



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos*



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Soluciones híbridas como medidas de protección costera: estudio de la interacción de un campo de vegetación y una pendiente impermeable

Trabajo realizado por:

Luis Felipe Alfaro Corrales

Dirigido:

María Emilia Maza Fernández

Titulación:

**Máster Universitario en
Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2021

TRABAJO FINAL DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Cira, mi papá Jorge y mis hermanos Igna y Jo por estar siempre.

A mis amigos cercanos, que a pesar de la distancia siempre han estado presentes y dispuestos a compartir tiempo e ideas. A Richard, Juan, Nati, Hugo, Pablo, Mónica, Diego, Daniel, Sofía, Coco y Pater.

A la gente de IMARES en especial a Henry y Georges por guiarme, aconsejarme y siempre tratarme de igual a igual.

A mis compañeros de Máster y amigos en Santander. A Manuel por su amistad y compañía.

A los profesores del Máster. En especial a María, Javier y Gabo, personas muy humildes, por su ayuda y confianza.

A la Fundación Carolina por darme la oportunidad de crecer en mi carrera profesional.

Contenidos

1. Introducción.....	1
1.1. Estado del arte.....	2
1.1.1. Soluciones híbridas para protección costera.....	2
1.1.2. Protección costera mediante vegetación.....	3
1.1.3. Run-up en pendientes impermeables.....	5
1.1.4. Atenuación de altura de ola en campos de vegetación	8
1.1.5. Coeficiente de reflexión.....	9
1.2. Objetivos.....	10
1.2.1. Objetivo general	10
1.2.2. Objetivos específicos	10
1.3. Metodología.....	10
2. Modelado numérico	13
2.1. Condiciones hidrodinámicas.....	13
2.2. Características del campo de vegetación	17
2.3. Dominio espacial	21
2.4. Mallado numérico	21
2.5. Análisis de sensibilidad de resultados	24
2.5.1. Número de olas.....	24
2.5.2. Aleatoriedad de series temporales	27
2.6. Validación del canal numérico	30
2.7. Resumen de casos	32
3. Discusión de resultados.....	34
3.1. Atenuación de la altura de ola	34

3.2. Run-up	43
3.3. Verificación de formulaciones del run-up relativo.....	47
4. Conclusiones	49
Referencias	52

Lista de Figuras

Figura 1. Campo de vegetación <i>Spartina Anglica</i> (a) emergida (b) sumergida.	5
Figura 2. Esquema de Run-up sobre pendiente impermeable. Fuente: (Eurotop, 2018).	6
Figura 3. Run-up en función del parámetro de rotura para pendientes impermeables. Fuente: (Eurotop, 2018).....	8
Figura 4. Esquema de metodología del trabajo de investigación.....	12
Figura 5. Esquema de configuraciones de modelado en canal numérico de IH2VOF ...	18
Figura 6. Dominio geométrico con campo de vegetación de 12.0m	21
Figura 7. Discretización del mallado para el oleaje 4	22
Figura 8. Forzamiento para análisis de sensibilidad de número de olas	25
Figura 9. Series temporales e histogramas de run-up para forzamientos de 1500, 1000 y 500 olas	26
Figura 10. Forzamiento para análisis de sensibilidad de aleatoriedad de superficie libre	28
Figura 11. Series temporales de Run-up en función de aleatoriedad de series de forzamiento.....	29
Figura 12. $Ru_{2\%}$ relativo en función del parámetro de rotura en rampa impermeable	31

Figura 13. Esquema de resumen de configuraciones simuladas..... 32

Figura 14. Atenuación de altura de ola, comparativa solución verde y solución híbrida, oleaje 1 a)veg1 y veg4, b)veg2 y veg5, c)veg3 y veg6..... 36

Figura 15. Comparativa de atenuación de altura de ola en función de longitud de campo para el oleaje 1 para solución híbrida..... 37

Figura 16. Evolución de altura de ola para los oleajes a)5 y b)6..... 38

Figura 17. Evolución de altura de ola para oleajes a)10, b)12, c)13 y d)14..... 39

Figura 18. Evolución de altura de ola para oleajes a)10, b)11 40

Figura 19. Evolución de altura de ola para estados de mar a)1, b)5, c)10 42

Figura 20. Run-up en función de parámetro de rotura para casos con vegetación 48

Lista de Tablas

Tabla 1. Casos de oleaje base seleccionados para ensayos numéricos 13

Tabla 2. Estados de mar seleccionados para propagaciones numéricas y parámetros adimensionales..... 15

Tabla 3. Características geométricas consideradas para la *Spartina Anglica* 17

Tabla 4. Coeficientes de arrastre de la vegetación para cada estado de mar simulado 20

Tabla 5. Resumen de discretizaciones de malla para estados de mar simulados..... 23

Tabla 6. Resultados de Run-up según número de olas del forzamiento 25

Tabla 7. Resultados de Run-up según la aleatoriedad de serie de forzamiento 27

Tabla 8. Resultados de run-up y parámetro de rotura para validación numérica 30

Tabla 9. Evolución de altura de ola y disipación del campo de vegetación 34

Tabla 10. Run-up y K_{RU} de las configuraciones de solución híbrida..... 43

RESUMEN

Título:	Soluciones híbridas como medida de protección costera: estudio de la interacción de un campo de vegetación y una pendiente impermeable
Autor:	Luis Felipe Alfaro Corrales
Directora:	María Emilia Maza Fernández
Fecha:	Septiembre, 2021
Palabras clave:	Vegetación, Protección Costera, Run-up, Atenuación de oleaje

Este trabajo caracteriza soluciones híbridas para protección costera compuestas por un campo de vegetación y una pendiente impermeable mediante el modelo IH2VOF. Previamente a las propagaciones de la solución híbrida, se estudia la solución convencional y la solución verde por separado para estudiar run-up y atenuación de altura de ola a lo largo del campo, respectivamente.

En primer lugar, la formulación para run-up relativo en rampas impermeables de (Eutorop, 2018) ha sido utilizada para validar el set-up numérico de la solución convencional. Además, se estudia el run-up que sirve como referencia para las comparativas con la solución híbrida. Para este caso, se seleccionó el método de (Mansard & Funke, 1980) para obtener la altura de ola incidente a pie de pendiente. Posteriormente, con el objetivo de analizar la atenuación a lo largo del campo de vegetación, se ha modelado la solución verde con campos de vegetación con características de *Spartina Anglica* con altura de vegetación constante de 0.50 m y un contorno absorbente detrás de la vegetación. Con estas ejecuciones se encontró la altura de ola tras el campo de vegetación, que se considera la altura de ola a pie de estructura en la evaluación posterior de soluciones híbridas.

Seguidamente, se procede a modelar diferentes casos de solución híbrida. Se ejecutan varios oleajes representativos de condiciones realistas encontradas en campos de

marismas, tres longitudes de campo de vegetación, 12.0, 10.0 y 8.0 m, y tres calados, 0.30, 0.50 y 0.70 m.

Los resultados muestran que, la altura de ola disminuye con campos de vegetación más largos. Conforme disminuye el peralte, el coeficiente de atenuación de altura de ola también disminuye. Los patrones de reflexión observados en las soluciones híbridas no presentan diferencias notables en función de la longitud del campo de vegetación. No obstante, son más marcados conforme aumenta el periodo. Por otra parte, conforme aumenta el peralte), disminuye la reducción porcentual del run-up producida por el campo de vegetación. Por otro lado, a medida que disminuye el calado y la vegetación queda emergida esta reducción de run-up porcentual es mayor. Conforme aumenta la longitud de campo, se tienen menores valores de run-up debido a la mayor atenuación del oleaje producida por el campo. Finalmente se obtiene que, la formulación del (Eurotop, 2018) para el cálculo del run-up relativo sobreestima dicho valor en casos de solución híbrida en los que la vegetación está emergida o a nivel, mientras que para vegetación sumergida, este run-up relativo sí puede estimarse con dicha fórmula.

ABSTRACT

Title:	Hybrid solutions as coastal protection measures: a study of the interaction of a vegetation field and an impermeable slope
Author:	Luis Felipe Alfaro Corrales
Supervisor:	María Emilia Maza Fernández
Date:	September, 2021
Key words	Vegetation, Coastal Protection, Run-up, Wave Attenuation

This research characterizes hybrid solutions as a coastal protection measure defined as a combination of a vegetation field and an impermeable slope using IH2VOF model. Before the hybrid solution propagations, conventional and green solutions were studied separately to study wave run-up height and wave attenuation respectively.

First, the relative wave run-up height for impermeable slopes formulation from (Eurotop, 2018) has been used to validate the numerical set-up from conventional solution. Besides, wave run-up height was obtained as the reference to compare with hybrid solution. (Mansard&Funke, 1980) method has been selected to obtain the incident wave height on the slope. Then, to analyze the decay in wave height over the salt marsh field, the green solution using *Spartina Anglica* features with 0.50 m constant stem height and absorbent boundary behind vegetation has been modeled. From this, wave height at the end of the field was found and it is considered the same as the incident wave height on the slope which can be used for relative wave run-up height in hybrid solution cases. The simulations were performed including representative wave conditions from estuaries, three vegetation field lengths, 12.0, 10.0 and 8.0 m, and three depths, 0.30, 0.50 and 0.70 m.

The outcomes show that, larger vegetation fields reduce wave height. Also, lower wave steepness values reduce the wave height attenuation coefficient. The reflective oscillations observed in hybrid solutions as a function of vegetation field length do not

show significant differences. However, these oscillations are clearer for longer periods. Additionally, higher ratio of stem to water depth increases the percentual reduction of wave run-up height. Larger vegetation fields reduce wave run-up height. Finally, relative wave run-up height is overestimated by (Eurotop, 2018) formulation for emergent or edge water-level vegetation from hybrid solution, whereas submerged vegetation is accurately estimated using those equations.

1. Introducción

Las soluciones híbridas para protección costera combinan las obras de infraestructura rígidas, como diques, y ecosistemas costeros, como los campos de vegetación. Esto resulta en una buena estrategia puesto que la vegetación proporciona una mejora en la integridad de la línea de costa a largo plazo ya que se representan alternativas dinámicas y autoadaptativas siendo capaces de cambiar conforme varían las condiciones climáticas, como por ejemplo, el incremento del nivel del mar debido al cambio climático.

Los campos de vegetación funcionan como protección costera natural. Tienen la capacidad de atenuar la energía del oleaje. Esta atenuación del oleaje puede afectar al dimensionamiento de un dique que se encuentre tras el campo de vegetación, la pendiente y la protección en berma de pie, ya que modifica las condiciones de diseño y por lo tanto, resulta beneficioso para la estabilidad del dique (Van Loon-Steensma & Kok, 2016).

En los últimos años, se ha incrementado el número de estudios que se centran en analizar el papel que tienen los campos de vegetación para la estabilización de la línea de costa y la protección de las comunidades costeras. Sin embargo, todavía existe un amplio panorama por investigar referente a la cuantificación del efecto que tienen los mencionados campos de vegetación en la atenuación del oleaje (Gedan et al., 2011).

Dentro de las utilidades que brinda el uso de estas alternativas se encuentran: reducción de la erosión, protección ante tsunamis y aumentos de marea meteorológica. Consecuentemente se ha demostrado que la presencia de vegetación reduce la altura de ola, la afectación sobre terrenos colindantes al mar y por lo tanto, el riesgo de pérdida de vidas humanas.

El diseño de diques se realiza en función de las condiciones de oleaje que caracterizan el sitio. Se analizan parámetros como el run-up o el rebase admisible dependiendo del valor económico y el uso que tengan las facilidades costeras abrigadas para dimensionar la obra.

Con respecto a la vegetación en zonas estuarinas es esperable encontrar diferentes especies con características biofísicas distintas. La distribución espacial de los campos de vegetación influye en la atenuación del oleaje. Se ha reportado que dicha distribución espacial y distanciamiento entre grupos de vegetación afectan la interacción en zonas costeras creando áreas con diferentes condiciones de oleaje (Chembolu et al., 2019).

En consecuencia, con los antecedentes mencionados y para dar claridad al papel que juegan las soluciones híbridas como medidas de protección costera, se plantea este estudio para determinar cómo el ecosistema influye en el diseño de la estructura convencional en función de sus características. Para ello, se utiliza el modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) IH2VOF que resuelve las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

El análisis numérico se realiza considerando una solución híbrida simplificada que consta de una rampa impermeable y diferentes longitudes de campo de vegetación, considerando vegetación intermareal de zonas templadas. Dichas tipologías de solución híbrida se simulan considerando diferentes condiciones de oleaje representativas de condiciones medias que se producen en zonas de marisma.

Las mencionadas simulaciones numéricas forman parte de un estudio preliminar que servirá como prediseño de unos ensayos de laboratorio que se realizarán en el tanque de oleaje direccional de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.

1.1. Estado del arte

En esta sección se presenta la teoría básica en la que se apoya este trabajo. Se realiza una descripción de los conceptos pertinentes al tema de investigación de acuerdo con la revisión bibliográfica consultada.

1.1.1. Soluciones híbridas para protección costera

Históricamente, el problema de la protección costera ha seguido la tendencia de utilizar obras ingenieriles como la construcción de diques. Este enfoque puede impactar negativamente los hábitats ecológicos locales y circundantes y además puede no

representar la solución óptima y más sostenible. Por lo anterior, la utilización de ecosistemas ha ganado interés en los últimos años, ya que existe una necesidad por la innovación, sostenibilidad y reducción de los costos de diseño (Borsje et al., 2011).

Las soluciones de protección costera que combinan ecosistemas se mencionan cada vez más como complemento de las obras convencionales de protección costera, como pueden ser los diques rompeolas, con el objetivo de conseguir diseños más eficientes. Como estrategia de adaptación a las amenazas del cambio climático, las soluciones híbridas brindan una alternativa flexible, económica y complementan la infraestructura convencional (Jones et al., 2012).

En la actualidad, se considera una opción a priorizar aquella que migra de la obra gris convencional hacia soluciones híbridas que sirven como defensa costera con beneficios tanto ecológicos como económicos. Los diferentes ecosistemas costeros como arrecifes de coral, pastos marinos, manglares o marismas, cumplen una importante función de protección costera. Éstos tienen el potencial de ser utilizados para el amortiguamiento de las mareas meteorológicas, oleaje por viento de corto periodo e inundaciones producidas por tormentas y huracanes (Shores, 2015).

1.1.2. Protección costera mediante vegetación

Los campos de vegetación en zonas costeras han sido altamente estudiados en los últimos años debido a los beneficios que proveen para la protección contra las acciones del oleaje. Disipan altura de ola, reducen la velocidad del flujo, disminuyen la turbulencia, atrapan sedimento limitando la resuspensión del mismo y reducen la erosión de la línea costa (Maza et al., 2013).

La atenuación por vegetación depende de características de la planta como geometría, relación de sumergencia, densidad, módulo de elasticidad y al mismo tiempo de los parámetros del oleaje como altura de ola, periodo y del calado. No obstante, al existir gran variedad de especies y condiciones hidrodinámicas, dependiendo del sitio, se hace más complicada la generalización de los resultados de investigaciones relacionadas con el tema.

El modelado de la vegetación depende de las propiedades geométricas y biomecánicas de la planta. Sin embargo, en un gran número de estudios la vegetación ha sido simplificada a cilindros rígidos para facilitar el estudio de su interacción con el flujo.

