



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



Validación de una herramienta numérica para predecir el servicio de protección costera proporcionado por bosques de manglar

Trabajo realizado por:

Maëlys Le Mouel

Dirigido:

María Emilia Maza Fernández

Titulación:

**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2022

TRABAJO FIN DE MASTER

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a María Emilia Maza Fernández por su orientación, su disponibilidad, su amabilidad y la ayuda que me ha prestado a lo largo de mi trabajo de fin de Máster. Aprecié especialmente que me introdujera en el mundo de la investigación y que me explicara los temas de su trabajo de investigación que están relacionados con el trabajo que yo he realizado.

También quiero dar las gracias a Fernando López-Arias, que ha estado tan presente como María. Ha podido desbloquear algunos puntos técnicos para la realización de mis simulaciones y por explicarme los detalles de la campaña de medición que ha llevado a cabo. También quiero subrayar su benevolencia y su reactividad a lo largo de este trabajo.

Me gustaría prestar especial atención al apoyo que recibí de Armonie, que me dio valor y perseverancia en mis comienzos con un español dudoso y que supo apoyarme en los momentos difíciles a la vez que aportaba alegría y buen humor con su generosa personalidad.

Me gustaría agradecer a Sonia su paciencia durante nuestros intercambios en lengua de signos a principios de este año en Santander. Aprendí mucho de ella y nos lo pasamos muy bien compartiendo nuestras culturas de forma amistosa.

Me gustaría dar las gracias al personal docente y, en particular, a Mauricio, Raúl y Gabo, que han estado especialmente presentes a lo largo de este año.

Índice

Símbolos	6
Siglas y abreviaciones.....	7
1.1. Planteamiento del problema	15
1.2. Estado del arte y motivaciones.....	16
1.3. Objetivos del estudio	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Metodología	18
1.5. Organización del estudio	20
2.1. Presentación del modelo SWAN	22
2.2. Presentación del módulo de vegetación utilizado	23
2.2.1. SWAN-VEG modelo.....	23
2.2.2. Ecuaciones utilizadas para caracterizar los manglares	24
3.1. Verificación de la implementación de la fórmula del coeficiente de atenuación en el modelo con datos de laboratorio	26
3.1.1. Presentación de las pruebas de laboratorio de Maza et al (2019)	26
3.1.1.1. Presentación del dispositivo.....	26
3.1.1.2. Descripción de la vegetación	27
3.1.1.3. Casos utilizados para la validación de la implementación de la herramienta numérica	28
3.1.2. Construcción de archivos de entrada utilizados para verificar la implementación de la fórmula del coeficiente de atenuación con datos de laboratorio	29
3.1.2.1. Supuestos para el archivo de entrada a validar asociado a la simulación de laboratorio.....	29
3.1.2.2. Dominio de computación para el laboratorio	29
3.1.2.3. Mallado utilizado para el laboratorio	29
3.1.2.4. Condiciones límite e iniciales	30
3.1.2.5. Nivel de agua y batimetría para el laboratorio.....	30
3.1.2.6. El volumen sólido sumergido para el laboratorio	30
3.1.2.7. Diagrama resumen del dominio numérico construido.....	31
3.2. Validación de la herramienta numérica con datos de campo.....	32
3.2.1. Presentación del trabajo de campo de López-Arias et al. [2022].....	32
3.2.1.1. Contexto del estudio	32

3.2.1.2.	Descripción de la vegetación	34
3.2.1.3.	Medidas de campo utilizados para la validación de la herramienta numérica	36
3.2.2.	Construcción de archivos de entrada utilizados para validar la herramienta numérica con datos de campo	37
3.2.2.1.	Supuestos para el archivo de entrada a validar asociado a la simulación de campo	37
3.2.2.2.	Dominio de computación para el campo.....	37
3.2.2.3.	Mallado utilizado para el campo	37
3.2.2.4.	Condiciones límite e iniciales	38
3.2.2.5.	Nivel de agua, batimetría y marea para el campo	38
3.2.2.6.	Coeficiente de fricción	39
3.2.2.7.	El volumen sólido sumergido para el campo	40
3.2.2.8.	Diagrama resumen del dominio numérico construido.....	41
4.1.	Criterios de validación.....	43
4.2.	Resultados de la validación realizada con datos de laboratorio	43
4.2.1.	Resultados.....	43
4.2.1.1.	Comparación de los resultados del modelo con los datos de laboratorio para diferentes calados.....	43
4.2.1.2.	Comparación de los resultados del modelo con los datos de laboratorio para diferentes alturas de ola.....	46
4.2.1.3.	Comparación de los coeficientes de atenuación del modelo numérico con los de laboratorio	47
4.2.2.	Discusión	50
4.3.	Resultados para la validación de la herramienta numérica con datos de campo	51
4.3.1.	Resultados.....	51
4.3.2.	Discusión	52
Anexo 1:	Fichero de entrada del caso 4 para un nivel de agua de 0,17 m para la validación de la implementación de la fórmula basada en Maza et al. [2019] de la herramienta numérica SWAN con los datos de laboratorio: atenuación de la altura de ola a lo largo del manglar.....	57
Anexo 2:	Fichero de entrada del caso 4 para un nivel de agua de 0,17 m para la validación de la implementación de la fórmula basada en Maza et al. [2019] de la herramienta numérica SWAN con los datos de laboratorio: atenuación de la altura de ola a lo largo del manglar.....	58
Anexo 3:	Fórmulas de los indicadores utilizados para validar la herramienta numérica de predicción de la atenuación del oleaje por los bosques de manglares <i>Rhizophora mangle</i>	59

Anexo 4: Gráficos que representan los resultados de la atenuación de la altura ola con la herramienta numérica basada en el método de Maza et al. [2019] en relación con los datos de laboratorio	60
Anexo 5: Cálculo de indicadores para la comparación de la atenuación de las alturas de los datos de laboratorio de Maza et al. [2019] y los datos del modelo numérico basada en el método de Maza et al. [2019]	67
Anexo 6: Gráficos que representan los resultados del ajuste del coeficiente de atenuación con la fórmula de Mendez and Losada [2004] para los datos de laboratorio de Maza et al. [2019] y los datos del modelo numérico basada en el método de Maza et al. [2019]	69
Anexo 7: Gráficos que representan los resultados de la atenuación de la altura ola con la herramienta numérica basada en el método de Maza et al. [2019] en relación con los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y las zonas Z1, Z2 y Z3 de manglares <i>Rhizophora</i> caracterizadas por diferentes SVF	83
Anexo 8: Cálculo de indicadores para la comparación de la atenuación de las alturas de los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y los datos del modelo numérico basada en el método de Maza et al. [2019]	86

Símbolos, siglas y abreviaciones

Símbolos

A_h : área horizontal unitaria (m^2)
 β : coeficiente de atenuación total
 β_B : coeficiente de atenuación asociado con el fondo del canal
 β_M : coeficiente de atenuación asociados a los manglares
 b_v : diámetro del tallo del cilindro de la planta (m)
 C_{bottom} : coeficiente de fricción del fondo (-)
 $\overline{C_d}$: coeficiente de arrastre medio (-)
 C_g : celeridad de grupo de las olas (m/s)
 d^* : diámetro medio equivalente del volumen sumergido de los manglares (m)
 E_{tot} : energía total ($kg.m^2.s^{-2}$)
 g : constante de gravedad ($m.s^{-2}$)
 Υ : coeficiente de forma del espectro
 Γ : coeficiente dependiente de la pendiente (m^3/s^3)
 h : nivel de agua (m)
 H_{mo} : Altura de la ola de momento de orden cero (m)
 H_{rms} : Altura de la ola media cuadrática (Root mean square wave height) (m)
 i : índice que caracteriza la ola incidente
 $\bar{k}$: número medio de onda ($rad.m^{-1}$)
 k : índice de la variable de interés
 n : número de datos de medida
 N : denota la densidad espectral de la acción de las olas
 N_M : número de manglares por unidad de superficie
 R^2 : coeficiente de determinación
 σ : frecuencia intrínseca (s^{-1})
 $\bar{\sigma}$: frecuencia media (s^{-1})
 $S_{ds,b}$: disipación por fricción de fondo (SI)
 $S_{ds,br}$: disipación de rotura inducida por la profundidad (SI)
 $S_{ds,br,tot}$: nivel de disipación de E_{tot} (SI)
 $S_{ds,veg}$: disipación total de energía debida a la vegetación (SI)
 $S_{ds,wc}$: disipación por whitecapping (SI)
 $\sigma \varepsilon^2$: exactitud del modelo
 S_{in} : energía de crecimiento de las olas debido al viento (SI)
 $S_{n|3}$: energía de interacción no lineal ola-ola (tríadas) (SI)
 $S_{n|4}$: energía de interacción no lineal ola-ola (cuádruple) (SI)
 S_{tot} : disipación total de energía (SI)
 t : tiempo (s)
 T_{m02} : periodo medio de paso ascendente por cero (s)
 T_p : periodo de pico (s)
 Θ : dirección de las olas ($^\circ$)
 X_{medida} : variable medida
 $\overline{X_{medida}}$: media de la variable medida
 $X_{simulada}$: variable simulada con la herramienta numérica

Siglas y abreviaciones

JONSWAP: JOint North Sea Wave Project

MSE: Mean Square Error

NBS: Nature Based Solution

NS: criterio de Nash-Sutcliffe

RMSE: Root Mean Square Error

RSR: RMSE standard deviation ratio

SVF: Solide Volume Fraction

SWAN: Simulating WAVes Nearshore

Resumen

Validación de una herramienta numérica para predecir el servicio de protección costera proporcionado por bosques de manglar

Herramienta numérica predictiva - Validación de herramienta numérica - Modelo SWAN - Bosque de manglares *Rhizophora* - Atenuación de ola - Coeficiente de atenuación - SVF

Los manglares son ecosistemas que prestan un valioso servicio de protección costera. Sin embargo, todavía es complicado conocer la relación entre este servicio, las características del oleaje y el tipo de manglares presentes. De forma general, para determinar este vínculo se utiliza el coeficiente de arrastre, C_d , el cual se utiliza para obtener la atenuación de altura de ola producida por un bosque de manglar y así determinar el coeficiente de atenuación de altura de ola, β , resultante. Sin embargo, esta aproximación presenta importantes desventajas como es la simplificación de suponer que los manglares son cilíndricos y la necesidad de calibrar el coeficiente para cada caso de estudio. Sin embargo, estudios recientes de [Maza et al. \[2019\]](#) han establecido relaciones de laboratorio que permiten relacionar β con el volumen sólido sumergido del bosque de manglar (SVF). El SVF es un parámetro que se puede determinar conociendo la especie de manglar y su edad ([Maza et al. \[2021\]](#)) o a través de medidas geométricas tomadas en campo y no requiere de calibración.

Este trabajo se basa en la nueva formulación basada en el trabajo de [Maza et al. \[2019\]](#) que se ha implementado en el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore). El objetivo principal es validar una herramienta numérica que permita predecir el servicio de protección costera proporcionado por los bosques de manglar. Para ello, en un primer paso, se verifica la implementación de la fórmula en el modelo SWAN con datos de laboratorio del trabajo de [Maza et al \[2019\]](#). Estos datos tienen en cuenta: 8 casos con calado igual a 0,17m, 16 casos con calado de 0,33 m y 20 casos con calado de 0,50 m. A continuación, para comprobar la validez de la herramienta en su aplicación a casos en campo, se realiza la validación del modelo numérico con datos de campo del trabajo de [López-Arias et al. \[2022\]](#). Esta validación se realiza sobre 22 mediciones a diferentes alturas de agua.

En el transcurso de este trabajo, se observa que el modelo reproduce adecuadamente las tendencias observadas por los datos de laboratorio. Sin embargo, el acuerdo entre datos de laboratorio y resultados del modelo no es perfecto en todos los casos. No se observa una relación clara entre la hidrodinámica y la capacidad del modelo numérico para reproducir con exactitud lo medido en el laboratorio. Esto se debe a que la formulación utilizada se obtiene a través del ajuste de los resultados obtenidos del laboratorio y, por lo tanto, no es exacta en todos los casos. Cabe resaltar que en todos los casos el error obtenido está por debajo de 0.01.

Finalmente, el modelo se valida con datos de campo. Las simulaciones reproducen adecuadamente las tendencias observadas en el campo en todos los

casos. Sin embargo, se observan casos en los que el acuerdo entre la estimación del modelo y los datos de campo es muy alto, mientras que otros en los que el modelo no es capaz de reproducir con precisión las tasas de atenuación de altura de ola medidas en campo. Cabe resaltar que en todos los casos el error obtenido está entre 0.01 y 0,04. Cabe señalar aquí que la formulación obtenida en el laboratorio considerando la fricción producida por las paredes y fondo del canal es la utilizada en este caso. Este aspecto puede ser una de las razones que motiva el bajo acuerdo observado en algunos casos. En futuros estudios, se podría utilizar la formulación derivada por [Maza et al. \[2019\]](#) en la que sólo se tiene en cuenta la disipación producida por los árboles y a la que se añadiría numéricamente una fricción por fondo atendiendo al tipo de fondo que encontramos en la zona de estudio. Otra posible razón, puede ser la incertidumbre de las medidas tomadas en campo, tanto en las medidas hidrodinámicas como en las de volumen sólido sumergido. En aquellos casos en los que el acuerdo no es satisfactorio, el modelo sobrestima la altura de ola al final del bosque.

Así, la herramienta numérica da lugar a resultados altamente muy satisfactorios en muchos de los casos, pero cabe señalar que se necesitan más investigaciones para llegar a dar lugar a una herramienta predictiva que permita obtener la capacidad de atenuación de altura de ola producida por bosques de manglar de manera amplia.

Abstract

Validation of a numerical tool to predict the coastal protection service provided by mangrove forests

Numerical predictive tool - Numerical tool validation - SWAN model - Rhizophora mangrove forest - Wave attenuation - Wave attenuation coefficient - SVF

Mangroves are ecosystems that provide a valuable coastal protection service. However, it is still difficult to know the relationship between this service, wave characteristics and the type of mangroves present. In general, the drag coefficient, C_d , is used to determine this link and is used to derive the wave height attenuation produced by a mangrove forest and thus determine the resulting wave height attenuation coefficient, β . However, this approach has significant disadvantages such as the simplification of assuming that mangroves are cylindrical and the need to calibrate the coefficient for each case study. However, recent studies by [Maza et al. \[2019\]](#) have established laboratory relationships that allow β to be related to the submerged solid volume of the mangrove forest (SVF). SVF is a parameter that can be determined by knowing the mangrove species and its age ([Maza et al. \[2021\]](#)) or through geometric measurements taken in the field and does not require calibration.

This work is built on the new formulation based on the work of [Maza et al. \[2019\]](#) that has been implemented in the SWAN (Simulating WAVes Nearshore) model. The main objective is to validate a numerical tool to predict the coastal protection service provided by mangrove forests. For this, in a first step, the implementation of the formula in the SWAN model is verified with laboratory data from the work of [Maza et al \[2019\]](#). These data take into account: 8 cases with draught equal to 0.17m, 16 cases with draught of 0.33 m and 20 cases with draught of 0.50 m. Next, to check the validity of the tool in its application to cases in the field, the numerical model is validated with field data from the work of [López-Arias et al \[2022\]](#). This validation is performed on 22 measurements at different water heights.

In the progress of this work, it is observed that the model adequately reproduces the trends observed by the laboratory data. However, the accordance between laboratory data and model results is not perfect in all cases. There is no clear relationship between the hydrodynamics and the ability of the numerical model to accurately reproduce what is measured in the laboratory. This is due to the fact that the formulation used is obtained by adjusting the results obtained in the laboratory and, therefore, it is not exact in all cases. It should be noted that in all cases the error obtained is below 0.01.

Finally, the model is validated with field data. The simulations adequately reproduce the trends observed in the field in all cases. However, there are cases where the accordance between the model estimate and the field data is very high, while in other cases the model is not able to accurately reproduce the wave height attenuation rates measured in the field. It should be noted that in all cases the error

obtained is between 0.01 and 0.04. It should be noted here that the formulation obtained in the laboratory considering the friction produced by the channel walls and bottom is the one used in this case. This aspect may be one of the reasons for the low accordance observed in some cases. In future studies, the formulation derived by Maza et al. [2019] could be used, in which only the dissipation produced by the trees is taken into account and to which a bottom friction would be added numerically according to the type of bottom found in the study area. Another possible reason may be the uncertainty of the measurements taken in the field, both in the hydrodynamic measurements and in the submerged solid volume measurements. In those cases where the agreement is not satisfactory, the model overestimates the wave height at the end of the forest.

Thus, the numerical tool yields highly satisfactory results in many of the cases, but it should be noted that further research is needed to develop a predictive tool to obtain the wave height attenuation capacity of mangrove forests in a comprehensive manner.

Índice de figuras

Figura 1. 1: Mapa que muestra la ubicación de los manglares de <i>Rhizophora</i> en el mundo (©National Geographic Magazine) y la ubicación de las distintas especies asociadas (Duke et al. [2014])	15
Figura 1. 2: Riqueza ecológica, social y económica del manglar <i>Rhizophora</i>	16
Figura 1. 3: Diagrama que presenta el método general de validación de la herramienta numérica de predicción del servicio de protección costera por parte de los manglares <i>Rhizophora</i>	19

Figura 2. 1: Esquema que muestra la inclusión de la disipación por parte de las plantas en el modelo SWAN.....	23
--	----

Figura 3. 1: Presentación del montaje experimental utilizado para el experimento de Maza et al. [2019], (figura de Maza et al. [2019])	27
Figura 3. 2: Diagrama que muestra el dominio computacional de los experimentos realizados por Maza et al [2019] (no a escala).....	31
Figura 3. 3: Vista aérea de la ubicación general del Golf de Nicoya	32
Figura 3. 4: Vista aérea del Golfo de Nicoya mostrando las principales áreas y el perfil de campaña de medición de López-Arias et al [2022] (perfil burdeos).....	33
Figura 3. 5: Vista aérea que muestra la localización de la zona de la campaña de medición realizada por López-Arias et al. [2022] e identificación de los diferentes segmentos y componentes del perfil de medición.....	34
Figura 3. 6: Gráfico que muestra la evolución de la fracción de volumen sólido de los manglares de los muestreos de la campaña de medición de Costa Rica en función de diferentes niveles de agua (López-Arias et al. [2022])	35
Figura 3. 7: Gráfico que muestra el perfil 1 de la campaña de medición de López-Arias et al. [2022] y la localización de los sensores en relación con las diferentes zonas delimitadas	38
Figura 3. 8: Diagrama que muestra el dominio computacional de los experimentos realizados por López-Arias et al. [2022] (no a escala).....	41

Figura 4. 1: Comparación de los resultados de la atenuación de la altura de ola del caso 4 a partir de datos de laboratorio de Maza et al [2019] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola para diferentes profundidades (verde: zona de manglares)	44
Figura 4. 2: Comparación de los resultados de la atenuación de la altura de ola de los casos con una profundidad de 0.50 m y un periodo de pico de 2.64s a partir de datos de laboratorio de Maza et al [2019] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola para diferentes alturas de ola significantes iniciales (verde: zona de manglares)	46
Figura 4. 3: Comparación de los β -fits (coeficiente de atenuación total) obtenidos con datos de laboratorio y por el modelo SWAN con el método de Maza et al. [2019] para el caso 4 de tres niveles de agua diferentes	48
Figura 4. 4: Gráfico scatter-plot que muestra la diferencia entre los coeficientes de atenuación de los datos de laboratorio y los de los datos de SWAN-MAN.....	49

Figura 4. 5: Gráficos que representan los resultados de la atenuación de la altura ola con la herramienta numérica basada en el método de Maza et al. [2019] en relación con los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y las zonas Z1, Z2 y Z3 de manglares caracterizadas por diferentes SVF 51

Índice de tablas

Tabla 3. 1: Fracción de volumen sólido de <i>Rhizophora mangle</i> en función del nivel de agua (datos de Maza et al. [2019])	27
Tabla 3. 2: Presentación de las características del oleaje de los diferentes casos en el sensor 4 del experimento de Maza et al. (2019) así como el coeficiente de atenuación total medido fuera del canal	28
Tabla 3. 3: Presentación de las diferentes mediciones realizadas por López-Arias et al. [2022] en el Golfo de Nicoya en Costa Rica (datos del sensor 1)	36
Tabla 3. 4: Tabla con los niveles de agua utilizados en la herramienta numérica de la atenuación de la altura de ola con el modelo SWAN en relación con la referencia de sicigias.....	39
Tabla 3. 5: Fracción de volumen sólido de los manglares <i>Rhizophora</i> según las zonas delimitadas durante la campaña de medición de López-Arias et al. [2022]	40
Tabla 4 1: Presentación de los parámetros iniciales del caso 4 utilizados en los experimentos de Maza et al [2019]	44
Tabla 4. 2: Resultados de los indicadores estadísticos que comparan los datos de laboratorio y los resultados obtenidos por la herramienta numérica SWAN para la atenuación de la altura de las olas por los manglares basado en el método de Maza et al [2019]	45
Tabla 4. 3: Cálculos de diferentes indicadores de comparación del caso 4 entre los datos de laboratorio de Maza et al [2019] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola debido a los bosques de manglares.....	47
Tabla 4. 4: Cálculos de diferentes indicadores de comparación de los casos 3, 21, 9 y 10 entre los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola debido a los bosques de manglares	52

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Cada vez es más necesario proteger las costas de la erosión y de la mayor frecuencia de fenómenos extremos debidos al cambio climático. En ingeniería, hay dos enfoques principales para la protección de las costas: las soluciones grises y las verdes. Estas últimas, también conocidas como soluciones basadas en la naturaleza (NBS), suelen tener múltiples ventajas sobre las soluciones grises. Pueden ser alternativas a las soluciones grises por su carácter más sostenible y su capacidad para integrarse mejor en los entornos naturales, aunque es cierto que aún es necesario disponer de herramientas predictivas y metodologías de diseño y aplicación de este nuevo tipo de soluciones.

Los manglares son ecosistemas situados en zonas costeras e intermareales situadas en los trópicos y subtrópicos (**Figura 1.1.**). Los manglares, bajo el género *Rhizophora*, cuentan con un total de 6 especies. La especie estudiada en este trabajo es la más abundante, que es *Rhizophora mangle*, localizada en las costas de América Latina y en el oeste del continente africano.

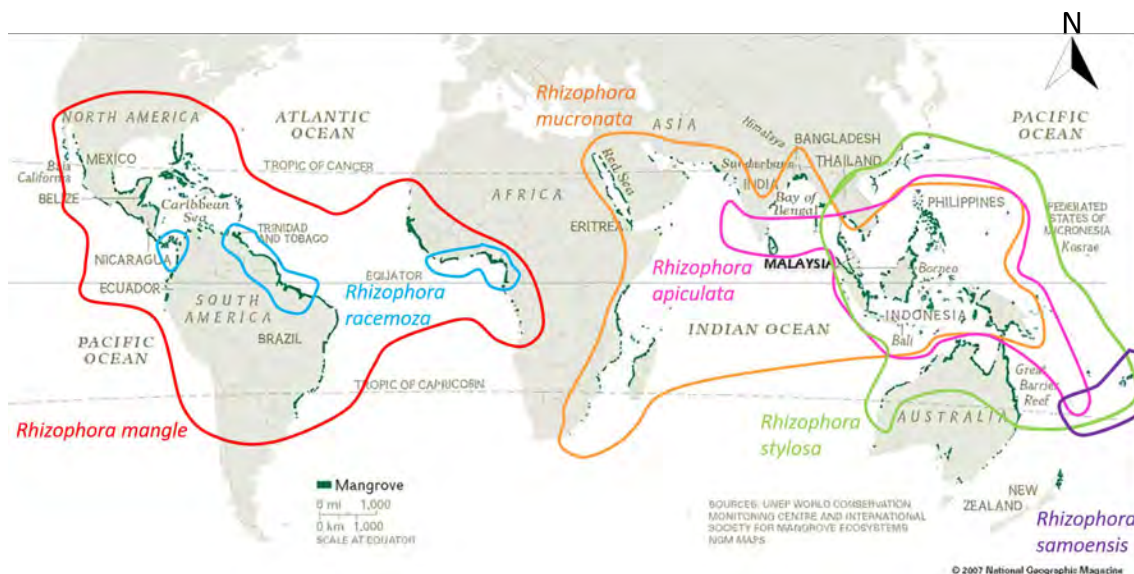


Figura 1. 1: Mapa que muestra la ubicación de los manglares de *Rhizophora* en el mundo (©National Geographic Magazine) y la ubicación de las distintas especies asociadas (Duke et al. [2014])

Sin embargo, actualmente se calcula que, a escala mundial, alrededor del 1% de los manglares desaparece cada año debido a la deforestación. Esto corresponde a una superficie anual de 150.000 ha/año (de Almeida et al. [2016]). Esto se debe principalmente al desarrollo de las actividades humanas costeras, la expansión urbana y el crecimiento de la acuicultura, especialmente la cría de camarones (Hamilton y Casey [2016]).

Por otro lado, varios estudios destacan la importancia socioeconómica y medioambiental de los manglares. De hecho, el valor de estos ecosistemas suele medirse en términos de servicios ecosistémicos. Por ello, se llevan a cabo numerosas medidas de conservación y trabajos de restauración de estos ecosistemas con el fin de recuperar ecosistemas cercanos al original y poder beneficiarse de las diversas ventajas que proporcionan. En la **Figura 1.2.** se resumen los múltiples beneficios de estos ecosistemas.



Figura 1. 2: Riqueza ecológica, social y económica del manglar *Rhizophora*

La protección costera proporcionada por los bosques de manglar ha sido ampliamente reconocida debido a su capacidad de atenuar la energía del flujo incidente (Mazda et al. [1997]). Esta característica es la que interesa abordar en el caso del servicio de protección de costas objeto de este trabajo.

1.2. Estado del arte y motivaciones

Los estudios sobre la disipación de energía inducida por las plantas son relativamente recientes. En los últimos 30 años se han propuesto varios modelos analíticos, de laboratorio y numéricos (Suzuki et al. [2011]). Para estos estudios, actualmente se consideran diferentes enfoques:

- Vegetación incluida en un parámetro de fricción: fricción del fondo (Hasselmann y Collins [1968]) o rugosidad del lecho (Van Rijn [1989]).
- Vegetación considerada como elemento estructural: disipación de energía inducida por fuerzas de arrastre dependientes del coeficiente de arrastre C_d (Dalrymple et al. [1984]).

El segundo enfoque es el utilizado en el módulo de vegetación del modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Sin embargo, el parámetro C_d implica realizar la

calibración del mismo debido a que se desconoce su valor para geometrías complejas, como es el caso de los manglares, los cuales tienen un sistema radicular muy desarrollado, sumergido y fuera del suelo.

Según (Dalrymple et al. [1984]), la atenuación de las ondas puede caracterizarse por el coeficiente de atenuación β que depende de Cd. Esta atenuación de la altura de ola puede expresarse, para olas irregulares, mediante la siguiente relación (Méndez y Losada [2004]):

$$\frac{H_{rms}}{H_{rms,i}} = \frac{1}{1 + \beta X}$$

Con:

- H_{rms} : altura de ola media cuadrática medida a lo largo del campo, siendo X la coordenada a lo largo del mismo.
- $H_{rms,i}$: altura de ola media cuadrática al principio del campo de manglares

Este coeficiente de atenuación fue definido recientemente para manglares maduros de Rhizophora mediante el parámetro SVF (Solid Volume Fraction) en el trabajo de Maza et al [2019] obteniéndose la formulación siguiente:

$$\beta = A \times SVF \times \frac{H_{rms,i}}{h} + B$$

Con:

$$SVF = \frac{\text{Solide volume}}{\text{Water volume}} = \frac{h * \frac{\pi * d^{*2}}{4} * N_M}{A_h * h}$$

Donde:

- A y B: parámetros del ajuste
- h: calado
- d*: diámetro medio equivalente del volumen sumergido de los manglares
- N_M: número de manglares por unidad de superficie
- A_h: área horizontal unitaria

El interés de esta nueva formulación es que no requiere de ningún coeficiente de calibración o ajuste. Estas formulaciones se han implementado en el modelo SWAN para eliminar estas dos restricciones. Así, el presente trabajo consiste en comprobar si las simulaciones numéricas realizadas con el modelo SWAN mediante esta formulación pueden ser validadas.

1.3. Objetivos del estudio

1.3.1. Objetivo general

El objetivo principal de este estudio es obtener una herramienta numérica predictiva para estimar la atenuación de la altura de las olas a lo largo de un bosque de manglares.

1.3.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general se definen los siguientes objetivos específicos:

- Validar la implementación de la fórmula basado en Maza et al. [2019] en el modelo SWAN con datos de laboratorio.
- Validar la herramienta numérica con datos de la campaña de campo de López-Arias et al. [2022].

1.4. Metodología

Este trabajo consiste en validar la nueva implementación en la herramienta numérica SWAN teniendo en cuenta las ecuaciones del coeficiente de atenuación en función del SVF. Esta validación se realiza con datos de laboratorio y de campo. Los datos utilizados en el desarrollo de este trabajo son:

- Los trabajos experimentales realizados por Maza et al. [2019] que realizaron ensayos con modelos físicos para estudiar la atenuación de energía del oleaje por un bosque maduro de *Rhizophora*.
- La campaña de campo en el Golfo de Nicoya (Costa Rica) de López-Arias et al. [2022].

