



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL
RHIZOPHORA MANGLE FRENTE A EVENTOS MEDIOS DEL
OLEAJE

ANALYSIS OF *RHIZOPHORA MANGLE* HYDRAULIC BEHAVIOUR
IN FRONT OF MEAN SEA EVENTS

Catalina Andrea Vanegas Giraldo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magister
en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director: Ph.D. Andrés Fernando Osorio Arias
Codirector (a): Ph.D. Ligia E. Urrego Giraldo

Grupo de Oceanografía e Ingeniería Costera
Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia
Medellín - 2015

**Happiness can be found even in the
darkest of times if one only remembers
to turn on the light.**

J. K. Rowling.

Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos a mis padres, Luz Elena Giraldo y Rubén Darío Vanegas por su paciencia, apoyo incondicional y soporte emocional durante este proceso. También al resto de mi familia, tíos, tías, primos, abuela y madrinas, por acompañarme y entenderme durante los meses de trabajo. Agradezco especialmente a mi novio, David Quintero por su inmensa ayuda, comprensión y apoyo durante el desarrollo de este proyecto. A mis amigos Julián Sepúlveda, Andrés Felipe Gómez, Andrés Atehortúa, Ivonne Caldera, Vannesa Giraldo, Trino Angarita, Yanid Arango y Julián Casas por siempre estar ahí para animarme a continuar. A mis compañeros de estudio, que tras el tiempo compartido son mas amigos que compañeros, Jennifer Montaña, Enovaldo Herrera, Steffani Sanjuan, Daniel Peláez, Susana Cadavid, César Jaramillo, Diego Chalarca y Andrea Galeano. También agradezco a todos los compañeros de los grupos de investigación PARH y OCEANICOS. A todos gracias por su apoyo, por sus risas y por sus enseñanzas, que le dan a este proceso un aprendizaje integral y valioso para la vida.

Quiero agradecer a mi director, el docente Andrés Osorio, por confiar en mi para este trabajo, por brindarme los medios necesarios para desarrollarlo, por su ayuda durante todo el proceso y por darme la oportunidad de trabajar en el grupo de investigación OCEANICOS. A mi codirectora, Ligia Estela Urrego, por ser como una mamá a nivel académico, por corregirme y guiarme. Gracias por la paciencia, la dedicación y el apoyo emocional. También quiero agradecer a Carlos David Hoyos por estar siempre dispuesto ayudarme y por aconsejarme en los momentos mas difíciles de este proceso. Agradezco a los profesores del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente Gaspar Monsalve, Gladys Bernal, Mauricio Toro, María Isabel Toro y Luis Fernando Carvajal por retro alimentarme en mi proceso de formación; y a la asistente academia del Área Curricular en Medio Ambiente, Patricia Arias por su ayuda incondicional en todo momento.

Finalmente quiero expresar mi gratitud hacia la Universidad Nacional de Colombia, especialmente la Facultad de Minas, por permitirme llevar a cabo este proceso de formación académica. Gracias al proyecto 'Eventos Oceánicos Extremos en Ecosistemas Costeros Insulares del Pacífico y el Caribe Colombianos' de *COLCIENCIAS* por ayudarme en la adquisición de los datos en campo y al proyecto 'Jóvenes Investigadores' de *COLCIENCIAS* por el apoyo económico durante los últimos meses de trabajo. Agradezco también a Santiago López y Rubén Darío Montoya, docentes de la Universidad de Medellín por darme las guías necesarias para el uso del modelo numérico openFoam y al investigador Jun Tang de Dalian University of Technology, China por brindarme los datos experimentales para la calibración del modelo numérico.

Resumen

Los bosques costeros conformados por *Rhizophora mangle* han sido estudiados como estructuras de protección costera debido a su localización estratégica frente al oleaje y a la configuración de sus raíces. Algunas investigaciones se han basado en el análisis de la fuerza inducida sobre las raíces y el cálculo de la disipación de energía asociada a la presencia del mangle, con base en ello este estudio pretende analizar dicha fuerza a partir de la ecuación de Morrison y de las deducciones introducidas por Mazda *et al.* (1997b). Para representar la estructura de manglar serán utilizadas las parametrizaciones implementadas por Dalrymple *et al.* (1984) y Husrin & Oumeraci (2009) para modelos físicos o numéricos, incluyendo además el efecto de la pendiente de fondo dentro de la disipación de energía total, en busca de verificar la relación lineal entre ambos efectos o determinar un efecto combinado entre manglar *Rhizophora* y la batimetría de la zona. Para ello se implementa el modelo numérico *openFoam* junto con la herramienta *waves2Foam*, donde se evalúan las variables involucradas dentro del proceso físico, las variaciones del coeficiente de dragado (C_D) según las características del oleaje incidente y la configuración geométrica de la estructura de manglar, validando su comportamiento con la información de campo, donde el C_D es mayor en presencia de flujos con menores números de Reynolds. De esta forma se encontró una variación del C_D en función de la pendiente de fondo, con magnitudes superiores a las registradas en la literatura para otros tipos de vegetación y un aporte no lineal al flujo de energía por parte de las disipaciones por fondo y vegetación.

Abstract

The coastal forests shaped by *Rhizophora mangle* have been studied like coastal protection structures due their strategic location in front of the sea waves and by their roots configuration. Some studies have analyzed the induced force by the flow over the roots and calculated the wave dissipation caused by mangrove tree species. Based on those studies, the study presented here was conducted to investigate this force using the Morrison's equation and Mazda's method (Mazda *et al.* , 1997b). The implemented configuration to represent the mangrove structure were used based on Dalrymple *et al.* (1984) and Husrin & Oumeraci (2009)'s researches for physical and numerical models, including the slope bottom effect to calculate the total energy dissipation, in order to verify the lineal relationship between both effects (mangrove and slope) or have a combined effect. To evaluate the flow variables, the change in the drag coefficient (C_D) by incident sea waves characteristics and the geometrical configuration of mangrove structure, the numeric model *openFoam* and the tool *waves2Foam* were used. The results behavior were validated with field information, where the results of C_D show an increase under lower values of the Reynolds number. The findings show a C_D variation as function of bottom slope, with upper magnitudes than those recorded in the literature to other vegetation types and no lineal contribution to the energy flow by the bottom and vegetation dissipations.

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen	IV
<hr/>	
Lista de Símbolos	VIII
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Estado del arte y problema de investigación	3
1.2. Objetivos	5
2. Marco teórico y generalidades	6
2.1. Fundamentos teóricos	9
2.2. Modelación numérica	13
2.2.1. Modelo seleccionado y consideraciones generales	14
3. Cálculo de la respuesta del manglar usando un modelo numérico	18
3.1. Metodología	19
3.2. Calibración del modelo numérico	20
3.2.1. Flujo laminar vs Flujo turbulento	22
3.2.2. Calculo de errores	25
3.3. Mallado y configuración de casos	28
3.3.1. Consideraciones especiales	32
3.3.2. Selección de escenarios	36
3.4. Resultados	38
3.4.1. Análisis del escenario con y sin manglar	38
3.4.2. Efecto de la presencia de la estructura	45
3.4.3. Disipación de H_s	49
4. Análisis del C_D y de la disipación asociada a datos de campo	58
4.1. Zona de estudio	59
4.2. Metodología	60
4.3. Disipación por vegetación	63
4.4. Disipación por fondo	68
4.5. Disipación de H_S	71

5. Conclusiones	74
5.1. Recomendaciones	77

Lista de Símbolos

A	Área transversal al flujo (m^2)
B	Parámetro de ajuste de $O(1)$
A_p	Área proyectada perpendicular a la dirección del flujo (m^2)
C	Número de <i>Courant</i>
C_D	Coefficiente de dragado
C_g	Celeridad de grupo (m/s)
C_m	Coefficiente de inercia
D	Flujo de energía (N/ms)
D_C	Suma de los coeficientes de disipación
D_{slope}	Disipación de energía por fondo (N/m)
D_{veg}	Disipación de energía por vegetación (N/m)
$Diff_{Dc}$	Porcentaje de disipación entre puntos contiguos
F	Fuerza total (N)
F_D	Fuerza de dragado (N)
F_m	Fuerza de inercia (N)
FFT	Transformada rápida de Fourier
H_b	Máxima altura de ola antes de rotura (m)
H_s	Altura de ola significativa (m)
I_w	Índice de concordancia de Willmot
K_C	Número de Keulegan Carpenter
L_e	Longitud efectiva de la vegetación (m)
MAE	Error medio absoluto
N	Número de cilindros
P_w	Presión constante bajo flujo estacionario (N/m^2)
Q	Número del cuadrante
Re	Número de Reynolds
R_T^2	Error relativo
$RMSE$	Error cuadrático medio
S	Tensor de velocidad de deformación
SST	shear stress transport
T_p	Periodo pico (s)
V	Volumen de la estructura (m^3)
V_w	Volumen de agua (m^3)
V_m	Volumen de raíces (m^3)
V1S1	Caso con manglar y con pendiente
V1S0	Caso con manglar y sin pendiente
V0S1	Caso sin manglar y con pendiente
V0S0	Caso sin manglar y sin pendiente

a	Radio del cilindro de estudio (m)
d	Diámetro (m)
g	Aceleración gravitacional (m/s^2)
h	Profundidad (m)
h_c	Altura de cilindro (m)
k	Número de onda
l	Longitud de onda (m)
lr	Punto para evaluar la ecuación de Bernoulli
l'	Longitud efectiva turbulenta (m)
m	Número mínimo de cuadrantes requeridos
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
p	Presión (N/m^2)
p^*	Presión adicional a la hidrostática (N/m^2)
r	Vector en dirección radial
u	Velocidad del flujo (m/s)
u_r	Velocidad radial (m/s)
u_θ	Velocidad angular (m/s)
α	racción del agua ocupada por la vegetación
Δ_{Dc}	Cambio en la disipación (N/m)
Δ_{fe}	Cambio en el flujo de energía (N/m)
Δ_t	Cambio en el tiempo (s)
κ	Energía cinética turbulenta (Nm)
κ_γ	urvatura superficial
γ	Campo escalar que define la trayectoria del fluido
μ	Viscosidad dinámica molecular (Ns/m^2)
μ_t	Viscosidad dinámica turbulenta (Ns/m^2)
ρ	Densidad del agua ($998,2 kg/m^3$)
θ_s	Ángulo de referencia en relación a la dirección del flujo ($^\circ$)
ω	Disipación por unidad de energía cinética turbulenta (Nm)
$\partial u/\partial t$	Aceleración del flujo (m/s^2)
$\partial \eta/\partial x$	Gradiente de superficie libre
σ	frecuencia angula ($rad.s$)
σ_T	Coefficiente de tensión superficial
τ	Tensor de esfuerzos de Reynolds
ν	Viscosidad cinemática del agua ($1,007 * 10^{-6} m^2/s$)

Lista de Figuras

2.1. Diagrama de conectividad entre los ecosistemas de manglar, coral y pastos marinos (Silvestri & Kershaw, 2010)	7
2.2. Diagrama a escala temporal de los factores que influyen en la respuesta del bosque de manglar (Spencer & Möller, 2013)	7
2.3. Escenario general y factores de interacción	8
2.4. Esquema general para la ecuación de Morrison (Anderson <i>et al.</i> , 2011)	10
2.5. Esquema para definir L_e (Mazda <i>et al.</i> , 1997a)	11
2.6. Esquema para un cilindro y el flujo incidente. (a) Vista en planta. (b) Sección transversal	13
3.1. Metodología implementada	20
3.2. Resultados caso Løvås (2000) (Tang <i>et al.</i> , 2015)	21
3.3. Evolución de la superficie libre para el caso laminar, $\kappa - \omega SST1$ y $\kappa - \omega SST2$	24
3.4. Resultados H_s para el caso laminar, $\kappa - \omega SST1$ y $\kappa - \omega SST2$	25
3.5. Errores de H_s para los casos laminar, $\kappa - \omega SST1$ y $\kappa - \omega SST2$ vs caso de Løvås (2000)	26
3.6. Gráfica para definir el diámetro de trabajo (Oumeraci, 2014)	28
3.7. Vista en planta - Distribución de los cilindros	30
3.8. Configuración del fondo del canal (caso con pendiente y caso sin pendiente)	31
3.9. Configuración de la malla para la pendiente de $1,96^\circ$. a.Vista longitudinal del canal. b.Vista frontal del canal. c.Vista frontal de los cilindros	31
3.10. Configuración de la malla para la pendiente de $0,00^\circ$. a.Vista longitudinal del canal. b.Vista frontal del canal. c.Vista frontal de los cilindros	32
3.11. Definición de las teorías de olas a implementar según los parámetros del oleaje	33
3.12. Comparación de superficie libre con <i>stokesFirst</i> vs <i>stokesFifth</i> (1)	34
3.13. Comparación de superficie libre con <i>stokesFirst</i> vs <i>stokesFifth</i> (2)	35
3.14. Evolución de H_s con <i>stokesFirst</i> vs <i>stokesFifth</i>	35
3.15. Evolución de H_s caso 1 V1S1 y caso 1 V0S1	39
3.16. Diferencia porcentual de los valores de H_s para el caso 1 V1S1 vs caso 1 V0S1	39
3.17. Velocidad media y total - caso 1 V1S1 vs caso 1 V0S1. Valores de Fuerza para el caso 1 V1S1	41
3.18. C_D vs R_e - caso 1 V1S1	41
3.19. Evolución de H_s caso 1 V1S0 y caso 1 V0S0	42
3.20. Diferencia porcentual de los valores de H_s para el caso 1 V1S0 vs caso 1 V0S0	43
3.21. C_D vs R_e - caso 1 V1S0	43
3.22. Evolución de H_s Caso 1 V1S1 y caso 1 V1S0	44
3.23. Evolución de H_s Caso 1 V0S1 y caso 1 V0S0	44
3.24. C_D vs R_e	47

3.25. K_C vs C_D	48
3.26. Comparación $C_{D-medio}$ contra C_{D-max}	48
3.27. Evolución de H_s relativa para los 20 casos simulados	50
3.28. Flujo de energía para los 20 casos simulados	51
3.29. Suma de los coeficientes de disipación calculados para los 20 casos simulados	54
3.30. Diferencia D_C entre sensores	56
4.1. Mapa de localización de la zona de estudio	59
4.2. Zonificación del parche de manglar	60
4.3. Localización de los sensores de presión	61
4.4. (a) Series medidas en unidades de presión (bar). (b) Series sin ciclo de marea (mca). (c) Ciclo de marea	63
4.5. Altura de ola significativa. Desde 7:00 del 8 de Mayo hasta 16:00 del 11 de Mayo del 2014.	64
4.6. Evolución de H_s	65
4.7. Velocidad incidente.	66
4.8. C_D . (a) Por estado de mar. (b) En función del número de Reynolds	66
4.9. Fuerza de Dragado por estado de mar	67
4.10. Altura de ola significativa calculada con la teoría lineal y Battjes & Janssen (1978)	69
4.11. Comparación de H_s . (a) WG_1 (b) WG_2	69
4.12. Comparación de la evolución de H_s	70
4.13. Comparación H_s en el WG_1	71
4.14. Flujo de energía para los estados de mar analizados en campo	72
4.15. Coeficientes de disipación para los estados de mar analizados en campo	72
4.16. Comparación flujo de energía vs coeficientes de disipación	73

Lista de Tablas

3.1. Condiciones iniciales - Caso para calibración del modelo	21
3.2. Valores iniciales de κ y ω	24
3.3. Calculo de errores para la calibración del modelo	26
3.4. Dimensión de cilindros del esquema de Husrin & Oumeraci (2009)	29
3.5. Definición del diámetro de cilindros en función de la Figura 3.6	29
3.6. Dimensión de cilindros del esquema de Husrin & Oumeraci (2009) escalados 4 veces	30
3.7. Disposición de los sensores a lo largo del canal	33
3.8. Configuración de casos a simular - con manglar	37
3.9. Configuración de casos a simular - sin manglar	37
3.10. Valores medios de C_D , R_e y K_C para cada caso con manglar	46
3.11. Esquema para la comparación de los resultados de flujo de energía y coeficientes de disipación	50
3.12. Resultados flujo de energía	52
3.13. Resultados de los coeficientes de disipación	54
4.1. Datos medidos del manglar	61
4.2. Valores medios de H_s y T_p	64
4.3. Comparación C_D	68
4.4. Valores medios de H_s para el caso modelado (PETRA)	69
4.5. Diferencia porcentual de H_s en el WG_1	70
4.6. Comparación flujo de energía vs coeficientes de disipación WG_1 - WG_2	73

Capítulo 1

Introducción

Los ecosistemas costeros como bosques de manglar y de pino, arrecifes de coral y playas han sido considerados como estructuras de defensa costera que ayudan a mitigar el daño ocasionado por eventos extremos y el cambio climático, por lo que son considerados en el desarrollo de los diferentes planes de manejo costero (Aswani *et al.* , 2012). Sin embargo, aun no se ha determinado cuantitativamente su efecto y los enfoques de los diferentes investigadores varia según el rango de funcionalidad de los ecosistemas, considerando el nivel de impacto y la respuesta en función de las diferentes características físicas, biológicas, socio-económicas y geomorfológicas de cada zona. En particular, los bosques de manglar se destacan por ser formadores de la línea de costa, proteger las demás estructuras (Lewis, 2005) y mitigar los efectos del cambio climático (Robertson & Alongi, 1992), debido a que su tamaño y configuración proporcionan resistencia de toda la estructura frente a la acción del oleaje. Por ello, se ha buscado promover su restauración y protección en zonas protegidas y no protegidas donde la sobre explotación de los servicios ecosistémicos afecta la dinámica de las playas favoreciendo los procesos de erosión costera. De esta forma, algunos investigadores han basado sus estudios en la interacción ola - vegetación generada dentro de los ecosistemas de manglar considerando que los procesos hidrodinámicos, morfológicos y las condiciones climáticas afectan el crecimiento, distribución y la densidad de las diferentes especies (Jimenez, 1980), lo que a su vez afecta el comportamiento de las variables físicas, generando un ciclo constante entre todos los fenómenos involucrados en el estudio de la acción del oleaje sobre los árboles de manglar.

El estudio de estos bosques costeros se ha enfocado en la búsqueda de determinar un cinturón de vegetación que permita proteger el litoral y disminuir la erosión producto de un estado de mar, de condiciones extremas o de efectos antrópicos. Algunos análisis tienen en cuenta solo la configuración de las raíces y la densidad de los tallos ya que estas partes del árbol influyen directamente en la disipación de las olas, mientras que las ramas cumplen un papel más importante frente a trenes de viento, huracanes, etc. Para dichos estudios se han ido desarrollando aproximaciones con modelos físicos a través del uso de canales de oleaje en laboratorio, donde con esquemas a escala se evalúan variables como la densidad y la distribución de las raíces del manglar, así como el efecto sobre el oleaje bajo ambientes controlados (Husrin & Oumeraci, 2009; Husrin & Strusi, 2012; Tanaka *et al.* , 2006; Aceh, 2012; Hashim & Catherine, 2013); también con modelos numéricos se tienen aproximaciones al coeficiente de dragado (C_D), el coeficiente de inercia (C_m), el de manning (n), el régimen del flujo y la geometría asociada al manglar para determinar el porcentaje de disipación del oleaje debido a la presencia de la vegetación y las fuerzas inducidas por la estructura sobre el flujo (Mendez & Losada, 2004; Suzuki *et al.* , 2012). Estas aproximaciones están generalmente basadas en la información recolectada *in situ*

para variables físicas del oleaje y geomorfológicas del manglar (Burger, 2005; Das & Crépin, 2013; Mazda *et al.*, 1997a; Massel *et al.*, 1999; Maza *et al.*, 2015), donde se consideran las diferentes variables que influyen según el modelo, las aproximaciones empleadas, el enfoque de la investigación y la información disponible.

En particular, para modelos físicos y numéricos a escala de laboratorio basados en prototipos de la estructura del *Rhizophora sp.*, las aproximaciones más comunes a la geometría del manglar son la rigidez de las raíces con materiales como concreto o metal y su esquematización a través de cilindros con radio y altura constante y conocida, teniendo en cuenta las propiedades del sistema como la densidad de individuos, los efectos de fricción y la posición frente al oleaje incidente, así como las características del tren de olas. Por otro lado, las aproximaciones a tallos y ramas se especifica incluyendo los mecanismos de falla de la estructura (Husrin & Oumeraci, 2009), lo que incrementa la complejidad del análisis debido a las variables adicionales relacionadas con las fuerzas de viento e inercia que interactúan en el modelo.

En este trabajo se evaluará la fuerza de dragado inducida por el oleaje en la estructura del bosque de manglar *Rhizophora* mediante la calibración de un modelo numérico donde se involucran las variables de fondo y de la estructura, considerando las correlaciones de Husrin & Oumeraci (2009) para *Rhizophora Stylosa*. El comportamiento obtenido tanto de las fuerzas inducidas por la estructura como del porcentaje de disminución de la superficie libre, se comparará de forma cualitativa con la información recolectada en campo para la especie *Rhizophora mangle*, dando una primera aproximación al efecto de los eventos medios del oleaje sobre el ecosistema, así como determinar la respuesta de este y su rango de efectividad.

Dado lo anterior, se busca determinar la resistencia de las raíces de manglar mediante la esquematización del escenario real a escala de laboratorio dentro del modelo numérico *openFoam* que permite capturar todos los fenómenos físicos asociados al proceso de interacción agua-estructura, partiendo de las calibraciones registradas en la literatura para el esquema del manglar y la configuración del fondo del canal. Su comportamiento será validado cualitativamente con la información recolectada en campo y a su vez con la información registrada por diferentes autores, con el fin de determinar la influencia de la batimetría en el C_D . Con ello se obtiene también el porcentaje de disipación generado por la presencia de la estructura de manglar bajo diferentes batimetrías, es decir, teniendo en cuenta la variación del fondo, de modo que se puedan diferenciar los procesos por fondo de los procesos debidos a la presencia de la estructura. Donde a su vez, se pueda hacer una comparación entre el cálculo del flujo de energía y de los coeficientes de disipación paramétricos propuestos por Méndez *et al.* (1999) y Alsina & Baldock (2007), para situaciones con presencia de manglar y pendiente de fondo, contra situaciones con manglar sobre fondo plano y sin manglar en pendientes inclinadas. De esta forma, se busca poder determinar el porcentaje de no linealidad asociado a la superposición de los procesos individuales.

Finalmente, se quiere dar un primer acercamiento a la implementación del modelo numérico *openFoam* para el estudio costero colombiano, en la cual se tenga un procedimiento básico para su uso, incluyendo la simulación del proceso físico de interacción ola-estructura, que considere el modulo *waves2Foam* (Jacobsen *et al.*, 2012) y otras herramientas de post procesamiento del modelo, para que posteriormente pueda ser punto de partida para la evaluación de diferentes fenómenos físicos en zonas costeras.

De esta forma se plantean a continuación el problema y los objetivos de la investigación, direccionados al análisis numérico del comportamiento de la estructura de manglar para diferentes condiciones de oleaje bajo escenarios controlados con y sin pendiente de fondo; así como al estudio de la respuesta del *Rhizophora mangle* con mediciones en campo, considerando las variables geométricas de la estructura y las hidrodinámicas del oleaje incidente. Para ello, se parte de la

información obtenida por las simulaciones numéricas y del análisis de la información recolectada en campo, donde los resultados obtenidos de forma individual son comparados de forma cualitativa al final de este trabajo. Para abordar cada uno de los parámetros mencionados, en el Capítulo 2 se plantean las generalidades tanto para la implementación del modelo numérico seleccionado, como para el uso del método seleccionado para la recolección y el procesamiento de la información en campo; haciendo énfasis en las ecuaciones implementadas para el cálculo de variables como C_D , R_e y los coeficientes de disipación. Así, en el Capítulo 3 se plantea de forma sistemática la implementación del modelo numérico según las condiciones del presente trabajo, la definición de los diferentes casos a simular y los resultados obtenidos para las variables de interés bajo las hipótesis consideradas. Por otro lado, en el Capítulo 4 se especifica el procedimiento ejecutado para la recolección de la información en campo y el procesamiento de la misma para el cálculo de las variables buscadas. Finalmente, el Capítulo 5 presenta de forma concisa los hallazgos y aportes de la investigación en la respuesta del *Rhizophora mangle* frente a eventos medios del oleaje, considerando las 2 fuentes de información disponibles para dar respuesta a cada uno de los objetivos planteados, relacionando los resultados obtenidos en los Capítulos 2 y 3. También se presentan algunas recomendaciones para el uso futuro del modelo numérico y para la recolección y análisis de datos de campo.

1.1. Estado del arte y problema de investigación

El bosque de manglar es uno de los ecosistemas más estudiados en el mundo científico debido a los diferentes servicios ecosistémicos que brinda a las comunidades aledañas, a la protección que provee al litoral costero frente a los procesos de erosión y a la disipación de energía del oleaje incidente. En los últimos años, como consecuencia de diferentes eventos catastróficos como el Tsunami del océano Índico en 2004, se ha impulsado el desarrollo de sistemas de manejo y gestión integrada costera, especialmente en Oceanía y el Sureste Asiático (Aswani *et al.*, 2012), considerando proyectos de restauración y protección de estos bosques frente a la destrucción antrópica a gran escala por prácticas como agricultura, acuicultura y deforestación. En contraste, en el escenario latinoamericano es importante considerar en los sistemas de manejo y gestión, aspectos ecológicos, económicos y sociales de las comunidades, como el crecimiento de la población, la biodiversidad existente, la disminución de la capacidad de restauración de la costa y la pérdida del litoral que se traduce en pérdida de ecosistemas costeros (Silva *et al.*, 2014). Lo anterior incrementa los procesos de erosión costera, que en ciertos casos solo puede ser manejada con estructuras de ingeniería a altos costos (Anthony & Gratiot, 2012).

Para estas prácticas de manejo y gestión es indispensable tener un conocimiento específico del ciclo hidrológico y oceánico de la zona, de la dinámica de las olas, del flujo de sedimentos, la geomorfología, la estructura del bosque, la biogeografía, la distancia de dispersión de propágulos (Lewis, 2005) y otros procesos que demuestren la resiliencia del manglar frente a la evolución de la línea de costa (Alongi, 2008). De igual forma, es importante conocer los procesos hidrodinámicos involucrados (Mazda, 2014) como la interacción ola - vegetación, donde la configuración de la estructura está en función de las raíces, los tallos y las ramas, incluyéndose como una rugosidad del sistema debido al paisaje irregular que se presenta en la línea de costa. Su comportamiento, en función de la variabilidad de las especies, sirve como protección costera acentuando la efectividad en las zonas donde la predominancia del bosque es mayor e induciendo cambios intra e inter especies que paulatinamente modifican el paisaje y generan un ciclo de interacción entre las variables involucradas (Anderson *et al.*, 2011; Jimenez, 1980). Por esta razón dicho fenómeno se ha estado estudiando en el mundo científico desde Dalrymple *et al.* (1984), quien plantea la reducción de la altura de ola de aproximación a la línea de costa por la presencia de ecosistemas

naturales como bosques de manglar y ciénagas, de esta forma, se incluye la vegetación sumergida y emergida.

Para el conocimiento específico del fenómeno se han implementado modelos físicos y numéricos, a escala real y a escala de laboratorio; para estos últimos varios autores como Dalrymple *et al.* (1984); Mazda *et al.* (1997a, 2006); Husrin & Oumeraci (2009); Mendez & Losada (2004); Hashim & Catherine (2013); Iimura & Tanaka (2012), entre otros, han realizado diferentes parametrizaciones y simplificaciones del caso real, principalmente en la configuración de la estructura de manglar mediante un arreglo de cilindros rígidos verticales con alturas y diámetros conocidos variando su disposición (alineados y al tresbolillo), la localización de la estructura sobre fondo plano y las condiciones del flujo incidente. Hipótesis que también son aplicables a otros tipos de vegetación emergida cerca a pantanos como *S. alterniflora* y *J. roemerianus* (Ozeren *et al.*, 2009; Augustin *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2011). Dichas consideraciones están basadas en las características del flujo como altura de ola, velocidades, régimen de flujo, etc. y en la variabilidad de la configuración de la estructura de la vegetación como el crecimiento, distribución y extensión de la misma (información que puede ser recolectada en campo).

Debido a estas simplificaciones del fenómeno físico existen diversos vacíos registrados en la literatura, bien sea por su grado de complejidad o por la falta de información y monitoreo del escenario real. Algunos de estos vacíos están en función de la rugosidad del material para los cilindros, el decaimiento o aumento de la disipación total según la forma como el flujo afecte la primera línea de estructura vegetal a comparación de las líneas posteriores, la rugosidad adicional debido a los diferentes moluscos, animales y otras especies vegetales que viven albergados bajo los mangles, la influencia del transporte de sedimentos y el control de erosión en la transformación del perfil de playa con y sin manglar, la diferencia de los efectos por fondo y los efectos por la presencia de la estructura y recientemente la implementación de modelos numéricos como *openFoam* para el análisis hidráulico de la interacción ola-vegetación, dada la cantidad de información que se puede obtener conociendo las parametrizaciones y las limitaciones tanto computacionales, como de la representación del proceso.