Al mismo tiempo, se ha trabajado con modelos que resuelven las ecuaciones RANS para resolver la interacción del oleaje y la vegetación con un alto grado de detalle. Este es el caso del modelo IH2VOF en el que se implementó un módulo de vegetación en el que se considera una fuerza de arrastre en la ecuación de momento para modelar la atenuación de oleaje producida por un campo de vegetación (Maza et al., 2013). Esta fuerza de arrastre es:

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot a \cdot N \cdot \bar{u} \cdot |\bar{u}| \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, a es el área frontal de la planta, C_D es el coeficiente de arrastre, N es el número de plantas por unidad de área y \bar{u} es la velocidad del flujo.

Una de las especies más comunes en zonas estuarinas en las zonas templadas es la *Spartina Anglica*. Por ello, se selecciona esta especie para definir los parámetros del campo de vegetación que será estudiado en este trabajo.

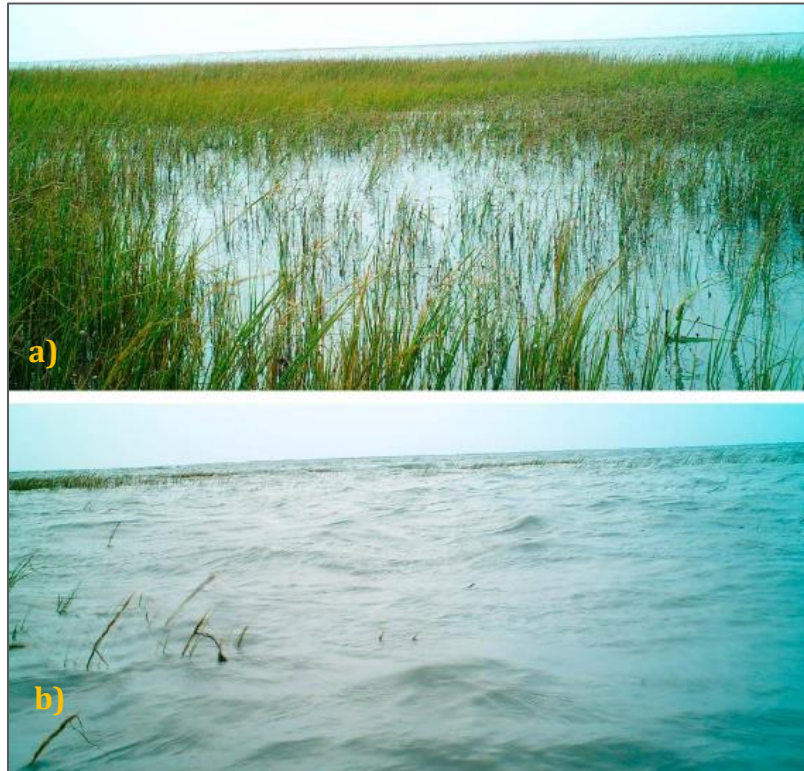


Figura 1. Campo de vegetación *Spartina Anglica* (a) emergida (b) sumergida.

Fuente: (Garzon et al., 2019).

La Figura 1 muestra un campo de *Spartina Anglica* en diferentes condiciones de calado. Esta variable, el calado y por consiguiente el grado de sumergencia del campo, es fundamental en términos de disipación del oleaje. Por ello, se considerarán diferentes condiciones de sumergencia en el presente estudio.

Para considerar la sumergencia de la vegetación, se define el parámetro de relación de sumergencia que corresponde a la relación entre la altura de la planta y el calado.

$$h_r = \frac{l_v}{h} \quad (2)$$

1.1.3. Run-up en pendientes impermeables

El run-up es la distancia vertical desde el punto más alto que alcanza la lámina de agua hasta el nivel medio.

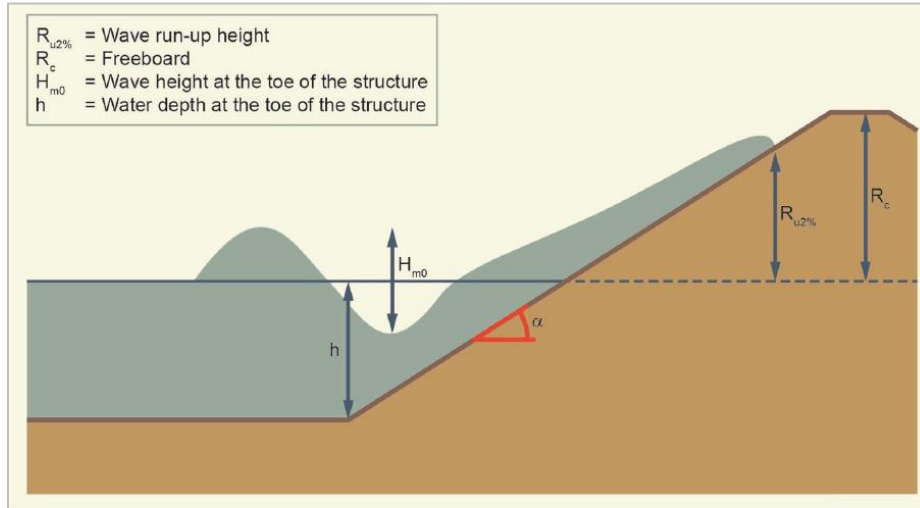


Figura 2. Esquema de Run-up sobre pendiente impermeable. Fuente: (Eurotop, 2018).

La Figura 2 muestra un esquema para representar gráficamente qué es el run-up, h es el calado a pie de estructura, H_{m0} es la altura de ola incidente asociada al momento de orden cero que también se relaciona con altura de ola significativa H_s que es la media del tercio de las olas mayores del estado de mar y R_c es el francobordo del dique. Históricamente los diques se han diseñado utilizando el valor de $Ru_{2\%}$ que se refiere al valor de run-up que es excedido por el 2% de las olas incidentes de un estado de mar.

Para los ensayos numéricos de esta investigación se utiliza una superficie impermeable lisa, sin porosidad ni fricción. Asimismo, se considerará sólo una pendiente 1:3 desde el fondo hasta el borde libre, es decir, sin berma. La pendiente seleccionada es representativa de geometrías realistas de diques en talud (Vuik et al., 2016).

De acuerdo con (Eurotop, 2018) la fórmula general para evaluar el run-up relativo Ru_2/H_{m0} , está en función del parámetro de rotura $\xi_{m-1,0}$ que relaciona la pendiente del talud y el peralte de la ola, como se muestra en la ecuación 2.

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{H_{m0}/L_{m-1,0}}} \quad (3)$$

Debe notarse en que la longitud de onda en aguas profundas $L_{m-1,0} = gT_{m-1,0}^2/2\pi$ está en función del periodo medio de la energía $T_{m-1,0}$ que es el más recomendado para el

cálculo del run-up cuando el espectro presenta formas complejas, así como para espectros teóricos tipo JONSWAP o TMA. La utilización del periodo $T_{m-1,0}$ da más peso a los periodos más largos en el espectro, por lo tanto, funciona adecuadamente para espectros bimodales o multimodales. Cuando se tiene un espectro uniforme, existe una relación entre el periodo de pico y el periodo medio de la energía: $T_p = 1.1 \cdot T_{m-1,0}$.

En la relación del run-up relativo y el parámetro de rotura se observan dos tramos con comportamiento distinto, que se grafican en la Figura 3 de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

Para la tendencia media del primer tramo ($\mu = 1.65$; $\sigma = 0.10$) se tiene:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = 1.65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \quad (4)$$

Donde γ_f es la influencia de la rugosidad de los elementos de la estructura y γ_b a la influencia de la oblicuidad del oleaje incidente. Para el caso específico de esta investigación se utiliza una pendiente lisa y no existe oblicuidad ya que se trata de casos bidimensionales.

Mientras que para la tendencia del segundo tramo ($\mu = 1.00$; $\sigma = 0.07$) se tiene:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = 1.0 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}} \right) \quad (5)$$

Donde γ_b es la influencia de una berma, sin embargo, para las propagaciones de este trabajo no se tiene ninguna.

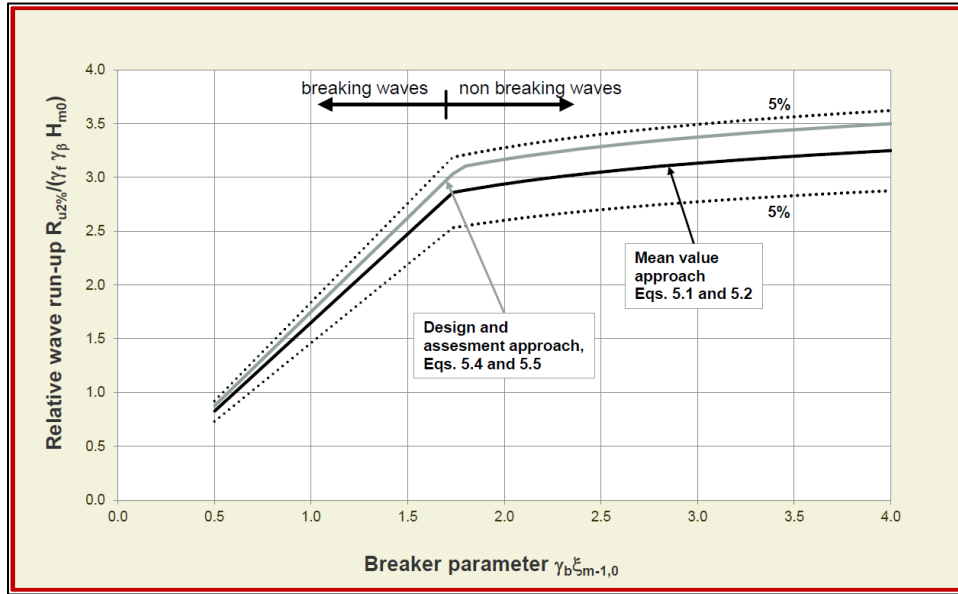


Figura 3. Run-up en función del parámetro de rotura para pendientes impermeables. Fuente: (Eurotop, 2018).

En Figura 3 se muestran las expresiones presentadas en las ecuaciones 3 y 4. El run-up relativo aumenta linealmente conforme aumenta el parámetro de rotura $\xi_{m-1,0}$ en un primer rango correspondiente a las olas rompiendo con parámetro de rotura menor a 1.8. Por otro lado, para olas que no rompen y valores altos del parámetro de rotura, la tendencia es linealmente creciente, pero con menor pendiente.

1.1.4. Atenuación de altura de ola en campos de vegetación

Para estudiar la atenuación de altura de ola se colocaron sensores de superficie libre dentro de la longitud de campo de vegetación y hasta llegar a pie de rampa. Con esa información se pueden estimar los parámetros de altura de ola H_{m0} , H_{rms} , H_{max} , T_p , T_m en cada uno de los puntos mediante un análisis en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

El parámetro β indica la atenuación de la altura de ola por unidad de longitud de campo de vegetación. De acuerdo con (Mendez & Losada, 2004) la evolución de la altura de ola para un oleaje irregular dentro de un campo de vegetación se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_{RMS} = \frac{H_{RMS0}}{1+\beta X} \quad (6)$$

Donde H_0 es la altura de ola a inicio de dique y funciona como referencia, X es la posición dentro del campo de vegetación. Por lo tanto, cuanto mayor es β mayor es la disipación de energía que produce el campo de vegetación y menor es la altura de ola al final del mismo.

1.1.5. Coeficiente de reflexión

La interacción del oleaje con la rampa impermeable provoca que parte de la energía se refleje. Dado que las formulaciones para el cálculo de run-up sobre pendiente impermeable están en función de la altura de ola incidente, es necesario separar los trenes de ondas incidente y reflejada para realizar el análisis de run-up.

De acuerdo con el método (Mansard & Funke, 1980) se requieren tres sensores de superficie libre frente a la estructura reflejante para aplicar el método. Las distancias dependen de la longitud de onda, por lo tanto, del periodo pico de la onda.

La distancia entre el primer y segundo sensor es:

$$x_{12} = L_p/10 \quad (7)$$

Mientras que la distancia entre el primer y tercer sensor debe cumplir:

$$\begin{aligned} L_p/6 < x_{13} < L_p/3 \\ x_{13} \neq L_p/5 \\ x_{13} \neq 3L_p/10 \end{aligned} \quad (8)$$

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar y parametrizar soluciones híbridas compuestas por un campo de vegetación y una pendiente impermeable, mediante el análisis de la atenuación de altura de ola producida por el campo y el run-up producido sobre la estructura.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de las características del oleaje, la longitud del campo de vegetación y la relación de sumergencia sobre la reducción del run-up.
- Analizar la interacción entre el campo de vegetación y la pendiente y su influencia en la atenuación de ola producida a lo largo del campo.
- Evaluar la influencia de las características del oleaje, la longitud del campo de vegetación y la relación de sumergencia sobre la atenuación de la altura de ola a lo largo del campo de vegetación.
- Verificar las formulaciones existentes para el cálculo del run-up relativo para una solución híbrida.

1.3. Metodología

En esta sección se detalla la metodología a seguir para el desarrollo del proyecto.

En primer lugar, se definen las condiciones hidrodinámicas para forzar el modelo, el dominio espacial, geometrías y características de los campos de vegetación. La solución híbrida expuesta en este trabajo está compuesta por la combinación de una rampa impermeable y un campo de vegetación. Previamente a las propagaciones de la solución híbrida, se estudia la solución convencional y la solución verde por separado para estudiar run-up y atenuación de altura de ola a lo largo del campo, respectivamente. Seguidamente y previo a las propagaciones con vegetación, se lleva a cabo una validación de la solución convencional con canal vacío *veg0* (sin campo de vegetación) para realizar una comparativa con expresiones teóricas de run-up en función del parámetro de rotura $\xi_{-1,0}$ según (Eurotop, 2018) y así verificar la correcta representación numérica del dominio. Se debe tener en cuenta que la rampa, genera

una reflexión y que el cálculo de run-up está asociado a la altura de ola incidente a pie de dique. Por lo tanto, es necesario separar los trenes de onda incidente y reflejada. Para ello, se selecciona el método de (Mansard & Funke, 1980). Tras esta primera verificación, y debido al alto coste computacional necesario para ejecutar todos los oleajes seleccionados inicialmente, se realiza una selección de oleajes teniendo en cuenta principalmente: el peralte del oleaje y la relación de sumergencia. Esta relación de sumergencia se define como la relación entre la altura de vegetación y el calado: $h_r = l_v/h$. Se define una altura de vegetación constante para todos los casos de $l_v = 0.50 \text{ m}$, por lo que los cambios de calado definirán el grado de sumergencia. Con respecto a la solución verde, se opta por ejecutar los oleajes seleccionados en un canal numérico incluyendo únicamente los campos de vegetación, considerando tres longitudes de campo de vegetación: 12.0, 10.0 y 8.0 m, sin rampa impermeable (*veg1*, *veg2* y *veg3*) y con un contorno absorbente detrás del campo (contorno de la derecha). Estas ejecuciones permiten obtener la disipación de altura de ola producida por el campo, y por lo tanto la altura de ola tras el campo, sin presencia de la rampa. Dicha altura de ola será la que se considere como la altura de ola incidente a pie de estructura para los posteriores casos de solución híbrida. La obtención de esta altura de ola incidente a pie de estructura, viene motivada por la imposibilidad de aplicar el método de Mansard & Funke (1980) en los casos de soluciones híbridas dado que las medidas de superficie libre utilizadas para aplicar dicho método se verían influenciadas por la disipación de energía producida por el campo. Una vez simuladas las soluciones convencional y verde por separado, se procede a modelar diferentes combinaciones de solución híbrida (*veg4*, *veg5* y *veg6*) considerando las tres longitudes de campo. Por lo tanto, en el dominio se incluye tanto los campos de vegetación como la rampa impermeable. Dichas simulaciones se ejecutan considerando tres calados distintos, para simular condiciones de vegetación sumergida, a nivel y emergida y para las tres longitudes de campo. Para el análisis de run-up se obtiene el $Ru_{2\%}$ para cada oleaje seleccionado. Adicionalmente, se discuten los resultados comparativos para mostrar la influencia del peralte, la longitud de campo de vegetación y el grado de sumergencia sobre la atenuación de altura de ola y el run-up. Por último, se obtiene el run-up relativo

obtenido para cada solución híbrida y se compara con la fórmula del Eurotop (2018) con el objetivo de verificar su posible aplicación al diseño de este tipo de soluciones.

