



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

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



NUEVA FORMULACIÓN DE ATENUACIÓN DE ENERGÍA BAJO CONDICIONES DE OLEAJE Y CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA BIOMASA AÉREA

Trabajo realizado por:

Isabel Gallego Bermúdez

Dirigido:

María Emilia Maza Fernández

Titulación:

**Máster Universitario en
Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2023

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Luis Guillermo y Ruth Mery, por su respaldo, por ser mi gran inspiración. Gracias a mis hermanos Ana María y Luis Fernando, por acompañarme siempre. Gracias a mí sobrina Isabella, a la que he tenido que ver crecer de lejos y a la que quiero inspirar para que cumpla sus sueños. Su constante aliento y ejemplo me han llevado hasta aquí, y por eso este logro también les pertenece. Gracias a toda mi familia, porque desde diferentes lugares del mundo han estado ahí para apoyarme a pesar de la distancia.

A Mariana, cualquier palabra se queda corta para agradecerte por todo lo que haces por mí. Gracias por siempre estar dispuesta a explicarme con paciencia, por tu amor incondicional. Gracias por ayudarme a mantener la calma en los momentos difíciles durante este año. Gracias por las comidas hechas en casa que fueron fuente de energía y bienestar. Gracias por ayudarme a hacer realidad este sueño, por demostrarme que cuando luchamos juntas no hay imposibles para nosotras.

A Javi por su confianza desde el momento cero. Gracias por echarnos un cable cuando más lo necesitamos y por todas tus enseñanzas a lo largo del máster.

A mi directora, María, por sus valiosos aportes para el desarrollo de este trabajo. Gracias por creer en mí y por tu calidad humana, gracias por las oportunidades brindadas.

A todos los profesores del máster, porque cada uno de ustedes ha dejado huella en mí. Gracias Gabo, estuviste acompañando este proceso de principio a fin, te agradezco por tu confianza y tus enseñanzas. Gracias Raúl, por compartir tu talento con tus estudiantes y por tu capacidad de inspirar.

A mis amigos en Colombia, especialmente a Laura y Mateo. Gracias por su paciencia, por sus palabras de ánimo durante este año, por alegrarse conmigo por este logro. Gracias también a Paola por las risas y la buena energía. Espero volver a coincidir pronto con ustedes.

A mis compañeros, por hacer de esta experiencia algo único. Gracias Carla, por tus abrazos en los momentos más oportunos y por motivarme a salir de mi zona de confort. Gracias Gabriel por tu calidez y por los paseos en tu coche. Éxitos para todos en su vida, se merecen todo lo mejor.

A mi gran amiga Natalí, gracias por los momentos vividos que siempre quedarán en mi corazón. Gracias por ser el mejor equipo, por nuestras infinitas charlas y risas, por transmitirme *tranquilidad* en los momentos más difíciles y por nuestras noches en vela con mi sándwich favorito a las 3 de la mañana. La vida nos juntó de la manera más inesperada y decidimos aprender, crecer y disfrutar al máximo. Hay que hacer realidad los proyectos con los que hemos soñado.

Gracias a la vida que me ha puesto aquí en el momento justo, por demostrarme que cuando hay convicción y determinación todo se puede lograr, incluso cuando los planes no salen de la manera esperada. Gracias al mar, por su grandeza, por transmitir tranquilidad y por ser fuente infinita de inspiración.

ÍNDICE

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Estado del arte.....	10
1.2. Objetivos.....	14
2. METODOLOGÍA.....	15
3. DATOS DE PARTIDA	16
3.1. Descripción de la campaña experimental utilizada	16
3.2. Información disponible.....	18
4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.....	22
4.1. Obtención de coeficientes de atenuación.....	22
4.2. Relación entre coeficientes de atenuación y biomasa aérea y comparación con formulaciones existentes en función de la biomasa aérea	26
▪ Análisis y comparación para el coeficiente de atenuación (β)	27
▪ Análisis y comparación para el coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea (βSB)	30
5. OBTENCIÓN DE LA NUEVA FORMULACIÓN	33
5.1. Implementación de parámetro que relaciona velocidad orbital y velocidad de corriente (Formulación 1)	34
5.2. Implementación de parámetro que relaciona la velocidad de fase y la velocidad de la corriente (Formulación 2).....	37
5.3. Comparación entre formulaciones	41
6. CONCLUSIONES	43
7. REFERENCIAS.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico implementado	16
Figura 2. (A) Esquema de la configuración experimental. Vista en planta para los casos de densidad 100% y 50%. Vista en perfil, identificando los 15 sensores de control. (B) Especies utilizadas en el ensayo. De izquierda a derecha: <i>Spartina</i> sp., <i>Salicornia</i> sp., <i>Juncus</i> sp. Y <i>Halimione</i> sp.. Tomado de Maza et al. (2022).	17
Figura 3. Ejemplo de registro experimental de superficie libre para 50 olas. Ensayo con <i>Spartina</i> sp. asociado a $H=0.08$ m, $T=2$ s, $h=0.3$ m y $U=0.13$ m/s.....	20
Figura 4. <i>Spartina maritima</i> . Tomado de: Asturnatura.com	21
Figura 5. <i>Salicornia europaea</i> . Tomado de: Asturnatura.com	21
Figura 6. <i>Halimione portulacoides</i> . Tomado de: Asturnatura.com.....	22
Figura 7. <i>Juncus maritimus</i> . Tomado de: Asturnatura.com.....	22
Figura 8. Análisis de atenuación para un calado de 0.2 m, velocidad de corriente de 0.13 m/s, período de 2 s y altura de ola en generación de 0.08 m para <i>Spartina</i> sp. 100% (S100), 50% (S050) y densidad 0 (S000); <i>Salicornia</i> sp. 100% (L100), 50% (L050) y 0% (L000); <i>Juncus</i> sp. 100% (J100), 50% (J050) y 0% (J000); y <i>Halimione</i> sp. 100% (H100), 50% (H050) y 0% (H000).	25
Figura 9. Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.....	28
Figura 10. Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y velocidades de corriente.	28
Figura 11. Formulación existente que relaciona el coeficiente de atenuación (β) con la biomasa hidráulica del ecosistema (HSB) para condiciones de oleaje regular (sin considerar la acción de las corrientes). Fuente: Tomado de: Maza et al. (2022).	29
Figura 12. Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.	31
Figura 13. Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y corrientes.	31
Figura 14. Formulación existente que relaciona el coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) con la biomasa hidráulica del ecosistema (HSB) para condiciones de oleaje regular (sin considerar la acción de las corrientes). Fuente: Tomado de: Maza et al. (2022).	32
Figura 15. Formulación 1: Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * (U_w/U_c) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.	35
Figura 16. Formulación 1: Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * (U_w/U_c) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y velocidades de corriente.	36
Figura 17. Formulación 1: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB)) * (U_w/U_c) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.....	36

Figura 18. Formulación 1: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * (U_w/U_c) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y corrientes.	37
Figura 19. Formulación 2: Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * ($\sigma/(k*U_c)$) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.	39
Figura 20. Formulación 2: Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * ($\sigma/(k*U_c)$) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y velocidades de corriente.	39
Figura 21. Formulación 2: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB)) * ($\sigma/(k*U_c)$) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.....	40
Figura 22. Formulación 2: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * ($\sigma/(k*U_c)$) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y corrientes.	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones hidrodinámicas ensayadas para las especies Halimione, Juncus y Spartina.....	18
Tabla 2. Condiciones hidrodinámicas ensayadas para la especie Salicornia.....	19
Tabla 3. Ubicación de los sensores respecto al punto de inicio del campo vegetado ($X=0$)	19
Tabla 4. Caracterización de las 4 especies de marismas.....	20
Tabla 5. Coeficientes de atenuación obtenidos para los diferentes ensayos y para las 3 densidades consideradas (0%, 50% y 100%), con su intervalo de confianza del 95% (95% CI) y su coeficiente de correlación	26
Tabla 6. Comparación de formulaciones por medio de coeficientes estadísticos	43

RESUMEN

Título: Nueva formulación de atenuación de energía bajo condiciones de oleaje y corriente en función de la biomasa aérea.

Autora: Isabel Gallego Bermúdez

Directora: María Emilia Maza Fernández

Palabras clave: Atenuación del oleaje, biomasa aérea, marismas, protección costera, coeficiente de atenuación.

Históricamente la protección costera se ha centrado en el uso de infraestructura gris. Sin embargo, cada vez se pone más en valor la protección brindada por los ecosistemas intermareales, ya que representan una barrera natural y proveen servicios ecosistémicos relevantes como la protección frente a inundaciones. La revisión de la literatura ha permitido identificar que la atenuación de la energía del oleaje que interacciona con este tipo de ecosistemas ha sido estudiada típicamente con base en el coeficiente de arrastre, con la desventaja de que este enfoque requiere un proceso de calibración y es caso dependiente. Esto ha motivado que se busquen otras alternativas para la estimación del coeficiente de atenuación, entre ellas se destaca el estudio de Maza et al. (2022) el cual se centra en la obtención del coeficiente de atenuación en función de la biomasa aérea del ecosistema, cuyos resultados son satisfactorios para condiciones de oleaje. Sin embargo, no se identifica una formulación que permita estimar la atenuación de la energía en condiciones de ola-corriente en función de la biomasa aérea.

Todo lo anterior motiva el objetivo del presente estudio, el cual se centra en la obtención de una nueva formulación para estimar la disipación de energía en condiciones de ola-corriente en función de la biomasa aérea del ecosistema. Para el desarrollo de este estudio se contó con datos experimentales de ola-corriente en los cuales se realizaron ensayos de laboratorio con 4 especies de marismas *Spartina maritima*, *Salicornia europaea*, *Halimione portulacoides* y *Juncus maritimus*. Para dar cumplimiento a los objetivos del estudio, se realizó la caracterización de datos experimentales y la obtención de coeficientes de atenuación para los diferentes ensayos. Esto permitió comprender los procesos de transformación de la energía del flujo en condiciones de oleaje-corriente. Además, se compararon las relaciones obtenidas con formulaciones existentes basadas en la biomasa aérea, teniendo en cuenta la ocurrencia conjunta de oleaje y corrientes.

El análisis de los datos de laboratorio demostró la importancia de considerar las corrientes en las formulaciones para estimar el coeficiente de atenuación en condiciones de oleaje y corrientes, ya que su omisión generaba reducciones significativas de entre el 40 y 50% en el coeficiente de correlación, respecto a la formulación existente para estimar la atenuación del oleaje en función de la biomasa aérea del ecosistema, la cual solo consideraba condiciones de oleaje. Adicionalmente, los análisis realizados permitieron identificar que si se hace uso de la formulación de Maza et al. (2022) en los casos en los que se tienen condiciones de ola-corriente, hace que se sobreestime el coeficiente de atenuación y por ende la capacidad de atenuación del ecosistema. Por lo tanto, se

proponen 2 nuevas formulaciones para casos de ola-corriente en la misma dirección, las cuales toman como punto de partida la formulación de Maza et al. (2022) e incorporan factores adicionales, justificados por la literatura, que tienen en cuenta la influencia de las corrientes.

Las formulaciones propuestas mostraron buenos resultados para la estimación del coeficiente de atenuación cuando se tienen condiciones de ola-corriente, pues ambas mostraron tener una bondad ajuste. La primera formulación incluye un factor que relaciona la velocidad orbital y la velocidad de la corriente, mientras que la segunda relaciona la velocidad de fase y la velocidad de la corriente. La bondad de ajuste de ambas formulaciones es similar, pero se sugiere el uso de la segunda formulación, pues depende de menos parámetros y esto facilita que se pueda aplicar de forma más directa. Estas formulaciones mejoraron la estimación del coeficiente de atenuación en condiciones de oleaje-corriente, respecto a la formulación de referencia. Ambas formulaciones tienen el potencial de ser incorporadas en modelos numéricos, lo que abriría la posibilidad de extender su aplicación a casos de estudio reales en los que se desee modelar la atenuación en ecosistemas intermareales en estuarios.

ABSTRACT

Title: New energy attenuation formulation under wave and current conditions as a function of standing biomass.

Author: Isabel Gallego Bermúdez

Director: María Emilia Maza Fernández

Key words: Wave damping, aerial biomass, marshes, coastal protection, attenuation coefficient.

Historically, coastal protection has primarily relied on grey infrastructure. However, there is a growing recognition of protective benefits provided by intertidal ecosystems, which serve as a natural barrier and offer essential ecosystem services such as flood protection. Literature review reveals that the attenuation of wave energy interacting with these ecosystems has typically been studied based on the drag coefficient, with the disadvantage that this approach requires calibration and is case-dependent. This has spurred the search for alternative methods to estimate the attenuation coefficient. One of them is the study done by Maza et al. (2022), which focuses on deriving the attenuation coefficient based on the standing biomass of the ecosystem, yielding satisfactory results for wave conditions. However, it was not identified a formulation that allows for the estimation of energy attenuation in wave-current conditions based on standing biomass.

Based on the factors mentioned above, the objective of this study revolves around obtaining a new formulation to estimate energy dissipation in wave-current conditions based on stanging biomass. The study leveraged experimental data involving wave-current conditions, with laboratory tests conducted on four salt marsh species: *Spartina maritima*, *Salicornia europaea*, *Halimione portulacoides*, and *Juncus maritimus*. To fulfill the study's objectives, data characterization and the calculation of attenuation coefficients for different experiments were performed. This facilitated an understanding

of energy transformation processes in wave-current conditions. Furthermore, the obtained relationships were compared with existing formulations based on aerial biomass, taking into account the concurrent presence of waves and currents.

The analysis of laboratory data demonstrated the importance of considering currents in formulations to estimate the attenuation coefficient under wave and current conditions. The omission of currents resulted in significant reductions of between 40 and 50% in the correlation coefficient, compared to the existing formulation for estimating wave attenuation based on ecosystem aerial biomass, which only considered wave conditions. Additionally, the analyses conducted allowed us to identify that using Maza et al. (2022) formulation in cases where wave-current conditions exist leads to an overestimation of the attenuation coefficient. This implies an affection in the same sense over the estimation of ecosystem attenuation capacity. Therefore, we propose 2 new formulations for same direction wave-current cases, which are based on Maza et al.'s formulation (2022) and incorporate additional factors, justified by the literature, that consider the influence of currents.

The proposed formulations yielded favorable results in estimating the attenuation coefficient under wave-current conditions, demonstrating a strong correlation. The first formulation includes a factor relating orbital velocity to current velocity, while the second formulation relates phase velocity to current velocity. Both formulations exhibited similar goodness of fit, but the use of the second formulation is recommended due to its dependency on fewer parameters, facilitating a more direct application. These formulations improved the estimation of the attenuation coefficient in wave-current conditions compared to the reference formulation. Both formulations have the potential for incorporation into numerical models, offering the possibility of extending their application to real case studies involving attenuation in intertidal ecosystems within estuaries.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras están sometidas a grandes presiones antrópicas debido a las grandes tasas poblacionales que albergan y al desarrollo que se ha impulsado en ellas (Luijendijk, et al., 2018). En el caso particular de España, cerca del 40% de la población se encuentra asentada en la costa a pesar de que los municipios costeros solo constituyen el 9,9% del total de municipios del país (Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, 2022). Esto es un ejemplo claro del atractivo que representa la franja litoral para la población. Sin embargo, esto también implica que las regiones aledañas al mar estén más expuestas a problemáticas como la erosión y las inundaciones (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2008). Estos retos denotan la importancia de generar estrategias de adaptación para la protección y gestión de la costa (Hinkel, et al., 2014; Morris, et al., 2021).

Históricamente la ingeniería gris ha sido el principal instrumento para la protección costera (Silva, et al., 2021). Normalmente, las estructuras grises típicas proveen solución parcial o total a problemas como la inundación costera, sin embargo, también generan retos ambientales y económicos, pues no siempre tienen en cuenta la sostenibilidad a la hora de implementarse (Morris, et al., 2018). Esto ha motivado que en los últimos años las construcciones costeras han comenzado a migrar hacia diseños amigables con el medio ambiente (Silva, et al., 2021). Además, se ha puesto en valor la protección costera que brindan los ecosistemas intermareales, ya que representan una barrera natural y proveen servicios ecosistémicos relevantes como la protección frente a inundaciones (Reguero, et al., 2017). De este modo, los ecosistemas representan un elemento clave en la gestión y adaptación de los entornos costeros.

Para cuantificar el beneficio brindado por ecosistemas como vegetación de marismas se hace relevante estudiar en qué medida se atenúa la altura de ola al interactuar con el campo vegetado y la metodología óptima para dicho propósito. En este sentido, en el presente estudio se tiene como objetivo principal obtener una nueva formulación para estimar la atenuación de energía bajo condiciones de oleaje y corriente en función de la biomasa aérea de la vegetación de marismas. En concreto, se estudiarán condiciones de oleaje y corriente propagándose en la misma dirección. El uso de la biomasa aérea se justifica por el estado del arte, pues se ha identificado el potencial del uso de la biomasa aérea del ecosistema para determinar la atenuación de la energía del oleaje, ya que esta permite proponer formulaciones predictivas y libres de procesos de calibración, contrario a lo que sucede con otros enfoques reportados por la literatura, tal como se verá más adelante en el desarrollo del estado del arte del presente estudio.