Para llevar a cabo esta validación, se utilizan varios indicadores y parámetros estadísticos. La metodología general se presenta en el siguiente diagrama:

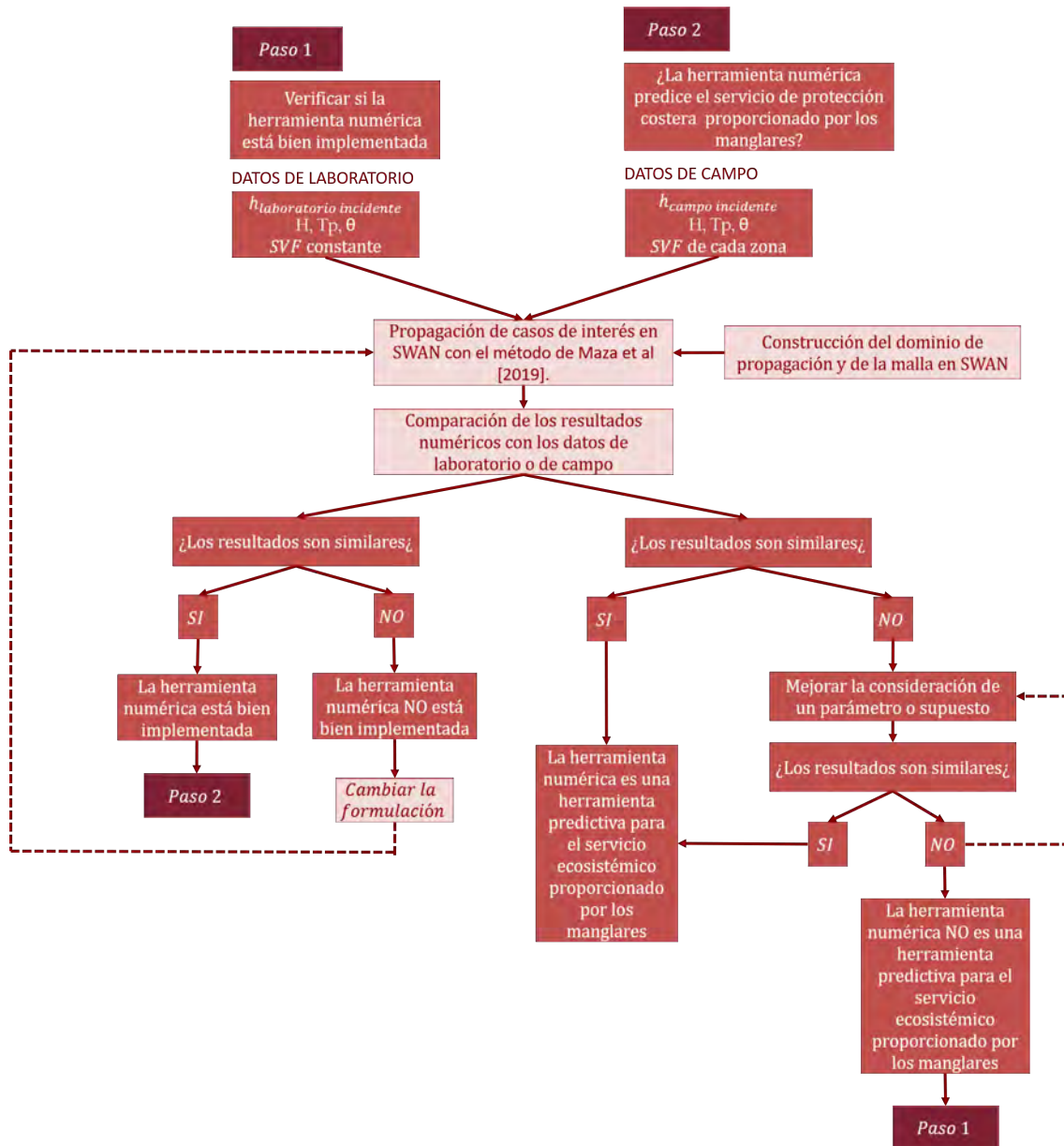


Figura 1. 3: Diagrama que presenta el método general de validación de la herramienta numérica de predicción del servicio de protección costera por parte de los manglares *Rhizophora*

Se trata de construir el entorno numérico para reconstruir el entorno de laboratorio y de campo. Este entorno permitirá verificar la aplicación de la fórmula basada en Maza et al. [2019] y validar la herramienta numérica a partir de los datos de campo. Se hará una evaluación de los resultados para saber si la herramienta es una herramienta numérica predictiva para estimar la atenuación de la altura de las olas a lo largo de un bosque de manglares.

1.5. Organización del estudio

El estudio se presenta como sigue:

Capítulo 2: El capítulo presenta la herramienta numérica SWAN utilizada para la propagación de las olas a lo largo de los manglares

Capítulo 3: Este capítulo presenta las pruebas de laboratorio realizadas por **Maza et al. [2019]** y la campaña de campo de **López-Arias et al. [2022]** y los datos utilizados para validar el modelo numérico. En esta sección, se trata de detallar las distintas hipótesis tomadas en consideración y de realizar una comparación entre los archivos de entrada para validar el modelo con datos de laboratorio o de campo.

Capítulo 4: Validación del modelo numérico con datos de laboratorio y de campo. Esta parte consiste en presentar algunos resultados obtenidos de la atenuación del oleaje por los bosques de manglares con la herramienta numérica. El objetivo es comparar cuantitativamente los resultados numéricos con los medidos en el laboratorio o en el campo. A continuación, se llevará a cabo una discusión de estos resultados.

Capítulo 5: Este último capítulo destacará las principales conclusiones extraídas de este trabajo. El objetivo es responder a los problemas y proponer líneas de trabajo futuras.

CAPÍTULO 2

PRESENTACIÓN GENERAL DEL MODELO NUMÉRICO

2. Presentación general del modelo numérico

2.1. Presentación del modelo SWAN

El modelo Simulating WAVes Nearshore (SWAN) es un modelo espectral de tercera generación para la propagación del estado del mar. Fue desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft. SWAN permite calcular los parámetros del oleaje en zonas costeras, lagos, lagunas y estuarios, a partir de la información de batimetría, corriente y viento.

Permite una buena resolución de los fenómenos de:

- Refracción y asomeramiento debido a las variaciones espaciales de la batimetría y la corriente
- Reflexión y rotura debido a corrientes adversas
- Interacción ola-corriente
- Interacción no lineal ola-ola
- Disipación por whitecapping
- Disipación por rotura batimétrica
- Disipación por fricción del fondo

Este modelo tiene la ventaja de cubrir un espectro de ondas completo en todas las direcciones, de 0° a 360°. Sin embargo, la resolución de la difracción es aproximada.

El modelo SWAN resuelve las ecuaciones de balance de energía de las olas considerando fuentes y sumideros. Realiza la integración de las ecuaciones de evolución de la energía para las células. La ecuación de balance energético utilizada es la de [Booij et al \[1999\]](#):

$$\frac{S_{t_0t}}{\sigma} = \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x}N}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}N}{\partial y} + \frac{\partial c_{g,\sigma}N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{g,\theta}N}{\partial \theta}$$

También se expresa de la siguiente forma:

$$S_{t_0t} = S_{in} + S_{n|3} + S_{n|4} + S_{ds,b} + S_{ds,br} + S_{ds,wc}$$

Con:

- S_{in} crecimiento de las olas inducido por el viento:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad \text{con A y B constantes}$$

- $S_{n|3}$ el tríptico correspondiente a la transferencia de energía debida a la interacción ola-ola no lineal de las bajas frecuencias a las altas frecuencias a profundidad reducida.
- $S_{n|4}$ el cuádruple correspondiente a la transferencia de energía debida a la interacción onda-onda no lineal de las bajas frecuencias a las altas frecuencias a grandes profundidades.
- $S_{ds,b}$ la disipación de energía por fricción con el fondo

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

- $S_{ds,br}$ la disipación de energía por rotura de las olas

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{S_{ds,br,tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

- $S_{ds,wc}$ la disipación de la energía a través del whitecapping

$$S_{ds,wc}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\bar{k}} E(\sigma, \theta)$$

2.2. Presentación del módulo de vegetación utilizado

2.2.1. SWAN-VEG modelo

Además de los diferentes términos de disipación presentados anteriormente, es posible añadir un elemento de disipación por plantas. La consideración de la disipación de energía por parte de las plantas puede representarse esquemáticamente como sigue:

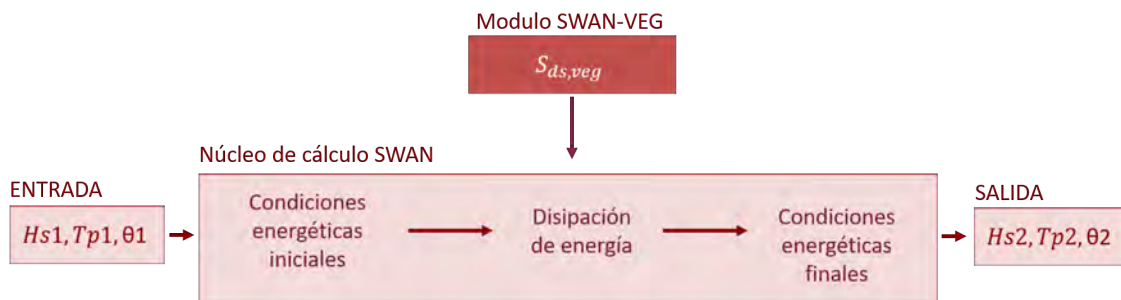


Figura 2. 1: Esquema que muestra la inclusión de la disipación por parte de las plantas en el modelo SWAN

2.2.2. Ecuaciones utilizadas para caracterizar los manglares

Según [Suzuki et al \[2011\]](#), la disipación de energía por la vegetación se expresa de la siguiente manera:

$$S_{ds,veg} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} g^2 \overline{C_d} b_v N \left(\frac{\bar{k}}{\tilde{\sigma}} \right)^3 \frac{\sinh^3 \bar{k} h_v + 3 \sinh \bar{k} h_v}{3 \bar{k} \cosh^3 \bar{k} h} \sqrt{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

Ahora, el coeficiente de arrastre $\overline{C_d}$ se obtiene en función del coeficiente de atenuación β de la siguiente manera ([Méndez y Losada \[2004\]](#)):

$$\overline{C_d} = \frac{3\sqrt{\pi}}{b_v N \bar{k}_0 \sqrt{8E_{tot}}} \frac{(\sin h 2\bar{k}_0 h_v + 2\bar{k}_0 h_0) \sin h \bar{k}_0 h_0}{\sin h^3 \bar{k}_0 h_v + 3 \sinh \bar{k}_0 h_v} \beta$$

Además, el coeficiente de atenuación β depende del SVF, que es el nuevo parámetro de interés. La fórmula utilizada en la herramienta desarrollada posteriormente es la siguiente basada en [Maza et al \[2019\]](#):

$$\beta = 3,65 \times SVF \times \frac{Hrms,i}{h} + 0,0026$$

Esta formulación actual considera la disipación del manglar y la disipación por fondo testada en el laboratorio.

Así, tras la sustitución de los parámetros $\overline{C_d}$ y β , $S_{ds,veg}$ puede expresarse en términos de SVF:

$$S_{ds,veg,SVF} = \sqrt{\frac{3\sqrt{2}}{\bar{k}_0 \sqrt{8E_{tot,0}}}} g^2 \left(\frac{\bar{k}}{\tilde{\sigma}} \right)^3 \left[\frac{\sinh^3 \bar{k} h_v + 3 \sinh \bar{k} h_v}{3 \bar{k} \cosh^3 \bar{k} h} \right] \left[\frac{(\sin h 2\bar{k}_0 h_v + 2\bar{k}_0 h_0) \sin h \bar{k}_0 h_0}{\sin h^3 \bar{k}_0 h_v + 3 \sinh \bar{k}_0 h_v} \right] \left(A \times SVF \times \frac{Hrms}{h} + B \right) \sqrt{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

Esta última fórmula es la que se utiliza para sustituir la de [Suzuki et al \[2011\]](#) para evaluar la atenuación de la altura de las olas en presencia del bosque de manglar.

CAPÍTULO 3

CONSTRUCCIÓN DE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA NUMÉRICA

3. Construcción de los archivos de entrada utilizados para la validación del modelo

3.1. Verificación de la implementación de la fórmula del coeficiente de atenuación en el modelo con datos de laboratorio

Esta parte consiste en presentar la herramienta numérica adaptada para reproducir los ensayos de laboratorio con el fin de verificar la aplicación de la fórmula del coeficiente de atenuación basada en Maza et al. [2019]. También se presenta la herramienta numérica utilizada para validar el modelo en la campaña de medición de López-Arias et al. [2022].

3.1.1. Presentación de las pruebas de laboratorio de Maza et al (2019)

En esta sección se presentan las pruebas de laboratorio de Maza et al [2019]. Estas pruebas de laboratorio son la base para validar la aplicación de la fórmula del coeficiente de atenuación dependiente del SVF en la herramienta numérica para representar la atenuación del oleaje por los manglares.

3.1.1.1. Presentación del dispositivo

El objetivo del trabajo de Maza et al [2019] es determinar fórmulas que relacionen el coeficiente de atenuación β con el SVF. Para ello, se utilizan varias condiciones de olas a 3 profundidades de agua diferentes.

Los diferentes ensayos realizados en el laboratorio se llevan a cabo en el canal de oleaje-corriente-tsunami (COCOTSU) del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria). Este canal tiene 56 m de largo y 2 m de ancho. Está equipado con una pala de olas de pistón que permite generar olas en una carrera de 2 m. Está equipado con un absorbedor de ondas activo y una zona de disipación de energía para evitar cualquier efecto de reflexión que pueda alterar los experimentos. También hay un sistema de recirculación de agua para la generación de corrientes.

La zona de estudio, formada por manglares artificiales, está situada a 23 m de la pala y tiene 26 m de longitud. El dispositivo se muestra en la **Figura 3.1**.

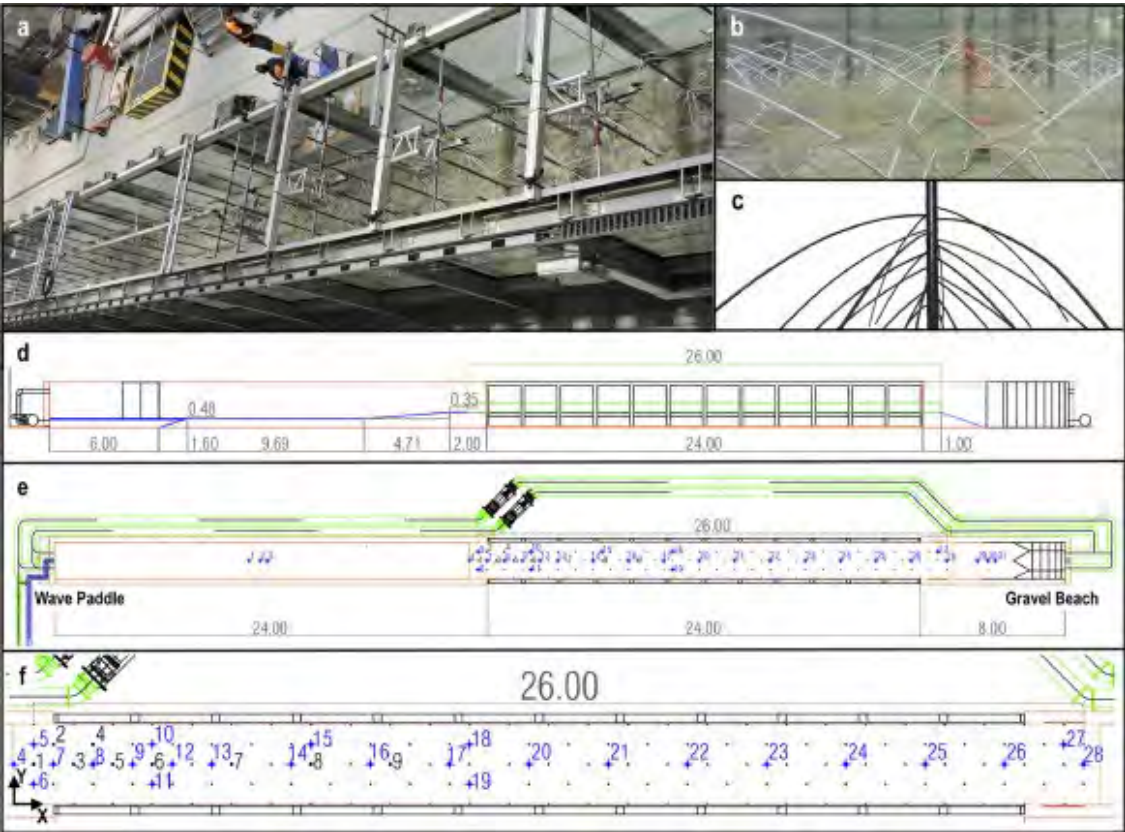


Fig.1. Experimental set-up (a) Top view of the testing area; (b) Detailed lateral view; (c) Mangrove model; (d) Lateral view of the flume; (e) 26 m long mangrove forest (black dots display trunk position), 31 free surface gauges (blues crosses) and 9 load cells (black circles). Glass walls, in black, are located along 24 m of the testing area; the mangrove forest is located at a distance of 24 m from the wave paddle and 8 m from the gravel beach at the end of the flume. A zoom of the study area is shown in panel (f).

Figura 3. 1: Presentación del montaje experimental utilizado para el experimento de Maza et al. [2019], (figura de Maza et al. [2019])

3.1.1.2. Descripción de la vegetación

El bosque artificial de manglares se compone de 135 modelos de Rhizophora de 20 años, cada uno con 24 raíces hechas de latón. El trabajo de Maza et al [2019] determinó diferentes valores de SVF para las tres alturas de agua utilizadas en los ensayos: 0,17 m, 0,33 m y 0,50 m, detallados en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3. 1: Fracción de volumen sólido de Rhizophora mangle en función del nivel de agua (datos de Maza et al. [2019])

SVF (h=0.17m)	SVF (h=0.33m)	SVF (h=0.50m)
0.0272	0.0177	0.0095

Estos tres SVF son los valores de referencia utilizados en la construcción de los archivos de entrada de SWAN para utilizar las fórmulas basadas en Maza et al [2019]. Se puede observar que el SVF aumenta a medida que el nivel del agua disminuye.

3.1.1.3. Casos utilizados para la validación de la implementación de la herramienta numérica

Para realizar la validación numérica, se tienen en cuenta los casos presentados en la **Tabla 3.2**. Así, la aplicación de la fórmula se verificará para los 3 calados mencionados anteriormente y diferentes oleajes. Las características incidentes al campo del oleaje se consideran aquellas medidas por el sensor 4, ya que este sensor se encuentra justo antes de la zona de manglares. Así, el dominio de cálculo se reducirá y con ello el coste computacional.

Tabla 3. 2: Presentación de las características del oleaje de los diferentes casos en el sensor 4 del experimento de Maza et al. (2019) así como el coeficiente de atenuación total medido fuera del canal

Caso	h (m)	T _p (s)	H _s S4 (m)	Coeficiente de atenuación a lo largo del canal β
1	0.17	1.44	0.04	0.0212
2		1.92	0.04	0.0177
3		2.4	0.03	0.0166
4		2.64	0.03	0.0121
5		1.44	0.06	0.0326
6		1.92	0.06	0.0259
7		2.4	0.05	0.0227
8		2.64	0.05	0.0177
1	0.33	1.44	0.04	0.0111
2		1.92	0.04	0.0083
3		2.4	0.03	0.0076
4		2.64	0.03	0.0041
5		1.44	0.06	0.0140
6		1.92	0.05	0.0098
7		2.4	0.05	0.0101
8		2.64	0.05	0.0073
9		1.44	0.09	0.0191
10		1.92	0.08	0.0164
11		2.4	0.08	0.0149
12		2.64	0.08	0.0116
13		1.44	0.13	0.0233
14		1.92	0.12	0.0210
15		2.4	0.11	0.0176
16		2.64	0.11	0.0142
1	0.50	1.44	0.05	0.005
2		1.92	0.04	0.004
3		2.4	0.04	0.003
4		2.64	0.03	0.002
5		1.44	0.07	0.007
6		1.92	0.06	0.005
7		2.4	0.05	0.004
8		2.64	0.05	0.004
9		1.44	0.11	0.009
10		1.92	0.09	0.008
11		2.4	0.09	0.007
12		2.64	0.08	0.006
13		1.44	0.14	0.011
14		1.92	0.12	0.010

15		2.4	0.12	0.009
16		2.64	0.11	0.008
17		1.44	0.17	0.013
18		1.92	0.16	0.013
19		2.4	0.16	0.011
20		2.64	0.15	0.010

3.1.2. Construcción de archivos de entrada utilizados para verificar la implementación de la fórmula del coeficiente de atenuación con datos de laboratorio

El archivo INPUT que reúne toda la información se encuentra en el [Anexo 1](#).

3.1.2.1. Supuestos para el archivo de entrada a validar asociado a la simulación de laboratorio

En la construcción del modelo se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Modo estacionario
- Simulación 1D
- Sistema de coordenadas cartesianas
- Rejilla de cálculo uniforme y rectangular
- Disipación de la energía del whitecapping despreciada
- Disipación de energía por interacción no lineal ola-ola despreciada
- Disipación de energía por rotura de olas despreciada
- Disipación de energía por fricción de fondo se tiene en cuenta en la fórmula del coeficiente de atenuación

3.1.2.2. Dominio de computación para el laboratorio

El dominio computacional asociado al laboratorio tiene 26 m de longitud. Tiene en cuenta toda la parte del laboratorio, incluidos los manglares artificiales, que se extiende desde los datos del sensor 4 hasta los del sensor 27. Así, los datos de la onda de entrada corresponden a los datos del sensor 4.

3.1.2.3. Mallado utilizado para el laboratorio

La definición de la malla utilizada es muy importante para garantizar la convergencia de los cálculos y la calidad de los resultados. Para ello, el diseño de la malla debe cumplir dos limitaciones principales:

- Ser lo suficientemente fino como para tener resultados comparables a los datos de laboratorio y de campo
- No hay que ser demasiado delgado para limitar los tiempos de cálculo

Como se realiza una simulación 1D, sólo es necesario definir una resolución para el eje x. Para hacerse una idea del tamaño de la malla a utilizar y obtener resultados cualitativos, se recomienda utilizar entre 5 y 15 nodos por longitud de onda. En este trabajo, se utilizan 5 nodos por longitud de onda. Así, calculando las longitudes de onda asociadas a los períodos de pico mínimos para las profundidades asociadas, se puede calcular la resolución mínima. En el caso de la resolución del laboratorio, se encuentra una resolución mínima de 0,1 m para tener el número necesario de nodos por longitud de onda. Por lo tanto, en el archivo de entrada se utiliza una resolución $Dx=0,1$ m. Por otro lado, como el dominio computacional asociado al laboratorio es $L=26$ m, el número total de mallas es de 260.

3.1.2.4. Condiciones límite e iniciales

La condición límite del espectro se define como un espectro JONSWAP con un coeficiente de apuntamiento $\gamma=3,3$. Las condiciones de contorno del espectro se definen constantes a lo largo de este segmento. Este espectro está definido por la media de los parámetros de entrada del sensor 4: H_s , T_p y dirección. El espectro de la onda incidente proviene del oeste, es decir, 270° . La desviación estándar de esta dirección se elige de 10° .

3.1.2.5. Nivel de agua y batimetría para el laboratorio

En el caso de la simulación numérica de las pruebas de laboratorio, la batimetría es constante, ya que se trata de un canal con un fondo constante en la parte en la que hay manglares. Así, el archivo de batimetría está compuesto por la altura del agua de cada prueba si se tiene en cuenta un nivel de agua de referencia 0. Por lo tanto, este archivo contiene 261 valores de la misma altura de agua para resolver las ecuaciones con el modelo SWAN en todas las mallas:

$$\text{Número de valores en el archivo} = \frac{L}{Dx} + 1$$

3.1.2.6. El volumen sólido sumergido para el laboratorio

En el caso de las pruebas de laboratorio de [Maza et al \[2019\]](#), el SVF es constante en todo el manglar artificial. Así, se mantienen los valores de SVF correspondientes a las profundidades 0,17m, 0,33 m y 0,50 m determinadas por [Maza et al. \[2019\]](#). Por las mismas razones que el archivo de fondo, el archivo debe contener 261 valores.

El parámetro SVF es constante a lo largo de la zona de estudio porque el nivel del agua es constante a lo largo del canal.

3.1.2.7. Diagrama resumen del dominio numérico construido

Una vez realizado todo este trabajo previo, es posible representar el proceso de cálculo de forma esquemática. Este es el objetivo de la siguiente figura.

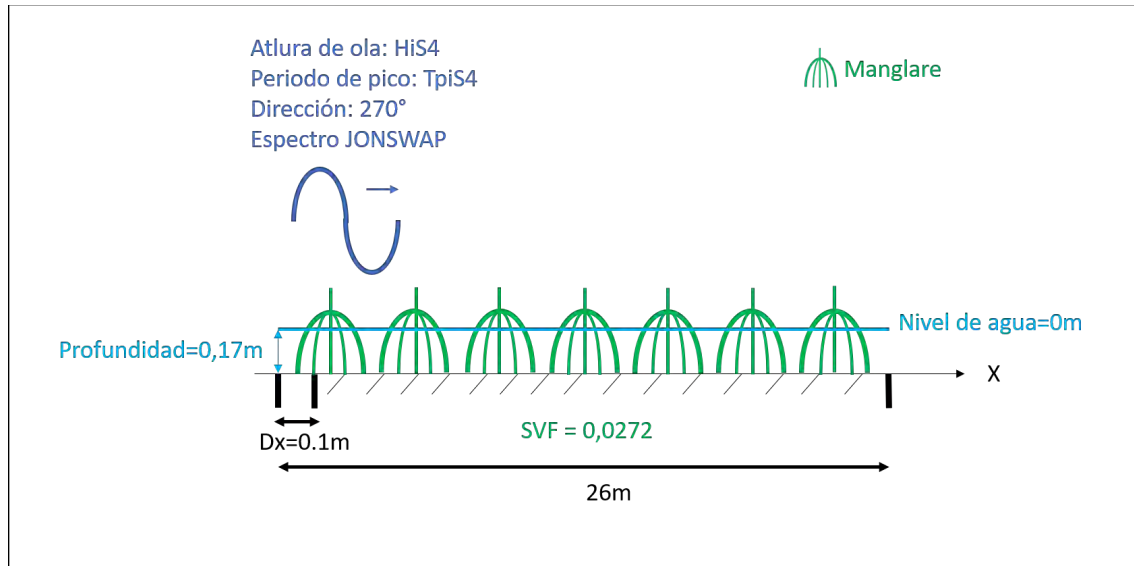


Figura 3. 2: Diagrama que muestra el dominio computacional de los experimentos realizados por Maza et al [2019] (no a escala)

3.2. Validación de la herramienta numérica con datos de campo

3.2.1. Presentación del trabajo de campo de López-Arias et al. [2022]

Para comprender mejor el desarrollo de la herramienta numérica y validarla con datos de campo, es importante presentar la campaña de medición realizada.

3.2.1.1. Contexto del estudio

La campaña de medición de López-Arias et al [2022] se llevó a cabo del 21/02/2022 al 05/03/2023 en América central, en Costa Rica, en la parte interior del Golfo de Nicoya. (**Figura 3.3.**).

Esta zona cuenta con numerosos bosques de manglares, bancos de barro y arena y playas (Angulo et al. [2014]). La presencia de *Rhizophora mangle* justifica que es una zona interesante para validar la herramienta numérica de predicción del servicio de protección costera proporcionado por bosques de manglar.



Figura 3. 3: Vista aérea de la ubicación general del Golf de Nicoya

El Golfo de Nicoya desembocan varios ríos, cuyo principal afluente es el río Tempisque (**Figura 3.4.**). Este río provoca un gradiente de salinidad horizontal y vertical en la región central del Golfo.

El Golfo de Nicoya tiene muchas islas pequeñas. Este parámetro es importante, ya que la zona de medición se encuentra entre las islas de Chira, Venado Bejuoo y Caballo. Su ubicación la convierte en una zona relativamente protegida. La campaña de medición se llevó a cabo en varios perfiles. En este estudio, la validación de la herramienta numérica se basa en los datos recogidos del perfil en burdeos en las **Figura 3.4.** y **Figura 3.5.**



Figura 3. 4: Vista aérea del Golfo de Nicoya mostrando las principales áreas y el perfil de campaña de medición de López-Arias et al [2022] (perfil burdeos)

El perfil de medición se presenta con más detalle en la **Figura 3.5**. Este perfil sirve de base para la construcción del modelo numérico. Este perfil está dividido en varias zonas:

- Zona sin manglares
- Zona 1 (Z1): con una población de *Rhizophora mangle* de alta densidad
- Zona 2 (Z2): con una población heterogénea de *Rhizophora mangle* de densidad media
- Zona 3 (Z3): con una población de *Rhizophora mangle* de baja densidad

Los sensores se colocan en los límites de cada zona para poder caracterizar los siguientes parámetros:

- Profundidad
- Altura de ola H_{m0} que se considera igual a H_s , ya que hay poco viento causando espectros de oleaje muy estrechos.
- T_p y T_{m02}

También se realizan cuatro muestreos de manglares:

- M1: el muestreo al final de la Zona 1

- M2 y M3: los muestreos presentes al final de la Zona 2. Dada la naturaleza heterogénea de la zona 2, M2 representa áreas de baja densidad de manglares y M3 representa áreas de alta densidad.
- M4: el muestreo al final de la Zona 3

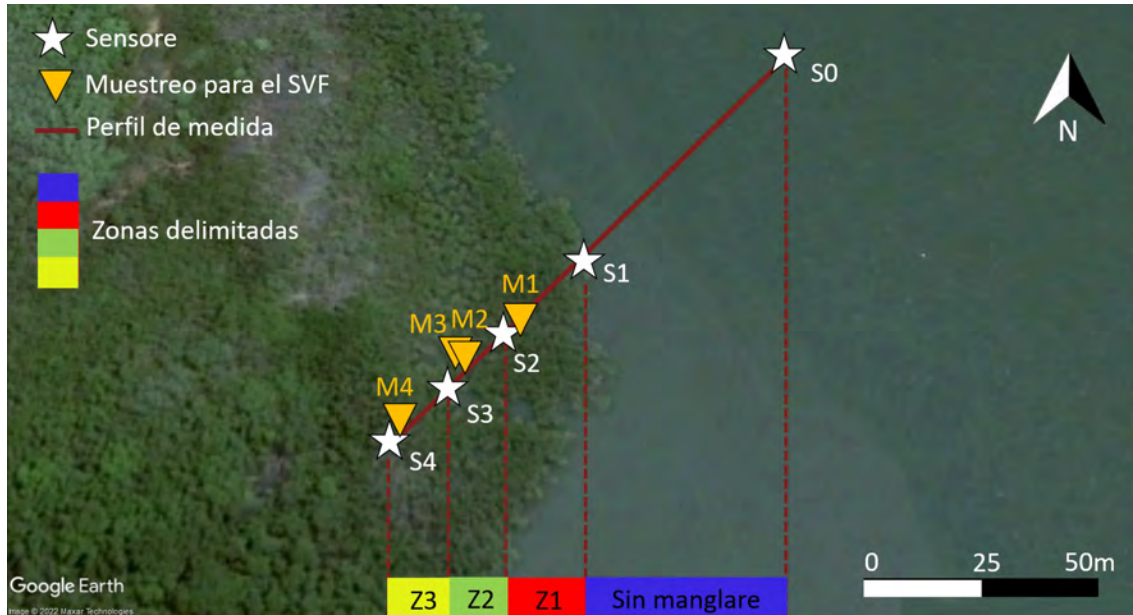


Figura 3. 5: Vista aérea que muestra la localización de la zona de la campaña de medición realizada por López-Arias et al. [2022] e identificación de los diferentes segmentos y componentes del perfil de medición

Existe un gradiente decreciente de densidad de vegetación desde la zona 1 a la zona 3. Además, la zona 2 es una zona de densidad relativamente heterogénea. Así, se realizan dos muestreos para caracterizar el SVF frente a uno solo para las zonas 1 y 3. En la construcción de la herramienta numérica, se considera que los muestreos son representativos de cada zona estudiada. Las características de la vegetación se presentan en la siguiente sección.