En la Figura 4 se muestra un esquema de la metodología seguida en el trabajo.

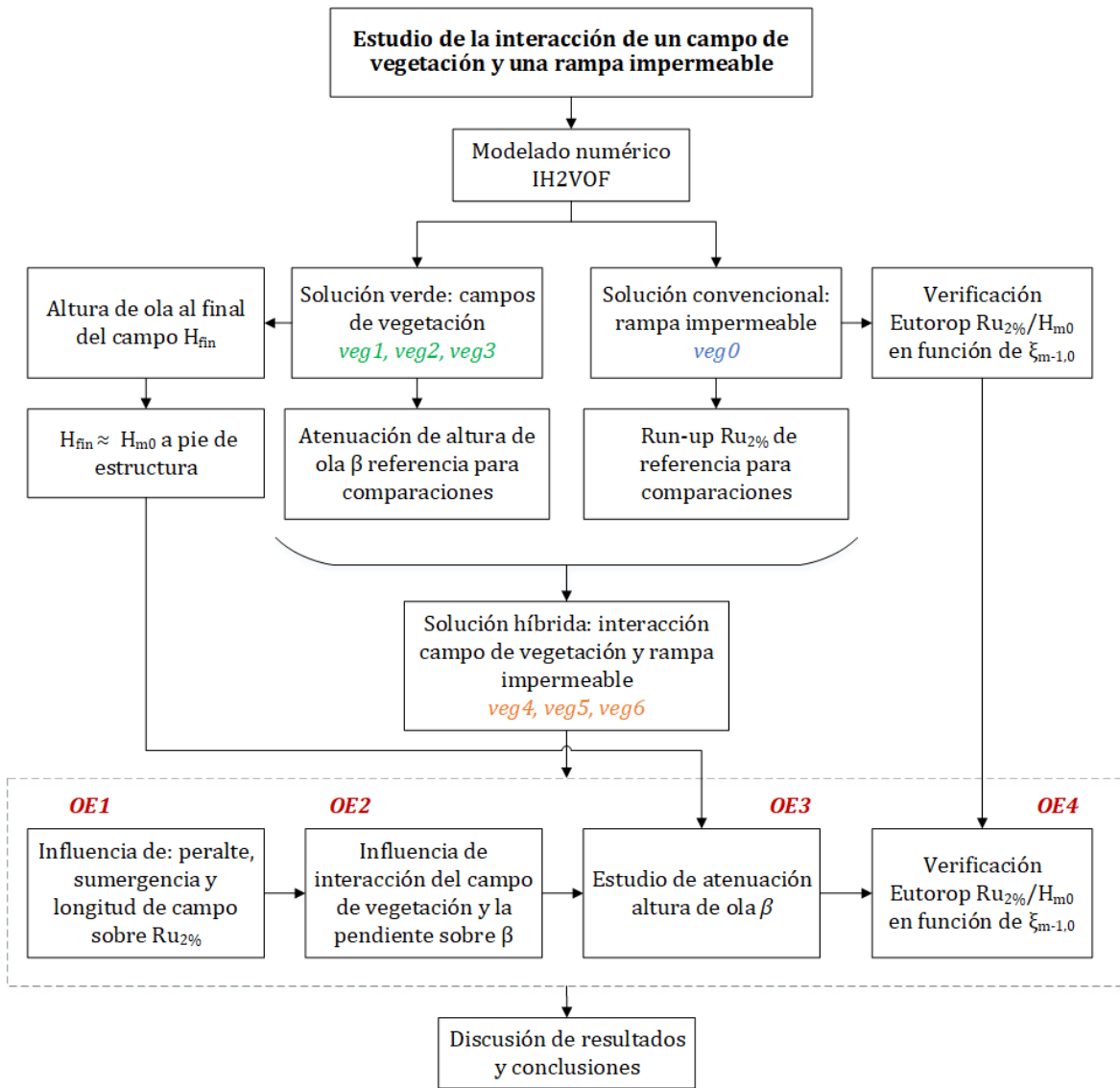


Figura 4. Esquema de metodología del trabajo de investigación

2. Modelado numérico

En esta sección se describen las propagaciones de oleaje, casos de oleaje seleccionados, características del campo de vegetación, dominio geométrico del canal numérico, mallado numérico y coeficientes de reflexión.

2.1. Condiciones hidrodinámicas

A partir de una revisión bibliográfica de ensayos similares con campos de vegetación, se seleccionaron ciertos oleajes representativos de condiciones realistas medias encontradas en campos de marismas. Se toma como parámetro clave el peralte, puesto que se pretende estudiar la sensibilidad de las características del oleaje (altura de ola y periodo) sobre atenuación de oleaje y el run-up. En todos los casos se trata de oleaje de corto periodo. Además, los parámetros de oleaje, altura de ola y periodo, de los casos seleccionados están limitados a las dimensiones del laboratorio donde se pretenden realizar los ensayos.

Tabla 1. Casos de oleaje base seleccionados para ensayos numéricos

Caso	h (m)	H _{rms} (m)	T _m (s)
1	0.30	0.060	1.5
2	0.30	0.060	2.5
3	0.30	0.030	3.5
4	0.30	0.060	3.5
5	0.50	0.060	1.5
6	0.50	0.090	1.5
7	0.50	0.060	2.5
8	0.50	0.060	3.5
9	0.50	0.060	4.5
10	0.70	0.060	1.5
11	0.70	0.120	1.5
12	0.70	0.060	2.5
13	0.70	0.060	3.5
14	0.70	0.060	4.5

Como se muestra en la Tabla 1 los casos de oleaje están divididos en diferentes calados. Para todas las simulaciones se utiliza una altura de vegetación $l_v = 0.50 \text{ m}$ constante. Por lo tanto, los oleajes 1, 2, 3 y 4 son casos con vegetación emergida, 5, 6, 7, 8 y 9, con vegetación a nivel, mientras que 10, 11, 12, 13 y 14, con vegetación sumergida.

Para cada uno los casos de la Tabla 1 se genera una serie temporal de superficie libre tal que cumpla con los parámetros de altura de ola significativa y periodo pico, considerando un espectro teórico tipo JONSWAP con factor de apuntamiento de 3.3. Dichas series representan las condiciones de forzamiento para el modelado numérico. Las series temporales de superficie libre tienen una longitud de 500 olas. Este número de olas se selecciona en base a un análisis de sensibilidad del número de olas sobre los resultados de $Ru_{2\%}$ que se presenta más adelante en la sección: Análisis de sensibilidad de resultados.

Tabla 2. Estados de mar seleccionados para propagaciones numéricas y parámetros adimensionales

Caso	h (m)	l_v/h	H_s (m)	H_{max} (m)	H_{max}/H_s	T_m (s)	T_p (s)	L_m (m)	ε	ξ	$\mu=h/L_m$	$\delta=H_s/h$	$\delta_{max}=H_{max}/h$	$\varepsilon_{max}=H_{max}/L_m$
1	0.30	1.67	0.086	0.157	1.82	1.4	1.9	2.1	0.042	1.63	0.15	0.29	0.52	0.076
2	0.30	1.67	0.088	0.151	1.71	2.4	3.2	3.9	0.023	2.21	0.08	0.29	0.50	0.039
3	0.30	1.67	0.043	0.075	1.76	3.3	4.4	5.5	0.008	3.79	0.05	0.14	0.25	0.014
4	0.30	1.67	0.087	0.158	1.81	3.4	4.5	5.6	0.015	2.68	0.05	0.29	0.53	0.028
5	0.50	1.00	0.086	0.157	1.82	1.4	1.9	2.4	0.036	1.77	0.21	0.17	0.31	0.065
6	0.50	1.00	0.129	0.231	1.79	1.4	1.9	2.4	0.054	1.44	0.21	0.26	0.46	0.096
7	0.50	1.00	0.088	0.151	1.71	2.4	3.2	4.8	0.018	2.46	0.10	0.18	0.30	0.031
8	0.50	1.00	0.087	0.158	1.81	3.4	4.5	7.1	0.012	3.01	0.07	0.17	0.32	0.022
9	0.50	1.00	0.087	0.156	1.79	4.3	5.7	9.3	0.009	3.44	0.05	0.17	0.31	0.017
10	0.70	0.71	0.086	0.157	1.82	1.4	1.9	2.6	0.033	1.85	0.26	0.12	0.22	0.059
11	0.70	0.71	0.171	0.295	1.72	1.4	1.9	2.6	0.067	1.29	0.27	0.24	0.42	0.115
12	0.70	0.71	0.088	0.151	1.71	2.4	3.2	5.5	0.016	2.63	0.13	0.13	0.22	0.028
13	0.70	0.71	0.087	0.158	1.81	3.4	4.5	8.3	0.011	3.24	0.08	0.12	0.23	0.019
14	0.70	0.71	0.087	0.156	1.79	4.3	5.7	10.8	0.008	3.71	0.06	0.12	0.22	0.014

En la Tabla 2 se presentan nuevamente los casos de oleaje seleccionados junto con una serie de parámetros adimensionales. Lo primero a notar es que se tiene tres diferentes calados: 0.30, 0.50 y 0.70 m que simulan condiciones de vegetación sumergida, a nivel o emergida. Para esto se calcula la relación de sumergencia $h_r = l_v/h$ que relaciona cada calado con la altura de la planta, que para todos los casos de esta investigación es de $l_v = 0.50m$. Por lo tanto, se puede observar que se repiten oleajes en cada uno de los calados. Por ejemplo, los oleajes 1, 5 y 10 presentan la misma altura de ola y periodo, pero distinto calado. Pasa lo mismo con 2, 7 y 12; 4, 8 y 13; mientras que 3, 9 y 14 comparten un rango similar de número de Iribarren ξ . Si se observa los casos de calado de 0.50 m, por ejemplo, se nota que la altura de ola se mantiene constante y se varía el periodo en los casos 5, 7, 8 y 9. Sin embargo, se incluye el caso 6 para analizar la sensibilidad de la altura de ola, que se puede comparar con el caso 5. Se debe recordar que el número de Iribarren o parámetro de rotura ξ está en función del peralte calculado con la longitud de onda asociada al periodo medio y con una pendiente de rampa 1:3.

Además, se estiman algunos parámetros adimensionales que brindan más información sobre cada estado de mar en cuestión. Por ejemplo, se estima la profundidad relativa μ para determinar en qué profundidades se está trabajando. Como todos los valores se encuentran en el rango $1/20 < \mu < 1/2$, se concluye que todos los casos corresponden a profundidades intermedias. Luego, se calcula la altura relativa δ tanto para la altura de ola significativa como para la altura de ola máxima del estado de mar. Este parámetro está asociado a la rotura por fondo y la relación entre la máxima altura de ola que puede existir en cierta profundidad. Con la altura de ola significativa, los valores de profundidad relativa no superan el 0.30 por lo que las olas están lejos de romper por fondo, mientras que para la altura de ola máxima, apenas algunos valores se aproximan al límite para rotura conocido en la teoría pero siempre por debajo de 0.52 (para el oleaje 1), por lo que es de esperar que haya una mínima cantidad de olas rotas o ninguna. Por último, se estima el peralte para la ola máxima, también relacionado con la rotura, sin embargo, todos los valores están muy por debajo de 0.14, por lo que no se espera que haya olas rompiendo por peralte. Se evita la rotura en los estados de mar

seleccionados ya que, al tratarse de un estudio de disipación de oleaje por vegetación, es de vital interés que la atenuación identificada sea producto de la vegetación y no de otros procesos.

Para finalizar la sección, se debe mencionar que los casos de oleajes aquí presentados se ejecutan con el canal numérico vacío y para cada una de las longitudes de campo de vegetación.

2.2. Características del campo de vegetación

Para evaluar la influencia que tiene un campo de vegetación sobre la atenuación del oleaje y el run-up se varía la longitud del campo frente a la estructura. Las demás características asociadas a la vegetación se mantienen constantes.

Los campos de vegetación se modelan con las características de la especie *Spartina Anglica*, que se muestran a continuación.

Tabla 3. Características geométricas consideradas para la *Spartina Anglica*

Densidad (tallos/m ²)	300
Longitud de planta (m)	0.50
Diámetro (m)	0.006

Como se mencionó antes, se tiene un caso cero para calibración donde no se coloca ningún campo. Luego se cuenta con tres campos con longitud: 12.0, 10.0 y 8.0 m frente a la rampa, siendo el campo de 12.0 m el que llega hasta pie de dique. Visto de otra forma se tiene que el espacio entre pie de dique y el final de campo es de 0.0, 2.0 y 4.0 m, respectivamente. Un esquema de las configuraciones del dominio para las simulaciones se muestra a continuación en la Figura 5

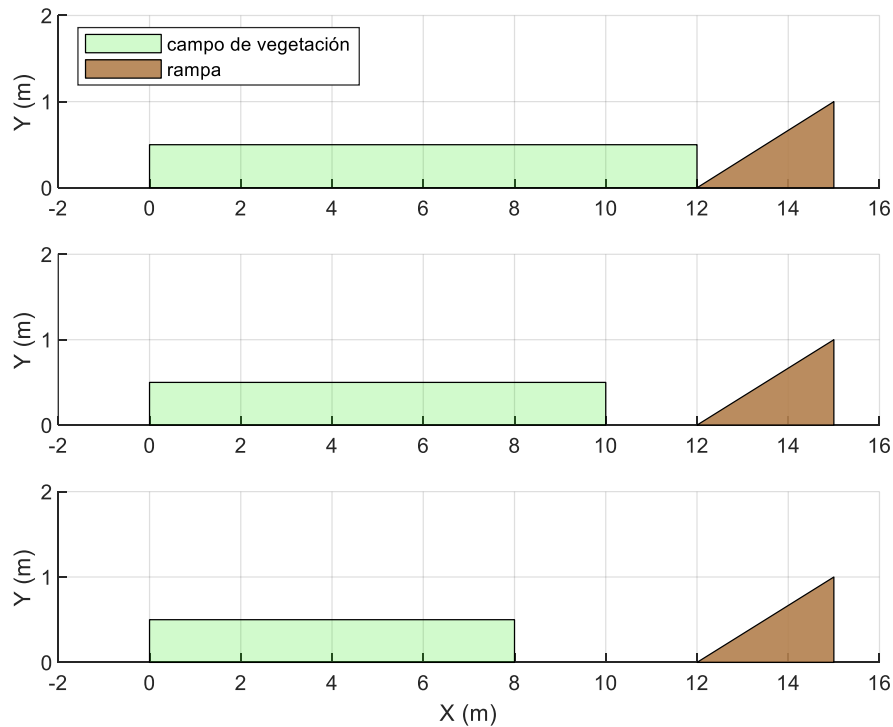


Figura 5. Esquema de configuraciones de modelado en canal numérico de IH2VOF

Por otra parte, la disipación por vegetación se introduce al modelo IH2VOF mediante algunas propiedades de la especie en uso denominada *Spartina Anglica*. Aparte de las características geométricas de la planta, se debe definir el coeficiente de arrastre.