Para dar cumplimiento al objetivo del presente estudio se utilizan datos provenientes de campañas experimentales análogas a las utilizadas previamente por Maza, et al. (2022), pero considerando la acción conjunta de oleaje y corrientes, pues los datos utilizados en dicho estudio consideraban la interacción del flujo con 4 especies de marismas bajo la influencia del oleaje únicamente. Estas campañas se describen con detalle en el capítulo asociado a los datos de partida. Los datos provenientes de dichos ensayos de laboratorio se procesan e interpretan para analizar la interacción ola corriente con diferentes especies de marismas. Además, se comparan las relaciones obtenidas con formulaciones de atenuación de energía existentes en función de la biomasa aérea del ecosistema. Finalmente, se presentan y se comparan las formulaciones obtenidas, las cuales tienen un importante potencial para su implementación en modelos numéricos.

1.1. Estado del arte

A continuación, se presenta el estado del arte asociado a la atenuación de la energía del oleaje debido a la interacción del flujo con ecosistemas, tales como vegetación de marismas. Así pues, se destacan algunas formulaciones precedentes que han permitido avanzar en la cuantificación de la atenuación de la energía del oleaje que interactúa con ecosistemas, las cuales además constituyen la base teórica para el desarrollo del presente estudio. En primer lugar, se destaca la aproximación de Dalrymple et al. (1984) los cuales tomaron como punto de partida los procedimientos sugeridos por la National Academy of Science (NAS) de Estados Unidos para estimar la atenuación de la altura de ola debida a la presencia de árboles y extendieron la formulación para otro tipo de plantas modeladas como cilindros rígidos. El desarrollo de Dalrymple et al. (1984) se basa en la ecuación de conservación de energía, la consideración de cumplimiento de la teoría lineal y la hipótesis de que el coeficiente de arrastre (C_d) es constante en profundidad, con el fondo localmente plano. Dalrymple et al. (1984) modelaron la atenuación de la altura de ola con base en la ecuación 1, la cual representa la atenuación de la energía a través del campo vegetado, en términos de la amplitud de la onda.

$$\frac{a}{a_0} = \frac{1}{1 + \alpha x} \quad (1)$$

Donde x corresponde la abscisa del campo vegetado, con $x=0$ correspondiente al punto de inicio de la pradera. Por otro lado, la ecuación 1 depende también del coeficiente de atenuación (α), de la amplitud de la ola (a) y de la amplitud de la ola incidente antes de entrar en el campo (a_0). El coeficiente de atenuación (α) propuesto por Dalrymple et al. (1984) se describe por la ecuación 2, donde b , D y s corresponden a parámetros geométricos del cilindro que modela la planta. Específicamente, b es el espaciamiento entre plantas, D el diámetro del cilindro o planta y s la altura sobre el fondo. La ecuación 2 también involucra el número de onda (k) y el coeficiente de arrastre (C_d).

$$\alpha = \frac{2C_d}{3\pi} \left(\frac{D}{b}\right) \left(\frac{a_0}{b}\right) (\sinh^3 ks + 3 \sinh ks) \left(\frac{4k}{3 \sinh kh (\sinh 2kh + 2kh)}\right) \quad (2)$$

Es de resaltar que las formulaciones posteriores a Dalrymple et al. (1984) se basan también en un balance energético entre la pérdida de energía producida por el ecosistema y la fuerza de arrastre producida en el mismo. Los esfuerzos se han concentrado en la extensión de la formulación de Dalrymple et al. (1984) para otras condiciones, y en mejorar la estimación del coeficiente α o del C_d buscando obtener un enfoque predictivo para poder cuantificar la atenuación de la altura de ola debido a la presencia de ecosistemas.

En este sentido, la formulación de Dalrymple et al. (1984) fue extendida por Méndez & Losada (2004) para condiciones de oleaje irregular, teniendo en cuenta variaciones en el fondo, la naturaleza aleatoria del oleaje e incluyendo disipación tanto por la vegetación como por la rotura del oleaje. Esta formulación se describe por las ecuaciones 4 y 5 que se presentan a continuación. Donde, H_{rms} corresponde a la altura de ola media cuadrática y $H_{rms,0}$ a esta misma variable en el punto de inicio del campo vegetado ($x=0$). Por su parte $\tilde{\beta}$ corresponde al coeficiente de atenuación, análogo al α de Dalrymple et al. (1984), en este caso $\tilde{\beta}$ se describe por la ecuación 5 y depende del $\tilde{C_d}$ que corresponde al coeficiente de arrastre parametrizado en función del número adimensional de Keulegan-Carpenter, del número medio de plantas por unidad de área horizontal (N), del número de onda (k), de la altura media de la planta (αh) y del área por unidad de altura de cada planta normal a u (b_v).

$$\frac{H_{rms}}{H_{rms,0}} = \frac{1}{1 + \tilde{\beta}x} \quad (4)$$

$$\tilde{\beta} = \frac{B_0 H_{rms,0}}{2} = \frac{1}{3\sqrt{\pi}} \tilde{C_d} b_v N H_{rms,0} k * \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3\sinh k\alpha h}{(\sinh 2kh + 2kh) \sinh kh} \quad (5)$$

La formulación de Dalrymple et al. (1984) también fue el punto de partida para Losada et al. (2016), los cuales extendieron la formulación para condiciones conjuntas de oleaje y corriente tanto para oleaje regular como para oleaje irregular, además de modificar la frecuencia angular para tener en cuenta el efecto Doppler y tener en cuenta la deflexión de la planta. La formulación propuesta por Losada et al. (2016) tiene la misma forma de la ecuación 1 pero en términos de altura de ola en lugar de amplitud de la onda. En este caso, el coeficiente de atenuación se representa por β_{wc} y se describe por la ecuación 6 para el caso de oleaje regular. Donde, H_0 corresponde a la altura de ola incidente, mientras que A_0 y B son coeficientes descritos por las ecuaciones 7 y 8. Estos coeficientes dependen del área de la planta por unidad de altura (a), la velocidad de la corriente en el punto de inicio del campo de vegetación (U_0), la densidad del agua (ρ), la longitud deflectada de la planta (l_d) y de la frecuencia angular de la onda (σ). Además de otros parámetros del oleaje análogos a los descritos en las formulaciones anteriores.

$$\beta_{wc} = \frac{A_0 H_0}{B} \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{2}{3\pi} \rho C_d a N \left(\frac{gk}{2(\sigma - U_0 k)} \right)^3 \frac{\sinh^3 k l_d + 3 \sinh k l_d}{3k \cosh^3 kh} \quad (7)$$

$$B = \left[\frac{\rho g}{8} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \left(\frac{g}{k} \tanh kh \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\rho g}{8} U_0 \left(3 + \frac{4kh}{\sinh 2kh} \right) + \frac{3\rho k}{8} U_0^2 \left(\frac{g}{k} \coth kh \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[U_0 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \left(\frac{g}{k} \tanh kh \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (8)$$

Tal como se mencionó anteriormente, Losada et al. (2016) también extendieron la formulación de Dalrymple et al. (1984) para oleaje irregular, obteniendo las expresiones presentadas en las ecuaciones 9 y 10 asociadas al coeficiente de atenuación para esta condición β'_{wc} .

$$\beta'_{wc} = \frac{A'_0 H_{rms,0}}{B} \quad (9)$$

$$A'_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \rho C_d a N \left(\frac{gk}{2(\sigma - U_0 k)} \right)^3 \frac{\sinh^3 kl_d + 3 \sinh kl_d}{3k \cosh^3 kh} \quad (10)$$

Han sido múltiples los esfuerzos por estudiar la atenuación de la altura de ola a través de campos vegetados, usando mayoritariamente el coeficiente de arrastre, tal como se ha evidenciado en las formulaciones presentadas y en otras formulaciones que han tratado de unificar la estimación del C_d , especialmente usando relaciones con números adimensionales como Reynolds o Keulegan Carpenter (Jadhav, 2012; Anderson & Smith, 2014; Garzón et al., 2017; Garzón et al., 2019; Wang et al., 2022; Zhu, et al., 2023). Las formulaciones dependientes del C_d tienen las desventajas de que este varía con las características del oleaje y la vegetación, además de requerir un proceso de calibración (Horstman, et al., 2018). Lo que hace que la obtención del C_d sea dependiente de cada caso particular.

Esto ha motivado la búsqueda de nuevos enfoques para determinar la influencia de los ecosistemas en la atenuación de la altura de ola. Uno de ellos corresponde a un modelo basado en el volumen de sólido sumergido, el cual es únicamente aplicable a elementos rígidos (Maza, et al., 2021). También se ha estudiado la implementación del número de Cauchy y un término de flotabilidad en función de la densidad de la planta, considerando el módulo de elasticidad y el segundo momento de inercia de esta. En este caso, la formulación parte de experimentos limitados a una única especie. Además, generalmente las formulaciones existentes requieren mediciones que permitan tener una caracterización detallada de los individuos que componen el campo vegetado (Luhar, et al., 2017; Lei & Nepf, 2019; Zhang, et al., 2021; Zhang, et al., 2022).

En este sentido, Maza et al. 2022 proponen definir la capacidad de atenuación de la altura de ola con base en la biomasa aérea del ecosistema como única variable, la cual se puede estimar a partir de teledetección o imágenes aéreas, siendo la biomasa el peso seco de la vegetación por unidad de área. Esto implica que solo se requiere conocer la altura media de la planta y la biomasa del campo de vegetación para conocer de forma predictiva la capacidad de atenuación de energía producida por el campo, sin depender de la estimación del coeficiente de arrastre ni procesos de calibración. Maza et al. 2022

tuvieron en cuenta resultados de campañas experimentales en condiciones de oleaje en interacción con 4 especies de marismas (*Spartina sp.*, *Salicornia sp.*, *Halimione sp.*, *Juncus sp.*) de tal forma que estas brindan una buena representación de las características biomecánicas y morfológicas de las especies de marismas. La formulación derivada en este estudio para el cálculo del coeficiente de atenuación se propone en función de la biomasa hidráulica (HSB), la cual corresponde a la biomasa en contacto con el agua, es decir, la biomasa asociada a la porción de la planta que realmente influye en la disipación de energía y también considera las condiciones de flujo incidente. Para el cálculo de la biomasa hidráulica se consideran las ecuaciones 11-15 que se presentan a continuación, donde ESB corresponde a la biomasa aérea efectiva, el DryWeight es el peso seco de cada especie en g/m^2 , h_v es la altura media de la planta, SR es la relación de inmersión, VSB es la biomasa aérea volumétrica en g/m^3 , L representa la longitud de onda y L_v corresponde a la longitud unitaria del campo vegetado.

$$ESB = DryWeight * \frac{\min \{h_v, h\}}{h_v} \quad (11)$$

$$SR = \frac{h_v}{h}, \quad \text{donde } SR = 1 \text{ para } h_v > h \quad (12)$$

$$SBR = ESB * SR \quad (13)$$

$$VSB = SBR * \frac{1}{h} \quad (14)$$

$$HSB = VSB * \frac{H}{h} * \frac{L_v}{L} \quad (15)$$

Maza et al. (2022) presentan la relación entre el coeficiente de atenuación del oleaje y HSB teniendo en cuenta los datos experimentales. Así, se realizan dos tipos de ajuste, el primero consiste en un ajuste lineal único a todos los datos y el segundo corresponde a un ajuste en dos tramos considerando el punto de saturación a partir del cual el coeficiente de atenuación alcanza un valor constante, tal como evidencian los resultados experimentales. De este modo, las formulaciones que se presentan a continuación están asociadas al ajuste en 2 tramos. Para este caso, Maza et al. (2022) propone estimar el coeficiente de atenuación para dos condiciones:

- a)** En caso de que no se tenga una caracterización del fondo, se propone estimar el β con base en la ecuación 16 (oleaje regular) y ecuación 17 (oleaje irregular). Donde el valor entre paréntesis corresponde al intervalo de confianza del 95% para cada coeficiente. Estas formulaciones permiten obtener el coeficiente de atenuación asociado a la disipación conjunta producida por el campo de vegetación y el fondo.

$$\beta = \begin{cases} 1.020 * 10^{-3}(1.112 * 10^{-4}) * HSB + 0.088(0.020) & \text{para } 0 < HSB < 659 \\ 0.758(0.027) & \text{para } HSB > 659 \end{cases} \quad (16)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.310 * 10^{-3}(1.232 * 10^{-4}) * HSB + 0.059(0.017) & \text{para } HSB > 474 \\ 0.684(0.066) & \text{para } HSB > 474 \end{cases} \quad (17)$$

- b) En caso de que se tenga caracterizado el fondo y se desee calcular el coeficiente de atenuación asociado únicamente a la vegetación (β_{SB}), se propone estimar este coeficiente haciendo uso de la ecuación 18 (oleaje regular) y de la ecuación 19 (oleaje irregular). Así, estas formulaciones permiten obtener el coeficiente de atenuación debido únicamente a la acción de la vegetación, sin considerar la atenuación adicional producida por el fondo, la cual debería ser añadida de acuerdo a las características del mismo.

$$\beta = \begin{cases} 1.151 * 10^{-3}(7.445 * 10^{-5}) * HSB & \text{para } 0 < HSB < 599 \\ 0.685(0.047) & \text{para } HSB > 599 \end{cases} \quad (18)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.396 * 10^{-3}(7.919 * 10^{-5}) * HSB & \text{para } 0 < HSB < 451 \\ 0.631(0.055) & \text{para } HSB > 451 \end{cases} \quad (19)$$

Además, López-Arias et al. (2023) ya han validado la eficacia de las formulaciones de Maza et al. (2022) para condiciones de oleaje, no solo utilizando datos de laboratorio sino también en datos de campo de diferentes especies. Teniendo en cuenta el contexto presentado, se evidencia la necesidad de estudiar la atenuación de la altura de ola asociada al ecosistema debida a la acción conjunta de oleaje y corriente en función de una variable diferente al coeficiente de arrastre y es ahí donde cobra relevancia el uso de la biomasa del ecosistema, pues tal como demuestra el estado del arte, el uso de esta variable genera un cambio de paradigma en la estimación de la atenuación de la energía del oleaje debido a la presencia de un campo vegetado. Además, el uso de la biomasa aérea para este propósito ha mostrado buenos resultados para condiciones de oleaje únicamente, de tal forma que se hace relevante extender el análisis para la ocurrencia conjunta de oleaje y corrientes. Por otro lado, a la hora de estudiar la interacción del oleaje con las marismas es importante tener en cuenta la acción conjunta de oleaje y corrientes, pues estos ecosistemas son típicos de zonas estuarinas en las cuales es muy relevante la influencia de las corrientes. En concreto este trabajo se centrará en condiciones de oleaje-corriente co-lineales y en la misma dirección.

1.2. Objetivos

Teniendo en cuenta el contexto presentado se han establecido los siguientes objetivos para el presente estudio:

1.2.1. Objetivo general

Obtener una nueva formulación de disipación de energía para condiciones de oleaje-corriente en función de la biomasa aérea del ecosistema.

1.2.2. Objetivos específicos

- **Objetivo específico 1 (OE1):** Identificación de formulaciones de la atenuación de la energía del oleaje debido a la interacción del flujo con ecosistemas, tales como vegetación de marismas.
- **Objetivo específico 2 (OE2):** Analizar la interacción ola-corriente con diferentes especies de marismas con base en datos experimentales.
- **Objetivo específico 3 (OE3):** Comparar las relaciones obtenidas con formulaciones existentes en función de la biomasa aérea del ecosistema.
- **Objetivo específico 4 (OE4):** Obtener nuevas formulaciones para estimar la disipación de energía para condiciones de oleaje-corriente en función de la biomasa aérea del ecosistema y seleccionar la más adecuada.

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se presenta la metodología propuesta para dar cumplimiento a los objetivos planteados en este trabajo, de acuerdo con la Figura 1. En primer lugar, se desarrolla el estado del arte con el fin de identificar estudios previos que se han enfocado en el desarrollo de formulaciones de atenuación de la energía del oleaje en interacción con ecosistemas como marismas. Esta primera fase constituye una base teórica para el desarrollo del presente trabajo. Por otro lado, para analizar la interacción de las diferentes especies de marismas con condiciones de ola-corriente se propone en primer lugar caracterizar los datos experimentales con los que se cuenta y posteriormente obtener los coeficientes de atenuación para cada uno de los ensayos. De este modo es posible comprender y analizar los procesos de transformación de la energía del flujo que interacciona con los ecosistemas en condiciones de ola-corriente.

