorios y no es aconsejable registrar el oleaje en ese punto si no es con 3 sensores de superficie libre.

4.5.3. Resultados

Los resultados obtenidos del cálculo de R_u y R_d , a partir del post proceso de las imágenes grabadas por las videocámaras, se muestran mediante los gráficos de ocurrencia acumulada. La Figura 58 muestra los resultados para las cuatro diferentes configuraciones en el caso de los registros del R_u .

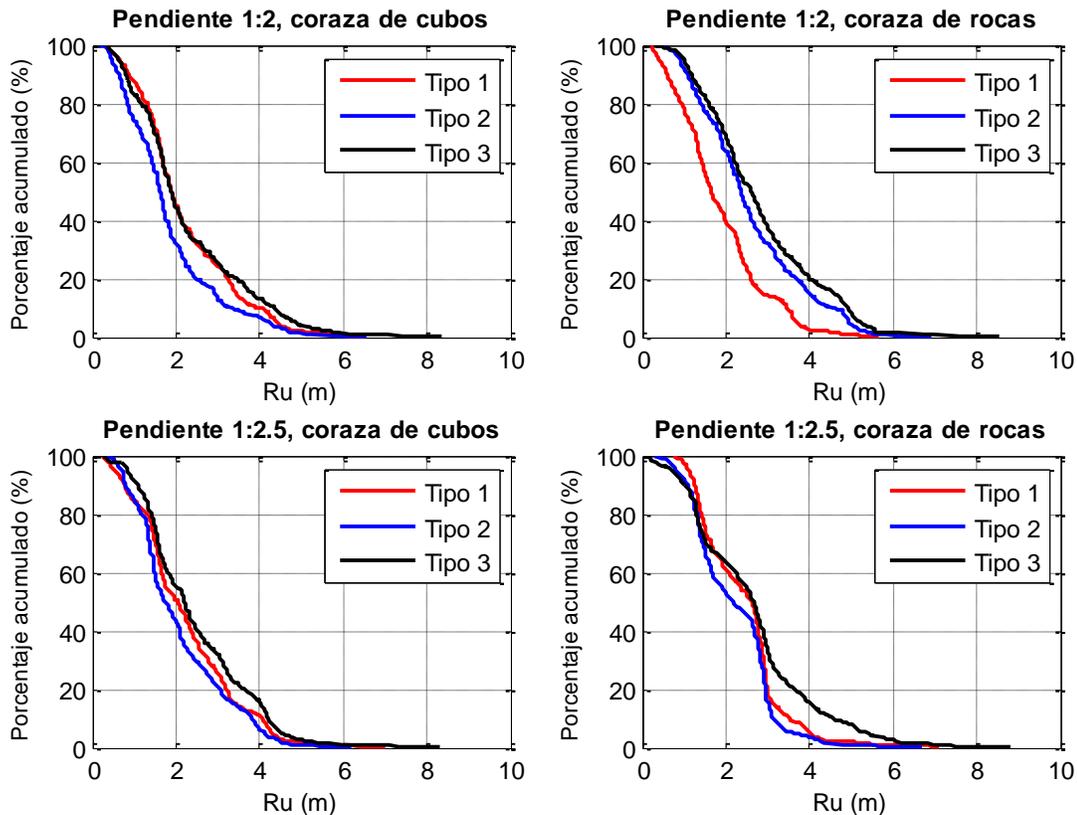


Figura 58. Ascensos máximos registrados en las cuatro configuraciones del modelo físico bajo los tres tipos de oleaje

De acuerdo con la Figura 58, se observa que el oleaje representativo tipo 3 produce mayores valores de Ru al interactuar en las cuatro configuraciones ensayadas del rompeolas, mientras que el oleaje tipo 2 produce menores ascensos a excepción de las configuraciones pendiente 1:2 con coraza de rocas.

La Figura 59 muestra los resultados gráficos de los registros del Rd para las cuatro diferentes configuraciones bajo los tres tipos de oleaje evaluados.

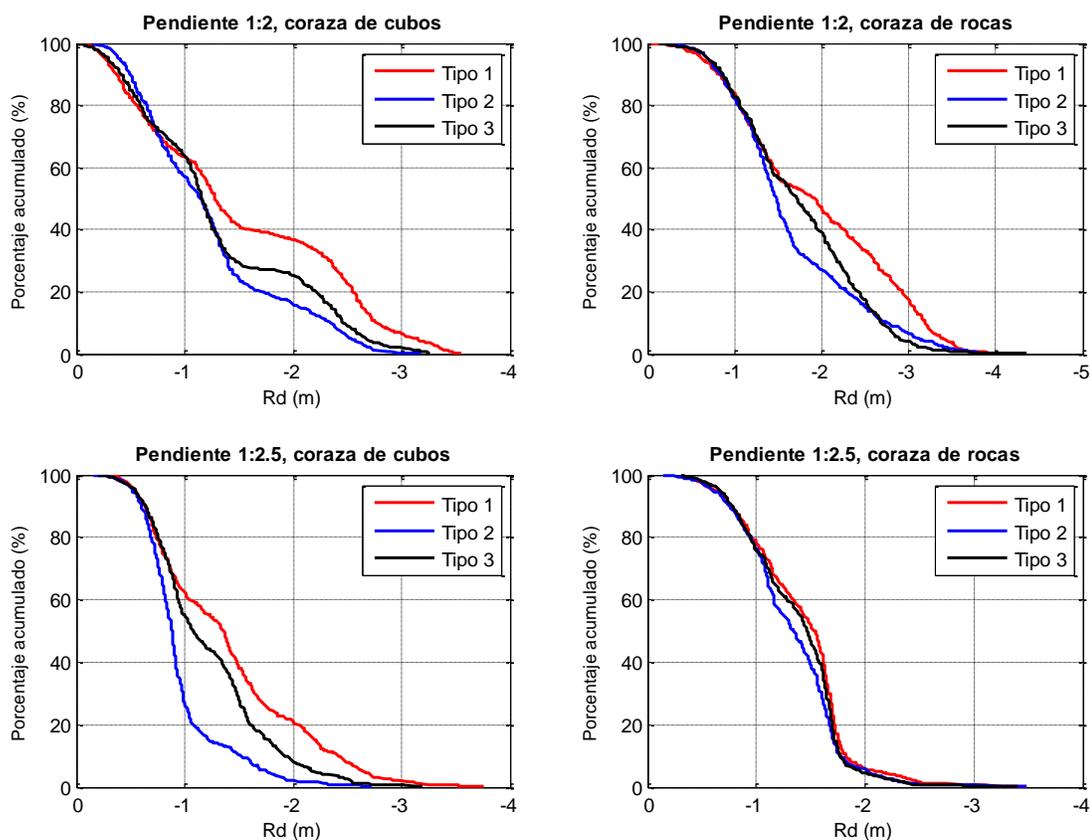


Figura 59. Descensos máximos registrados en las cuatro configuraciones del modelo físico bajo los tres tipos de oleaje.

De acuerdo con la Figura 59, los descensos máximos presentan mayor magnitud bajo el oleaje representativo tipo 1 para todas las configuraciones.

Posteriormente, con base en los resultados de los registros de las variables R_u y R_d se realizaron los cálculos de los parámetros estadísticos. El Cuadro 24 presenta los resultados de los cálculos estadísticos en el caso del R_u para la totalidad de los ensayos, mientras que el Cuadro 25 muestra la estadística basada en las mediciones de los R_d .

Cuadro 24. Parámetros estadísticos basados en las mediciones de Ru.