Para definir el coeficiente de arrastre se toma el estudio de (Anderson & Smith, 2014) en el que se realizaron ensayos con réplicas de *Spartina Alterniflora* bajo diferentes condiciones de oleaje en los que se caracterizó el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds, que siguiendo el procedimiento utilizado en el artículo, se calcula:

$$Re = \frac{u_c \cdot b}{\nu} \quad (9)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del agua ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), b es el diámetro de la planta y u_c es la velocidad característica que actúa sobre la planta y es definida como la

máxima velocidad horizontal en frente del campo de vegetación en la parte superior del tallo y se calcula utilizando teoría lineal:

$$u_c = \frac{H_{rms}}{2} \cdot \omega_p \cdot \left(\frac{\cosh(k\alpha h)}{\sinh(kh)} \right) \quad (10)$$

Donde ω_p es la frecuencia angular asociada a T_p , $k = 2\pi/L$ es el número de onda, h es el calado y $\alpha = \min\{1, l_v/h\}$.

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{H_{m0}/L_{m-1,0}}} \quad (11)$$

Sin embargo, para tomar en cuenta el efecto de la sumergencia, (Anderson & Smith, 2014) definieron el número de Reynolds modificado, ya que para condiciones de vegetación emergida se tienen valores de coeficiente de arrastre mayores.

$$Q_{Re} = Re/(l_s/h)^{1.5} \quad (12)$$

Seguidamente, se puede relacionar el número de Reynolds modificado, con el coeficiente de arrastre, a través de la fórmula (Anderson & Smith, 2014):

$$c_D = 0.11 + \left(\frac{2067.7}{Q_{Re}} \right)^{0.64} \quad (13)$$

Esta expresión es válida para el rango $533 < Re < 2296$. En la Tabla 4 se muestran los coeficientes de arrastre para cada oleaje simulado. Se puede notar que existe una correlación con la relación de sumergencia, puesto que para vegetación emergida el coeficiente de arrastre es mayor. Es evidente que, en los casos de vegetación emergida, las plantas son un obstáculo en toda la columna de agua y la resistencia hidrodinámica es mayor que en los casos en los que la vegetación está sumergida.

Tabla 4. Coeficientes de arrastre de la vegetación para cada estado de mar simulado

Caso	h (m)	H _{rms} (m)	H _s (m)	T _p (s)	L _p (m)	ω (rad/s)	k (rad/m)	α	u _c (m/s)	Re	hr = ls/h	Q _{Re}	C _D = f(Q _{Re})
1	0.30	0.061	0.086	1.9	2.9	3.36	2.18	1.00	0.179	1076.4	1.67	500.3	2.59
2	0.30	0.062	0.088	3.2	5.2	1.99	1.21	1.00	0.179	1074.1	1.67	499.2	2.59
3	0.30	0.030	0.043	4.4	7.4	1.42	0.85	1.00	0.087	520.8	1.67	242.0	4.06
4	0.30	0.062	0.087	4.5	7.6	1.40	0.83	1.00	0.178	1067.6	1.67	496.2	2.60
5	0.50	0.061	0.086	1.9	3.5	3.36	1.80	1.00	0.144	863.6	1.00	863.6	1.86
6	0.50	0.092	0.129	1.9	3.6	3.32	1.77	1.00	0.215	1287.1	1.00	1287.1	1.46
7	0.50	0.062	0.088	3.2	6.5	1.99	0.96	1.00	0.139	836.4	1.00	836.4	1.89
8	0.50	0.062	0.087	4.5	9.6	1.40	0.65	1.00	0.138	828.1	1.00	828.1	1.91
9	0.50	0.062	0.087	5.7	12.3	1.11	0.51	1.00	0.137	824.9	1.00	824.9	1.91
10	0.70	0.061	0.086	1.9	3.9	3.36	1.61	0.71	0.100	600.6	0.71	994.9	1.71
11	0.70	0.121	0.171	1.9	3.9	3.36	1.61	0.71	0.197	1183.3	0.71	1960.1	1.14
12	0.70	0.062	0.088	3.2	7.6	1.99	0.83	0.71	0.110	659.8	0.71	1093.0	1.61
13	0.70	0.062	0.087	4.5	11.2	1.40	0.56	0.71	0.113	676.4	0.71	1120.4	1.59
14	0.70	0.062	0.087	5.7	14.4	1.11	0.43	0.71	0.114	682.4	0.71	1130.4	1.58

2.3. Dominio espacial

El dominio espacial de los ensayos numéricos está delimitado por las dimensiones del tanque de oleaje de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, puesto que el modelado numérico aquí presentado forma parte de un estudio preliminar para pruebas de modelado físico en dichas instalaciones.

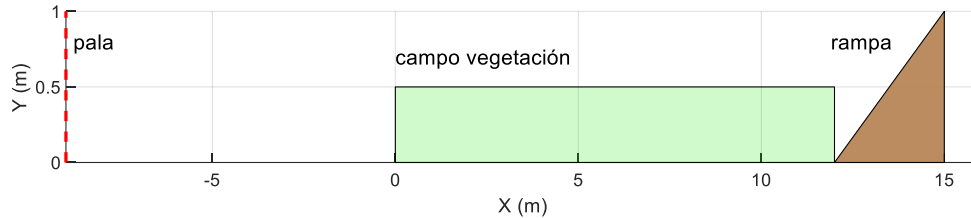


Figura 6. Dominio geométrico con campo de vegetación de 12.0m

En la Figura 6 se presenta el dominio geométrico para las propagaciones. La pala generadora se encuentra a 9.0 m antes del inicio del campo de vegetación. En la figura se muestra el ejemplo de campo de vegetación de 12.0 m que llega hasta el pie de la estructura. En ese punto se tiene una rampa impermeable de pendiente 1:3.

2.4. Mallado numérico

El mallado numérico debe asegurar que los fenómenos físicos sean representados adecuadamente. Para esto, se siguen algunas condiciones que requiere IH2VOF para obtener una solución adecuada.

Se debe recordar que la malla de cálculo en IH2VOF está compuesta por celdas rectangulares. Las dimensiones en la dirección x están condicionadas a la adecuada representación de la longitud de onda y se recomienda que una longitud de onda sea representada por al menos 100 celdas, $\Delta x = L/100$. En la dirección y el tamaño de celda está relacionadas con la altura de ola y se recomienda tener 10 celdas por altura de ola, $\Delta y = H/10$. Además, se debe cumplir una relación de aspecto de celda en ambas direcciones x, y . Se recomienda que $1 < \Delta x/\Delta y < 5$ siendo lo recomendable que $\Delta x/\Delta y \approx 2$.

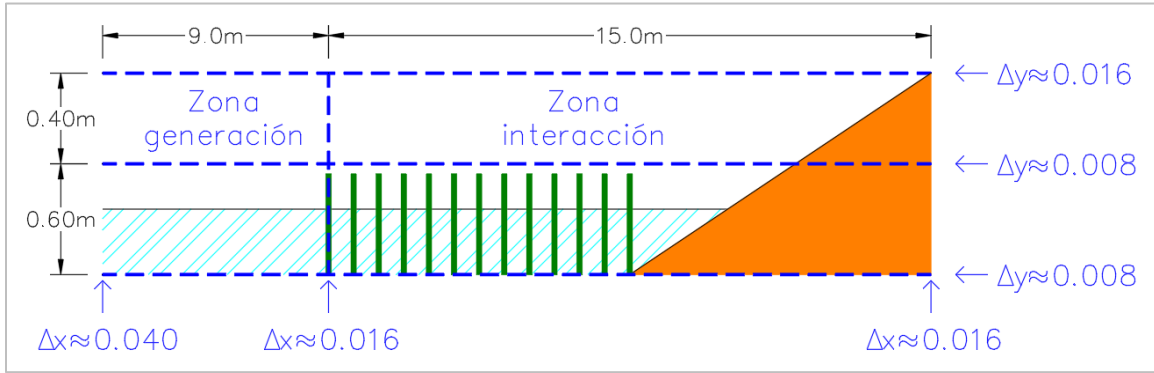


Figura 7. Discretización del mallado para el oleaje 4

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la malla realizada para el oleaje 4, que tiene un calado de $h = 0.30m$ y altura de vegetación $l_v = 0.50m$. La malla cuenta con tamaño de celdas variable para reducir coste computacional. En la zona de interacción con la estructura presenta mayor discretización con el objetivo de una adecuada resolución de los procesos presentes y la interacción con el campo de vegetación. Desde el inicio del campo hasta la pala generadora se relaja la discretización hasta llegar al contorno de generación con un tamaño de celda de aproximadamente $\Delta x = 0.040m$ para reducir el costo computacional, disminuyendo la cantidad de celdas en la dirección x .

Con respecto a los contornos, se coloca absorción en la generación. Al final del canal, donde se encuentra la rampa, no se coloca absorción ya que el interés se concentra en medir el run-up y estudiar la influencia de la interacción con la estructura en combinación con los campos de vegetación. Un resumen de las discretizaciones para cada estado de mar se presenta a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen de discretizaciones de malla para estados de mar simulados

Caso	h (m)	H _s (m)	T _m (s)	L _m (m)	H/10 (m)	L/100 (m)	Zona de interacción estructura			Zona de generación		
							Δy (m)	Δx (m)	Δx/Δy	Δy (m)	Δx (m)	Δx/Δy
1	0.30	0.086	1.4	2.1	0.0086	0.021	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.020	2.50
2	0.30	0.088	2.4	3.9	0.0088	0.039	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00
3	0.30	0.043	3.3	5.5	0.0043	0.055	0.0040	0.008	2.00	0.0040	0.020	5.00
4	0.30	0.087	3.4	5.6	0.0087	0.056	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00
5	0.50	0.086	1.4	2.4	0.0086	0.024	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.024	3.00
6	0.50	0.129	1.4	2.4	0.0129	0.024	0.0120	0.024	2.00	0.0120	0.024	2.00
7	0.50	0.088	2.4	4.8	0.0088	0.048	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00
8	0.50	0.087	3.4	7.1	0.0087	0.071	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00
9	0.50	0.087	4.3	9.3	0.0087	0.093	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00
10	0.70	0.086	1.4	2.6	0.0086	0.026	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.024	3.00
11	0.70	0.171	1.4	2.6	0.0171	0.026	0.0150	0.030	2.00	0.0160	0.026	1.63
12	0.70	0.088	2.4	5.5	0.0088	0.055	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00
13	0.70	0.087	3.4	8.3	0.0087	0.083	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00
14	0.70	0.087	4.3	10.8	0.0087	0.108	0.0080	0.016	2.00	0.0080	0.040	5.00

2.5. Análisis de sensibilidad de resultados

En esta sección se discute la sensibilidad de los resultados obtenidos al número de olas simuladas y a la aleatoriedad de las series de superficie libre generadas. Para las comprobaciones se generan series tomando como base los parámetros del caso de oleaje 11.

2.5.1. Número de olas

El $Ru_{2\%}$ se refiere al nivel de agua que es superado por el 2% de las olas incidentes. Al ser un parámetro estadístico, se debe tener en cuenta que la longitud de la serie de oleaje de forzamiento podría influir en dicha estimación. Por lo tanto, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para comprobar que, al aumentar el número de olas de la serie, los resultados no varían significativamente. Esto porque, a pesar de que la serie es generada utilizando fases aleatorias, debe cumplir ciertas condicionantes. Por ejemplo, si se hace un análisis en el dominio del tiempo o de la frecuencia, los parámetros H_{m0} , T_p deben ser prácticamente los mismos con los que fue creada la serie y se deben respetar las relaciones entre H_{rms} , H_{max} y T_m .

A partir de cierto número de olas, el $Ru_{2\%}$ no cambia significativamente. Así, se busca ejecutar las series con el menor número de olas posible para reducir el coste computacional.

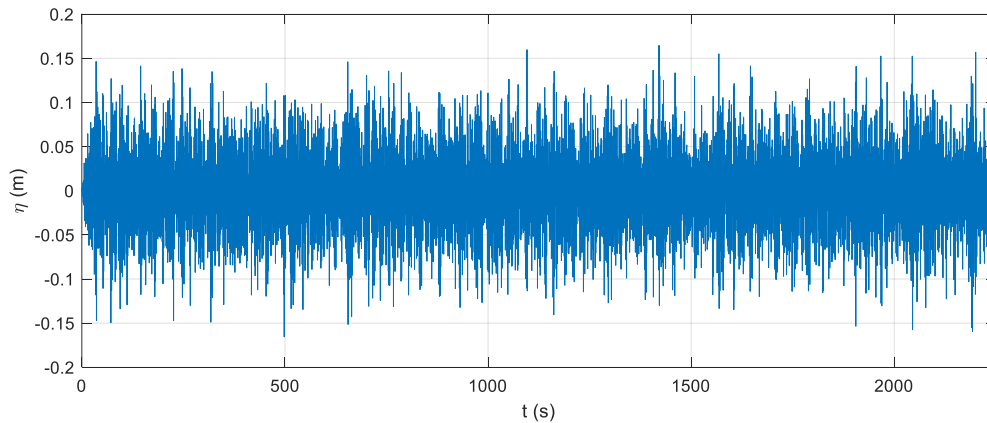


Figura 8. Forzamiento para análisis de sensibilidad de número de olas

En la Figura 8 se muestra la serie temporal de superficie libre que se utiliza como forzamiento para el análisis de sensibilidad del número de olas. Tiene una duración aproximada del número de olas por el periodo medio de la serie, $Dur = No. \text{ olas} \cdot T_m$. Para el oleaje 11 se usa una serie con $T_m = 1.5 \text{ s}$. Se ejecutan simulaciones con la misma serie, pero utilizando 500, 1000 y 1500 olas, es decir 750s, 1500s y 2250s de duración aproximadamente.