A partir de estos vacíos, especialmente a que la pendiente del fondo no ha sido involucrada dentro del estudio de la respuesta hidráulica del manglar y el efecto de la disipación por fondo ha sido sumado de forma lineal al efecto de disipación por vegetación (Mendez & Losada, 2004), desconociendo el porcentaje de no linealidad adicional debido al efecto combinado fondo - vegetación. Adicionalmente, a que la comparación del comportamiento registrado en campo con los resultados del modelamiento físico y numérico es de vital importancia para la validación de las hipótesis mencionadas, y a la importancia de introducir dentro de los planes de gestión y manejo costeros resultados cuantitativos de la efectividad de estos ecosistemas naturales como estructuras de protección costera; este trabajo busca determinar la fuerza y el coeficiente de dragado según el régimen del flujo y la configuración del manglar bajo la metodología propuesta por Mazda *et al.* (1997a) para la recolección y el procesamiento de datos de campo; así como la implementación del modelo numérico tipo VOF (Volume of Fluid) *openFoam* (Foundation, 2015a) partiendo de un esquema a escala de laboratorio basado en la propuesta de Husrin & Strusi (2012) para el manglar y el montaje de Løvås (2000) para el esquema del fondo del canal, incluyendo el análisis la ecuación de Morrison y las deducciones introducidas por Dalrymple & Dean (1984) y Mazda *et al.* (1997a) sobre la aproximación a cilindros rígidos con información hidrodinámica, batimétrica y de la estructura del manglar, en busca de determinar la influencia lineal o no lineal de la batimetría dentro del desarrollo hidráulico del proceso físico.

Adicionalmente es importante anotar que en Colombia los bosques de manglar son reconocidos más por sus servicios ecosistémicos que por sus beneficios en temas de protección costera debido

a las actividades socio-económicas de las comunidades aledañas, registrando tasas de deforestación y degradación tanto en zonas protegidas como en zonas no protegidas, aumentando la vulnerabilidad en las zonas costeras y la necesidad de generar herramientas para su conservación, gestión y de ser factible, su restauración para el desarrollo sostenible dentro de las comunidades. Sin embargo, a nivel científico aún se tienen muchas incertidumbres sobre el papel de los ecosistemas de manglar como barreras de protección costera. Por estas razones es importante buscar metodologías o herramientas para el estudio de la dinámica biológica, física y social del ecosistema, cuyos resultados sean útiles e implementables dentro de los planes de manejo nacionales y que también permitan dar un primer acercamiento a valores cuantitativos con la información obtenida tanto del escenario real como del esquema modelado numéricamente.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar y analizar el comportamiento hidráulico del *Rhizophora mangle* mediante el uso de datos tomados en campo y de un modelo numérico parametrizado a escala de laboratorio, considerando en ambos casos aspectos estructurales de la vegetación y de la playa (como la batimetría).

Objetivos específicos

- Caracterizar la estructura del *Rhizophora mangle* y del perfil de playa, para la configuración de la malla dentro del modelo numérico.
- Analizar numéricamente la respuesta del *Rhizophora mangle* para condiciones medias del oleaje, implementando el modelo numérico OpenFoam junto con el módulo *waves2Foam* para la configuración de escenarios controlados y a escala de laboratorio.
- Analizar y caracterizar la resistencia hidráulica de la estructura de manglar *Rhizophora* frente al oleaje medio, a partir de la toma de datos en campo.
- Determinar la densidad, configuración y extensión del manglar con la información tomada en campo para evaluar la atenuación del oleaje en diferentes escenarios.
- Comparar y relacionar los resultados del modelo numérico a escala de laboratorio con el comportamiento medido en campo, con el fin de determinar las variables de mayor peso y evaluar la capacidad del manglar para disipar la energía del oleaje.

Capítulo 2

Marco teórico y generalidades

El estudio de los ecosistemas costeros ha sido abordados a nivel mundial desde diferentes enfoques, entre los que se destacan el biológico que incluye el estudio de la composición de fauna y flora, la interacción entre especies y el transporte de nutrientes, el social que involucra la interacción humana con el entorno, el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos y la transformación del paisaje en función de la población en zonas costeras, y el físico que incluye las descargas de agua dulce y salada, el transporte de sedimentos y la respuesta del ecosistema frente a eventos medios y extremos del oleaje. En la Figura 2.1 se puede observar la conectividad de los ecosistemas de manglar, coral y pastos marinos con el impacto generado por las actividades humanas de aprovechamiento de los recursos, donde la destrucción del hábitat es el primer factor que influye en la pérdida de los ecosistemas, la disminución de la protección costera, el aumento de los procesos de erosión y el cambio socio-económico de las poblaciones costeras.

De allí es importante considerar la relación entre los ecosistemas debido a los flujos de energía y materia, así como el sistema de interacciones complejas, entre los humanos, sus actividades y el medio ambiente que conforman fluctuaciones dinámicas en función de los eventos extremos, el aumento de la población y el cambio en el uso del suelo, teniendo consecuencias leves en función de los estados medios del oleaje y consecuencias drásticas en función de eventos extremos que generalmente conllevan a cambios permanentes del paisaje (Silvestri & Kershaw, 2010; Lacambra, 2015). Es por ello, que a nivel político y económico es muy importante realizar un manejo adecuado de los recursos ecosistémicos, de la forma de su explotación y tener planes de contingencia para el control de los ecosistemas y la prevención de riesgos, siendo necesaria la información integral en las zonas costeras.

Existen diferentes problemáticas socio-económicas y ambientales que incrementan la vulnerabilidad de las poblaciones costeras y el riesgo de catástrofes naturales debido a las condiciones modificadas del paisaje que lo hacen menos resistente. Entre estos factores se destacan la pobreza y ubicación en zonas de riesgo, el deterioro ambiental, la degradación de los ecosistemas naturales y las consecuencias del cambio climático como el aumento del nivel del mar, de la frecuencia y magnitud de los eventos naturales como lluvias, vientos y oleaje (Lacambra, 2015). Adicionalmente, existe un factor dominante la gestión, manejo y control de los ecosistemas, el cual es la existencia y disponibilidad de datos, ya que en el escenario latinoamericano se carece de continuidad y exactitud de series temporales y de datos básicos como la caracterización de las zonas costeras, etc. Por estas razones es necesario determinar desde diferentes enfoques, esquemas para la toma de decisión para el manejo y la planificación costera tanto de los ecosistemas como de las poblaciones aledañas.

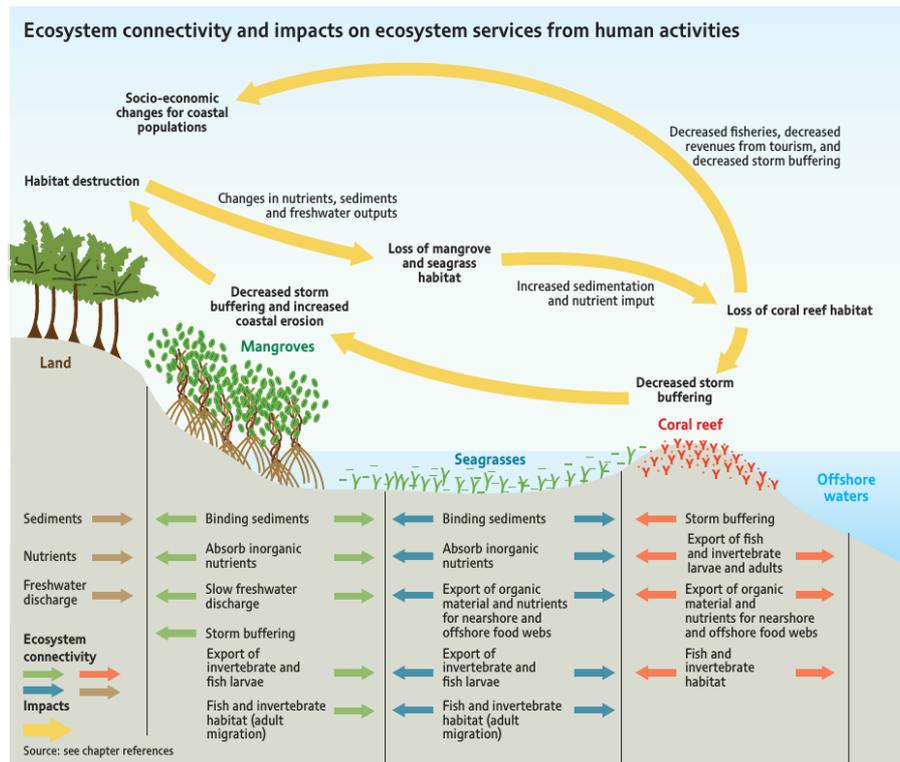


Figura 2.1: Diagrama de conectividad entre los ecosistemas de manglar, coral y pastos marinos (Silvestri & Kershaw, 2010)

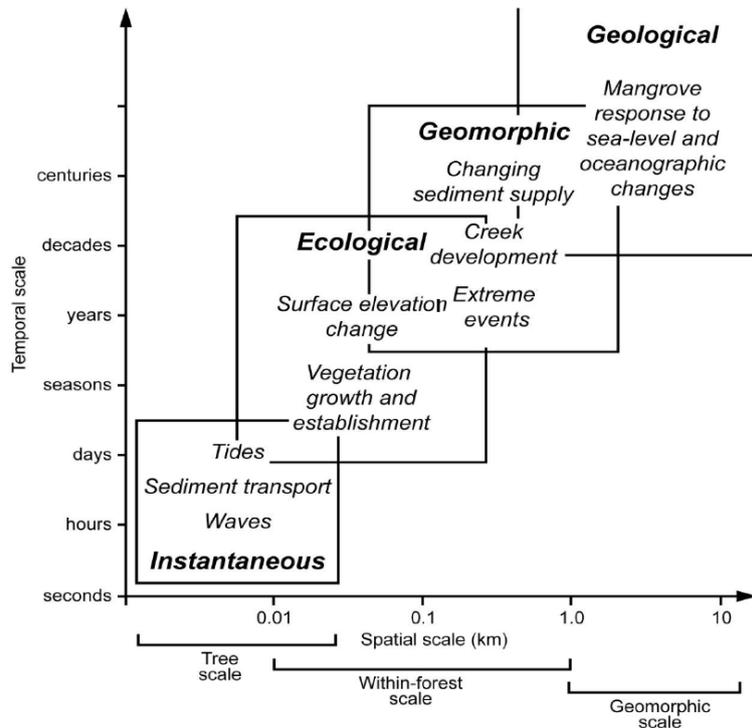


Figura 2.2: Diagrama a escala temporal de los factores que influyen en la respuesta del bosque de manglar (Spencer & Möller, 2013)

En particular, los ecosistemas de manglar son hábitats intermareales característicos de los trópi-

cos, donde se presentan diversos procesos ecosistémicos como el reciclaje de nutrientes, el refugio de peces, el transporte y acumulación de sedimentos. Esta última acción puede favorecer la protección de la infraestructura interior y de las poblaciones costeras (Silvestri & Kershaw, 2010); es decir, su papel como estructuras de protección costera es reconocido a nivel mundial pero la cuantificación de dicho nivel de protección aun es tema de debate a nivel científico ya que debe determinarse los riesgos socio-ambientales al promoverlos como barreras de protección, cuantificar su influencia en la reducción de la fuerza de las olas medias y extremas y en la estabilización y desarrollo de suelos, y su resistencia al cambio de las condiciones medias del oleaje como el aumento del nivel del mar.

Estos efectos se ven representados a diferentes escalas temporales durante el desarrollo del ecosistema. En la Figura 2.2 se puede observar el nivel de interacción en diferentes escalas espaciales y temporales, bien sea instantáneo, ecológico, geomorfológico o geológico de acuerdo a los eventos que se desarrollan en días, décadas y siglos frente a escalas de árbol y de bosque. En ésta es importante resaltar como los efectos medios del oleaje y el transporte de sedimentos interfieren en el establecimiento y crecimiento de la vegetación, así como el cambio del nivel medio del mar influye en el desarrollo del hábitat y los eventos extremos en la respuesta del manglar (Spencer & Möller, 2013).

La configuración de las diferentes especies de vegetación a nivel de la línea de costa, así como su predominancia dentro del desarrollo del ecosistema, depende de las características físicas de la zona, como el oleaje medio y extremal incidente, las corrientes marinas y fluviales, la pendiente del fondo, la configuración de la playa, el régimen de vientos y lluvias; y de las características químicas y biológicas como el balance entre agua dulce y salada, la presencia de nutrientes y factores como el oxígeno disuelto y el pH, que favorecen la supervivencia de ciertas especies. En el caso particular de los manglares, existen diversidad de especies a nivel mundial, sectorizados principalmente en la zona ecuatorial debido a las condiciones climáticas favorables para su desarrollo y extensión. Estas especies difieren en su estructura así como en la geomorfología de la zona y la interacción con el oleaje incidente (Robertson & Alongi, 1992).

Sin embargo, el esquema general de interacción dentro del ecosistema de manglar es similar entre las diferentes especies ubicadas al pie de playa y se presenta en la Figura 2.3 donde se visualizan las principales relaciones del manglar con el medio, mencionadas anteriormente.

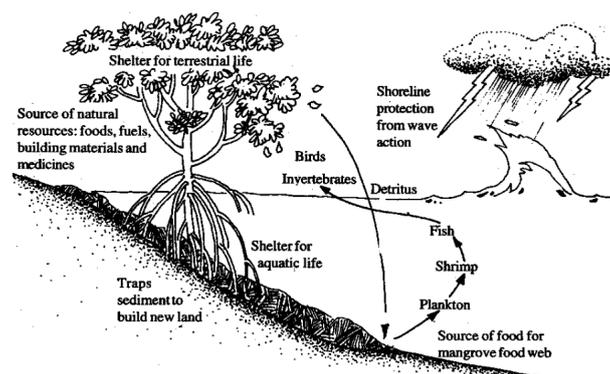


Figura 2.3: Escenario general y factores de interacción

Dado que las condiciones de la zona determinan la predominancia y la estratificación de las diferentes especies de vegetación, se decidió trabajar con la especie de manglar *Rhizophora mangle* por ser la especie que se encuentra más cercana al océano, y es la que mejor se adapta a las condiciones de salinidad presentes en esa zona, además tiene la capacidad de crecer en zonas bajas donde el agua se encuentra en continuo movimiento, con suelos de pH alto. También puede

adaptarse a zonas con variaciones amplias de precipitación (secas, húmedas y muy húmedas), generándose el mayor desarrollo estructural de la especie en las zonas de mayor precipitación, sin embargo, es muy sensible a heladas por lo que la temperatura promedio esta entre $21^{\circ}C$ y $30^{\circ}C$ (Jimenez, 1980). En Colombia esta especie crece en ambas costas, siendo las zonas más significativas las presentes en Urabá, en la cuenca del rio San Juan y el sur del pacífico entre Tumaco y Buenaventura (Álvarez León, 2003).

Morfológicamente el *Rhizophora mangle* está conformado por un tronco que se apoya en numerosas raíces aéreas en forma de zancos, arqueadas y ramificadas de textura levemente rugosa debido a un mecanismo interno para respirar en épocas de inundación, y ramas con hojas simples aglomeradas. Razón por la cual, pueden absorber energía de las olas, sirviendo de obstáculo o por la fricción generada por la rugosidad de su estructura o por factores adicionales, como la fricción del fondo y la fricción aparente generada por los *flocs* de sedimentos atrapados (Duke, 1992). Adicionalmente, debido a los procesos de interacción entre el ecosistema y el oleaje, se genera una modificación paulatina del crecimiento, densidad y distribución de la vegetación, por lo que es importante considerar adecuadamente la escala de tiempo dentro de los modelos físicos y numéricos y de los métodos para el procesamiento de la información recolectada en campo para realizar las parametrizaciones e hipótesis que permitan obtener resultados confiables y comparables con la realidad.

2.1. Fundamentos teóricos

Debido a los diferentes enfoques desde los cuales se puede abordar la temática objeto de este estudio, se presentan a continuación las ecuaciones generales y algunos métodos para la manipulación de los datos de campo, mientras que lo correspondiente al modelo numérico y consideraciones para su implementación se presentan en la siguiente sección. (Ver sección 2.2)

Como se ha mencionado, son varios investigadores los que se han dedicado a evaluar la respuesta de la vegetación costera frente a eventos medios y extremos como el Tsunami del 2004, para ello se han implementado diferentes fundamentos teóricos para el procesamiento de la información medida *in situ* y para el montaje de los modelos numéricos y físicos. En la mayoría de los análisis desde el punto físico del fenómeno, dicha respuesta se ha enfocado en el cálculo del porcentaje de disipación y la fuerza de dragado (F_D), valores que varían según las condiciones del medio y del tipo de estructura por lo que se tiene una discusión abierta en el mundo científico con el fin de determinar un patrón de comportamiento del coeficiente de arrastre que permita estandarizar el análisis del fenómeno.

La interacción entre las características estructurales de la vegetación y las olas es compleja debido a la variación en la distribución espacial de los individuos, en los diámetros de tallos, en la estructura individual de cada individuo y sus propiedades (Ozeren *et al.* , 2009) y en el caso particular del *Rhizophora mangle*, la configuración de las raíces. Dicha interacción puede ser evaluada desde la resistencia hidráulica de las estructuras naturales, la cual comprende coeficientes de dragado, inercia, coeficiente de Manning y correlaciones de los datos de campo con el número de Reynolds (Re) (Anderson *et al.* , 2011; Booij *et al.* , 1999; Mazda *et al.* , 1997a).

El comportamiento de los coeficientes de dragado e inercia está en función de las características de los árboles y de la fuerza total (F) por medio de la ecuación de Morrison (ecuación 2.1) (Husrin & Oumeraci, 2009). Donde F_D y F_M son las fuerzas de dragado e inercia, respectivamente. C_D

y C_M los coeficientes correspondientes, ρ la densidad del agua, A el área transversal al flujo, V el volumen de la estructura, u la velocidad del flujo y $\frac{\partial u}{\partial t}$ la aceleración del flujo.

$$F = F_D + F_M = \frac{1}{2}C_D\rho Au^2 + C_M\rho V\frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.1)$$

Para este estudio, en el uso de la ecuación 2.1, se asume F_M muy pequeña comparada con la F_D debido a la relación entre el diámetro de las raíces y la profundidad del agua, donde el diámetro es mucho menor a la profundidad, esta relación corresponde a la interacción de cuerpos pequeños con flujos estacionarios y sin presencia de eventos extremos. De esta forma, se tiene que para ondas relativamente altas, F_M generalmente se ignora (Dalrymple & Dean, 1984; Mendez & Losada, 2004; Vo-Luong & Massel, 2008; Suzuki & Eng, 2009), quedando F en función de F_D .

En la Figura 2.4 se observa un esquema general del modelo parametrizado donde se encuentran las diferentes variables geométricas y físicas que afectan la F_D y como, en el caso de la vegetación, la estructura a evaluar es un conjunto de objetos, generalmente cilíndricos, con diámetro y longitud conocida con los cuales se pueda obtener la variable de A con un valor representativo para todos los objetos, lo que incrementa la complejidad del análisis.

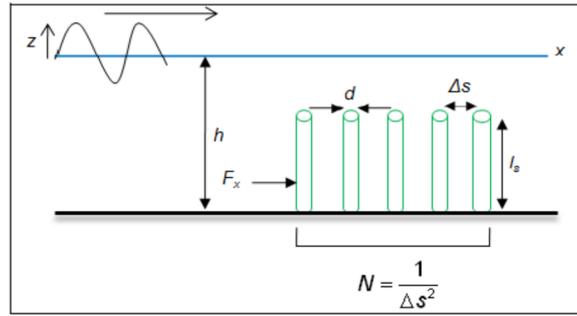


Figura 2.4: Esquema general para la ecuación de Morrison (Anderson *et al.* , 2011)

Para el uso de la ecuación de Morrison y el cálculo de las diferentes variables asociadas, se han propuesto diferentes formulaciones para calcular el porcentaje de disminución de la superficie del agua a través de la vegetación, la energía disipada y los valores de C_D empleando información recolectada en campo o mediciones de laboratorio. Mazda *et al.* (1997a) desarrollaron un método en el cual se reduce la ecuación de momento, dominada por la profundidad media para ciénagas de manglar (ecuación 2.2), en función de la aceleración del flujo, la elevación de la superficie libre y la fuerza de resistencia al flujo, a un balance entre el peralte de la superficie del agua y la F_D partiendo de que las aceleraciones, al lado izquierdo de la ecuación 2.2, son uno o dos órdenes de magnitud menores que el gradiente de superficie libre y por tanto se pueden despreciar.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} + F \quad (2.2)$$

En la ecuación 2.2, $-g\frac{\partial \eta}{\partial x}$ es la presión del agua sobre un punto x , F es la resistencia al flujo, donde la fricción del fondo puede ser despreciada debido a la densa vegetación en las zonas inundadas, quedando en función solo de F_D . Estos términos, ubicados al lado derecho de la ecuación representan el comportamiento hidrodinámico sobre un volumen de agua como función del área superficial y la profundidad inundada. Integrando estos términos sobre el volumen considerado con $\frac{\partial \eta}{\partial x}$ como el gradiente de superficie libre, L_e como la longitud efectiva de la

vegetación (ecuación 2.3) (Mazda *et al.* , 1997a) y despreciando los términos del lado izquierdo, se calcula el C_D como se presenta en la ecuación 2.4, donde I representa el gradiente de superficie libre y u la velocidad del flujo.

Mazda *et al.* (1997a) introdujeron el término de longitud efectiva de la vegetación, L_e , como una variable geométrica donde se puede incluir la configuración del manglar a estudiar, es decir, es una longitud característica calculada como la relación entre la diferencia de volúmenes de agua V_w y raíces V_m con el área proyectada perpendicular a la dirección del flujo A_p , así como se presenta en la Figura 2.5. Donde el cubo oscuro delimita el sector específico que es objeto de estudio y la diferencia de volúmenes se obtiene restando el volumen ocupado por las estructuras vegetales, i.e. el volumen de raíces y troncos dentro de dicho sector, al volumen de control de agua (Husrin & Oumeraci, 2009; Mazda *et al.* , 1997a). Este parámetro incluye información sobre la densidad, distribución y tamaño de las raíces dentro de la zona de manglar en estudio, por lo que la información recolectada en campo es muy importante.

$$L_e = \frac{V_w - V_m}{A_p} \quad (2.3)$$

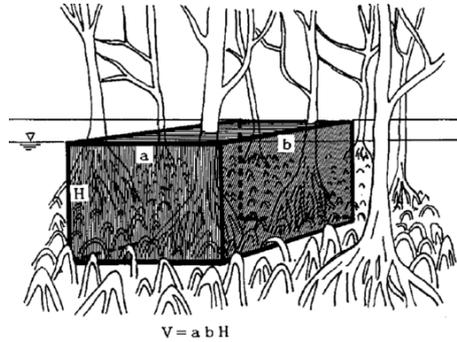


Figura 2.5: Esquema para definir L_e (Mazda *et al.* , 1997a)

$$C_D = \frac{2gI}{u^2} L_e \quad (2.4)$$

De esta forma, a partir de la recolección en campo de información tanto de la estructura de manglar como hidrodinámica del flujo incidente sobre la vegetación, se tiene una aproximación matemática para el cálculo numérico del C_D , que al ser implementada debe considerar todas las simplificaciones para su desarrollo y que la validez de las hipótesis asociadas varían dependiendo de la zona de estudio. .

Por otro lado, Dalrymple & Dean (1984) presentaron el cálculo de las fuerzas inducidas por las olas sobre pilas circulares y verticales, diferenciando en sus cálculos los correspondientes a la fuerza de dragado de los de la fuerza de inercia basándose en la relación entre el diámetro de las pilas, la profundidad de la inundación y la longitud de onda de las olas. Inicialmente, se obtiene la fuerza integrando el campo de presiones alrededor de la pila, usando la aproximación para flujo potencial con los componentes de la velocidad (ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8) y la ecuación de Laplace en coordenadas polares con solución uniforme en la vertical (ecuación 2.9), donde el flujo potencial depende de la velocidad incidente del flujo, el diámetro de las pilas y el ángulo de incidencia del campo de presiones.

$$\nabla^2\phi \simeq \frac{\partial^2\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2\phi}{r^2\partial\theta^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

Donde,

$$u_r = -\frac{\partial\phi}{\partial r} \quad (2.6)$$

$$u_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial\theta} \quad (2.7)$$

$$u_z = -\frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (2.8)$$

$$\phi(r, \theta) = u(t)r\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)\cos\theta \quad (2.9)$$

Con r como un vector en dirección radial que define un punto sobre el flujo, a el radio del cilindro de estudio, ρ la densidad del agua, u_r la velocidad radial de las coordenadas polares, u_θ la velocidad angular y u_z la velocidad sobre el eje vertical.

Adicionalmente para obtener la distribución del campo de presiones alrededor del cilindro, se aplica la ecuación de Bernoulli para flujo no estacionario con los mismos componentes de velocidad sobre dos puntos, uno en la cara del cilindro y otro alejado de este (Dalrymple *et al.*, 1984) (ecuación 2.10). Donde a y lr representan los puntos a evaluar, uno sobre la pared de la pila y otro alejado de la misma.

$$\left[\frac{p(r, \theta)}{\rho} + gz + \frac{u_r^2 + u_\theta^2}{2} - \frac{\partial\phi}{\partial t}\right]_{r=a} = \left[\frac{p(r, \theta)}{\rho} + gz + \frac{u_r^2 + u_\theta^2}{2} - \frac{\partial\phi}{\partial t}\right]_{r=lr, \theta=0} \quad (2.10)$$

Con el análisis anterior, en los puntos mencionados que caracterizan el campo de presiones y usando las aproximaciones para las ecuaciones de flujo potencial, se obtiene la distribución de presión alrededor del cilindro como un delta de presiones con 2 contribuciones, la de dragado y la de inercia. En este caso, solo se analiza completamente la F_D , la cual finalmente se obtiene integrando la presión alrededor de la superficial del cilindro, como se muestra en la ecuación 2.11. En esta ecuación, uno de los términos es calculado en frente de la pila en dirección al flujo ($0 \leq \theta \leq \theta_s$) y el otro detrás de la pila en contra de la dirección del flujo ($\theta \geq \theta_s$).

$$dF_D = r\rho u^2 \int_0^{\theta_s} (1 - 4\sin^2\theta) \cos\theta d\theta + 2rP_w \int_{\theta_s}^{\pi} \cos\theta d\theta \quad (2.11)$$

Donde u es la velocidad incidente del flujo, θ_s es el ángulo límite entre el cálculo de la presión por flujo potencial y de la presión que se supone casi constante. P_w es la presión constante bajo flujo estacionario, asumida en este caso como presión hidrostática detrás de la pila y r corresponde al radio de la pila (ver Figura 2.6)

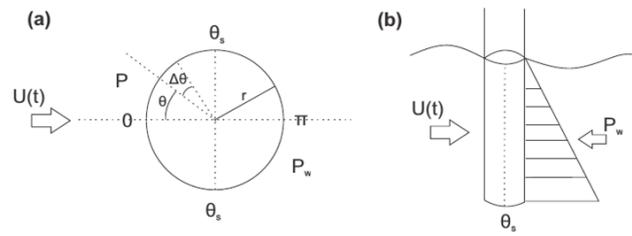


Figura 2.6: Esquema para un cilindro y el flujo incidente. (a) Vista en planta. (b) Sección transversal

Con este análisis y con θ_s como el ángulo límite sobre la pila de forma perpendicular a la dirección del flujo, es decir, $\theta_s = 90^\circ$ se resuelve la ecuación 2.11 para F_D por pila. Sin embargo, para poder comparar los resultados aplicando este método con los que se obtienen usando las ecuaciones 2.1 y 2.4 es necesario extender la fuerza aplicada por el flujo sobre las raíces medidas en campo. Para ello, se usa la variable geométrica L_e como la principal característica para representar la geometría del parche de manglar. La ecuación resultante para el cálculo de F_D con las consideraciones mencionadas es la ecuación 2.12.

$$F_D = L_e \left(\frac{r\rho u^2}{3} + \frac{r\rho gh}{2} \right) \quad (2.12)$$

Por otro lado, para implementar ambos métodos de cálculo de la F_D , es necesario conocer la velocidad incidente, la cual puede medirse en campo o extraerse de la información de los sensores de presión (WG), que es más fácil de obtener en campo y ha sido utilizada por diferentes investigadores (Ozeren *et al.*, 2009). En este trabajo, dicho cálculo se hizo a partir de la ecuación presentada por Svendsen (2006) donde se relacionan los espectros de presión, superficie libre y velocidad.

De esta forma, en el capítulo 4 se presentan los datos recolectados en la campaña de campo realizada en un parche de *Rhizophora mangle* en Islas del Rosario-Cartagena, Colombia. Donde se utilizó la metodología de Mazda *et al.* (1997a) para la recolección de datos y el análisis de los mismos empleando las ecuaciones 2.2 y 2.3. Con el fin de validar o comparar dichos resultados, se empleó el desarrollo numérico realizado por Dalrymple & Dean (1984) con las consideraciones mencionadas.

2.2. Modelación numérica

Para abordar el estudio de la respuesta de la vegetación a los efectos del oleaje mediante aproximaciones numéricas, es de gran importancia la selección idónea del modelo a calibrar e implementar debido a la complejidad del fenómeno de interacción ola - vegetación, a la configuración especial del *Rhizophora mangle*, al cambio de respuesta en función de las condiciones del entorno, de la zona de estudio y a la distribución espacial de los diferentes árboles.