3.2.1.2. Descripción de la vegetación

La vegetación de las 3 zonas se caracteriza por el SVF. Para determinar el SVF de cada zona, hay que tener en cuenta diferentes profundidades de agua. El trabajo de López-Arias et al [2022] determinó el SVF de cada muestreo para profundidades de agua de 0,10, 0,30, 0,50, 1,00, 1,50 m. Los valores restantes se interpolaron.

El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos:

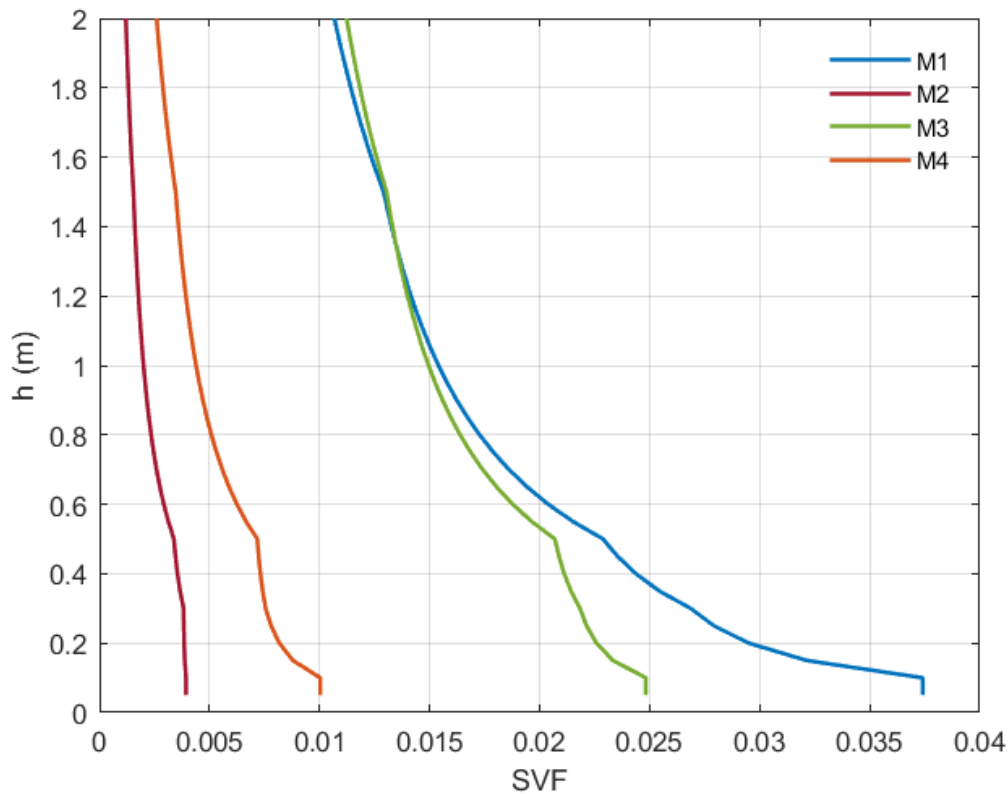


Figura 3. 6: Gráfico que muestra la evolución de la fracción de volumen sólido de los manglares de los muestreos de la campaña de medición de Costa Rica en función de diferentes niveles de agua (López-Arias et al. [2022])

Estas curvas muestran claramente que el SVF aumenta con la disminución de la altura del agua debido a la mayor porción de sólidos en comparación con el volumen de agua presente. Por ejemplo, en el caso de M1, para una profundidad de agua de 0,10 m, el SVF es 2,5 veces mayor en comparación con una profundidad de agua de 1 m.

El gradiente de densidad global también es claramente visible gracias al SVF, que disminuye de la zona 1 (M1) a la zona 3 (M4). Este gradiente es aún más marcado a poca profundidad. Cuando se analizan las curvas de las muestras M2 y M3, se observa claramente la heterogeneidad presente en la zona 2 de los manglares. En efecto, para una altura de agua de 0,10 m, el SVF de M3 es 2,5 veces mayor que el de M2. La gestión de esta heterogeneidad en el modelo numérico se detallará en la siguiente sección. Estas curvas se utilizarán para determinar el SVF de los muestreos necesarios para la modelización numérica de las diferentes mediciones.

3.2.1.3. Medidas de campo utilizados para la validación de la herramienta numérica

Las mediciones realizadas en la zona de estudio de la campaña de medición son las siguientes:

Tabla 3. 3: Presentación de las diferentes mediciones realizadas por López-Arias et al. [2022] en el Golfo de Nicoya en Costa Rica (datos del sensor 1)

Medida	Fecha	Profundida S1 (m)	H _{mo} (m)	T _p (s)
1	2022-02-21 16:20	1.34	0.18	2.56
2	2022-02-21 20:40	1.34	0.11	2.91
3	2022-02-22 21:20	1.38	0.16	3.20
4	2022-02-23 17:40	1.21	0.16	2.29
5	2022-02-23 18:00	1.42	0.18	2.67
6	2022-02-26 21:20	1.29	0.14	2.56
7	2022-03-03 17:40	1.69	0.18	3.05
8	2022-03-03 18:00	1.40	0.20	3.56
9	2022-03-04 02:00	1.37	0.19	3.20
10	2022-03-04 02:20	1.60	0.17	3.20
11	2022-03-04 02:40	1.81	0.16	3.05
12	2022-03-04 05:00	2.14	0.19	3.05
13	2022-03-04 05:20	1.99	0.20	2.78
14	2022-03-04 05:40	1.82	0.19	2.91
15	2022-03-04 06:00	1.59	0.19	2.67
16	2022-03-04 06:20	1.29	0.16	2.91
17	2022-03-04 14:20	1.37	0.22	3.20
18	2022-03-04 14:40	1.64	0.16	3.05
19	2022-03-04 18:20	1.77	0.21	3.20
20	2022-03-04 18:40	1.50	0.21	3.37
21	2022-03-05 19:20	1.53	0.22	2.91
22	2022-03-05 19:40	1.23	0.25	3.56

Los datos presentados son los del sensor 1, que se encuentra al principio de la zona de manglares. Los datos de este sensor se introducen en el modelo numérico en lugar del sensor 0 para evitar la alteración de los resultados en la zona de manglares por los errores causados por la zona sin manglares entre S0 y S1.

3.2.2. Construcción de archivos de entrada utilizados para validar la herramienta numérica con datos de campo

El archivo INPUT que reúne toda la información se encuentra en el [Anexo 2](#).

3.2.2.1. Supuestos para el archivo de entrada a validar asociado a la simulación de campo

En la construcción del modelo se pueden tener en cuenta varios supuestos:

- Modo estacionario
- Simulación 1D
- Sistema de coordenadas cartesianas
- Rejilla de cálculo uniforme y rectangular
- Disipación de la energía del whitecapping despreciada
- Disipación de energía por interacción no lineal ola-ola despreciada
- Disipación de energía por rotura de olas despreciada
- Disipación de energía por fricción de fondo que se tiene en cuenta en la fórmula del coeficiente de atenuación

3.2.2.2. Dominio de computación para el campo

El inicio del dominio computacional para representar el perfil de la campaña de medición se elige a partir del sensor 1. Sin embargo, el sensor 1 está situado 2,6 m antes del inicio de la zona de manglares. Además, el rango de validez de la fórmula del coeficiente de atenuación asociado al SVF no tiene en cuenta la ausencia de manglares. Así, debido a la proximidad del sensor 1 al inicio de la zona de manglares 1, se asume que el sensor 1 corresponde al inicio de la zona de manglares.

Siguiendo esta hipótesis, la distancia asociada a la superficie total cubierta por los manglares es de 65,7 m. Para poder comparar la salida del modelo con los datos del sensor 4 de la campaña de medición, se tiene en cuenta un dominio de 66 m de longitud en el archivo de entrada.

3.2.2.3. Mallado utilizado para el campo

También se realiza una simulación 1D. Así, sólo es necesario definir una resolución para el eje x.

La determinación del tamaño de la malla sólo se utiliza en el caso de la simulación con datos de laboratorio. Se determina una resolución mínima de 0,5 m. En el archivo de entrada se utiliza una resolución de 0,5 m.

3.2.2.4. Condiciones límite e iniciales

La condición límite del espectro se define como un espectro JONSWAP con un coeficiente de forma $\gamma=3,3$. Las condiciones de contorno del espectro se definen constantes a lo largo de este segmento. Este espectro está definido por la media de los parámetros de entrada del sensor 4: H_s , T_p y dirección. El espectro de la onda incidente proviene del oeste, es decir, 270° . La desviación estándar de esta dirección se elige de 10° .

3.2.2.5. Nivel de agua, batimetría y marea para el campo

En el caso de la simulación numérica de las mediciones de campo, la batimetría no es constante (**Figura 3.3**). Por lo tanto, puede haber fenómenos de asomeramiento por batimetría. La batimetría proporcionada respeta la referencia de nivel de bajamares de sicigias que corresponde a la bajamar media en mareas vivas.

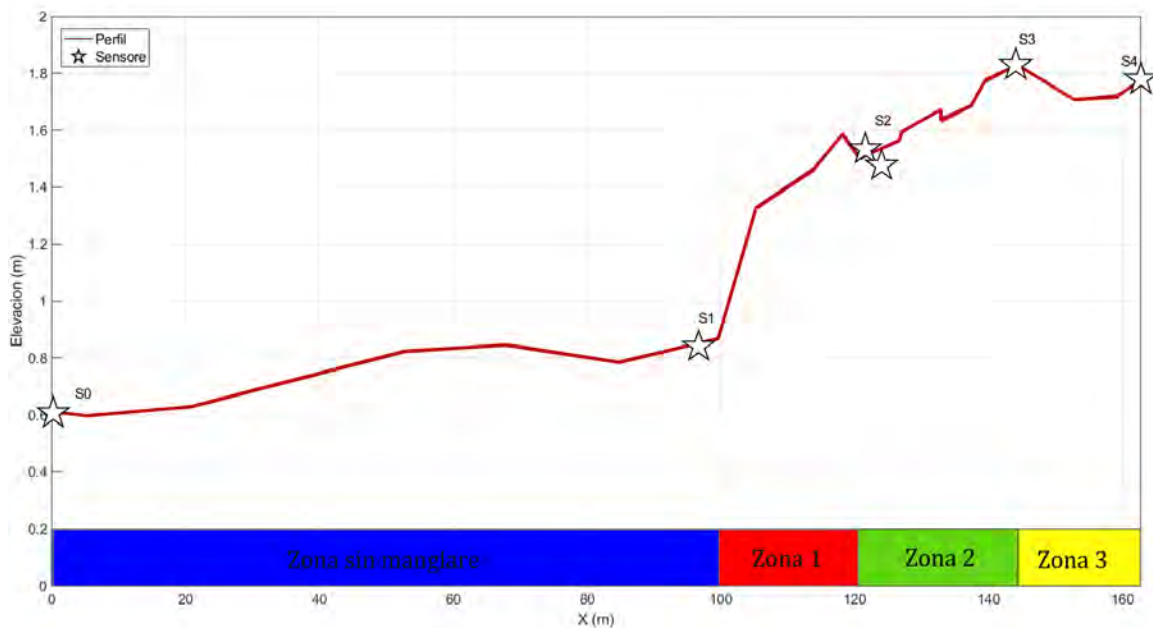


Figura 3. 7: Gráfico que muestra el perfil 1 de la campaña de medición de López-Arias et al. [2022] y la localización de los sensores en relación con las diferentes zonas delimitadas

Como los datos de las mediciones batimétricas son poco numerosos en comparación con el número de valores necesarios en el archivo batimétrico para introducirlos en el modelo, se realiza una interpolación lineal entre cada punto. Así, para respetar el dominio de cálculo y la malla, se introducen en el fichero 133 valores batimétricos. Para respetar numéricamente este nivel, toda la batimetría se pone en negativo.

El nivel de agua seleccionado se toma a lo largo del perfil. Corresponde a la suma de la elevación y de la profundidad del agua medida en el sensor 1. Así, los

parámetros de profundidad y nivel de agua que deben introducirse en el modelo para cada caso simulado se presentan en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3. 4: Tabla con los niveles de agua utilizados en la herramienta numérica de la atenuación de la altura de ola con el modelo SWAN en relación con la referencia de sicigias

Medida	Profundidad S1 (m)	Elevación S1 (m)	Nivel de agua (m)
1	1.34	0.847	2.19
2	1.34		2.19
3	.38		2.22
4	1.21		2.06
5	1.42		2.26
6	1.29		2.13
7	1.69		2.54
8	1.40		2.24
9	1.37		2.21
10	1.60		2.44
11	1.81		2.66
12	2.14		2.99
13	1.99		2.84
14	1.82		2.66
15	1.59		2.43
16	1.29		2.14
17	1.37		2.22
18	1.64		2.49
19	1.77		2.62
20	1.50		2.35
21	1.53		2.38
22	1.23		2.07

3.2.2.6. Coeficiente de fricción

Como primera aproximación, en este estudio, se supone que el coeficiente de fricción asociado al fondo marino del perfil es igual al calculado en el laboratorio de forma que se utiliza directamente la formulación para fricción por fondo y lados del canal con la disipación producida por los manglares de **Maza et al. [2019]**. Cabe señalar, que esta consideración puede dar lugar a mayores discrepancias entre los resultados de la campaña de medición y los que da el modelo.

3.2.2.7. El volumen sólido sumergido para el campo

Como se ha visto anteriormente, el bosque de manglares presente en el perfil de medición del Golfo de Nicoya, el SVF es variable según la zona. A partir de las curvas de SVF frente a la altura del agua de la campaña de medición, es posible calcular el SVF correspondiente a cada muestreo.

En primer lugar, los SVF seleccionados son relativos al nivel de agua inicial de cada zona. El SVF seleccionado para la zona 2 se elige como la media de los SVF calculados en los muestreos M2 y M3. Los SVF seleccionados para las validaciones numéricas de cada uno de los muestreos son los siguientes:

Tabla 3. 5: Fracción de volumen sólido de los manglares Rhizophora según las zonas delimitadas durante la campaña de medición de López-Arias et al. [2022]

Caso	SVF (M1)	SVF (M2)	SVF (M3)	SVF (M4)
1	0.0135	0.0029	0.0209	0.0067
2	0.0135	0.0029	0.0209	0.0062
3	0.0133	0.0027	0.0207	0.0062
4	0.0142	0.0034	0.0218	0.0072
5	0.0133	0.0026	0.0207	0.0059
6	0.0137	0.0031	0.0211	0.0072
7	0.0119	0.0021	0.0164	0.0045
8	0.0133	0.0026	0.0207	0.0059
9	0.0135	0.0029	0.0209	0.0062
10	0.0124	0.0022	0.0174	0.0051
11	0.0114	0.0019	0.0156	0.0043
12	0.0102	0.0016	0.0138	0.0037
13	0.0107	0.0017	0.0144	0.0039
14	0.0114	0.0019	0.0156	0.0043
15	0.0124	0.0022	0.0174	0.0051
16	0.0137	0.0031	0.0211	0.0072
17	0.0135	0.0027	0.0209	0.0062
18	0.0121	0.0022	0.0169	0.0047
19	0.0116	0.0019	0.0156	0.0044
20	0.0129	0.0023	0.0188	0.0053
21	0.0126	0.0023	0.0180	0.0053
22	0.0139	0.0034	0.0214	0.0072

Así, los valores de SVF en los muestreos se interpolan a cada zona correspondiente para los 22 casos. Por último, se crean 22 archivos de SVF variables con un tamaño de 133 para permitir la resolución por la malla creada.

3.2.2.8. Diagrama resumen del dominio numérico construido

Una vez realizado todo este trabajo previo, es posible representar el proceso de cálculo de forma esquemática. Este es el objetivo de la siguiente figura.

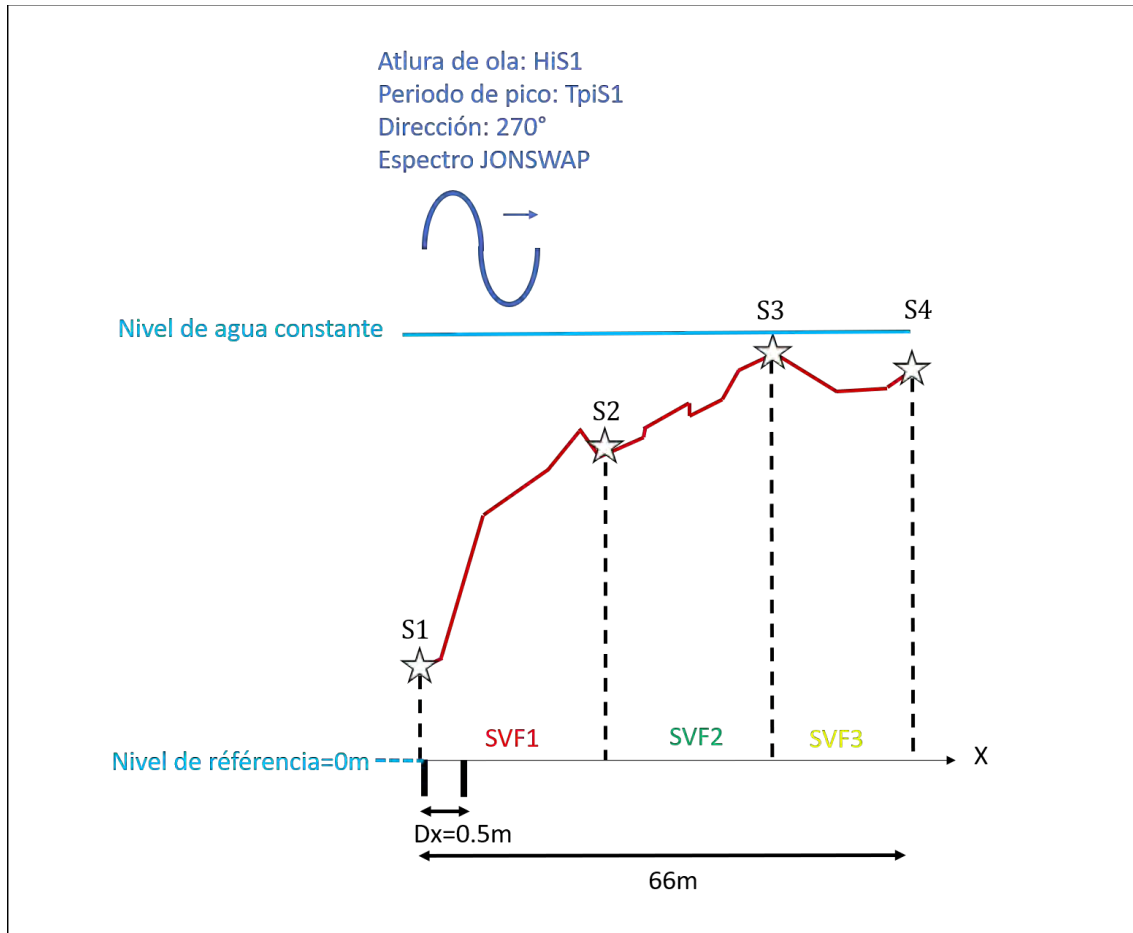


Figura 3. 8: Diagrama que muestra el dominio computacional de los experimentos realizados por López-Arias et al. [2022] (no a escala)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO CON DATOS DE LABORATORIO Y DE CAMPO

4. Resultados de la validación del modelo numérico con datos de laboratorio y de campo

La comparación con los datos de laboratorio permite saber si la herramienta numérica está bien implementada. La comparación con los datos de campo permite validar el modelo y saber si la herramienta numérica predice o no la atenuación de altura de ola producida por los manglares. El objetivo de este apartado es, por tanto, presentar los resultados obtenidos de las simulaciones de la herramienta numérica de atenuación del oleaje por los manglares con las fórmulas basadas en [Maza et al. \[2019\]](#).

4.1. Criterios de validación

Para realizar la validación de la herramienta numérica, se pueden utilizar varios indicadores. El objetivo es evaluar si el modelo genera predicciones relevantes para las alturas de las olas resultantes de la propagación de las olas a lo largo de los manglares. Estos indicadores cuantifican la diferencia entre los valores medidos y los simulados. En este estudio se calculan los siguientes indicadores:

- Sesgo
- Root Mean Square Error: RMSE
- Mean Square Error: MSE
- Exactitud del modelo: $\sigma\epsilon^2$
- Criterio de Nash-Sutcliffe: NS o Coeficiente de determinación R^2
- RMSE standard deviation ratio: RSR

Las fórmulas de cada indicador están disponibles en el [Anexo 3](#).

4.2. Resultados de la validación realizada con datos de laboratorio

4.2.1. Resultados

4.2.1.1. Comparación de los resultados del modelo con los datos de laboratorio para diferentes calados

Para poder representar los resultados de forma más sintética, se detallan los resultados del caso 4 ([Figura 4.1](#)). Los resultados obtenidos en los demás casos para cada nivel de agua están disponibles en el [Anexo 4](#). Las tendencias observadas para cada caso son globalmente las mismas que para el caso 4. El caso 4 tiene las siguientes características:

Tabla 4 1: Presentación de los parámetros iniciales del caso 4 utilizados en los experimentos de Maza et al [2019]

Caso	H _s (m)	T _p (s)	h (m)	SVF
4	0.03	2.64	0.17	0.0272
			0.33	0.0177
			0.50	0.0095

A partir de estas condiciones, se obtienen los siguientes resultados:

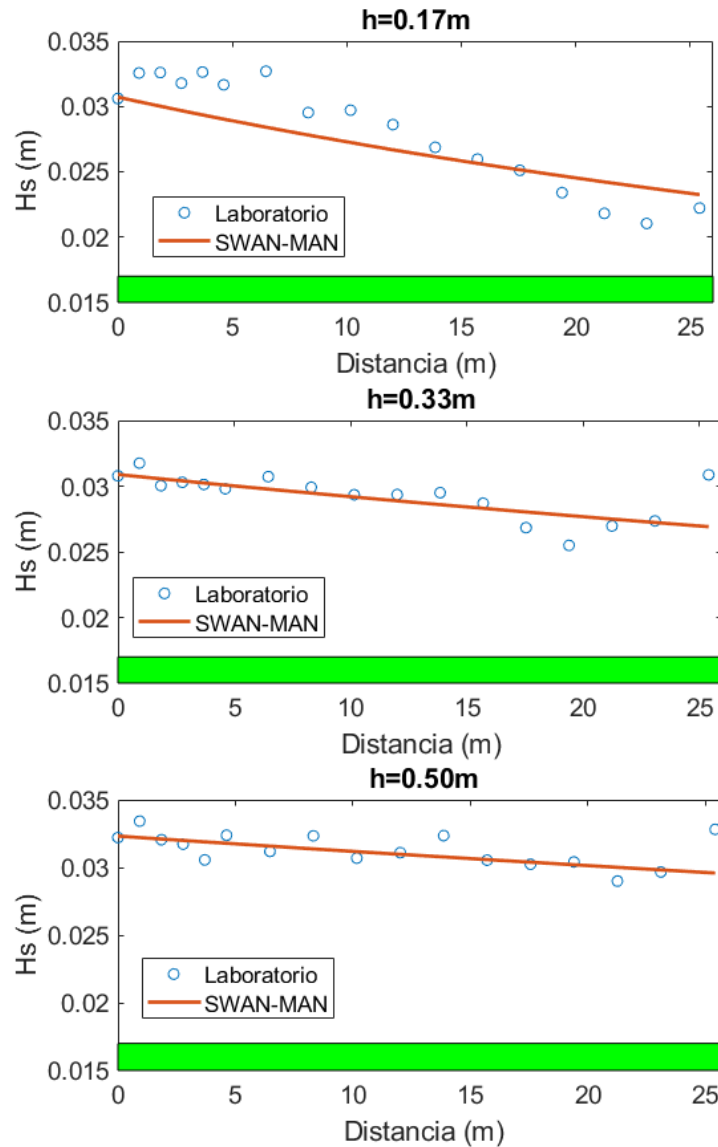


Figura 4. 1: Comparación de los resultados de la atenuación de la altura de ola del caso 4 a partir de datos de laboratorio de Maza et al [2019] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola para diferentes profundidades (verde: zona de manglares)

Al observar los resultados gráficamente, se ve que los resultados simulados permiten estimar la atenuación de altura de ola producida a lo largo del bosque de manglar. Al analizar los resultados para cada profundidad de agua en el caso 4, se puede observar que la atenuación de la altura de ola por parte de los manglares disminuye al aumentar la profundidad del agua en el caso simulado. Esto es

coherente con los resultados de laboratorio y con el hecho de que la fracción sólida es más alta para calados menores.

Para un análisis más detallado de los resultados, se calculan los indicadores mencionados anteriormente (*Anexo 5*). Los resultados para el caso 4 son los siguientes:

Tabla 4. 2: Resultados de los indicadores estadísticos que comparan los datos de laboratorio y los resultados obtenidos por la herramienta numérica SWAN para la atenuación de la altura de las olas por los manglares basado en el método de Maza et al [2019]

Caso	h (m)	Sesgo	RMSE	MSE	σ_{ϵ}^2	NS	R ²	RSR
4	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.71	0.54
	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.43	0.76
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.91

Una condición en la validación de un modelo es que la media de todas las desviaciones sea lo más cercana a cero posible, es decir, un modelo sin sesgo. El sesgo describe la fidelidad del modelo: si sobreestima o subestima sistemáticamente los valores medidos. Aquí, el sesgo es cero. Pero es importante tener en cuenta que un sesgo puede ser igual a cero mediante la compensación de errores, que es esencialmente el caso aquí. De hecho, por ejemplo, en el caso con una profundidad de 0,17m, el modelo parece subestimar las alturas de las olas al principio de la zona de manglares y parece sobrestimar la atenuación de las olas a partir de los 17 m. Esto se debe principalmente a la imposibilidad de reproducir los fenómenos no lineales de interacción del oleaje con la vegetación mediante la utilización de una formulación de coeficiente de atenuación de altura de ola, beta, el cual es constante a lo largo de todo el campo.

El sesgo presenta las desviaciones, pero no da información sobre la magnitud de las mismas. Esto es lo que hace el RMSE. Pero aquí, como este parámetro también es igual a cero, es complicado saber si una simulación sobrestima o subestima los datos del laboratorio más que otra. El MSE está en la misma línea que el RMSE, pero aún no está la elevación al cuadrado permite ampliar las diferencias más o menos significativas entre los datos medidos y los calculados. Las mismas conclusiones extraídas anteriormente por el RMSE pueden afirmarse. La exactitud del modelo confirma los análisis anteriores.

Analizando el parámetro de Nash-Sutcliffe (NS) o el coeficiente de determinación, se puede establecer una clara diferencia entre el modelo y los resultados de laboratorio. El parámetro de Nash-Sutcliffe se utiliza para estimar la capacidad de un modelo de reproducir el comportamiento observado. Tiene un rango entre menos el infinito y 1. Cuanto más se acerque a 1 el valor obtenido para este criterio, mejor será el ajuste del modelo a los valores observados. En general, se acepta que el criterio de Nash-Sutcliffe debe ser superior a 0,7 para poder afirmar que un modelo es satisfactorio, es decir, que el modelo y los valores observados son coherentes. Este valor también depende del ámbito en el que se trabaje y de la calidad de los modelos utilizados.

Aquí se puede ver que sólo el caso 4, con una profundidad de 0,17 m, podría cumplir este criterio en el límite inferior entre las 3 profundidades. El análisis de este criterio muestra que el modelo no es capaz de describir perfectamente lo que ocurre en el laboratorio. Esto se debe a que la fórmula del coeficiente de atenuación de Mendez y Losada (2004) presentada en la sección 1.2, no es capaz de reproducir los patrones no lineales o de reflexión que se producen en el campo de la vegetación. Siendo consciente de esta limitación, el modelo funciona de forma satisfactoria ya que se da una estimación precisa de la altura de ola al fin de la zona de manglares.