Tabla 6. Resultados de Run-up según número de olas del forzamiento

Caso	Número de olas	Duración (s)	Ru _{2%} (m)	Ru _{max} (m)
1	500	750	0.32	0.40
2	1000	1500	0.32	0.40
3	1500	2250	0.32	0.40

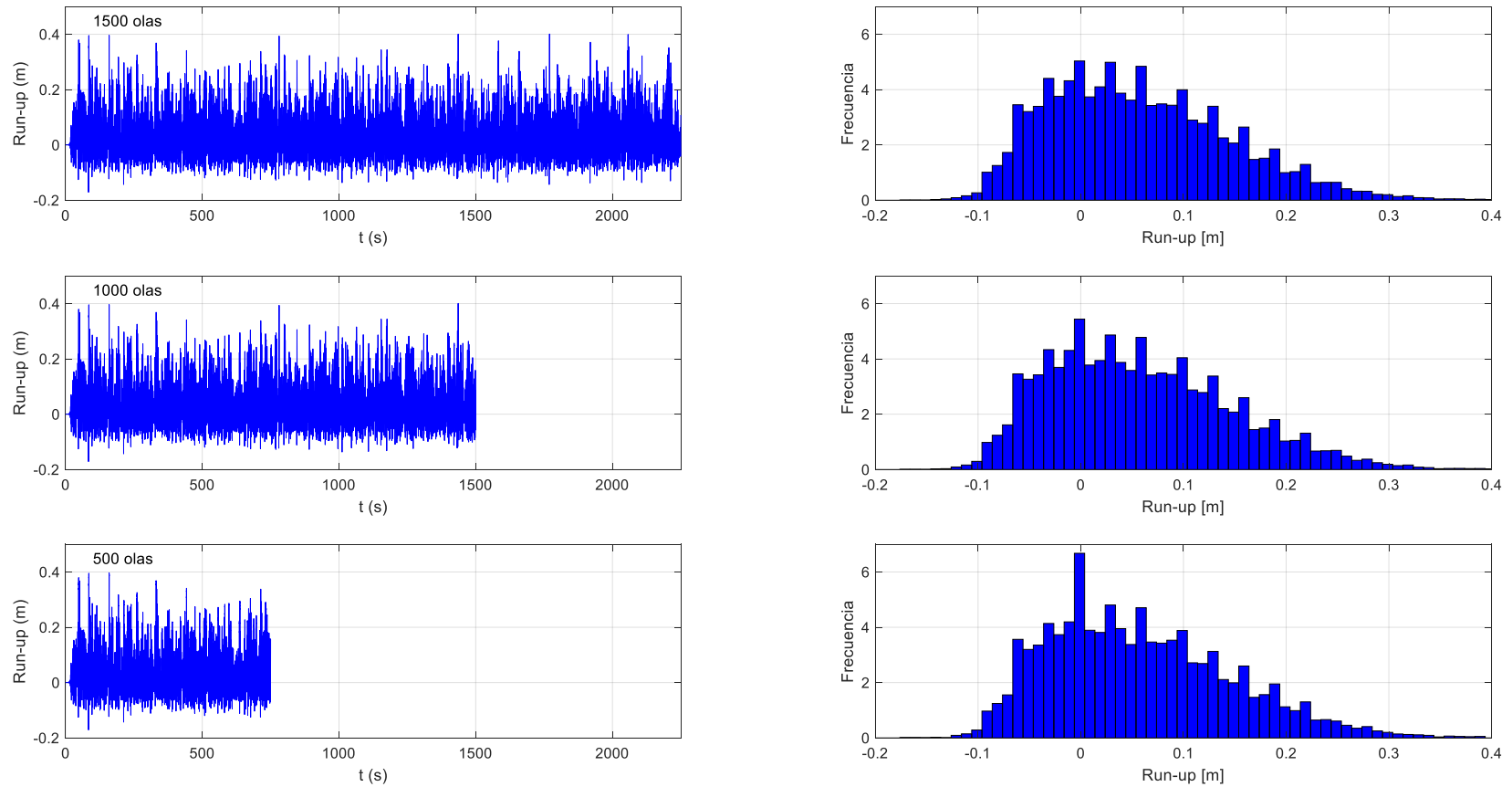


Figura 9. Series temporales e histogramas de run-up para forzamientos de 1500, 1000 y 500 olas

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 9 y la Tabla 6 se concluye que las ejecuciones con 500 olas resultan adecuadas, ya que si se aumenta el número de olas no se producen cambios en los resultados del estadístico $Ru_{2\%}$.

2.5.2. Aleatoriedad de series temporales

Consecuentemente con la sección anterior, la aleatoriedad de las series generadas para forzamiento es otro aspecto para tomar en consideración. Si bien las series temporales generadas aleatoriamente, se estiman a partir de parámetros estadísticos y un modelo de espectro teórico, la secuencia de olas se ve condicionada por la generación aleatoria de las fases. Para estudiar la posible variación que podría encontrarse entre diferentes series de forzamiento, se ejecutan tres series diferentes generadas a partir de los mismos estadísticos del oleaje ($H_{m0} = 0.169 \text{ m}$ y $T_p = 1.8 \text{ s}$) con la misma duración.

Tabla 7. Resultados de Run-up según la aleatoriedad de serie de forzamiento

Caso	Hm0 (m)	Tp (s)	Ru _{2%} (m)	Ru _{max} (m)
1	0.171	1.87	0.32	0.38
2	0.172	1.89	0.32	0.40
3	0.172	1.91	0.31	0.38

En la Tabla 7 se observan los tres casos que se ejecutan para el análisis de sensibilidad de las series temporales de oleaje. Todos los casos presentan parámetros de altura de ola y periodo prácticamente iguales. Se puede ver como los resultados de $Ru_{2\%}$ y Ru_{max} son muy similares con diferencias por debajo del 5%, por lo que se realizará una única serie temporal para cada uno de los oleajes seleccionados. La Figura 10 muestra las tres series temporales de superficie libre mencionadas.

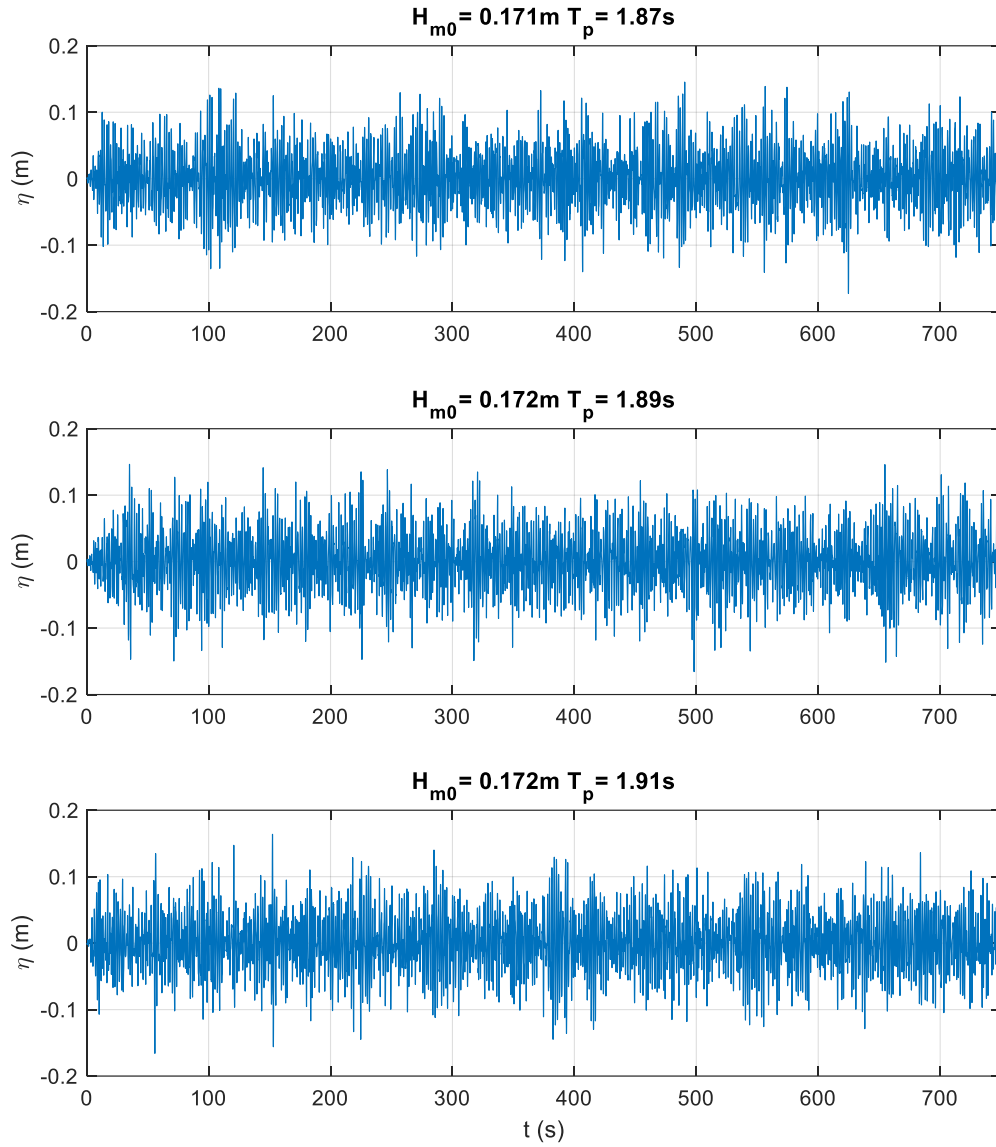


Figura 10. Forzamiento para análisis de sensibilidad de aleatoriedad de superficie libre

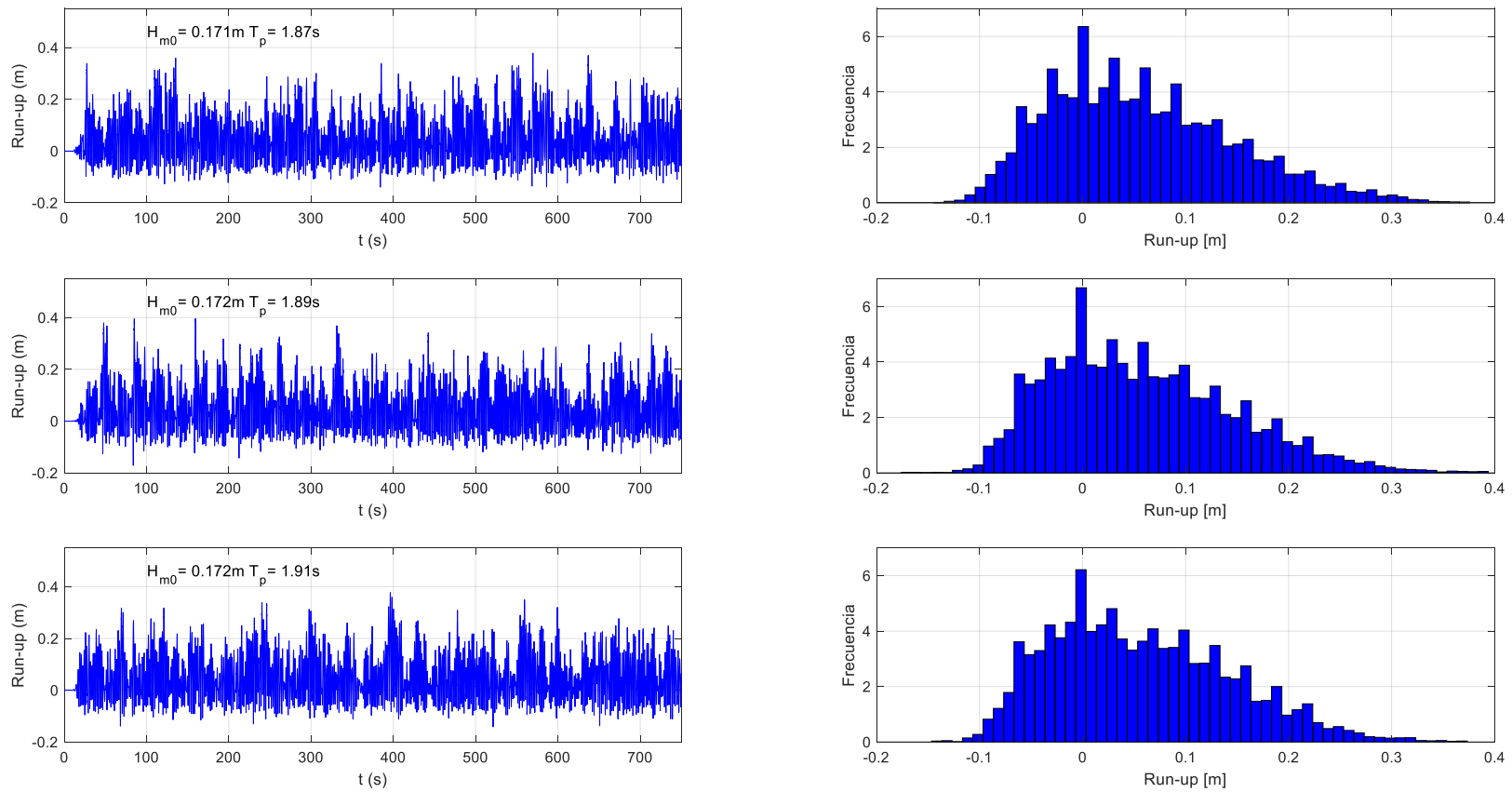


Figura 11. Series temporales de Run-up en función de aleatoriedad de series de forzamiento

En la Figura 11 se muestran las series de run-up donde se puede observar un comportamiento similar en cuanto los máximos y cantidad de máximos, que dan como resultado los estadísticos presentados en la Tabla 7.

2.6. Validación del canal numérico

Para validar los resultados del modelado numérico con IH2VOF se propagan todos los casos de oleaje en el canal vacío, es decir, sin incluir ningún campo de vegetación. Los resultados de $Ru_{2\%}$ son comparados con lo que se menciona en (Eurotop, 2018) y se presenta en la Figura 3.

Tabla 8. Resultados de run-up y parámetro de rotura para validación numérica

Caso	H_{m0} (m)	$\xi_{m-1,0}$	$Ru_{2\%}$ (m)	$Ru_{2\%} / H_{m0}$
1	0.059	2.47	0.18	3.07
2	0.072	3.75	0.20	2.78
3	0.042	6.78	0.16	3.81
4	0.074	5.21	0.28	3.78
5	0.071	2.24	0.24	3.38
6	0.098	1.89	0.28	2.87
7	0.083	3.48	0.24	2.88
8	0.087	4.80	0.30	3.45
9	0.090	6.01	0.35	3.87
10	0.073	2.20	0.26	3.55
11	0.127	1.64	0.32	2.51
12	0.084	3.47	0.27	3.21
13	0.089	4.76	0.29	3.27
14	0.087	6.12	0.33	3.78

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las propagaciones para la validación del canal numérico ejecutado sin campos de vegetación. Se debe notar que, la altura de ola a pie de dique solo hace referencia a la altura de ola incidente (sin la reflejada) estimada mediante el método de separación de (Mansard & Funke, 1980).

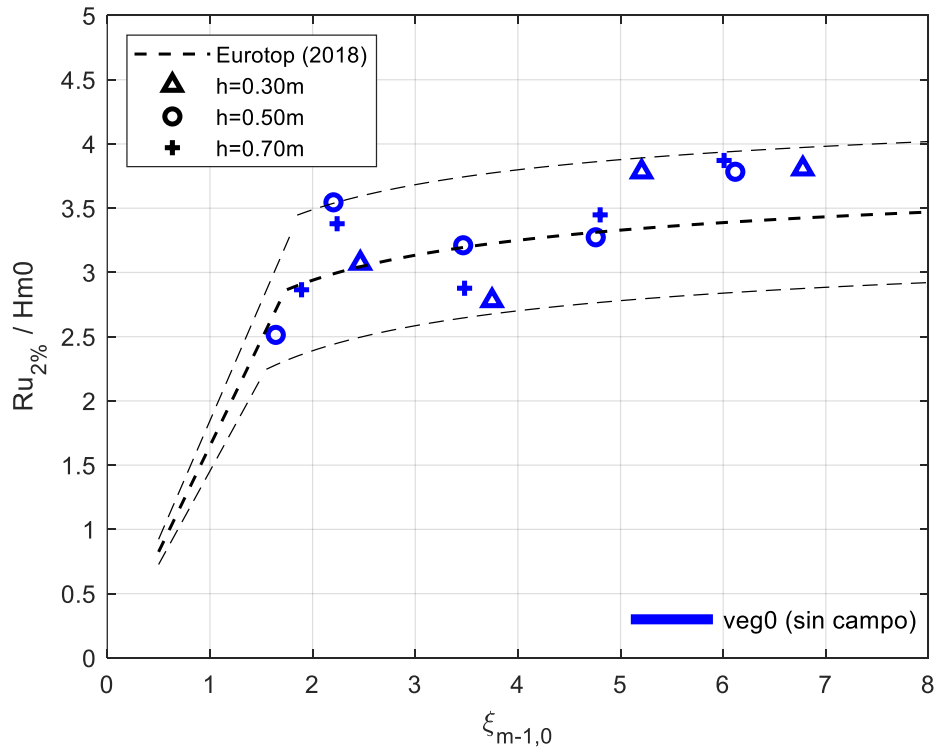


Figura 12. $Ru_{2\%}$ relativo en función del parámetro de rotura en rampa impermeable

En la Figura 12 se presenta el $Ru_{2\%}$ relativo a la altura de ola incidente a pie de dique en función del parámetro de rotura $\xi_{m-1,0}$ obtenido de las propagaciones del caso *veg0* sin incluir campos de vegetación y filtrando la onda reflejada, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 8. Los casos propagados muestran un comportamiento que sigue la tendencia de las ecuaciones y se ubican dentro de las bandas de confianza según (Eurotop, 2018). El primer tramo para $\xi_{m-1,0} < 1.8$, se refiere a casos con olas rotas como se vio en la Figura 3. Solo hay un punto cercano a esa zona y corresponde al oleaje 11 que presenta una altura de ola mayor al resto y tiene uno de los mayores peraltes, por lo que algunas olas de dicho estado podrían romper.