Por ello, varios estudios plantean diferentes limitaciones, asumiendo simplificaciones para evaluar los efectos de la escala, la parametrización de la estructura de la vegetación y las condiciones del flujo (Maza *et al.*, 2015). A partir de éstas, en los últimos años se han desarrollado formulaciones para reproducir o representar el efecto del oleaje sobre los bosques de manglar, basados en las ecuaciones de aguas someras o en las ecuaciones de Boussinesq, considerando la formulación de Morrison (ver ecuación 2.1) para el cálculo de los coeficientes de dragado e inercia. De igual

forma Mendez & Losada (2004) incluyeron una formulación para la respuesta de la vegetación frente al oleaje, sin discriminar las propiedades de cada especie en el modelo SWAN, basada en coeficientes empíricos que deben ser calibrados pre-procesamiento, para obtener resultados reales (ver ecuación 3.15). Así mismo Suzuki *et al.* (2012) implementaron esta formulación para manglares considerando la distribución vertical más no la horizontal de los mismos.

De esta forma, también se consideran los modelos de conservación de flujo de energía, los cuales consisten en la igualdad entre los cambios de energía en puntos conocidos y la suma lineal de la disipación causada por los diferentes agentes que afectan el flujo (ver ecuaciones 3.13 y 3.14). Para ello, se incluye la formulación del coeficiente de disipación por vegetación planteado por Mendez & Losada (2004), junto con el coeficiente de disipación por fondo planteado por Alsina & Baldock (2007) (ver ecuación 3.16), ya que corresponden a los agentes a estudiar en este trabajo y aunque son formulaciones paramétricas, permiten hacer una comparación teórica de la predominancia de ambos efectos dentro del cálculo del flujo de energía total y del porcentaje de no linealidad debido a la presencia de ambos agentes, para los casos modelados y para la información recolectada en campo.

Adicionalmente, es importante considerar que estas formulaciones y aproximaciones numéricas no pueden resolver la distribución vertical del campo de velocidades o de los flujos turbulentos y su predicción del campo de presiones no es exacta, ya que el comportamiento del fenómeno, en especial bajo olas de tsunami no es hidrostático (Maza *et al.*, 2015); factores que pueden ser determinantes en la estimación cuantitativa de la protección costera que brindan los bosques de manglar, ya que la variación en los rangos de valores como el ascenso del nivel medio del oleaje y los porcentajes de disipación influye tanto en la estimación de la capacidad del ecosistema para mitigar el efecto del oleaje como en la asignación de umbrales máximos y mínimos para diseño de las estructuras.

En busca de dar solución a todas las variables del flujo necesarias para realizar una estimación de la disipación generada por la presencia del obstáculo y tener una mejor representación del flujo alrededor de éste, donde se consideren tanto las componentes verticales del flujo como los efectos turbulentos generados por la presencia del obstáculo (Maza *et al.*, 2013). Se ha implementado el uso de las ecuaciones Reynolds–Averaged Navier Stokes (RANS) (ecuaciones 2.13 a 2.15), dado las ventajas para obtener los perfiles de presión y velocidad en 3 dimensiones. Su solución, sin necesidad de hacer suposiciones iniciales como en otros modelos numéricos, ha extendido el creciente uso de las aproximaciones Eulerianas frente a la Lagrangianas (Higuera *et al.*, 2013b). Sin embargo, su principal inconveniente es el alto costo computacional que demanda su implementación, el cual incrementa con la precisión de la malla y de los resultados esperados.

Dado lo anterior, es muy importante realizar una selección idónea del modelo numérico a implementar según el enfoque del trabajo, teniendo en cuenta las demandas computacionales, los resultados esperados y la inclusión de la estructura de manglar dentro de este.

2.2.1. Modelo seleccionado y consideraciones generales

Para el desarrollo del presente trabajo, teniendo como eje principal la relación existente entre el oleaje y las características estructurales del *Rhizophora mangle*, se busca implementar un modelo numérico que permita representar el flujo bajo las condiciones y variaciones necesarias para determinar el C_D y el porcentaje de disipación del oleaje. Para ello se utiliza un modelo que contiene un método para solucionar el flujo Newtoniano en la superficie libre a través de las ecuaciones RANS (ecuaciones 2.13 a 2.15), junto con el método del volumen de fluido (VOF

por sus siglas en inglés), y que en los últimos años ha ganado popularidad en aplicaciones para ingeniería e investigación (Jacobsen *et al.*, 2012). Éste, corresponde a la librería de libre acceso *openFoam*, por sus siglas en inglés (Open Field Operation and Manipulation) (Foundation, 2015a), que a través de sus solucionadores para flujo en 2 fases permite simular los campos de presión y velocidad tanto para el aire como para el agua y la capa de interacción agua-aire.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho u u^T] = -\nabla p^* - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot [\mu \nabla u + \rho \tau] + \sigma_T \kappa_\gamma \nabla \gamma \quad (2.13)$$

La ecuación 2.13 se acopla con la ecuación de continuidad para flujo incompresible presentada a continuación (ecuación 2.14).

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2.14)$$

Donde, u es el campo de velocidades (u, v, w) , p^* es la presión adicional a la hidrostática, ρ es la densidad del fluido que es función del contenido aire-agua en las celdas de computo, g la aceleración gravitacional, μ es la viscosidad dinámica molecular, κ es la energía cinética turbulenta por unidad de masa, ∇ es $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$ con $x = (x, y, z)$ siendo las coordenadas cartesianas, σ_T el coeficiente de tensión superficial, κ_γ la curvatura superficial, γ es el campo escalar que define la trayectoria del fluido y se representa con 0 para el aire, 1 para el agua y los valores intermedios corresponden a una mezcla de fluidos; su distribución se calcula mediante la ecuación de advección (Ver Jacobsen *et al.* (2012)) y τ es el tensor de esfuerzos de Reynolds (ecuación 2.15)

$$\tau = \frac{2}{\rho} \mu_t S - \frac{2}{3} \kappa I \quad (2.15)$$

Con S como el tensor de velocidad de deformación y μ_t la viscosidad dinámica turbulenta obtenida a través de la inclusión de modelos turbulentos (e.g. $\kappa - \epsilon$, $\kappa - \omega SST$ y LES) (Jacobsen *et al.*, 2012)

Adicionalmente, se puede expresar la variación espacial de cualquier propiedad del fluido, como la viscosidad μ y la densidad ρ a través de la siguiente ecuación de ponderación, donde ϕ puede ser cualquier cantidad.

$$\phi = \gamma \phi_{agua} + (1 - \gamma) \phi_{aire} \quad (2.16)$$

OpenFoam es un código de la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) robusto y avanzado que usa mallas estructuradas y no estructuradas con valores de celda centrados, basado en la solución de la ecuación de transporte (Verschaeve & Pedersen, 2014). Este código es ampliamente utilizado y al ser libre, permite generar modificaciones en las diferentes librerías según las necesidades del usuario, ejercicio que se facilita por su lenguaje de programación (C++), que también es ampliamente utilizado. Sin embargo, en relación a los propósitos específicos de la ingeniería costera, aunque pueda solucionar flujo en dos fases con diferentes modelos de turbulencia, no está adaptado y carece de las condiciones de contorno para la generación y absorción de olas (Higuera *et al.*, 2013b).

Dado lo anterior, varios investigadores han desarrollado e implementado dentro del *openFoam* herramientas adicionales con condiciones de contorno que permiten la generación del oleaje y la absorción aguas abajo con y sin zonas de relajación, *waveFoam* (Jacobsen *et al.*, 2012) e *IHFoam*

(Higuera *et al.* , 2013a,b) respectivamente. Estas herramientas son una versión modificada del *interFoam*, originario del *openFoam* donde se puede trabajar con flujo incompresible, que es aplicable a la mayoría de los problemas de ingeniería costera (Maza *et al.* , 2015) y como cualquier esquema de *openFoam* extienden el dominio computacional en la vertical, generando demandas computacionales que requieren ejecutarse en paralelo. Además, permiten simular las condiciones medias y extremas del oleaje a escala de laboratorio, ya que la generación del oleaje y las condiciones de las zonas de absorción están esquematizadas de acuerdo a las condiciones típicas de un canal de oleaje.

De esta forma, para emplear alguno de estos modelos es necesario tener como condiciones iniciales un esquema a escala de laboratorio con la configuración del fenómeno que se desea estudiar a una escala de trabajo acorde al escenario real, donde se consideren los efectos de borde y de ser posible se validen los resultados del modelo con experimentos reales.

Los modelos mencionados, acoplados a las características necesarias para el estudio de la ingeniería costera tienen diferente configuración y opciones para la inclusión de los parámetros del oleaje (H_s y T_p), el esquema de oleaje (monocromático, bicromático y espectral) y la teoría de solución del oleaje (Stokes de primer orden, quinto orden, teoría cenoidal y onda solitaria), entre otras. En particular, el modelo *waveFoam* permite incluir el oleaje espectral utilizando solo los parámetros del espectro, mientras que el *IHFoam* requiere incluir la amplitud y el periodo de cada una de las frecuencias relacionadas en el espectro, haciendo que el procedimiento sea tedioso.

En la presente investigación se trabaja con la herramienta desarrollada por Jacobsen *et al.* (2012) disponible de forma libre para las comunidades que trabajan en ingeniería costera y marítima, en éste se modela con precisión la propagación y el rompimiento de las olas, donde cada celda de computo adyacente a las condiciones de borde está en uno de los 3 estados, completamente sumergido (mojado), fuera del agua (seco) o en la interfaz, según lo cual se define su forma de cálculo, es decir, las condiciones de frontera para las caras mojadas, se calculan analíticamente según la teoría de ondas elegida y para las caras en interfaz se calculan a través de una aproximación lineal utilizando métodos geométricos simples (Jacobsen *et al.* , 2012).

De igual forma, *waves2Foam* incluye zonas de relajación en las fronteras de entrada y salida del flujo para evitar la reflexión de las ondas en el dominio computacional, contaminando los resultados de forma que se generen soluciones divergentes. En el trabajo de Jacobsen *et al.* (2012) se explica mejor las consideraciones asumidas y como se implementan las zonas de relajación dentro del lenguaje de programación C++.

Aunque los modelos con ecuaciones RANS generen mejores resultados por su capacidad de representar el flujo en las 3 dimensiones y que en particular *waves2Foam* permite caracterizar el flujo en un canal de oleaje incluyendo oleaje espectral y monocromático bajo diferentes teorías de ola. Las simplificaciones relacionadas al escalar y parametrizar la estructura siguen siendo estudiadas, y son parámetros fundamentales para la obtención de resultados comparables con la realidad. Razón por la cual la forma de implementar la estructura del manglar y del fondo debe incluirse en una malla adecuada, considerando las restricciones del número de Courant, el cálculo de los errores residuales, las unidades de pared y las coordenadas para el mallado (zeta o sigma).

De esta forma, la implementación del modelo en las simulaciones del cálculo de la disipación y de la fuerza de dragado ejercida por la presencia de la estructura del *Rhizophora mangle* se realizó acorde a los resultados esperados, es decir, se hizo una calibración del modelo numérico y

se verificó su comportamiento comparándolo con resultados reales de un experimento en laboratorio. A partir de allí se incluyeron las variaciones de la malla relacionadas a la estructura de la vegetación según los resultados obtenidos por Husrin & Oumeraci (2009), con lo cual se calcula el C_D y se comparan los resultados de la disipación por fondo con y sin la estructura. Además, se realizaron los cambios de la pendiente del fondo requeridos para la solución al problema planteado y se hicieron las comparaciones del C_D de acuerdo a las pendientes de fondo.

Los resultados obtenidos con la implementación de este modelo numérico, permiten comparar de forma individual los términos de la ecuación de flujo de energía, de forma que se puede determinar el porcentaje de no linealidad existente en los efectos por fondo y por vegetación. Verificando las sub y sobre estimaciones existentes dentro de las ecuaciones paramétricas para los coeficientes de disipación y la influencia de estos 2 agentes dentro del efecto total debido a la presencia del manglar dentro del flujo.

Capítulo 3

Cálculo de la respuesta del manglar usando un modelo numérico

Para determinar la respuesta de las olas ante la presencia de la vegetación como obstáculo, mediante el cálculo del C_D , la F_D y el porcentaje de disipación utilizando un modelo numérico donde se tenga conocimiento de los campos de velocidad y presión a lo largo de la malla y en especial en la zona de localización del manglar, se emplea, como se mencionó antes el modelo de libre acceso *openFoam* (Foundation, 2015a), con la librería de *waves2Foam* (Jacobsen *et al.*, 2012). Con lo que se obtiene el nivel de la superficie libre en los puntos asignados por el usuario, al igual que la fuerza total ejercida por el conjunto de cilindros montados en la malla de trabajo, donde su post-procesamiento se hace con el lenguaje de programación interpretado de libre acceso *Python* (Foundation, 2015b).

Es importante también, que para el montaje del esquema dentro del modelo numérico, se realicen adecuadamente las consideraciones de escala y mallado según el esquema de trabajo, las restricciones numéricas del modelo y la definición de los casos a simular; ya que estos últimos determinan el diámetro mínimo y máximo de acuerdo a las fuerzas que se deseen evaluar y a las que se deseen despreciar (ver figura 3.6).

En este capítulo se busca calcular las variables mas significativas en la determinación de la respuesta del manglar frente al oleaje, como el C_D y los coeficientes de disipación asociados a la presencia de la pendiente del fondo y de la vegetación. Estos resultados, podrán ser comparados de forma cualitativa con la información de las mediciones en campo, con el fin de determinar el comportamiento de este tipo de vegetación costera bajo diferentes condiciones de estudio. Sin embargo, para hacer comparables los resultados de campo con los de una modelación numérica debe considerarse que la información recolectada en campo depende de variables, tanto de la zona de estudio como de los equipos y el personal de trabajo, mientras que el modelo numérico simula unas condiciones controladas y sus resultados dependen de la calidad de la información suministrada por el usuario al modelo, donde las limitaciones son la simplificación de la estructura para que su mallado sea más sencillo, y la calibración del modelo para garantizar la validez de los resultados obtenidos.

De esta forma, con la información mencionada en el capítulo 2 se implementa entonces la parametrización de Husrin & Oumeraci (2009) para la estructura de *Rhizophora stylosa* escalada 4 veces más de su tamaño original para satisfacer las condiciones planteadas en las ecuaciones 3.8 y 3.9, para solo tener en cuenta el C_D en el análisis de los resultados. De igual forma, se calibra el modelo con la información suministrada por Tang *et al.* (2015) y que se basa en

el trabajo de Løvås (2000). Esta información también sirvió de base para Mendez & Losada (2004). Posteriormente, se determinan los casos a simular en el modelo, definiendo H_s y T_p para oleaje monocromático y se varía la pendiente original de trabajo ejecutando los mismos casos, información importante para caracterizar la disipación por fondo y por vegetación.

3.1. Metodología

En el siguiente esquema (Figura 3.1) se presenta de forma consolidada la metodología que se implementó para el uso del modelo *openFoam* y de la librería *waves2Foam* con la determinación de las condiciones de contorno iniciales (α , U , $p - rgh$, ρ , κ , ω), la definición de los esquemas de solución (librerías *fvSchemes* y *fvSolution*), la selección de la teoría del oleaje según el caso planteado, la zona y tipo de relajación y su inclusión dentro del archivo *waveProperties.input*. De igual forma, se incluyen la calibración del modelo con un esquema real montado en laboratorio, los sensores de superficie libre virtuales, la definición del tiempo de simulación, número de Courant y rangos del deltaT mediante la modificación del archivo *controlDict*. Luego, con la configuración del modelo validada, se modifica la malla para la inclusión de la estructura de manglar mediante la modificación del archivo *snappyHexMesh* y se simulan los casos con y sin manglar, incluyendo el cálculo de la fuerza para los casos con manglar mediante la modificación del archivo *controlDict*.

De igual forma, se debe configurar la simulación en el *cluster* según la disponibilidad de éste para ejecutar los trabajos en varios procesadores, para lo cual se debe preparar el caso mediante los comandos *decomposePar* y *reconstructPar*. Ya con la información final de la simulación, se verifican la continuidad y los errores residuales y se procede a calcular las velocidades en los perfiles que el usuario desee mediante la modificación del archivo *sampleDict*. Finalmente, con el *script* montado en el lenguaje de programación *Python* se leen y procesan los datos de superficie libre, velocidad y fuerza según sea el caso, con los cuales se obtienen las variables buscadas, C_D , H_s , R_e y K_C .

En la Figura 3.1 se especifica el orden de los comandos necesarios para ejecutar una simulación completa desde la terminal del *cluster*, estos están indicados de 1 a 7 en círculos verdes, mientras que aquellos que tienen la nomenclatura *ad* corresponden a pasos adicionales para verificar que las condiciones del modelo numérico se cumplan de tal forma que los resultados obtenidos sean confiables y para extraer información de todas las carpetas que se obtienen de una corrida, como un perfil de velocidad. De igual forma, se resaltan en rojo las variaciones que se incluyen para los casos con manglar.

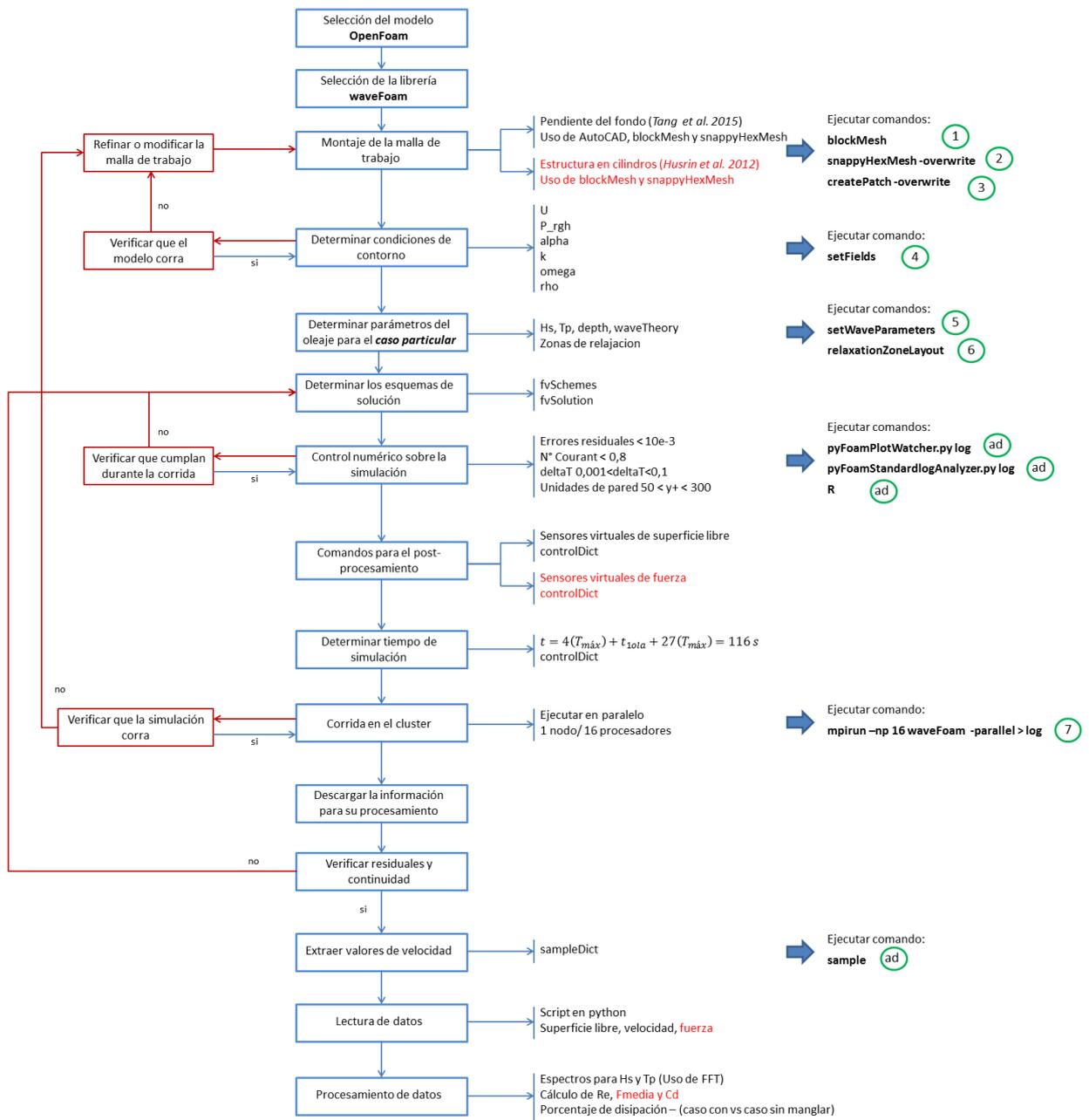


Figura 3.1: Metodología implementada

3.2. Calibración del modelo numérico

Como ya se mencionó, la calibración del modelo numérico se realizó a partir de la información consignada en Tang *et al.* (2015), donde se presenta la evolución de la altura de ola para 8 sensores en un tramo de 22 m de un canal de oleaje de 40 m. Esta información fue recolectada por Løvås (2000) para su trabajo de investigación, en el cual realizaron experimentos para la propagación de la ola bajo un falso fondo con una pendiente de 1,96° aproximadamente (1:30), considerando casos con y sin vegetación. De esta forma, se tiene vegetación costera rígida

parametrizada como cilindros equidistantes de $0,025\text{ m}$ de diámetro y altura de $0,20\text{ m}$. En una longitud de $7,26\text{ m}$ a lo largo de la pendiente del canal, para una densidad de 1200 und/m^2 (Tang *et al.*, 2015). De los 4 casos estudiados por Tang *et al.* (2015) para validar su modelo numérico de disipación del oleaje, en zonas con bajas pendientes en presencia de vegetación, se utilizó el caso 1 sin vegetación, ya que la configuración realizada por Løvås (2000) no es comparable con la estructura de manglar que se introduce dentro del modelo numérico; esto, como base para la calibración del modelo *waves2Foam*, de acuerdo a las necesidades del presente trabajo. Los resultados obtenidos para H_s de Løvås (2000) para este caso corresponden al análisis de la información de los sensores para las condiciones iniciales presentadas en la Tabla 3.1. Dichos resultados se presentan en la Figura 3.2 para los casos con y sin vegetación.

Tabla 3.1: Condiciones iniciales - Caso para calibración del modelo

<i>Caso</i>	<i>Teoría de olas</i>	<i>Gamma</i>	H_s <i>m</i>	T_p <i>s</i>	h <i>m</i>
1	Espectral - Jonswap	3,3	0,18	3,5	0,69

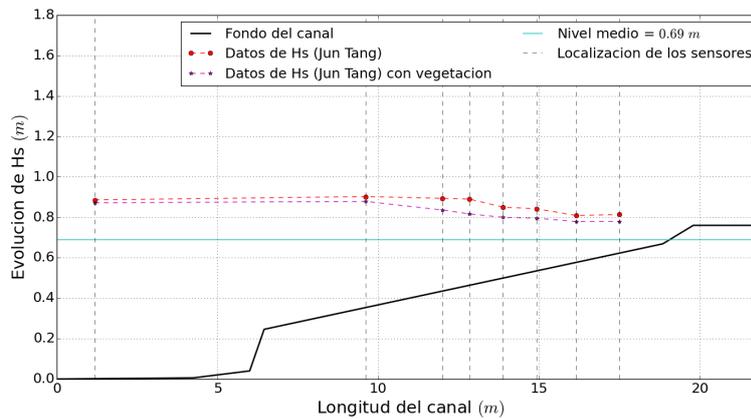


Figura 3.2: Resultados caso Løvås (2000) (Tang *et al.*, 2015)

En la Figura 3.2 la línea roja corresponde a los resultados sin presencia de manglar, es decir, a la información con la cual se realizará la calibración del modelo numérico. Ésta información es poca debido a que los experimentos fueron realizados por otro investigador diferente a quien la facilitó y no se conoce con exactitud la cantidad de casos experimentales, el rango de los mismos y las condiciones exactas para la obtención de los resultados finales. Adicionalmente, es importante considerar que para realizar la validación de un modelo tan robusto lo ideal sería tener mayor número de casos y ejecutarlos dentro de un canal de oleaje, como por ejemplo el existente en el laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas, para tener conocimiento exacto del escenario completo controlado.

Sin embargo, la calibración del modelo numérico se ejecutará con base en las condiciones mencionadas en la Tabla 3.1, ya que está fue la única información disponible a la que se tuvo acceso cuando se realizó la calibración del modelo numérico. De esta forma se realiza un proceso riguroso en la selección del tamaño de malla, condiciones iniciales del esquema numérico y representación de los valores de superficie libre y H_s , ya que existen diferentes limitaciones para la ejecución de los ensayos físicos y restricción de tiempo para el montaje en el modelo numérico y la corrida de los diferentes casos. La calibración será validada a partir del cálculo de los errores respecto a los valores de H_s para este caso.

De esta forma, se configuró la malla en el modelo numérico de acuerdo al falso fondo presentado en la Figura 3.2 donde el tamaño de las celdas en cada eje se determinó partiendo de la ecuación del número de *Courant* y teniendo en cuenta la velocidad máxima obtenida de un caso piloto y un valor de paso de tiempo dentro de los límites considerados. Ver ecuación 3.1, donde $\Delta_{x,y,z}$ corresponde al tamaño de la celda en cada uno de los ejes, Δ_t es el valor considerado para el paso de tiempo, $V_{x,y,z}$ es la velocidad máxima en cada uno de los ejes y C es el número de *Courant*.

$$\Delta_{x,y,z} = \frac{\Delta_t V_{x,y,z}}{C} \quad (3.1)$$

Posteriormente, fue ajustado el tamaño de las celdas según la precisión deseada en cada uno de los ejes, considerando como coordenadas de trabajo las coordenadas zeta dado que éstas, al cortarse según la geometría del canal no generan tanto ruido numérico como las sigma, que se van acomodando a la geometría, haciéndose más finas en la zona de mayor pendiente. Después de realizar varios casos de prueba variando el tipo de coordenadas a implementar y el tamaño de celdas, se determinó trabajar con un tamaño de celda de $0,0147m$ en el eje horizontal (x), $0,025m$ en el eje transversal (y) y $0,015m$ en el eje vertical (z), para un total de 1500 celdas en el eje horizontal, 40 en el eje transversal y 100 en el eje vertical; que representan adecuadamente las condiciones con y sin obstáculos.

Con ésta información se configuró un caso con las condiciones iniciales presentadas en la Tabla 3.1 para un número de *Courant* de 0,8 y un tiempo total de simulación máximo de 116s correspondiente al tiempo que demora una ola en recorrer todo el canal ($7,0 s$ para $T_p = 3,5 s$), más un periodo de calibración del modelo numérico de $4 * T_{max}$ aproximadamente ($14,0 s$) y el tiempo para tener una muestra significativa de olas para tener los 1024 datos necesarios para trabajar con la *FFT*, este tiempo es de $27 * T_{max}$ aproximadamente ($94,5 s$) y esta en función de la configuración del modelo, donde se especifica el paso de tiempo en el cual escribe las mediciones. Las condiciones de frontera se plantearon de acuerdo al modelo *waves2Foam* para la entrada al canal (*waveVelocity* y *waveAlpha*) y para las demás, de acuerdo a las consideraciones físicas de las variables *alpha*, *U*, *p - rgh*, *rho* y del modelo *openFoam*.

También, como se presenta más adelante, se trabajó con un esquema laminar y uno turbulento dada la robustez del modelo y a que las condiciones del trabajo sugieren hacer las simulaciones bajo cualquiera de los esquemas turbulentos implementados dentro del modelo numérico. Las diferencias encontradas en estas simulaciones se presentan en las Figuras 3.3 y 3.4 y el análisis de los errores en la Figura 3.5.

3.2.1. Flujo laminar vs Flujo turbulento

Para realizar la calibración del modelo con el caso descrito previamente, es necesario también definir las propiedades de turbulencia con las que trabajará el *openFoam*, en éste caso se ejecutaron los tipos laminar y RASmodel para $\kappa - \omega SST$, que es el más utilizado en la simulación de canales de oleaje (Maza *et al.*, 2015; Higuera *et al.*, 2013a,b), esto con el fin de definir cuál es el mejor esquema para trabajar los casos de disipación por presencia de manglar, considerando también que la literatura y otras investigaciones, sugieren el uso de esquemas turbulentos en modelos tipo VOF y para casos de oleaje, ya que la interacción del flujo con los elementos del canal debe ser simulada de forma tal que se capturen los movimientos caóticos que se pueden calcular a partir del uso de este esquema. Además, el fenómeno turbulento es dominante y genera disipación, mezcla y difusión en el campo de presión y puede caracterizar la dinámica del flujo a

partir de los términos, convectivo y no estacionario en las ecuaciones eulerianas (Wilcox, 1993). De ésta forma, se tiene un caso para el esquema laminar y dos para el turbulento, con el objetivo de ver las diferencias en la superficie libre medida en cada uno de los 8 sensores y comparar los valores de H_s con los resultados de Løvås (2000).