Otro parámetro calculado para evaluar la bondad del modelo es el RSR. Cuanto más se acerque a 0 el valor obtenido para este criterio, mejor se ajustará el modelo a los valores observados. Este criterio es más discriminatorio que el de Nash. Como antes, la dirección del oleaje es la mejor modelada porque la RSR es la más baja. Como los valores de RSR son cercanos a cero, se puede decir que el modelo hace una buena estimación de la atenuación del oleaje en comparación con los datos de laboratorio.

4.2.2.2. Comparación de los resultados del modelo con los datos de laboratorio para diferentes alturas de ola

Para un mismo nivel de agua y periodo de pico, se puede realizar la comparación de la atenuación de las alturas de ola simuladas y observadas:

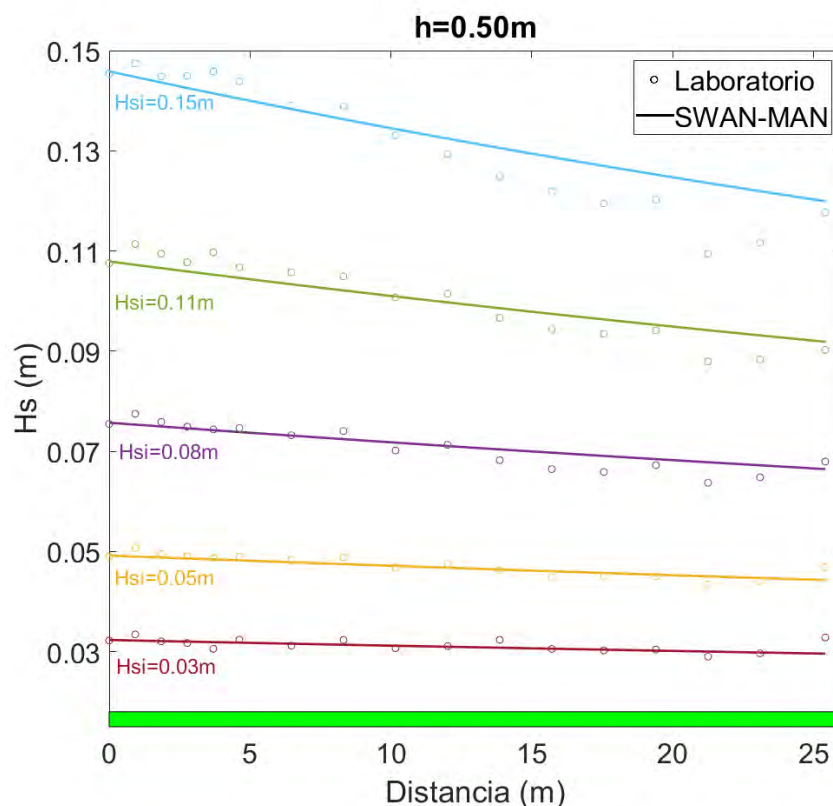


Figura 4. 2: Comparación de los resultados de la atenuación de la altura de ola de los casos con una profundidad de 0.50 m y un periodo de pico de 2.64s a partir de datos de laboratorio de Maza et al [2019] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola para diferentes alturas de ola significantes iniciales (verde: zona de manglares)

Para cada uno de los casos anteriores, se pueden calcular los siguientes indicadores:

Tabla 4. 3: Cálculos de diferentes indicadores de comparación del caso 4 entre los datos de laboratorio de Maza et al [2019] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola debido a los bosques de manglares

Caso	h (m)	Hsi (m)	Sesgo	RMSE	MSE	σ_{ϵ}^2	NS	RSR
4	0.50	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.91
8		0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.50
12		0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.45
16		0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.39
20		0.15	0.00	0.01	0.00	0.00	0.81	0.44

Analizando los cuatro primeros parámetros de la tabla anterior, se pueden extraer las mismas conclusiones en cuanto a la irrelevancia de estos resultados y, por tanto, el límite de estos parámetros en este caso. Sin embargo, al analizar el criterio de Nash, parece que sólo el caso 4, con una altura de ola menor, no está bien representado. Por otro lado, no se observa una tendencia de mejora en los resultados del modelo cuando las alturas de las olas aumentan a partir de 50 cm. Al analizar el RSR, los valores asociados a cada caso en el análisis se alejan del valor máximo de 0,2 para considerar que los resultados están bien representados. Como este parámetro es más restrictivo, estas afirmaciones pueden calificarse en función del objetivo que se persigue.

4.2.2.3. Comparación de los coeficientes de atenuación del modelo numérico con los de laboratorio

Con la fórmula del coeficiente de atenuación de Méndez y Losada [2004], es posible encontrar el coeficiente de atenuación mediante un ajuste con las alturas de ola de laboratorio. También se realiza un ajuste con las alturas de ola significativas emitidas por la herramienta numérica para poder determinar el valor del coeficiente de atenuación que no es una variable de salida directa. El objetivo es comparar los dos coeficientes. La fórmula de Méndez y Losada [2004] utilizada es la siguiente:

$$\frac{H_s}{H_{s,i}} = \frac{1}{1 + \beta X}$$

Como se ha visto anteriormente con la diferencia de alturas de ola simuladas y observadas en el laboratorio, se observa una diferencia entre los coeficientes de atenuación. Utilizando el ejemplo del caso 4, se obtienen los ajustes en la **Figura 4.3**. Los demás casos están disponibles en el **Anexo 6** para las tres alturas de agua probadas en las mediciones de laboratorio. Se observa que los coeficientes de atenuación para un nivel de agua de 0,17 m son aproximadamente los mismos. En

cambio, para un nivel de agua de 0,50 m, el coeficiente de atenuación se multiplica por 1,5 en comparación con el del laboratorio.

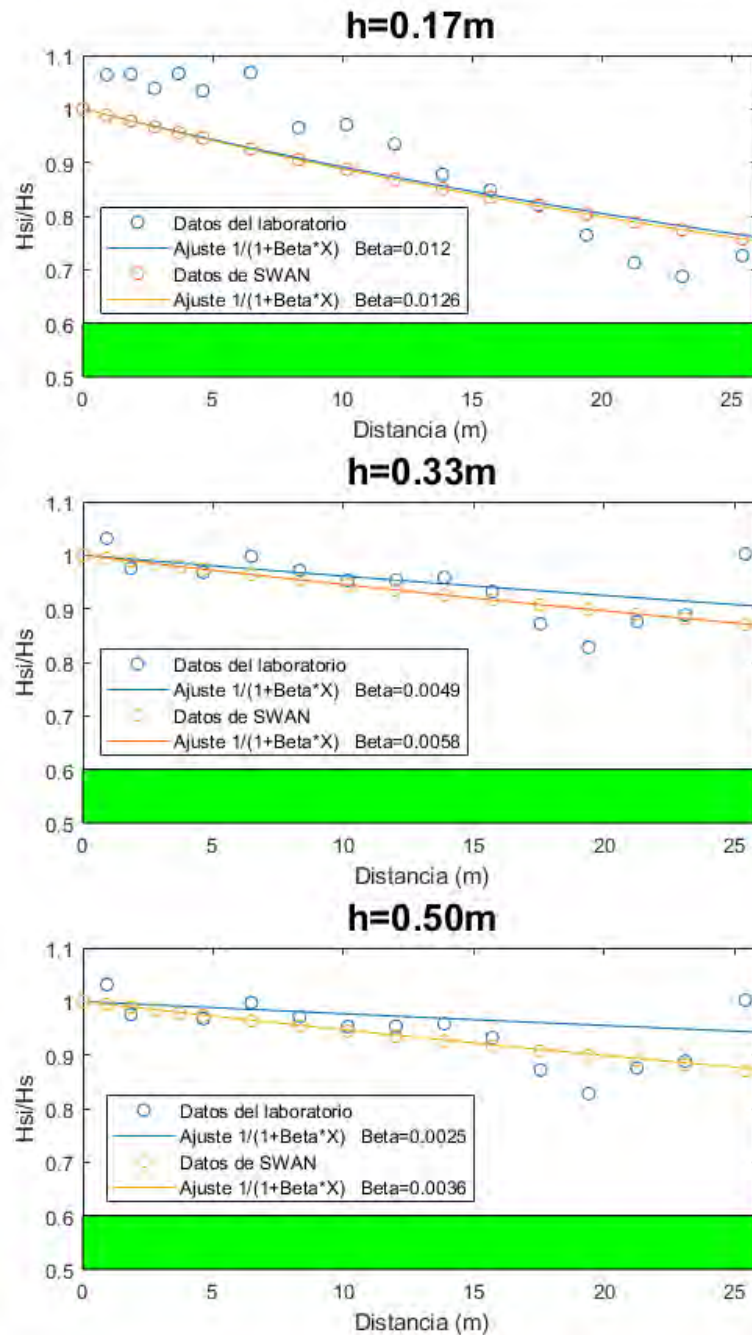


Figura 4. 3: Comparación de los β -fits (coeficiente de atenuación total) obtenidos con datos de laboratorio y por el modelo SWAN con el método de Maza et al. [2019] para el caso 4 de tres niveles de agua diferentes

Como se esperaba, el ajuste de los datos calculados por el modelo numérico es perfecto con la fórmula de Méndez y Losada [2004]. De hecho, en su aplicación, el coeficiente C_a se sustituye por el coeficiente β . Este coeficiente se utiliza para encontrar las alturas significativas de ola utilizando la fórmula de Losada Méndez y Losada [2004]. Por el contrario, en los todos gráficos, los coeficientes de atenuación ajustados con los datos de laboratorio son inferiores a los de los datos de salida de SWAN. Esto se debe al ajuste de los datos de laboratorio mediante la fórmula de β de Méndez y Losada [2004], que es peor que el ajuste de los datos de salida de SWAN.

Para tratar de establecer una tendencia en los coeficientes de atenuación en función de los niveles de agua es posible dibujar un gráfico de dispersión teniendo en cuenta los datos de laboratorio y los datos de las simulaciones numéricas. Los resultados se presentan en la siguiente figura:

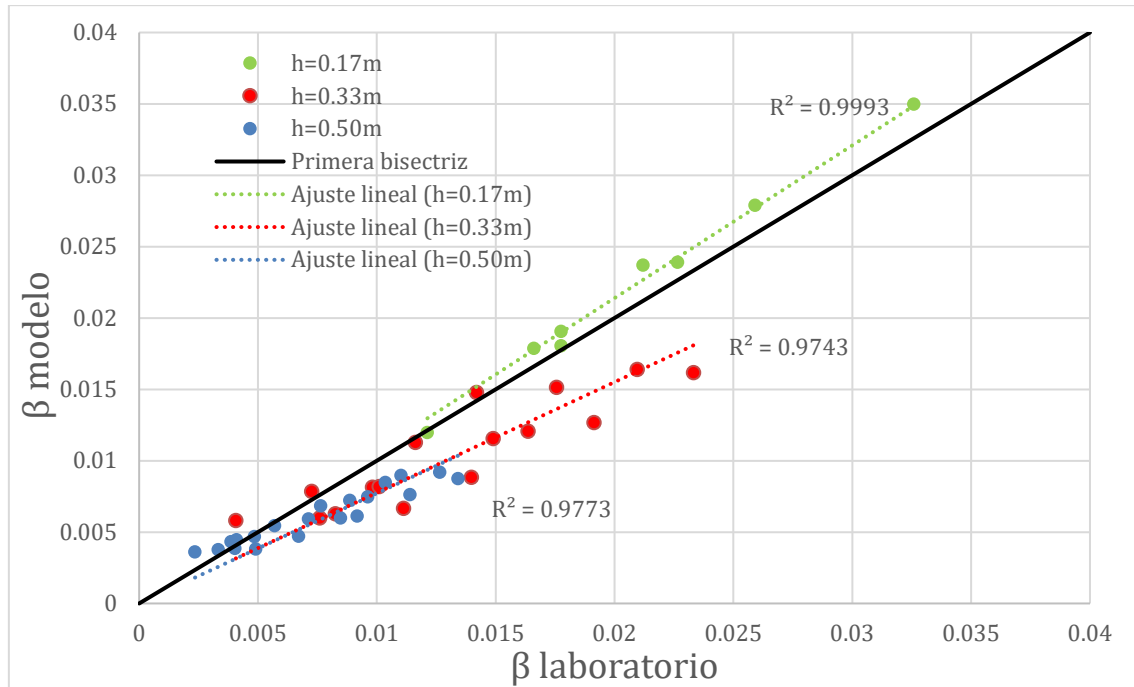


Figura 4. 4: Gráfico scatter-plot que muestra la diferencia entre los coeficientes de atenuación de los datos de laboratorio y los de los datos de SWAN-MAN

En general, el modelo parece sobrestimar el parámetro de atenuación de las olas para niveles de agua de 0,17 m. Por otra parte, aunque también es el caso de los coeficientes de atenuación pequeños para niveles de agua de 0,33 m y 0,50 m, estos valores parecen estar subestimados para los coeficientes de atenuación mayores.

4.3.2. Discusión

Parece que la fórmula del coeficiente de atenuación basada en Maza et al [2019] está bien implementada debido a que las tendencias de atenuación del oleaje están bastante bien representadas. Sin embargo, hay que hacer algunas matizaciones.

Es importante señalar que la fórmula utilizada en la aplicación en SWAN es una fórmula única. Sin embargo, el trabajo de Maza et al [2019] ha mostrado varias formulaciones en función de los tres niveles de agua utilizados para las pruebas. Por tanto, esta fórmula global no puede representar con exactitud todas las alturas del agua, pero puede dar una buena aproximación. Sin embargo, estos resultados son muy alentadores, ya que aunque no es capaz de reproducir los patrones no lineales o de reflexión que se producen en el campo de vegetación, da una buena aproximación de la altura de ola en el extremo del campo de manglares.

Además, al determinar las formulaciones precisas en el trabajo de Maza et al. [2019] algunos de los casos se desviaron de las fórmulas propuestas. Por lo tanto, esto puede contribuir a aumentar las diferencias entre lo observado y lo simulado.

Además, algunas hipótesis para la modelización son relativamente importantes, como la disipación de energía por la no interacción olas/olas, el whitecapping o la rotura de la ola. Por último, es difícil observar una tendencia clara en el tipo de ola y el nivel de agua mejor representados por la formulación. Hay que seguir investigando.

Una vez verificada la implementación de la fórmula del coeficiente de atenuación en función de la fracción sólida sumergida, se pueden estudiar su comportamiento a la hora de reproducir datos medidos en campo. Esto se presenta en la siguiente sección.

4.3. Resultados para la validación de la herramienta numérica con datos de campo

4.3.1. Resultados

Al analizar los resultados proporcionados por la herramienta numérica en comparación con los datos de campo, no es posible identificar una tendencia a representar mejor o peor los datos de campo según las condiciones hidrodinámicas como la profundidad, la altura de ola o el periodo de pico. A continuación, se exponen algunos ejemplos de resultados y los demás casos figuran en el [Anexo 7](#). Los indicadores calculados se detallan en el [Anexo 8](#).

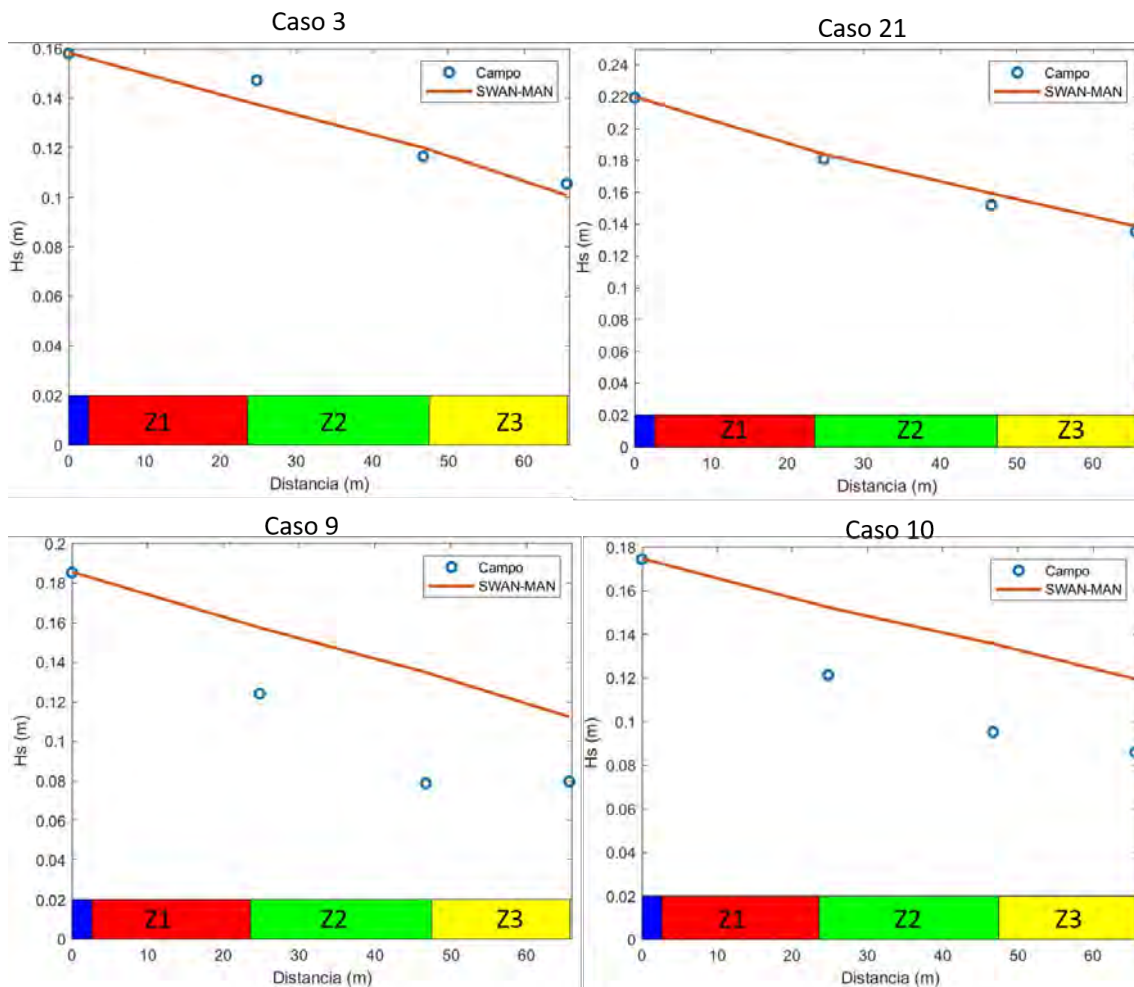


Figura 4. 5: Gráficos que representan los resultados de la atenuación de la altura ola con la herramienta numérica basada en el método de Maza et al. [2019] en relación con los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y las zonas Z1, Z2 y Z3 de manglares caracterizadas por diferentes SVF

La [Figura 4.5](#) muestra los resultados para cuatro de las simulaciones realizadas: dos en los que el acuerdo entre el modelo y los datos de campo es altamente satisfactorio (casos 3 y 21) y dos en los que el modelo no es capaz de atenuar la altura de ola lo suficiente (casos 9 y 10). Gracias a los indicadores, mostrados en la [Tabla 4.4](#), es posible cuantificar las diferencias observadas.

Tabla 4. 4: Cálculos de diferentes indicadores de comparación de los casos 3, 21, 9 y 10 entre los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y de la herramienta numérica de representación de la atenuación de la altura de ola debido a los bosques de manglares

Caso	Sesgo	RMSE	MSE	σ_{ϵ}^2	NS	RSR
3	0.00	0.01	0.00	0.00	0.93	0.26
21	0.00	0.01	0.00	0.00	0.95	0.23
9	-0.03	0.04	0.00	0.00	0.30	0.84
10	-0.03	0.03	0.00	0.00	0.21	0.89

El sesgo para los 2 primeros casos, casos 3 y 21, es igual a cero (al igual que para los parámetros asociados), lo que demuestra que los resultados simulados se acercan mucho a los resultados observados en el campo. Por otro lado, el sesgo negativo para los casos 9 y 10 implica una sobreestimación de las alturas de ola por parte del modelo, aspecto visible en la **Figura 4.5**.

Asimismo, el criterio de Nash es muy bueno para los casos 3 y 21. El RSR para estos dos casos se acerca al 0,2 recomendado. Además, el RSR muestra las mismas conclusiones que el criterio de Nash. En contra de lo esperado, los resultados del criterio de Nash y del RSR para los casos 3 y 21 son buenos. Aunque los resultados ofrecidos por los casos 9 y 10 (por ejemplo) no se presentan de forma precisa, hay que tener en cuenta el carácter muy alentador de este estudio. De hecho, el modelo tiene en cuenta un único parámetro, el SVF, y no requiere ningún ajuste. Tener resultados tan cercanos a lo observable en el campo con esta herramienta numérica sabiendo que las incertidumbres de las mediciones son importantes y complejas es muy positivo.

4.3.2. Discusión

Ahora, es difícil concluir que la herramienta numérica utilizada para la atenuación del oleaje por los bosques de manglar basada en el método de **Maza et al. [2019]** sea una herramienta numérica para predecir el servicio de protección costera proporcionado por los bosques de manglar. En efecto, los resultados obtenidos según las condiciones hidrodinámicas introducidas son desiguales en términos de precisión. Sin embargo, los resultados obtenidos son muy positivos y son, para algunos de los casos probados, muy precisos. Esto es muy alentador para seguir investigando.

Además, los supuestos que se tienen en cuenta son mucho más importantes que los que se toman para las simulaciones de los casos de laboratorio. Esto se debe a que las condiciones de laboratorio son controlables, mientras que las condiciones de campo son muy variables.

No se tienen en cuenta los parámetros de reflexión y de interacción onda/onda inducidos por los manglares. Por lo tanto, esto puede ser una fuente adicional de error.

La inclusión del SVF también es una fuente de errores. De hecho, este parámetro y las zonas delimitadas son parámetros definidos en campo de acuerdo con la inspección visual. Por otro lado, el carácter heterogéneo de la zona 2 es difícil de caracterizar. Para mejorar los resultados de esta zona se podría considerar una media ponderada en lugar de una media simple.

Entre esta suposición, está la presencia de que el coeficiente de fricción por fondo se toma igual al del laboratorio que tiene en cuenta los lados y el fondo del canal. Sin embargo, es muy probable que este coeficiente sea mayor en la realidad que en el laboratorio debido a la rugosidad de fondo inducida por un sustrato más rugoso, en lugar de por la madera lisa utilizada en los ensayos. De acuerdo a esto, en futuros trabajos un aspecto a analizar sería probar la siguiente fórmula que sólo tiene en cuenta el coeficiente de atenuación por los manglares:

$$\beta_M = 2,8308 * \frac{H_{rms,i}}{h} * SVF$$

Así, la fricción del fondo podría tratarse por separado utilizando el módulo SWAN previsto para ello.

Correlativamente, se podría conseguir una mejora de los resultados incluyendo la disipación de energía por la no interacción olas/olas, el whitecapping o la rotura de la ola. En efecto, estas disipaciones de fondo están muy presentes en el medio natural, por lo que sería pertinente tenerlas en cuenta.

El nivel de agua constante a lo largo del perfil, así como la posición del sensor 1, que se consideró como punto de partida de la zona de manglares, también pueden ser una fuente de error.

Además, las formulaciones encontradas en el laboratorio pueden no ser aplicables a la zona de la campaña de medición. En efecto, las alturas de agua utilizadas para construir la fórmula del coeficiente de atenuación no siempre se adaptaron bien a los casos de laboratorio y fueron menores que las presentes en el campo. Sin embargo, cabe resaltar, que los resultados obtenidos remarcan el gran potencial del modelo como herramienta de predicción debido a los buenos resultados obtenidos pese a las consideraciones mencionadas y que deberían de analizarse en mayor detalle para buscar una mejor aproximación.

Con todos estos cambios, sería probable observar fuertes cambios en los resultados. Los resultados que son "mejores" con el modelo actual podrían convertirse en "peores" y viceversa.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

5. Conclusión

Al final de este estudio, se puede concluir que el modelo da resultados muy satisfactorios en cuanto a las tendencias de atenuación del oleaje observadas tanto en laboratorio como en campo. Esto es tanto más alentador cuanto que el único parámetro utilizado para evaluar la atenuación del oleaje por los manglares es el SVF. Sin embargo, es necesario un análisis más detallado para mejorar los resultados obtenidos.

De hecho, una de las principales limitaciones de este modelo es que la concordancia entre los resultados numéricos y de laboratorio no es exacta. Esto también afecta a los resultados de la simulación con datos de campo. Por lo tanto, no es posible afirmar que esta herramienta numérica, en su estado actual, sea una herramienta numérica para predecir el servicio de protección costera proporcionado por bosques de manglar de forma exacta, pero los resultados obtenidos son muy prometedores y ponen en evidencia el gran potencial de la nueva herramienta que no depende de ningún coeficiente de calibración.

Una de las motivaciones más importantes de este estudio es la dificultad para encontrar formulaciones sencillas de laboratorio que reproduzcan la atenuación de las olas por parte de los manglares en todas las condiciones hidrodinámicas y utilizarlas en una herramienta sencilla que sirva como herramienta de predicción. Por lo tanto, el estudio representa un avance importante en la obtención de ese tipo de herramientas. Sin embargo, este trabajo también ha puesto de manifiesto algunas de las limitaciones asociadas a las hipótesis de partida, las cuales deberían de tratarse en estudios posteriores. Además del problema de las hipótesis de partida, muchos parámetros no son controlables y son muy variables en el campo. En efecto, aunque el estudio se basa en la atenuación de las olas por los manglares, éste no es el único parámetro que puede inducir esta atenuación. Las olas pueden verse afectadas, por ejemplo, por factores externos como el paso de un barco o fondos irregulares que pueden cambiar la dirección y la dinámica de las olas, los cuales introducen incertidumbre en las mediciones de campo.

Por lo tanto, los resultados obtenidos destacan el potencial de la herramienta estudiada en la predicción de la evolución de la altura de ola a lo largo de bosques de manglares y se detallan aquellos aspectos a tener en cuenta en estudios futuros para mejorar la herramienta presentada en este trabajo.