Los resultados obtenidos para este caso sin vegetación confirman la validez del set-up numérico y tras esta validación se procede a realizar las simulaciones incluyendo vegetación.

2.7. Resumen de casos

En adelante, se mencionan diferentes configuraciones con el propósito de explicar de manera simplificada los dominios numéricos. Se presenta un esquema en la Figura 13.

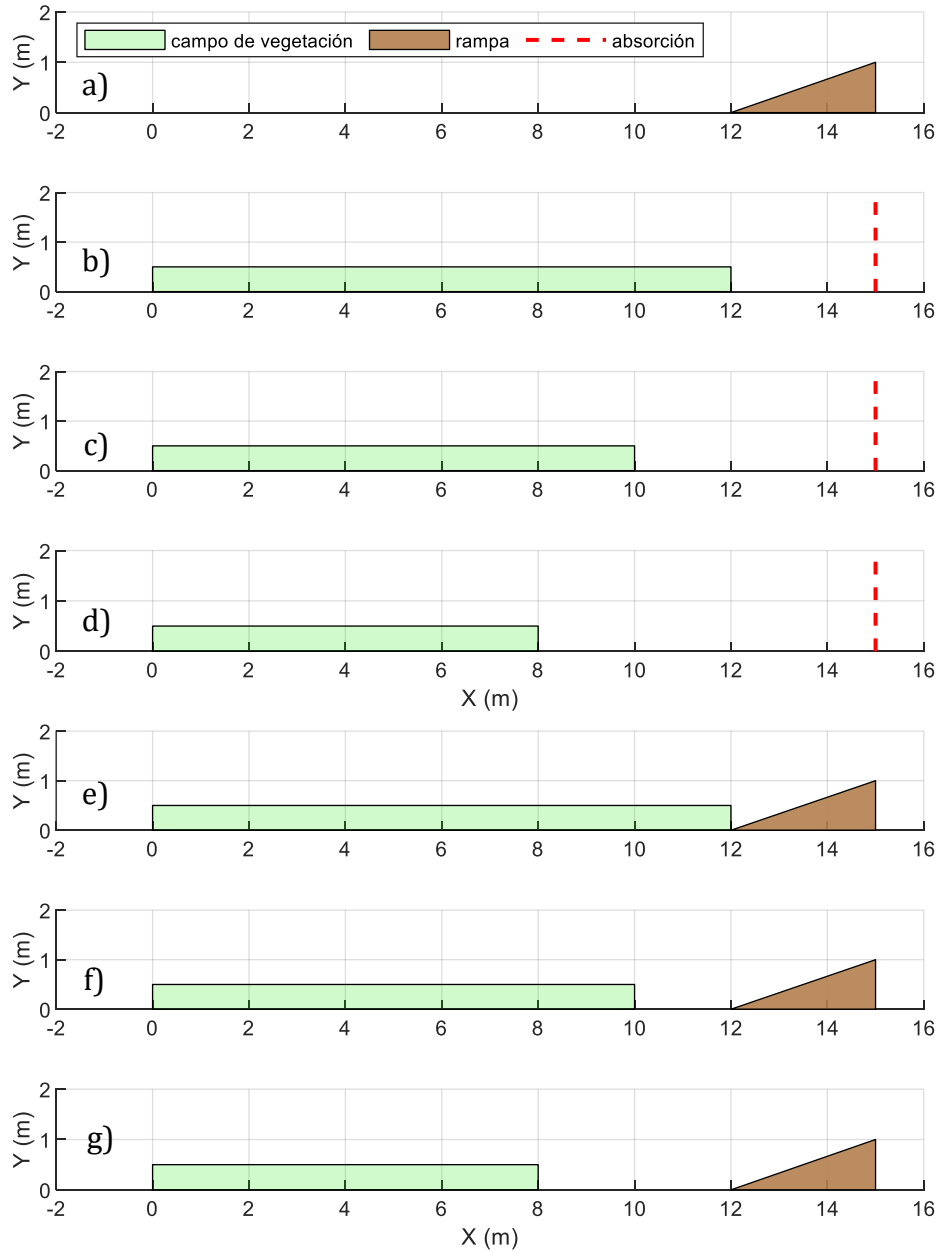


Figura 13. Esquema de resumen de configuraciones simuladas

Solución rígida convencional:

- *veg0*: caso de verificación sin ningún campo de vegetación, solo con rampa impermeable. Tiene la función de corroborar el comportamiento de lo modelado con la teoría de las referencias consultadas. Ver Figura 13 a).

Solución verde:

- *veg1*: dominio con campo de vegetación de 12.0 m de longitud iniciando a 9.0 m de la pala. Detrás del campo se define un contorno absorbente. No existe rampa en este caso. Ver Figura 13 b).
- *veg2*: dominio con campo de vegetación de 10.0 m de longitud iniciando a 9.0 m de la pala. Detrás del campo se define un contorno absorbente. No existe rampa en este caso. Ver Figura 13 c).
- *veg3*: dominio con campo de vegetación de 8.0 m de longitud iniciando a 9.0 m de la pala. Detrás del campo se define un contorno absorbente. No existe rampa en este caso. Ver Figura 13 d).

Solución híbrida:

- *veg4*: corresponde al dominio de *veg1*, pero se incluye la rampa impermeable. El pie de la rampa inicia donde termina el campo de vegetación. Ver Figura 13 e).
- *veg5*: corresponde al dominio de *veg2*, pero se incluye la rampa impermeable. El pie de la rampa inicia a 2.0 m de donde termina el campo de vegetación. Ver Figura 13 f).
- *veg6*: corresponde al dominio de *veg3*, pero se incluye la rampa impermeable. El pie de la rampa inicia a 4.0 m de donde termina el campo de vegetación. Ver Figura 13 g).

3. Discusión de resultados

3.1. Atenuación de la altura de ola

A continuación, se presentan los resultados de la evolución de la altura de ola a lo largo de los diferentes campos de vegetación.

Tabla 9. Evolución de altura de ola y disipación del campo de vegetación

Caso	h (m)	Solución híbrida						Solución verde (sin rampa)					
		H _{sfin4} (m)	H _{sfin5} (m)	H _{sfin6} (m)	β_4	β_5	β_6	H _{sfin1} (m)	H _{sfin2} (m)	H _{sfin3} (m)	β_1	β_2	β_3
1	0.3	0.045	0.041	0.046	0.099	0.101	0.099	0.034	0.037	0.042	0.120	0.120	0.120
5	0.5	0.052	0.055	0.060	0.050	0.049	0.048	0.051	0.054	0.058	0.062	0.062	0.062
6	0.5	0.069	0.072	0.079	0.061	0.061	0.059	0.066	0.071	0.077	0.068	0.068	0.067
10	0.7	0.063	0.075	0.074	0.021	0.016	0.021	0.065	0.068	0.071	0.023	0.023	0.023
11	0.7	0.101	0.113	0.120	0.033	0.032	0.032	0.118	0.124	0.130	0.033	0.033	0.034
12	0.7	0.099	0.074	0.101	0.013	0.020	0.011	0.068	0.072	0.074	0.023	0.023	0.023
13	0.7	0.061	0.109	0.095	0.015	0.008	0.016	0.069	0.072	0.075	0.024	0.024	0.024
14	0.7	0.067	0.083	0.120	0.029	0.016	0.016	0.071	0.073	0.076	0.021	0.022	0.022

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la altura de ola a final del campo de vegetación y el coeficiente β de disipación de altura de ola por unidad de longitud de campo de vegetación. Se dividen en dos grandes grupos: los resultados de *solución híbrida* para estudiar la interacción con la estructura y *solución verde* para aislar el análisis al efecto de la vegetación sin la influencia de la rampa.

En primer lugar, centrandó la atención en los casos de *solución verde*, se observa un coeficiente β idéntico para las tres longitudes de campo de vegetación, lo que indica que las tres longitudes seleccionadas disipan el oleaje por unidad de longitud de la misma manera. Sin embargo, la altura de ola al final del campo varía ya que, dependiendo de la longitud del campo, la ola tiene mayor o menor pérdida de energía a lo largo del mismo. Es fácil ver que, a mayor longitud de campo, menor será la altura de ola tras el campo. Esta tendencia se nota en todos los oleajes, sin excepción.

Por otra parte, se tiene el oleaje 1 para un calado de $h = 0.30m$, en el cual se puede ver que el coeficiente β es mayor en comparación con el resto de oleajes.

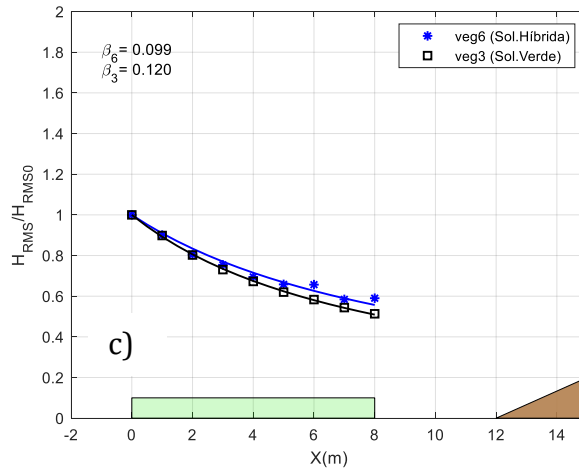
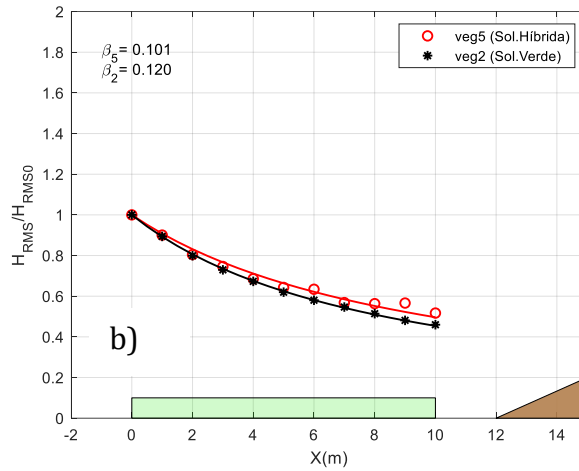
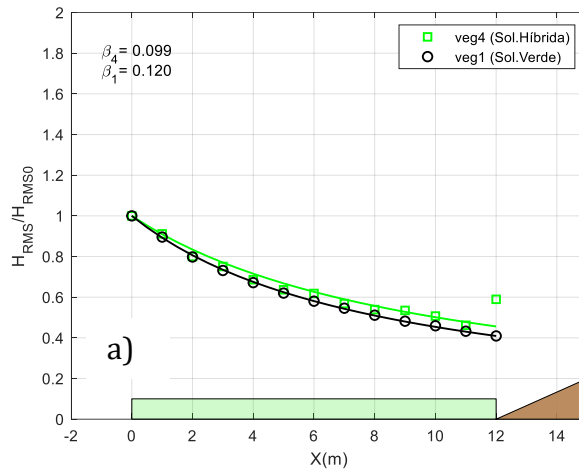


Figura 14. Atenuación de altura de ola, comparativa solución verde y solución híbrida, oleaje 1 a)veg1 y veg4, b)veg2 y veg5, c)veg3 y veg6

En la Figura 14 se muestra la comparativa de la evolución de altura de ola dentro de campo de vegetación para las simulaciones de *solución híbrida* (línea a color) y *solución verde* (línea negra) para el oleaje 1. En todos los casos se observa que la interacción vegetación-rampa produce reflexiones que aumentan la altura de ola y disminuyen la atenuación, respecto a los casos ejecutados para la *solución verde*. Particularmente en esta comparativa, los tres oleajes mostrados se comportan de manera similar, lo que se debe a que la combinación de oleajes pequeños y bajo calado no permiten ver claras diferencias.

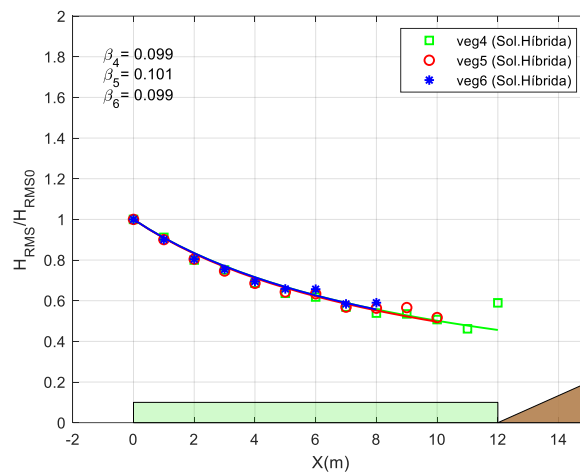


Figura 15. Comparativa de atenuación de altura de ola en función de longitud de campo para el oleaje 1 para solución híbrida

Con respecto a la variable longitud de campo, para los casos de calado $h = 0.30m$ de *solución híbrida*, se aprecia en la Figura 15 que al reducir la longitud de campo, que al igual que en los casos para la *solución verde*, la atenuación es prácticamente la misma ya que el patrón de reflexión se mantiene para las tres longitudes de campo.

En la Figura 16 se muestra la evolución de la altura de ola dentro de los campos de vegetación para los oleajes 5 y 6 que comparten el mismo calado $h = 0.50 m$. Se debe recordar que el oleaje 6 tiene el doble de altura de ola H_{rms} que el oleaje 5 y el mismo periodo, y por tanto mayor peralte y menor parámetro de rotura. Si se compara porcentualmente el coeficiente β para los oleajes 5 y 6, es decir ante un aumento del peralte, por ejemplo, en la configuración *veg4* en la Figura 16 a) y b) se observa un

aumento del coeficiente de disipación, β , de aproximadamente el 22% para el oleaje 6 respecto al oleaje 5, mientras que para la configuración *veg5*, comparando β_5 se tiene un aumento del 25% y para *veg6* con β_6 , se tiene un aumento de 23%. Por lo tanto, conforme se aumenta el peralte, se aumenta la disipación. Sin embargo, no existe una relación clara entre la longitud de campo y β porque a pesar de que se acorte la longitud de campo, el cambio en β es mínimo.