Tras comprender los procesos relevantes, se propone comparar las relaciones obtenidas con formulaciones existentes en función de la biomasa aérea del ecosistema. Esta variable ha sido utilizada en un estudio previo en el que se consideraron únicamente condiciones de oleaje, por lo tanto, en esta fase se pretende analizar las diferencias obtenidas al tener en cuenta la ocurrencia conjunta de oleaje y corrientes propagándose en la misma dirección. En función de los resultados y análisis realizados se pretende proponer posibles formulaciones que permitan incluir la influencia de las corrientes en la atenuación de la energía del oleaje en interacción con marismas. Estas formulaciones serán comparadas con el fin de identificar aquella con mayores bondades para la estimación de la atenuación de la altura de ola en condiciones de ola-corriente a través de un campo vegetado.

Finalmente, tras el cumplimiento de las diferentes fases metodológicas, se presentan las conclusiones asociadas a los hallazgos relevantes del estudio en cuanto a la estimación de la energía del oleaje en condiciones de ola-corriente cuando hay presencia de campos vegetados de marismas y en cuanto a la nueva formulación que se propone. Por otro lado, se proponen futuras líneas de trabajo con base en los resultados obtenidos, pues la metodología propuesta deja abiertas múltiples posibilidades de investigación y aplicaciones ingenieriles a futuro en las cuales se pueda seguir aprovechando la relación entre la biomasa aérea y la disipación de la energía del oleaje. De este modo, la metodología propuesta permite realizar un aporte a la comprensión de la transformación de la energía del oleaje cuando interacciona con campos vegetados en condiciones de ola-

corriente, aportando así a la integración de la ingeniería y la naturaleza desde un punto de vista cuantitativo y aplicable a casos de estudio de ingeniería costera.

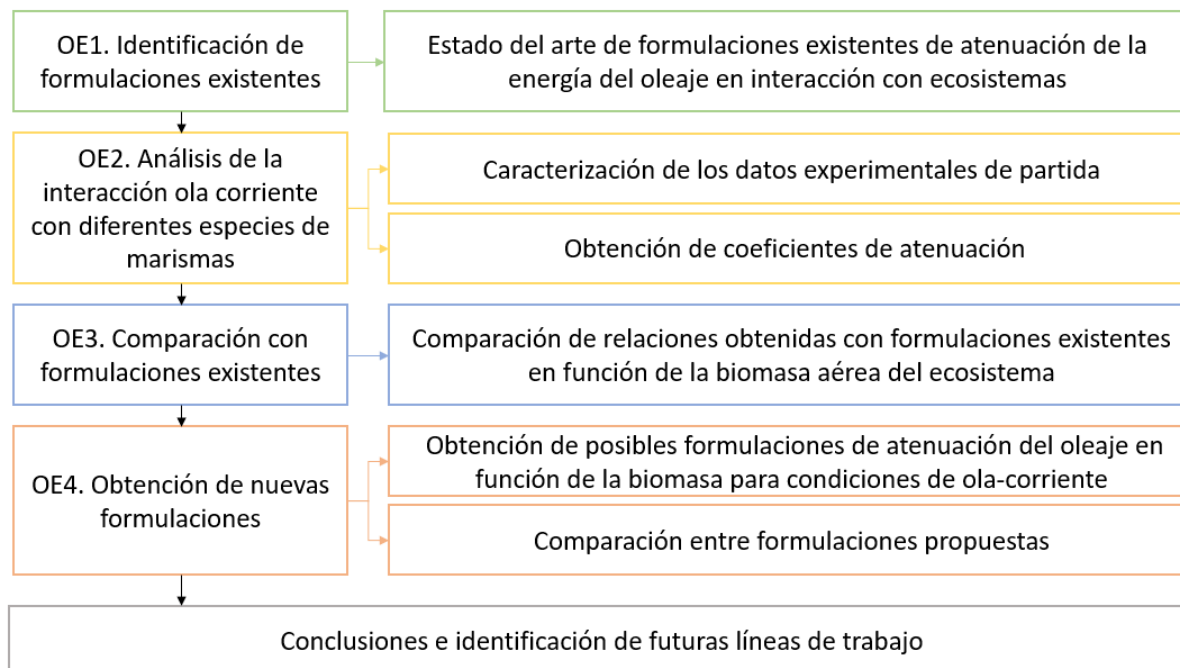


Figura 1. Esquema metodológico implementado

3. DATOS DE PARTIDA

3.1. Descripción de la campaña experimental utilizada

Los datos de partida del presente estudio provienen de una campaña experimental del año 2019, realizada en el canal de oleaje de la Universidad de Cantabria. La configuración experimental de los datos es análoga a la presentada por Maza et al. (2022). En esta campaña se realizaron ensayos con vegetación real asociada a 4 especies de marismas: *Spartina maritima*, *Salicornia europaea*, *Halimione portulacoides* y *Juncus maritimus*. Se seleccionaron estas especies estratégicamente con el fin de caracterizar ampliamente las características morfológicas y biomecánicas de las especies de marismas. La recolección de las plantas se realizó en marea baja a finales de verano e inicios de otoño, concretamente entre septiembre y octubre del 2019.

El montaje experimental se realizó el canal de oleaje de la Universidad de Cantabria, tal como se mencionó anteriormente, esta instalación cuenta con 20.71 m de largo y con una anchura de 0.58 m, además, en el canal se cuenta con un sistema de generación de oleaje en el extremo izquierdo y otro de disipación al lado contrario. Las plantas fueron recolectadas y organizadas en cajas con el fin de construir un campo vegetado en el canal de 9.05 m de largo y 0.58 m de ancho. Para llevar a cabo los ensayos se recolectaron 105 cajas de cada una de las especies de interés. Para cada especie se utilizaron 94 cajas para la elaboración del campo vegetado, mientras que 5 cajas fueron empleadas para determinar la biomasa área en campo y 6 se conservaron como reserva para posibles contingencias.

En la Figura 2 (A) se presenta la distribución espacial de las 94 cajas del campo vegetado y las dimensiones relevantes del montaje experimental. La ubicación de las cajas se realizó con los patrones mostrados en la figura con el fin de evitar la creación de canales preferentes de flujo. En la campaña experimental se implementó un falso fondo para garantizar una transición suave entre el área de generación y el campo vegetado, este también se presenta en la Figura 2 (A) y consiste en una estructura de madera con una capa fina de sedimento de tal forma que se replique la rugosidad del fondo en campo. Por su parte, en la Figura 2 (B) se presentan imágenes de las 4 especies de marismas utilizadas, específicamente de izquierda a derecha se pueden observar los especímenes de *Spartina sp.*, *Salicornia sp.*, *Juncus sp.* y *Halimione sp.*

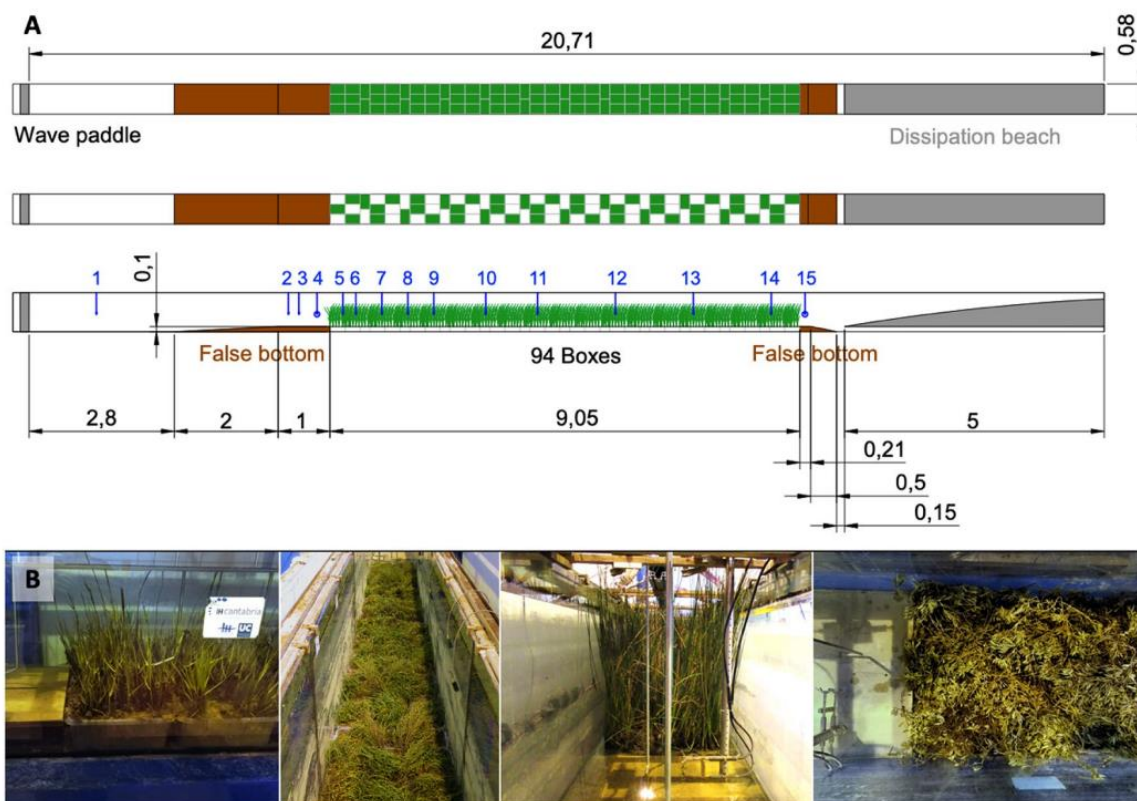


Figura 2. (A) Esquema de la configuración experimental. Vista en planta para los casos de densidad 100% y 50%. Vista en perfil, identificando los 15 sensores de control. (B) Especies utilizadas en el ensayo. De izquierda a derecha: *Spartina sp.*, *Salicornia sp.*, *Juncus sp.* y *Halimione sp.*. Tomado de Maza et al. (2022).

En los ensayos experimentales se consideraron tres densidades del campo vegetado (0%, 50% y 100%). La densidad del 0% interacción del flujo con el fondo sin presencia de plantas, para ello se retiraron por completo las plantas, dejando únicamente el sedimento presente en cada una de las cajas, el cual corresponde al tomado directamente en campo. Por su parte, la densidad del 50% permite estimar la atenuación de la altura de ola en un campo más típico de las condiciones de invierno y finalmente, la condición de densidad 100% representa la circunstancia más favorable para el ecosistema. De este modo, las variaciones evaluadas en los ensayos facilitan la aplicabilidad de los resultados, pues se consideran diferentes escenarios de interés.

3.2. Información disponible

En la campaña experimental descrita anteriormente se realizaron ensayos con 7 condiciones de oleaje para cada una de las especies consideradas y para las 3 densidades que se analizaron, lo cual corresponde a 21 ensayos por especie. Los ensayos con los que se cuenta se realizaron para la condición de oleaje regular y con la corriente a favor del flujo. Los 7 oleajes ensayados se componen de un período fijo de 2 segundos, el cual se combina con tres alturas de ola (0.08 m, 0.12 m y 0.15 m), 3 calados (0.2 m, 0.3 m y 0.4 m) y 6 valores de corriente (0.13 m/s, 0.26 m/s, 0.42 m/s, 0.18 m/s, 0.37 m/s y 0.23 m/s). Para las 3 densidades consideradas se ensayaron las mismas 7 combinaciones oleaje y para el caso de la *Spartina*, *Halimione* y *Juncus* se cuenta con todos los ensayos, los cuales se resumen en la Tabla 1. Por su parte, en el caso de la *Salicornia* solo se cuenta con el registro de 9 ensayos, puesto que las características morfológicas y biomecánicas de esta especie dificultaron la toma de datos garantizando la integridad de la muestra, es por este motivo que solo se cuentan con resultados asociados a los valores más bajos de corriente, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Condiciones hidrodinámicas ensayadas para las especies Halimione, Juncus y Spartina.

Halimione, Juncus y Spartina				
T (s)	H (m)	h (m)	U (m/s)	Den (%)
2	0.08	0.2	0.13	100
2	0.08	0.2	0.26	100
2	0.08	0.2	0.42	100
2	0.12	0.3	0.18	100
2	0.12	0.3	0.37	100
2	0.15	0.4	0.23	100
2	0.15	0.4	0.37	100
2	0.08	0.2	0.13	50
2	0.08	0.2	0.26	50
2	0.08	0.2	0.42	50
2	0.12	0.3	0.18	50
2	0.12	0.3	0.37	50
2	0.15	0.4	0.23	50
2	0.15	0.4	0.37	50
2	0.08	0.2	0.13	0
2	0.08	0.2	0.26	0
2	0.08	0.2	0.42	0
2	0.12	0.3	0.18	0
2	0.12	0.3	0.37	0
2	0.15	0.4	0.23	0
2	0.15	0.4	0.37	0

Tabla 2. Condiciones hidrodinámicas ensayadas para la especie *Salicornia*.

<i>Salicornia</i>				
T (s)	H (m)	h (m)	U (m/s)	Den (%)
2	0.08	0.2	0.13	100
2	0.08	0.2	0.26	100
2	0.12	0.3	0.18	100
2	0.15	0.4	0.23	100
2	0.15	0.4	0.37	100
2	0.08	0.2	0.13	50
2	0.12	0.3	0.18	50
2	0.08	0.2	0.13	0
2	0.12	0.3	0.18	0

En las Tabla 1 y Tabla 2 se tiene que T es el período, H es la altura de ola generada, h es el calado, U es la velocidad de la corriente y Den es la densidad ensayada. Para cada uno de los ensayos se cuenta con el registro de superficie libre tomado en 15 sensores, los cuales fueron presentados previamente en la Figura 2. Adicionalmente, en la Tabla 3 se presenta la ubicación de cada uno de dichos sensores respecto al inicio del campo vegetado ($X=0$ m).

Tabla 3. Ubicación de los sensores respecto al punto de inicio del campo vegetado ($X=0$)

Sensor	X (m)
1	-4.5
2	-0.8
3	-0.6
4	-0.25
5	0.25
6	0.5
7	1
8	1.5
9	2
10	3
11	4
12	5.5
13	7
14	8.5
15	9.15

En la Figura 3 se presenta un ejemplo del registro de uno de los sensores de superficie libre con los que se cuenta para cada uno de los ensayos. El registro presentado muestra el comportamiento esperado para la condición de oleaje regular utilizada como forzamiento. En este caso, el registro mostrado corresponde al sensor 5 (WG5) de uno de los ensayos realizados con *Spartina*, específicamente al caso con altura de ola de 0.08 m, período de 2 s, calado de 0.3 m, densidad 100% y corriente de 0.13 m/s. Para cada ensayo se seleccionó un tramo de 50 olas que mostrara un comportamiento estable en la

superficie libre tal como en el que se muestra en la Figura 3, pues el registro original tomado del laboratorio cuenta con períodos de transición asociados a la metodología utilizada durante la generación y toma de los datos, dichos períodos no se tienen en cuenta en el postproceso con el fin de evitar la inclusión de datos anómalos en los resultados reportados.

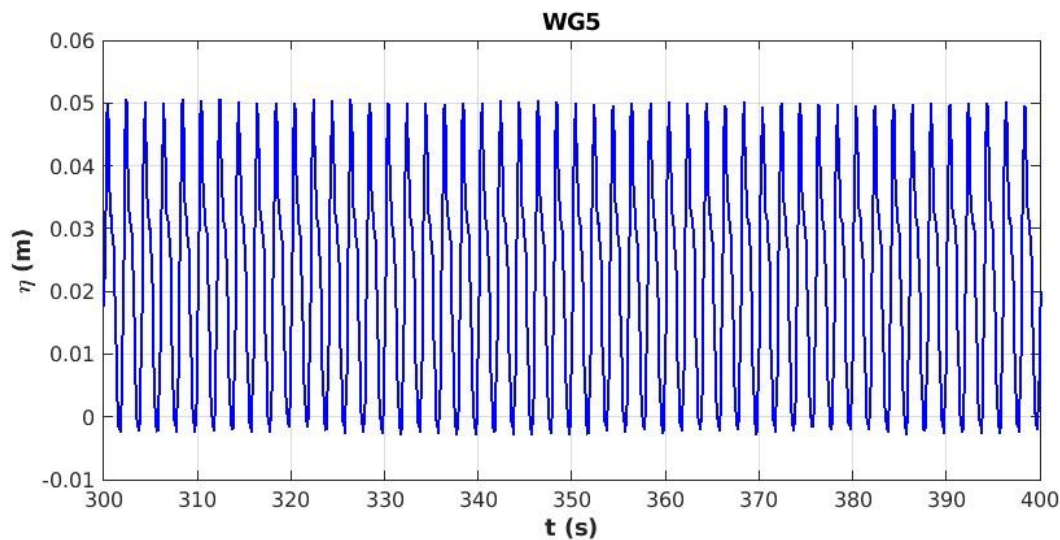


Figura 3. Ejemplo de registro experimental de superficie libre para 50 olas. Ensayo con *Spartina* sp. asociado a $H=0.08$ m, $T=2$ s, $h=0.3$ m y $U=0.13$ m/s

Como parte de los datos de partida también se cuenta con una caracterización de la vegetación utilizada en la campaña experimental de la que parten los datos experimentales utilizados en el presente estudio. De este modo, en la Tabla 4 se presenta la biomasa aérea y la altura de las 4 especies de marismas utilizadas, en ambos casos se presenta el valor medio con su respectiva desviación estándar (SD).