ANEXOS

Anexos

Anexo 1: Fichero de entrada del caso 4 para un nivel de agua de 0,17 m para la validación de la implementación de la fórmula basada en Maza et al. [2019] de la herramienta numérica SWAN con los datos de laboratorio: atenuación de la altura de ola a lo largo del manglar

```

$*****HEADING*****
$
PROJ 'Caso4_h_0_17' 'mve'
$
$ Validation of the numerical model SWAN - Manglares
$
$ case 4: depth=0.17m SVF=0.0272 (height = 0.17 m, Hs=0.031 m, Tp=2.64s)
$
$*****INPUT*****
$
SET level=0 NAUTICAL
MODE STAT ONED
COORDINATES CARTESIAN

$COMPUTATIONAL GRID
CGRID REG 0 0 0 26 0 260 0 CIRCLE 360 0.03558410 1 50
$
INPGRID BOTTOM REGULAR 0 0 0 260 0 0.1 0 EXC -99.0
READINP BOTTOM 1 'bottom_h_0_17_m.txt' 1 0 FREE
$
INPGRID SVF REGULAR 0 0 0 260 0 0.1 0 EXC -99.0
READINP SVF 1 'facteur_SVF.txt' 1 0 FREE
$
BOUN SHAPE JONSWAP 3.3 PEAK DSPR DEGREES
BOUN SIDE W CON PAR 0.031 2.64 270 1
$
OFF QUAD
OFF BREAK
OFF WCAP
$
VEGE MAZ MAN height=0.17 SVF=0.0272 A=3.65 B=0.0026 X=0 Y=0
$
POINTS 'points' FILE 'point.txt'
TABLE 'points' HEAD 'Caso4_h_0_17.tbl' DIST DEP HS RTP TM01 TM02 FSPR DIR FORCE XP YP
$
TEST 1,0
COMPUTE
STOP
$

```

Anexo 2: Fichero de entrada del caso 4 para un nivel de agua de 0,17 m para la validación de la implementación de la fórmula basada en Maza et al. [2019] de la herramienta numérica SWAN con los datos de laboratorio: atenuación de la altura de ola a lo largo del manglar

```

$*****HEADING*****
$
PROJ 'Casol_campo' 'mve'
$
$ validación de la herramienta numérica SWAN con datos de campo
$ - Atenuación de la altura de las olas por los bosques de manglares -
$
$ caso 1: profundidad=1.34m SVF=variable (nivel de agua=2.19 m, Hs=0.18 m, Tp=2.56)
$
$*****INPUT*****
$
SET level=2.19 maxerr=10 NAUTICAL
MODE STAT ONED
COORDINATES 'CARTESIAN'

$COMPUTATIONAL GRID
CGRID REG 0 0 0 66 0 132 0 CIRCLE 360 0.03558410 1 50
$
INPGRID BOTTOM REGULAR 0 0 0 132 0 0.5 0 EXC -99.0
READINP BOTTOM -1 'Bottom_ID_zona_reducida.txt' 1 0 FREE
$
INPGRID SVF REGULAR 0 0 0 132 0 0.5 0 EXC -99.0
READINP SVF 1 'SVF_ID_zona_reducida_casol.txt' 1 0 FREE
$
BOUN SHAPE JONSWAP 3.3 PEAK DSPR DEGREES
BOUN SIDE W CON PAR 0.18 2.56 270 1
$
OFF QUAD
OFF BREAK
OFF WCAP
$
VEGE MAZ MAN height=2.19 SVF=1 A=3.65 B=0.0026 X=0 Y=0
$
POINTS 'points' FILE 'point.txt'
TABLE 'points' HEAD 'Casol_campo_ID_zona_reducida.tbl' DIST DEP HS RTP TM01 TM02 FSPR DIR FORCE XP YP DISVeg
$
TEST 1,0
COMPUTE
STOP
$

```

Anexo 3: Fórmulas de los indicadores utilizados para validar la herramienta numérica de predicción de la atenuación del oleaje por los bosques de manglares *Rhizophora mangle*

- **Sesgo:**

$$Sesgo = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{medida\ k} - X_{simulada\ k})$$

- **Root Mean Square Error: RMSE**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{medida\ k} - X_{simulada\ k})^2}$$

- **Mean Square Error: MSE**

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{medida\ k} - X_{simulada\ k})^2$$

- **Exactitud del modelo: $\sigma \epsilon^2$**

$$\sigma \epsilon^2 = RMSE^2 - Sesgo^2$$

- **Criterio de Nash-Sutcliffe: NS o Coeficiente de determinación R^2**

$$NS = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (X_{medida\ k} - X_{simulada\ k})^2}{\sum_{k=1}^n (X_{medida\ k} - \bar{X}_{medida})^2}$$

- **RMSE standard deviation ratio: RSR**

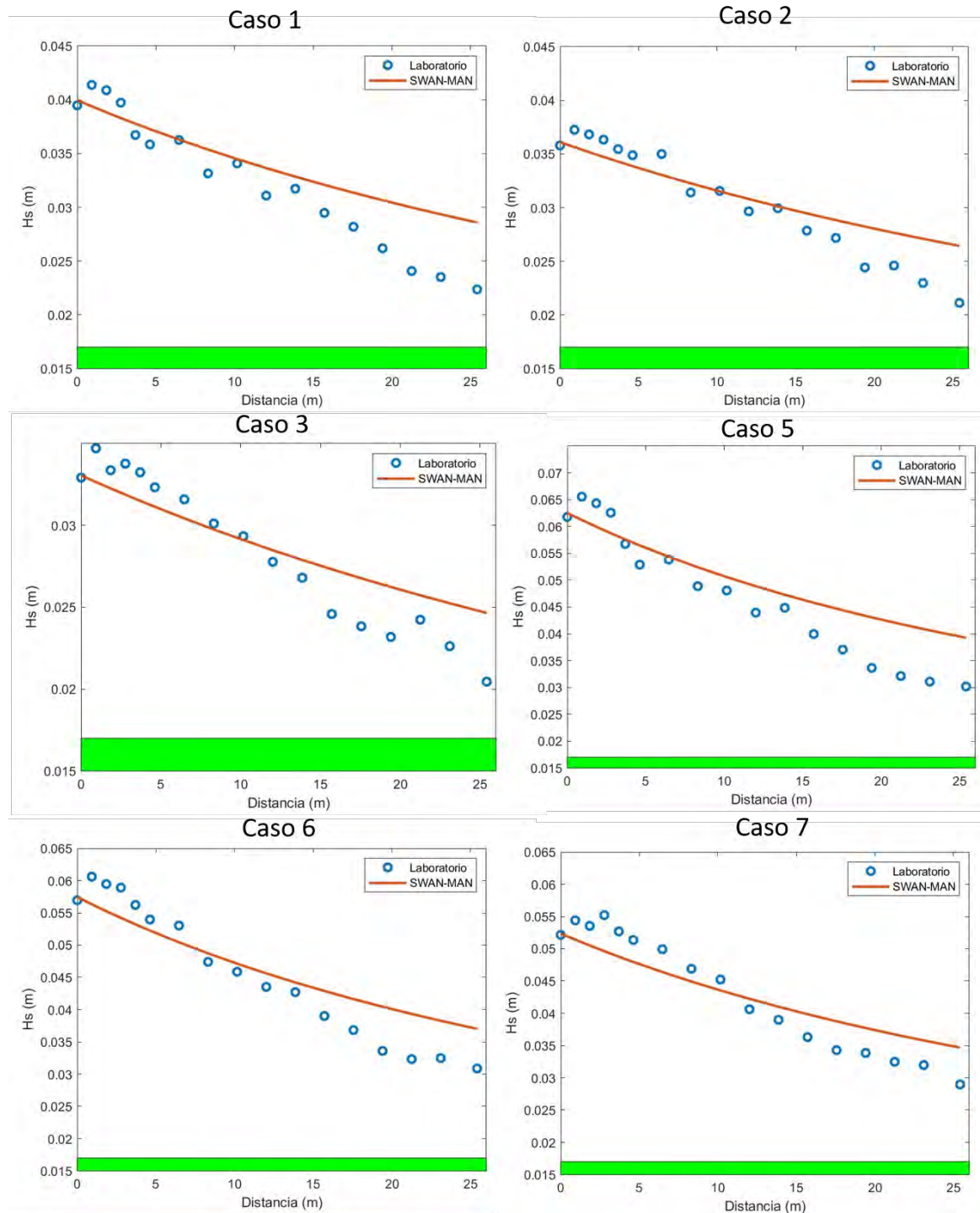
$$RSR = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (X_{medida\ k} - X_{simulada\ k})^2}{\sum_{k=1}^n (X_{medida\ k} - \bar{X}_{medida})^2}}$$

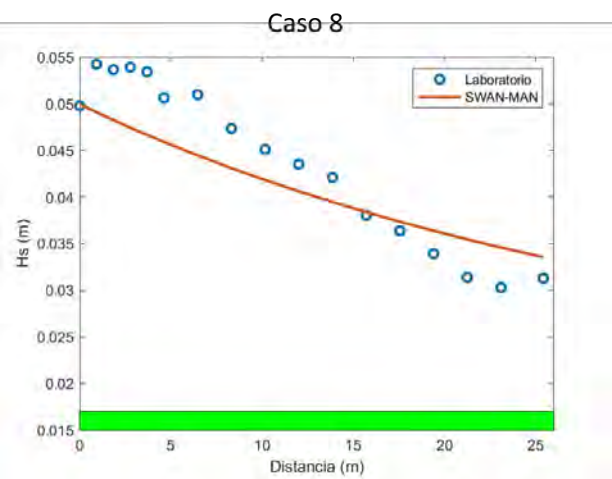
Con:

- k: índice de la variable de interés
- n: número de datos de medida
- X_{medida} : variable medida (aquí H_s)
- $X_{simulada}$: variable simulada con la herramienta numérica (aquí H_s)
- $\bar{X}_{medida}$: media de la variable medida

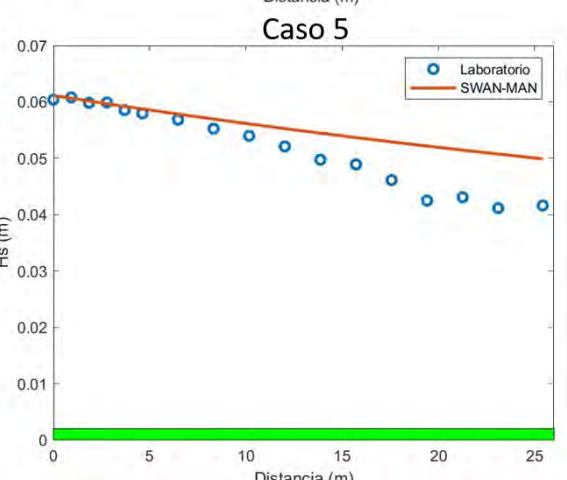
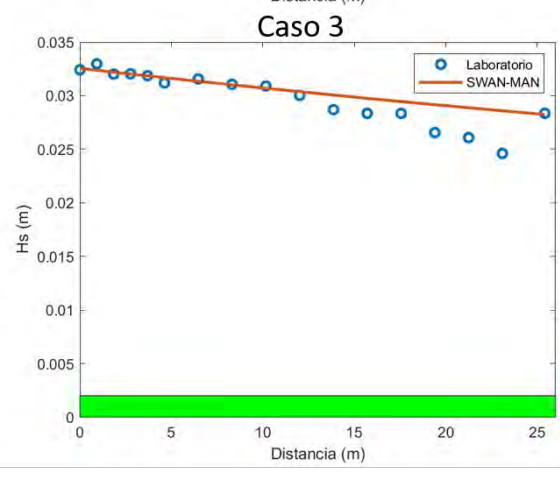
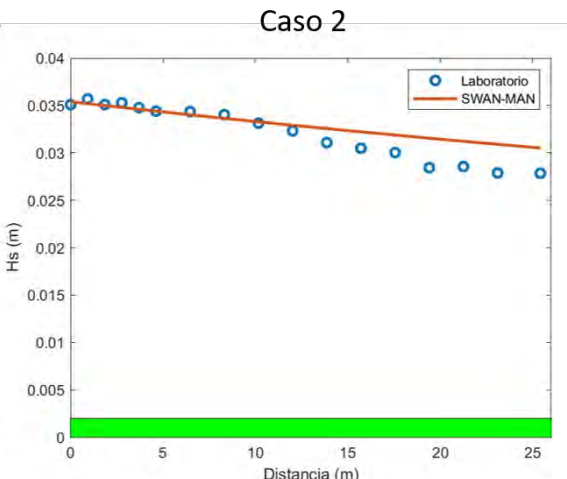
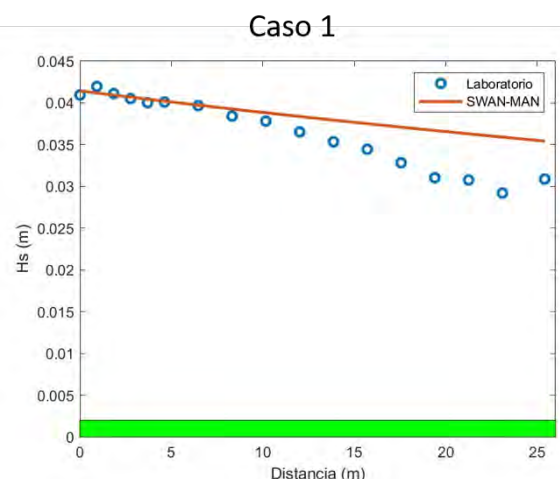
Anexo 4: Gráficos que representan los resultados de la atenuación de la altura ola con la herramienta numérica basada en el método de Maza et al. [2019] en relación con los datos de laboratorio

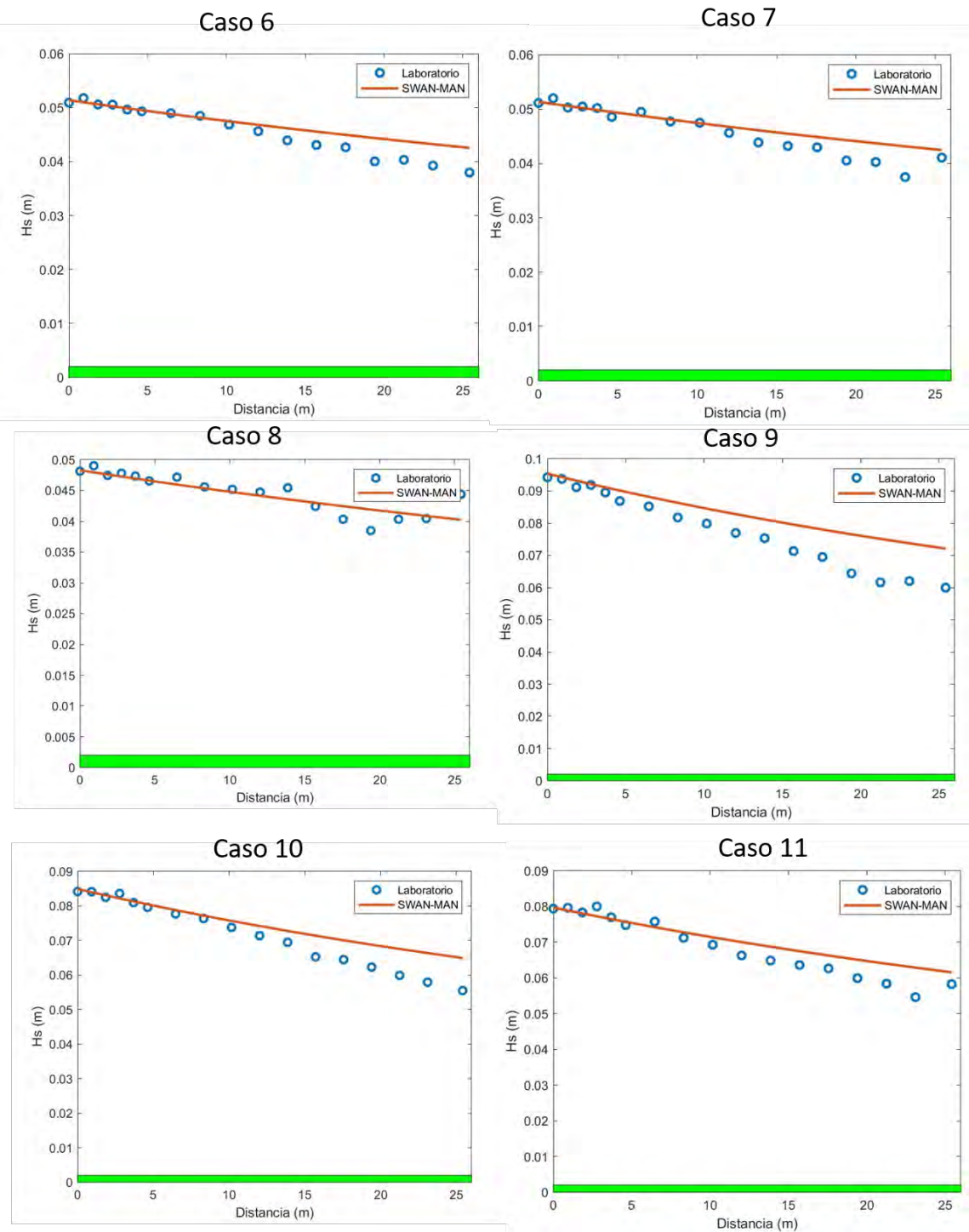
$h=0,17m$

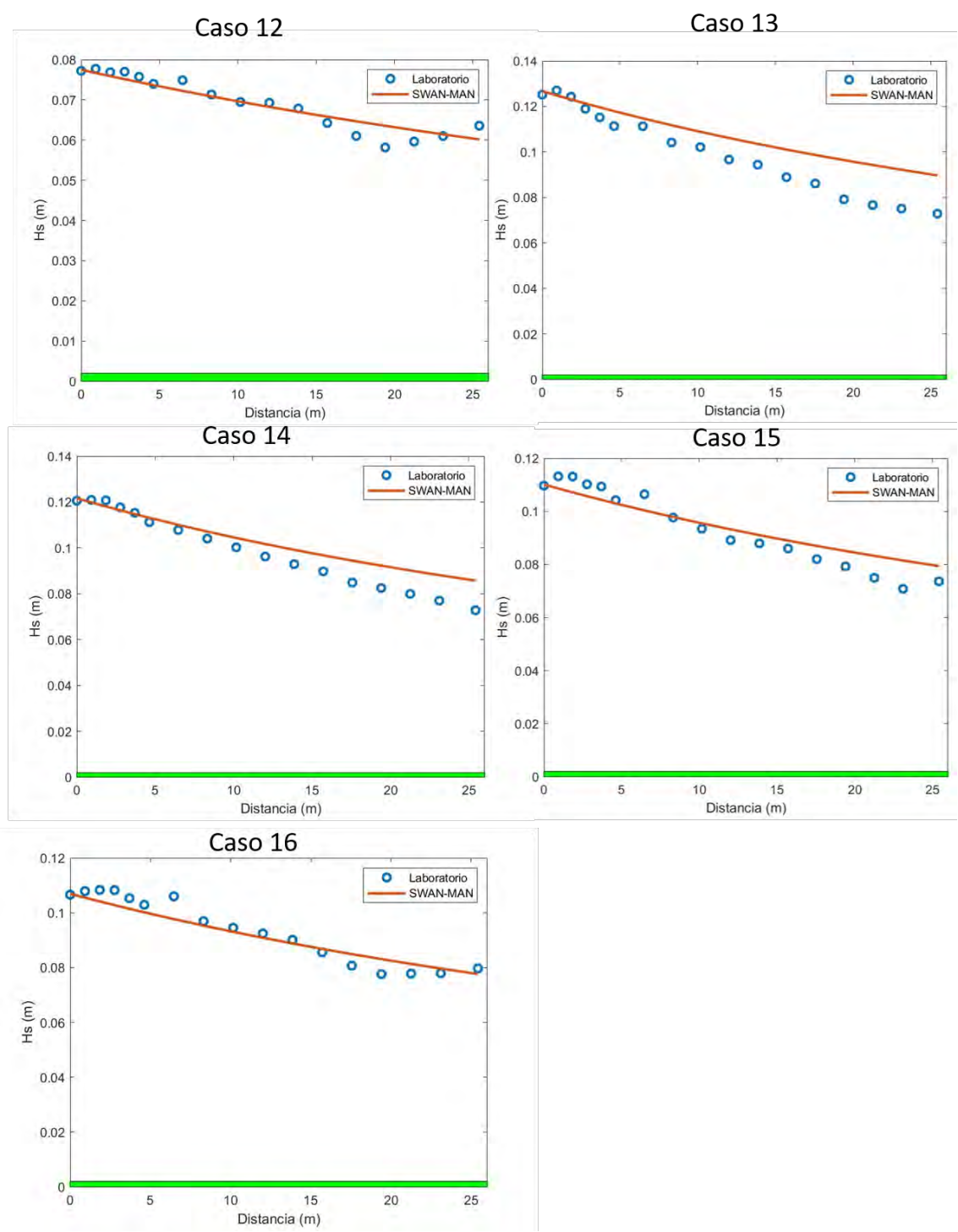




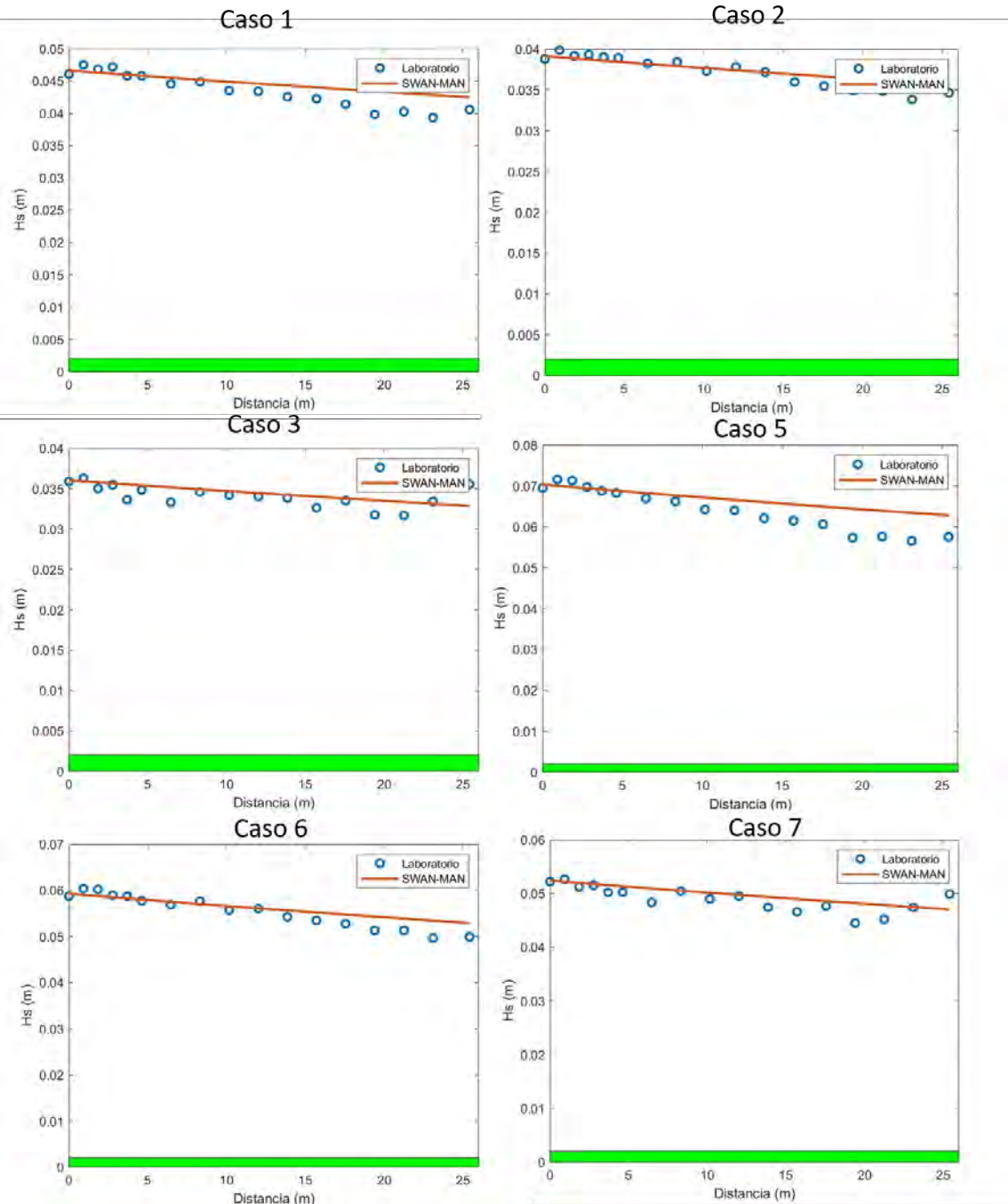
$h=0,33\text{m}$

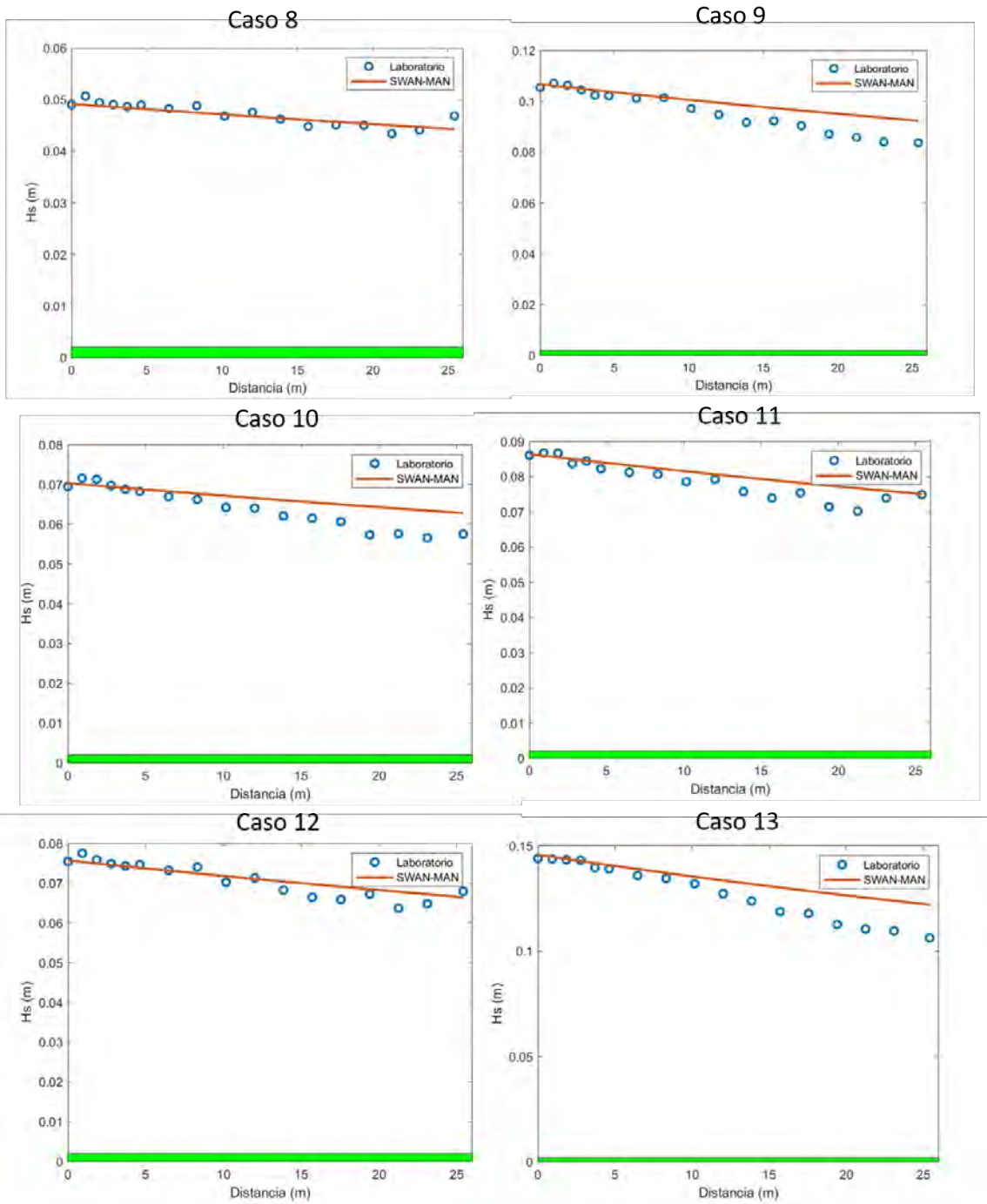




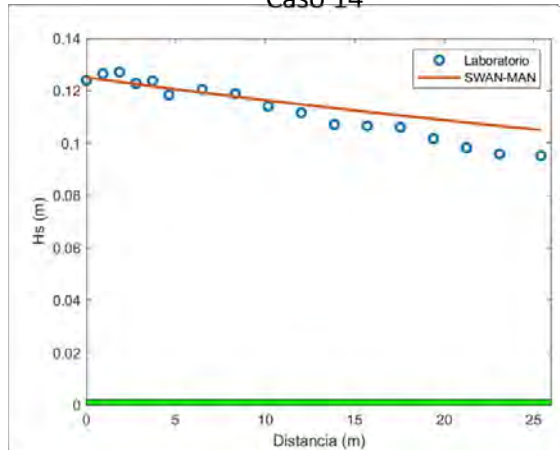


h=0,50m

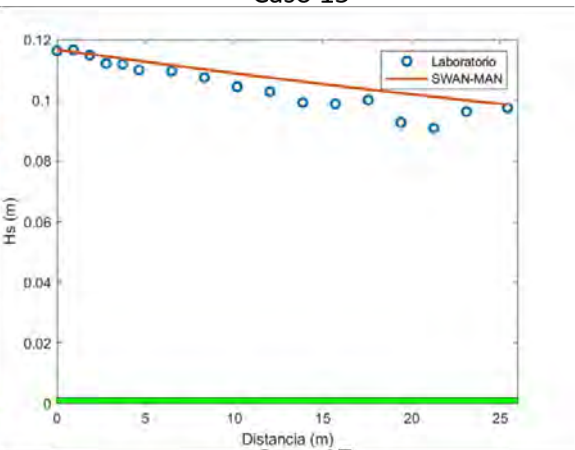




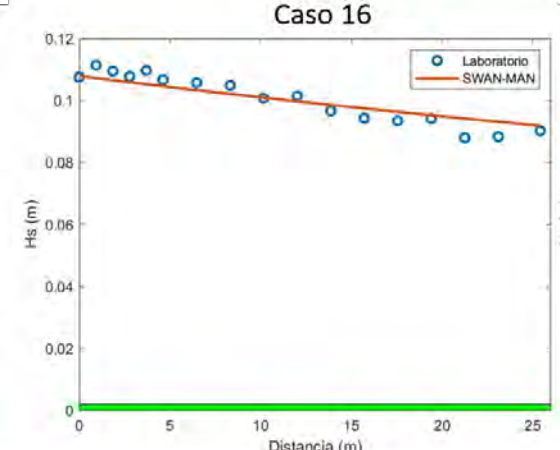
Caso 14



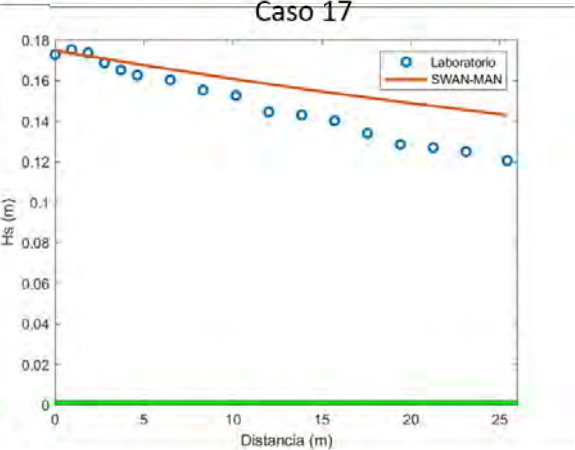
Caso 15



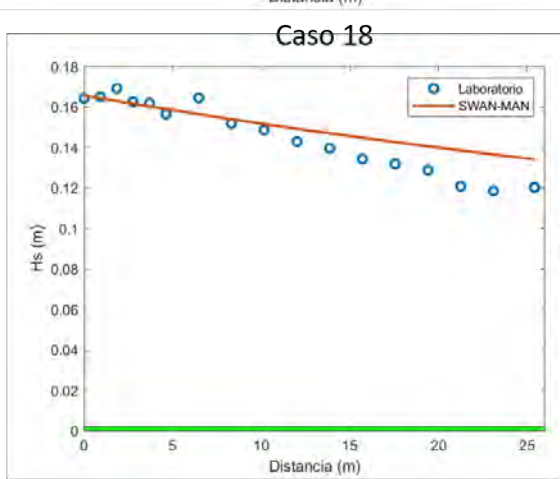
Caso 16



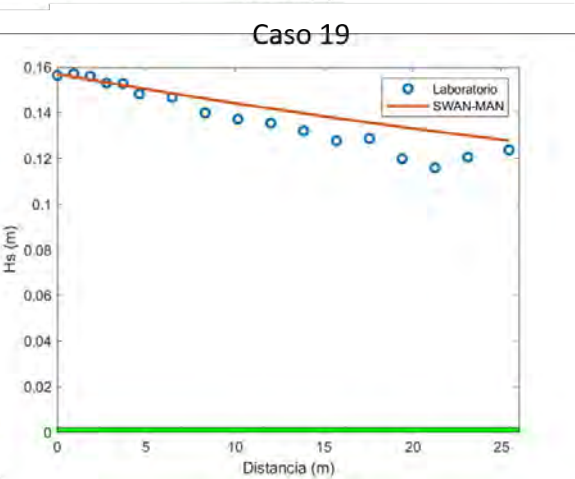
Caso 17



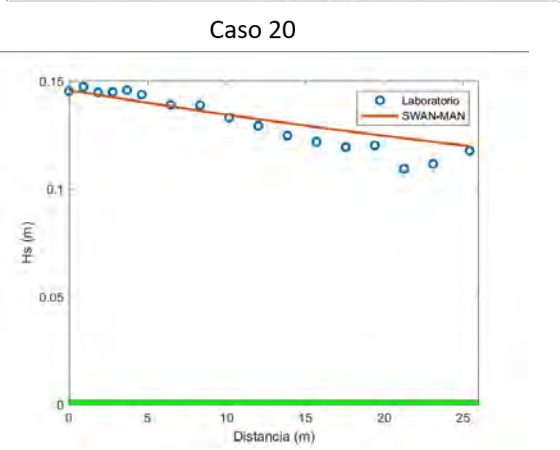
Caso 18



Caso 19



Caso 20



Anexo 5: Cálculo de indicadores para la comparación de la atenuación de las alturas de los datos de laboratorio de Maza et al. [2019] y los datos del modelo numérico basada en el método de Maza et al. [2019]

h=0.17m						
Sesgo	RMSE	MSE	σ_ε^2	NS	R²	RSR
0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.72	0.53
0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.80	0.45
0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.80	0.45
0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.71	0.54
0.00	0.01	0.00	0.00	0.76	0.76	0.48
0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	0.84	0.40
0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	0.84	0.40
0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.76	0.49