El modelo de turbulencia seleccionado, el $\kappa - \omega SST$ es un modelo de 2 ecuaciones, que incluye una ecuación para la longitud efectiva turbulenta, la cual puede ser empleada para predecir las propiedades turbulentas de un flujo, sin tener un conocimiento previo de la estructura turbulenta (Wilcox, 1993). Este modelo combina el transporte de esfuerzo cortante (shear stress transport *SST*) con el uso de las formulaciones del modelo $\kappa - \omega$ en las partes adyacentes a la capa limite, haciéndolo utilizable a través de la sub-capa viscosa, por lo que este modelo puede ser utilizado como modelo de turbulencia Low-Re sin ninguna función de amortiguación adicional. También, se combina con el modelo $\kappa - \epsilon$ de forma tal, que la formulación *SST* cambia en este segundo modelo para la corriente libre, evitando problemas de sensibilidad comunes en el modelo $\kappa - \omega$ (Menter, 1993). El esquema $\kappa - \omega SST$ es muy utilizado por su buen funcionamiento con gradientes de presión adversos y separación de flujo, situación particular de los canales de oleaje (Higuera *et al.*, 2013a).

Para la inclusión de los efectos turbulentos, se utilizaron 2 escenarios ($\kappa - \omega SST1$ y $\kappa - \omega SST2$), en el primero los valores iniciales para la energía cinética turbulenta (κ) y la disipación por unidad de energía cinética turbulenta (ω) fueron calculados a partir de la velocidad inicial, el número de Reynolds y la profundidad de agua en el canal para el caso laminar. En el segundo, se utilizaron los valores que por defecto trae el modelo *openFoam* para las variables de κ y ω con el fin de verificar la sensibilidad en la respuesta del modelo según los valores iniciales, estos valores se presentan en la Tabla 3.2.

Para calcular los valores iniciales, se utilizaron las relaciones auxiliares del modelo $\kappa - \omega SST$ (ecuaciones 3.2 a 3.6). Donde, l' es la longitud efectiva turbulenta que se calcula en función de h que es la profundidad del agua en el canal, en este caso se asume la profundidad del flujo incidente dado que esta varía a lo largo de todo el canal por la configuración del fondo. u es la velocidad media del caso laminar.

$$l' = 0,07 \frac{h}{2} \quad (3.2)$$

$$I \simeq 0,16 R_e^{-1/8} \quad (3.3)$$

$$\kappa = \frac{3}{2} (uI)^2 \quad (3.4)$$

$$\epsilon = (0,09)^{3/4} \frac{\kappa^{3/2}}{l'} \quad (3.5)$$

$$\omega = \frac{\epsilon}{0,09\kappa} \quad (3.6)$$

Con lo anterior, en la Figura 3.3 se presenta la evolución de la superficie libre en cada uno de los sensores para los casos mencionados, el laminar identificado con línea azul, $\kappa - \omega SST1$ con línea negra y el $\kappa - \omega SST2$ con línea verde. De igual forma, se presenta en la Figura 3.4 los valores calculados de H_s .

En la Figura 3.3 se puede observar una notable diferencia entre las series de superficie libre, donde las correspondientes a los casos turbulentos se mueven en un rango más bajo que la del caso laminar, debido a los procesos de disipación y mezcla asociados. De igual forma estas series, para los casos turbulentos representan mejor los picos y los valles, demostrando la importancia de considerar dicho esquema para la caracterización de la dinámica del fluido. Ésto es importante debido a que en la configuración de los casos a estudiar se considera un obstáculo conformado por cilindros rígidos, donde el flujo a su alrededor será mejor representado a través del esquema turbulento.

Para el caso de los escenarios turbulentos se tiene que al comparar las líneas negras y verdes, en los 8 sensores se visualiza un comportamiento muy similar en la superficie libre, donde la línea verde sobresale en los picos y en los valles, generado un rango de variación mayor, notable entre los segundos 60 y 80.

Tabla 3.2: Valores iniciales de κ y ω

<i>Caso</i>	κ	ω
Valores calculados	0,0140	8,980
Valores por defecto	0,0001	0,003

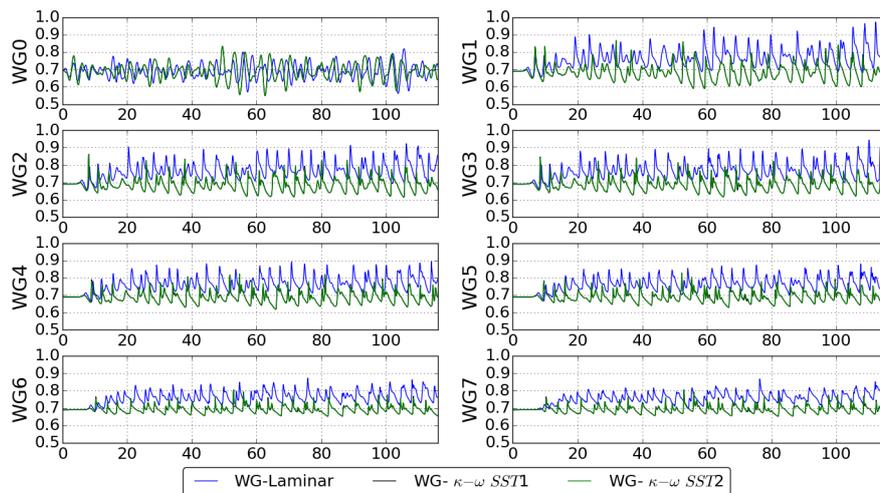


Figura 3.3: Evolución de la superficie libre para el caso laminar, $\kappa - \omega SST1$ y $\kappa - \omega SST2$

Al procesar las series de superficie libre, se tienen para todos los casos, los valores de H_s con los cuales se procede hacer un análisis de errores para verificar cuál de los 3 casos representa mejor los resultados obtenidos por Løvås (2000), y los procesos físicos asociados a la interacción flujo - estructura. En la Figura 3.4 se presentan de forma comparativa, los resultados para el caso laminar (línea azul), el caso $\kappa - \omega SST1$ (línea negra), el caso $\kappa - \omega SST2$ (línea verde) y para los valores del caso de Løvås (2000) (puntos rojos). Donde los 2 primeros esquemas representan de forma muy aproximada los resultados del caso de Løvås (2000), siendo más cercano el caso laminar, ya que en el turbulento, así como se visualizó en el comportamiento de la superficie libre (Figura 3.3), se registra una mayor disipación en los últimos 6 sensores, debido a su comportamiento dinámico y a las consideraciones teóricas previamente expuestas. El tercer esquema, tiene valores de H_s más bajos que los correspondientes al esquema turbulento con valores calculados, al laminar y por ende a los resultados de Løvås (2000), este comportamiento

se debe a que los procesos de disipación y mezcla son función de los valores iniciales de κ , ω y ϵ .

Con lo anterior, es claro que para emplear el esquema turbulento $\kappa - \omega SST$ se debe considerar el cálculo de los valores iniciales, ya que a partir de éstos el modelo calcula la disipación, la mezcla y la difusión del campo de presión, así como la caracterización dinámica del fluido según las condiciones iniciales de cada caso en particular. Además la consideración adecuada de los flujos turbulentos juega un papel importante en la estimación de la capacidad real de protección que puede tener un manglar y ayuda en la simplificación de la descripción detallada de la geometría compleja del mangle mediante la caracterización del comportamiento medio del flujo dentro de la vegetación con las propiedades del volumen de control (Maza *et al.*, 2015).

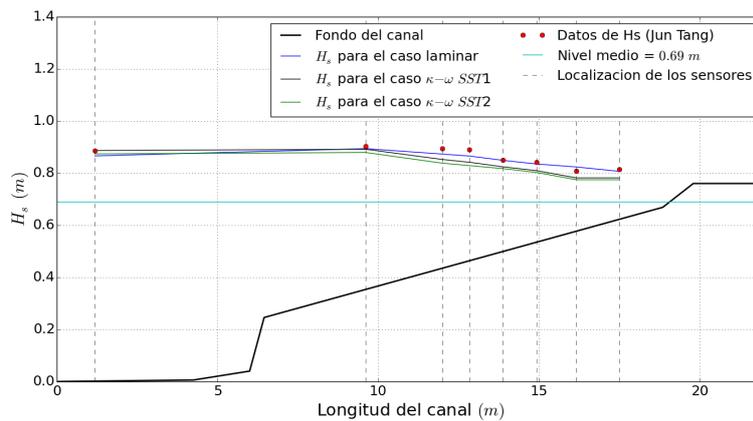


Figura 3.4: Resultados H_s para el caso laminar, $\kappa - \omega SST1$ y $\kappa - \omega SST2$

De ésta forma y considerando las ventajas de trabajar con el esquema turbulento, teniendo en cuenta los resultados previamente expuestos, donde visualmente el esquema laminar arroja resultados más aproximados y sabiendo que el uso de un solo caso para hacer la calibración del modelo puede ser poca, en la sección 3.2.2 se presenta el análisis de errores asociado a los resultados obtenidos.

Este procedimiento es necesario para poder corroborar la información presentada y configurar el caso idóneo para la calibración del modelo numérico, el cual se realiza a partir de los valores obtenidos por Løvås (2000) para los 2 casos turbulentos y el caso laminar considerados. A partir de estos errores se puede determinar un grado de validez de la calibración presentada y por ende de los resultados obtenidos para los casos con y sin manglar.

3.2.2. Cálculo de errores

Para determinar la validez de los casos evaluados anteriormente, es necesario realizar un análisis de error, a través de la comparación entre la altura de ola significativa, calculada con las mediciones de superficie libre en cada uno de los 3 casos expuestos, contra los resultados obtenidos por Løvås (2000) y presentados en Tang *et al.* (2015), que es el caso básico para la calibración del modelo numérico. Con ello se busca garantizar que la información obtenida del mismo sea válida para las aplicaciones posteriores.

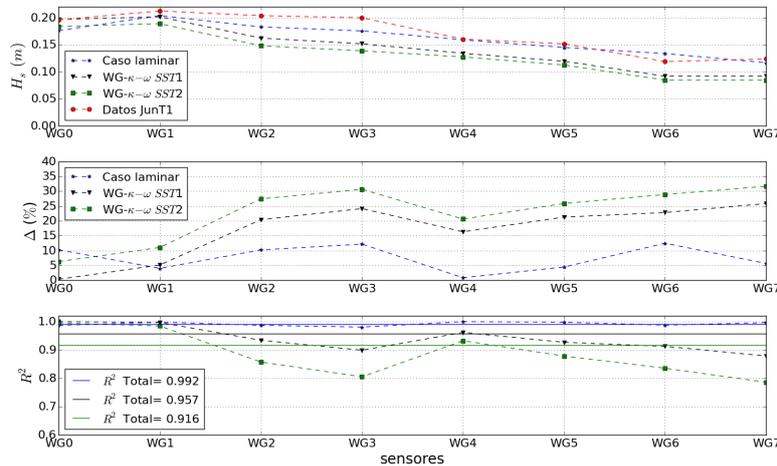
Existen diferentes metodologías para realizar el cálculo del error relativo y absoluto según sean las consideraciones, lineales o de orden superior y el sistema que se esté estudiando. En éste trabajo, se consideraron el coeficiente de determinación (R^2) relativo y absoluto, el error medio

absoluto (MAE por sus siglas en inglés) (Willmott *et al.*, 1985; Sutherland *et al.*, 2004a), el error cuadrático medio ($RMSE$ por sus siglas en inglés) (Willmott *et al.*, 2012) y el índice de Willmott (Willmott *et al.*, 1985, 2012). Todo ello en busca de tener un soporte estadísticamente robusto para la implementación del modelo *openFoam* en el análisis de la eficiencia de los manglares como estructuras disipadoras de energía, y en particular para validar la configuración del caso realizada con el espaciamiento de malla y las condiciones iniciales definidas. Los errores obtenidos, para cada uno de los 3 casos presentados anteriormente se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Calculo de errores para la calibración del modelo

<i>Caso</i>	R_T^2	MAE	$RMSE$	I_w
Laminar	0,9915	-0,0093	0,0002	0,9906
$\kappa - \omega SST1$	0,9569	-0,0271	0,0009	0,9775
$\kappa - \omega SST2$	0,9160	-0,0373	0,0016	0,9651

Los valores obtenidos por las diferentes metodologías de análisis de error empleadas, varían de forma tal que los valores que tienen un mejor ajuste, como era de esperarse, son los correspondientes al caso laminar, donde para el coeficiente de determinación absoluto cuyo valor optimo es 1, se tiene una aproximación a los datos reales de cerca del 99 %, mientras que para el caso $\kappa - \omega SST1$ (con valores iniciales calculados) el ajuste es del 95 % y para el caso $\kappa - \omega SST2$ (con valores iniciales por defecto) es de 91 %. De igual forma, en la Figura 3.5 se presentan de forma comparativa los valores obtenidos de H_s , la diferencia porcentual en relación a los resultados de Løvås (2000), y el estadístico R^2 relativo, para cada uno de los sensores analizados. Según este parámetro y considerando un error válido de hasta el 10 %, se tiene que para los 3 casos el R^2 absoluto esta dentro del rango, mientras que para el error relativo, los valores para el caso $\kappa - \omega SST2$ tiene puntos mayores a un error de 10 %.

Figura 3.5: Errores de H_s para los casos laminar, $\kappa - \omega SST1$ y $\kappa - \omega SST2$ vs caso de Løvås (2000)

El error medio absoluto y el error cuadrático medio fueron considerados ya que son las medidas de precisión más comunes, y representan el comportamiento de la variable en el espacio sin necesidad de ponderarla, adicionalmente, dependen de los valores extremos, teniendo mayor influencia en el $RMSE$ por lo que es más conservador (Sutherland *et al.*, 2004a); por otro lado Sutherland *et al.* (2004b) asegura que el MAE es muy útil para la validación de modelos hidrodinámicos. En el caso particular de los datos analizados en este trabajo, la Tabla 3.3 muestra como para

los 3 casos, los valores del MAE dan negativos, lo que quiere decir, que los valores simulados son menores, en todos los casos, a los valores de Løvås (2000) siendo el más cercano a 0 el correspondiente al caso laminar. Los valores del $RMSE$ son un orden de magnitud menores a los anteriores, y como corresponden a un análisis más conservador, dan mayor confiabilidad en los resultados obtenidos para los 3 casos.

Por su parte el índice de Willmott (I_w), es un índice de concordancia que representa el acuerdo (1) o desacuerdo (0) de los valores medidos (P_i) con los observados (O_i) (Willmott *et al.*, 2012), a partir de la relación entre la suma de las diferencias de los valores observados y los calculados, con la suma de la relación de los valores calculados y observados con la media observada (\bar{O}) (ver ecuación 3.7); siendo de esta forma la media observada (media del valor real) el parámetro de mayor peso, y con el cual se realiza la comparación final. Así, el índice de concordancia final es menos sensible a la forma de la distribución del error y a los errores concentrados en valores atípicos, dando un valor generalizado en los datos observados. En este caso, los 3 I_w dan muy cercanos a 1 lo cual se acerca al límite de acuerdo o concordancia entre los valores calculados y los observados, siendo el de mejor aproximación el laminar y entre los turbulentos el $\kappa - \omega SST1$.

$$I_w = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (3.7)$$

Con toda la información anterior, es posible concluir que el caso laminar y el $\kappa - \omega SST1$ pueden ajustarse al caso observado o caso real (datos del caso de Løvås (2000)) con un alto porcentaje de coherencia, siendo el más apropiado el caso laminar, ya que la superficie libre allí calculada solo se ve afectada por la pendiente del fondo, mientras que en los casos turbulentos se incluye la disipación y mezcla generada por la interacción entre las partículas y con las fronteras del canal. De esta forma se tiene que la simulación de un caso sin obstáculos dentro del canal puede ejecutarse empleando el esquema laminar, bajo la calibración realizada en este trabajo con un coeficiente de determinación de 99,15%, que representa para una $H_s = 0,18 m$, un cambio de 0,0015 m , con lo cual se válida la configuración empleada. Por otro lado, la simulación empleando el esquema $\kappa - \omega SST1$ puede trabajarse con el 95,69% de determinación; el cual difiere en 3,46% del laminar y representa un cambio de 0,0077 m en los valores de H_s . La implementación del esquema turbulento seleccionado, debe validarse mediante la calibración de un caso con la inclusión de obstáculos, ya que es allí donde diferentes investigaciones centradas en el uso de modelos tipo VOF para el estudio de procesos costeros y caracterizando la dinámica del fluido junto con la presencia de obstáculos (Maza *et al.*, 2013; Higuera *et al.*, 2013a, 2014b,a), sugieren la necesidad de implementar modelos turbulentos capaces de simular los fenómenos de separación del flujo en los límites visibles de experimentos físicos.

La inclusión de dichos obstáculos genera discontinuidad en las líneas de flujo, alterando los campos de velocidad y presión, por lo que la suposición de flujo laminar es parcialmente correcta y puede generar errores numéricos en la estimación de las diferentes variables buscadas. Es por ello que para los problemas de interacción flujo - estructura se ha implementado el esquema turbulento $\kappa - \omega SST$ (Higuera *et al.*, 2013a). Sin embargo, como se mencionó previamente, la información disponible para la calibración del modelo numérico solo corresponde a datos de H_s para un escenario sin vegetación, por lo cual no es posible realizar la validación del modelo numérico con un caso real simulado en laboratorio con presencia de obstáculos. Así, con las restricciones de la información presentada, debe decidirse que esquema emplear, garantizando que la calibración realizada tenga validez según las consideraciones mencionadas previamente. De esta forma y asumiendo un rango de error admisible del 5,0%, se tiene que los esquemas

laminar y $\kappa - \omega SST1$ son válidos para representar el caso de Løvås (2000) sin vegetación; siendo el caso laminar óptimo en los escenarios sin obstáculo y el caso $\kappa - \omega SST1$ el idóneo al momento de considerar las variables físicas asociadas a la turbulencia y necesarias para el esquema de análisis con los cilindros como obstáculos que representan de forma simplificada la vegetación, casos que serán implementados mas adelante. Es por está ultima razón que se decide trabajar con el esquema $\kappa - \omega SST1$, que esta dentro del rango de error y sigue las sugerencias de diferentes autores en el uso de modelos tipo VOF.

Es importante aclarar, que todas las metodologías de análisis de error implementadas en este trabajo se realizaron bajo la consideración de que la variable observada (los datos del caso de Løvås (2000)), estaba libre de error y las comparaciones se hicieron recargando todo el error en las variables modeladas; por lo que el esquema finalmente seleccionado para el trabajo posterior y el análisis de resultados se encuentra basado y validado bajo las condiciones asumidas en la modelación y en los resultados del análisis de errores.

3.3. Mallado y configuración de casos

Con el modelo numérico calibrado, considerando los esquemas de malla y condiciones físicas del flujo, mencionadas anteriormente para un escenario sin obstáculo, se procede a realizar el mallado necesario para considerar la presencia del manglar como obstáculo que, como se había mencionado previamente, corresponde a una parametrización mediante un arreglo de cilindros rígidos escalados a partir de las consideraciones del modelo físico de Husrin & Oumeraci (2009). Para determinar sus dimensiones finales dentro del esquema del presente trabajo, teniendo como variable de interés la F_D , se determinó el diámetro mínimo que deben tener los cilindros para que solo sean afectados por dicha fuerza y pueda ser despreciada la F_m . Para ello, se emplearon las ecuaciones y la gráfica definida por Oumeraci (2014), donde se definen los diámetros en relación a la longitud de onda, profundidad del canal y H_s .

$$D > \frac{H_s}{(16 \frac{h}{L})} \quad (3.8) \quad D < \frac{H_s}{(100 \frac{h}{L})} \quad (3.9)$$

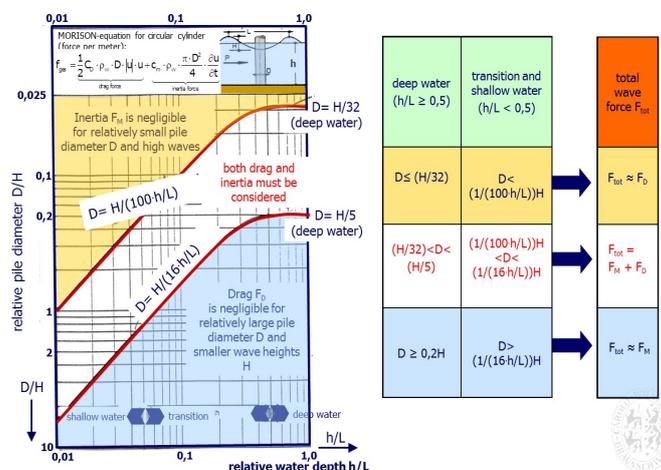


Figura 3.6: Gráfica para definir el diámetro de trabajo (Oumeraci, 2014)

En las ecuaciones 3.8 y 3.9 se presenta el cálculo del diámetro necesario para el análisis de las fuerzas, es decir, el diámetro que deben tener los cilindros para que al analizar una de las fuerzas, la otra pueda ser despreciada. Y en la figura 3.6, a partir de la ecuación de Morrison para un cilindro, se puede ver el comportamiento de dichas fuerzas en un rango de 0,01 a 10 para el diámetro relativo de la pila (d/H) y de 0,01 a 1 para la profundidad relativa del agua (h/L). De esta forma se tiene que la fuerza de inercia puede ser despreciada para diámetros relativos muy pequeños y grandes olas, mientras que la fuerza de dragado se puede despreciar con grandes diámetros relativos y olas pequeñas.

A partir de lo mencionado, y dado que el esquema inicial de Husrin & Oumeraci (2009) considera 2 diámetros diferentes, uno para el tallo principal de 1,0 *cm*, y otro para las raíces que conforman el resto del esquema de 0,6 *cm*, variando su altura y la cantidad de cilindros dentro del arreglo (ver Tabla 3.4), se define el tamaño final del esquema según el diámetro más pequeño, ya que es el valor de 116 cilindros.

Tabla 3.4: Dimensión de cilindros del esquema de Husrin & Oumeraci (2009)

Tipo	d m	N	h_c m
Tipo I	0,01	1	0,150
Tipo II	0,006	8	0,125
Tipo III	0,006	24	0,075
Tipo IV	0,006	48	0,050
Tipo V	0,006	34	0,025

Con esta información, se define el diámetro de los cilindros en función de la Figura 3.6, se determina la escala a la cual se trabajará todo el esquema y se definen las variables del oleaje a ser consideradas, como profundidad, altura de ola y periodo. En la Tabla 3.5 se presentan las variables del oleaje consideradas, el diámetro sugerido (D), los resultados de las ecuaciones 3.8 y 3.9, y si cumplen o no con las restricciones mencionadas para las fuerzas de inercia y dragado. Siendo 0 el caso en que no cumplen y 1 en el que sí.

Para determinar la influencia o el peso de las variables de inercia y dragado dentro de la ecuación de Morrison, se seleccionaron 2 profundidades de trabajo, una de ellas, la original del caso de Løvås (2000) (0,69 *m*) y una inferior definida arbitrariamente, que permita ver la respuesta del manglar con otra profundidad (0,60 *m*). De igual forma se procedió para determinar las 2 alturas de ola (0,18 *m* y 0,25 *m*) y los 3 periodos (3,5 *s*, 3,0 *s* y 2,8 *s*).

Tabla 3.5: Definición del diámetro de cilindros en función de la Figura 3.6

<i>Casos</i>	h m	H_s m	T_p s	l m	h/l	d m	$D > H/(16h/l)$ m	F'_m	$D < H/(100h/l)$ m	F'_D
a	0,69	0,18	3,5	8,761	0,078	0,024	0,143	0	0,023	0
b	0,69	0,25	3,5	8,761	0,078	0,024	0,198	0	0,032	1
c	0,69	0,25	3,0	7,402	0,093	0,024	0,168	0	0,027	1
d	0,69	0,25	2,8	6,853	0,101	0,024	0,155	0	0,025	1
e	0,60	0,18	3,5	9,374	0,064	0,024	0,176	0	0,028	1

Con lo anterior, se identifica que el diámetro de 0,024 *m* es idóneo para poder despreciar las fuerzas de inercia, ya que todos los valores de F'_m son 0, es decir, no es necesario trabajar únicamente con ellas, y se consideran solo las fuerzas de dragado, ya que los valores de F'_D son

1, excepto para el caso a, el cual exige un diámetro de $0,023 \text{ m}$. Sin embargo, como la diferencia con el diámetro seleccionado es de $4,2 \%$, se trata del caso inicial con los datos del oleaje a partir de la propuesta de Løvås (2000) y así, el resultado de F'_m no exige considerar únicamente las variables de inercia, y por eso se decidió trabajar con éste valor.

Dicho diámetro corresponde a los cilindros que representan las raíces, por la cual se debe escalar el esquema general de Husrin & Oumeraci (2009) 4 veces, pasando de un arreglo de $0,175 \text{ m}$ por $0,175 \text{ m}$ en planta a uno de $0,70 \text{ m}$ por $0,70 \text{ m}$, el cual se adecua a las condiciones físicas del canal analizado, ya que este es de 1 m de ancho, quedando $0,15 \text{ m}$ de borde libre a cada lado para evitar problemas numéricos con los bordes del canal. Las nuevas dimensiones para cada uno de los cilindros dentro del arreglo se presentan en la Tabla 3.6. Así, al trabajar con una estructura de manglar parametrizada para *Rhizophora stylosa* se pueden comparar los resultados del modelo numérico con las mediciones en campo, realizadas sobre *Rhizophora mangle*.

Tabla 3.6: Dimensión de cilindros del esquema de Husrin & Oumeraci (2009) escalados 4 veces

Tipo	d m	N	h_c m
Tipo I	0,04	1	0,60
Tipo II	0,024	8	0,50
Tipo III	0,024	24	0,30
Tipo IV	0,024	48	0,20
Tipo V	0,024	34	0,10

Con la distribución definida, así como el tamaño y posición de cada uno de los cilindros acorde al esquema base, se realiza el montaje de éstos dentro del modelo numérico con la herramienta *snappyHexMesh*, con la ayuda de la Tabla 3.6 y de la Figura 3.7. Para ello, es necesario considerar que el fondo del canal en la zona donde será localizada la estructura de manglar, corresponde a la zona que se variará de pendiente, por lo cual es importante tener un punto de referencia útil y válido para cualquier configuración del fondo y desde el cual se pueda llegar geoméricamente al punto central, o punto base del esquema de cilindros, que en éste caso corresponde al cilindro que representa el tronco del manglar.

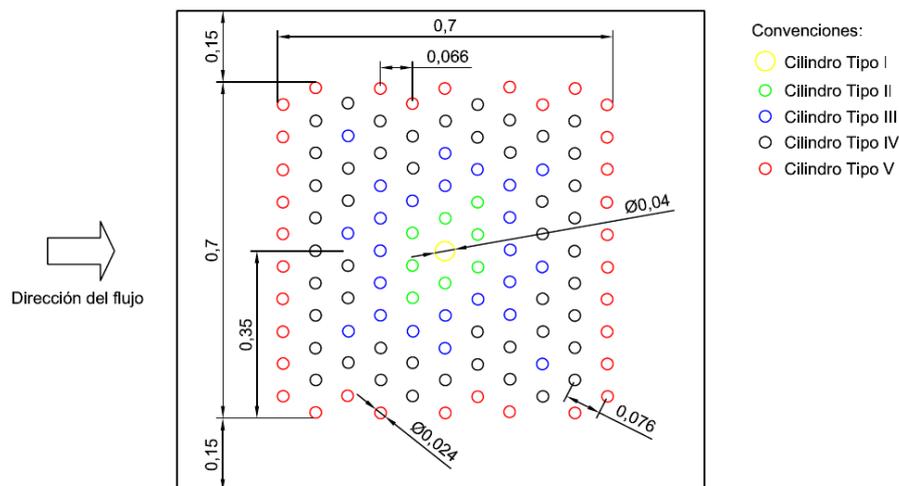


Figura 3.7: Vista en planta - Distribución de los cilindros

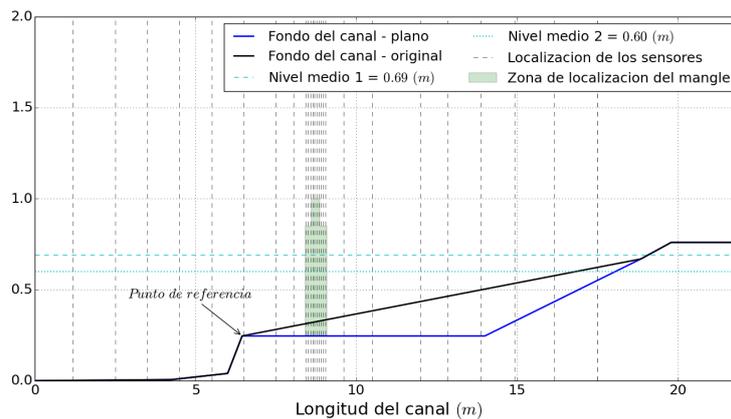


Figura 3.8: Configuración del fondo del canal (caso con pendiente y caso sin pendiente)

Con lo anterior y partiendo de la Figura 3.8, se tiene que el punto de referencia mencionado corresponde a las coordenadas $x = 6,45 \text{ m}$, $y = 0,5 \text{ m}$, $z = 0,246 \text{ m}$, que en la configuración del fondo inicial corresponde al punto medio del cambio más brusco de pendiente y se considera como punto base, ya que a partir de él se realizan los cambios de pendiente. A partir de este punto, los cilindros del esquema serán colocados sobre el plano $z = 0,246 \text{ m}$ y a una distancia de $2,288 \text{ m}$ desde el punto de referencia del esquema, permitiendo el desarrollo del oleaje después del cambio brusco de pendiente, a través del manglar y antes de llegar a la zona de playa. De esta forma, los cilindros serán interceptados por la pendiente en cada caso de análisis, permitiendo que para el caso con pendiente las raíces sean más altas en la parte inicial y más pequeñas en la parte trasera del manglar (ver Figuras 3.8, 3.9 y 3.10); situación que simula el comportamiento real del *Rhizophora mangle*, ya que el mayor desarrollo de sus raíces se hace en la zona frontal al oleaje.