Tabla 4. Caracterización de las 4 especies de marismas.

Especie	Biomasa aérea (SD) [g/m ²]	Altura de la planta (SD) [m]
<i>Spartina</i> sp.	310.3 (24.7)	0.17 (0.074)
<i>Salicornia</i> sp.	689.7 (102.6)	0.175 (0.070)
<i>Juncus</i> sp.	1858.0 (157.3)	0.714 (0.127)
<i>Halimione</i> sp.	1394.9 (127.1)	0.187 (0.113)

Aunque el presente informe se centra en la estimación de atenuación de la energía en función de una única variable asociada al ecosistema (su biomasa aérea), a continuación, se presenta una breve descripción de las especies utilizadas en los ensayos de laboratorio con los que se cuenta para el desarrollo del presente estudio. En primer lugar, la *Spartina maritima* es una planta perenne y es la única especie nativa de este género en España, es típica de ecosistemas de marismas, se desarrolla sobre suelos salinos en costas y en cuencas interiores. En la Figura 4 se presenta una fotografía de esta especie, la cual se caracteriza por tener tallos entre 15 y 70 cm aproximadamente. (MITECO, 2005; Menéndez, 2006; Nieto et al., 2015)



Figura 4. Spartina maritima.
Tomado de: Asturnatura.com

La *Salicornia europaea* está presente principalmente en depósitos arenosos con exposición alta a las mareas. También se conoce como espárrago de mar o hierba salada por la alta concentración de sal que se acumula en su estructura, usualmente alcanza alturas inferiores a los 30 cm, En la Figura 5 se presenta una fotografía de esta especie. (Figuerola, Jiménez, Carranza, & González, 1987; Diario Vasco, 2019)



Figura 5. Salicornia europaea.
Tomado de: Asturnatura.com

El *Halimione portulacoides* un arbusto perenne que se encuentra en hábitats costeros y salinos. Sus hojas son suculentas y de forma lanceolada, y produce pequeñas flores verdosas. En la Figura 6 se presenta una fotografía de esta especie, la cual puede alcanzar alturas de hasta 1.5 metros. (Menéndez, 2006)



*Figura 6. Halimione portulacoides.
Tomado de: Asturnatura.com*

El *Juncus maritimus* es una planta perenne que se encuentra en zonas húmedas costeras, como marismas. Tiene tallos cilíndricos y flores en forma de espiga. En la Figura 7 se presenta una fotografía de esta especie que puede tener alturas entre los 30 y los 150 cm aproximadamente. (Ménendez, 2006)



*Figura 7. Juncus maritimus.
Tomado de: Asturnatura.com*

4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta el análisis de los datos, describiendo los diferentes procesos físicos que se evidencian en las diferentes configuraciones ensayadas en laboratorio y el procedimiento seguido para la obtención de los resultados obtenidos. Además, se presentan los resultados asociados a la obtención de coeficientes de atenuación de cada uno de los ensayos, la relación entre los coeficientes de atenuación y la biomasa aérea y finalmente, la comparación de los resultados con las formulaciones existentes en función de la biomasa.

4.1. Obtención de coeficientes de atenuación

Este apartado se centra en la obtención de coeficientes de atenuación para los diferentes ensayos de laboratorio con los que se cuenta. Estos coeficientes son un componente

esencial para el entendimiento de la interacción entre el flujo y las diferentes configuraciones ensayadas. Además, los coeficientes de atenuación obtenidos son clave como base cuantitativa para la proposición de nuevas formulaciones que consideren el efecto conjunto de olas y corrientes en la atenuación de la energía del oleaje cuando este interacciona con un ecosistema de marismas. A continuación, se presenta en detalle la metodología empleada para la obtención de dichos coeficientes y los análisis derivados de los resultados obtenidos.

Tal como se mencionó en la descripción de los datos de partida, se cuenta con datos experimentales de 15 sensores, sin embargo, para la obtención de los coeficientes de atenuación solo se hizo uso de la información asociada a los sensores 4 al 15, los cuales abarcan desde el inicio hasta el final del campo vegetado. Incluso para los análisis de los casos sin vegetación se utilizan estos mismos sensores con el fin de trabajar en todos los casos con la misma referencia. De este modo, se aprovechó la información de superficie libre suministrada por el conjunto de 12 sensores de interés, los cuales se localizaron de manera estratégica a lo largo del campo vegetado, permitiendo obtener una visión global del comportamiento de la altura de ola a través del ecosistema de marismas. La localización exacta de los sensores se presentó previamente en la Figura 2 y en la Tabla 3.

Para la estimación de los coeficientes de atenuación se tuvieron en cuenta algunas consideraciones relevantes. En cuanto a la altura de ola incidente, esta se tomó del registro del sensor 4, puesto que este se ubica en el inicio del campo vegetado y, por lo tanto, captura la magnitud de la superficie libre justo antes de la interacción con las marismas. Por otro lado, tal como se ha mencionado anteriormente en los datos de partida, el punto de referencia para la toma de las distancias de interés se tomó como el punto de inicio del campo vegetado ($X=0$). De esta forma, se tiene este punto de partida a partir del cual se evalúa la propagación del oleaje y la atenuación de la energía a medida que el oleaje avanza a través del ecosistema de marismas.

Además de las consideraciones mencionadas, para la obtención de los coeficientes de atenuación se llevó a cabo siguiendo la formulación propuesta por Dalrymple (1984), la cual fue detallada previamente en la ecuación 1. Esta formulación resultó especialmente pertinente para nuestros propósitos, ya que se encuentra diseñada para condiciones de oleaje regular, al igual que los ensayos experimentales con los que se cuenta. Por lo tanto, al adoptar esta formulación como base teórica, aseguramos coherencia entre las condiciones de los datos de laboratorio y el marco conceptual utilizado para derivar los coeficientes de atenuación.

Inicialmente la formulación de Dalrymple (1984) se utilizó directamente sobre los datos obtenidos del laboratorio, es decir, datos que abarcan tanto la atenuación debida al ecosistema como la atenuación inherente a la interacción del oleaje con el fondo marino (casos de densidad 50% y 100%). De este modo, se proporciona una visión integral de la interacción entre ambos factores y se brinda un coeficiente de atenuación debido a la influencia combinada de la presencia del ecosistema y las características del fondo (β). Esta primera aproximación es especialmente útil cuando si no se tiene una caracterización detallada del fondo marino y se hace necesario emplear directamente el coeficiente de atenuación asociado a las condiciones de laboratorio.

Sin embargo, para una comprensión más precisa y específica de la influencia del ecosistema en la atenuación de la energía, se decidió aislar la atenuación debida exclusivamente al campo vegetado. Con este propósito se utilizaron los datos asociados a densidad nula de vegetación, los cuales permitieron obtener los coeficientes de atenuación debidos únicamente al fondo marino (β_B). La ecuación 20 que se presenta a continuación permite obtener el coeficiente de atenuación debido al efecto de la biomasa aérea (β_{SB}), brindando una visión más clara de la atenuación generada por las marismas para condiciones de ola-corriente. Esta aproximación es de utilidad cuando se tiene bien caracterizado el fondo marino y es posible analizar su contribución específica en la atenuación de la energía del oleaje.

$$\beta_{SB} = \beta - \beta_B \quad (20)$$

Teniendo en cuenta las consideraciones teóricas explicadas previamente, se procedió a calcular y obtener los coeficientes de atenuación para todos los ensayos realizados en el estudio. En la Figura 8, se presenta un ejemplo que resume la obtención de estos coeficientes para un ensayo específico y para las 4 especies de marismas que se analizaron en laboratorio. El ensayo utilizado para la construcción de la Figura 8 se caracteriza por un calado de 0.2 metros y una velocidad de corriente de 0.13 m/s. En esta figura los puntos representan los datos experimentales, siendo los puntos azules los correspondientes al caso de densidad 0, los puntos verde claro los asociados al caso de densidad 50% y los puntos verde oscuro los asociados al caso de densidad 100%. En los mismos colores se presentan los 3 ajustes realizados teniendo en cuenta la formulación de Dalrymple (1984) y los coeficientes de atenuación obtenidos en cada caso con el valor del intervalo de confianza del 95% entre paréntesis y con su respectivo coeficiente de correlación (ρ^2). Finalmente, en gris oscuro punteado se presenta la forma del ajuste tras aplicar la ecuación 20, es decir que esta curva representa la disipación debida únicamente al ecosistema para la condición de densidad 50%. Análogamente, se presenta la curva punteada en color gris claro, considerando la disipación del ecosistema para la densidad del 100%. Para ambas curvas punteadas se presenta el respectivo valor del coeficiente de atenuación debido al ecosistema (β_{SB}).

La Figura 8 refleja cómo la disipación de las olas muestra un incremento en las 4 especies de marismas consideradas en el escenario de densidad 100% respecto a los demás escenarios considerados (densidad 0% y 50%). Este resultado es congruente con lo esperado y denota la importancia de la biomasa aérea en la disipación de la energía del oleaje. Al aislar el efecto de la fricción por fondo se observa que la especie con menores coeficientes de disipación respecto a las demás especies corresponde a la *Spartina sp.*, tanto para la densidad del 100% como para la densidad del 50%. Por otro lado, al contrastar todas las especies, se aprecia que el coeficiente de disipación más alto relacionado con la biomasa aérea (β_{SB}) corresponde a la especie *Halimione sp.*, para las dos densidades examinadas.

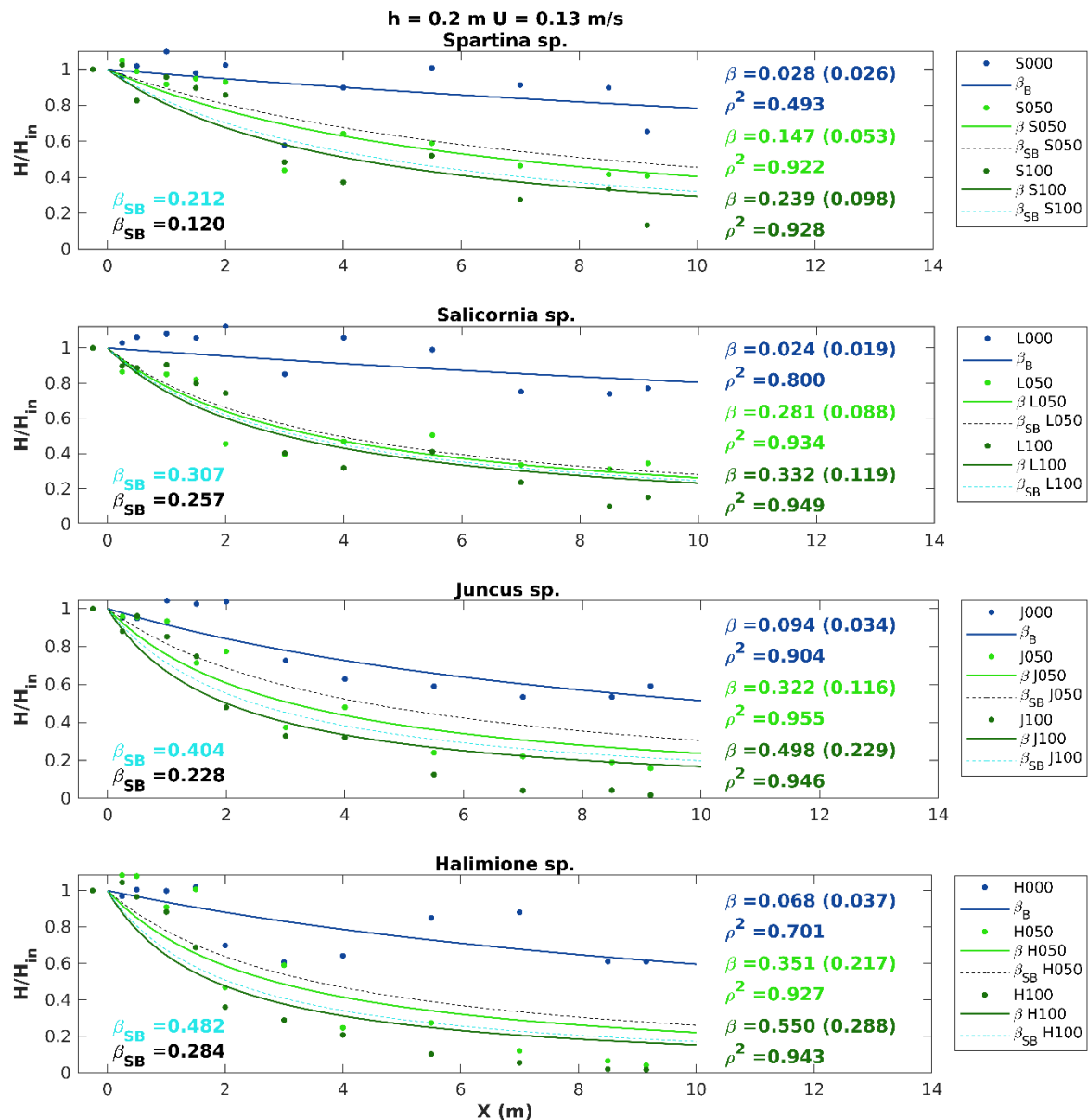


Figura 8. Análisis de atenuación para un calado de 0.2 m, velocidad de corriente de 0.13 m/s, periodo de 2 s y altura de ola en generación de 0.08 m para *Spartina* sp. 100% (S100), 50% (S050) y densidad 0 (S000); *Salicornia* sp. 100% (L100), 50% (L050) y 0% (L000); *Juncus* sp. 100% (J100), 50% (J050) y 0% (J000); y *Halimione* sp. 100% (H100), 50% (H050) y 0% (H000).

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los coeficientes de atenuación obtenidos para los diferentes ensayos de laboratorio realizados. En esta tabla se presentan los β obtenidos para las 3 densidades consideradas en los ensayos (0%, 50% y 100%), adicionalmente se presenta el valor del intervalo de confianza del 95% y el coeficiente de correlación (ρ^2). En todos los casos se observan resultados consistentes a los presentados en la Figura 8, pues los menores coeficientes de disipación se obtienen para el caso de densidad 0%, además, la especie con mayores coeficientes de disipación en todos los casos corresponde a *Halimione* Sp., mientras que la especie con menores coeficientes de disipación es la *Spartina* Sp. Por otro lado, los coeficientes de correlación que denotan

menor bondad en el ajuste corresponden en todos los casos a los datos asociados a densidad 0%.

Tabla 5. Coeficientes de atenuación obtenidos para los diferentes ensayos y para las 3 densidades consideradas (0%, 50% y 100%), con su intervalo de confianza del 95% (95% CI) y su coeficiente de correlación

Especie	Ensayo				Ajuste densidad 0%			Ajuste densidad 50%			Ajuste densidad 100%		
	T (s)	H (m)	h (m)	U (m/s)	β_b	95% CI	ρ^2	β	95% CI	ρ^2	β	95% CI	ρ^2
Halimione	2	0.08	0.2	0.13	0.068	0.037	0.701	0.351	0.217	0.927	0.550	0.288	0.943
	2	0.08	0.2	0.26	0.021	0.015	0.537	0.237	0.108	0.930	0.319	0.144	0.948
	2	0.08	0.2	0.42	0.073	0.035	0.697	0.089	0.035	0.926	0.175	0.055	0.945
	2	0.12	0.3	0.18	0.006	0.022	0.437	0.095	0.029	0.968	0.228	0.083	0.939
	2	0.12	0.3	0.37	0.001	0.009	-0.171	0.044	0.015	0.895	0.104	0.034	0.927
	2	0.15	0.4	0.23	0.004	0.005	0.789	0.064	0.014	0.960	0.097	0.012	0.985
	2	0.15	0.4	0.37	0.000	0.000	1.000	0.027	0.008	0.875	0.063	0.022	0.886
Juncus	2	0.08	0.2	0.13	0.094	0.034	0.904	0.322	0.116	0.955	0.498	0.229	0.946
	2	0.08	0.2	0.26	0.031	0.030	0.579	0.321	0.149	0.939	0.432	0.267	0.928
	2	0.08	0.2	0.42	0.059	0.031	0.608	0.157	0.090	0.911	0.284	0.167	0.935
	2	0.12	0.3	0.18	0.003	0.018	0.540	0.151	0.051	0.944	0.263	0.133	0.944
	2	0.12	0.3	0.37	0.000	0.009	0.354	0.103	0.059	0.915	0.201	0.104	0.932
	2	0.15	0.4	0.23	0.000	0.005	-0.651	0.092	0.024	0.964	0.192	0.082	0.956
	2	0.15	0.4	0.37	0.000	0.008	-0.056	0.061	0.022	0.949	0.180	0.065	0.965
Salicornia	2	0.08	0.2	0.13	0.024	0.019	0.800	0.281	0.088	0.934	0.332	0.119	0.949
	2	0.12	0.3	0.18	0.005	0.013	0.614	0.035	0.011	0.953	0.076	0.026	0.914
Spartina	2	0.08	0.2	0.13	0.028	0.026	0.493	0.147	0.053	0.922	0.239	0.098	0.928
	2	0.08	0.2	0.26	0.018	0.022	0.504	0.120	0.051	0.941	0.172	0.078	0.917
	2	0.08	0.2	0.42	0.009	0.017	0.298	0.092	0.029	0.882	0.059	0.020	0.848
	2	0.12	0.3	0.18	0.000	0.000	1.000	0.031	0.008	0.964	0.061	0.017	0.944
	2	0.12	0.3	0.37	0.000	0.000	1.000	0.030	0.011	0.789	0.040	0.017	0.719
	2	0.15	0.4	0.23	0.001	0.007	0.369	0.023	0.006	0.920	0.046	0.009	0.978
	2	0.15	0.4	0.37	0.000	0.009	0.235	0.009	0.006	0.775	0.023	0.009	0.832

4.2. Relación entre coeficientes de atenuación y biomasa aérea y comparación con formulaciones existentes en función de la biomasa aérea

En el presente apartado se presenta la relación entre los coeficientes de atenuación previamente obtenidos y la biomasa aérea del ecosistema. Esta relación fue introducida previamente por Maza et al. (2022) y a partir de ella es posible obtener el coeficiente de atenuación desde un enfoque predictivo e independiente del coeficiente de arrastre. Sin embargo, en dicho estudio solo se consideraron las condiciones de oleaje regular e irregular y no se tuvo en cuenta la acción de las corrientes. Esto ha motivado que en el presente estudio sea analizada la influencia de la acción conjunta del oleaje y las corrientes. Para este caso se cuenta específicamente con datos asociados a ensayos de oleaje regular y corrientes, tal como se ha mencionado anteriormente.