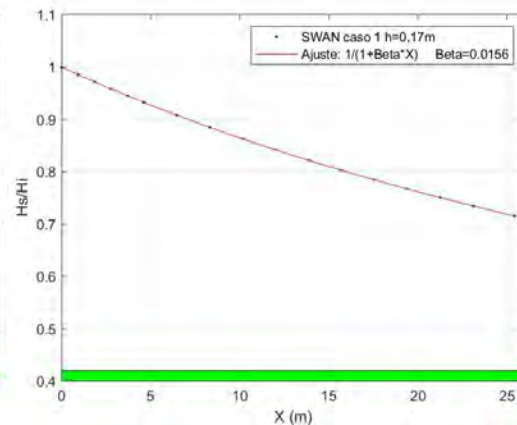
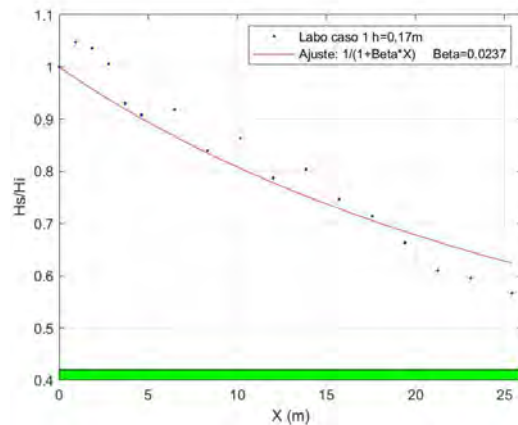
h=0.33m						
Sesgo	RMSE	MSE	σ_ε^2	NS	R²	RSR
0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.43	0.76
0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.68	0.57
0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.63	0.61
0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.43	0.76
0.00	0.01	0.00	0.00	0.48	0.48	0.72
0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.75	0.50
0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.76	0.49
0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.75	0.50
0.01	0.01	0.00	0.00	0.61	0.61	0.62
0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.77	0.48
0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.82	0.42
0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.89	0.33
- 0.01	0.01	0.00	0.00	0.66	0.66	0.58
0.00	0.01	0.00	0.00	0.83	0.83	0.41
0.00	0.01	0.00	0.00	0.87	0.87	0.36
0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	0.91	0.31

h=0.50m						
Sesgo	RMSE	MSE	σ_ε^2	NS	R²	RSR
0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.53	0.69
0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.77	0.48
0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.16	0.91
0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.91
0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.44	0.75
0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.74	0.51
0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.42	0.76
0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.75	0.50
0.00	0.01	0.00	0.00	0.57	0.57	0.66
0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.71	0.54
0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.66	0.58
0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.80	0.45
0.01	0.01	0.00	0.00	0.56	0.56	0.66
0.00	0.01	0.00	0.00	0.74	0.74	0.51
0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.65	0.59
0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.85	0.39
-0.01	0.01	0.00	0.00	0.48	0.48	0.72
- 0.01	0.01	0.00	0.00	0.71	0.71	0.53
- 0.01	0.01	0.00	0.00	0.72	0.72	0.53
0.00	0.01	0.00	0.00	0.81	0.81	0.44

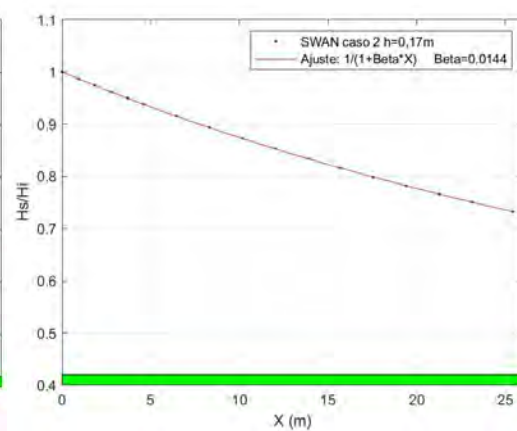
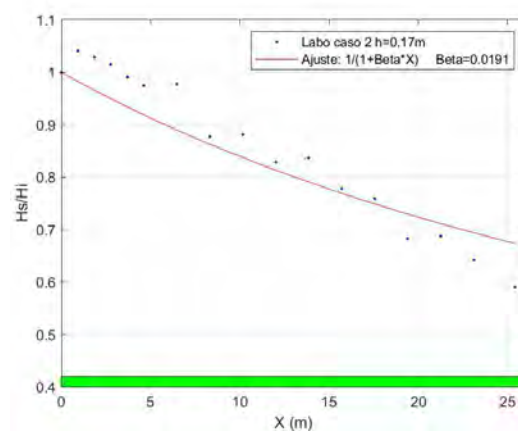
Anexo 6: Gráficos que representan los resultados del ajuste del coeficiente de atenuación con la fórmula de Mendez and Losada [2004] para los datos de laboratorio de Maza et al. [2019] y los datos del modelo numérico basada en el método de Maza et al. [2019]

$h=0,17\text{m}$

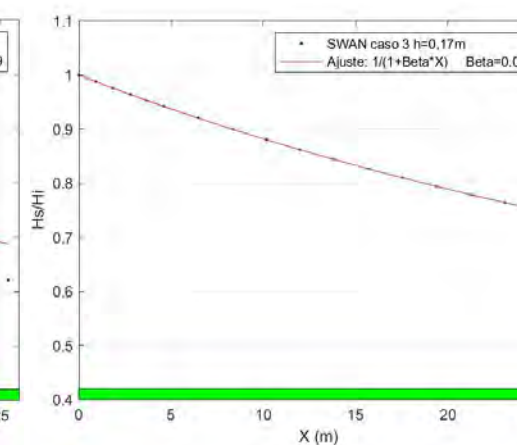
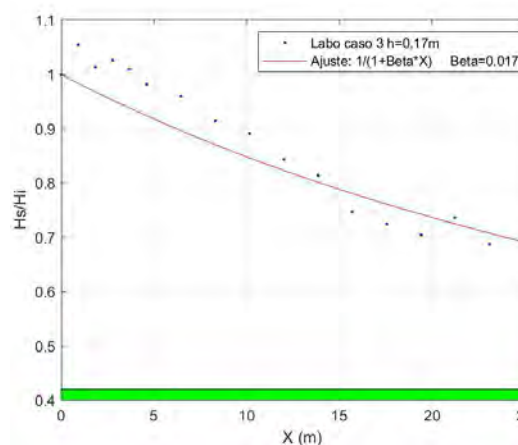
caso 1