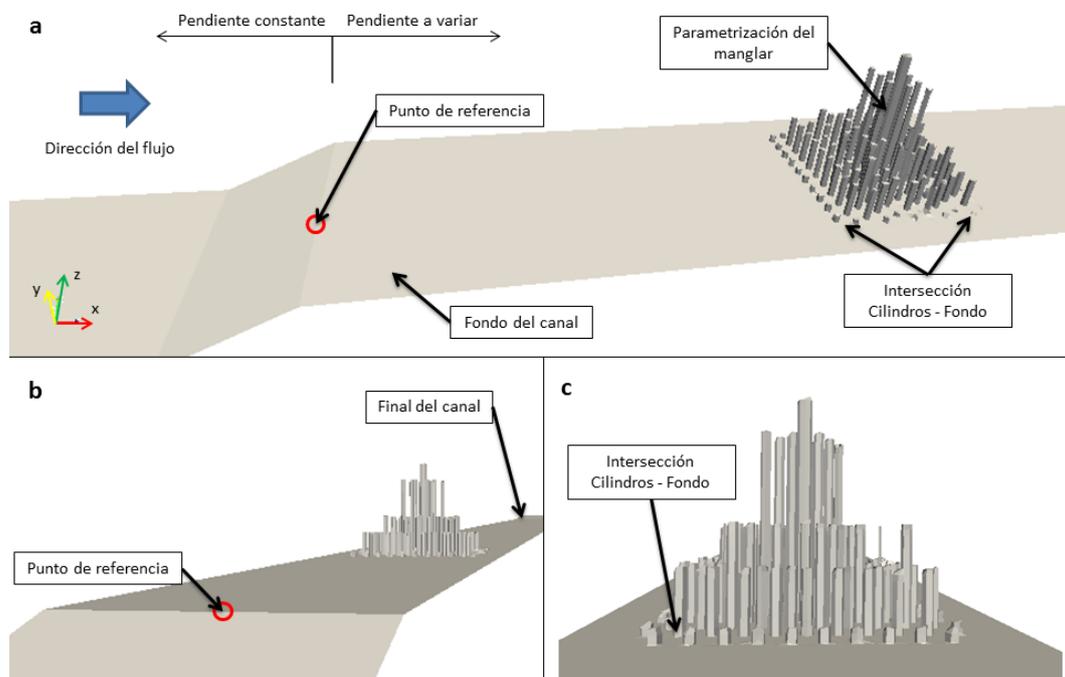


Figura 3.9: Configuración de la malla para la pendiente de $1,96^\circ$. a.Vista longitudinal del canal. b.Vista frontal del canal. c.Vista frontal de los cilindros

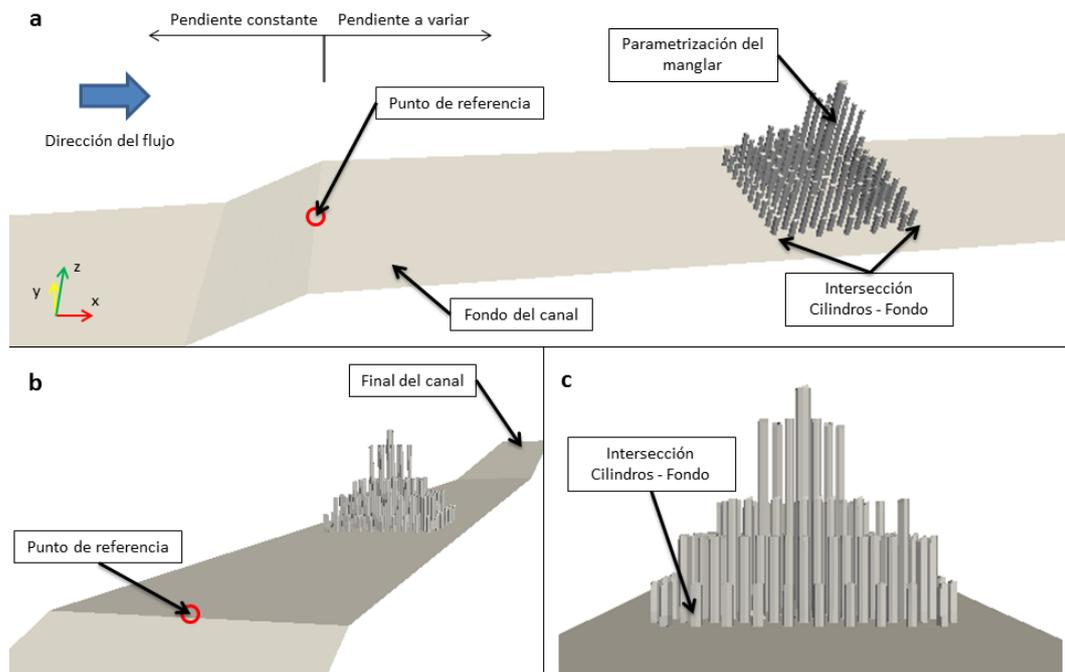


Figura 3.10: Configuración de la malla para la pendiente de $0,00^\circ$. a.Vista longitudinal del canal. b.Vista frontal del canal. c.Vista frontal de los cilindros

En las Figuras 3.9 y 3.10 se puede observar la configuración de la malla para las pendientes de $1,96^\circ$ y $0,00^\circ$ respectivamente, en ellas se presenta el punto de referencia mencionado, así como los cilindros resultantes después de su intersección con la pendiente. En la parte c de estas figuras, es claro ver como los cilindros son más pequeños en el caso de la Figura 3.9 y más grandes en la Figura 3.10. También, en la parte a se puede visualizar como para la Figura 3.9 los cilindros se van haciendo más pequeños en la parte trasera del manglar, y por el contrario, en la Figura 3.10 permanecen constantes.

Para el montaje de esta nueva malla, es importante tener en cuenta el refinamiento en todas las direcciones de la malla original especificada en la Sección 3.2, en la zona donde será ubicado el conjunto de cilindros. Es por ello, que dentro de la herramienta *snappyHexMesh* se definió un dominio dentro del canal que incluyera dicha zona y se refinó la malla de forma tal que se duplicara el número de celdas en la zona de localización del manglar.

De ésta forma, con la información obtenida por Husrin & Oumeraci (2009) en su trabajo, y con la configuración del fondo del canal suministrada por Tang *et al.* (2015), se definió el esquema general con y sin manglar para las pendientes de $1,96^\circ$ y $0,00^\circ$, así como los parámetros iniciales del oleaje para la configuración de los casos (ver Tabla 3.5).

3.3.1. Consideraciones especiales

Con la información anterior y considerando los parámetros del oleaje definidos, es posible determinar los casos que se simularán en *openFoam* mediante una combinación de todas las características mencionadas para oleaje monocromático, ya que éste permite visualizar mejor las fluctuaciones en la superficie libre debido a la influencia de los cilindros. Sin embargo, es importante definir la teoría de oleaje con la cual el modelo solucionará la evolución del oleaje en cada punto de la malla. Por esta razón, en la Figura 3.11 se presenta la definición de la teoría de oleaje y la localización (aguas profundas, intermedias o someras) a partir de las relaciones

profundidad contra periodo y altura de ola significativa contra periodo. También es importante tener en cuenta, la evolución del fondo del canal, por lo cual en la Figura 3.11 se presentan los valores considerando la profundidad inicial y la profundidad desde la zona con pendiente donde se ubica el manglar.

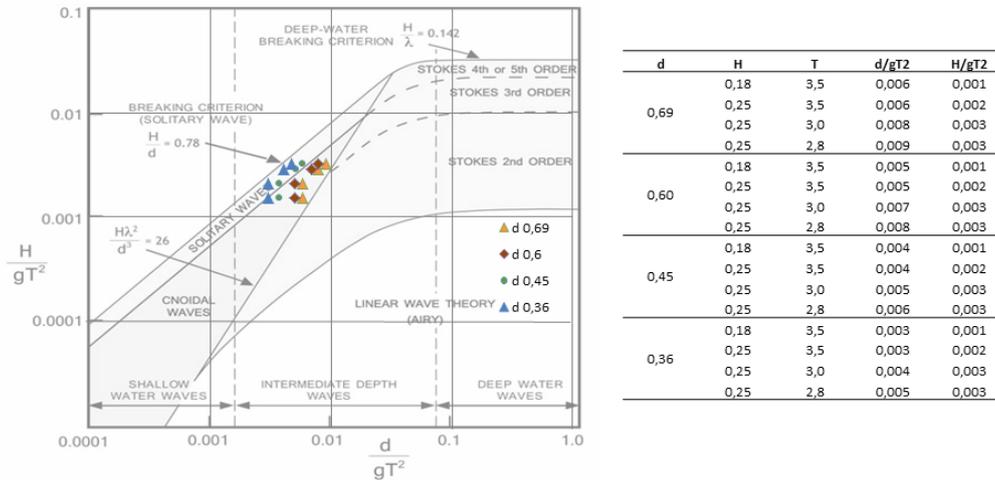


Figura 3.11: Definición de las teorías de olas a implementar según los parámetros del oleaje

En la Figura 3.11 es posible ver cómo los 2 casos mencionados para la profundidad, y las 2 zonas correspondientes a la profundidad inicial (0,69 m y 0,60 m) y en la zona del manglar (0,45 m y 0,36 m), el oleaje se ubica en aguas intermedias y entre la teoría de Stokes de tercer orden, *cnoidal-waves* y *solitary wave*. En esta última el punto de rotura se puede definir mediante la relación $H/h = 0,78$, el cual está localizado después del manglar para todos los casos presentados.

Con lo anterior, y considerando las opciones que tiene *waves2Foam* para oleaje regular (Jacobsen *et al.*, 2012), se decide hacer una comparación entre las teorías de Stokes de primer (*Stokes first order wave theory*) y quinto orden (*Stokes fifth order wave theory*), ya que la teoría para *solitary wave* reproduce una sola onda y la teoría de Stokes de tercer orden no está definida dentro de las opciones de esta herramienta. Esto para identificar que afectación genera el uso de una u otra teoría en los resultados de superficie libre y altura de ola significativa, con el fin de emplear la que mejor se ajuste a las condiciones especificadas por la Figura 3.11, y que además sea óptima, ya que a mayor orden de teoría de oleaje, mayor tiempo de simulación, y representa mejor los procesos no lineales debidos a la interacción flujo - estructura.

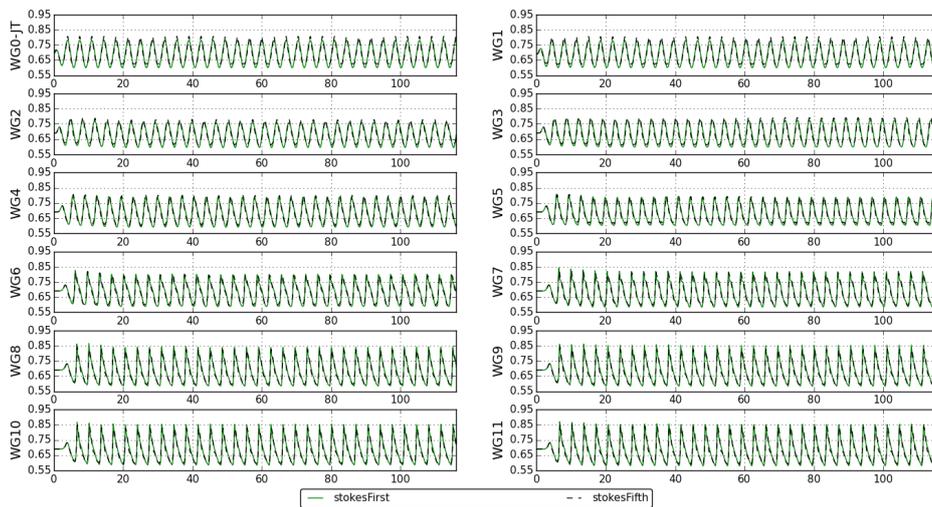
De esta forma, se simuló 2 casos monocromáticos con los parámetros de H_s , T_p y h presentados en la Tabla 3.1, para la calibración del modelo incluyendo la malla con los cilindros especificados previamente y el esquema turbulento $\kappa - \omega SST1$. Uno de los casos se simuló con la opción *stokesFirst* y el otro con *stokesFifth*. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 3.12 a 3.14 donde se tiene la evolución de la superficie libre con 26 sensores definidos especialmente en la zona donde se encuentra el conjunto de cilindros e incluyendo los definidos por Tang *et al.* (2015).

La disposición de los sensores se puede observar en la Figura 3.14 y en la Tabla 3.7, donde los sensores definidos por Løvås (2000) se diferencian usando *-JunT* haciendo referencia al trabajo de Tang *et al.* (2015), y los adicionales, están numerados de 1 a 18. De esta forma se consideran 8 sensores antes del manglar, 10 a través del manglar y 8 en la parte posterior, para un total de 26 sensores a lo largo del canal.

Tabla 3.7: Disposición de los sensores a lo largo del canal

n	Sensor	Localización - x m	n	Sensor	Localización - x m
1	WG0-JunT	1,1812	14	WG13	8,77
2	WG1	2,50	15	WG14	8,84
3	WG2	3,50	16	WG15	8,90
4	WG3	4,50	17	WG16	8,97
5	WG4	5,50	18	WG17	9,04
6	WG5	6,50	19	WG1-JunT	9,6107
7	WG6	7,50	20	WG18	10,5
8	WG7	8,05	21	WG2-JunT	12,00
9	WG8	8,43	22	WG3-JunT	12,8322
10	WG9	8,50	23	WG4-JunT	13,8792
11	WG10	8,57	24	WG5-JunT	14,9262
12	WG11	8,64	25	WG6-JunT	16,1611
13	WG12	8,70	26	WG7-JunT	17,5034

En las Figuras 3.12 y 3.13 la línea continua de color verde representa los resultados de superficie libre obtenidos con la simulación usando *stokesFirst*, mientras que la línea punteada negra representa los correspondientes a la simulación usando *stokesFifth*. Para los primeros sensores, aquellos ubicados antes del manglar, hasta el WG7 aproximadamente, la teoría de primer orden registra que la superficie libre tiene un rango inferior más bajo, y para los resultados de la teoría de quinto orden, el rango superior es más alto. Posteriormente, en la zona de afectación directa del manglar y de la pendiente, hasta el final del canal, el rango más amplio se visualiza en la teoría de primer orden, tanto en el límite inferior como en el superior, mostrando así, que la teoría de quinto orden se comporta diferente frente a la presencia de los 2 obstáculos.

Figura 3.12: Comparación de superficie libre con *stokesFirst* vs *stokesFifth* (1)

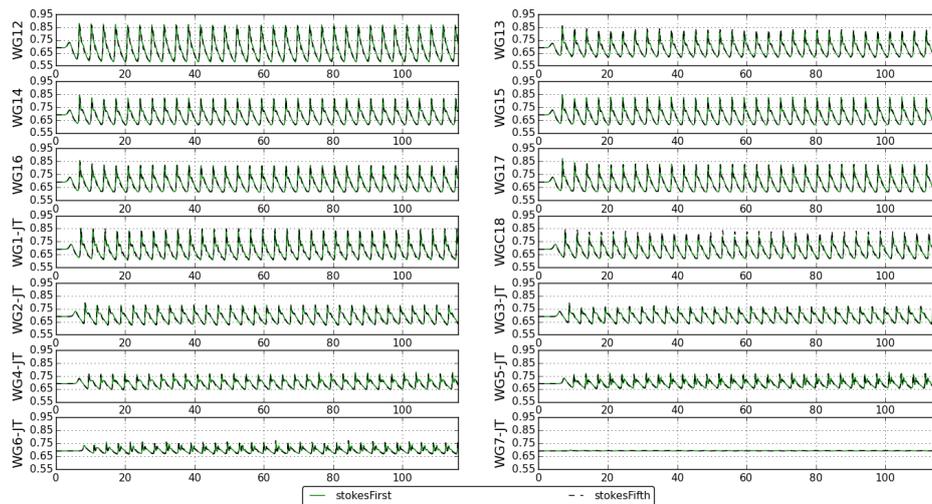


Figura 3.13: Comparación de superficie libre con *stokesFirst* vs *stokesFifth* (2)

Para visualizar mejor las diferencias obtenidas en la superficie libre, la información se procesó mediante la transformada rápida de Fourier (*FFT* por sus siglas en inglés) para obtener los valores de H_s , los cuales se presentan en la Figura 3.14. En la primera parte se observa que en los 4 primeros y en los últimos 4 sensores no hay mucha diferencia entre las 2 teorías empleadas, por lo cual, seleccionar cualquiera de las 2 para el montaje de los casos a simular podría ser arbitrario. Sin embargo, en los sensores del medio, donde se desarrolla la pendiente del fondo y se ubica la estructura parametrizada del manglar es posible distinguir cierta variación antes, en medio y después del manglar.

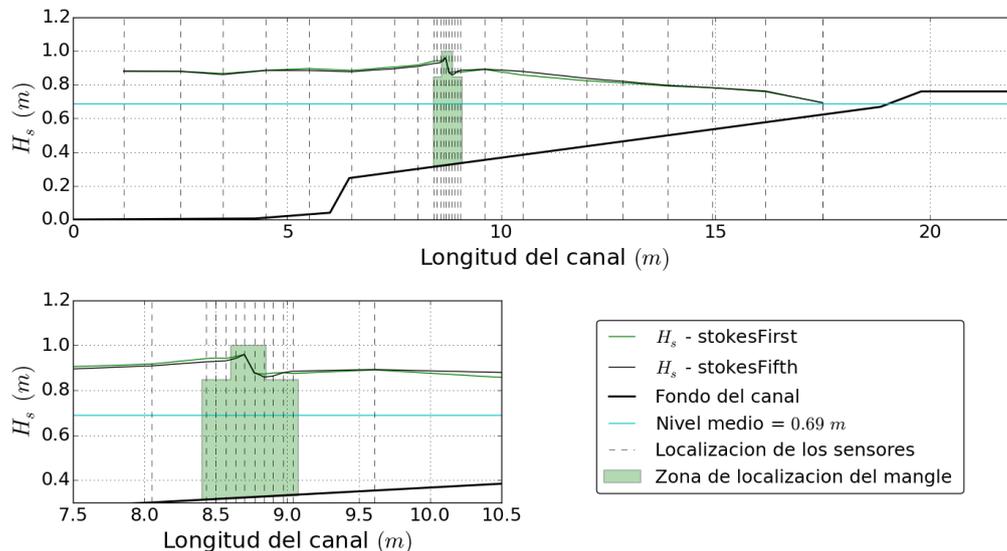


Figura 3.14: Evolución de H_s con *stokesFirst* vs *stokesFifth*

Los sensores ubicados inmediatamente antes del manglar registran mayor altura de ola para el caso usando *stokesFirst*, mientras que aquellos que se encuentran inmediatamente después del manglar, registran mayores valores usando *stokesFifth*, presentando una diferencia máxima entre los resultados de ambas teorías, de 1,47 *cm* y una diferencia media de 0,22 *cm* que corresponden

al 8,20 % y 1,22 % de la H_s inicial. Éste comportamiento se puede visualizar mejor en el zoom para la zona del manglar presentado en la segunda parte de la Figura 3.14.

Considerando que la información obtenida al realizar las simulaciones con las 2 teorías de oleaje seleccionadas según las opciones del *waves2Foam* no es posible compararla con mediciones reales en laboratorio, ya que aun no se tiene la disponibilidad de esa información, teniendo en cuenta que la selección de la teoría de oleaje a implementar influye directamente en el tiempo que demora la simulación del modelo; y partiendo de los resultados presentados, donde se registran variaciones entre las 2 teorías de oleaje, mediante cambios de comportamiento en los valores de H_s en cada uno de los sensores, en especial en la zona de localización del manglar y la pendiente del fondo. Se debe seleccionar una teoría para la configuración de los casos a simular en este trabajo, que sea capaz de representar la mayor parte de los procesos debidos a la interacción flujo - vegetación - fondo, dando un nivel de confiabilidad que subsane la ausencia del caso real simulado en un canal de oleaje y que a su vez sea óptimo para la simulación en el *cluster*. Además, teniendo en cuenta que el porcentaje de diferencia registrado es superior al 5,0 %, no se puede hacer una selección arbitraria de la teoría de oleaje, ya que el nivel de confiabilidad varía entre ambas teorías.

Adicionalmente, la teoría de Stokes para los diferentes ordenes corresponde a ondas senoidales acopladas que van siendo más complicadas a medida que se superponen ondas básicas, conformando así las teorías de segundo orden con 2 ondas, de tercer orden con 3 ondas, etc. De donde se tiene que para las representaciones mas complejas, en este caso de quinto orden (*stokesFifth*) se tienen resultados que se ajustan mejor a los fenómenos que ocurren en la naturaleza (López & Tinoco, 2015). Así, con las necesidades y las limitaciones planteadas para la selección de una u otra teoría, se decide trabajar con la teoría *stokesFifth*, ya que aunque genere un mayor costo computacional en tiempo, define mejor los procesos no lineales presentes en la interacción de los fenómenos a estudiar, dando mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

3.3.2. Selección de escenarios

Con toda la información analizada, para la calibración del modelo numérico, para la determinación de la parametrización idónea de la estructura de manglar y para la definición de la teoría de oleaje a implementar, se define la configuración final de los casos a simular con y sin manglar dentro del modelo numérico *openFoam*. Dichos casos se dividen en 2 escenarios con diferente pendiente de fondo y 6 configuraciones, según los parámetros del oleaje ya definidos. La distribución de estos casos obedece entonces a la necesidad de visualizar su comportamiento bajo escenarios con y sin manglar, a determinar la influencia de la pendiente del fondo en los resultados de disipación y el cálculo del coeficiente de dragado.

De esta forma, se decide trabajar con la configuración de los fondos del canal presentados en la Figura 3.8, donde la línea continua negra representa el fondo original del caso de Løvås (2000), y la línea continua azul es la modificación a pendiente plana en la zona donde el manglar se ubica, y su conexión con el fondo anterior. Además están esquematizados en las Figuras 3.9 y 3.10 con el modelo parametrizado del *Rhizophora mangle*. Ambas configuraciones generan una respuesta diferente frente al tren de olas incidente, tanto por la presencia del manglar, en zona plana o no plana, como por la inclinación de la pendiente antes de llegar a la playa. Estos comportamientos serán analizados individualmente y los resultados obtenidos dependerán de dicho comportamiento.

En las Tablas 3.8 y 3.9 se presentan cada uno de los casos, con la configuración de la pendiente del fondo identificada con *S1* para el caso con pendiente y *S0* para el caso sin pendiente; la

profundidad inicial del agua, H_s , T_p , la teoría del oleaje (*waveTheory*) y el tiempo de simulación para los escenarios con y sin manglar, identificados con *V1* y *V0* respectivamente. Considerando, en el caso de los escenarios con manglar, los valores de L_e , calculados a partir de la ecuación 2.3 y necesarios para determinar el C_D . Dicho valor es función de la profundidad inundada, por lo cual varía conforme varíe la pendiente del fondo y la profundidad inicial del agua, es decir, C_D variará si el manglar se encuentra en un fondo plano o no, tanto por la evolución del oleaje como por la L_e característica en cada caso.

Tabla 3.8: Configuración de casos a simular - con manglar

<i>Caso</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Profundidad</i> <i>m</i>	H_s <i>m</i>	T_p <i>s</i>	<i>waveTheory</i>	<i>T-simulación</i> <i>s</i>	L_e <i>m</i>
1 V1S1	1,96°	0,69	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116	0,6691
2 V1S1	1,96°	0,69	0,25	3,5	Monocromático - Stokes5	116	0,6691
3 V1S1	1,96°	0,69	0,25	3,0	Monocromático - Stokes5	116	0,6691
4 V1S1	1,96°	0,69	0,25	2,8	Monocromático - Stokes5	116	0,6691
5 V1S1	1,96°	0,60	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116	0,6606
1 V1S0	0,00°	0,69	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116	0,6745
2 V1S0	0,00°	0,69	0,25	3,5	Monocromático - Stokes5	116	0,6745
3 V1S0	0,00°	0,69	0,25	3,0	Monocromático - Stokes5	116	0,6745
4 V1S0	0,00°	0,69	0,25	2,8	Monocromático - Stokes5	116	0,6745
5 V1S0	0,00°	0,60	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116	0,6693

Tabla 3.9: Configuración de casos a simular - sin manglar

<i>Caso</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Profundidad</i> <i>m</i>	H_s <i>m</i>	T_p <i>s</i>	<i>waveTheory</i>	<i>T-simulación</i> <i>s</i>
1 V0S1	1,96°	0,69	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116
2 V0S1	1,96°	0,69	0,25	3,5	Monocromático - Stokes5	116
3 V0S1	1,96°	0,69	0,25	3,0	Monocromático - Stokes5	116
4 V0S1	1,96°	0,69	0,25	2,8	Monocromático - Stokes5	116
5 V0S1	1,96°	0,60	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116
1 V0S0	0,00°	0,69	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116
2 V0S0	0,00°	0,69	0,25	3,5	Monocromático - Stokes5	116
3 V0S0	0,00°	0,69	0,25	3,0	Monocromático - Stokes5	116
4 V0S0	0,00°	0,69	0,25	2,8	Monocromático - Stokes5	116
5 V0S0	0,00°	0,60	0,18	3,5	Monocromático - Stokes5	116

Así, se definieron la misma cantidad de casos para escenarios con y sin manglar, considerando para cada uno 5 casos con pendiente de 1,96° y 5 con pendiente 0,00°, para cada pendiente se determinaron 4 casos con profundidad 0,69 *m* y 1 con profundidad 0,60 *m*; donde se tiene H_s de 0,18 *m* y 0,25 *m* combinados con T_p de 3,5 *s*, 3,0 *s* y 2,8 *s*. Todos los casos se simularon bajo oleaje regular con teoría de Stokes de quinto orden y por 116 *s*, tiempo definido previamente para la calibración del modelo.

3.4. Resultados

3.4.1. Análisis del escenario con y sin manglar

Como ya se mencionó, el caso *a* de la Tabla 3.5 se definió conservando los parámetros iniciales del caso de Løvås (2000), quien determinó la evolución de H_s debido a la pendiente del fondo y analizó la presencia de vegetación costera. Con ello, los casos para este trabajo se definieron como V1S1 para aquellos con manglar y V0S1 para aquellos sin manglar, (Tablas 3.8 y 3.9), con el fin de realizar el análisis comparativo, determinando la influencia de la pendiente del fondo. De igual forma, los resultados se comparan con el comportamiento obtenido en los casos V1S0 con manglar y V0S0 sin manglar para fondo plano.

En esta sección se presenta los resultados obtenidos en los casos 1 V1S1, 1 V0S1, 1 V1S0 y 1 V0S0, haciendo un análisis con todos los sensores a lo largo del canal, presentando la influencia de la pendiente en dichos resultados, y el cálculo del C_D a partir de la ecuación de Morrison y los resultados arrojados para la F_D por parte del modelo numérico *openFoam*. De igual forma se tiene el comportamiento de la velocidad incidente del flujo, del número de Re a lo largo del tiempo de simulación, y el cálculo de los valores medios para cada una de estas variables. También, se analizan las variables numéricas de continuidad, errores residuales y *yplus* necesarias para la confiabilidad y estabilidad de los resultados (Foundation, 2015a).

Los casos 1 V1S1 y 1 V0S1 corresponden entonces a los escenarios con y sin manglar para una pendiente de $1,96^\circ$, ambos casos fueron simulados en 16 procesadores del *cluster* de la Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín y se demoraron aproximadamente 5 días cada uno. En la Figura 3.15 se puede observar la evolución de H_s a lo largo de todo el canal y como la línea negra, correspondiente al caso 1 V0S1 se comporta según la evolución del oleaje debido al esquema de fondo, teniendo su valor más alto en el sensor *WG18* (ver Tabla 3.7) un poco mas lejos de la zona generación del oleaje, que el presentado en la Figura 3.4, correspondiente a la calibración del modelo numérico. Se puede observar el proceso de asomeramiento por fondo y posteriormente la rotura y disipación debida a éste. Por otro lado, la línea azul, corresponde al caso 1 V1S1 y muestra un asomeramiento que genera una H_s mayor justo en la mitad del esquema de cilindros, en el sensor *WG12*, haciendo que el esquema de manglar funcione como una barrera que impide el paso del oleaje y posteriormente la H_s cae por debajo de la línea negra indicando disipación por la presencia del manglar hasta el sensor *WG2-JunT*, este comportamiento es similar al registrado por Teh *et al.* (2009) donde existe una sobreelevación notoria de la superficie libre inmediatamente antes del obstáculo, de acuerdo al tiempo de simulación y conforme a la resistencia del manglar. Finalmente, al llegar a la zona de la playa el comportamiento de H_s es similar al caso 1 V0S1, indicando predominancia de la disipación por fondo. Estas líneas muestran también la influencia del manglar a lo largo del canal y como los procesos que allí se generan afectan el flujo desde el tercer sensor.