Tipo oleaje		Unimodal, tipo 1				Bimodal, tipo 2				Bimodal, tipo 3			
Pendiente 1:		2		2.5		2		2.5		2		2.5	
Coraza		Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas
Condición	Ru máx. (m)	6.47	6.72	7.03	7.09	6.58	6.92	6.20	6.68	8.33	8.54	8.32	8.80
	Ru 1% (m)	6.09	6.43	6.43	6.57	5.75	6.21	5.59	5.89	7.42	7.58	7.47	7.61
	Ru 2% (m)	5.66	6.15	5.89	5.95	5.28	5.83	5.11	5.16	6.66	6.84	6.51	7.04
	Ru 5% (m)	5.04	5.19	5.02	4.87	4.76	5.38	4.62	4.47	5.78	5.98	5.48	6.23
	Ru 10% (m)	4.64	4.80	4.60	4.33	4.28	5.10	4.28	3.88	5.17	5.51	4.91	5.59
	Ru 1/3 (m)	3.57	3.62	3.59	3.42	3.03	4.04	3.37	3.22	3.87	4.44	3.95	4.08
	Ru rms (m)	2.49	2.59	2.52	2.60	2.11	2.86	2.33	2.39	2.65	3.14	2.76	2.99
	Ru med. (m)	3.09	3.10	3.17	3.16	2.61	3.56	2.92	2.98	3.28	3.92	3.46	3.73

Cuadro 25. Parámetros estadísticos basados en las mediciones de Rd.

Tipo oleaje		Unimodal, tipo 1				Bimodal, tipo 2				Bimodal, tipo 3			
Pendiente 1:		2		2.5		2		2.5		2		2.5	
Coraza		Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas	Cubos	Rocas
Condición	Rd máx. (m)	-3.54	-4.08	-3.20	-3.10	-3.18	-4.10	-3.76	-3.49	-3.27	-4.35	-2.73	-3.40
	Rd 1/3 (m)	-2.69	-3.02	-1.82	-1.85	-1.96	-2.51	-2.19	-1.79	-2.24	-2.57	-1.34	-1.80
	Rd rms (m)	-1.79	-2.14	-1.32	-1.49	-1.38	-1.80	-1.55	-1.40	-1.52	-1.89	-1.02	-1.44
	Rd med. (m)	-2.33	-2.74	-1.64	-1.78	-1.72	-2.20	-1.95	-1.68	-1.91	-2.35	-1.19	-1.72

De acuerdo con el Cuadro 24, los resultados del Ru son mayores bajo condiciones de oleaje tipo 3 en comparación con los otros tipos de oleaje, para todas las configuraciones del rompeolas y en todos los estadísticos estimados. Los oleajes representativos tipo 1 y tipo 2 produjeron estadísticos de Ru similares en magnitud para todas las configuraciones del rompeolas, más no se halló una diferencia general entre ellos.

Además, independientemente del tipo representativo de oleaje, bajo una misma pendiente de talud se dan Ru mayores sobre la coraza de rocas que para los Ru registrados en coraza de cubos.

De acuerdo con los estadísticos de Ru para los 3 tipos de oleaje y manteniendo la misma coraza pero bajo distinta pendiente de talud no se evidenció un patrón claro que permita

establecer que la pendiente del rompeolas bajo una misma coraza de protección afecta de cierta manera en el R_u .

En cuanto al R_d , para los 3 tipos de oleaje representativos, al mantener la misma coraza pero distinta pendiente se observó que los estadísticos de R_u para pendiente 1V: 2H son de mayor magnitud que los estadísticos bajo una pendiente de talud de 1V: 2.5H, en la mayoría de los estadísticos. Lo anterior de acuerdo con el Cuadro 25.

Una vez obtenidos los resultados se realizan las comparaciones entre los resultados de las ecuaciones que calculan los estadísticos de R_u y R_d , y los resultados respectivos basados en el modelado físico. Se calculan además las diferencias relativas porcentuales. La expresión (55) define la manera de calcular la diferencia relativa porcentual:

$$e = \frac{|R_{calculado} - R_{registrado}|}{|R_{calculado}|} \cdot 100 \% \quad (55)$$

donde:

$R_{calculado}$: el parámetro (R_u o R_d) calculado mediante las ecuaciones teóricas.

$R_{registrado}$: el parámetro (R_u o R_d) registrado a través del post procesamiento de los videos del experimento.

4.6. Análisis de resultados

En este apartado se presenta el análisis de comparar los tres tipos de oleaje representativos utilizado para cada una de las 4 configuraciones de rompeolas ensayadas. Se utiliza como referencia el oleaje tipo 1 debido a que es un espectro de energía unimodal, y porque a su vez, se utiliza para comparar con las formulaciones de diseño, las cuales están basadas en un oleaje con espectro unimodal.

De manera complementaria también se compara con el oleaje tipo 2, con el fin de realizar las tres comparaciones. Para medir las diferencias de los resultados obtenidos se utiliza la diferencia del Ru ($\Delta_{rel. a-b}$), donde:

$$\Delta_{rel. a-b} = \frac{Ru_{x b} - Ru_{x a}}{Ru_{x a}} \quad (56)$$

x: estadístico que se esté evaluando.

Los resultados con signo negativo indican que el oleaje tipo indicado por el subíndice (a) produce Ru superiores que los producidos por el oleaje tipo de oleaje indicado por el subíndice (b).

Cuadro 26. Comparación de estadísticos de Ru entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2H.

Coraza:		Cubos				
Pendiente 1:		2				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta_{rel. 1-2}$ (%)	$\Delta_{rel. 1-3}$ (%)
		1	2	3		
Condición	Ru máx. (m)	6.47	6.58	8.33	1.6	28.8
	Ru 1% (m)	6.09	5.75	7.42	-5.5	21.8
	Ru 2% (m)	5.66	5.28	6.66	-6.9	17.6
	Ru 5% (m)	5.04	4.76	5.78	-5.6	14.6
	Ru 10% (m)	4.64	4.28	5.17	-7.6	11.5
	Ru 1/3 (m)	3.57	3.03	3.87	-15.2	8.4
	Ru rms (m)	2.49	2.11	2.65	-15.1	6.5
	Ru med. (m)	3.09	2.61	3.28	-15.6	6.3

De acuerdo con el Cuadro 26 se observa que para la mayoría de los estadísticos del Ru el oleaje tipo 1 genera valores de los estadísticos mayores respecto a los estadísticos que se estiman bajo un oleaje tipo 2, mientras que si se compara con el oleaje tipo 3 se observa los estadísticos estimados con el tipo 3 superan a los estadísticos del oleaje tipo 1.

Cuadro 27. Comparación de estadísticos de Rd entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2H.

Coraza:		Cubos				
Pendiente 1:		2				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta\text{rel}_{1-2}(\%)$	$\Delta\text{rel}_{1-3}(\%)$
		1	2	3		
Condición	Rd _{máx.} (m)	-3.54	-3.18	-3.27	-10.4	-7.8
	Rd _{1/3} (m)	-2.69	-1.96	-2.24	-27.1	-16.7
	Rd _{rms} (m)	-1.79	-1.38	-1.52	-22.8	-15.2
	Rd _{med.} (m)	-2.33	-1.72	-1.91	-26.2	-18.1

Con base en el Cuadro 27 tanto los Ru producidos por el oleaje representativo tipo 1 son mayores que los Ru producidos por los oleajes representativos tipo 2 y 3.

Cuadro 28. Comparación de estadísticos de Ru entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2H.

Coraza:		Rocas				
Pendiente 1:		2				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta\text{rel}_{1-2}(\%)$	$\Delta\text{rel}_{1-3}(\%)$
		1	2	3		
Condición	Ru _{máx.} (m)	6.72	6.92	8.54	3.1	27.2
	Ru _{1%} (m)	6.43	6.21	7.58	-3.5	17.8
	Ru _{2%} (m)	6.15	5.83	6.84	-5.2	11.3
	Ru _{5%} (m)	5.19	5.38	5.98	3.7	15.2
	Ru _{10%} (m)	4.80	5.10	5.51	6.2	14.7
	Ru _{1/3} (m)	3.62	4.04	4.44	11.8	22.7
	Ru _{rms} (m)	2.59	2.86	3.14	10.5	21.3
	Ru _{med.} (m)	3.10	3.56	3.92	14.7	26.3

El Cuadro 28 muestra que para la mayoría de los estadísticos estudiados los R_u son mayores para cuando se reproducen oleajes representativos tipo 2 y 3, respecto a las condiciones de oleaje del tipo 1. Por otra parte, en cuanto a los estadísticos de R_d , los descensos máximos son mayores en presencia del oleaje tipo 1, para la mayoría de los estadísticos analizados (ver Cuadro 29).