En el presente apartado también se brinda una comparación de los resultados obtenidos previamente con formulaciones existentes en función de la biomasa. Tal como se pudo determinar en el estado del arte, la variable usualmente utilizada para determinar la atenuación de la energía del oleaje es el coeficiente de arrastre. Por lo tanto, son limitadas las formulaciones que han migrado a otras variables para la estimación de la disminución de la altura de ola a través de un campo de marismas. Sin embargo, la biomasa aérea del

ecosistema ya fue incorporada en la formulación propuesta por Maza et al. (2022). Así pues, se utilizan los resultados obtenidos en dicho estudio como punto de comparación para los resultados presentados en este informe.

Teniendo en cuenta que en el presente estudio solo se consideraron ensayos de laboratorio asociados a oleaje regular, solo se tendrán en cuenta los resultados obtenidos por Maza et al. (2022) concernientes a condiciones de oleaje regular. Tal como se ha mencionado anteriormente, en dicho estudio no se consideró la influencia de las corrientes y se desea analizar los cambios observados al incluir esta nueva variable en los análisis. Inicialmente se presentan los análisis y comparaciones asociados al coeficiente de atenuación (β) y posteriormente se extienden los análisis para el coeficiente de atenuación asociado exclusivamente a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}).

▪ **Análisis y comparación para el coeficiente de atenuación (β)**

Previamente se presentó la estimación de los coeficientes de atenuación para los diferentes ensayos de laboratorio y para relacionar este coeficiente con la biomasa aérea del ecosistema se utiliza la biomasa hidráulica (HSB). La HSB ofrece una forma de relacionar las características de la vegetación con las condiciones de flujo de los ensayos de laboratorio. Para la estimación de HSB se utilizaron las ecuaciones 11 a 15 del presente informe. Así pues, en la Figura 9 y Figura 10 se presentan los resultados de relacionar el coeficiente de atenuación con la biomasa hidráulica. Además, se presenta un ajuste lineal de ambas variables, mostrando la ecuación de ajuste con el intervalo de confianza del 95% entre paréntesis. Finalmente se presenta el ρ^2 en ambas figuras. Estas figuras representan los mismos datos y por ende están representadas por la misma ecuación de ajuste (ecuación 21). Sin embargo, cada una de las figuras proporciona información diferente de acuerdo con su representación gráfica, tal como se analiza a continuación. El ajuste presentado es de la forma $A \cdot HSB + B$, donde A y B son constantes con unidades de $(\frac{g}{m^2})^{-1}$ y m^{-1} , respectivamente.

$$\beta = 5.478 * 10^{-4}(1.631 * 10^{-4}) * HSB + 6.147 * 10^{-2}(3.948 * 10^{-2}) \quad (21)$$

En la Figura 9 se diferencian por colores las 4 especies utilizadas en los ensayos de laboratorio. Los datos azules corresponden a la especie *Halimione*, los rojos al *Juncus*. Mientras que los marcadores negros representan a la *Salicornia* y los verdes a la *Spartina*. Adicionalmente, en esta figura también se hace una distinción entre las dos densidades consideradas para el campo vegetado, de tal forma que los círculos representan la densidad del 50% y los cuadrados se asocian al 100% de densidad.

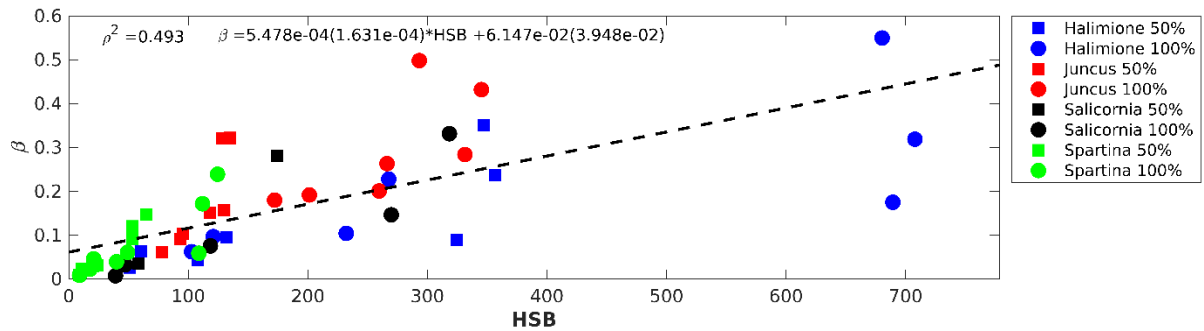


Figura 9. Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.

En la Figura 10 se diferencian por colores los 3 calados propios de los ensayos de laboratorio. Los datos azules corresponden a los ensayos del menor calado (0.2 m), en rojo se presentan los datos del calado de 0.3 m y en verde se tienen los resultados del mayor calado (0.4 m). Por otro lado, las formas de cada marcador identifican el valor de la corriente (U) asociada a cada ensayo, en este caso los círculos representan la corriente de 0.13 m/s, los cuadrados la corriente de 0.26 m/s, las estrellas son para $U=0.42$ m/s, los rombos para $U=0.18$ m/s, los asteriscos están asociados a $U=0.37$ m/s y los triángulos a $U=0.23$ m/s.

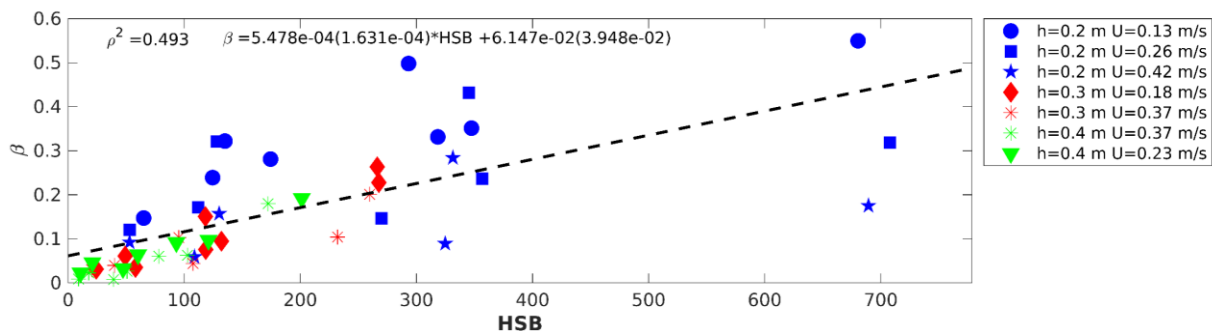


Figura 10. Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y velocidades de corriente.

A continuación, en la Figura 11 se presentan los resultados de la formulación de Maza et al. (2022). En esta figura se presenta la relación entre el coeficiente de atenuación de oleaje (β) y la HSB para condiciones de oleaje regular. En esta figura se representan los casos de densidad 100% por medio de círculos negros y los casos de densidad 50% a través de cuadros negros. Por otro lado, en la Figura 11 se observan dos ajustes, el primero de ellos en color negro corresponde a un ajuste lineal y en el mismo color se presenta la ecuación de ajuste con el valor del intervalo de confianza del 95% entre paréntesis y con su respectivo coeficiente de correlación. El segundo ajuste, presentado en color gris, este considera un punto de saturación a partir del cual la curva de ajuste se asume constante, puesto que este es el comportamiento que muestran los datos. El punto de saturación de la Figura 11 (mostrado en línea gris punteada) se definió como el promedio de los 4 puntos en los que se observan valores similares de β para diferentes datos de HSB. Para el caso de oleaje regular, se alcanza un valor constante de $\beta=0.79$ para valores de $HSB>659$.

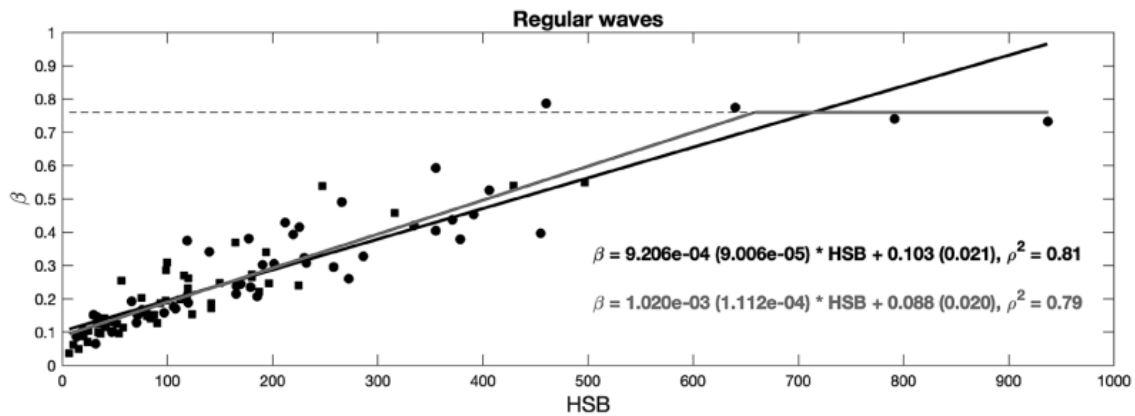


Figura 11. Formulación existente que relaciona el coeficiente de atenuación (β) con la biomasa hidráulica del ecosistema (HSB) para condiciones de oleaje regular (sin considerar la acción de las corrientes).
Fuente: Tomado de: Maza et al. (2022).

En la formulación de Maza et al. (2022) presenta dos ajustes debido al punto de saturación que se mencionó anteriormente. Sin embargo, para el caso de los ensayos de laboratorio con condiciones conjuntas de oleaje y corrientes no se identifica un punto de saturación y por ende se presenta únicamente un ajuste lineal. Es importante también anotar que cada uno de los puntos de la Figura 9 y la Figura 10 (puntos con ola-corriente), tienen un ensayo análogo en la Figura 11 (solo oleaje). Sin embargo, se encuentran diferencias considerables en el eje X de las figuras, puesto que HSB depende de la altura de ola incidente (tal como se puede observar en la ecuación 15) y ésta se ve modificada por las diferentes condiciones de corriente. Sin embargo, el comportamiento de este eje es consistente con lo esperado, puesto que, al incluir el efecto de las corrientes a favor del flujo, se espera un aumento en la fricción y por ende una disminución de la altura de ola medida por el sensor 4, esto implica obtener menores valores de HSB, tal como se evidencia al comparar los valores de HSB de la Figura 9 y la Figura 10 con los de la Figura 11. A pesar de esto, al tratarse de las mismas condiciones hidrodinámicas, los ensayos son comparables en cuanto al coeficiente de atenuación obtenido en ambos casos.

En la Figura 9 se observa que la especie con la que se pueden obtener mayores coeficientes de disipación corresponde al *Hamillione*, alcanzando un valor máximo de $\beta=0.55$. Mientras que la *Spartina*, especie con los menores coeficientes de atenuación, solo logra llegar a un valor máximo de $\beta=0.24$. Esto es consistente con los resultados reportados por el estudio de Maza et al. (2022), si bien no es posible identificar las especies en la Figura 11, el análisis de los coeficientes de atenuación obtenidos que se presenta en dicho estudio da cuenta de la congruencia del estudio de Maza et al. (2022) y los resultados obtenidos en este estudio. En la Figura 9 también se observa que para las 4 especies se obtienen los mayores coeficientes de atenuación cuando se tiene la condición de 100% de densidad del campo vegetado. La distinción por densidades de la Figura 11 muestra el mismo comportamiento, en el cual los puntos asociados a la densidad 100% son los que alcanzan mayores coeficientes de disipación, aunque sin diferenciar los resultados por especie.

En la Figura 10 se evidencia que para los calados de 0.2 y 0.3 m, cuando se tienen mayores velocidades de corriente se obtienen menores coeficientes de atenuación. Adicionalmente, en la Figura 10 los puntos asociados al menor calado ($h=0.2\text{m}$) son los

que se alejan más del ajuste presentado, esto puede estar relacionado con la interacción compleja que se genera entre el flujo y la vegetación en este calado, ya que 3 de las especies tienen una altura cercana a 0.2 m y en el caso del *Juncus*, la totalidad del calado se encuentra ocupado por la vegetación. Por otro lado, del análisis de los coeficientes de atenuación obtenidos previamente se había determinado que este calado ($h=0.2\text{m}$) es el que genera los mayores coeficientes de atenuación y el ajuste presentado en la Figura 10 no representa adecuadamente este hecho, puesto que gran parte de los puntos azules están siendo subestimados por el ajuste presentado. Estos resultados demuestran la relevancia de tener una formulación que tenga en cuenta la influencia de las corrientes al momento de estimar la atenuación de la energía del oleaje.

Por otro lado, la Figura 9 y la Figura 10 muestran que la tendencia de los coeficientes de atenuación es a aumentar la atenuación conforme aumenta la HSB, este resultado es consistente con la formulación de Maza et al. (2022), presentada en la Figura 11. Sin embargo, en la Figura 9 se observa que el ajuste realizado tiende a sobreestimar los coeficientes de atenuación del *Halimione* especialmente, mientras que subestima los coeficientes de atenuación del *Juncus*. Este análisis no se puede contrastar directamente con la Figura 11 puesto que en esta no se realiza una discriminación por tipo de especie. Sin embargo, lo que sí se observa es que la formulación de Maza et al. (2022) tiene un coeficiente de correlación el ajuste lineal de 0.81, mientras que el ajuste presentado en la Figura 9 y en la Figura 10 tiene un coeficiente de correlación de 0.493. Esto supone que se generó una reducción del 39.14% en el coeficiente de correlación al incluir el efecto de las corrientes respecto al caso en el que se consideró solo la influencia del oleaje. Adicionalmente, los resultados presentados muestran que el uso directo de la formulación de Maza et al. (2022) para casos en los que se tienen condiciones de ola-corriente, conlleva a una sobreestimación del coeficiente de atenuación y por ende de la capacidad de atenuación del ecosistema. Todo lo anterior denota la importancia de obtener una nueva formulación que tenga en cuenta condiciones conjuntas de ola-corriente.

▪ **Análisis y comparación para el coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea (β_{SB})**

A continuación, se presenta el análisis y comparación para el coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema. El ajuste lineal presentado en la Figura 12 y Figura 13 inicia en la coordenada 0,0 (a diferencia de la Figura 9 y la Figura 10) puesto que en este caso se está relacionando el coeficiente de atenuación asociado únicamente a la biomasa aérea del ecosistema y no se considera la atenuación debida a la interacción del flujo con el fondo. El ajuste realizado en este caso se describe por la ecuación 22. La representación gráfica de la Figura 12 es análoga a la de la Figura 9 y del mismo modo, sucede con la Figura 10 y la Figura 13. La principal diferencia es que en este caso no se considera el aporte del fondo a la disipación de la energía del oleaje.

$$\beta_{SB} = 6.380 * 10^{-4} (1.176 * 10^{-4}) * HSB \quad (22)$$

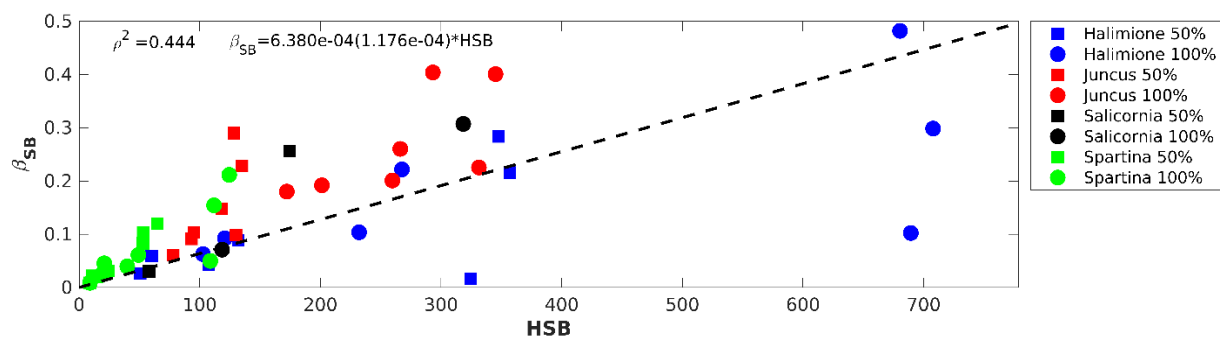


Figura 12. Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.