La evolución de la H_s a lo largo del canal evidencia la presencia y predominancia de diferentes fenómenos y varía su comportamiento de acuerdo a la presencia del obstáculo. Allí, además de los procesos de disipación por fondo y vegetación, se presenta reflexión debido al efecto barrera del manglar y velocidades *undertown* en la zona del manglar que afectan el flujo aguas abajo, favoreciendo el transporte de sedimentos, la formación de barras y la protección contra la erosión en playas. Sin embargo, en este trabajo se abordaran solo los procesos de disipación por fondo y vegetación y el cálculo del coeficiente de dragado debido al manglar, es decir, el efecto final de la presencia de la estructura, por lo cual los demás fenómenos asociados quedan como líneas de investigación futuras.

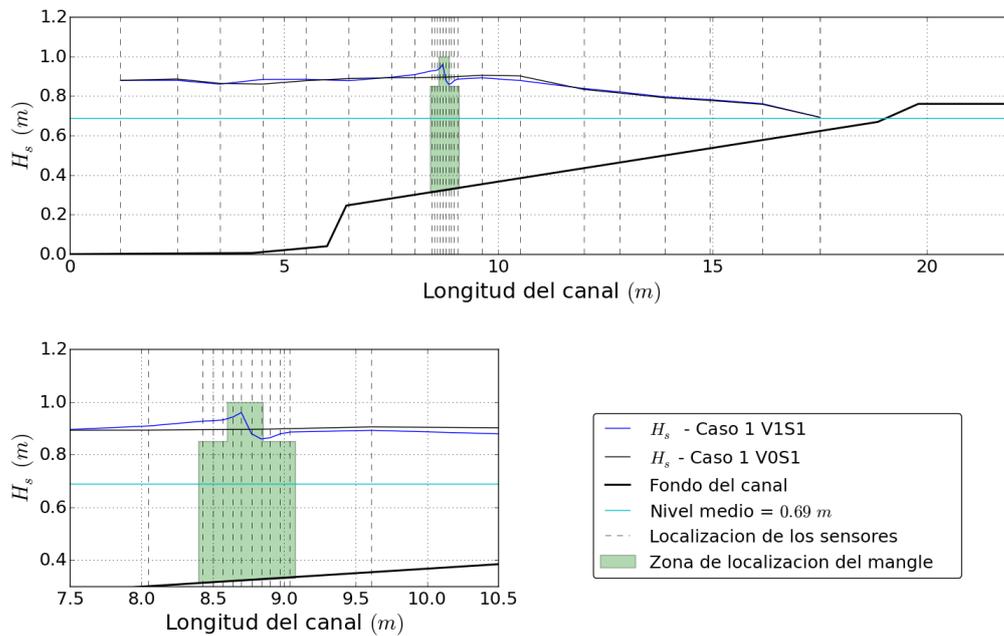


Figura 3.15: Evolución de H_s caso 1 V1S1 y caso 1 V0S1

En la segunda parte de la Figura 3.15 se observa un acercamiento a la zona de manglar y al comportamiento de H_s para los casos 1 V1S1 y 1 V0S1, así como la distribución de sensores mencionada en la Tabla 3.7. Allí, se puede observar una fluctuación de aproximadamente 8,0 a 10,0 *cm* en los valores de H_s para el caso 1 V1S1 y una variación entre los valores del caso 1 V1S1 y los del caso 1 V0S1 de aproximadamente 5,0 *cm* entre los valores máximos y mínimos de H_s . Éstas diferencias se presentan de forma porcentual en la Figura 3.16.

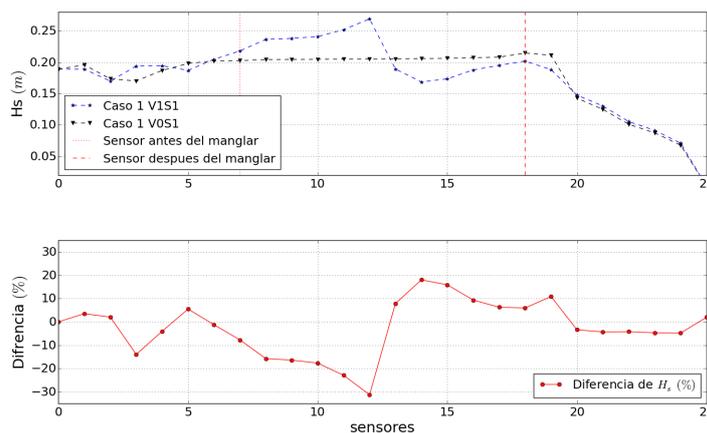


Figura 3.16: Diferencia porcentual de los valores de H_s para el caso 1 V1S1 vs caso 1 V0S1

En la primera parte de la Figura 3.16 se muestran los valores de H_s a lo largo de los 26 sensores. Allí se señala la zona correspondiente al esquema de manglar, y se puede observar con mayor claridad como para el caso sin manglar los valores de H_s son casi constantes hasta el punto de rotura, mientras que en el caso con manglar aumentan considerablemente hasta la mitad del esquema y luego bajan, mostrando 2 fenómenos importantes de analizar en la implementación

de los bosques de manglar como sistemas de protección costera: el bloqueo o efecto barrera y la disipación, importantes debido a los niveles máximo y mínimos del agua. Además, al tener en la zona de la playa un comportamiento similar debe cuestionarse tanto la efectividad del manglar como su localización óptima según la funcionalidad que se busque con ellos.

En la segunda parte de la Figura 3.16 se presenta la diferencia sensor a sensor de los valores obtenidos de H_s , siendo el punto de referencia el caso sin manglar. En éste caso es importante notar como en la zona de mayor asomeramiento debido al efecto barrera de los cilindros, la diferencia porcentual es mayor en comparación a la zona de disipación (31,29 % vs 18,03 %) pero se presenta en menos sensores; es decir, la diferencia debido a la disipación por manglar (sensores 13 a 20 - *WG12* a *WG18*) se presenta en mayor número de sensores pero con menor magnitud.

Por otro lado, dentro de las simulaciones numéricas del *openFoam*, se tienen varias opciones para calcular u obtener variables de interés como fuerzas, velocidades, presión, etc. En este caso, como se mencionó en la metodología, los valores de fuerza con los cuales se obtendrán los valores para C_D a partir de la ecuación de Morrison, se obtienen a partir de la librería *libforce*, la cual calcula la fuerza ejercida por el flujo sobre una superficie determinada en cada una de las 3 direcciones, partiendo del campo de presión. En este caso, se calcularon las fuerzas sobre la superficie de los cilindros, ya que el conjunto de estos representa la parametrización de un árbol de *Rhizophora mangle*.

Otra variable de interés para el análisis del C_D es la velocidad incidente del flujo, la cual puede obtenerse desde los campos de velocidad totales en cada uno de los pasos de tiempo, para ello se utilizó la librería *sample*, la cual lee los valores de velocidad del flujo, en un perfil horizontal o vertical, para todos los pasos de tiempo. De ésta forma, se definió un perfil vertical en la zona donde no hay cambios bruscos del fondo, es decir en la parte inicial del canal, exactamente en $x = 4,0 m$ con el fin de asegurar que la velocidad utilizada corresponde a la velocidad incidente del flujo. Se utiliza esta velocidad, ya que Mazda *et al.* (1997a) en su trabajo plantea el método de análisis de datos, para definir el C_D a partir de la velocidad fuera de la zona de la vegetación; al igual que Dalrymple *et al.* (1984); Dalrymple & Dean (1984) donde se analiza el efecto del flujo sobre cilindros rígidos a partir de las condiciones del flujo incidente.

Así se tienen los valores de fuerza y velocidad a lo largo del tiempo de simulación. Dichos valores se presentan en la Figuras 3.17, donde los valores de fuerza serán predominantes en una u otra dirección según el análisis a realizarse. En éste caso, se trabajará con la fuerza longitudinal (*eje x*) ya que es la fuerza directamente relacionada con el efecto del flujo sobre la estructura, que presenta la mayor variación, y se puede despreciar la fuerza transversal (*eje y*) debido a que tiene valores muy pequeños en comparación a los valores obtenidos en las otras 2 direcciones. Por otro lado, la fuerza vertical (*eje z*) corresponde al efecto del flujo por las variaciones del nivel medio debido al oleaje incidente, con valores negativos que indican presión hacia el fondo del canal, la cual no será analizada.

En la primera parte de la Figura 3.17 se presentan los valores de velocidad para los 2 casos analizados, así como los valores medios utilizados para el cálculo del C_D y el número Re en el caso con manglar. En ésta es posible notar una pequeña variación entre los 2 casos debido al efecto generado por la presencia del manglar en el flujo.

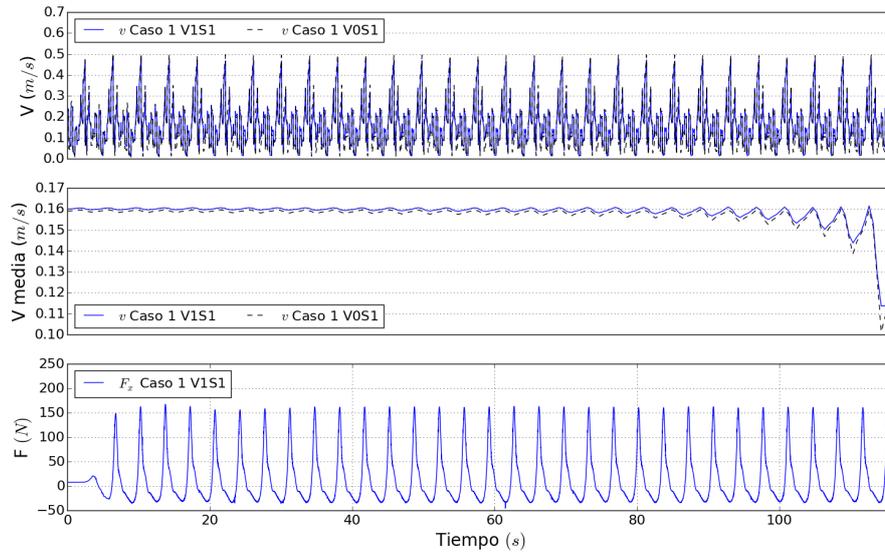


Figura 3.17: Velocidad media y total - caso 1 V1S1 vs caso 1 V0S1. Valores de Fuerza para el caso 1 V1S1

Con la información obtenida del modelo numérico, considerando la longitud efectiva L_e presentada en la Tabla 3.8, empleando la ecuación de Morrison para el cálculo del C_D (ecuación 3.10) a partir de la F_x y el número de R_e para cada uno de los pasos de tiempo simulados (desde 0 s hasta 116 s en intervalos de 0,5 s) se obtiene la Figura 3.18. Allí se observa un comportamiento similar al obtenido con el análisis de los datos de campo (Figura 4.8), donde a mayor número de R_e , es decir, a mayor turbulencia del flujo, menor valor de C_D , es decir, menor efecto de la presencia de la vegetación en el proceso de disipación de energía. De éstos se puede obtener un valor medio que pueda ser comparable con los resultados obtenidos en los demás casos. Dichos valores se presentan en la Tabla 3.10.

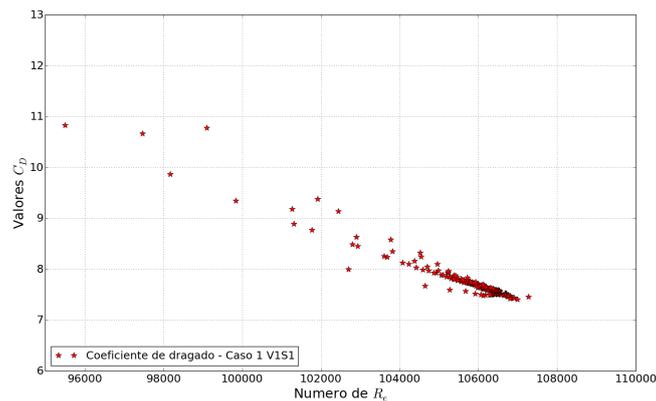


Figura 3.18: C_D vs R_e - caso 1 V1S1

Los casos 1 V1S0 y 1 V0S0 corresponden también a escenarios con y sin manglar pero para el caso sin pendiente en la zona de localización de los cilindros. El procedimiento para su análisis es similar al presentado para los casos 1 V1S1 y 1 V0S1. En las Figuras 3.19 a 3.21 se presenta la evolución de H_s a lo largo del canal y específicamente en la zona de localización del mangle, las diferencias porcentuales entre ambos casos y los valores calculados para R_e y C_D .

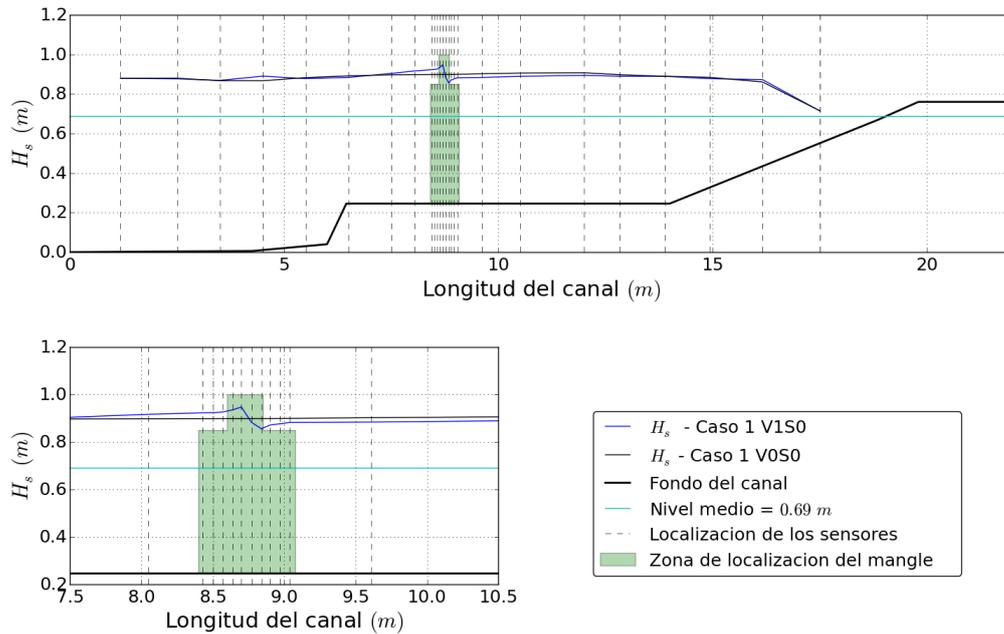


Figura 3.19: Evolución de H_s caso 1 V1S0 y caso 1 V0S0

Para este escenario, es importante notar que el punto de rotura se presenta en la zona de la playa, específicamente en el sensor *WG6-JunT* tanto para el caso sin manglar, como para el caso con manglar. En la Figura 3.19 se puede observar el mismo efecto barrera generado por la presencia del manglar en la evolución de H_s (línea azul). Se presentan valores menores al caso sin manglar (línea negra) hasta el último sensor, lo que quiere decir, que el efecto de la disipación por la presencia del manglar es más prolongado, ya que el fondo no ejerce ninguna variación hasta el sensor *WG5-JunT*, lo que podría generar mejores resultados en relación a la respuesta del manglar.

En la segunda parte de la Figura 3.19 se puede observar la zona de manglar y el comportamiento de H_s a través de la localización del esquema de cilindros para los casos 1 V1S0 y 1 V0S0; en ésta se puede notar una fluctuación de los valores de H_s menor a la presentada (Figura 3.15), de 5,0 a 6,0 cm, ya que en este caso no se incluye el efecto de la pendiente de fondo, lo que favorece el análisis del efecto de la presencia del obstáculo.

En la Figura 3.20 se puede observar como para el caso sin manglar los valores de H_s son casi constantes hasta el punto de rotura, mientras que para el caso con manglar se marcan los fenómenos de barrera en medio del manglar, y de disipación después de este punto. Se identifican comportamientos levemente diferentes hasta llegar a la zona de la playa, lo cual contrasta con los resultados anteriores dado que la diferencia porcentual debida a la disipación de energía por presencia del manglar, se presenta casi hasta el final del canal, abarcando mayor número de sensores que en el caso anterior y con magnitudes máximas más similares entre sí (23,33% vs 20,60%).

Al igual que para los casos 1 V1S1 y 1 V0S1, se tienen los valores de fuerza y velocidad de acuerdo a los parámetros mencionados y con ellos se obtienen los resultados para R_e y C_D presentados en la Figura 3.21, la cual tiene un comportamiento similar al caso anterior, con valores extremos mayores, cercanos a 20, mientras en el caso anterior eran cercanos a 13. Estos resultados, para todos los casos simulados se presentan en la Tabla 3.10, donde el C_D para el caso V1S0 es mayor

al C_D para el caso V1S1 en los casos 1 y 2; mientras que el C_D para el caso V1S1 es mayor al C_D para el caso V1S0 en los casos 3 y 4. Esto podría indicar una tendencia, con un efecto desfavorable de la presencia de la pendiente de fondo en el comportamiento del manglar frente a la acción del oleaje.

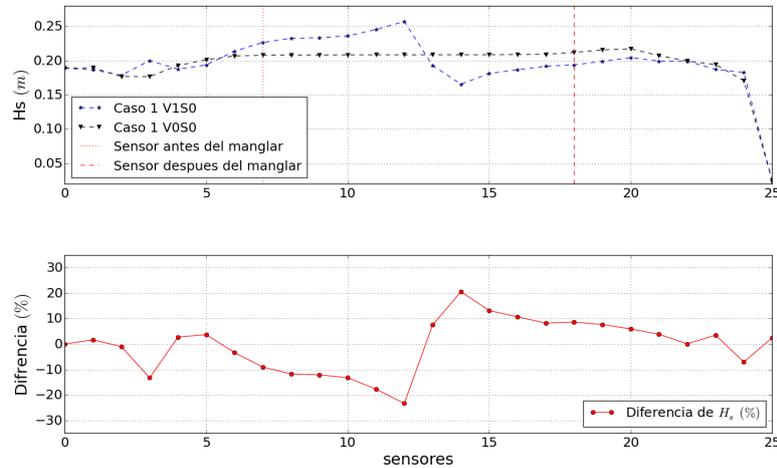


Figura 3.20: Diferencia porcentual de los valores de H_s para el caso 1 V1S0 vs caso 1 V0S0

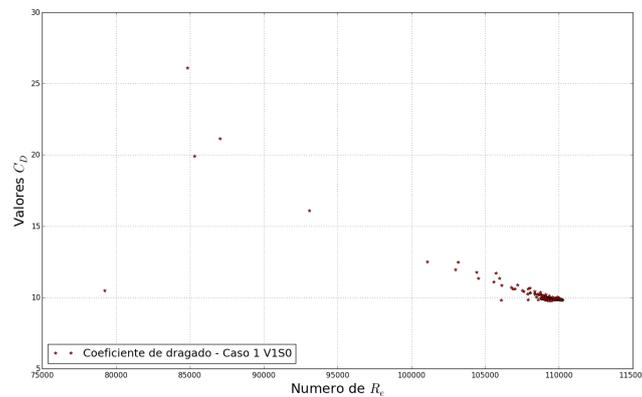


Figura 3.21: C_D vs R_e - caso 1 V1S0

Debido a la diferencia de pendiente en los casos presentados, los resultados mostrados tanto para la evolución de H_s como para el cálculo del C_D varían de acuerdo a los fenómenos de disipación predominantes en cada caso. En los resultados del C_D es fácil ver como en ausencia de pendiente de fondo el efecto del manglar es mayor, mientras que para la evolución de H_s es necesario comparar los 2 casos sin manglar y los 2 casos con manglar y así poder determinar la influencia de la pendiente de fondo. Estas comparaciones se presentan en las Figuras 3.22 y 3.23.

En la Figura 3.22 se presentan las pendientes de fondo utilizadas, $1,96^\circ$ con una línea continua negra y $0,00^\circ$ con una línea punteada azul, y los resultados obtenidos de H_s para el caso 1 V1S1 (línea roja) y el caso 1 V1S0 (línea morada). En ésta es fácil observar como antes de la localización del manglar el comportamiento del flujo es muy similar entre ambos casos hasta el sensor 5 (WG_4) y después, en $x = 5,50 m$ varía de forma tal que los valores que más se

disipan son los que corresponden al caso con pendiente de fondo. También es notable como el comportamiento del flujo en la zona de manglar es similar para ambos casos pero con valores diferentes, conservando la localización de los valores más altos de H_s (0,269 m para el caso 1 V1S1 y 0,257 m para el caso 1 V1S0), registrados en el sensor 13 (*WG12*) y los más bajos (0,169 m para el caso 1 V1S1 y 0,165 m para el caso 1 V1S0) registrados en el sensor 26 (*WG7-JunT*), variando 1,20 cm para los primeros y 0,4 cm para los segundos; lo cual sugiere un efecto de la pendiente en la respuesta del manglar debido a la acción combinada de fondo y vegetación; ya que las diferencias registradas corresponden a simulaciones donde se varía la pendiente de fondo, dejando constantes las demás condiciones geométricas e hidrodinámicas.

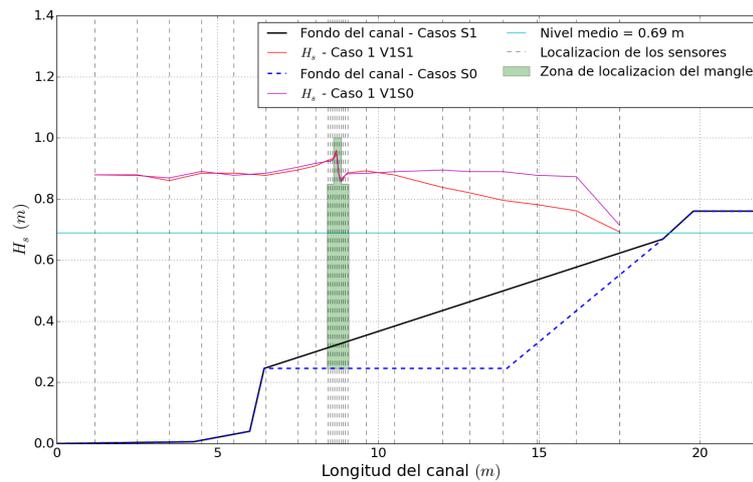


Figura 3.22: Evolución de H_s Caso 1 V1S1 y caso 1 V1S0

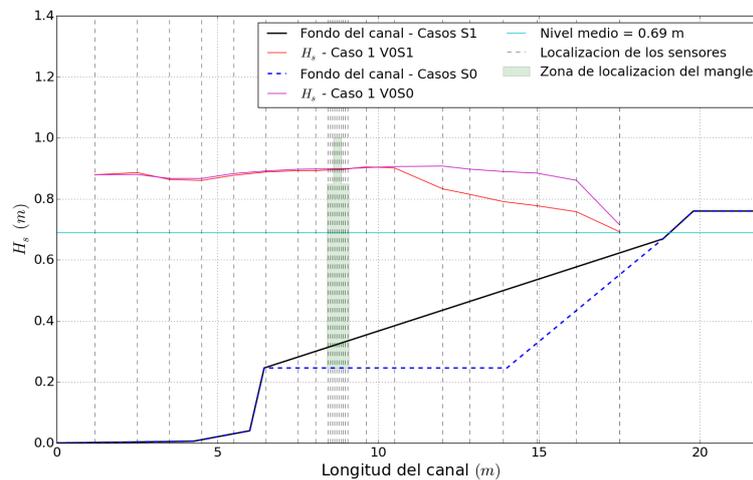


Figura 3.23: Evolución de H_s Caso 1 V0S1 y caso 1 V0S0

Por otro lado, la Figura 3.23 muestra la evolución de H_s para los casos sin manglar, representados por la línea roja (caso 1 V0S1) el correspondiente a la pendiente $1,96^\circ$ y la línea morada (caso 1 V0S0) el correspondiente a la pendiente $0,00^\circ$. En ésta se observa, como en la zona donde se ubica el manglar, la evolución del flujo es muy similar hasta el sensor *WG18* en $x = 10,5$ m; y como a partir de ese punto predomina la disipación por fondo, mostrando una notable diferencia entre los 2 esquemas.

Con lo anterior, se evidencia que la influencia de la pendiente del fondo en la zona de la playa y en el punto de rotura del oleaje, se ve afectada por la presencia del manglar debido a la disposición de los cilindros y por la disipación de energía generada por el efecto combinado de la pendiente y la vegetación. Dicho efecto es más notorio en el caso correspondiente a la pendiente de $0,00^\circ$, ya que se registra en mayor cantidad de sensores (Figura 3.19). Para el caso con pendiente de $1,96^\circ$, los valores son mayores pero se concentran en la zona inmediatamente después del manglar (Figura 3.15), es decir, se comporta como un efecto instantáneo que sugiere la predominancia del fondo en el comportamiento general.

De ésta forma, es importante evaluar los resultados de todos los casos planteados para poder mostrar el efecto combinado de la vegetación con la pendiente de fondo, tanto en la evolución de H_s como en el comportamiento de C_D , mediante el cálculo de los coeficientes de disipación por fondo y por vegetación, coeficientes que caracterizan el comportamiento del flujo y pueden dar una explicación cuantitativa del mismo. Para ello se analizan los comportamientos relacionados con la pendiente de fondo, como los presentados en la Figura 3.23, y los comportamientos debidos a la presencia del manglar en los esquemas con y sin pendiente (Figura 3.22). Estudiando específicamente el efecto barrera, el cual genera una sobre elevación considerable en el medio del esquema de cilindros.

Finalmente es importante resaltar que para todos los casos simulados y debido al esquema numérico implementado para la solución de la superficie libre en cada punto de la malla configurada, es necesario garantizar que exista continuidad, que los errores residuales para los campos de presión y velocidad sean del orden de 10^{-4} y que las unidades de pared (*yplus*) estén entre 5 y 300 (Foundation, 2015a), para garantizar la estabilidad numérica del modelo.

3.4.2. Efecto de la presencia de la estructura

Para determinar el efecto de la estructura del manglar sobre el flujo, varios autores han recurrido al uso del coeficiente de dragado para calcular tanto los coeficientes de disipación como la fuerza inducida por la vegetación sobre el fluido (Mazda *et al.*, 1997a; Husrin & Oumeraci, 2009; Mendez & Losada, 2004). Éstos valores se comparan con el número de Reynolds, que representa las condiciones del flujo, y con la relación de Keulegan - Carpenter, que representa la velocidad característica actuante en medio de la vegetación. Buscando relacionar las características geometrías y geomorfológicas de la vegetación con las condiciones medias del oleaje. A continuación se presentan las ecuaciones implementadas para calcular C_D , Re y K_C . Estas ecuaciones paramétricas son utilizadas mas adelante para la caracterización de los casos analizados, buscando diferenciar su comportamiento para los casos con fondo inclinado de los casos con fondo plano.

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho Au^2} \quad (3.10)$$

Donde F_D corresponde al valor medio de las fuerzas en x calculadas por *openFoam* sobre el conjunto de cilindros, u es la velocidad media incidente y A es el área frontal al flujo tomada desde el centro del manglar debido a que esta varía según la pendiente de fondo.

$$Re = \frac{uL_e}{\nu} \quad (3.11)$$

Donde L_e es la longitud característica de la vegetación, calculada según el planteamiento de Mazda *et al.* (1997a) y ν es la viscosidad cinemática del agua ($1,007 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

$$K_C = \frac{uT_p}{L_e} \quad (3.12)$$

Donde T_p es el periodo pico y L_e reemplaza el valor geométrico característico de la vegetación, considerado por otros autores como el diámetro medio de los cilindros, que es una variable geométrica representativa del manglar.

A partir de las ecuaciones y con los resultados presentados en los escenarios con manglar para los 2 esquemas de fondo seleccionados, se obtienen los valores medios en cada caso, de las variables que caracterizan la fuerza de dragado. En la Tabla 3.10 se presentan los valores iniciales de H_s y T_p , y los calculados para C_D , R_e y K_C en función de los resultados de las simulaciones de *openFoam*.