Cuadro 29. Comparación de estadísticos de R_d entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2H.

Coraza:		Rocas				
Pendiente 1:		2				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta rel_{1-2} (\%)$	$\Delta rel_{1-3} (\%)$
		1	2	3		
Condición	$Rd_{m\acute{a}x.} (m)$	-4.08	-4.10	-4.35	0.6	6.8
	$Rd_{1/3} (m)$	-3.02	-2.51	-2.57	-17.1	-15.0
	$Rd_{rms} (m)$	-2.14	-1.80	-1.89	-16.0	-12.0
	$Rd_{med.} (m)$	-2.74	-2.20	-2.35	-19.8	-14.2

Un análisis comparativo similar al anterior es aplicable para las diferentes configuraciones de rompeolas, bajos los oleajes representativos 1, 2 y 3, tal y como se muestra entre el Cuadro 30 y el Cuadro 33.

Cuadro 30. Comparación de estadísticos de Ru entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2.5H.

Coraza:		Cubos				
Pendiente 1:		2.5				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta\text{rel}_{1-2}(\%)$	$\Delta\text{rel}_{1-3}(\%)$
		1	2	3		
Condición	Ru _{máx.} (m)	7.03	6.20	8.32	-11.7	18.4
	Ru _{1%} (m)	6.43	5.59	7.47	-13.1	16.1
	Ru _{2%} (m)	5.89	5.11	6.51	-13.3	10.4
	Ru _{5%} (m)	5.02	4.62	5.48	-7.9	9.2
	Ru _{10%} (m)	4.60	4.28	4.91	-6.8	6.7
	Ru _{1/3} (m)	3.59	3.37	3.95	-6.2	10.0
	Ru _{rms} (m)	2.52	2.33	2.76	-7.6	9.6
	Ru _{med.} (m)	3.17	2.92	3.46	-8.0	9.1

Cuadro 31. Comparación de estadísticos de Rd entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de cubos y pendiente 1V:2.5H.

Coraza:		Cubos				
Pendiente 1:		2.5				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta\text{rel}_{1-2}(\%)$	$\Delta\text{rel}_{1-3}(\%)$
		1	2	3		
Condición	Rd _{máx.} (m)	-2.73	-3.76	-3.20	37.8	17.2
	Rd _{1/3} (m)	-1.34	-2.19	-1.82	63.9	36.5
	Rd _{rms} (m)	-1.02	-1.55	-1.32	51.9	29.8
	Rd _{med.} (m)	-1.19	-1.95	-1.64	62.9	37.5

Cuadro 32. Comparación de estadísticos de Ru entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2.5H.

Coraza:		Rocas				
Pendiente 1:		2.5				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta\text{rel}_{1-2} (\%)$	$\Delta\text{rel}_{1-3} (\%)$
		1	2	3		
Condición	Ru máx. (m)	7.09	6.68	8.80	-5.8	24.0
	Ru 1% (m)	6.57	5.89	7.61	-10.3	15.7
	Ru 2% (m)	5.95	5.16	7.04	-13.2	18.3
	Ru 5% (m)	4.87	4.47	6.23	-8.4	27.8
	Ru 10% (m)	4.33	3.88	5.59	-10.4	29.1
	Ru $1/3$ (m)	3.42	3.22	4.08	-5.9	19.2
	Ru rms (m)	2.60	2.39	2.99	-8.3	14.8
	Ru med. (m)	3.16	2.98	3.73	-5.6	18.2

Los resultados de los Ru medidos en los ensayos presentaron la característica de que los estadísticos estimados a partir de ellos son de mayor magnitud cuando se realizó el experimento con coraza de rocas que los estadísticos estimados con una coraza de cubos, bajo una misma pendiente en ambos ensayos; tal y como es de esperar.

Lo anterior fue válido para los 3 tipos de oleaje representativos y, además, dejó en evidencia que la coraza elaborada de cubos produce mayor disipación de energía del oleaje que incide en la estructura de protección de lo que produce una coraza hecha de rocas.

Cuadro 33. Comparación de estadísticos de Rd entre tipos de oleaje bajo una configuración de rompeolas con coraza de rocas y pendiente 1V:2.5H.

Coraza:		Rocas				
Pendiente 1:		2.5				
Oleaje		Tipo de oleaje			$\Delta\text{rel}_{1-2} (\%)$	$\Delta\text{rel}_{1-3} (\%)$
		1	2	3		
Condición	Rd máx. (m)	-3.10	-3.49	-3.40	12.4	9.6
	Rd $1/3$ (m)	-1.85	-1.79	-1.80	-3.0	-2.5
	Rd rms (m)	-1.49	-1.40	-1.44	-5.9	-3.3
	Rd med. (m)	-1.78	-1.68	-1.72	-5.3	-3.3

4.6.1. Ecuación de Losada y Giménez-Curto (1981)

Para comparar los resultados del R_u y R_d obtenidos a partir de las ecuaciones analíticas y de los ensayos de laboratorio, se recurre a un formato de cuadro. Cada cuadro contiene R_u y $R_{u\text{máx}}$ asociado a H_s y $H_{\text{máx}}$, respectivamente.

El H_s y $H_{\text{máx}}$, es el correspondiente a cada uno de los espectros tipo y para los cuatro experimentos. De acuerdo con el Cuadro 34, para el oleaje representativo tipo 1, los estadísticos R_u y R_m son mayores producto del modelo físico bajo la configuración del rompeolas bajo la pendiente 1V:2H y coraza de cubos, en comparación con los estadísticos estimados a través de la ecuación de diseño.

A su vez, se utiliza un código de colores para facilitar el análisis. Se le asigna un color azul al resultado de mayor magnitud y un color celeste de menor magnitud. Lo anterior aplica de igual manera para comparar los resultados de descenso R_d .

Cuadro 34. Comparación de resultados para R_u mediante ecuación de Losada y Giménez-Curto.

Condición	1:2 coraza de cubos			1:2 coraza de rocas			1:2.5 coraza de cubos			1:2.5 coraza de rocas		
Tipo de oleaje	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
$R_{u\ 1/3}$ calc.	3.33	3.35	3.35	5.41	5.38	5.49	3.25	3.26	3.28	5.12	5.09	5.23
$R_{u\ 1/3}$ regist.	3.60	3.00	3.84	3.60	4.02	4.44	3.60	3.36	3.96	3.42	3.24	4.08
$R_{u\text{máx}}$ calc.	5.67	6.68	6.11	9.72	11.45	10.48	5.67	6.68	6.11	9.72	11.45	10.48
$R_{u\text{máx}}$ regist.	6.48	6.66	8.34	6.72	6.90	8.52	7.02	6.18	8.34	7.08	6.66	8.82

* calc.: calculado.

** regist.: registrado.

En el Apéndice B se muestran las diferencias relativas porcentuales estimados entre los estadísticos estimados por la ecuación y los estadísticos obtenidos de los registros en el modelo físico. En estas diferencias relativas se utiliza como parámetro de referencia el estadístico obtenido a partir de las mediciones en el experimento.

De acuerdo con el Apéndice C, se evidencia que la ecuación de diseño de Losada y Giménez-Curto subestima el estadístico $R_{u\ 1/3}$ y el $R_{u\text{máx}}$ bajo la configuración de rompeolas en talud con pendientes 1V: 2H y 1V: 2.5H con coraza hecha de cubos, bajo los oleajes representativos tipo 1 y 3.