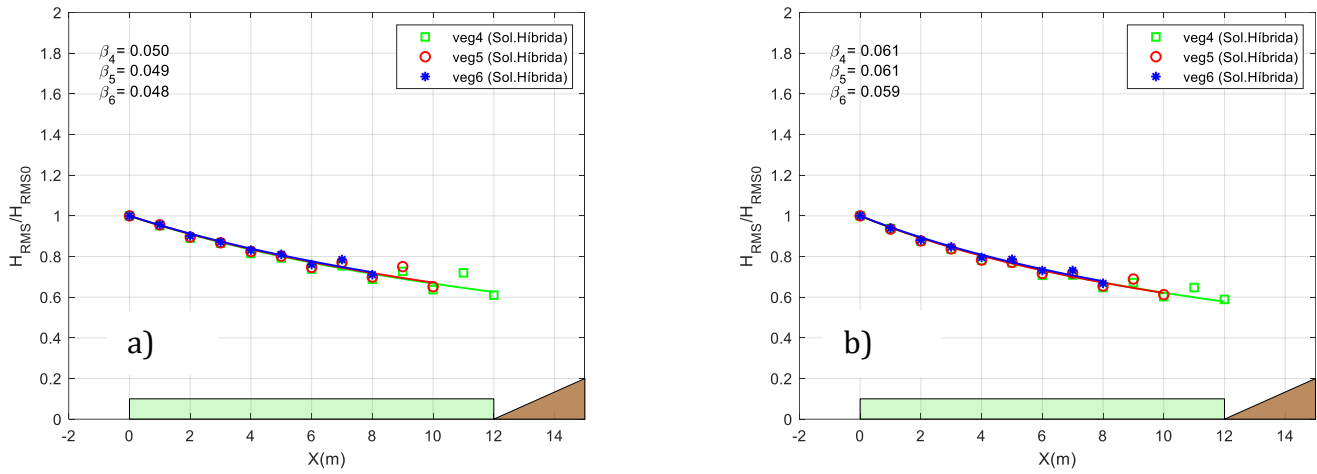


Figura 16. Evolución de altura de ola para los oleajes a)5 y b)6

Si se presta atención a la Figura 16 a), b) que corresponden a configuraciones *veg4*, *veg5* y *veg6*; y campos de 12.0, 10.0 y de 8.0 m respectivamente, se nota que, para el oleaje 5, las configuraciones *veg5* y *veg6* reducen el coeficiente β en menos del 5% respecto a *veg1*, mientras que para el oleaje 6, las reducciones son menores al 3%, es decir son prácticamente iguales. Por lo tanto, no existe un cambio significativo en cuanto al coeficiente de atenuación al disminuir la longitud del campo.

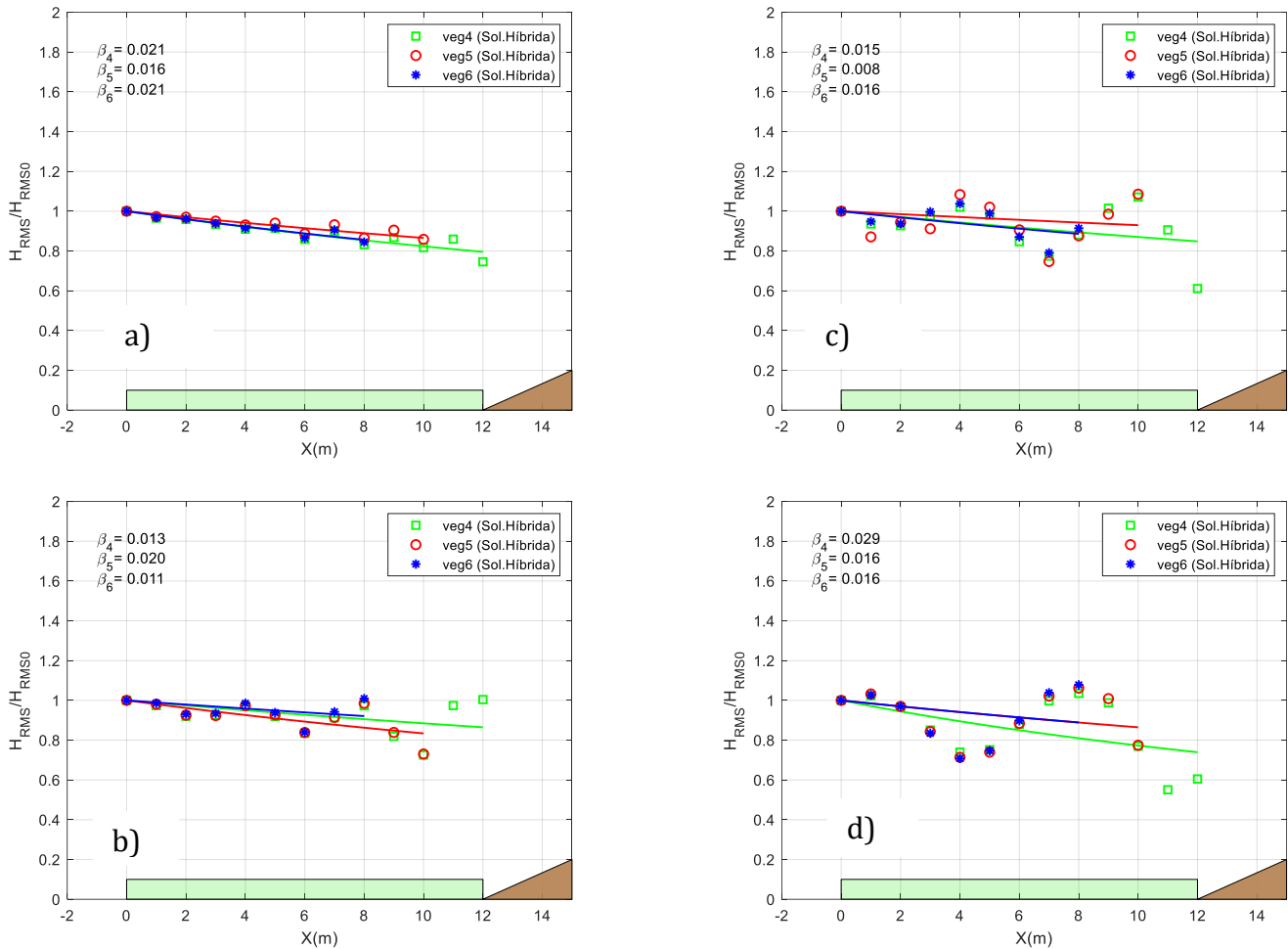


Figura 17. Evolución de altura de ola para oleajes a)10, b)12, c)13 y d)14

En la Figura 17 se muestra la evolución de la altura de ola en función de la longitud de campo para los oleajes a)10, b)12, c)13 y d)14. Si se centra la atención en la Figura 17 a) se aprecia que cuando se acorta la longitud del campo de 12.0 a 10.0 m se disminuye la disipación, ya que la pendiente del ajuste disminuye de $\beta_4 = 0.021$ a $\beta_5 = 0.016$ y, por lo tanto, la altura al final del campo es mayor. No obstante, si el campo se reduce a 8.0 m, el coeficiente de disipación, $\beta_6 = 0.021$, es muy similar al que se tiene con 12.0 m. Este comportamiento también se aprecia para el oleaje 13 en la Figura 17 c).

En la Figura 17 b) se presenta un comportamiento contrario al anterior, para el campo de 12.0 m se tiene $\beta_4 = 0.013$ y cuando se acorta el campo a 10.0 m la disipación aumenta con $\beta_5 = 0.020$. Luego si se acorta más el campo a 8.0 m la disipación vuelve a disminuir $\beta_6 = 0.011$.

Para el oleaje 14, que se presenta en la Figura 17 d), con una longitud de campo de 12.0 m se tiene $\beta_4 = 0.029$. Cuando se acorta el campo a 10.0 y 8.0 m se obtiene el mismo coeficiente de disipación: $\beta_5 = \beta_6 = 0.016$.

Por lo recién comentado es difícil establecer una relación en cómo afecta la longitud del campo en la disipación de altura de ola dentro de los campos de vegetación. Por otra parte, sí existe una tendencia marcada conforme se aumenta el periodo y se disminuye el peralte y aparecen claras oscilaciones en la superficie libre. Dichas oscilaciones sí afectan a la estimación del coeficiente β . Como se puede ver en la Figura 17d), para el oleaje 14, que tiene el mayor periodo, se observan las mayores oscilaciones.

Los patrones de reflexión son independientes de la longitud de los campos de vegetación, esto se puede observar en la ubicación de las alturas de ola a lo largo de la distancia hasta el pie de rampa, que para las tres longitudes son muy similares. Esto se observa para los cuatro oleajes de la Figura 17. No obstante, conforme aumenta el periodo, aumentan los patrones de reflexión y esto modifica el coeficiente de atenuación dependiendo de si el campo de vegetación termina donde se tenga un nodo o un antinodo de la oscilación.

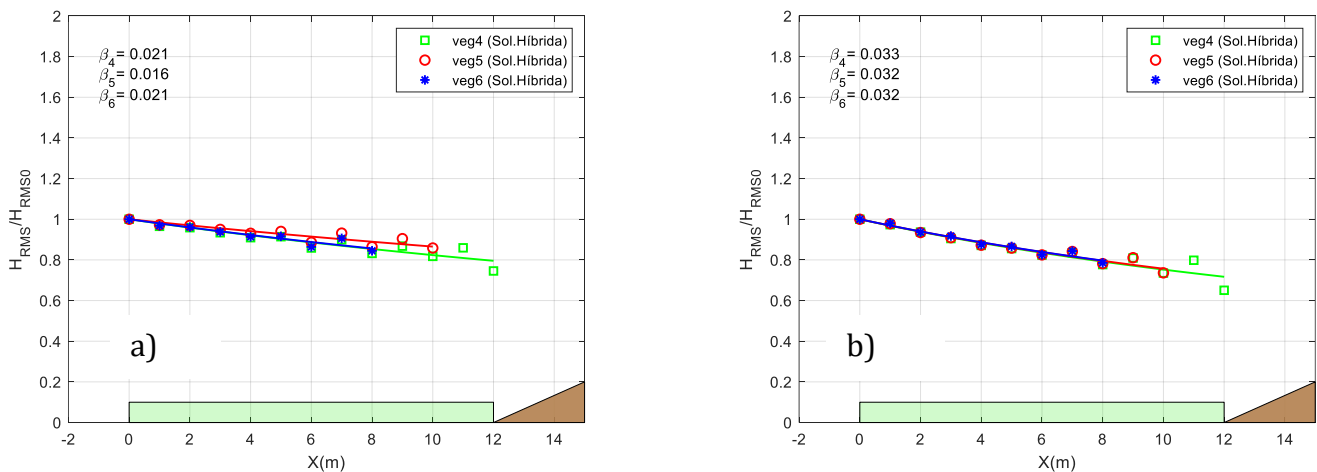


Figura 18. Evolución de altura de ola para oleajes a)10, b)11

En la Figura 18 se muestra la evolución de altura de ola sobre los campos de vegetación. Se comparan los oleajes 10 y 11 que comparten el mismo periodo, pero el oleaje 11 dobla la altura de ola H_{rms} del oleaje 10, lo que se traduce en un aumento del peralte.

Se destaca que conforme se aumenta el peralte, comparando Figura 18 a) y b), aumenta β para todas las longitudes de campo.

En la Figura 19 se estudia la influencia del calado en la disipación del oleaje. Los tres oleajes 1, 5 y 10, comparten la misma altura de ola y periodo. Se observa como β_1 , β_2 , β_3 disminuyen conforme aumenta el calado. Esta tendencia se encuentra en cualquiera de las longitudes de campo.

De lo anterior comentado, se puede resumir que, independientemente de la relación de sumergencia, coeficiente de atenuación entre las diferentes longitudes de campo modeladas para solución híbrida resulta en diferencias despreciables. Además, conforme aumenta el periodo y disminuye el peralte, disminuye el coeficiente de atenuación de altura de ola. Por otra parte, los patrones de reflexión son independientes de la longitud del campo de vegetación. No obstante, conforme aumenta el periodo, los patrones de reflexión son más marcados y afectan el coeficiente de atenuación.

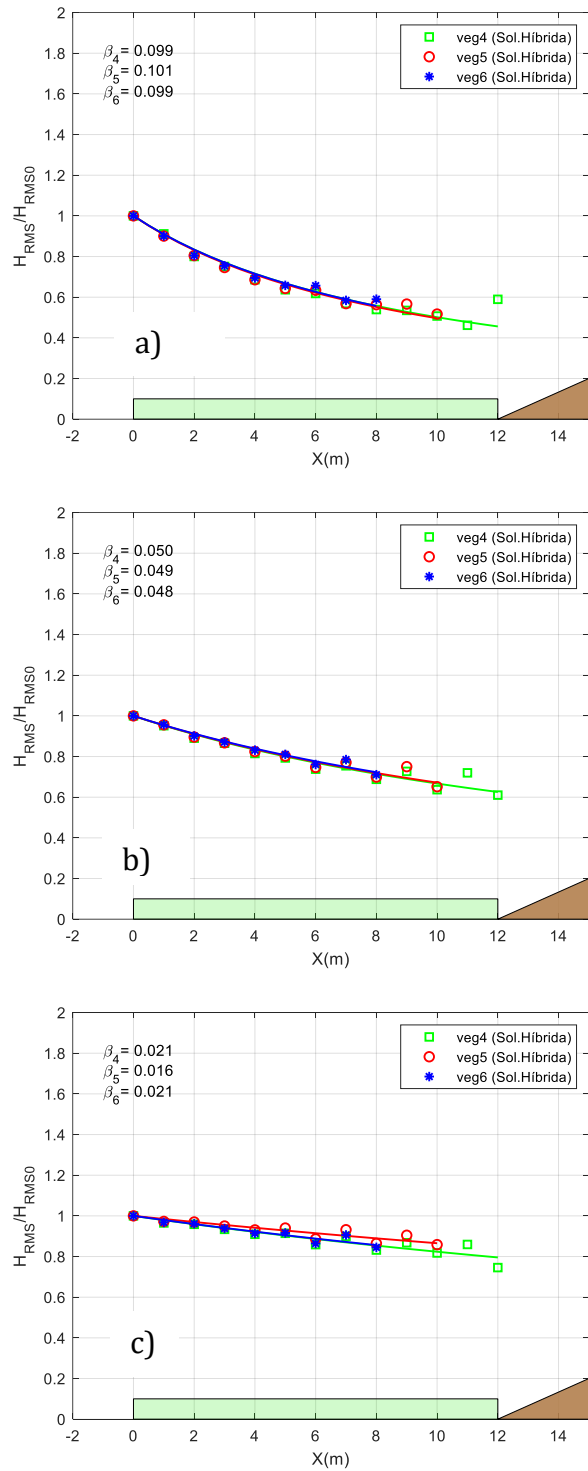


Figura 19. Evolución de altura de ola para estados de mar a)1, b)5, c)10

3.2. Run-up

En la Tabla 10 se presentan los resultados de run-up para el caso sin vegetación y los tres casos de soluciones híbridas.

Tabla 10. Run-up y K_{Ru} de las configuraciones de solución híbrida

Caso	$Ru_{2\%}$ (veg0)	$Ru_{2\%}$ (veg4)	$K_{Ru}(0-4)$	$Ru_{2\%}$ (veg5)	$K_{Ru}(0-5)$	$Ru_{2\%}$ (veg6)	$K_{Ru}(0-6)$
1	0.18	0.07	61%	0.08	56%	0.08	56%
2	0.20	0.06	70%	0.07	65%	0.08	60%
3	0.16	0.04	75%	0.05	69%	0.05	69%
4	0.28	0.06	79%	0.09	68%	0.08	71%
5	0.24	0.11	54%	0.13	46%	0.14	42%
6	0.28	0.15	46%	0.16	43%	0.18	36%
7	0.24	0.11	54%	0.12	50%	0.13	46%
8	0.30	0.12	60%	0.14	53%	0.15	50%
9	0.35	0.14	60%	0.16	54%	0.18	49%
10	0.26	0.20	23%	0.21	19%	0.21	19%
11	0.32	0.25	22%	0.26	19%	0.27	16%
12	0.27	0.19	30%	0.19	30%	0.20	26%
13	0.29	0.19	34%	0.21	28%	0.21	28%
14	0.33	0.21	36%	0.22	33%	0.23	30%

En la Tabla 10 se presentan los resultados de run-up para todos los oleajes simulados. En primer lugar, se muestran los valores de $Ru_{2\%}$ para la configuración *veg0* sin ningún campo de vegetación, que se utilizará como caso de referencia para comparar la efectividad de los campos de vegetación en la reducción del run-up y la atenuación de la altura de ola. Independientemente de la relación de sumergencia, se constata que: 1. a mayor periodo, aumenta el run-up y 2. a mayor altura de ola, aumenta el run-up.