Tabla 3.10: Valores medios de C_D , R_e y K_C para cada caso con manglar

<i>Caso</i>	H_s <i>m</i>	T_p <i>s</i>	h <i>m</i>	C_D	R_e	K_C
1 V1S1	0,18	3,5	0,69	7,6802	104917,7966	2,3388
2 V1S1	0,25	3,5	0,69	4,6326	176153,9975	3,1220
3 V1S1	0,25	3,0	0,69	5,6190	156829,9048	3,0962
4 V1S1	0,25	2,8	0,69	5,1494	158187,6961	3,2757
5 V1S1	0,18	3,5	0,60	10,3708	117122,0174	1,3859
1 V1S0	0,18	3,5	0,69	9,7827	108355,3198	2,1047
2 V1S0	0,25	3,5	0,69	4,9139	175647,0154	3,0459
3 V1S0	0,25	3,0	0,69	5,0239	158435,7803	2,8395
4 V1S0	0,25	2,8	0,69	4,9564	160723,2704	3,1902
5 V1S0	0,18	3,5	0,60	11,0057	116479,0305	2,0726

De esta forma, al graficar C_D contra R_e en la primera parte de la Figura 3.24 para las pendientes 1 (círculos rojos) y 2 (cuadros azules) se puede observar la influencia de la inclinación del fondo dentro de los resultados, ya que para todos los casos con pendiente los resultados dan diferentes a los casos sin pendiente y en la mayoría de ellos son mayores los resultados para éstos últimos, mostrando una influencia negativa en la respuesta del manglar en presencia de un fondo inclinado. Como se presentó en la sección anterior, al predominar los procesos por pendiente, no son tan notorios los debidos a la vegetación. También es importante notar que el comportamiento de los valores de C_D vs R_e corresponde al registrado en la literatura por otros autores (Mazda *et al.* , 1997a; Husrin & Oumeraci, 2009; Hu *et al.* , 2014; Ozeren *et al.* , 2009) para diferentes tipos de vegetación emergida, con datos de campo y laboratorio, donde a menores valores de R_e , se registran mayores valores de C_D y a partir de las condiciones del flujo incidente, se puede bosquejar un comportamiento asintótico en la parte derecha de la Figura. Sin embargo, existen variaciones en los órdenes de magnitud según sea la exposición de la vegetación frente al oleaje y la textura de dicha vegetación, ya que se han registrado valores de C_D mayores para vegetación leñosa que para vegetación no leñosa (resultados de Mazda *et al.* (1997a) vs resultados de Hu *et al.* (2014)). De ésta forma se registra un efecto de la pendiente dentro del comportamiento del coeficiente de dragado; mientras que para R_e los valores no varían tan notablemente puesto que son función de la velocidad incidente, y de las condiciones iniciales de cada caso.

En la segunda parte de la Figura 3.24 se presenta el porcentaje de variación (sub o sobre estimación) entre los valores del coeficiente de dragado con base en los valores obtenidos para el caso de fondo plano, que en la mayoría de los casos, corresponde a los valores predominantes. Dichos valores varían entre -12% y 21% , rango que podría ser explicado por la presencia de la pendiente dentro del análisis de la respuesta del manglar; ya que en los casos que se comparan, la pendiente es el único elemento que varía.

Debido a esto, en los estudios de vegetación costera, en particular de *Rhizophora mangle*, por la configuración de su estructura, es importante tener en cuenta que con las metodologías tradicionales existe un porcentaje de incertidumbre en cuanto a su comportamiento dependiendo de la geomorfología de la zona. Éste comportamiento es difícil de explicar y simular, por lo que existen diferentes aproximaciones mediante el cálculo del flujo de energía y ecuaciones calibradas, que se pueden aplicar considerando las hipótesis en su formulación. En la siguiente sección se aplican algunas de ellas.

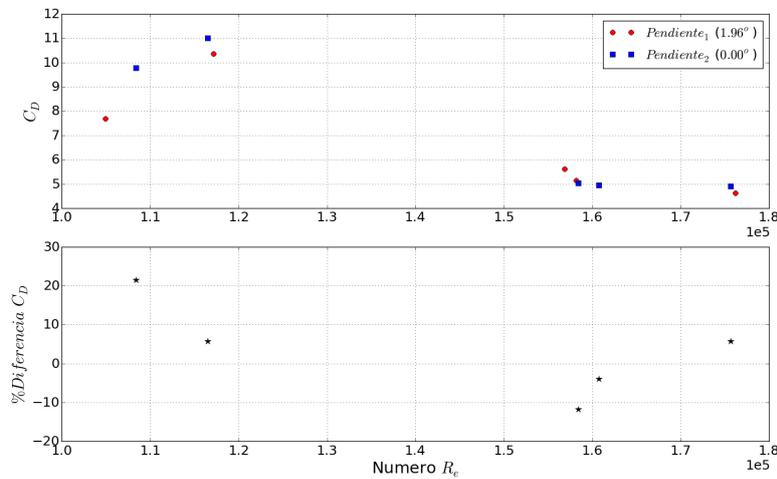


Figura 3.24: C_D vs R_e

Otra variable importante de considerar y que varía según la configuración del fondo es la L_e (Husrin & Oumeraci, 2009), la cual se calcula en función del área transversal de la vegetación, que a su vez está en función de la profundidad, es decir, para una configuración con fondo inclinado, ésta variará dependiendo del punto donde se tome, mientras que para el caso de fondo plano será constante en cualquier punto de medición, que en éste caso es considerado como el punto medio de la vegetación. Ésta variable, representada en la ecuación 2.3 puede reemplazarse en la ecuación 3.10 usando el área, A , para relacionar directamente el cálculo de C_D con L_e y también puede usarse en la ecuación 2.4 para el cálculo de C_D , derivada del trabajo de Mazda *et al.* (1997a). Según esto, los valores de L_e son mayores para el caso de fondo plano que para el inclinado, y al ser directamente proporcionales al C_D calculado para el modelo numérico y empleado para trabajo en campo, afectan de la misma forma el comportamiento de éste, es decir, el C_D es mayor para el caso de fondo plano que para el caso de fondo inclinado, si solo se considera la variación de L_e .

Por otro lado, la relación del número de K_C , tiene un comportamiento diferente al presentado por el C_D . En la Figura 3.25 se presentan los valores obtenidos para cada una de las pendientes, en función del C_D . Los casos para el caso con pendiente (círculos rojos) tienen, en su mayoría, valores más altos que los presentados para el caso sin pendiente (cuadros azules), contrastando con los resultados presentados en la Figura 3.24 para el C_D en función de la pendiente. El

porcentaje de variación entre los valores de K_C obtenidos, relativos a la condición de fondo plano muestra como los resultados varían entre -11% y 33% . De esta forma se tiene que al estudiar el comportamiento de K_C , en 4 de los 5 casos, es favorable la existencia de la pendiente de fondo.

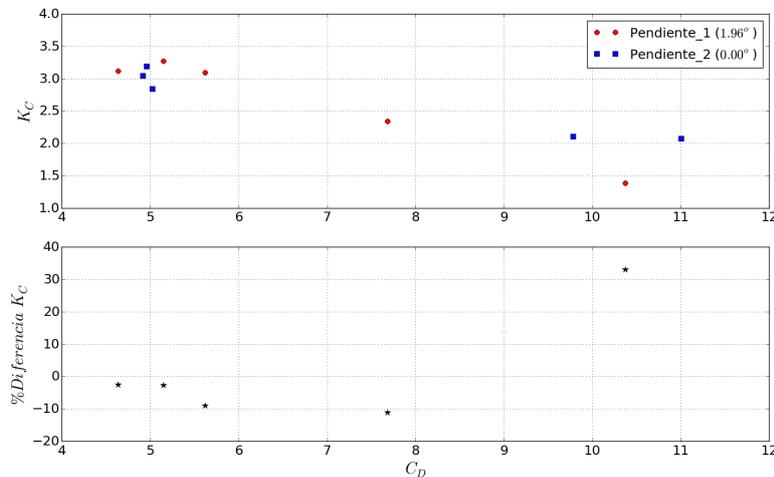


Figura 3.25: K_C vs C_D

Con la información presentada y considerando la variación de pendientes propuesta, donde los casos V1S1 corresponden a la configuración de fondo con pendiente a $1,96^\circ$ y los casos V1S0 a la inclinación de $0,00^\circ$. Se identifica que los valores de C_D son más altos para la mayoría de los casos con pendiente plana que para los casos con fondo inclinado (3 de 5 casos); mientras que los valores de K_C son más altos para la mayoría de los casos con pendiente inclinada. Estas diferencias en el comportamiento de los 2 parámetros utilizados para la caracterización del flujo en presencia de vegetación, verifica la influencia del fondo dentro del análisis del proceso físico y acentúa la hipótesis de su comportamiento no lineal. Con ello, se tiene un porcentaje de influencia del efecto combinado (pendiente - vegetación) sobre el flujo, que debe ser analizado para poder caracterizarlo numéricamente, ya que actualmente no se considera debido a la complejidad para su cálculo (Mendez & Losada, 2004).

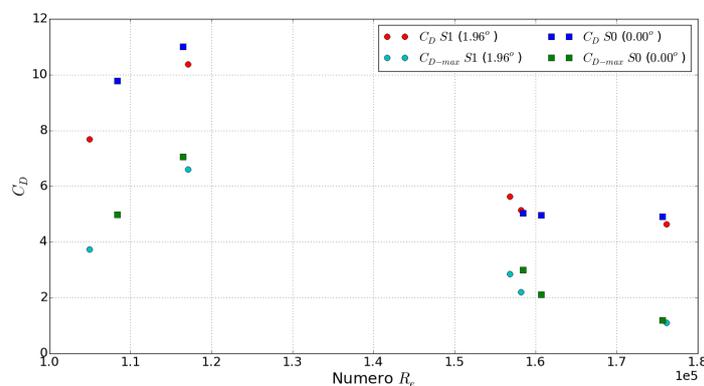


Figura 3.26: Comparación $C_{D-medio}$ contra C_{D-max}

Es importante resaltar que los valores obtenidos para C_D fueron calculados a partir de condiciones medias, es decir, se utilizó la velocidad media incidente y la F_D media de los datos simulados

en *openFoam* para cada uno de los casos. Sin embargo, Husrin & Oumeraci (2009) sugiere trabajar bajo condiciones máximas, de fuerza y velocidad, en busca de castigar el comportamiento del C_D , para evitar sobre estimaciones de la eficiencia del manglar como estructura de protección costera. Para ello, como ejercicio comparativo, se calculó el C_D a partir de los valores máximos mencionados (C_{D-max}) y se gráfico su comportamiento para los casos con y sin pendiente. Dicho comportamiento se compara en la Figura 3.26, con el C_D utilizado en el desarrollo de este trabajo. Allí se puede observar como los valores para el C_{D-max} tienen un comportamiento similar a los valores de C_D , donde los valores más altos entre $S0$ (cuadros verdes) y $S1$ (círculos *cyan*) corresponden en su mayoría, a los casos con fondo plano; pero las magnitudes registradas son menores, variando entre 1,09 y 7,05. De esta forma, se tienen valores menores para el C_D bajo las condiciones máximas del flujo, situación que debe ser estudiada para el diseño de estructuras de protección donde se emplee la vegetación, bajo condiciones extremas del oleaje.

3.4.3. Disipación de H_s

Con la información obtenida mediante la simulación de los 20 casos, se obtienen los valores de H_s en cada uno de los 26 sensores dispuestos a lo largo del canal. En la Figura 3.27 se presenta la evolución de la H_s relativa, calculada como la relación entre el valor obtenido en cada sensor y el valor de H_s definido para la simulación de cada caso (ver Tablas 3.8 y 3.9). En ella se puede observar el efecto descrito previamente, donde en la zona del manglar se presenta un aumento de H_s . También se puede observar que los valores en el primer sensor no son exactamente 1,0 ya que al aplicar la metodología de la *FFT* en casos monocromáticos se tiende hacer sobre estimaciones debido a que su formulación está basada en series de datos no uniformes o en análisis espectral.

En dicha figura se observa la influencia del efecto combinado (manglar + pendiente) dadas las diferencias que se presentan entre los casos con pendiente y los casos sin pendiente, donde en los primeros la H_s disminuye antes de llegar al final del canal, mientras que en los segundos decae bruscamente entre $x = 16,16 m$ y $x = 17,50 m$. También se observan diferencias entre la presencia y la ausencia del manglar, ya que después del aumento de H_s en $x = 8,77 m$ se presenta una fuerte disipación en los casos donde está presente el obstáculo. Ésto concuerda con los resultados obtenidos por Mendez & Losada (2004), donde la amortiguación debida a la presencia de la vegetación disminuye la H_s e influye en la transformación del oleaje, en función de las propiedades geométricas del campo de vegetación (tamaño, ancho, distribución, etc.)

Según lo anterior y considerando que en la zona de localización del manglar se presentan procesos de disipación por vegetación y por fondo, se hace un análisis a la luz del flujo de energía entre los sensores a partir de la información disponible por el post procesamiento de los resultados del modelo numérico. Con esta información, con el planteamiento general de la teoría de conservación de flujo de energía, y con las parametrizaciones registradas en la literatura para el cálculo de la disipación (Alsina & Baldock, 2007; Mendez & Losada, 2004) se puede hacer la comparación teórica de un caso con manglar y con pendiente de fondo contra la suma de un caso con manglar sobre fondo plano, más un caso sin manglar y con pendiente de fondo (ej: caso V1S1 vs caso 1 V1S0 + caso 1 V0S1). Esto se hace con el fin de verificar el comportamiento lineal de la suma de las disipaciones, o de visualizar una no linealidad, debido a la interacción de todos los fenómenos que se llevan a cabo en el escenario combinado, mediante un porcentaje de explicación parcial del proceso.

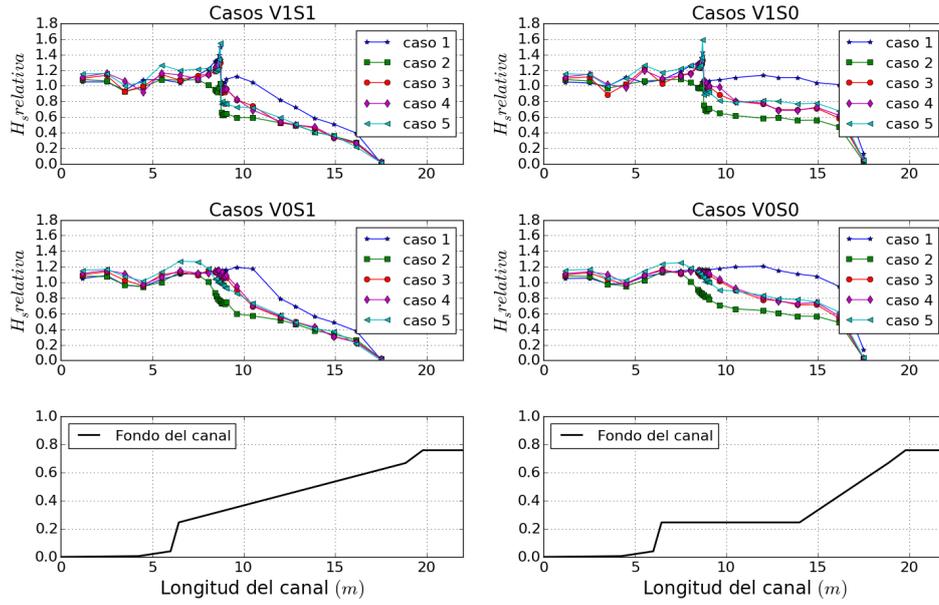


Figura 3.27: Evolución de H_s relativa para los 20 casos simulados

Debido a que en el cálculo de los coeficientes de disipación no es posible diferenciar cuales sensores están dentro y cuales fuera del manglar, al aplicar las ecuaciones, el comportamiento en todos los sensores sugiere existencia de mangle en todo el canal. Por ello para el cálculo del flujo de energía y de los coeficientes de disipación se consideran los sensores ubicados en la zona del manglar, desde el sensor 8 ($WG7$) ubicado en $X= 8,05 m$ hasta el 19 ($WG1-JunT$) en $X= 9,61 m$, ya que se tiene información de la zona anterior al manglar, dentro del manglar, entre filas de cilindros e inmediatamente después del manglar.

El flujo de energía (D) se calcula partir de las ecuaciones 3.13 y 3.14 entre los sensores mencionados, considerando que la transferencia de energía va en dirección a la playa, por lo que valores negativos en los resultados pueden hacer referencia a flujos *outshore* debidos a fenómenos de reflexión y el efecto barrera del manglar. Éste procedimiento se realiza para todos los casos simulados y sus resultados se comparan de acuerdo a la Tabla 3.11, donde el caso combinado corresponde a los casos V1S1, que se comparan con el resultado de sumar los casos a (V1S0) con los casos b (V0S1).

$$\frac{1}{8} \rho g \frac{\partial C_g H^2}{\partial x} = D \quad (3.13)$$

$$\frac{(EC_g)_1 - (EC_g)_2}{\Delta x} = D_{1-2} \quad (3.14)$$

Los resultados de comparar los casos combinados con la suma de los casos tipo *a* con los tipo *b* se presentan en la Figura 3.28 donde se observan diferencias en los valores máximos y en los mínimos en la zona donde se ubica el cilindro más alto, que es el punto donde se observa una sobre elevación en la evolución de la H_s . Así mismo, en algunos puntos se puede observar como la suma de los casos *a* y *b* se contrarrestan de forma tal que se acercan al comportamiento real del caso combinado, lo que sugiere una compensación de los fenómenos físicos presentes y evidencia procesos no lineales.

Tabla 3.11: Esquema para la comparación de los resultados de flujo de energía y coeficientes de disipación

H_s	T_p	h	<i>Caso combinado</i>		<i>Caso a</i>	<i>Caso b</i>		
m	s	m	<i>Vegetación + Pendiente</i>	\Rightarrow	<i>Solo vegetación</i>	+ <i>Solo pendiente</i>		
0,18	3,5	0,69	1	V1S1	1	V1S0	1	V0S1
0,25	3,5	0,69	2	V1S1	2	V1S0	2	V0S1
0,25	3,0	0,69	3	V1S1	3	V1S0	3	V0S1
0,25	2,8	0,69	4	V1S1	4	V1S0	4	V0S1
0,18	3,5	0,60	5	V1S1	5	V1S0	5	V0S1

De igual forma se obtiene una diferencia en el flujo total de energía D debido al comportamiento de las variables, a partir de las condiciones iniciales en cada caso y una predominancia de los valores correspondientes a los casos solo con vegetación (casos a), identificados con los círculos verdes, lo cual muestra un aumento del flujo de energía en función de la presencia o no del obstáculo, haciendo visible su efecto sobre el flujo.

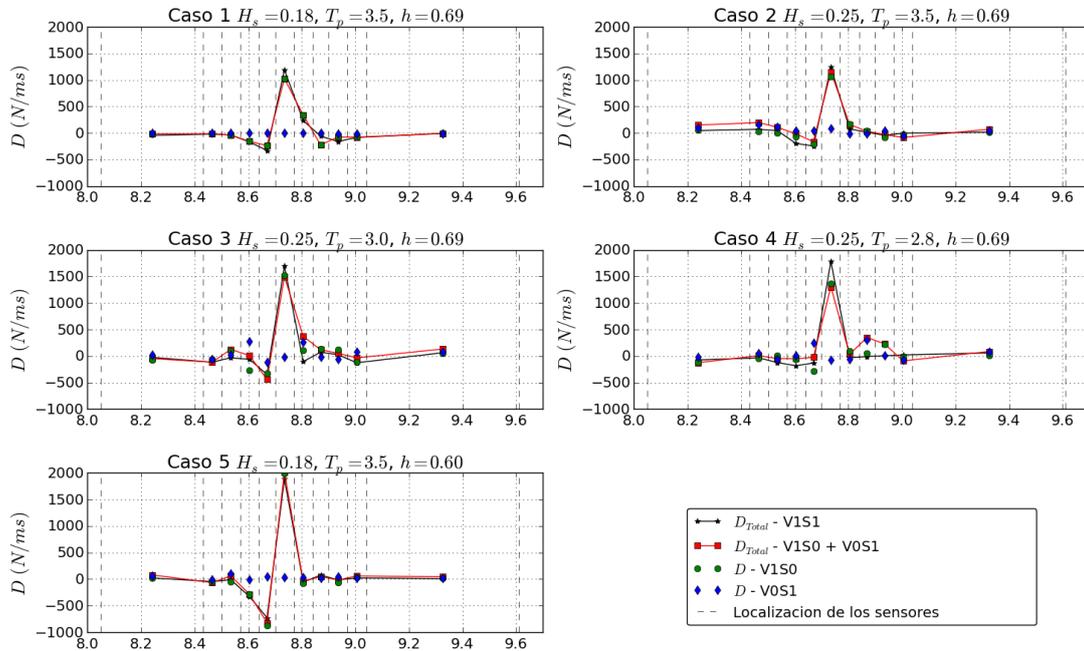


Figura 3.28: Flujo de energía para los 20 casos simulados

Con las diferencias registradas entre los casos combinados contra la suma de los casos a y b se puede justificar entonces la necesidad de entender mejor, desde el punto de vista numérico, los procesos asociados a la interacción flujo - estructura - pendiente, ya que las formulaciones hacen sub y sobre estimaciones al analizar varios fenómenos físicos dentro de un mismo escenario. En este caso, la suposición de la suma lineal de los efectos por vegetación y pendiente genera una sub estimación de los valores reales presentes en un caso combinado, por lo que es necesario explicar los procesos relacionados al porcentaje de diferencia (ver Tabla 3.12), que pueden determinar la efectividad de un manglar como sistema de protección frente a la acción del oleaje según su localización en referencia a la playa y a los asentamientos humanos aledaños.

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados obtenidos para los valores calculados de flujo de

energía entre los sensores 13 (*WG12*) y 14 (*WG13*), ubicados en $x = 8,70 \text{ m}$ y $x = 8,77 \text{ m}$ respectivamente, los cuales corresponden a los valores más altos registrados. En ésta se presentan los valores de flujo de energía para el caso combinado, los correspondientes para los casos *a* y *b*, la suma del flujo de energía de estos casos, el gradiente de flujo de energía entre el caso combinado y la suma de los casos *a* y *b*; y la diferencia relativa de flujo de energía en la comparación basada en el caso combinado. Con ello, se puede observar la diferencia relativa entre los casos analizados en función de las condiciones iniciales para la simulación, y se puede estimar de forma inicial el porcentaje de flujo de energía que esta siendo omitido en la suma lineal, dando paso a un esquema no lineal donde la predominancia del manglar puede estar en función de la inclinación que tenga el fondo.

Tabla 3.12: Resultados flujo de energía

H_s m	T_p s	h m	<i>Caso combinado</i> (N/ms)	<i>Caso a</i> (N/ms)	<i>Caso b</i> (N/ms)	Suma (N/ms)	Δ_{fe} (N/ms)	<i>Diferencia</i> %
0,18	3,5	0,69	1189,443	1023,551	0,095	1023,647	165,796	13,939
0,25	3,5	0,69	1242,696	1060,344	90,386	1150,730	91,966	7,401
0,25	3,0	0,69	1697,100	1513,293	-16,629	1496,665	200,435	11,810
0,25	2,8	0,69	1783,133	1370,218	-66,925	1303,292	479,840	26,909
0,18	3,5	0,60	1887,777	1989,066	27,194	2016,260	-128,483	-6,806

Con lo anterior se obtiene una diferencia relativa para los valores máximos de D calculados, que oscila entre el -6% y el 27% . Sin embargo, como se puede observar en la Figura 3.28, la diferencia en los demás puntos del flujo de energía, sobre todo en los extremos es mayor debido a la distancia que se presenta entre las líneas negras y rojas. De esta forma se podría decir que empleando el cálculo del flujo de energía usando un factor de seguridad, se tiene una aproximación aceptable del caso combinado con la suma lineal de los efectos para los valores máximos, ubicados en la zona de mayor obstáculo (donde se encuentra el cilindro de mayor tamaño). Sin embargo no aplica para los puntos ubicados antes y después del manglar, los cuales también deben analizarse ya que en ellos se registra afectación debida al manglar.

Con la información obtenida mediante el cálculo del flujo de energía se tiene una primera aproximación a la no linealidad del fenómeno de interacción flujo - estructura - pendiente. Por otro lado, se procede a calcular los coeficientes de disipación por vegetación y por fondo planteados por Mendez & Losada (2004) y Alsina & Baldock (2007) para los mismos sensores utilizados previamente. Estos valores se suman para los casos combinados (casos V1S1) y al igual que para el flujo de energía, se comparan con la suma del coeficiente de disipación por vegetación de los casos *a* (casos V1S0) con los coeficientes de fondo de los casos *b* (casos V0S1), para verificar la no linealidad del fenómeno, dado que las sumas de los casos *a* y *b*, al igual que para el flujo de energía arrojan valores diferentes a los obtenidos para el caso combinado.

Mendez & Losada (2004) plantean una ecuación para el cálculo de los coeficientes de disipación debido a la presencia de vegetación, que junto con el coeficiente de disipación por fondo, conforman el término de disipación total en la ecuación de conservación de energía. Para ello se asume una relación lineal entre los 2 coeficientes debido a la dificultad de identificar físicamente la contribución de cada término en la zona de la vegetación. En éste trabajo, se implemento la ecuación desarrollada para la disipación por vegetación con algunas consideraciones particulares (ver ecuación 3.15) y se aplico en cada uno de los 12 sensores ubicados en la zona del manglar.

$$D_{veg} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \rho N d C_D \left(\frac{kg}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3(k\alpha h) + 3\sinh(k\alpha h)}{3k \cosh^3(kh)} H^3 \quad (3.15)$$

Donde ρ es la densidad del agua ($998,2 \text{ kg/m}^3$), N la densidad de la vegetación (*cilindros/m*²), d el diámetro de las raíces, C_D el coeficiente de dragado (1 para árboles incluyendo manglares), k el número de ola, σ la frecuencia angular, h la profundidad del agua (localmente constante), α la fracción del agua ocupada por la vegetación (1 para vegetación emergida) y H la altura de ola significativa.

Debido a que dicho planteamiento fue calibrado con información de laboratorio de *L. hyperborea* y los valores registrados tanto en este trabajo como en la literatura para C_D en manglares pueden tener valores de hasta 10 (Mazda *et al.*, 1997a), para el cálculo del coeficiente de disipación por vegetación se utilizaron los valores calculados con la información del modelo numérico y presentados en la Tabla 3.10. Adicionalmente, como se trabaja con un fondo con pendiente, se varió el valor de h en cada punto según la ubicación del sensor, y se trabajó con $\alpha = 0,8$ dado que no todas las raíces emergen debido a su ubicación en los escenarios con pendiente y sin pendiente, el valor de N se calculó a partir de la distribución espacial de los cilindros ($334,69 \text{ cilindros/m}^2$), el diámetro promedio considerado fue el de las raíces ($0,024 \text{ m}$) y los valores de H corresponde a los calculados de H_s en cada sensor para cada caso. Éstas modificaciones se realizaron acorde a los resultados de Mendez & Losada (2004) donde existe un efecto sobre la disipación por fondo, ya que la amortiguación del oleaje generada por la vegetación reduce la relación H/h induciendo al oleaje a romper más cerca a la costa.

Por otro lado, se calcula el coeficiente de disipación por fondo para los 12 sensores a partir de la ecuación modificada de Battjes & Janssen (1978) presentada por Alsina & Baldock (2007) donde se asume que la relación $H/h \neq 1$. Dicha expresión esta calibrada con datos de laboratorio y validada con la comparación de otros modelos mediante el uso de una batimetría variable.

$$D_{slope} = A \frac{H^3}{h} \left[\left(\left(\frac{H_b}{H} \right)^3 + \frac{3H_b}{2H} \right) \exp \left(- \left(\frac{H_b}{H} \right)^2 \right) + \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \left(1 - \text{erf} \left(\frac{H_b}{H} \right) \right) \right] \quad (3.16)$$

Donde A es un factor de sedimento calculado mediante la ecuación 3.17 con f_p como la frecuencia pico, y B un parámetro de ajuste de $O(1)$ que se determina con los datos de campo o laboratorio medidos. *erf* es la función de error de Gauss programada por defecto en el paquete *math* de *Python*, H_b es la máxima altura de ola antes de rotura, la cual está en función del número de onda, la profundidad y el parámetro γ (ver ecuación 3.18). Este último se calcula a partir de la H_s inicial de cada caso y la longitud de onda correspondiente.

$$A = \frac{1}{4} \rho g f_p B \quad (3.17)$$

$$H_b = \frac{0,88}{k} \tanh \left(\gamma \frac{kh}{0,88} \right) \quad (3.18)$$

$$\gamma = 0,5 + 0,4 \tanh \left(33 \frac{H_0}{l_0} \right) \quad (3.19)$$

Con estas formulaciones se obtiene la suma de los coeficientes de disipación, $D_C = D_{veg} + D_{slope}$, para los casos combinados, donde se calcula el D_{veg} y el D_{slope} con la información de los casos

V1S1; y para la suma de los casos a y b , donde el D_{veg} se obtiene de los casos V1S0 y el D_{slope} de los casos V0S1. Estos valores que son comparados sensor a sensor para evaluar la presencia de efectos no lineales por la interacción de los diferentes agentes dentro del flujo. Los valores calculados para D_C en los casos mencionados se presentan en la Figura 3.29, con un comportamiento similar al presentado en la Figura 3.28, donde los valores más altos se registran en la zona donde se encuentra el cilindro más grande y la suma de los casos a y b (línea roja) genera una subestimación de los picos más altos registrados por el caso combinado (línea negra). En los extremos el comportamiento varía en función de las condiciones iniciales, con valores diferentes para cada caso.