Al utilizar el estadístico $Ru_{m\acute{a}x}$ se muestra que en la mayoría de los ensayos se sobrestiman los resultados; sin embargo, con un rompeolas bajo una pendiente del talud de 1V: 2H con coraza hecha de cubos con el oleaje representante 2 se halló una comparación donde, tanto de manera de cálculo como de estimación posterior al ensayo físico se encuentran diferencias relativas porcentuales menores que un 5 %.

El estadístico $Rd_{m\acute{a}x}$ se aproxima de manera aceptable bajo la reproducción de los oleajes representativos tipo 3 en el rompeolas con pendiente 1V:2H con una coraza hecha de cubos, así como bajo la misma pendiente hecha con coraza de rocas con un oleaje representativo tipo 1. El Cuadro 35 muestra las comparaciones descritas previamente y las diferencias relativas porcentuales se muestran en el Apéndice D.

Cuadro 35. Comparación de resultados para Rd mediante ecuación de Losada y Giménez-Curto.

Condición	1:2 coraza de cubos			1:2 coraza de rocas			1:2.5 coraza de cubos			1:2.5 coraza de rocas		
Tipo de oleaje	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
$Rd_{1/3}$ calc.	-2.10	-2.10	-2.16	-2.94	-2.88	-3.00	-1.98	-1.98	-2.04	-2.64	-2.64	-2.76
$Rd_{1/3}$ regist.	-2.70	-1.98	-2.22	-3.00	-2.52	-2.58	-1.32	-2.16	-1.80	-1.86	-1.80	-1.80
$Rd_{m\acute{a}x}$ calc.	-3.89	-4.58	-4.19	-5.94	-7.00	-6.40	-3.89	-4.58	-4.19	-5.94	-7.00	-6.40
$Rd_{m\acute{a}x}$ regist.	-3.54	-3.12	-3.24	-4.08	-4.08	-4.38	-2.70	-3.78	-3.18	-3.12	-3.48	-3.42

* calc.: calculado.

** regist.: registrado.

4.6.2. Método de cálculo propuesto por Van Der Meer (1992)

La ecuación de diseño propuesta por Van Der Meer permite estimar para probabilidades de ocurrencia de 1 %, 2 %, 5%, 10 % e incluso de 0.13 % (éste último no evaluado en este trabajo). Para cada uno de ellos se realizaron las comparaciones respectivas entre los resultados de esa ecuación y los estadísticos que se estimaron con base del experimento. Esos resultados se presentan en el Cuadro 36, mientras que las diferencias relativas porcentuales se muestran en el Apéndice F.

Cuadro 36. Comparación de resultados para Ru mediante ecuaciones de Van Der Meer.

Condición	1:2 coraza de cubos			1:2 coraza de rocas			1:2.5 coraza de cubos			1:2.5 coraza de rocas		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Ru 10 % calc.	5.56	5.96	6.15	5.56	5.96	6.15	5.06	5.42	5.57	5.06	5.42	5.59
Ru 10 % regist.	4.62	4.26	5.16	4.80	5.10	5.52	4.62	4.26	4.92	4.32	3.90	5.58
Ru 5 % calc.	7.13	7.63	7.83	7.13	7.63	7.83	6.46	6.92	7.10	6.46	6.92	7.10
Ru 5 % regist.	5.04	4.74	5.76	5.16	5.40	6.00	5.04	4.62	5.46	4.86	4.44	6.24
Ru 2 % calc.	8.98	9.40	9.82	8.98	9.40	9.82	8.11	8.48	8.86	8.11	8.48	8.86
Ru 2 % regist.	5.64	5.28	6.66	6.12	5.82	6.84	5.88	5.10	6.48	5.94	5.16	7.02
Ru 1 % calc.	10.52	11.68	11.47	10.52	11.68	11.47	9.45	10.49	10.31	9.45	10.49	10.31
Ru 1 % regist.	6.06	5.76	8.34	6.42	6.24	8.52	6.42	5.58	8.34	6.60	5.88	8.82

* calc.: calculado.

** regist.: registrado.

De acuerdo con los resultados, se observó que para todas las configuraciones del rompeolas en talud y bajo los 3 tipos de oleaje, la ecuación de Van Der Meer sobreestima los resultados de todos los estadísticos de Ru a partir de los registrados de esa variable en el modelo físico. Durante un oleaje representativo tipo 3 en interacción con rompeolas en talud 1V:2.5H y coraza hecha de rocas se encontró que la ecuación estima de manera aceptable el estadístico Ru_{10%}.

Se observó que para casos como el rompeolas en talud 1V: 2H bajo el oleaje representativo tipo 2 y para ambas corazas hechas de cubos se estima el Ru_{1%} bajo con una diferencia relativa porcentual superior a 102 %. Este hecho es indicativo de que la parametrización que estableció Van Der Meer (1992) en su ecuación es conservadora en cuanto al diseño funcional en rompeolas.

4.6.3. Ecuación de diseño del EurOtop (2018)

Las respectivas comparaciones de los estadísticos de Ru y Rd se muestran en el Cuadro 37, complementándose con información del Apéndice H y del Apéndice I. Se puede observar que para todas los Ru asociados al 2 % la ecuación de diseño del EurOtop sobreestima el resultado obtenido en el modelo físico bajo amplios márgenes de diferencia. De acuerdo con el Apéndice H existen diferencias relativas porcentuales que se encuentran entre el 33.7 % y 53.7 %.

Cuadro 37. Comparación de resultados para Ru mediante ecuación del EurOtop 2018.

Condición	1:2 coraza de cubos			1:2 coraza de rocas			1:2.5 coraza de cubos			1:2.5 coraza de rocas		
Tipo de oleaje	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Ru 2% calc.	12.07	11.40	13.23	12.07	11.40	13.23	9.65	9.12	10.58	9.65	9.12	10.58
Ru 2% regist.	5.64	5.28	6.66	6.12	5.82	6.84	5.88	5.10	6.48	5.94	5.16	7.02

* calc.: calculado.

** regist.: registrado.

4.7. Validación de hipótesis de equivalencia

El oleaje con el que se trabaja corresponde a un oleaje del tipo irregular; no obstante, se busca aplicar una metodología de estimación de Ru y Rd que se estableció dirigido a condiciones de oleaje regular. Debido a ello, se debe validar la metodología actualmente utilizada aplicando la hipótesis de equivalencia.

Se corrieron varias condiciones de oleaje regular, específicamente 78 combinaciones de H y T en las cuales se midieron 5 Ru y 5 Rd en cada una de dichas combinaciones. Posteriormente, se promedian esos 5 registros y se obtiene un Ru y Rd promedio para cada combinación. Los resultados de este procedimiento se presentan en el Cuadro 38, en cuanto a los ascensos máximos, mientras que para los descensos máximos se muestran en el Cuadro 39.

Cuadro 38. Medición en metros de Ru para diferentes combinaciones de altura de ola y período de ola.

T (s) \ H(m)	0.90	1.50	2.10	2.70	3.30	3.90
7.50	0.720	1.275	1.680	2.295	3.225	4.005
8.70	0.795	1.365	1.800	2.490	3.480	4.260
9.85	0.825	1.425	1.920	2.700	3.660	4.440
11.00	0.894	1.470	2.115	3.000	3.915	4.755
12.20	0.915	1.500	2.280	3.390	4.260	4.965
13.35	0.951	1.740	2.640	3.600	4.725	5.715
14.50	0.990	1.800	2.685	3.735	4.860	5.790
15.70	1.035	1.995	2.910	3.810	4.890	5.850
16.85	1.080	2.025	3.150	4.260	5.340	6.420
18.00	0.786	2.145	3.435	4.605	5.565	6.495
19.20	1.065	2.160	3.480	4.785	6.045	6.855
20.35	1.110	2.190	3.660	5.070	6.210	6.960
21.50	1.193	2.295	3.750	5.183	6.420	7.185

Cuadro 39. Medición en metros de Rd para diferentes combinaciones de altura de ola y período de ola.