Para cuantificar la reducción del run-up se calcula la disminución tomando como referencia el resultado obtenido para la configuración *veg0*. El coeficiente k_{Ru} es una medida de cuánto se reduce el $Ru_{2\%}$ por la presencia de vegetación:

$$k_{Ru}(0 - i) = 1 - \frac{Ru_{2\%}(vegi)}{Ru_{2\%}(veg0)} \quad (14)$$

Concentrando en análisis en los calados de $h = 0.30 m$ correspondientes a la vegetación emergida, se puede observar que para la configuración *veg4*, de acuerdo con los oleajes 1, 2 y 4, el run-up se reduce entre un 60 y un 80%, siendo el valor de $Ru_{2\%}$ obtenido para los tres campos muy similar. A pesar de que se tienen forzamientos diferentes (se aumenta el periodo, se mantiene constante la altura de ola), se obtienen magnitudes similares de $Ru_{2\%}$. Esto se debe a la alta influencia de la vegetación que disipa en gran medida el oleaje incidente. Este aspecto también se observa en los otros calados. Se destaca que, a mayor periodo, se tiene una mayor reducción de run-up. Estos mismos casos, pero con la configuración de *veg5*, muestran una tendencia similar ya que se reduce el run-up entre el 55 y el 70%. En el caso *veg6* se encuentra una disminución entre el 55 y el 70% y el $Ru_{2\%}$ es idéntico para todos los casos.

Si se pone atención a los casos *veg4* con la vegetación a nivel de calado, $h = 0.50m$, en detalle los casos 5, 7, 8 y 9, se nota como a mayor periodo se obtiene mayor run-up. Además, la reducción del run-up está entre el 55 y el 60% observándose que, a mayor periodo, mayor reducción de run-up. Los valores de $Ru_{2\%}$ son similares en los cuatro casos, pero son ligeramente mayores para los periodos más grandes. Con respecto al caso *veg5* los porcentajes de reducción varían entre el 45 y el 55% y para *veg6* entre un 40 y un 50%. Por lo tanto, conforme se reduce la longitud del campo de vegetación, se reduce la disipación de energía y se encuentran mayores valores de run-up.

En los casos de vegetación sumergida, $h = 0.70m$, en específico los casos 10, 12, 13 y 14, para la configuración *veg4* la reducción del run-up varía entre un 25 y un 55%, respetando el comportamiento de los otros niveles de calado, dado que a mayor periodo, mayor es la disipación de energía. Los valores de $Ru_{2\%}$ son similares para todos los casos. Mientras que para la configuración *veg5* la disipación varía entre un 20 y un 50% y para *veg6* varía entre un 20 y un 40%. En consecuencia con lo observado

para el calado de $h = 0.50m$, a mayor longitud de campo, mayor disipación de energía y menor run-up.

Para analizar la influencia de la relación de sumergencia, de la Tabla 10 se debe prestar atención a los casos 1, 5 y 10 donde se muestra que, para el mismo oleaje conforme se aumenta el calado y la vegetación queda sumergida, se tiene menor disipación.

Para estos oleajes la reducción del run-up varía entre un 25 y un 60%. Este comportamiento se tiene para las tres longitudes de campo de vegetación ensayada: *veg4*, *veg5* y *veg6*. Se tiene la misma tendencia si se toman los grupos de casos: 2, 7 y 12 con reducciones del run-up entre un 30 y un 70%; 4, 8 y 13 con reducciones entre el 35 y el 80%; o 3, 9 y 14 con una disminución entre el 50 y 75%. Por lo tanto, conforme aumenta el periodo (disminuye el peralte), el porcentaje de reducción del run-up aumenta.

La otra variable para tomar en consideración es longitud del campo y su influencia en el run-up obtenido. Si se concentra el análisis en los casos de vegetación emergida, calado $h = 0.30m$, para cada uno de los estados de mar, se observa como conforme se acorta el campo vegetado, el run-up es mayor. Para la configuración *veg4* se encuentran reducciones de run-up entre un 60 y un 80%, mientras que para *veg5* y *veg6* la reducción está entre un 55 y un 70%. La diferencia entre *veg5* y *veg6* es mínima.

Consecuentemente, para el calado a nivel con la vegetación $h = 0.50m$, para la configuración *veg5* se tienen reducciones de run-up entre el 55 y el 60%, para *veg5*, entre el 45 y el 55% y para *veg6*, entre el 40 y el 50%. Estos resultados concuerdan con el comportamiento observado con la vegetación emergida, es decir, si se reduce la longitud del campo, se produce menor disipación de energía y mayor run-up.

Por último, para el calado $h = 0.70m$ correspondiente a vegetación sumergida, para la configuración *veg4* se observan reducciones de run-up entre el 25 y el 35% mientras que para *veg5* y *veg6* se ve una disminución entre el 20 y el 30%.

De lo anterior, se resume que independientemente de la relación de sumergencia, a mayor longitud de campo, mayor disipación de energía y menor run-up. Con respecto

a la relación de sumergencia, los casos con vegetación emergida es la que presenta mayores reducciones del run-up. Por otra parte, en lo que respecta al peralte, se constató que conforme disminuye el peralte aumenta el porcentaje de reducción del run-up.

3.3. Verificación de formulaciones del run-up relativo

El campo de vegetación produce una atenuación de la altura de ola y el run-up es función de la altura de ola incidente a pie de estructura. Por ello, se separa la onda incidente a pie de dique porque las mediciones de desplazamiento de superficie libre contienen los efectos de reflexión con la rampa. Cuando se incluyen los campos de vegetación en las simulaciones, se presenta una desventaja a la hora de utilizar métodos para encontrar el coeficiente de reflexión por el acomodo requerido de los sensores ya que quedan dentro del campo de vegetación. Por lo que se optó por ejecutar simulaciones sin la estructura, con el contorno absorbente detrás del campo y se midió directamente la altura de ola tras el campo vegetado.

Se pretende entender el comportamiento del run-up si se tiene un campo de vegetación frente a una rampa impermeable, con el objetivo de determinar si el run-up relativo sigue la relación con el parámetro de rotura, que se observaría sin campo de vegetación.

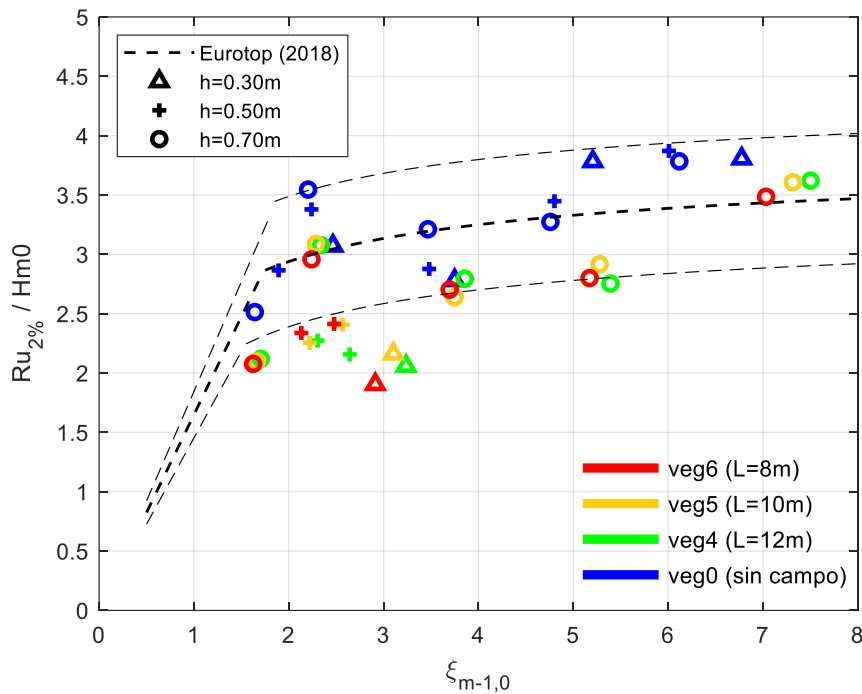


Figura 20. Run-up en función de parámetro de rotura para casos con vegetación

En la Figura 20 se muestra el run-up relativo en función del parámetro de rotura para las diferentes longitudes de campo. Se aprecia como los campos de vegetación afectan el comportamiento de run-up y como muchos de los casos simulados no se ajustan a la formulación analítica para rampa impermeable. Para parámetros de rotura $\xi_{m-1,0} < 3$ se tienen cuatro oleajes fuera de las bandas de confianza del comportamiento que expone (Eurotop, 2018) y corresponden a los casos con vegetación emergida, $h = 0.30 \text{ m}$, y a nivel, $h = 0.50 \text{ m}$. Solamente un caso de la vegetación sumergida, $h = 0.70 \text{ m}$, se encuentra fuera de las bandas de confianza y cercano a la zona de rotura (primer tramo de pendiente de comportamiento teórico) y es el oleaje 11. El resto de los casos con vegetación sumergida se encuentran dentro de la tendencia. Estos casos corresponden a aquellos en los que el efecto de la vegetación sobre el oleaje es menor y se observa que el run-up resultante de la combinación del campo de vegetación con la rampa impermeable se podría obtener utilizando la formulación para rampa impermeable. Sin embargo, en aquellos casos en los que la vegetación está emergida, la influencia de la misma es mucho mayor. Por una parte incluyen en gran medida a la altura de ola y por otra a los patrones de reflexión que se producen entre el campo y la

rampa. En estos casos, la formulación para rampa impermeable del (Eurotop, 2018) sobrestimaría el valor del run-up relativo producido sobre la rampa. Asimismo, cabe resaltar que la presencia del campo de vegetación, para casos emergidos, reduce el run-up relativo esperado sobre la estructura, lo cual pone en valor este tipo de soluciones híbridas.

4. Conclusiones

La metodología planteada ha permitido alcanzar los objetivos establecidos. Se caracterizó el efecto de la combinación de un campo de vegetación y rampa impermeable y cómo influye en la reducción del run-up producido sobre la rampa y la atenuación de altura de ola a lo largo del campo de vegetación.

Atenuación de altura de ola y su relación con el peralte, el calado y la longitud de campo:

- Los campos de vegetación disminuyen la altura de ola y esta disminución es mayor cuanto más largo sea el campo. Se observa además que el coeficiente de atenuación obtenido para las diferentes longitudes de campo modeladas es independiente de la longitud del campo para todos los casos.
- Conforme aumenta el periodo y/o disminuye la altura de ola, y por lo tanto disminuye el peralte, el coeficiente de atenuación de altura de ola también disminuye. Es decir, las alturas de ola más grande y los periodos de oleaje más cortos se ven atenuados en mayor medida.
- Los patrones de reflexión observados en las soluciones híbridas no presentan diferencias notables en función de la longitud del campo de vegetación. No obstante, conforme aumenta el periodo, los patrones de reflexión son más marcados. Estas oscilaciones producidas por los patrones de reflexión afectan en gran medida la estimación del coeficiente de atenuación a partir de los valores de altura de ola medidos a lo largo del campo.

Run-up y su relación con el peralte, el calado y la longitud de campo:

- Independientemente de la relación de sumergencia, conforme aumenta el periodo (disminuye el peralte), aumenta la reducción del run-up.
- Para todos los casos de solución híbrida, la presencia del campo de vegetación resulta en una disminución del run-up producido sobre la rampa. Conforme disminuye el calado y la vegetación queda emergida esta reducción de run-up porcentual es mayor.
- Independientemente del calado, conforme aumenta la longitud de campo, se tienen menores valores de run-up. No obstante, las diferencias entre las longitudes 10.0 y 8.0 m son despreciables.

Run-up en función de parámetro de rotura con campos de vegetación:

- Para calados con vegetación emergida y a nivel, la formulación del (Eurotop, 2018) para el cálculo del run-up relativo sobreestima dicho valor. Es decir, para casos en los que la vegetación tiene una alta interacción con el oleaje incidente y reflejado desde la rampa, el run-up relativo resultando es menor al obtenido con las fórmulas clásicas.
- Para vegetación sumergida, este run-up relativo sí puede obtenerse a través de la fórmula del (Eurotop, 2018) para rampas impermeables. Para estos casos las interacciones entre el campo y la rampa son más débiles y el run-up relativo responde al esperado según las formulaciones existentes.
- Por lo tanto, y de forma general, para casos en los que la vegetación se encuentra emergida o a nivel, las formulaciones del Eurotop (2018) para el cálculo de run-up sobre rampa impermeable sobreestiman dicho valor. Por ello, es necesario obtener nuevas formulaciones para hacer una estimación más precisa para estos casos de soluciones híbridas.

Futuras líneas de investigación:

- En el trabajo se podría ampliar las variables involucradas, es decir, ensayando más casos de oleaje para cubrir mayores rangos de peralte y parámetro de

rotura, aumentando la cantidad de longitudes de campo vegetado y variando la pendiente de la rampa.

- Por otro lado, se podría considerar la variación de las características de la vegetación, el área frontal de la planta, las densidades de tallos por unidad de área o la flexibilidad. En un estudio más amplio se podría considerar otras especies de vegetación de marisma o de otros entornos. Consecuentemente, se podría incluir ensayos con más calados y por tanto más relaciones de sumergencia.
- El análisis más amplio de casos, incluyendo diferentes tipos de soluciones híbridas, permitiría reforzar el análisis comparativo de formulaciones de run-up para así poder obtener una nueva formulación que permita la estimación de esta variable para este tipo de soluciones o, al menos, estimar los errores derivados de aplicar formulaciones realizadas para soluciones convencionales.
- Adicionalmente, se podría profundizar sobre la influencia de ondas infragravitatorias, puesto que el run-up podría variar debido a la onda larga liberada por grupos.

Referencias

- Anderson, M. E., & Smith, J. M. (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering*, 83, 82–92.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.004>
- Borsje, B. W., van Wesenbeeck, B. K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T. J., van Katwijk, M. M., & de Vries, M. B. (2011). How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering*, 37(2), 113–122.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.027>
- Chembolu, V., Kakati, R., & Dutta, S. (2019). A laboratory study of flow characteristics in natural heterogeneous vegetation patches under submerged conditions. *Advances in Water Resources*, 133(March).
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103418>
- Eurotop. (2018). *Eurotop 2018; Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. 320. www.overtopping-manual.com
- Garzon, J. L., Maza, M., Ferreira, C. M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2019). Wave Attenuation by Spartina Saltmarshes in the Chesapeake Bay Under Storm Surge Conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7), 5220–5243.
<https://doi.org/10.1029/2018JC014865>
- Gedan, K. B., Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B., & Silliman, B. R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: Answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7–29.
<https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7>
- Jones, H. P., Hole, D. G., & Zavaleta, E. S. (2012). Harnessing nature to help people adapt to climate change. *Nature Climate Change*, 2(7), 504–509.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1463>
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980). *The Measurements of Incident and Reflected*

Spectra Using a Least Square Method. 154–172.

- Maza, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2013). A coupled model of submerged vegetation under oscillatory flow using Navier-Stokes equations. *Coastal Engineering*, *80*, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.04.009>
- Mendez, F. J., & Losada, I. J. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, *51*(2), 103–118. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.11.003>
- Shores, K. (2015). *Special Section on Coastal Engineering and Climate Change*. *350*(6262). www.sciencemag.org
- Van Loon-Steensma, J. M., & Kok, M. (2016). Risk reduction by combining nature values with flood protection? *E3S Web of Conferences*, *7*, 1–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160713003>
- Vuik, V., Jonkman, S. N., Borsje, B. W., & Suzuki, T. (2016). Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes. *Coastal Engineering*, *116*, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.06.001>