En la Figura 12 se observa que aún sin tener en cuenta el aporte del fondo a la disipación de energía, la especie con la que se pueden obtener mayores coeficientes de atenuación sigue siendo el *Halimione*, alcanza un valor máximo de $\beta_{SB}=0.48$. En el caso de la *Spartina*, al considerar únicamente la atenuación debida al ecosistema se obtiene un $\beta_{SB}=0.21$ respecto al máximo valor de β de dicha especie. De este modo, en ambos casos se observa una disminución en el coeficiente de atenuación, no solo para el coeficiente de atenuación máximo alcanzado por las especies *Halimione* y *Spartina*, sino en general para todos los puntos y esto es debido a que en la Figura 12 se está sustrayendo el efecto de disipación debido al fondo, el cual tiene características particulares para las diferentes especies consideradas y cuya influencia se analizó con mayor detalle en el capítulo anterior del presente informe.

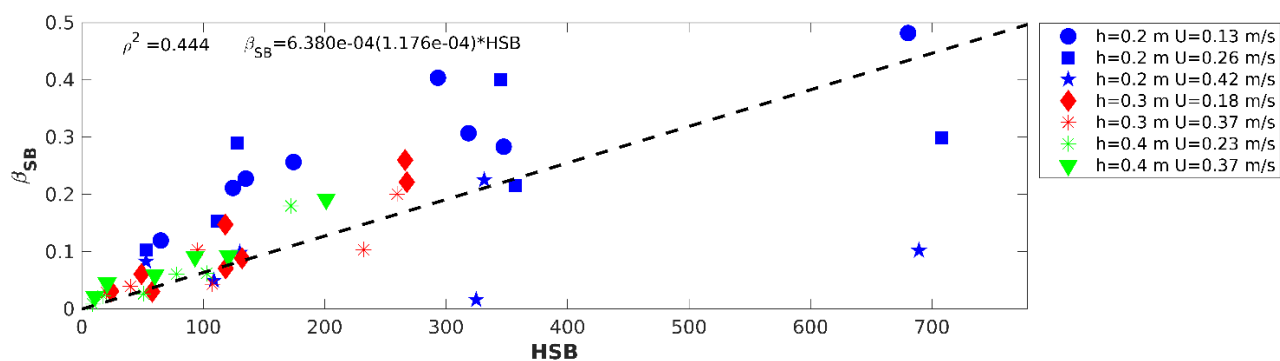


Figura 13. Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y corrientes.

Los resultados de la Figura 13 muestran que, especialmente para el calado de 0.2 m, se obtienen menores coeficientes de atenuación cuando se tienen los mayores valores de corriente. Por otro lado, en la Figura 12 y Figura 13 se observa que para valores de HSB entre 0 y 130 hay un mejor ajuste de los datos para todas las especies respecto a lo encontrado en la Figura 9 y en la Figura 10, particularmente para los calados de 0.3 y 0.4 m. Sin embargo, en la Figura 12 se puede ver que para valores de $HSB > 130$ el ajuste presentado no representa adecuadamente el comportamiento del *Juncus*, el *Halimione* y la *Salicornia*. Además, de la Figura 13 se puede ver que los puntos que más se alejan de la curva de ajuste corresponden a los casos asociados al menor calado, tal como ya se había

evidenciado en el análisis de la Figura 9 y de la Figura 10. Adicionalmente, los resultados presentados muestran que el uso directo de la formulación de Maza et al. (2022) para casos en los que se tienen condiciones de ola-corriente, conlleva a una sobreestimación del coeficiente de atenuación y por ende de la capacidad de atenuación del ecosistema, tal como ya se había mencionado anteriormente. Estos hallazgos respaldan la idea previamente mencionada asociada a la importancia de incluir el efecto de las corrientes en una nueva formulación con el fin de abordar las deficiencias inherentes a los resultados actuales y contribuir a su mejora.

En la Figura 14 se presentan los mismos datos de la Figura 11, con la diferencia de que en este caso se aisló el coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema, por medio de la ecuación 20, tal como se explicó anteriormente. Los ajustes presentados también corresponden a un ajuste lineal y a un ajuste en dos tramos (considerando el punto de saturación). Para este caso, acorde a lo esperado el punto de saturación está por debajo del obtenido en la Figura 11, ya que en este caso no se tiene en cuenta la atenuación debida a la fricción por fondo. En concreto, se alcanza un valor constante de $\beta_{SB}=0.69$ para valores de $HSB>599$.

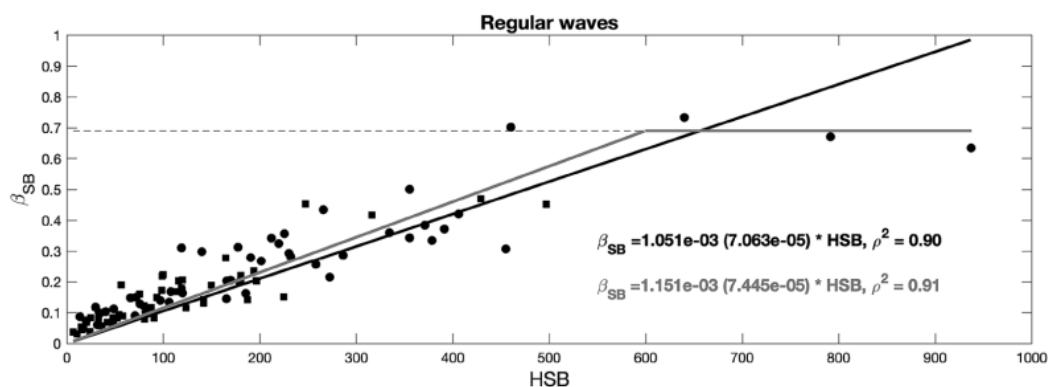


Figura 14. Formulación existente que relaciona el coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) con la biomasa hidráulica del ecosistema (HSB) para condiciones de oleaje regular (sin considerar la acción de las corrientes).

Fuente: Tomado de: Maza et al. (2022).

La Figura 12 y la Figura 13 fueron comparadas con la Figura 14 asociada a la formulación de Maza et al. (2022) para el caso de coeficiente de atenuación asociado a la vegetación. La tendencia de los resultados observados en la Figura 12 y la Figura 13 es consistente con la formulación de Maza et al. (2022), presentada en la Figura 14, pues en dichas figuras se observa que los coeficientes de atenuación tienden a aumentar cuando crece el valor de HSB . Sin embargo, se encuentra el mismo comportamiento de la Figura 9 en cuanto a que el ajuste realizado tiende a sobreestimar los β_{SB} del *Halimione*, mientras que subestima los β_{SB} del *Juncus*. Tal como ya se había mencionado, este análisis no se puede contrastar directamente con la Figura 14 puesto que en esta no se realiza una discriminación por tipo de especie. Sin embargo, lo que sí se observa es que la formulación de Maza et al. (2022) tiene un coeficiente de correlación el ajuste lineal de 0.9, mientras que el ajuste presentado en la Figura 12 y en la Figura 13 tiene un coeficiente de correlación de 0.444. Esto supone que se generó una reducción del 50.7% en el coeficiente de correlación al incluir el efecto de las corrientes respecto al caso en el que se consideró

solo la influencia del oleaje, es decir, una reducción incluso mayor a la obtenida para el caso del β , analizado previamente.

El comportamiento observado en la Figura 12 y la Figura 13 es similar al previamente descrito para la Figura 9 y la Figura 10, para la estimación del coeficiente de atenuación es importante realizar la discriminación para ambos casos, ya que en aquellos casos en los que se conocen las características del fondo previamente, se puede usar directamente la formulación presentada para estimar β_{SB} la cual considera únicamente el efecto de la vegetación en la atenuación de la energía del oleaje. Los hallazgos realizados permiten determinar que existen diversas razones para incorporar las corrientes en una nueva formulación, pues en general se observa que algunas condiciones no son adecuadamente representadas cuando se aplica una formulación que considera únicamente la influencia del oleaje, cuando también hay presencia de corrientes. Si bien la formulación de Maza et al. (2022) demostró ser efectiva en casos donde solo está presente el oleaje, se evidencia que su aplicabilidad se ve limitada en presencia de corrientes.

5. OBTENCIÓN DE LA NUEVA FORMULACIÓN

Tal como se ha venido explicando, los resultados presentados obtenidos previamente denotan la importancia de incluir la influencia de la velocidad de las corrientes para estimar la disipación de energía bajo condiciones de oleaje y corriente. De este modo, en el presente capítulo se pretende obtener una formulación en función de la biomasa aérea del ecosistema, puesto que ya se ha demostrado su potencial y sus ventajas sobre el coeficiente de arrastre. Para ello se toma como punto de partida la formulación realizada por Maza et al. (2022) y a continuación se presentan dos posibles alternativas para incluir las corrientes en la estimación de la atenuación de la altura de ola a través de un campo de marismas. Posteriormente, se comparan las dos alternativas analizadas con el fin de determinar la opción con mejor desempeño para la estimación de la atenuación de la energía del oleaje ante condiciones de oleaje y corriente en función de la biomasa aérea del ecosistema.

La formulación de Maza et al. (2022) que se toma como referencia, utiliza la biomasa hidráulica para la determinación del coeficiente de atenuación. Sin embargo, en el presente estudio en lugar de utilizar directamente la HSB se plantea el uso de una biomasa hidráulica asociada a condiciones de oleaje y corriente (HSB_{wc}), la cual se define por la ecuación 23. Donde HSB es la biomasa hidráulica definida por Maza et al. (2022) y f_{wc} es un factor de ola-corriente que permita incorporar el efecto de las corrientes. En las dos formulaciones que describen a continuación se propone un factor diferente para cada caso, partiendo de relaciones previamente utilizadas en la literatura para considerar la presencia de corrientes, tal como se explica en la descripción de cada formulación propuesta.

$$HSB_{wc} = HSB * f_{wc} \quad (23)$$

5.1. Implementación de parámetro que relaciona velocidad orbital y velocidad de corriente (Formulación 1)

Para el planteamiento de la primera formulación se utilizó un parámetro adimensional que relaciona la velocidad orbital (U_w) y la velocidad de la corriente (U_c). Esta relación se ha utilizado por autores como Longuet-Higgins & Stewart (1960) o Baddour & Song, (1990) los cuales han reportado la interacción entre ola y corriente en términos del cociente entre la velocidad orbital y la velocidad de la corriente con el fin de determinar cuál de los efectos es predominante. La velocidad orbital se calcula por medio de la ecuación 24 y se propone el uso de la velocidad orbital máxima. De este modo, H corresponde a la altura de ola incidente (medida por el sensor 4), ω es la velocidad angular, g es la gravedad, k es número de onda, h es el calado, z es la profundidad a la cual se desea estimar la velocidad orbital y como en este caso se desea calcular el valor máximo de esta variable se utiliza $z=0$. Finalmente, para determinar el valor de U_w se utiliza un valor de $X=0$ (posición en el eje x) y $t=0$ (instante de tiempo).

$$U_w = \frac{H}{2\omega} * gk * \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} * \cos(kx - \omega t) \quad (24)$$

En la primera formulación se propone estimar la HSB_{wc} por medio de la ecuación 23, utilizando el factor descrito por la ecuación 25, el cual relaciona la velocidad orbital y la velocidad de la corriente, tal como se explicó anteriormente. Del análisis previo de los datos de laboratorio se había identificado la posible relación inversa entre el coeficiente de atenuación y la velocidad de la corriente. Por lo tanto, se propone que para estimar el f_{wc} se tenga en cuenta la velocidad de las corrientes en el denominador, con el fin de proponer una alternativa coherente con los hallazgos previamente descritos en el capítulo anterior del presente informe.

$$f_{wc} = \frac{U_w}{U_c} \quad (25)$$

En la Figura 15 se presentan los mismos coeficientes de atenuación utilizados para la construcción de la Figura 9 y en la Figura 10, pero con el eje x modificado de tal forma que ahora representa el valor de HSB_{wc} . En dicha figura se presenta la ecuación del ajuste lineal realizado, esta ecuación también se muestra en la ecuación 26 y representa la forma de la primera formulación considerada para incluir el efecto de las corrientes en la determinación del coeficiente de atenuación en función de la biomasa aérea del ecosistema, específicamente haciendo uso de la HSB_{wc} .

$$\beta = 5.495 * 10^{-4}(1.025 * 10^{-4}) * HSB_{wc} + 5.716 * 10^{-2}(2.780 * 10^{-2}) \quad (26)$$

La convención de la Figura 15 es análoga a la de la Figura 9, en la que básicamente se diferencian los datos presentados por tipo de especie (identificadas por colores) y por densidad del campo vegetado (identificada por la forma de los marcadores de la figura), además, el coeficiente de atenuación de esta figura corresponde a β , el cual considera tanto la atenuación por fondo como la atenuación asociada a la biomasa aérea. Los cambios entre la Figura 9 y la Figura 15 son significativos puesto que se hace evidente que con la modificación realizada los datos presentan una menor dispersión respecto al ajuste cuando se considera la acción de las corrientes por medio del f_{wc} propuesto. En cuanto al coeficiente de correlación, en la Figura 9 se tenía un valor de $\rho^2=0.493$, mientras que para este caso se cuenta con un $\rho^2=0.712$, esto representa una mejora del 44.4 %. Por otro lado, los resultados de la Figura 15 muestran que incluso al incluir el efecto de las corrientes las especies que alcanzan los mayores y menores coeficientes de atenuación siguen siendo el *Halimione* y la *Spartina*, respectivamente. Por otro lado, la tendencia lineal de la Figura 15 es mucho más clara que la presentada en la Figura 9, denotando que el coeficiente de atenuación tiende a aumentar conforme aumenta HSB_{wc} .

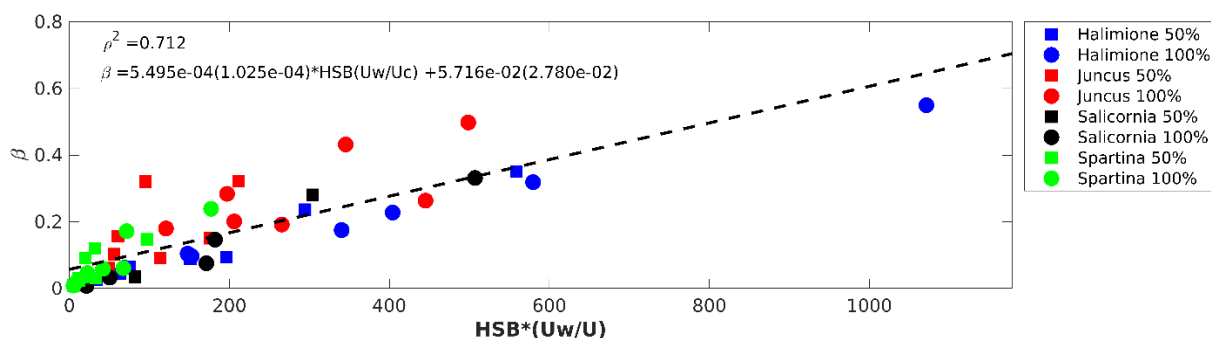


Figura 15. Formulación 1: Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * (Uw/Uc) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.

La Figura 16 es análoga a la Figura 10, diferenciando los datos presentados por calado según el color de los marcadores y por símbolo de acuerdo con la velocidad de la corriente. En la Figura 16, al igual que en la Figura 15, se visualizan los coeficientes de atenuación que consideran la acción del fondo sumada a la influencia de la vegetación. Uno de los aspectos más llamativos de la Figura 10 es que en ella se destaca la dispersión presentada por los datos del calado de 0.2 m, sin embargo, al incluir el efecto de las corrientes se puede ver una dispersión menor en los datos de este calado respecto al nuevo ajuste realizado. En la Figura 10 se analizó que los coeficientes de atenuación del menor calado se estaban subestimando con el ajuste realizado, si bien en la Figura 16 persiste la subestimación, esta se da en menor medida.