T (s) \ H(m)	0.90	1.50	2.10	2.70	3.30	3.90
7.50	0.405	0.540	0.510	0.510	0.495	0.525
8.70	0.465	0.615	0.630	0.630	0.585	0.645
9.85	0.486	0.696	0.765	0.765	0.735	0.750
11.00	0.525	0.750	0.870	0.915	0.990	1.080
12.20	0.585	0.840	1.140	1.320	1.290	1.290
13.35	0.600	0.900	1.230	1.470	1.575	1.575
14.50	0.615	0.915	1.320	1.575	1.590	1.590
15.70	0.654	1.005	1.395	1.605	1.620	1.620
16.85	0.639	1.080	1.485	1.680	1.785	1.695
18.00	0.681	1.140	1.530	1.695	1.800	1.695
19.20	0.702	1.170	1.545	1.680	1.785	1.725
20.35	0.750	1.140	1.515	1.680	1.758	1.698
21.50	0.735	1.193	1.545	1.680	1.688	1.740

Se tomó uno de los casos analizados en este experimento, específicamente la corrida del oleaje representativo tipo 3 reproducido en el rompeolas de pendiente 1V:2.5H y con coraza de rocas, con la finalidad de clasificar las olas H y T en conjuntos en los intervalos de olas regulares establecidos anteriormente.

Una vez clasificadas cada una de las olas que componen ese tipo de oleaje irregular, se dividen por la cantidad total de olas y de esa forma se puede obtener la ocurrencia porcentual de cada intervalo de H y T conjuntos. Los resultados son presentados en el Cuadro 40.

Cuadro 40. Ocurrencia porcentual de cada tipo de ola en un oleaje representativo tipo 3, bajo pendiente 1V: 2.5H y coraza de rocas.

T (s) \ H(m)	0.90	1.50	2.10	2.70	3.30
7.50	5.15	1.59	0.25	0.12	0.00
8.70	3.43	2.57	0.74	0.12	0.12
9.85	4.41	4.04	1.35	0.37	0.00
11.00	5.15	5.88	2.82	1.47	0.61
12.20	3.55	7.11	3.80	2.08	0.74
13.35	1.96	3.92	4.04	2.45	1.59
14.50	2.33	3.31	2.33	1.72	0.74
15.70	0.86	1.72	1.47	0.86	0.25
16.85	1.10	0.61	0.49	0.98	0.25
18.00	1.23	1.59	0.74	0.12	0.12
19.20	0.37	0.86	0.74	0.25	0.00
20.35	0.25	0.61	0.25	0.12	0.25
21.50	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00

Una vez calculada la ocurrencia de cada tipo conjunto de H y T, se tabula en conjunto con los resultados de Ru presentados en el Cuadro 38 con la finalidad de calcular la probabilidad acumulada de los Ru medidos (ver Figura 60).

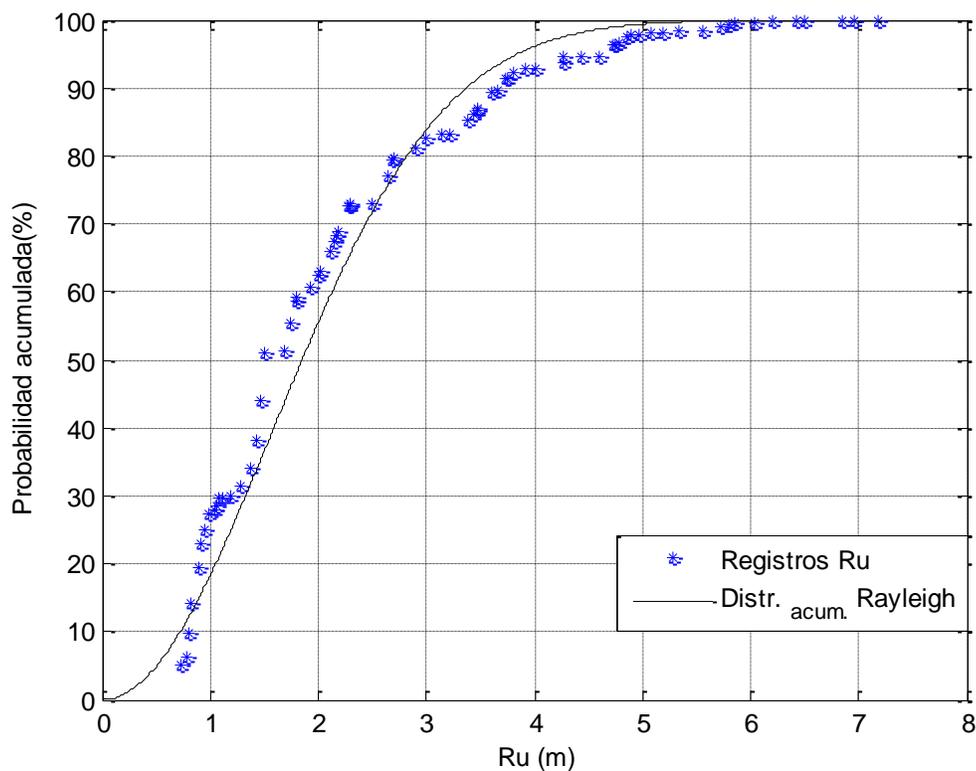


Figura 60. Probabilidad acumulada del Ru relacionado con la validación de la hipótesis de equivalencia.

Con el fin de realizar la validación de la hipótesis de equivalencia se han tomado los resultados de la medición del R_d en el rompeolas bajo la condición de oleaje bimodal del tipo 2 con un rompeolas de pendiente 1V: 2.5H y con coraza de rocas, tal y como se mostró en el Cuadro 24.

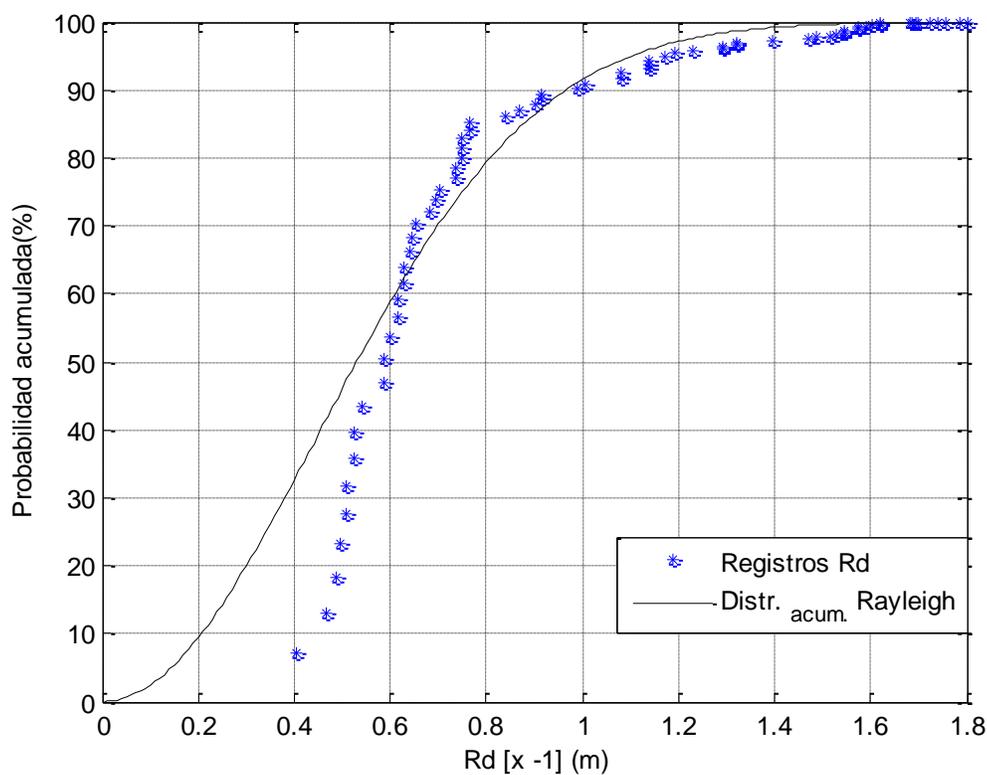
El Cuadro 41 presenta los resultados comparativos entre los estadísticos de Ru evaluados. Se dan diferencias relativas porcentuales menores al 10 % para los estadísticos de Ru estudiados, a excepción del $Ru_{1/3}$ que presentan una diferencia relativa del 50 %.