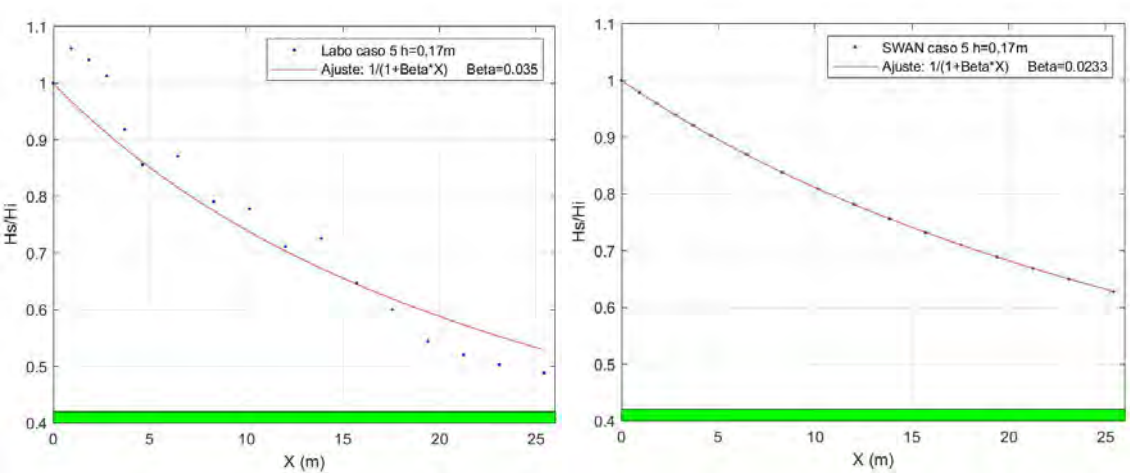
caso 2



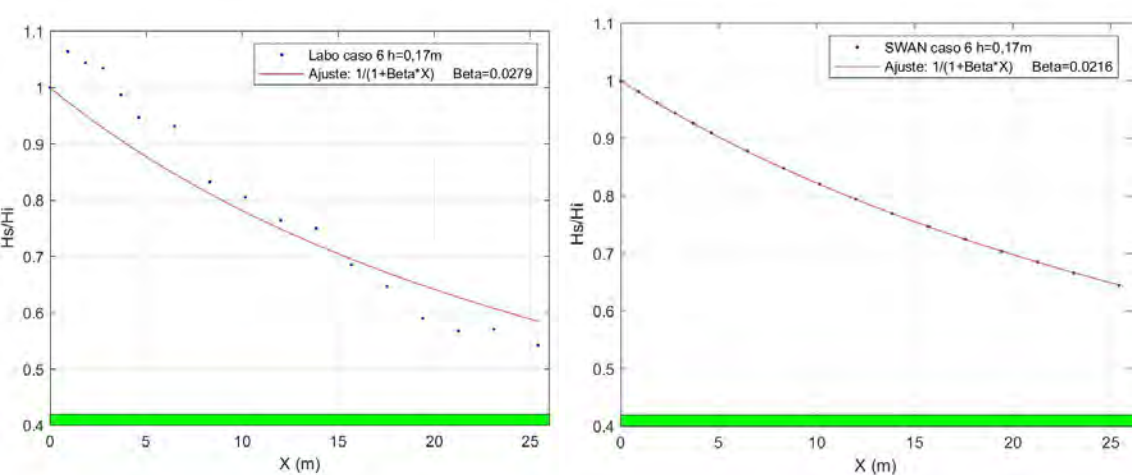
caso 3



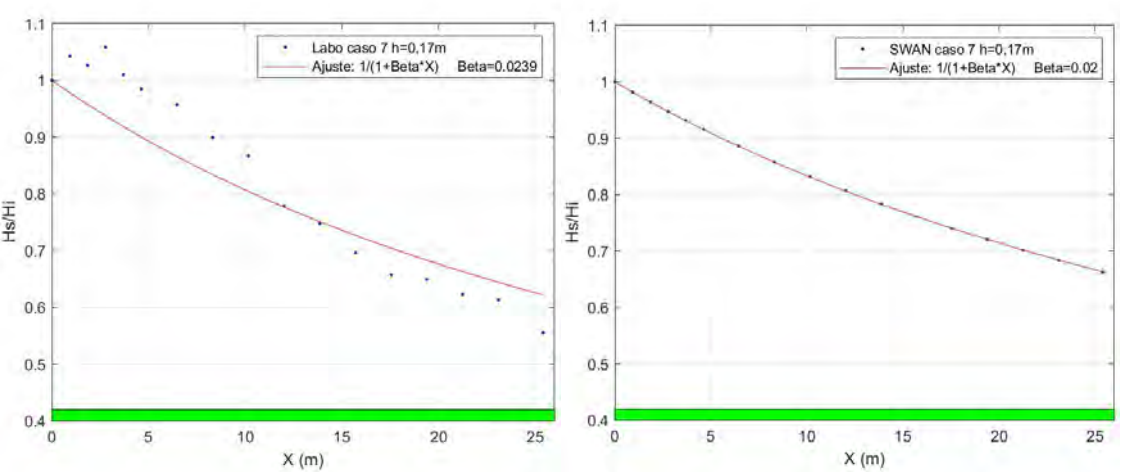
caso 5



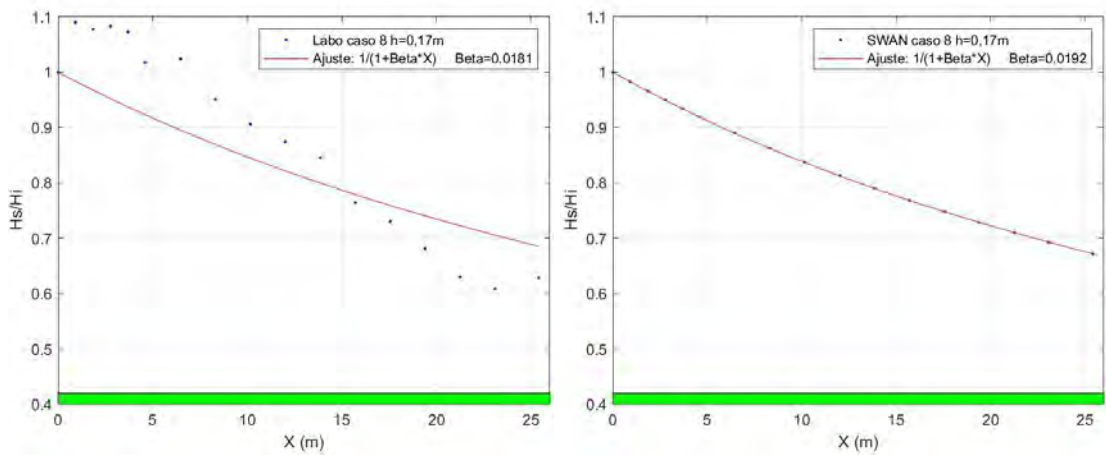
caso 6



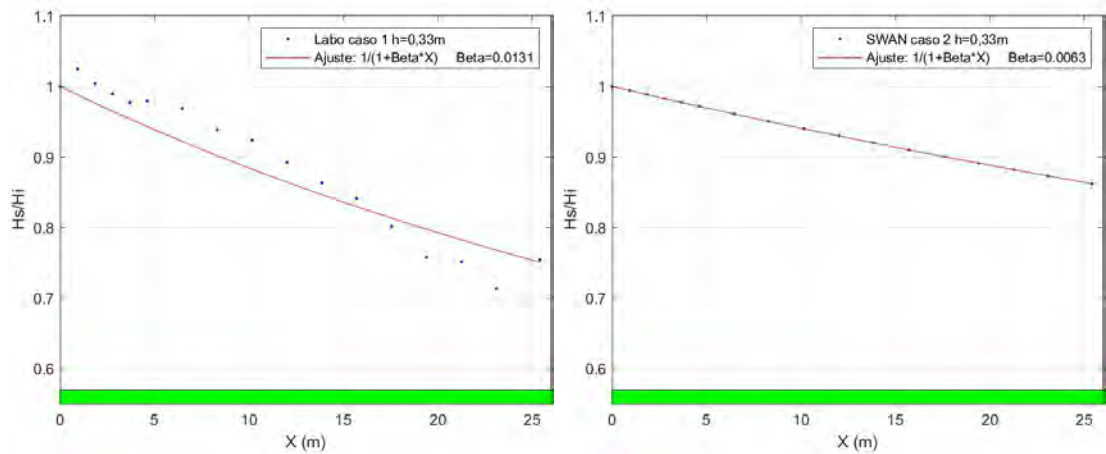
caso 7



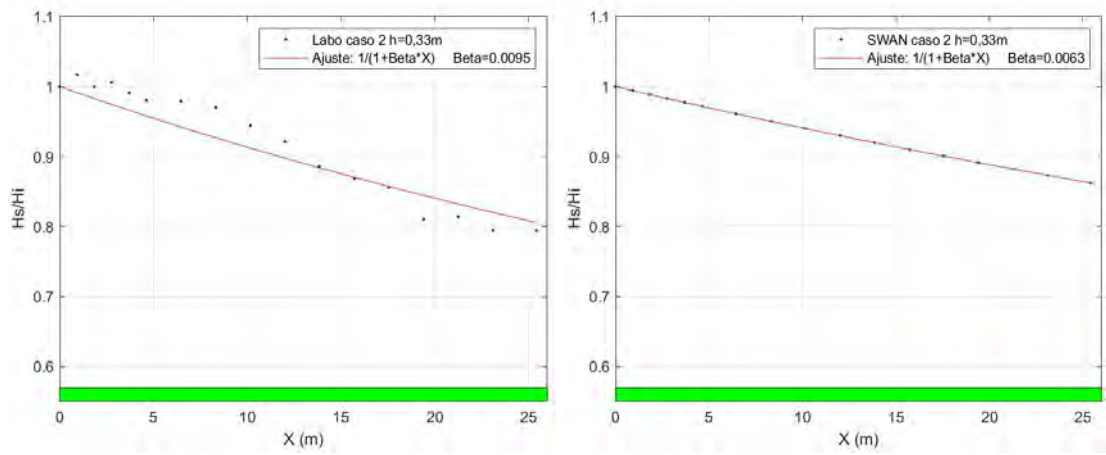
caso 8



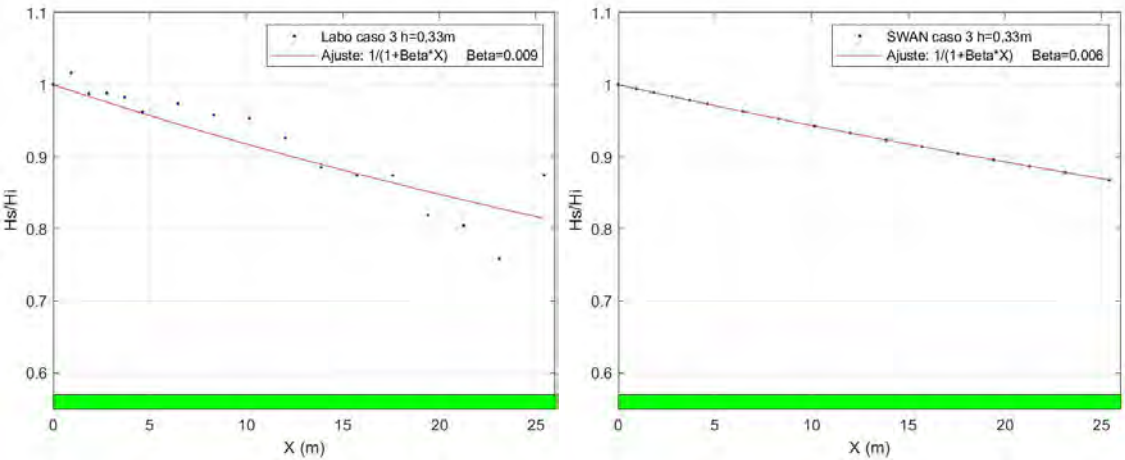
h=0,33m
caso 1



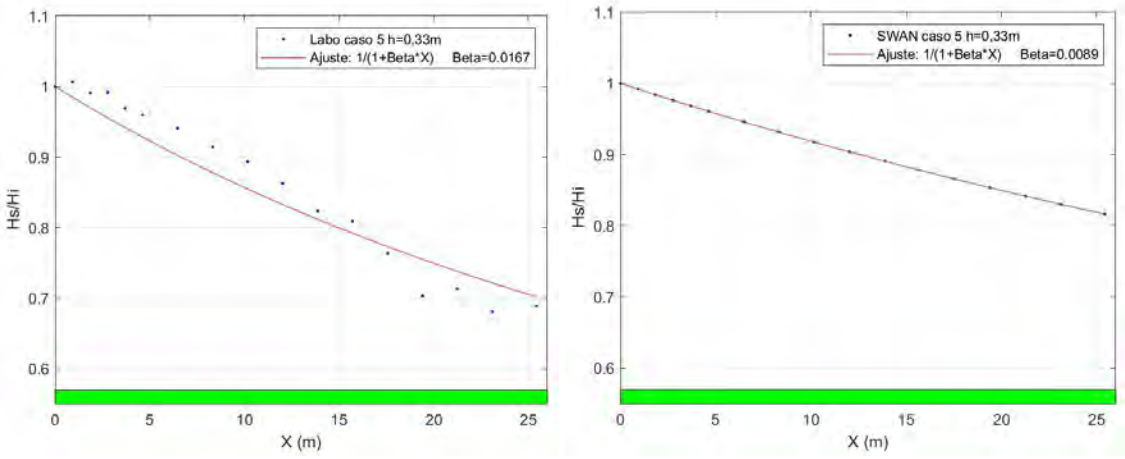
caso 2



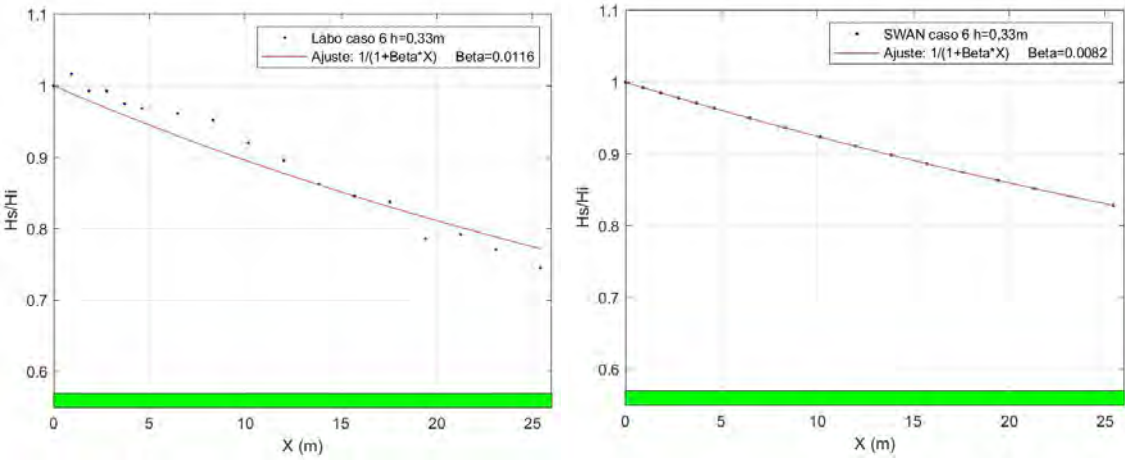
caso 3



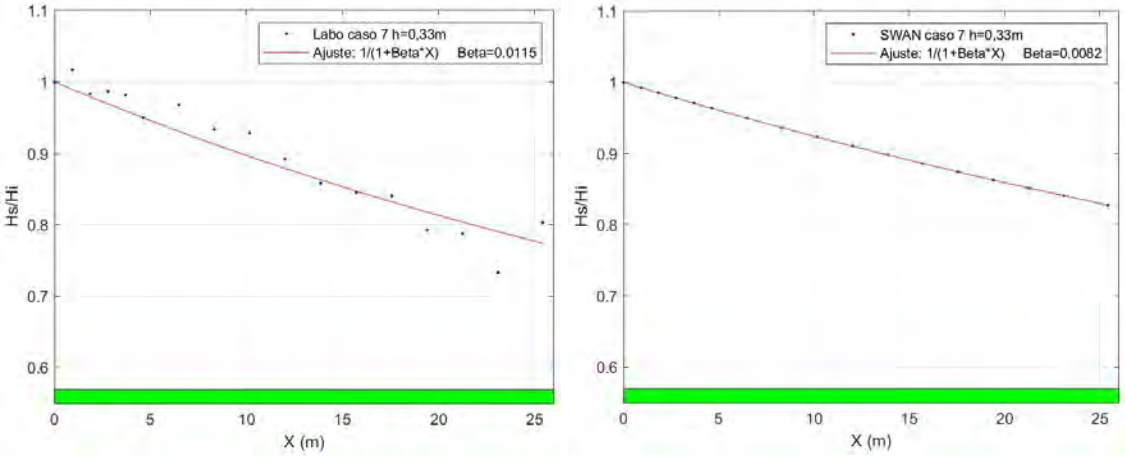
caso 5



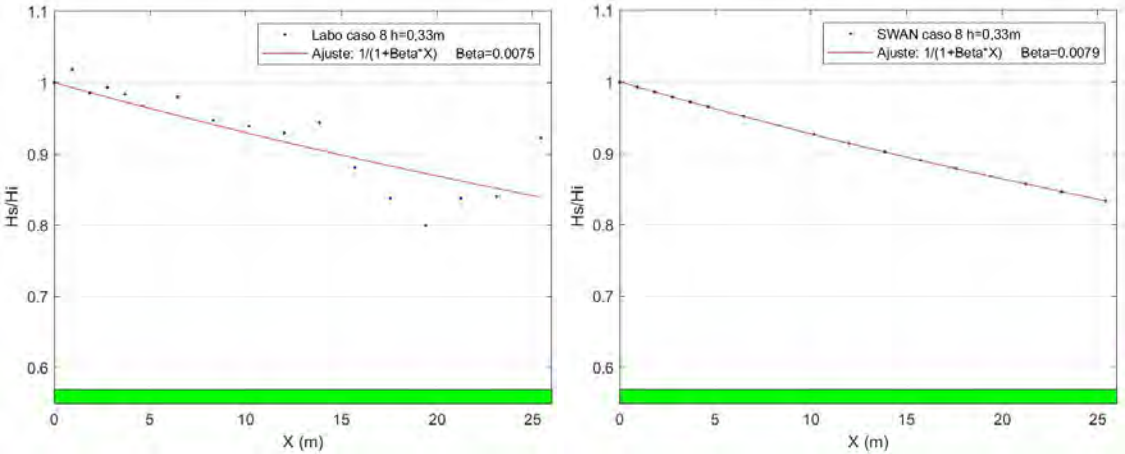
caso 6



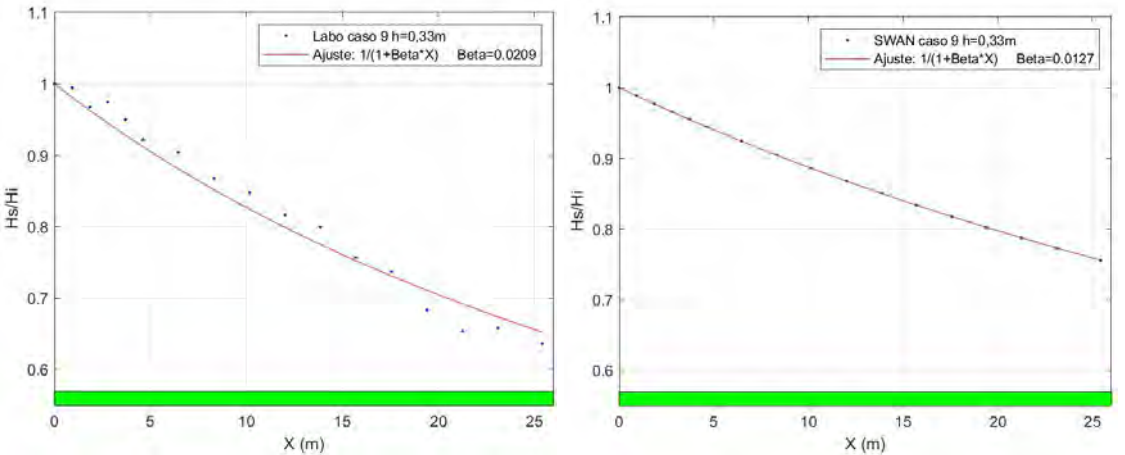
caso 7



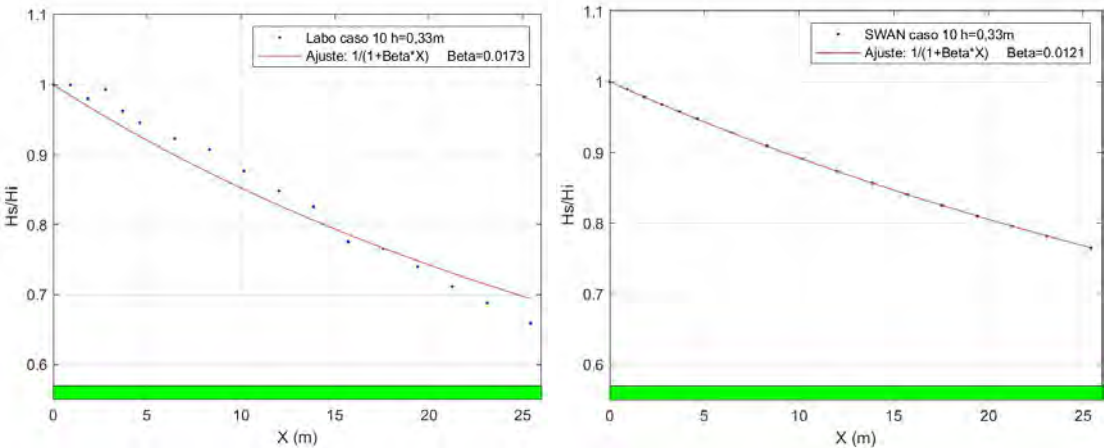
caso 8



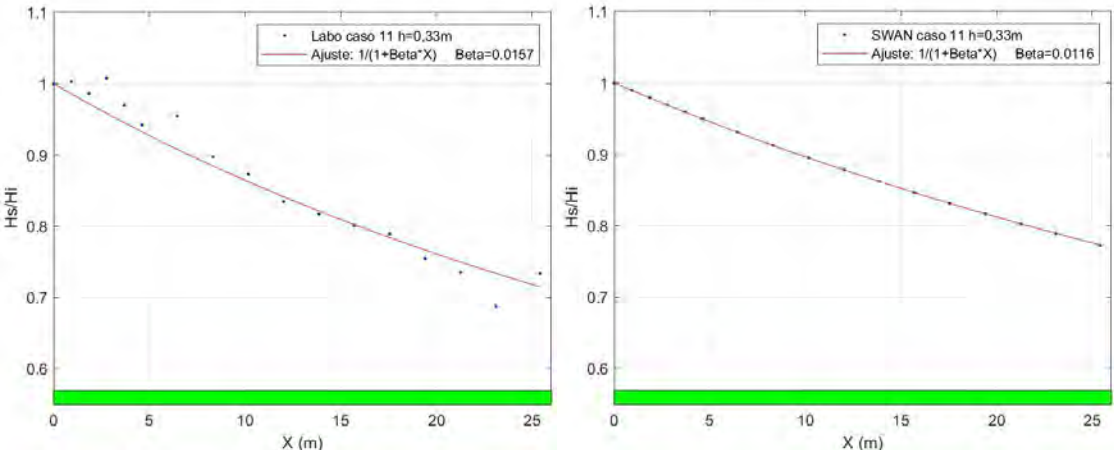
caso 9



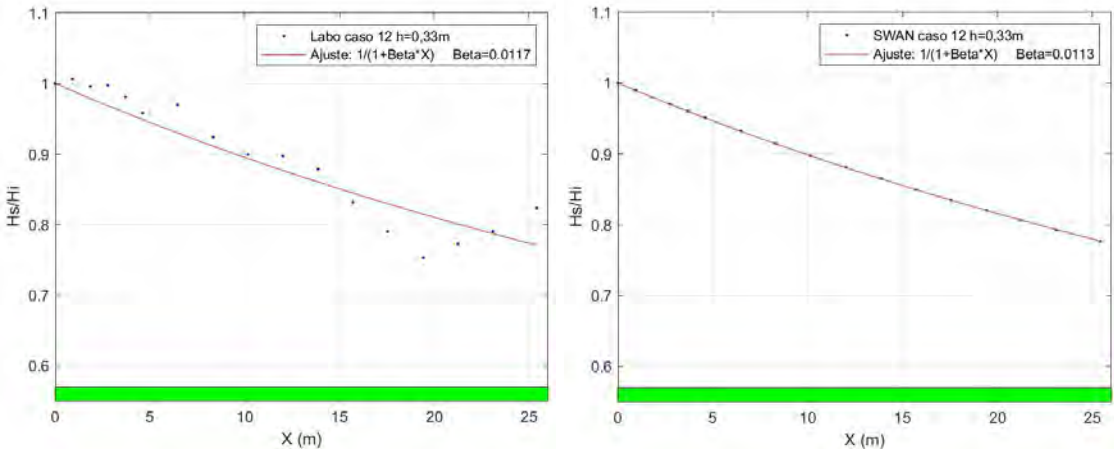
caso 10



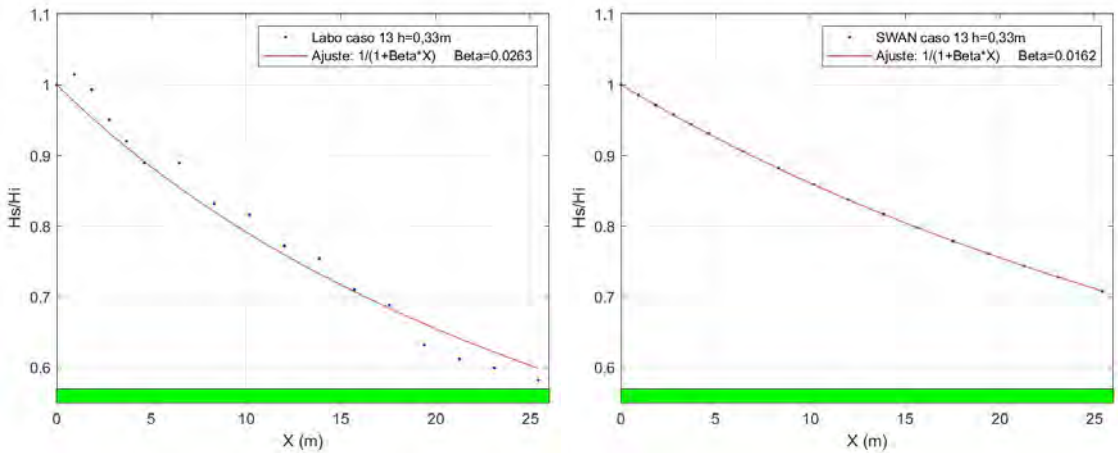
caso 11



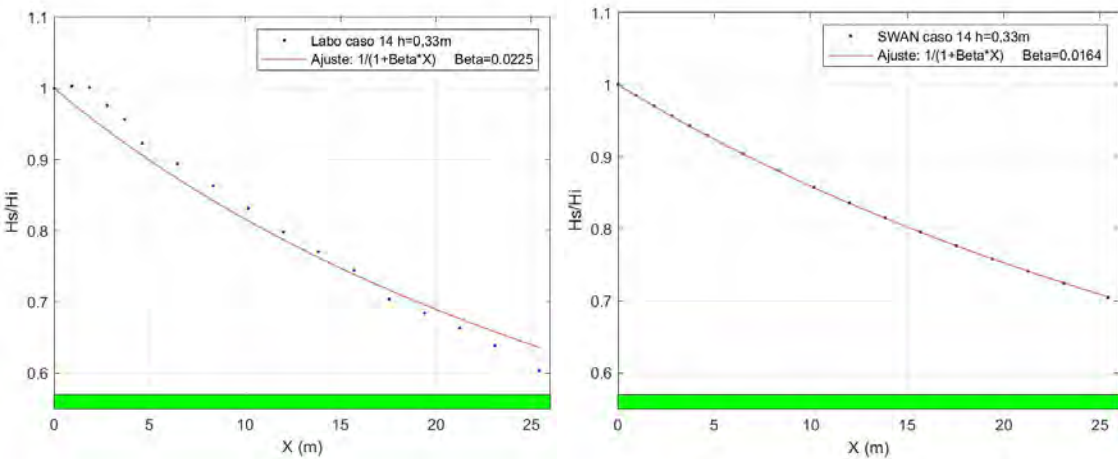
caso 12



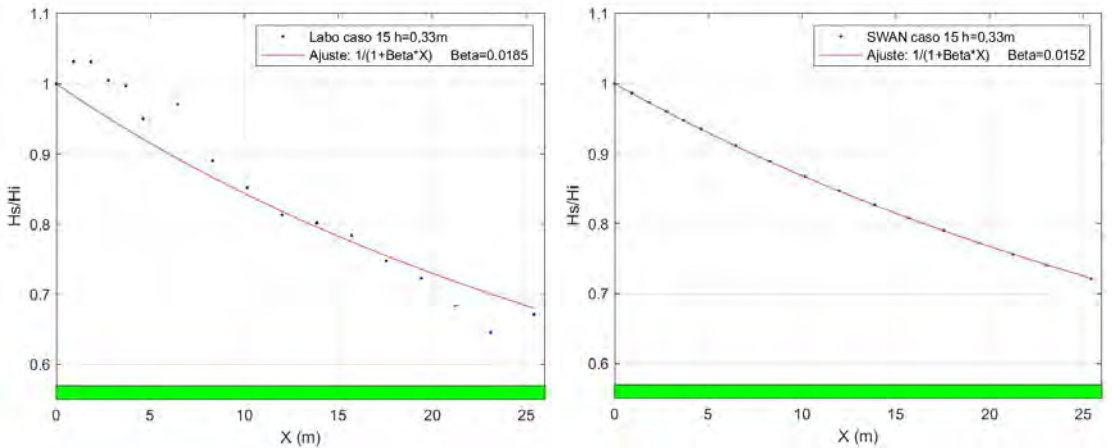
caso 13



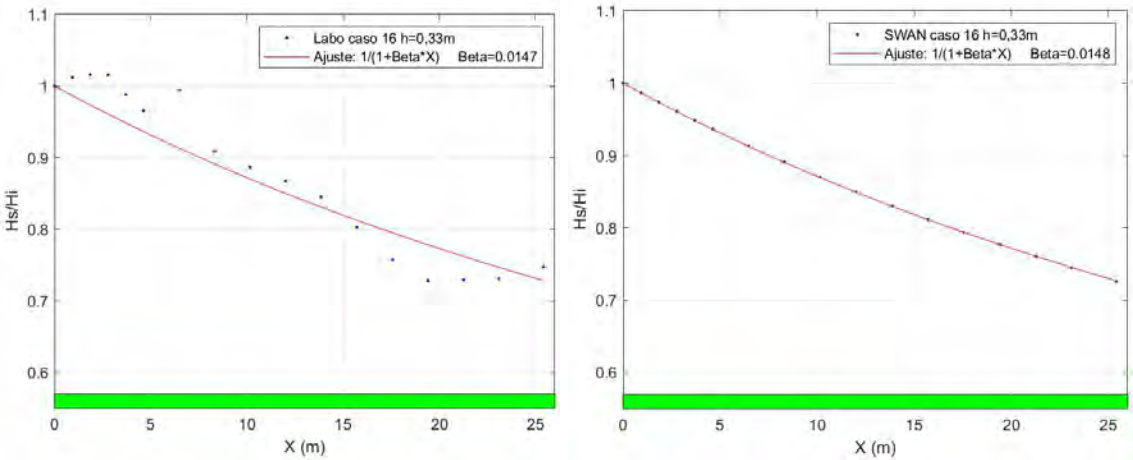
caso 14



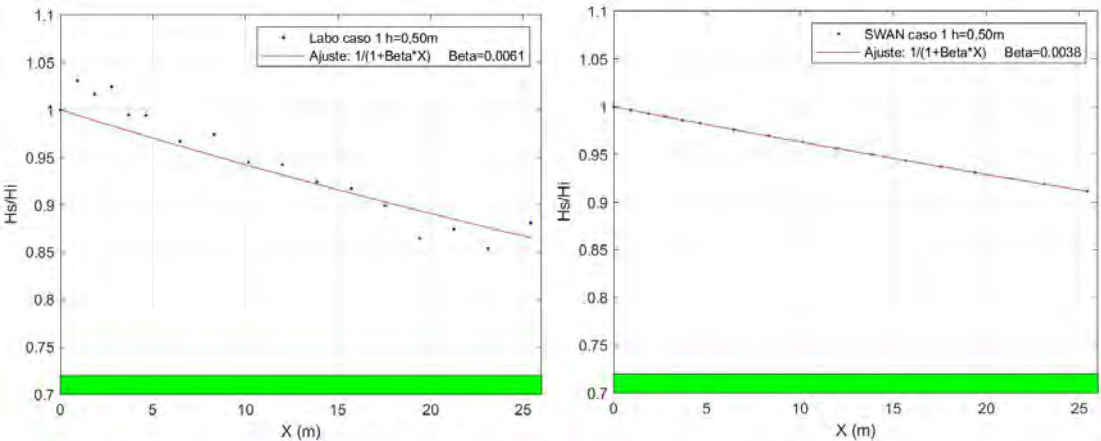
caso 15



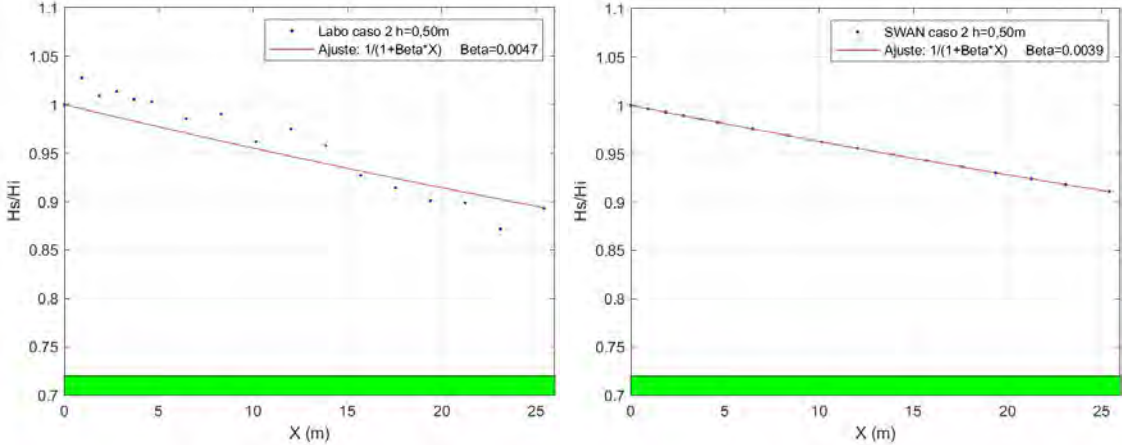
caso 16



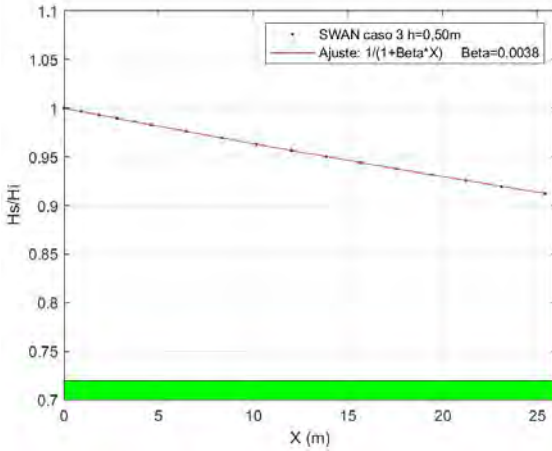
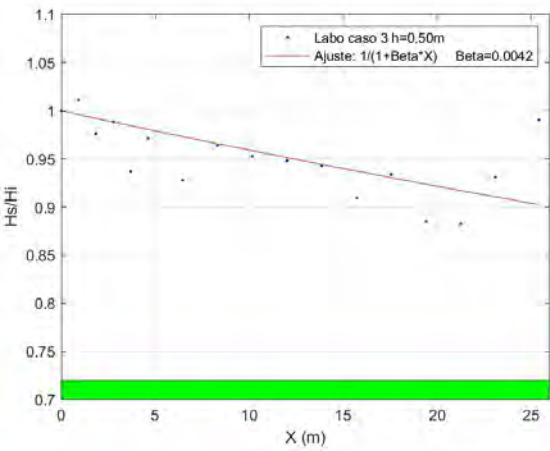
h=0,50m
caso 1



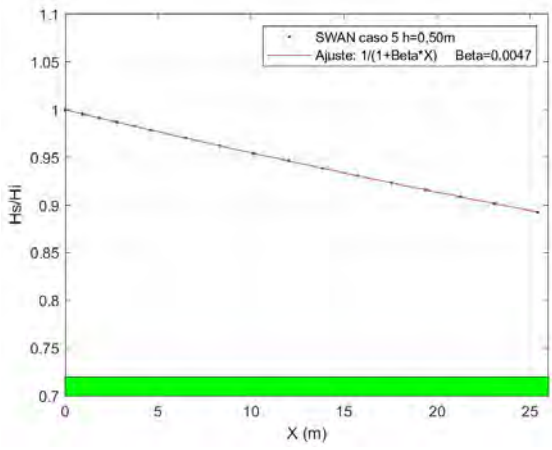
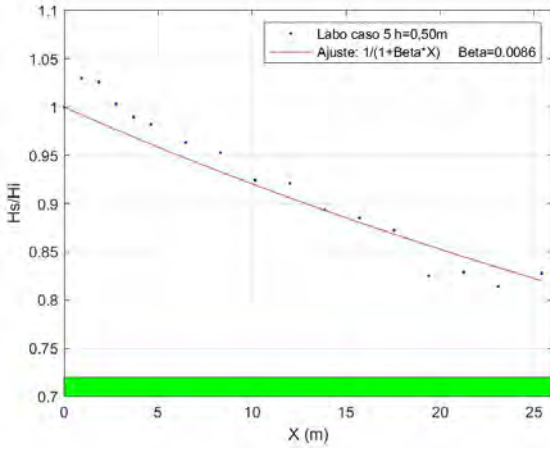
caso 2



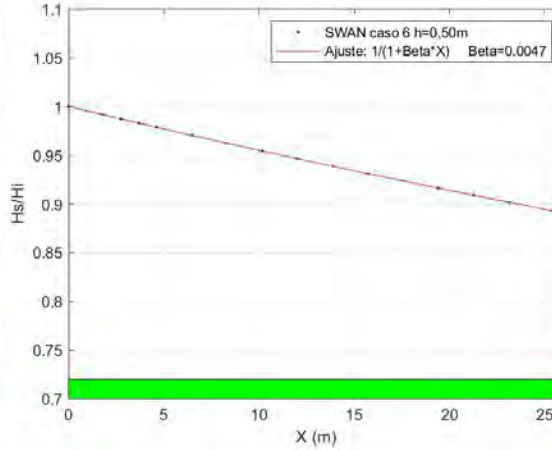
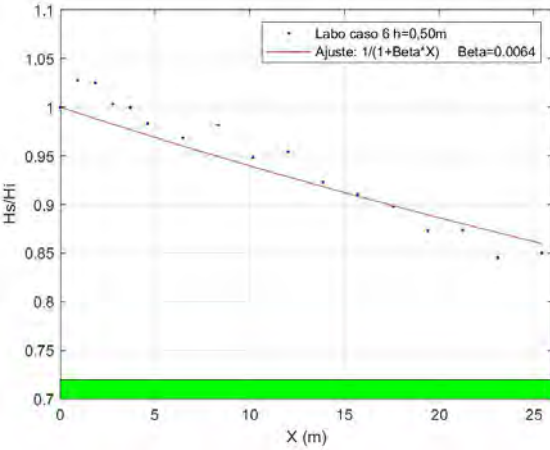
caso 3