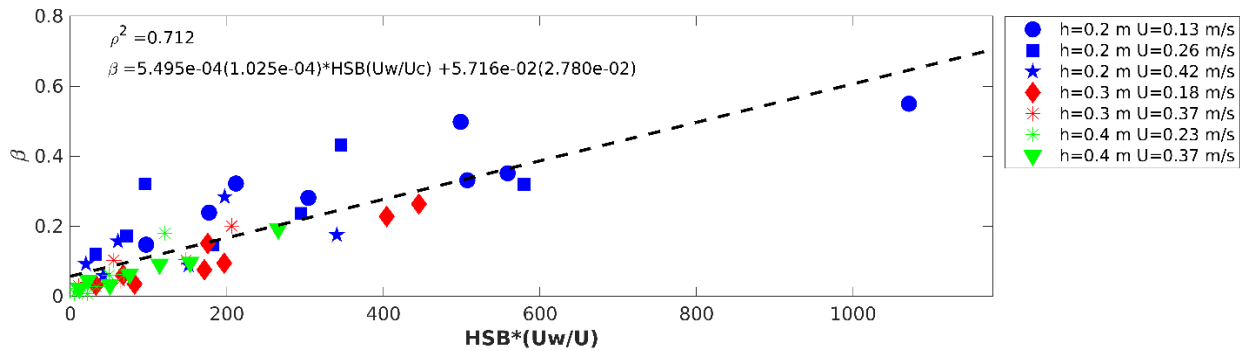


Figura 16. Formulación 1: Coeficiente de atenuación (β) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * (Uw/Uc) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y velocidades de corriente.

En la Figura 17 y en la Figura 18 se presentan los resultados derivados de extraer del análisis la atenuación de la energía debida a la fricción por fondo, el procedimiento para realizar dicha extracción se basa en la implementación de la ecuación 20, tal como ya se ha explicado anteriormente. Se puede decir que estos resultados son análogos a los presentados previamente en la Figura 12 y en la Figura 13, pero con la implementación del f_{wc} presentado en la ecuación 25, tal como se explicó para las dos figuras anteriores. Los cambios entre la Figura 17 y la Figura 18 respecto a la Figura 12 y la Figura 13 son significativos puesto que se hace evidente que al incorporar la acción de las corrientes en la formulación para hallar el β_{SB} los datos presentan una menor dispersión respecto al ajuste.

En cuanto al coeficiente de correlación, en la Figura 12 y en la Figura 13 se tenía un valor de $\rho^2=0.444$, mientras que para la Figura 17 y la Figura 18 se cuenta con un $\rho^2=0.706$, esto representa una mejora del 59% en el ρ^2 . Además, la tendencia lineal de la Figura 17 y la Figura 18 es mucho más clara que la presentada en la Figura 12 y en la Figura 13, denotando que el coeficiente de atenuación tiende a aumentar conforme aumenta HSB_{wc} , tal como ya se evidenciaba en la Figura 15 y en la Figura 16. Por otro lado, los resultados de la Figura 17 muestran que incluso al incluir el efecto de las corrientes y extraer la atenuación por fondo de la formulación, las especies que alcanzan los mayores y menores coeficientes de atenuación siguen siendo el Halimione y la Spartina, respectivamente.

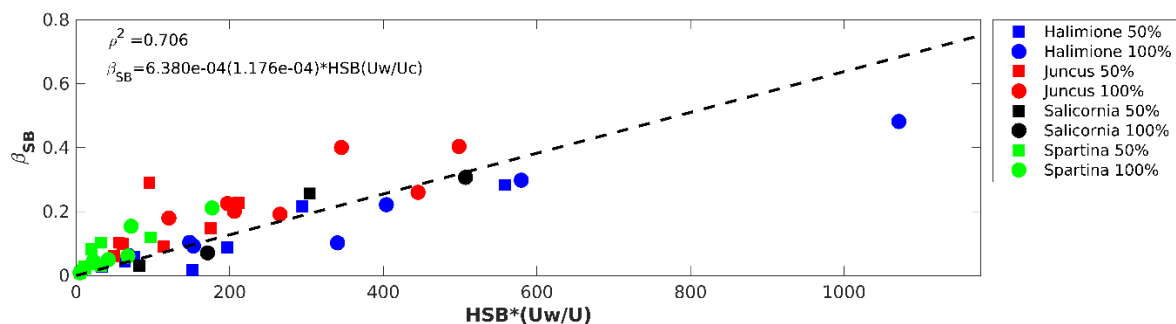


Figura 17. Formulación 1: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * (Uw/U) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.

Tal como se mencionó anteriormente, la Figura 13 es equivalente a la Figura 18, con la diferencia de que esta última considera la acción de las corrientes. Uno de los aspectos más llamativos de la Figura 13 es que en ella se destaca la dispersión presentada por los datos del calado de 0.2 m, sin embargo, al incluir el efecto de las corrientes se puede ver una dispersión menor en los datos de este calado respecto al nuevo ajuste realizado. Además, en la Figura 13 se observaba como el ajuste perdía precisión al aumentar el valor de HSB, mientras que al observar la Figura 18 se puede ver un ajuste más bondadoso para todos los valores de HSB_{wc} . En la Figura 13 se analizó que los coeficientes de atenuación del menor calado se estaban subestimando con el ajuste realizado, si bien en la Figura 18 persiste la subestimación, esta se da en menor medida, mientras que los datos asociados a calados mayores se ajustan en gran medida al ajuste presentado.

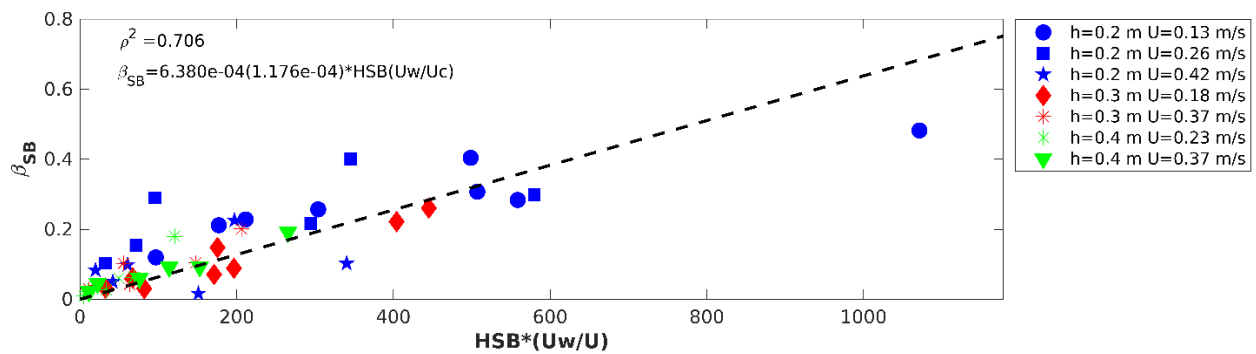


Figura 18. Formulación 1: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * (U_w/U_c) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y corrientes.

En la Figura 13 y en la Figura 14 se presenta la ecuación del ajuste lineal realizado, esta ecuación también se muestra en la ecuación 27 y representa la forma de la primera formulación considerada para incluir el efecto de las corrientes en la determinación del coeficiente de atenuación en función de la biomasa aérea del ecosistema sin considerar la atenuación asociada a la fricción por fondo. Esta formulación es especialmente útil cuando se tiene una adecuada caracterización del fondo y se quiere estimar directamente el coeficiente de atenuación debido únicamente al ecosistema.

$$\beta_{SB} = 6.380 \cdot 10^{-4} (1.176 \cdot 10^{-4}) \cdot HSB \cdot \frac{U_w}{U_c} \quad (27)$$

5.2. Implementación de parámetro que relaciona la velocidad de fase y la velocidad de la corriente (Formulación 2)

Para la definición de esta formulación se implementó un parámetro adimensional propuesto por Thomas & Klopman (1997). Este factor adimensional relaciona la velocidad de fase de la onda y la velocidad de la corriente y se describe por la ecuación 28. Este se propuso por Thomas & Klopman (1997). como una forma de incluir la presencia de las corrientes en problemas que típicamente solo consideraban oleaje y adicionalmente como un factor de clasificación del régimen de corrientes. En esta segunda formulación se propone estimar la HSB_{wc} por medio de la ecuación 23, utilizando el factor descrito por la ecuación 28. Donde, σ corresponde a la velocidad angular, k es el

número de onda y U_c es la velocidad de la corriente. Al igual que en la formulación 1, se propone que la velocidad de la corriente se incluya en el denominador a la hora de estimar el f_{wc} , debido a la relación inversa observada previamente entre el coeficiente de atenuación y la velocidad de la corriente.

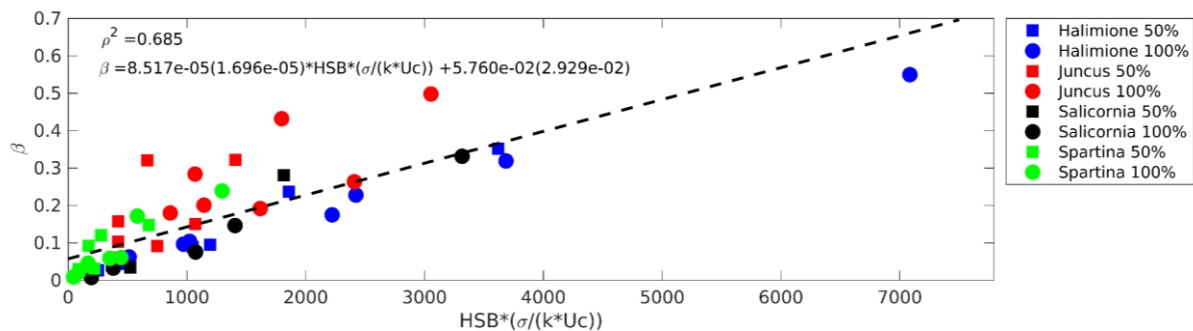
$$f_{wc} = \frac{\sigma}{k * U_c} \quad (28)$$

En la Figura 19 se presentan los mismos coeficientes de atenuación utilizados para la construcción de la Figura 9 y en la Figura 10, pero con el eje x modificado de tal forma que ahora representa el valor de HSB_{wc} , análogo a lo propuesto en la formulación 1. En dicha figura se presenta la ecuación del ajuste lineal realizado, esta ecuación también se muestra en la ecuación 29 y representa la forma de la segunda formulación considerada para incluir el efecto de las corrientes en la determinación del coeficiente de atenuación en función de la biomasa aérea del ecosistema, específicamente haciendo uso de la HSB_{wc} .

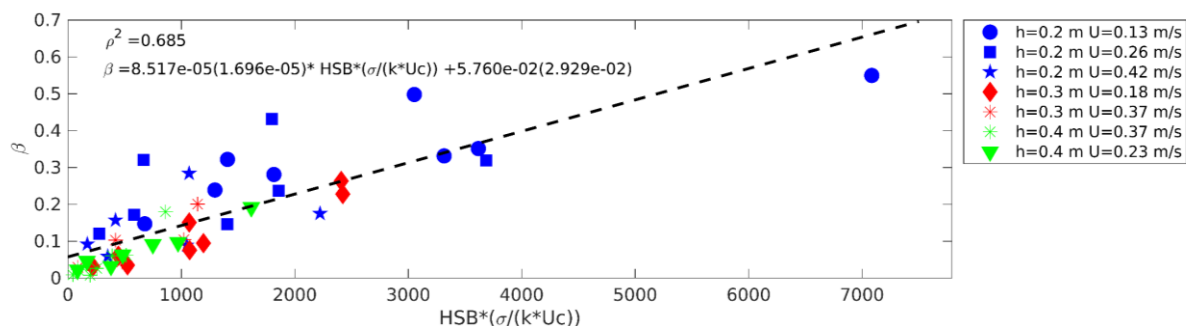
$$\beta = 8.517 * 10^{-5}(1.696 * 10^{-5}) * HSB_{wc} + 5.760 * 10^{-2}(2.929 * 10^{-2}) \quad (29)$$

La convención de la Figura 19 es análoga a la de la Figura 9, en la que básicamente se diferencian los datos presentados por tipo de especie (identificadas por colores) y por densidad del campo vegetado (identificada por la forma de los marcadores de la figura), además, el coeficiente de atenuación de esta figura corresponde a β , el cual considera tanto la atenuación por fondo como la atenuación asociada a la biomasa aérea. Los cambios entre la Figura 9 y la Figura 19 son significativos puesto que se hace evidente que con la modificación realizada los datos presentan una menor dispersión respecto al ajuste cuando se considera la acción de las corrientes por medio del f_{wc} propuesto.

En cuanto al coeficiente de correlación, en la Figura 9 se tenía un valor de $\rho^2=0.493$, mientras que para este caso se cuenta con un $\rho^2=0.685$, esto representa una mejora del 38.9%. Por otro lado, los resultados de la Figura 19 muestran que incluso al incluir el efecto de las corrientes las especies que alcanzan los mayores y menores coeficientes de atenuación siguen siendo el *Halimione* y la *Spartina*, respectivamente. Por otro lado, la tendencia lineal de la Figura 19 es mucho más clara que la presentada en la Figura 9, denotando que el coeficiente de atenuación tiende a aumentar conforme aumenta HSB_{wc} . Las estimaciones derivadas de la formulación 1 y la formulación 2 exhiben una concordancia sustancial, en el próximo capítulo del presente informe se comparan ambas formulaciones para determinar cuál de ellas presenta mayores bondades para la estimación del coeficiente de atenuación cuando se tienen condiciones de ola-corriente.



La Figura 20 es análoga a la Figura 10, diferenciando los datos presentados por calado según el color de los marcadores y por símbolo de acuerdo con la velocidad de la corriente. En la Figura 20, al igual que en la Figura 19, se visualizan los coeficientes de atenuación que consideran la acción del fondo sumada a la influencia de la vegetación. Uno de los aspectos más llamativos de la Figura 10 es que en ella se destaca la dispersión presentada por los datos del calado de 0.2 m, sin embargo, al incluir el efecto de las corrientes se puede ver una dispersión menor en los datos de este calado respecto al nuevo ajuste realizado, análogo a lo observado con la formulación 1. En la Figura 10 se analizó que los coeficientes de atenuación del menor calado se estaban subestimando con el ajuste realizado, si bien en la Figura 19 persiste la subestimación, esta se da en menor medida.



En la Figura 21 y en la Figura 22 se presentan los resultados derivados de extraer del análisis la atenuación de la energía debida a la fricción por fondo, el procedimiento para realizar dicha extracción se basa en la implementación de la ecuación 20, tal como ya se ha explicado anteriormente. Estos resultados son análogos a los presentados previamente en la Figura 12 y en la Figura 13, pero con la implementación del f_{wc} presentado en la ecuación 25, tal como se explicó para las dos figuras anteriores. Los cambios entre la Figura 21 y la Figura 22 respecto a la Figura 12 y la Figura 13 son significativos puesto que se hace evidente que al incorporar la acción de las corrientes en la formulación para hallar el β_{SB} los datos presentan una menor dispersión respecto al ajuste.

En cuanto al coeficiente de correlación, en la Figura 12 y en la Figura 13 se tenía un valor de $\rho^2=0.444$, mientras que para la Figura 21 y la Figura 22 se cuenta con un $\rho^2=0.672$, esto representa una mejora del 51.4 % en el ρ^2 . Además, la tendencia lineal de la Figura 21 y la Figura 22 es mucho más clara que la presentada en la Figura 12 y en la Figura 13, denotando que el coeficiente de atenuación tiende a aumentar conforme aumenta HSB_{wc} , tal como ya se evidenciaba en la Figura 19 y en la Figura 20. Por otro lado, los resultados de la Figura 21 muestran que incluso al incluir el efecto de las corrientes y extraer la atenuación por fondo de la formulación, las especies que alcanzan los mayores y menores coeficientes de atenuación siguen siendo el *Halimione* y la *Spartina*, respectivamente, en congruencia con lo encontrado al aplicar la formulación 1.

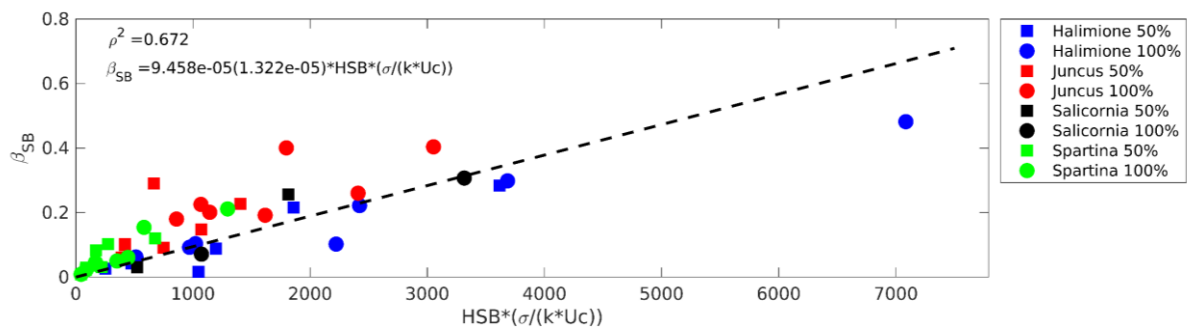


Figura 21. Formulación 2: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * ($\sigma / (k * U_c)$) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando tipo de especie y densidad.