Cuadro 41. Comparación de resultados de Ru al aplicar hipótesis de equivalencia

Parámetro	Registro en experimento* (m)	Hipótesis de equivalencia (m)	Diferencia relativa (%)
Ru _m	3.00	3.21	7.00
Ru _{1/3}	3.24	4.86	50.00
Ru _{2%}	7.04	7.05	0.14
Ru _{1%}	7.61	7.08	6.96

* Se mencionan los resultados bajo el oleaje representativo tipo 1 (unimodal).

De manera similar, se aplica este procedimiento para conocer la probabilidad acumulada de los Rd del experimento estudiado en la validación de la hipótesis de equivalencia. El resultado se presenta en la Figura 61.



Nota: $[x -1]$: valores del eje R_d multiplicada por -1.

Figura 61. Probabilidad acumulada del R_d relacionado con la validación de la hipótesis de equivalencia.

Al comparar los estadísticos $Rd_{1/3}$ y R_m se halla que la hipótesis de equivalencia aproxima el resultado de manera aceptable, bajo diferencias relativas porcentuales menores al 20 %, tal y como se indica en el Cuadro 42.

Cuadro 42. Comparación de resultados de Rd al aplicar hipótesis de equivalencia

Parámetro	Registro en experimento* (m)	Hipótesis de equivalencia (m)	Diferencia relativa (%)
$Rd_{1/3}$	-1.80	-1.60	11.11
Rd_m	-1.72	-1.40	18.60

* Se mencionan los resultados bajo el oleaje representativo tipo 1 (unimodal).

En general, respecto a la verificación de la hipótesis de equivalencia, se hallaron resultados cercanos o menores a un 20 % en su mayoría, tanto para Ru como para Rd .

La teoría indica que la aplicación de la hipótesis de equivalencia puede ser utilizada bajo oleaje irregular basándose en principios de probabilidad para oleaje regular, no obstante; para el caso de $Ru_{1/3}$ no funciona adecuadamente.

4.8. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en este capítulo que describe la ejecución del modelo físico para varias condiciones representativas de oleaje y la evaluación de los resultados entre el cálculo y estimación a través del modelado físico del Ru y Rd , se concluye que:

- Los 25 minutos durante los cuales se reprodujo la simulación física para cada uno de los 3 oleajes representativos se considera como un tiempo suficiente para asegurar una correcta estadística para la estimación de los parámetros $Ru_{1/3}$, Ru_m , Ru_{rms} , $Ru_{1\%}$, $Ru_{2\%}$, $Ru_{5\%}$, $Ru_{10\%}$, así como $Rd_{1/3}$, Rd_m y Rd_{rms} .
- El uso de videocámaras de alta resolución y el post procesamiento de imágenes conforman una herramienta adecuada y de alta fiabilidad de los registros de Ru y Rd .
- De acuerdo con las mediciones de Ru en la experimentación física se concluye que, independientemente del tipo representativo de oleaje, bajo una misma pendiente de

talud se dan Ru mayores sobre la coraza de rocas que para los Ru registrados en coraza de cubos, como era de esperarse.

- De acuerdo con los resultados del experimento físico se concluye que los estadísticos del Ru bajo el oleaje representativo tipo 3 son superiores que para los estadísticos estimados bajo los otros dos tipos de oleaje representativos.
- De acuerdo con los resultados de los factores de agrupamiento calculados, se concluye que el oleaje de los estados de mar que superan el umbral del 98 % de probabilidad de excedencia de H_{m0} presenta un agrupamiento normal.
- La técnica de superposición de espectros JONSWAP para ajustarse a un espectro bimodal se considera adecuada, siempre y cuando se mantenga la misma energía de ambos espectros y que relaciones entre los picos primario y secundario de energía del espectro medido y el parametrizado creado sean lo más parecidas en magnitud.
- La ecuación propuesta por Losada M. y Giménez-Curto L. sobreestima los estadísticos del Ru para las configuraciones de rompeolas con coraza hecha de rocas, tanto para la pendiente 1V:2H y 1V:2.5H con diferencias relativas porcentuales ampliamente superiores a 5 %, bajo los 3 tipos de oleaje representativos.
- La ecuación propuesta por Losada M. y Giménez-Curto L. sobreestima el parámetro $Rd_{\text{máx}}$ con diferencias relativas porcentuales superiores a 5 % en todas las configuraciones de rompeolas ensayadas.
- Las ecuaciones propuestas por Van Der Meer para la estimación del Ru al 1 %, 2 %, 5 % y 10 %, de probabilidad de excedencia, sobreestiman los resultados de los Ru ensayados en el laboratorio, con diferencias relativas porcentuales ampliamente superiores a 5 % en la mayoría de las configuraciones de rompeolas ensayadas.
- La ecuación planteada en el manual EurOtop 2018 para el cálculo del Ru al 2 % de probabilidad de excedencia, sobreestima los resultados de los Ru ensayados en el laboratorio, con diferencias relativas porcentuales ampliamente superiores a 5 % en todas las configuraciones de rompeolas ensayadas.
- El oleaje representativo tipo 1 produce descensos máximos de mayor magnitud que los producidos por los otros dos tipos de oleaje representativos.

- Para los ensayos realizados de oleaje irregular unimodal y bimodal se valida la hipótesis de equivalencia para dos condiciones de oleaje irregular, bajo diferencias relativas porcentuales menores al 15 % tanto para el caso de los estadísticos Ru_m , $Ru_{2\%}$ y $Ru_{1\%}$, y Rd_s .
- Los efectos de escala en los experimentos realizados se deben principalmente a que no se logra cumplir la semejanza dinámica parcial de Froude para todas las condiciones de oleaje ensayadas.

5. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo consistió en la evaluación de los parámetros de R_u y R_d estimados mediante una serie de expresiones matemáticas bajo las condiciones de mayor ocurrencia en el litoral Pacífico costarricense.

Para cumplir con los objetivos planteados, primeramente se realizó una etapa de caracterización del oleaje que arriba a las costas del Pacífico costarricense y, posteriormente, se crearon espectros de densidad de energía del oleaje representativos. Por último, se realizaron los ensayos en modelo físico a escala reducida.

De acuerdo con el desarrollo de los capítulos que abarca este trabajo, se enlistan una serie de conclusiones:

- La dirección predominante del oleaje que arriba a las costas del litoral Pacífico de Costa Rica es sur-suroeste, en aproximadamente el 65 % del tiempo, y el resto del tiempo proviene de la dirección suroeste.
- Según los registros de oleaje cuyos espectros de energía fueron analizados visualmente, se establece que el oleaje que arriba a las costas del Pacífico costarricense cuenta un alto porcentaje de oleaje multimodal: un 32.6 % corresponde a espectros de energía tipo 2 y un 10.9 % corresponde a un oleaje con espectros de energía tipo 3.

El espectro de energía tipo 4 presenta una ocurrencia de un 15.9 %; un 3.6 % de los estados de mar registrados son de espectros de energía tipo 5; un 19.1 % corresponde a un oleaje con espectros tipo 6; y oleaje con espectros de más de 3 picos presentan una ocurrencia del 0.4 %. Durante el periodo de mediciones de oleaje se encontró que un 17.4 % corresponde a oleaje cuyos espectros son unimodales.