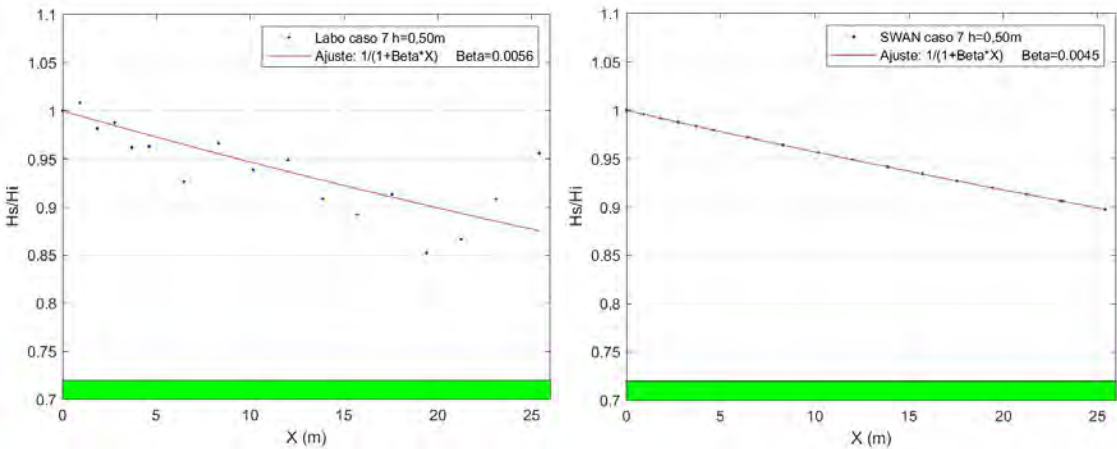
caso 5



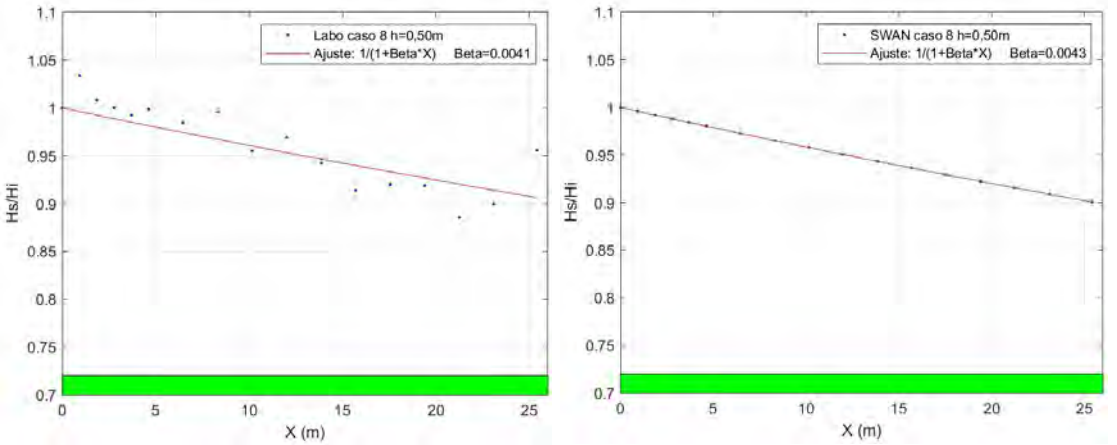
caso 6



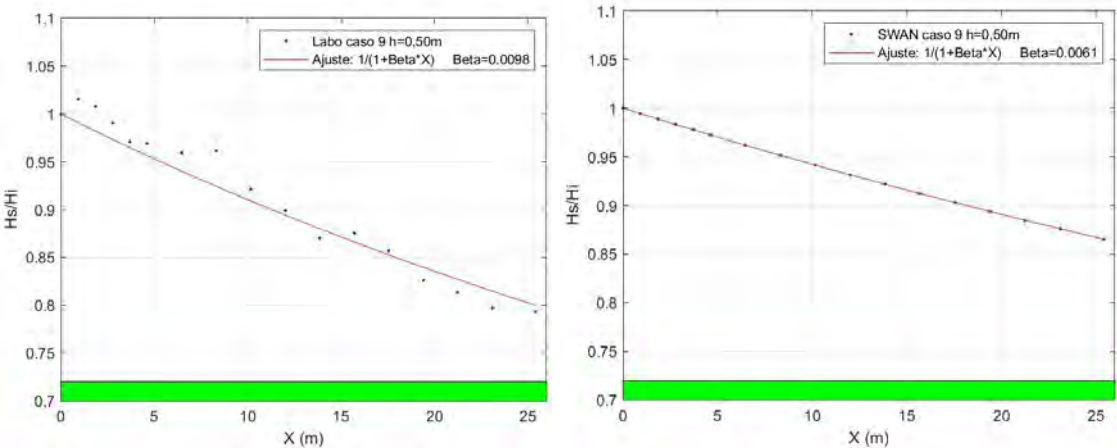
caso 7



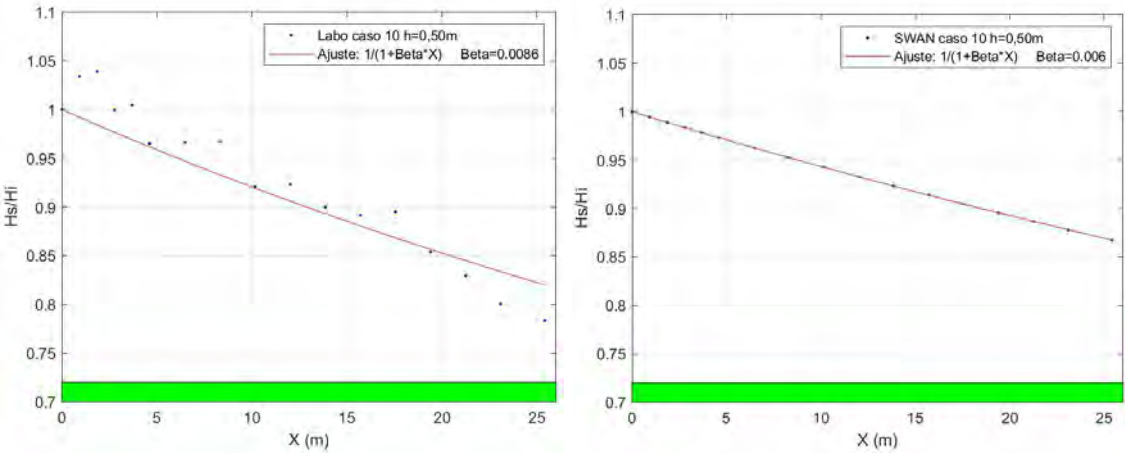
caso 8



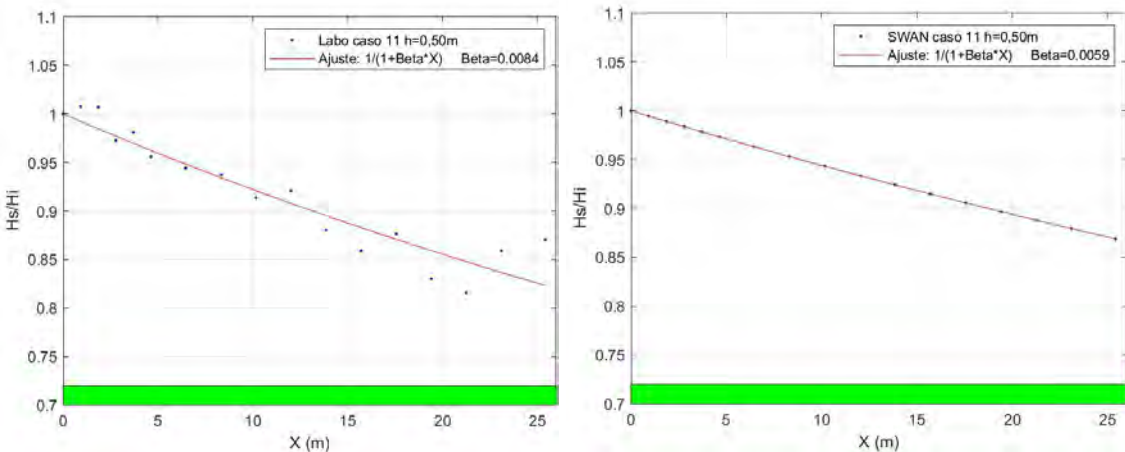
caso 9



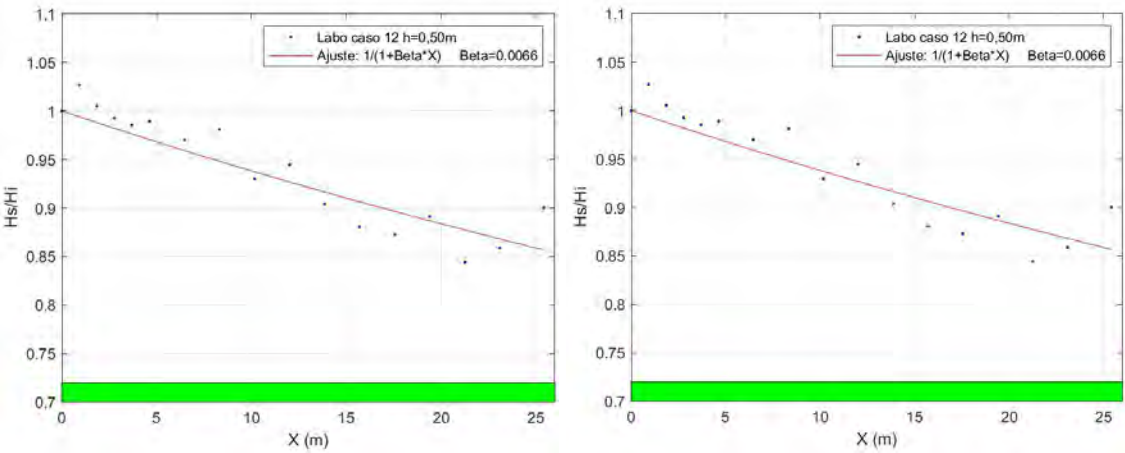
caso 10



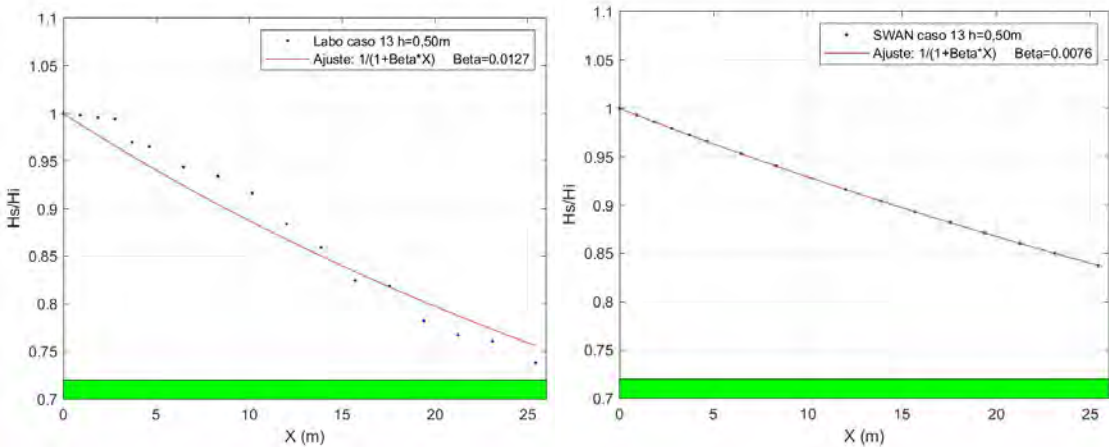
caso 11



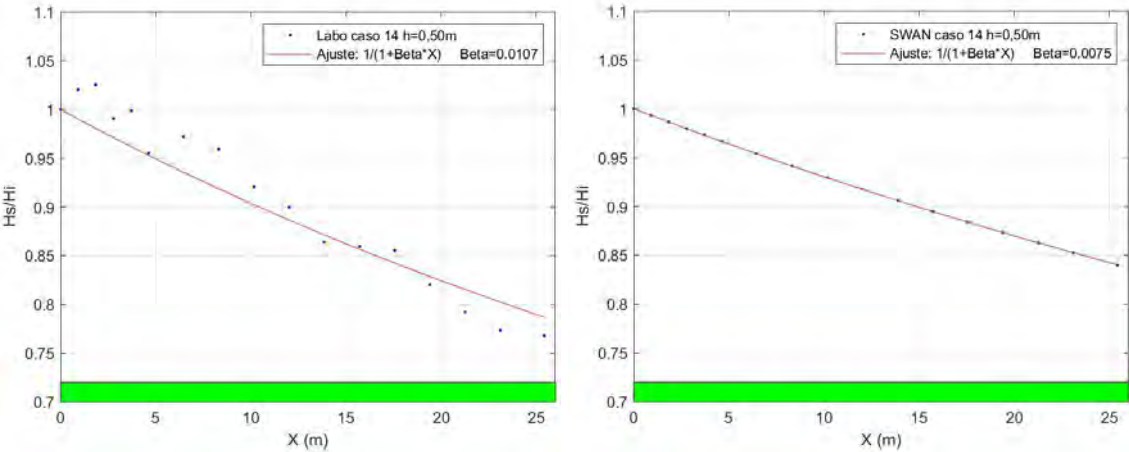
caso 12



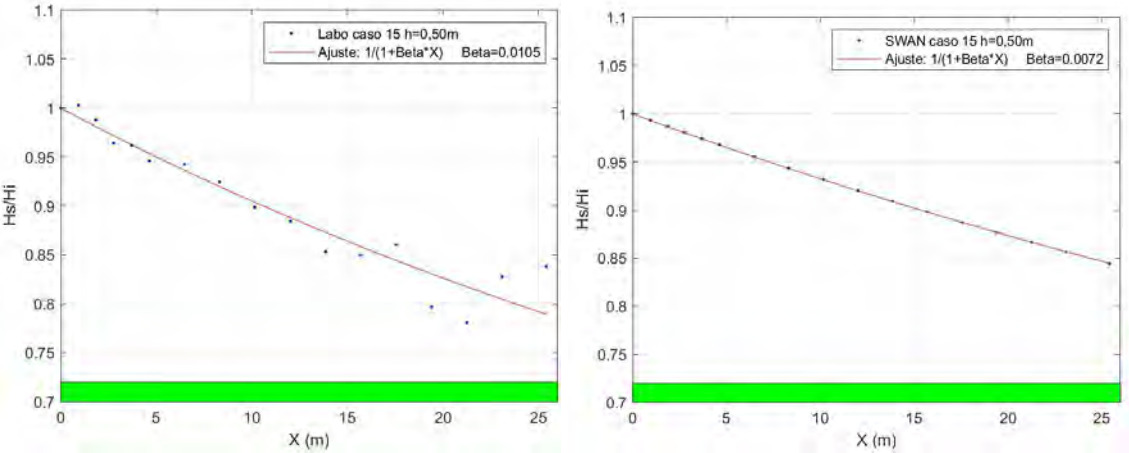
caso 13



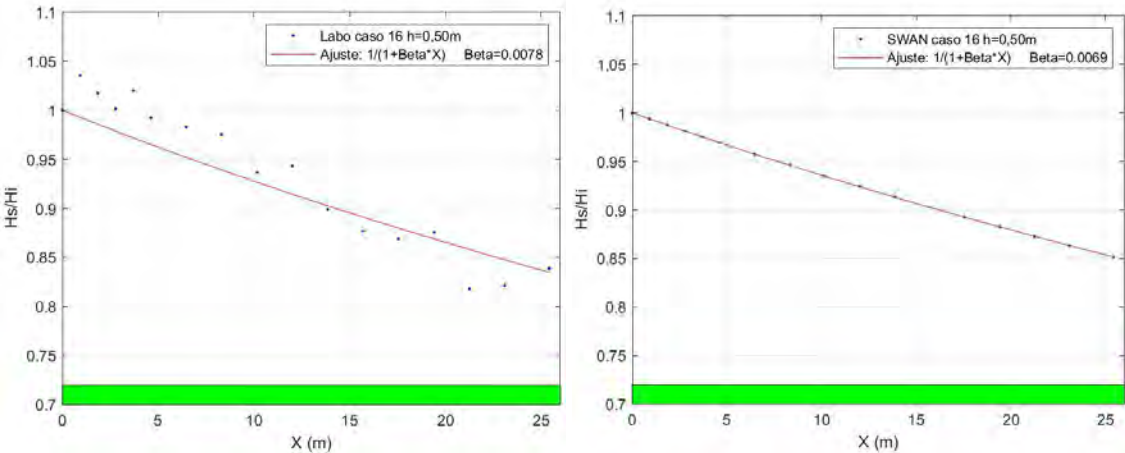
caso 14



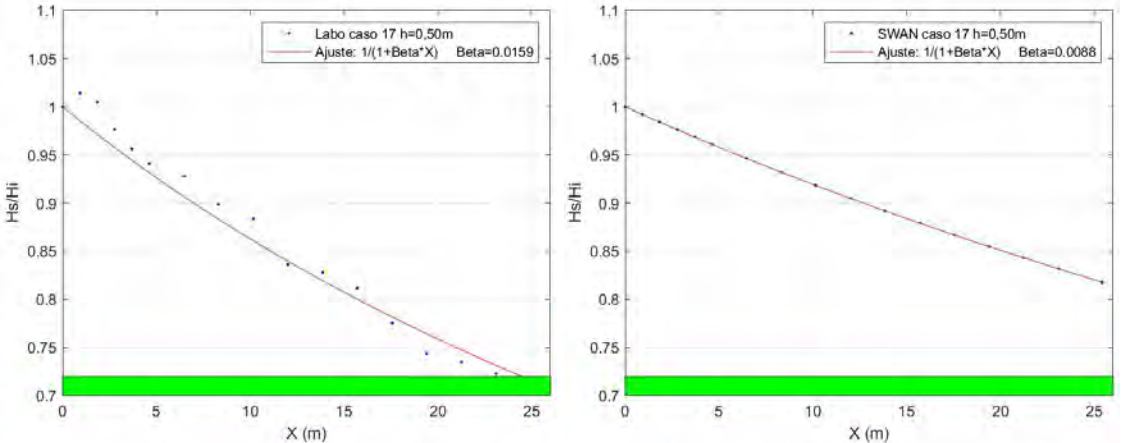
caso 15



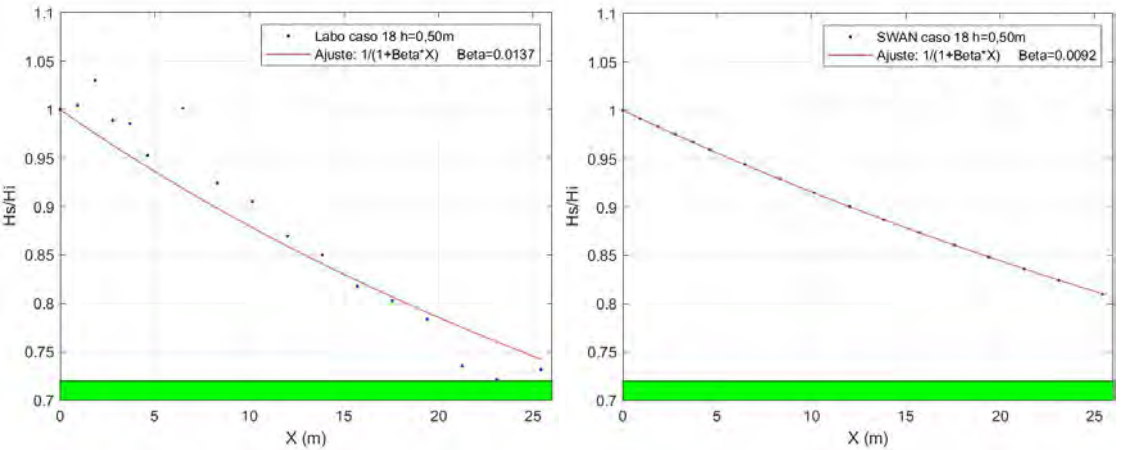
caso 16



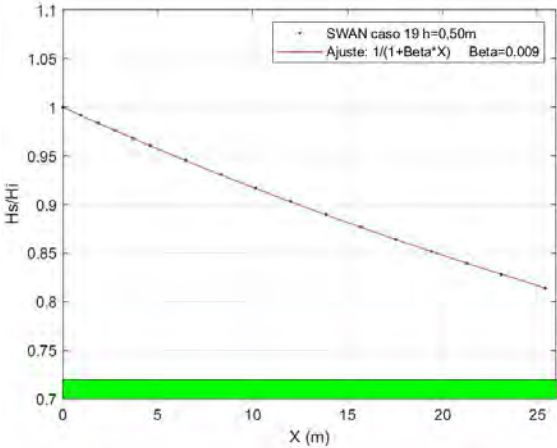
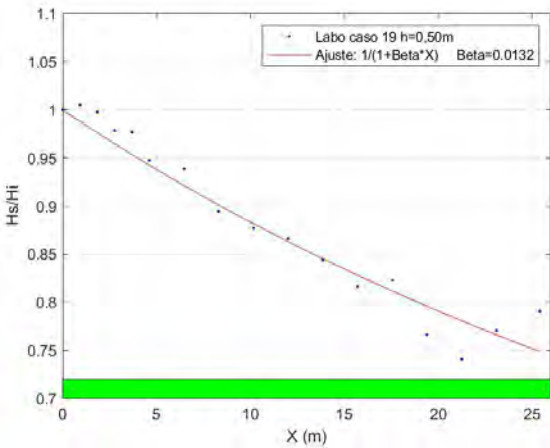
caso 17



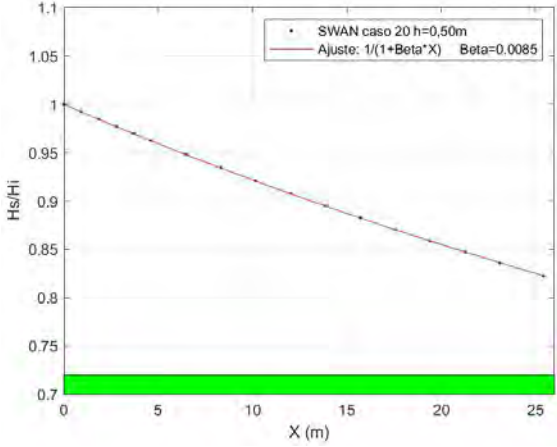
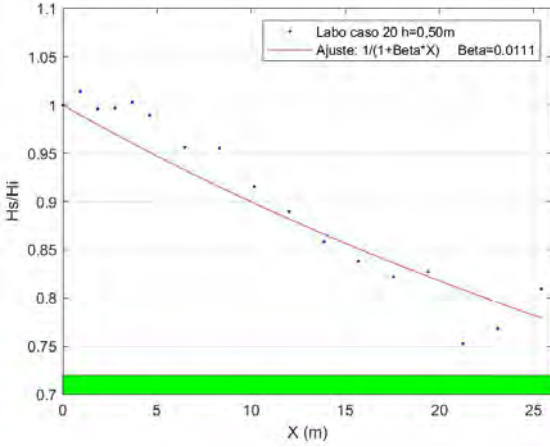
caso 18



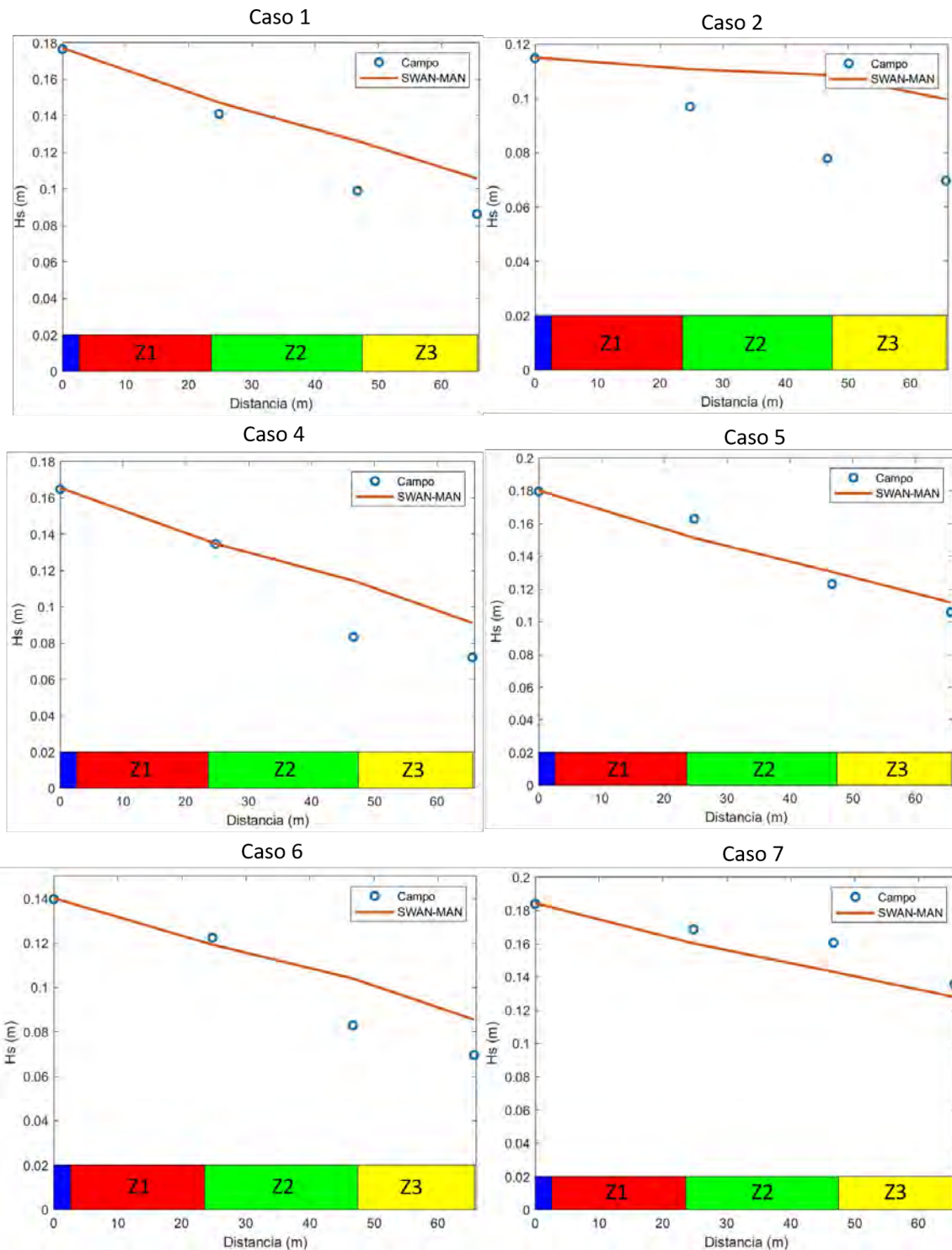
caso 19



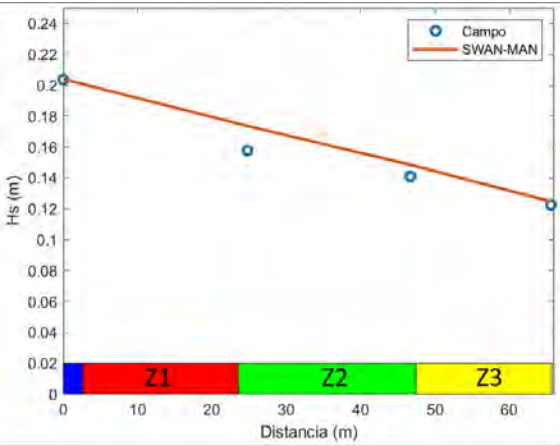
caso 20



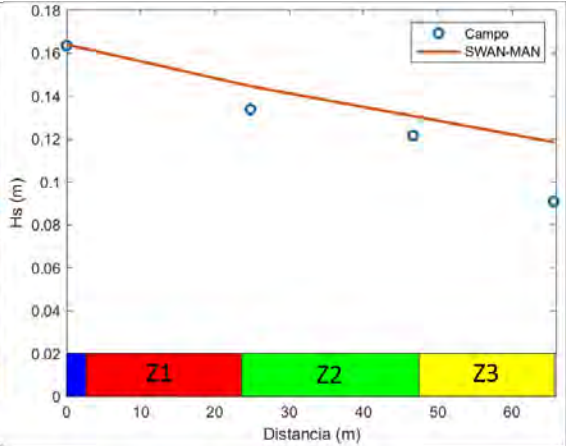
Anexo 7: Gráficos que representan los resultados de la atenuación de la altura ola con la herramienta numérica basada en el método de Maza et al. [2019] en relación con los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y las zonas Z1, Z2 y Z3 de manglares *Rhizophora* caracterizadas por diferentes SVF



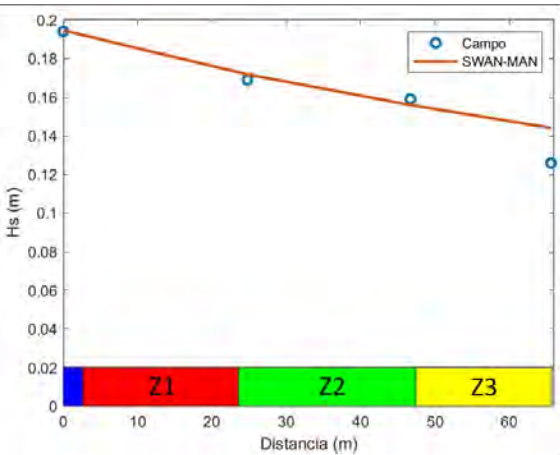
Caso 8



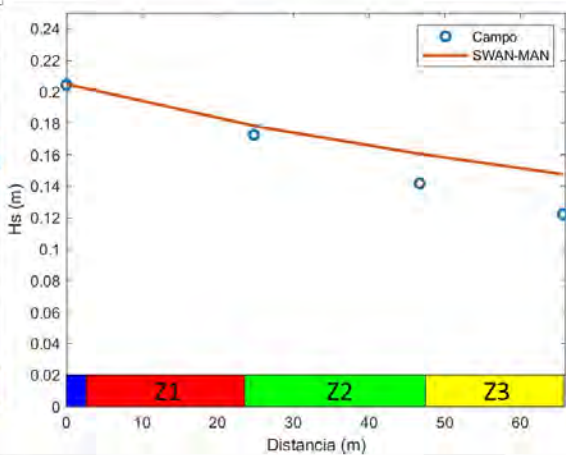
Caso 11



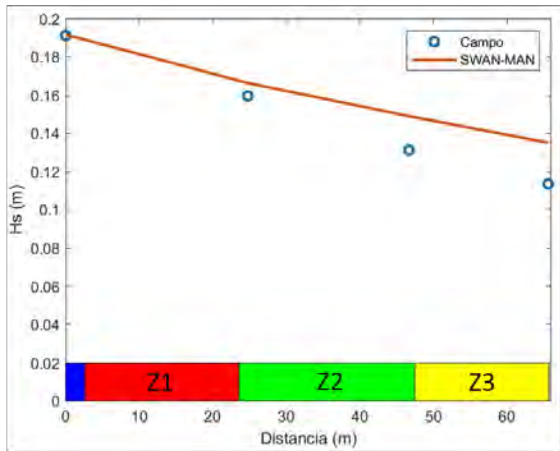
Caso 12



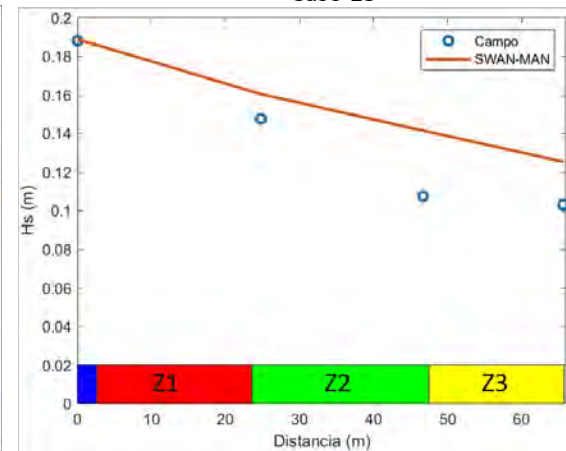
Caso 13

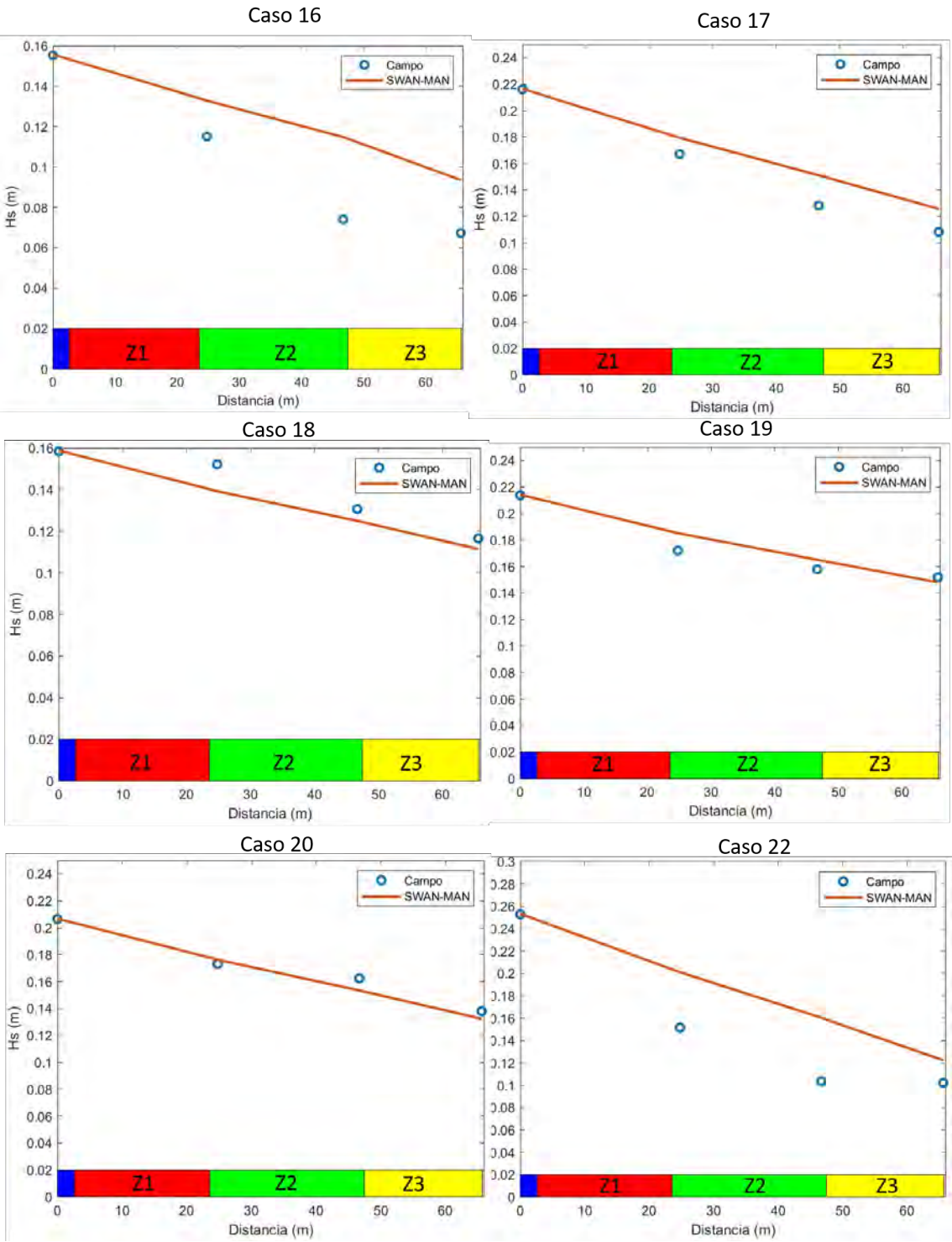


Caso 14



Caso 15





Anexo 8: Cálculo de indicadores para la comparación de la atenuación de las alturas de los datos de campo de López-Arias et al. [2022] y los datos del modelo numérico basada en el método de Maza et al. [2019]

h (m)	H _{m0i} (m)	T _{pi} (s)	L (m)	H/h	H/L	Sesgo	RMSE	MSE	σ_ϵ^2	NS	R ²	RSR
1.34	0.18	2.56	0.84	0.13	1.34	- 0.01	0.02	0.00	0.00	0.77	0.77	0.48
1.34	0.11	2.91	1.09	0.09	1.34	- 0.02	0.02	0.00	0.00	- 0.66	- 0.66	1.29
1.38	0.16	3.20	1.32	0.11	1.38	0.00	0.01	0.00	0.00	0.93	0.93	0.26
1.21	0.16	2.29	0.67	0.14	1.21	- 0.01	0.02	0.00	0.00	0.77	0.77	0.48
1.42	0.18	2.67	0.92	0.13	1.42	- 0.00	0.01	0.00	0.00	0.94	0.94	0.25
1.29	0.14	2.56	0.84	0.11	1.29	- 0.01	0.01	0.00	0.00	0.78	0.78	0.47
1.69	0.18	3.05	1.20	0.11	1.69	0.01	0.01	0.00	0.00	0.64	0.64	0.60
1.40	0.20	3.56	1.63	0.15	1.40	- 0.01	0.01	0.00	0.00	0.91	0.91	0.30
1.37	0.19	3.20	1.32	0.14	1.37	- 0.03	0.04	0.00	0.00	0.30	0.30	0.84
1.60	0.17	3.20	1.32	0.11	1.60	- 0.03	0.03	0.00	0.00	0.21	0.21	0.89
1.81	0.16	3.05	1.20	0.09	1.81	- 0.01	0.02	0.00	0.00	0.65	0.65	0.59
2.14	0.19	3.05	1.20	0.09	2.14	- 0.00	0.01	0.00	0.00	0.86	0.86	0.38
1.99	0.20	2.78	1.00	0.10	1.99	- 0.01	0.02	0.00	0.00	0.73	0.73	0.51
1.82	0.19	2.91	1.09	0.11	1.82	- 0.01	0.01	0.00	0.00	0.76	0.76	0.49
1.59	0.19	2.67	0.92	0.12	1.59	- 0.02	0.02	0.00	0.00	0.62	0.62	0.62
1.29	0.16	2.91	1.09	0.12	1.29	- 0.02	0.03	0.00	0.00	0.47	0.47	0.73
1.37	0.22	3.20	1.32	0.16	1.37	- 0.01	0.02	0.00	0.00	0.86	0.86	0.38
1.64	0.16	3.05	1.20	0.10	1.64	0.01	0.01	0.00	0.00	0.80	0.80	0.45
1.77	0.21	3.20	1.32	0.12	1.77	0.00	0.01	0.00	0.00	0.90	0.90	0.32
1.50	0.21	3.37	1.46	0.14	1.50	0.00	0.01	0.00	0.00	0.95	0.95	0.23
1.53	0.22	2.91	1.09	0.14	1.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.14
1.23	0.25	3.56	1.63	0.21	1.23	- 0.03	0.04	0.00	0.00	0.60	0.60	0.64

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Angulo, A., Bussing, López, M.I., W.A., Miyazaki, Y., Murase, A., 2014. *Marine and estuarine fish diversity in the inner Gulf of Nicoya, Pacific coast of Costa Rica*, Central America, Journal of Species Lists and Distribution, 1401-1413
<https://doi.org/10.15560/10.6.1401>

Beji, S., Battjes, J.A., 1993. *Experimental investigation of wave propagation over a bar*, Pages 151-162, Coastal Engineering, Volume 19, Issues 1-2, 0378-3839, [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90022-Z](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90022-Z).

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. *A third-generation wave model for coastal región, Part I, Model description and validation*. J. Geoph. Res. 104(C4), 7649-7666, <https://doi.org/10.1029/98JC02622>.

Dalrymple, R.A., Kirby, J.T., Hwang, P.A., 1984. *Wave diffraction due to areas of energy dissipation*. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 110, 67-79.

de Almeida, L.T., Olímpio, J.L.S., Pantalena, A.F., de Almeida, B.S., de Oliveira Soares, M., 2016. *Evaluating ten years of management effectiveness in a mangrove protected area*, Pages 29-37, Ocean & Coastal Management, Volume 125, 0964-5691, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.03.008>.

Duke, N., Sun, M., Yy, E., 2014. *Phylogeographic pattern of Rhizophora (Rhizophoraceae) reveals the importance of both vicariance and long-distance oceanic dispersal to modern mangrove distribution*. BMC evolutionary biology, Volume 14, 10.1186/1471-2148-14-83

Hamilton, S.E., Casey, D., 2016. *Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21)*. Global Ecol. Biogeogr. 25, 729-738, <https://doi.org/10.1111/geb.12449>.

Hasselmann, K., Collins, J.I., 1968. *Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction*. Journal of Marine Research, 26, 1-12.

López Arias, F., 2022. *Field campaign in the mangrove forest of the Golfo Nicoya (Costa Rica)*, Internal Report

Maza, M., Lara, J.L., Losada, I.J., 2019. *Experimental analysis of wave attenuation and drag forces in a realistic fringe Rhizophora mangrove forest*, Advances in Water Resources, Volume 131, 103376, 0309-1708, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.07.006>.

Maza, M., Lara, J.L., Losada, I.J., 2021. *Predicting the evolution of coastal protection service with mangrove forest age*, Coastal Engineering, Volume, 168 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103922>.

Mazda, Y., Magi, M., Motohiko, K., Hong, P.N., 1997. *Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam. Mangroves Salt Marshes* 1, 127–135. <https://doi.org/10.1023/A:1009928003700>.

Mendez, F.J., Losada, I.J., 2004. *An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields*, Pages 103-118, Coastal Engineering, Volume 51, Issue 2, 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.11.003>.

Suzuki, T., Zijlema, M., Burger, B., Meijer, M.C., Narayan, S., 2012. *Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN*, Pages 64-71, Coastal Engineering, Volume 59, Issue 1, 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.07.006>.

Van Rijn, L.C., 1989. Handbook – Sediment transport by currents and waves. Delft Hydraulics Report, p. H 461