Tal como se mencionó anteriormente, la Figura 13 es equivalente a la Figura 22, con la diferencia de que esta última considera la acción de las corrientes. Previamente ya se había mencionado la dispersión presentada por los datos asociados al menor calado que se evidencia en la Figura 13 y al igual que con la formulación 1, al aplicar la formulación 2 también se puede ver una dispersión menor en los datos de este calado respecto al nuevo ajuste realizado. Además, en la Figura 13 se observaba como el ajuste perdía precisión al aumentar el valor de HSB , mientras que al observar la Figura 22 se puede ver un ajuste más bondadoso para todos los valores de HSB_{wc} . En la Figura 13 se analizó que los coeficientes de atenuación del menor calado se estaban subestimando con el ajuste realizado, si bien en la Figura 22 persiste la subestimación, esta se da en menor medida, mientras que los datos asociados a calados mayores se ajustan en gran medida al ajuste presentado. Estos resultados son notoriamente congruentes con los obtenidos a partir de la formulación 1.

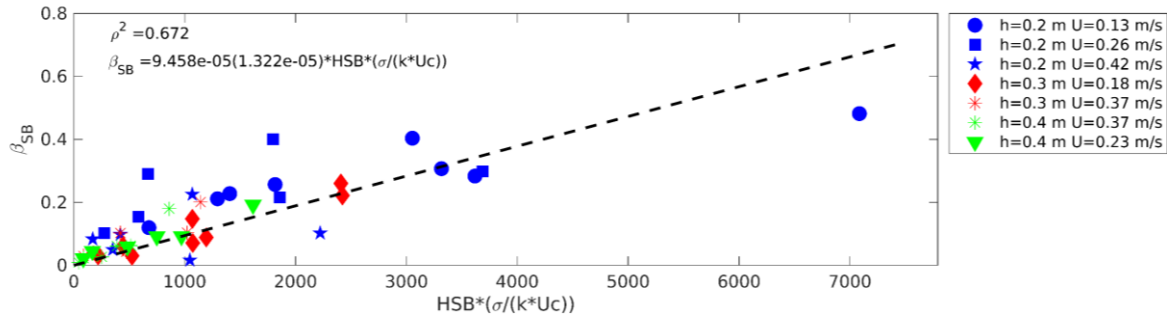


Figura 22. Formulación 2: Coeficiente de atenuación asociado a la biomasa aérea del ecosistema (β_{SB}) en función de la biomasa hidráulica (HSB) * ($\sigma / (k * U_c)$) bajo condiciones de oleaje regular y corrientes, con su respectivo ajuste lineal, diferenciando calados y corrientes.

En la Figura 21 y en la Figura 22 se presenta la ecuación del ajuste lineal realizado, esta ecuación también se muestra en la ecuación 30 y representa la forma de la segunda formulación considerada para incluir el efecto de las corrientes en la determinación del coeficiente de atenuación en función de la biomasa aérea del ecosistema sin considerar la atenuación asociada a la fricción por fondo. Esta formulación es especialmente útil cuando se tiene una adecuada caracterización del fondo y se quiere estimar directamente el coeficiente de atenuación debido únicamente al ecosistema.

$$\beta_{SB} = 9.458 * 10^{-5} (1.322 * 10^{-5}) * HSB * \frac{\sigma}{k * U_c} \quad (30)$$

5.3. Comparación entre formulaciones

Teniendo en cuenta que en el capítulo anterior se presentaron las dos posibles formulaciones y se obtuvieron coeficientes de correlación muy similares en los dos casos, se propone ahondar en la comparación entre las formulaciones con el cálculo de índices de correlación adicionales que permitan identificar la formulación más bondadosa para la estimación del coeficiente de atenuación. Con este fin se llevará a cabo un análisis complementario para evaluar la calidad de ajuste de los modelos propuestos. Para ello, se calcularán métricas de evaluación de modelos, como el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Sesgo (BIAS) y el Índice de Dispersión (SI). Estas métricas proporcionarán una comprensión más completa de la precisión y el rendimiento de las formulaciones en la predicción de los coeficientes de atenuación en función de la variable biomasa aérea.

Para realizar esta comparación se propone la normalización de la variable HSB (ecuación 31), con el propósito de estandarizar las escalas y unidades de las variables involucradas en el análisis. Dado que las formulaciones consideradas pueden presentar diferencias significativas en las magnitudes de HSB_{wc} , la normalización garantiza que los coeficientes de BIAS y RMSE sean comparables de manera equitativa entre las formulaciones. Es importante destacar que el SI se calcula utilizando la media y el RMSE en las unidades originales de HSB y no se normaliza. El SI proporciona información sobre cómo se distribuyen los errores de predicción en relación con la variabilidad de HSB en su escala original, lo que lo hace relevante para la interpretación en el contexto de la aplicación específica del presente estudio.

$$X_{norm} = \frac{X - \bar{X}}{SD} \quad (31)$$

En la ecuación 31 X representa a HSB o HSB_{wc} según corresponda, $\bar{X}$ es la media de X y SD es la desviación estándar. A continuación, se presentan las ecuaciones para la estimación de los diferentes coeficientes que se utilizan para la comparación entre formulaciones. El BIAS o sesgo está representado por la ecuación 32, el Error Cuadrático Medio (RMSE) está dado por la ecuación 33 y el coeficiente de correlación de Pearson se estima mediante la ecuación 34 y finalmente, el SI está dado por la ecuación 35.

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (32)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (33)$$

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (34)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{y}_i} \quad (35)$$

En las ecuaciones 32-35, n corresponde al número total de observaciones, es el valor observado en la i -ésima observación (variable dependiente), $\hat{y}_i$ corresponde al valor predicho por el modelo en la i -ésima observación (valor ajustado), x_i es el valor de la variable independiente en la i -ésima observación (variable explicativa). Por su parte, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ se refieren a la media (promedio) de los valores de x e y en el conjunto de datos, respectivamente. Por su parte, x_i es el valor de la variable independiente en la i -ésima observación (variable explicativa). A continuación, en la Tabla 6 se presentan los coeficientes de atenuación obtenidos para las dos formulaciones propuestas que tienen en cuenta la acción conjunta del oleaje y las corrientes.

Tabla 6. Comparación de formulaciones por medio de coeficientes estadísticos

Formulación		ρ^2	RMSE	BIAS	CORR	SI
Formulación 1	β	0.712	0.896	0.157	0.84	1.49
	β_{SB}	0.706	0.906	0.144	0.84	1.48
Formulación 2	β	0.685	0.898	0.157	0.83	1.48
	β_{SB}	0.672	0.908	0.144	0.82	1.47

Al comparar las dos formulaciones lo que se observa es que ambas tienen una bondad de ajuste muy similar. Aunque la formulación 1 tiene ligeras ventajas sobre la formulación 2, no hay una diferencia concluyente entre los índices estadísticos mostrados en la Tabla 6. Por lo tanto, se concluye que las dos formulaciones propuestas son válidas para la estimación del coeficiente de atenuación. Sin embargo, la formulación 2 tiene la ventaja de tener una aplicación más directa al no tener que hallar la velocidad orbital, esto implica que depende de menos parámetros. Esta particularidad podría facilitar la implementación de la formulación 2 respecto a la formulación 1.

6. CONCLUSIONES

En el presente estudio se encontró que al no incluir el efecto de las corrientes se generaban reducciones entre el 40 y el 50% en el coeficiente de correlación respecto a la formulación análoga de Maza et al. (2022) que solo considera la acción del oleaje. Adicionalmente, los resultados presentados muestran que el uso directo de la formulación de Maza et al. (2022) para casos en los que se tienen condiciones de ola-corriente, conlleva a una sobreestimación del coeficiente de atenuación y por ende de la capacidad de atenuación del ecosistema, lo que implica estar del lado de la inseguridad. Estos hallazgos demostraron la importancia de considerar la presencia de corrientes en las formulaciones para estimar el coeficiente de atenuación cuando hay una combinación de oleaje y corrientes.

Se confirma que la variable HSB es una valiosa herramienta para estimar la atenuación de la energía del oleaje, pues incluso sin incluir el efecto de las corrientes en la formulación de Maza et al. (2022), se observa una tendencia general que indica que a medida que aumenta el valor de HSB, aumenta también la atenuación de la energía. Sin embargo, se ha demostrado que el uso directo de la formulación de Maza et al. (2022) sin modificaciones es insuficiente para explicar la atenuación de energía en condiciones simultáneas de ola y corrientes. Esto destaca la importancia del presente trabajo en el que se incorporaron nuevos parámetros a dicha formulación, los cuales permiten incluir el efecto de las corrientes.

Los parámetros seleccionados en conjunto con la formulación inicial permitieron desarrollar dos nuevas formulaciones para estimar el coeficiente de atenuación en función de la biomasa. Ambas formulaciones mejoran la estimación del coeficiente y presentan una buena bondad de ajuste. Sin embargo, la Formulación 2, depende de menos parámetros y tiene una aplicación más directa, por lo tanto, se recomienda hacer uso de esta formulación cuyo f_{wc} relaciona únicamente la velocidad de fase con la velocidad de la corriente.

Las formulaciones propuestas que incluyen el efecto de oleaje y corrientes muestran que las especies con mayor y menor porcentaje de disipación son consistentes con la formulación que solo considera el oleaje, pues al tener en cuenta el efecto de las corrientes se confirma que la especie que da lugar a los mayores coeficientes de disipación en todos los casos es *Halimione Sp.*, mientras que la especie que da lugar a los menores coeficientes de disipación es *Spartina Sp.* Sin embargo, las nuevas formulaciones permiten mejorar la estimación del coeficiente de atenuación en condiciones de ola-corriente propagándose en la misma dirección.

La utilización de la biomasa aérea del ecosistema para estimar el coeficiente de atenuación presenta la ventaja de no requerir procesos de calibración, como ocurre al estimar la atenuación en función del coeficiente de arrastre. Investigadores como López-Arias et al. (2023) ya han validado la eficacia de esta metodología para condiciones de oleaje, no solo utilizando datos de laboratorio sino también en datos de campo de diferentes especies. De este modo, una posible línea futura de trabajo sería validar las formulaciones propuestas para otras especies de marismas y condiciones de campo. Adicionalmente, las formulaciones obtenidas podrían incorporarse en un modelo numérico, lo que abriría la posibilidad de extender su aplicación a casos de estudio reales en los que se desee modelar la atenuación en ecosistemas intermareales en estuarios.

Aunque los datos de laboratorio con los que se contó para el desarrollo del presente estudio solo consideran condiciones de oleaje regular, es importante anotar que la metodología seguida en este estudio es replicable y podría utilizarse para desarrollar formulaciones adecuadas para la condición de oleaje irregular en futuros estudios.

7. REFERENCIAS

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2008). *Evolución de las zonas costeras en Europa*.
- Anderson, M. E., & Smith, J. M. (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering*.
- Baddour, R., & Song, S. (1990). On the interaction between waves and currents. *Ocean Engineering*.
- Dalrymple, R., Asce, M., Kirby, J., & Hwang, P. (1984). Wave Diffraction Due to Areas of Energy Dissipation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.
- Diario Vasco. (2019). *El Diario Vasco*. Obtenido de Salicornia o espárrago de mar, ¿qué es y cuáles son las propiedades de esta planta?: <https://www.diariovasco.com/gastronomia/despensa/salicornia-20190812145638-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.diariovasco.com%2Fgastronomia%2Fdespensa%2Fsalicornia-20190812145638-nt.html>
- Figuerola, E., Jiménez, J., Carranza, J., & González, C. (1987). Distribución y nutrición mineral de *Salicornia ramosissima*, *Salicornia europaea* y *Salicornia dolichostachya* en el estuario de los ríos Odiel y Tinto. *Limnetica*.
- Garzón, J., Ferreira, C., & Padilla, R. (2017). Evaluation of weather forecast systems for storm surge modeling in the Chesapeake Bay. *Ocean Dynamics*.
- Garzón, J., 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*. doi:<https://doi.org/10.1029/2018JC014865>
- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A., Perrette, M., Nicholls, R., Tol, R., . . . Levermann, A. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>
- Horstman, E., Bryan, K., Mullarney, J., Pilditch, C., & Eager, C. (2018). Are flow-vegetation interactions well represented by mimics? A case study of mangrove pneumatophores. *Advances in Water Resources*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.018>
- Jadhav, R. (2012). Field Investigation of Wave and Surge Attenuation in Salt Marsh Vegetation and Wave Climate in a Shallow Estuary. *LSU Doctoral Dissertation*.
- Lei, J., & Nepf, H. (2019). Wave damping by flexible vegetation: Connecting individual blade dynamics to the meadow scale. *Coastal Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.008>
- Longuet-Higgins, M., & Stewart, R. (1960). *Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents*.

- López, F., Maza, M., Lara, J., & Losada, I. (2023). A new predictive tool for modeling wave attenuation produced by saltmarshes in SWAN based on standing biomass. *Coastal Engineering*.
- Losada, I., Maza, M., & Lara, J. (2016). A new formulation for vegetation-induced damping under combined waves and currents. *Coastal Engineering*.
- Luhar, M., Infantes, E., & Nepf, H. (2017). Seagrass blade motion under waves and its impact on wave decay. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. doi:<https://doi.org/10.1002/2017JC012731>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhos, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*. doi:10.1038/s41598-018-24630-6
- Maza, M., Lara, J., & Losada, I. (2021). Predicting the evolution of coastal protection service with mangrove forest age. *Coastal Engineering*. doi:10.1016/j.coastaleng.2021.103922
- Maza, M., Lara, J., & Losada, I. (2022). A paradigm shift in the quantification of wave energy attenuation due to saltmarshes based on their standing biomass. *Scientific Reports*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-022-18143-6>
- Méndez, F., & Losada, I. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Ocean Engineering*.
- Menéndez, J. (2006). *Halimione portulacoides*. En *asturnatura.com* [En línea].
- Menéndez, J. (2006). *Juncus maritimus*. En *asturnatura.com* [en línea].
- Menéndez, J. (2006). *Spartina maritima*. En *asturnatura.com* [en línea].
- Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. (2022). *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. Obtenido de Cerca del 40% de la población española está empadronada en municipios costeros: <https://www.mapa.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/-cerca-del-40-de-la-poblaci%C3%B3n-espa%C3%B1ola-est%C3%A1--empadronada-en-municipios-costeros/tcm:30-617477>
- MITECO. (2005). *Manual de Hábitat de España*.
- Morris, R., Konlechner, T., Ghisalberti, M., & Swearer, S. (2018). From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. *Global Change Biology*. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.14063>
- Morris, R., Bishop, M., Boon, P., Browne, N., Carley, J., Fest, B., . . . Swearer, S. (2021). *The Australian guide to nature-based methods for reducing risk from coastal hazards*. Melbourne.
- Nieto, G., Siqueiros, M., Luna, J., Flores, E., & Moreno, O. (2015). Taxonomía y distribución del género *Spartina* (Poaceae) en México. *Botanical Sciences*.

- Reguero, B., Beck, M., Losada, I., & Narayan, S. (2017). Uniendo ingeniería y ecología: la protección costera basada en ecosistemas. *Revista Iberoamericana del Agua (RIBAGUA)*. doi:<https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1332824>
- Silva, R., Oumeraci, H., Martínez, L., Chávez, V., Lithgow, D., Tussenbroek, B., . . . Bouma, T. (2021). Ten Commandments for Sustainable, Safe, and W/Healthy Sandy Coasts Facing Global Change. *Frontiers in Marine Science*. doi:10.3389/fmars.2021.616321
- Thomas, G., & Klopman, G. (1997). *Wave-current interactions in the nearshore region. Chapter 7 in Gravity waves in Water of Finite Depth. J.N. Hunt, University of Reading, United Kingdom. Advances in Fluid Mechanics Book Series. 336 pages.*
- Wang, H., Zin, Z., Luan, Y., Wang, Y., & Liu, D. (2022). Hydrodynamic Characteristics of Idealized Flexible Vegetation Under Regular Waves: Experimental Investigations and Analysis. *Journal of Coastal Research*.
- Zhang, X., Lin, P., & Nepf, H. (2021). A simple-wave damping model for flexible marsh plants. *Association for the Sciences and Limnology and Oceanography*. doi:10.1002/lno.11952
- Zhang, X., Lin, P., & Nepf, H. (2022). A wave damping model for flexible marsh plants with leaves considering linear to weakly nonlinear wave conditions. *Coastal Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104124>
- Zhu, L., Chen, Q., Ding, Y., Jafari, N., Wang, H., & Johnson, B. (2023). Towards a unified drag coefficient formula for quantifying wave energy reduction by salt marshes. *Coastal Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104256>