- De acuerdo con los estados de mar que superan el umbral del 98 % de probabilidad de excedencia de H_{m0} , se halló un comportamiento de energía espectral tal que en 23.5 % corresponde a espectros del tipo 1; un 45 % corresponde a oleaje con espectros del tipo 2; el oleaje con espectros del tipo 3 presenta una ocurrencia del 13 %. Asimismo, un 12 % de los espectros de energía de la selección son del tipo 4; y un 6.5 % correspondió a espectros de energía del tipo 6.

- Para los estados de mar que superan el umbral del 98 % de probabilidad de excedencia de H_{m0} , existe una importante presencia de espectros frecuenciales de energía bimodales, que se aproximan a 58 %, mientras que un 23.5 % corresponde a espectros de energía unimodales.
- Con base en la clasificación visual de la totalidad de espectros de energía y los espectros de energía cuya H_{m0} supera el umbral del 98 % de probabilidad de excedencia se encontró que existe la predominancia de los modelos 1, 2 y 3. Además se puede concluir que los espectros modelo 4 y 6 no tiene relevancia en condiciones de oleaje de diseño de obras costeras, pero en si condiciones operativas.
- La técnica de superposición de espectros JONSWAP para ajustarse a un espectro bimodal se considera adecuada, siempre y cuando se mantenga la misma energía de ambos espectros y que relaciones entre los picos primario y secundario de energía del espectro medido y el parametrizado creado sean lo más parecidas en magnitud.
- De acuerdo con los resultados de los factores de agrupamiento calculados, se concluye que el oleaje de los estados de mar que superan el umbral del 98 % de probabilidad de excedencia de H_{m0} presenta un agrupamiento normal.
- Los 25 minutos durante los cuales se reprodujo la simulación física para cada uno de los 3 oleajes representativos se considera como un tiempo suficiente para asegurar una correcta estadística para la estimación de los parámetros $Ru_{1/3}$, Ru_m , Ru_{rms} , $Ru_{1\%}$, $Ru_{2\%}$, $Ru_{5\%}$, $Ru_{10\%}$, así como $Rd_{1/3}$, Rd_m y Rd_{rms} .
- El uso de videocámaras de alta resolución y el post procesamiento de imágenes conforman una herramienta adecuada y de alta fiabilidad de los registros de Ru y Rd .
- De acuerdo con las mediciones de Ru en la experimentación física se concluye que, independientemente del tipo representativo de oleaje, bajo una misma pendiente de talud se dan Ru mayores sobre la coraza de rocas que para los Ru registrados en coraza de cubos, como es de esperar.
- De acuerdo con los resultados del experimento físico se concluye que los estadísticos del Ru son superiores bajo el oleaje representativo tipo 3 que para los

estadísticos estimados producto de la reproducción de los otros dos tipos de oleaje representativos.

- La ecuación propuesta por Losada M. y Giménez-Curto L. sobreestima los estadísticos del Ru para las configuraciones de rompeolas con coraza hecha de rocas, tanto para la pendiente 1V:2H y 1V:2.5H con diferencias relativas porcentuales ampliamente superiores a 5 %, bajo los 3 tipos de oleaje representativos.
- La ecuación propuesta por Losada M. y Giménez-Curto L. sobreestima el parámetro $Rd_{\text{máx}}$ con diferencias relativas porcentuales superiores a 5 % en todas las configuraciones de rompeolas ensayadas.
- Las ecuaciones propuestas por Van Der Meer para la estimación del Ru al 1 %, 2 %, 5 % y 10 %, de probabilidad de excedencia, sobreestiman los resultados de los Ru ensayados en el laboratorio, con diferencias relativas porcentuales ampliamente superiores a 5 % en todas las configuraciones de rompeolas ensayadas.
- La ecuación planteada en el manual EurOtop 2018 para el cálculo del Ru al 2 % de probabilidad de excedencia, sobreestima los resultados de los Ru ensayados en el laboratorio, con diferencias relativas porcentuales ampliamente superiores a 5 % en todas las configuraciones de rompeolas ensayadas.
- El oleaje representativo tipo 1 produce descensos máximos de mayor magnitud que los producidos por los otros dos tipos de oleaje representativos.
- Para los ensayos realizados de oleaje irregular unimodal y bimodal se valida la hipótesis de equivalencia para dos condiciones de oleaje irregular, en su mayoría bajo diferencias relativas porcentuales menores al 20 % tanto para el caso de los estadísticos Ru_m , $Ru_{2\%}$ y $Ru_{1\%}$. y $Rd_{1/3}$.
- Los efectos de escala en los experimentos realizados se deben principalmente a que no se logra cumplir la semejanza dinámica parcial de Froude para todas las condiciones de oleaje ensayadas.

5.1. Recomendaciones y futuras líneas de investigación

En función de las conclusiones expresadas previamente, se evaluaron posibles variables que pueden afectar directa o indirectamente el diseño funcional de un rompeolas en talud, así como la reproducción a escala de condiciones específicas de oleaje. Con la finalidad de tomar en cuenta dichas variables en líneas de investigación relacionadas al tema, se plantean las siguientes recomendaciones:

- En relación con la definición de los espectros de energía representativos del oleaje que se da en litoral Pacífico costarricense, este trabajo se plantearon condiciones promedio, en su mayoría, para la definición de las frecuencias pico y relaciones de energía entre picos de energía de espectros bimodales.
Se recomienda establecer otro umbral que permita abarcar otras frecuencias pico y relaciones entre picos de energía que complemente la caracterización del oleaje en el Pacífico de Costa Rica.
- Retomar en futuras líneas de investigación los espectros de energía modelo 4, 5 y 6 bajo condiciones de oleaje de diseño y realizar un procedimiento de parametrización similar al que se realiza en este trabajo, y evaluar el impacto de dicho tipo de oleaje en el ascenso y descenso máximos.
- Se recomienda medir la permeabilidad a través del cuerpo del rompeolas para verificar que exista una permeabilidad adecuada.
- Agilizar el post procesamiento de registros de ascensos y descenso máximos mediante una rutina programada a través de algún software que analice una alta cantidad de imágenes de videocámara.
- Considerar en una línea de investigación el planteamiento de una ecuación para la estimación del R_u y R_d adaptada a las condiciones típicas del oleaje característico del Pacífico costarricense.
- Realizar un modelado numérico que sea compatible con las características del modelo físico desarrollado en este trabajo, con la finalidad de evaluar otras variables de interés como la permeabilidad, porcentajes de reflexión de oleaje y disipación de energía, entre otros.

- El intervalo de registros de oleaje se considera aceptable para el análisis realizado en este trabajo, sin embargo; para dar mayor fiabilidad a los estadísticos del oleaje y realizar otras evaluaciones con respecto a condiciones de diseño de obras costeras es recomendable continuar con las mediciones en campo.

6. Referencias consultadas

Para desarrollar este trabajo se consultaron las siguientes fuentes de información:

- Ahrens, J., & Mc Cartney, B. (1975). Wave period effect on the stability of rip-rap. *Proceedings on Civil Engineering in the Oceans. 3rd edition. Vol. 2.*, 1019-1034.
- Alfaro, H. (2017). *Estudio de la Dinámica del oleaje en el litoral Pacífico de Costa Rica: Metodología de regionalización y avances en servicios relativos al clima marítimo*. Tesis doctoral. UNICAN: Santander.
- Alonso-Muñoyerro, M. (2005). Caracterización estadística del oleaje I: Análisis a corto término. En CEDEX, *Master en ingeniería de puertos y costas* (págs. 177-202). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- APM Terminals. (2018). *APM Terminals Latinoamérica*. Obtenido de APM Terminals Website: <http://www.apmterminals.com/es/operations/latin-america/moin/about-us>
- Battjies, J. (1974). *Surf similarity*. Copenhagen: Proc. Conference on Coastal Engineering.
- Burcharth, H. (1979). The effect of wave grouping on On-Shore Structures. *International Conference on Coastal Engineering*, No. 2, pp. 189-199.
- CIRIA, CUR, CETMEF. (2007). *The Rock Manual* (Vol. Chapter 5. Physical processes and design tools). London: C683, CI RIA London.
- Echávez, G. (1996). *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental*. Ciudad de México: Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Giménez-Curto, L. (1980). *Comportamiento de los diques rompeolas bajo la acción del oleaje*. Santander: Tesis doctoral: Universidad de Cantabria.
- GIOC. (2000). *Documento de Referencia* (Vol. 1). Cantabria, España.
- Goda, Y. (1983). Analysis of Wave Grouping and Spectral of Long-travelled Swell. En Y. Goda, *Rept. Port and Harbour Res.* (págs. 3-41).
- Goda, Y. (1985). *Randon seas and design of maritime structures*. Tokio: University of Tokio Press.

- Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures. *Advances Series on Ocean Engineering. Segunda edición. Singapur, World Scientific*, pp 443.
- Govaere, G. (1997). *Acción del oleaje sobre estructuras marítimas no rebasables*. México D.F.: UNAM.
- Guedes, C., & Nolasco, M. (1992). Spectral Modeling of Sea States with multiples wave systems. *ASME. Vol 114.*, 278-284.
- Günbak, A. (1977). Stability of sloping structures in the relation to $e=\tan a/\sqrt{H/L_0}$ risk criteria in design. *Coastal Engineering* (págs. 287-322). Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Günbak, A. (1979). *Rubble mound breakwaters*. Rep. No. 12/77. Trondheim: Division of Port and Ocean Engineering.
- Gutiérrez, R. (2005). Modelos físicos. Fundamento y Consideraciones Generales. En C. d. Públicas, *Máster en Ingeniería de Puertos y Costas* (págs. 1-19). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- Hughes, S. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. Waterways Experiment Station.: World Scientific.
- Hunt, I. (1959). Design of seawalls and breakwaters. Procedures of American Society of Civil Engineers. *Journal of waterways ans harbors division.*, 85(WW3).
- Johnson, R., Mansard, E., & Ploeg, J. (1978). Effects of Wave Gruoping on Breakwater Stability. *16th Ed. International Conference of Coastal Engineering* (págs. 2228-2243). Hamburg: ICCE.
- Kik, R. (2011). *Notional Permeability of breakwaters*. Delft: Delft University of Technology.
- Kobus, H. (1980). *Hidraulic Modelling*. Alemania: International Association for Hydraulic Research.

- Le Méhauté, B. (1976). Similitude in Coastal Engineering. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. ASCE*, 317-335.
- López, F. (2016). *Estimación del factor pico del espectro frecuencial JONSWAP para la costa Pacífico, con base en mediciones de oleaje en Puerto Caldera y Cabo Blanco*. San José : Universidad de Costa Rica.
- Losada, M. (1990). *Recent developments in the design of mound breakwaters*. Gulf Publishing.
- Losada, M., & Giménez-Curto, L. (1979). *The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribaren's number*. Amsterdam: Coastal Engineering Scientific Publishing Company.
- Losada, M., & Giménez-Curto, L. (1981). Flow Characteristics on rough, permeable slopes under wave action. *Coastal Engineering Scientific Publishing Company.*, 187-206.
- Lykke, T., & Frigaard, P. (2014). *Wave Generation in Physical Models: Technical documentation for AwaSys 6*. Aalborg University: DCE-Aalborg University.
- Lykke, T., Meinert, P., & Frigaard, P. (2018). *AwaSys 7: User Manual*. Aalborg: DCE: Aalborg University.
- NOAA. (2019). *National Weather Services: WaveWatch III*. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration of the United States of America: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/>
- NORTEK. (s.f.). *Nortek USA*. Obtenido de Acoustic Wave and Current Profiler AWAC: <http://www.nortekusa.com/lib/brochures/datasheet-awac>
- Pierson, W., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*.

- PROCOMER. (2018). *Exportaciones según medios de transporte en el 2017*. Obtenido de PROCOMER Costa Rica: https://procomer.com/es/estudios/anuario_estadistico_2018
- Puertos del Estado. (2009). *Recomendaciones de Obras Marítimas*. España: Puertos del estado. pp. 136-137.
- Saville, T. (1962). An Approximation of the wave run up frequency distribution. *International Conference on Coastal Engineering. 8th edition*. (Impreso por ASCE).
- Schüttrumpf , H., Van der Meer, J., Kortenhaus, A., Bruce, T., & Franco, L. (2010). *Wave Run-Up and Wave Overtopping at Armored Rubble Slopes and Mounds*. The Netherlands.
- Sierra, J., & Lo Presti, A. (1998). Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular. *Ingeniería del Agua. Vol 5. Num I.*, 23-34.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. México DF: UNAM.
- Technical Advisory Committee on Flood Defence. (2002). *Technical Report Wave Run Up and Wave Overtopping at Dikes*. The Netherlands: Technical Advisory Committee on Flood Defence.
- Thompson, D., & Shuttler , R. (1975). *Riprap design for wind-wave attack*. Wallingford.
- USACE. (1975). *Shore Protection Manual (Vol. II)*. Virginia: Department of the Army of US Army Corps of Engineers.
- USACE. (1984). *Shore Protection Manual*. Washington DC: Department of the Army of US Army Corps of Engineers.
- Van der Meer, J. (1988). *Rock slope and gravel beaches under wave attack*. The Netherlands: Delf Hydraulics Publications no. 396.

- Van Der Meer, J. (1992). Wave run up on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 534-550. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:5(534)
- Van der Meer, J., Allsop, N., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Zanuttigh, B. (2018). *EurOtop 2018*. Obtenido de Manual on wave overtopping of sea defences and related structures.: www.overtopping-manual.com
- Van Gent, M. (1995). *Wave Interaction with Permeable Coastal Structures*. Delft: Delft University of Technology.

Apéndice A. Probabilidad de no excedencia, periodo de retorno y riesgo para los estados de mar con H_{m0} igual a 3.4 m.

La probabilidad de excedencia está dada por la siguiente expresión:

$$P = 1 - P_n$$

donde P_n corresponde a la probabilidad de no excedencia, la cual es 0.994, de acuerdo con el gráfico de probabilidad acumulada de H_{m0} . Como resultado se obtiene una probabilidad de excedencia igual a 0.006. El periodo de retorno TR asociado a la probabilidad de excedencia se calcula de la siguiente manera:

$$TR = \frac{1}{P} = \frac{1}{0.006} = 166.7 \text{ años}$$

De acuerdo con las normas Recomendaciones de Obras Marítimas (Puertos del Estado, 2009), la vida útil para una estructura de rompeolas cuyo índice de repercusión económica es alto corresponde a 50 años. El riesgo “r” se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r = 1 - (1 - P)^N$$

$$r = 1 - (1 - 0.006)^{50} = 0.2598$$

Por lo tanto, existe un 25.98 % de probabilidad de que se alcance la condición de oleaje H_{m0} de 3.4 m en los 50 años de vida útil de la estructura.

Apéndice B. Diferencias relativas porcentuales para en el cálculo del Ru mediante ecuación de Losada y Giménez-Curto.

Condición	1:2 coraza de cubos			1:2 coraza de rocas			1:2.5 coraza de cubos			1:2.5 coraza de rocas		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
$Ru_{1/3}$	7.5	-11.7	12.8	-50.3	-33.8	-23.6	9.7	2.9	17.2	-49.7	-57.1	-28.2
$Ru_{máx}$	12.5	-0.3	26.7	-44.6	-65.9	-23.0	19.2	-8.1	26.7	-37.3	-71.9	-18.8

Nota: El signo negativo en el resultado indica que el estadístico obtenido del modelo físico es menor que el estadístico estimado con la ecuación evaluada.