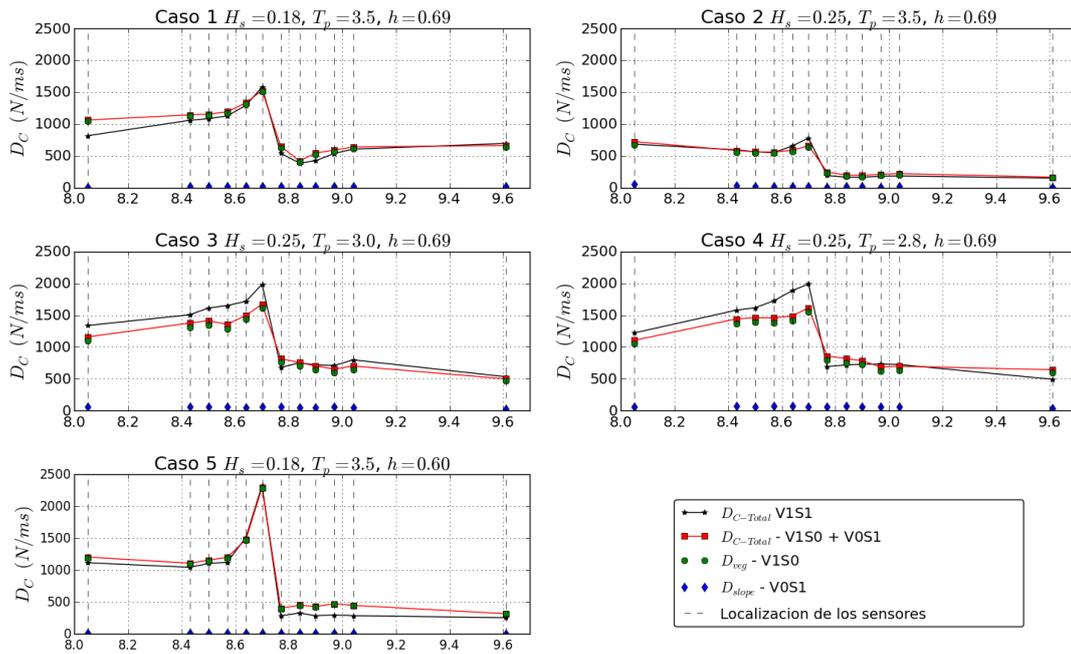


Figura 3.29: Suma de los coeficientes de disipación calculados para los 20 casos simulados

También es importante notar como la tendencia de las líneas rojas y negras se mantiene haciendo notoria la influencia del manglar y al igual que en el cálculo del flujo de energía existe una predominancia de los coeficientes de disipación por vegetación (círculos verdes). Sin embargo, el rango de los datos calculados varía, ya que no es posible tener coeficientes de disipación, por fondo y por vegetación negativos, lo cual restringe el análisis de todos los fenómenos físicos presentes.

Tabla 3.13: Resultados de los coeficientes de disipación

H_s	T_p	h	Caso combinado	Caso a	Caso b	Suma	Δ_{D_c}	Diferencia
m	s	m	(N/ms)	(N/ms)	(N/ms)	(N/ms)	(N/ms)	%
0,18	3,5	0,69	1579,367	1509,595	16,878	1526,473	52,894	3,349
0,25	3,5	0,69	779,008	642,239	17,148	659,388	119,620	15,355
0,25	3,0	0,69	1985,858	1611,328	59,930	1671,258	314,600	15,842
0,25	2,8	0,69	1990,148	1553,222	61,859	1615,082	375,066	18,846
0,18	3,5	0,60	2327,075	2286,367	8,063	2294,431	32,644	1,403

Para visualizar mejor estos resultados, en la Tabla 3.13 se presentan los valores obtenidos para los coeficientes de disipación en el sensor 13 (*WG12*), el cual corresponde al sensor ubicado en medio del manglar y registra los valores más altos. En ésta, al igual que en la Tabla 3.12 se presentan los resultados de los coeficientes de disipación calculados para el caso combinado, los correspondientes a la disipación por vegetación (caso *a*) de los casos V1S0, los de disipación por fondo (caso *b*) de los casos V0S1, la diferencia entre los resultados de los casos combinados y la suma de los casos *a* y *b*, y la diferencia relativa en función del caso combinado.

Al igual que los resultados presentados para el flujo de energía se obtiene una diferencia relativa hasta del 19%, pero en este caso oscila desde el 1%, sin embargo en la Figura 3.29 se puede observar que la diferencia en otros puntos puede ser mayor. De esta forma se verifican cuantitativamente los resultados del flujo de energía, donde la suma lineal de los casos con vegetación y con pendiente no representan completamente el comportamiento del fenómeno físico, existiendo un porcentaje de energía no explicado y que está en función de la interacción de las variables allí presentes.

Aunque los valores obtenidos para el flujo de energía se presentan entre sensores contiguos y los coeficientes de disipación se presentan para cada sensor de forma individual, es fácil observar, como los primeros tienen valores de energía más altos que los segundos. Ésto debido a que en el flujo de energía se incluyen todos los procesos físicos presentes, mientras que la suma de los 2 coeficientes de disipación mencionados no representa la totalidad de estos fenómenos y son capaces de explicar solo un porcentaje del total de la transferencia de energía. Sin embargo, otros trabajos muestran como los resultados numéricos de la disipación de energía de los 2 efectos por separado, contribuyen al decaimiento total del oleaje, mostrando buena concordancia con datos experimentales (Mendez & Losada, 2004). Los resultados presentados en las Tablas 3.12 y 3.13 para éste trabajo, muestran similitudes en el porcentaje no explicado de la suma lineal de los efectos por fondo y por vegetación; así como de la predominancia de cada uno de los efectos dentro del proceso de interacción.

Por otro lado, dado que los coeficientes de disipación son calculados para cada sensor, se realizó una comparación entre los sensores contiguos con el fin de verificar de forma porcentual la disipación generada entre los puntos estudiados y de esta forma, verificar cuantitativamente el comportamiento registrado en el cálculo de los flujos de energía. Para ello se calculó la diferencia porcentual mediante la ecuación 3.20 y los resultados se presentan en la Figura 3.30, donde el comportamiento en la zona media del manglar es el esperado, es decir, similar a los resultados previos presentados donde la mayor disipación se genera entre los sensores 13 (*WG12*) y 14 (*WG13*) para todos los casos simulados.

$$Dif_{Dc}(\%) = \frac{(D_{veg} + D_{slope})_1 - (D_{veg} + D_{slope})_2}{(D_{veg} + D_{slope})_1} * 100 \quad (3.20)$$

En la Figura 3.30 se tiene que la disipación máxima registrada por el caso combinado (línea negra) presenta valores entre el 65% y el 88%, mientras que para la suma de los casos *a* y *b* (línea roja), tiene valores entre el 46% y el 82%, con diferencias entre ambos escenarios del 5% y el 19%. También es importante notar que en las zonas aledañas a la mayor disipación se tienen valores negativos como en el caso del flujo de energía, lo que sugiere una respuesta mayor entre los sensores ubicados en medio del manglar en comparación a los que se encuentran en los extremos de éste o por fuera. Además, este comportamiento está en función de los valores de H_s obtenidos por la modelación numérica, con lo cual, los procesos de disipación registran el aumento de los valores de H_s en medio del manglar como una disipación negativa o un aumento de energía.

Todo lo anterior significa, que existe un porcentaje de no linealidad asociado al efecto combinado de la disipación por fondo y por vegetación, que en este trabajo, bajo escenarios de eventos medios (no extremos) corresponde a un rango (en valor absoluto) del 1% al 27%, definido entre los resultados de flujo de energía y los coeficientes de disipación. Valores que al ser extrapolados a las condiciones iniciales de H_s representan una variación entre 0,18 cm a 4,86 cm para los casos con $H_s = 0,18$ m y 0,25 cm a 6,75 cm para aquellos con $H_s = 0,25$ m, siendo una variación considerable en la determinación de la efectividad del manglar, al llevar el escenario en escala de laboratorio a una escala real.

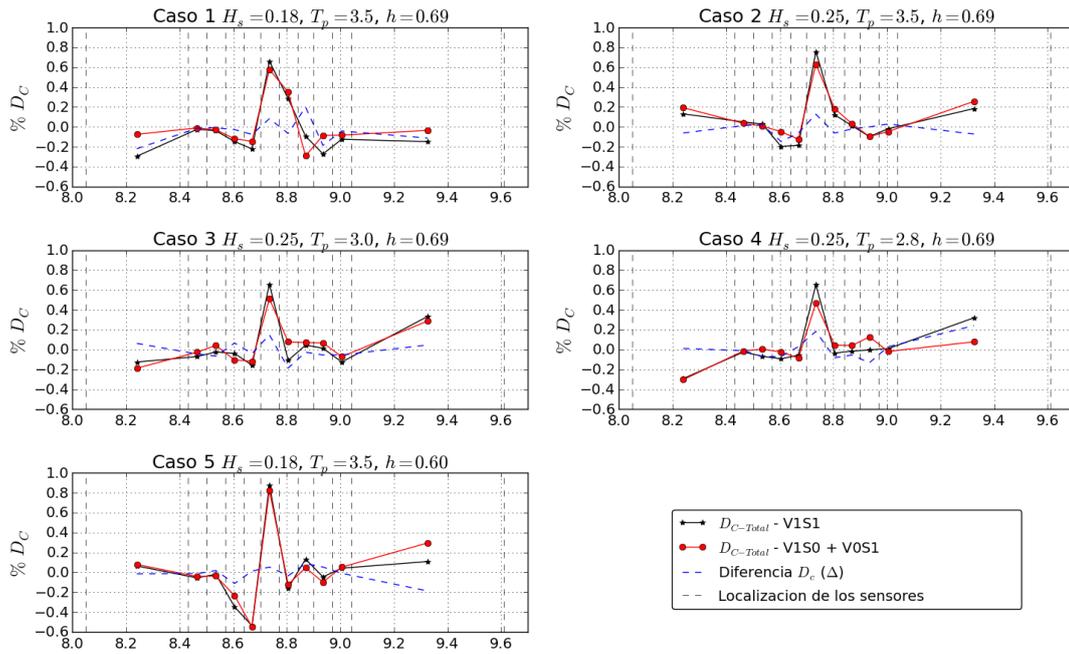


Figura 3.30: Diferencia D_C entre sensores

Estos procesos están dominados por la configuración del escenario de estudio, las condiciones iniciales del oleaje y las hipótesis tenidas en cuenta, por lo cual determinar un coeficiente de ponderación de la influencia de la disipación por fondo dentro del cálculo de la disipación por vegetación o una formulación que incluya el efecto combinado de estos procesos se dificulta con la información disponible en este trabajo, ya que estadísticamente es necesario tener un número significativo de casos, además de que se deberían considerarse otras inclinaciones de fondo. Por otro lado, los procesos de disipación también se ven afectados por la predominancia de la pendiente o de la vegetación, por lo cual es necesario buscar desde que punto (inclinación) es predominante la disipación por fondo y que valores toman las variables de C_D , H_s , D_{veg} y D_{slope} para calcular el coeficiente de ponderación y poder diseñar un esquema de protección costera que involucre ambas respuestas de forma equilibrada según las condiciones de la zona de estudio. Para obtener una relación como la del C_D con el número de K_C empleada por Mendez & Losada (2004) para relacionar la respuesta de la vegetación costera con las condiciones del flujo, partiendo de la disponibilidad de información suficiente para realizar una regresión estadística; procedimiento que han realizado diferentes autores para relacionar también el C_D con el número de R_e y que Husrin & Oumeraci (2009) plasma en su trabajo como métodos de aproximación al cálculo indirecto del C_D .

Todos los resultados obtenidos mediante los análisis presentados, tienen diferentes limitaciones asociadas al uso del modelo numérico y a las diferentes simplificaciones e hipótesis que fueron empleadas para su configuración. Es por ello que se hace necesario y pertinente, para los alcances de este trabajo, analizar la respuesta del *Rhizophora mangle* a la luz de la toma de datos en campo. Donde las comparaciones, como se mencionó antes, solo pueden hacerse de forma cualitativa, ya que el modelo numérico no representa el escenario real estudiado en campo y su configuración bajo las mediciones llevadas a cabo, se salen de los objetivos planteados en esta investigación. Para ello en el Capítulo 4 se presenta un caso de estudio, donde se recolectó información en campo para el cálculo del C_D , el flujo de energía, los coeficientes de disipación y la evolución de H_s , en un parche de manglar debidamente instrumentado.

Capítulo 4

Análisis del C_D y de la disipación asociada a datos de campo

Para el estudio del fenómeno de interacción ola - vegetación es importante caracterizar y analizar a fondo los procesos generados *in situ*, ya que es en la naturaleza donde se evidencian todas las variables físicas y biológicas involucradas y de donde se puede determinar cuales son las de mayor peso o las mas representativas según el enfoque del estudio a realizar y de esta forma validar las simplificaciones a las que halla lugar dentro del montaje en un modelo numérico o físico buscando conservar en la medida de lo posible el comportamiento real del fenómeno, evitando generar sobre estimaciones o sub estimaciones del mismo.

Sin embargo la información recolectada depende de las condiciones climáticas, topográficas y estacionales de la zona de estudio, razón por la cual no es posible tener el control de todas las variables asociadas y se genera un margen de error que debe ser considerado en el momento de realizar el análisis de los resultados o de sacar conclusiones. También es importante mencionar que en muchas ocasiones se generan limitaciones debidas a las características o configuración de los equipos, a la disponibilidad para el tiempo de medición y de los recursos económicos. Por ello, para el caso particular de este estudio, se han registrado en la literatura metodologías para evaluar la disipación del oleaje por presencia de manglares y para la caracterización de la estructura de los árboles, su variabilidad y su relación como un solo obstáculo, mediante la toma de datos de superficie libre y velocidad, perfiles de playa y batimetrías, diámetros y alturas de raíces y troncos en cada una de las parcelas dispuestas sobre la vegetación y densidad de raíces por parcela.

Con la información mencionada se obtienen mediciones para las componentes hidrodinámicas y forestales relevantes dentro del análisis que se desea con el presente trabajo, cuyo procesamiento se realizará partiendo de las consideraciones de Mazda *et al.* (1997a) sobre gradiente de superficie libre, volumen de control, longitud efectiva de la vegetación y su influencia en el cálculo del C_D y de las aproximaciones de Dalrymple & Dean (1984) sobre el flujo alrededor de un cilindro. De igual forma es importante destacar otras metodologías como las de Alongi (2008) y Komiyama *et al.* (2008), quienes plantean su esquema de trabajo sobre las relaciones alométricas, de biomasa y de relación entre diámetros de raíces y troncos según la edad de los individuos y de esta forma determinan su capacidad de amortiguar el efecto del oleaje.

4.1. Zona de estudio

La zona de estudio seleccionada para el estudio del fenómeno de interacción ola - vegetación se determinó considerando la accesibilidad a la toma de datos tanto de la variabilidad de raíces y troncos del manglar como de las características del oleaje incidente, de esta forma se instrumentó un parche de *Rhizophora mangle* localizado al Norte de Isla Grande, una de las 30 islas del archipiélago de Islas del Rosario a 35 km al sureste de Cartagena, Colombia. Las islas se encuentran protegidas por una barrera de arrecifes de coral, por lo que el oleaje que llega a las playas ya está transformado y corresponde a un oleaje post rotura.

En la zona se encuentran varios parches de *Rhizophora mangle* en frente a la acción del oleaje y se seleccionó arbitrariamente el que se encuentra localizado entre las coordenadas N 10.18040⁰ - W 75.73827⁰ y N 10.18039⁰ - W 75.73827⁰, con un área total de 26,26 m². En la Figura 4.1 se puede observar el mapa general de localización de la zona a estudiar.



Figura 4.1: Mapa de localización de la zona de estudio

En busca de validar la teoría y aplicar las metodologías registradas en la literatura para explicar el proceso de disipación de energía del oleaje por la presencia de la vegetación, el parche de manglar se seleccionó de tal forma que permitiera medir la superficie libre antes, en medio y detrás de él. Además por su tamaño, éste permitió capturar toda la variabilidad de raíces y troncos, mediante la medición de diámetros, altura de inundación, densidad y nivel de interacción de las raíces desde el tronco. En la Figura 4.2 se puede observar los 4 cuadrantes instrumentados dentro del parche, donde la relación de raíces por m² de agua varía según su localización, es decir, si está en la parte frontal (3 y 4) donde hay menor densidad de raíces o en la parte posterior del manglar (1 y 2) donde la densidad de raíces es mayor.



Figura 4.2: Zonificación del parche de manglar

4.2. Metodología

Como se mencionó previamente, para evaluar la disipación de la energía del oleaje generada por la presencia del parche de manglar, la información recolectada se dividió en 2 componentes. El primero corresponde a la caracterización geométrica de la zona, usando cuadrantes, pie de rey, cinta métrica y GPS; el segundo corresponde a las mediciones hidrodinámicas mediante la disposición de 3 sensores de presión atravesando el parche de manglar de forma perpendicular a la dirección de las olas. A continuación se describe el procedimiento realizado para cada uno de los componentes.

Primero, para obtener toda la información del parche de manglar, como la distribución y densidad de raíces y la variación del diámetro con la profundidad, se utilizó un muestreo estadístico. Para ello se utilizó un cuadrante hecho con PVC y con un área interna de $1,06\text{ m}$ por $1,06\text{ m}$ que se dispuso sobre 4 zonas representativas del parche de manglar; para cada zona, se puso el cuadrante a $1,18\text{ m}$ de altura en promedio desde el fondo del mar y se midió el número de raíces, los diámetros sumergido y emergido de cada una de las raíces, la profundidad media de inundación en el medio del cuadrante y se determinó el nivel de descendencia de las raíces desde el tronco.

El resumen de toda la información medida se presenta en la Tabla 4.1 donde Q es el número del cuadrante, n el número de raíces medidas, d el diámetro medio por cuadrante h la profundidad media del agua en el medio del cuadrante, V_m el volumen de raíces sumergidas, V el volumen de control, A el área proyectada por cuadrante en frente de la dirección del flujo y L_e la longitud efectiva de la vegetación (ecuación 2.3).

Con la información obtenida de las 4 zonas seleccionadas, el número mínimo de cuadrantes necesarios para cubrir toda la variabilidad del parche de manglar se calculó usando una ecuación de muestreo (ecuación 4.1), utilizando la distribución t - student. El número obtenido fue 3,67, lo que significa que con las 4 zonas seleccionadas y medidas se tiene toda la información, estadísticamente hablando, del manglar. Con ésta información se puede calcular entonces la longitud característica de la vegetación L_e del parche de manglar estudiado; valor que será empleado

para calcular las demás variables hidrodinámicas y que relacionan los 2 componentes medidos. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.1

Tabla 4.1: Datos medidos del manglar

Q	n	d cm	h cm	V_m cm ³	V cm ³	A cm ²	L_e cm
1	42	1.9	45	3731	505620	4770	105.2
2	38	2.2	48	3926	539328	5088	105.2
3	9	3.2	56	1612	629216	5936	105.7
4	8	1.9	38	574	426968	4028	105.9

$$m = \frac{t^2 \sigma^2}{e^2 + \frac{t^2 \sigma^2}{n}} \quad (4.1)$$

Donde m es el número mínimo de cuadrantes requeridos, t es el valor de la distribución t - student para un error e de 15 %, σ es la varianza (1,49) calculada con la relación entre el área media basal de las raíces (5,30 cm²) y la desviación estándar (7,92), y n el número de datos.

Por otro lado, para medir la superficie libre se dispusieron 3 sensores de presión (WG) en las estaciones 1 - 3 midiendo de forma continua durante 57 horas, desde las 7:00 am del 8 de Mayo del 2014 hasta las 4:00 pm del 10 de Mayo del 2014 con un intervalo de 1 Hz (1 dato por segundo). El primer sensor se localizó en la parte de atrás del parche de manglar a una profundidad de 0,35 m y aproximadamente a 1,0 m desde la línea de costa, el segundo se localizó a 3,50 m de distancia del primer WG, delante de la masa mas densa de raíces y a una profundidad de 0,46 m, y el último WG se localizó a 6,10 m de distancia del segundo WG y a una profundidad de 0,85 m. En la Figura 4.3 se puede observar el alineamiento de los 3 sensores dentro de la zona de estudio.

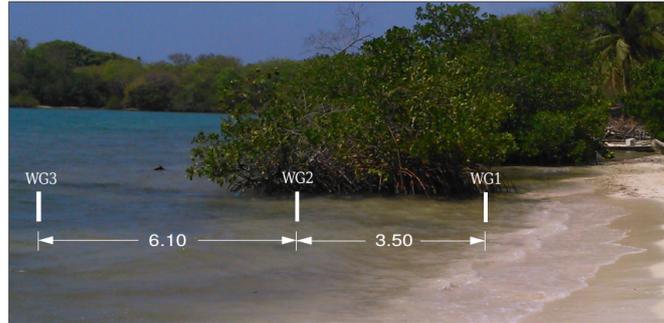


Figura 4.3: Localización de los sensores de presión

Para analizar la información medida, calcular la altura de ola significativa (H_s) y el periodo pico (T_p), los datos se agruparon en estados de mar de 1 hora y el cálculo espectral se realizó con la transformada rápida de Fourier (FFT) utilizando los primeros 2048 datos (34,13 min), y considerando la corrección por profundidad debido a la localización variable de los sensores respecto al nivel medio del mar.

Posteriormente, se implementó el método desarrollado por Mazda *et al.* (1997a) utilizando la información para H_s por hora en los sensores ubicados en la parte posterior del manglar (WG_1) y en frente de la mayor densidad de raíces (WG_2); con la información para el cálculo de la velocidad incidente (v) del sensor mas alejado del parche de manglar (WG_3). Con esta

información se calculó el C_D a partir de la ecuación 2.4 teniendo para cada estado de mar un valor de I y u y un valor constante en el tiempo para L_e y g . También se calculó el R_e para verificar el régimen de flujo, a partir de la ecuación 3.11 que corresponde a una modificación del cálculo general del número de Reynolds donde la longitud característica a incluir corresponde a la longitud efectiva de la vegetación.

Con esta información, se determinó la relación entre el R_e modificado y el C_D , utilizada por diferentes autores para verificar la respuesta de la vegetación según el régimen del oleaje (Augustin *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2014; Anderson *et al.*, 2011), dado que dicho régimen influencia el comportamiento del C_D (Thesis & Hendriks, 2014) y varía en función del tipo de vegetación a estudiar, de la distribución y la densidad de la misma (Burger, 2005). De igual forma modifica la respuesta de la vegetación mediante la interacción de esta con las variables hidrodinámicas.

Para cualquier tipo de vegetación, sea emergida o sumergida, se ha encontrado un comportamiento particular para la relación mencionada, que también se observa con la información obtenida del modelo numérico, donde a medida que el número de R_e aumenta, es decir el flujo se hace más turbulento, el C_D disminuye (Mendez & Losada, 2004; Mazda *et al.*, 1997b; Husrin & Oumeraci, 2009; Ozeren *et al.*, 2009). Lo que significa que la capacidad de la vegetación para la disipación del oleaje es mayor bajo condiciones de flujo estacionario que en presencia de flujo turbulento y zonas de rompiente. En dicho comportamiento varían los rangos de las variables según el tamaño de la vegetación y su oposición al oleaje, es decir, para ecosistemas de manglar se tiene valores de C_D más altos que para pantanos y marismas, pero aun no se ha determinado con exactitud su valor dependiendo de la especie de árboles predominante.

Con todo lo anterior se tiene entonces la disipación del oleaje incidente debido a la presencia de la vegetación, considerando un valor ponderado de L_e para el área total del parche de manglar y el gradiente de altura de ola entre los sensores WG_1 y WG_2 . También se calcula el C_D y F_D con la ecuación de Morrison (ecuación 2.1) y el método de Mazda *et al.* (1997a) (ecuación 2.4).

Por otro lado, para aplicar la teoría de Dalrymple *et al.* (1984) alrededor de cilindros rígidos y comparar sus resultados con el comportamiento registrado utilizando el método de Mazda *et al.* (1997a) se utilizó la ecuación 2.12 con la solución de la integral alrededor del perímetro de un cilindro, aproximado a la masa de raíces y diferenciando el comportamiento aguas arriba del de aguas abajo; para esta aproximación se utilizó el diámetro medio de las raíces medidas del manglar y se calculó la presión hidrostática con la profundidad media en el centro del parche de manglar, considerándose como la presión promedio en la zona aguas abajo del cilindro. Con estas hipótesis y las simplificaciones explicadas en el capítulo 2, se calcula el C_D por medio de la ecuación 2.1, incluyendo como parámetro geométrico el valor de L_e con el fin de hacer comparables los resultados con los obtenidos con la implementación de la metodología de Mazda *et al.* (1997a).

Para poder diferenciar el efecto causado por la presencia de la vegetación de los procesos de disipación por fondo, se utiliza la teoría lineal por medio del modelo PETRA del sistema de modelado costero (SMC) (González *et al.*, 2004) para el cálculo de la evolución de la H_S a partir del perfil de playa medido. Para ello se utiliza la información del WG_3 como información inicial para el modelo y se calculan los valores correspondientes a H_S en las zonas de localización del WG_2 y WG_1 , considerando únicamente la evolución punto a punto según el perfil batimétrico.

Dicho modelo se implementa a partir de la teoría de Battjes & Janssen (1978) para la disipación de energía del oleaje debido a la configuración del fondo en la zona de estudio, además se

consideraron 9 temporales de 6 horas cada uno, divididos según el comportamiento de la marea (ver Figura 4.4), para un total de 54 horas que serán comparadas con las primeras 54 horas analizadas en campo. De esta comparación es posible obtener la diferencia entre la disipación debida al perfil de playa y la causada por el efecto combinado de vegetación y fondo, donde se puede analizar el comportamiento hidráulico de la vegetación según el oleaje incidente y la batimetría asociada.

También se calcula el flujo de energía y los coeficientes de disipación con el fin de verificar el comportamiento de los 3 sensores durante los 57 estados de mar y el porcentaje de explicación que dichos coeficientes pueden dar de todo el proceso físico que se desarrolla en la interacción del fondo, vegetación y oleaje.

4.3. Disipación por vegetación

Como se mencionó anteriormente, el primer paso para el cálculo del coeficiente de dragado y del porcentaje de disipación entre los sensores WG_1 y WG_2 es el cálculo de la altura de ola significativa (H_s) y el análisis del comportamiento del ciclo de marea y del oleaje incidente delante, en medio y detrás del parche de manglar. Éstos resultados se muestran en las Figuras 4.4 y 4.5, que corresponden a las series medidas durante las 57 horas, a las series sin el ciclo de marea, al comportamiento de la marea y al valor de H_s por estado de mar.

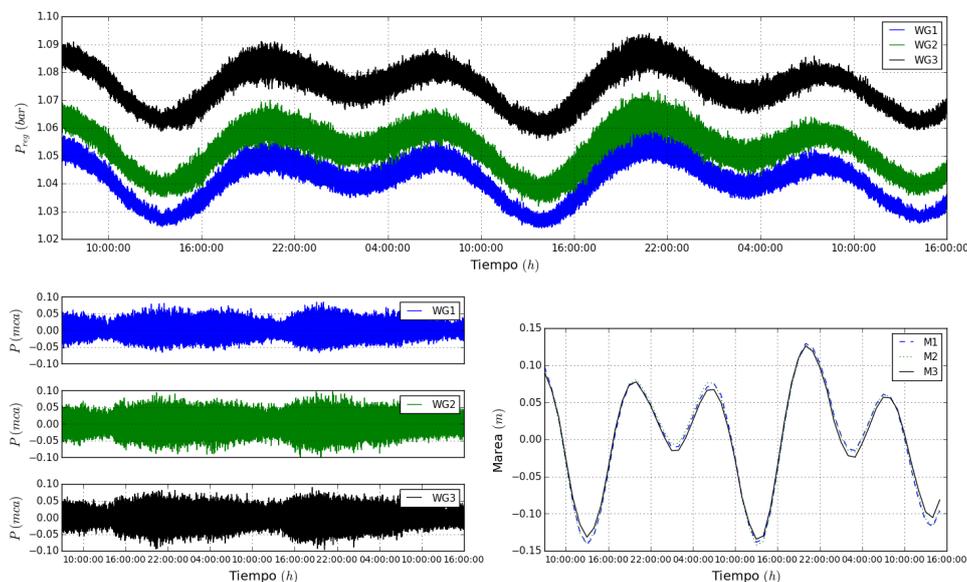


Figura 4.4: (a) Series medidas en unidades de presión (bar). (b) Series sin ciclo de marea (mca). (c) Ciclo de marea

La primera parte de la Figura 4.4 muestra claramente en sus registros de presión, tanto el comportamiento de la marea (sus picos y sus valles) como la variación según la localización del sensor con relación al parche de manglar; en cambio, la segunda parte muestra el comportamiento de los valores de presión en cada sensor sin el ciclo de marea para todos los datos medidos y aunque es difícil diferenciar la influencia de la localización del sensor, si se puede notar la diferencia en el ancho de cada una de las bandas, siendo menor la que corresponde al WG_1 .

También se presenta separadamente el comportamiento de la marea, el cual debe ser muy similar para los 3 sensores ya que todos se encuentran bajo la misma acción del oleaje y el comportamiento de la marea es indiferente a la posición del sensor en la zona de estudio. Este comportamiento se observa en la tercera parte Figura de la 4.4, donde las pequeñas diferencias pueden estar asociadas a la profundidad del sensor y al procesamiento numérico de la información.

De igual forma, en el ciclo de marea y en la evolución de H_s (Figura 4.5) se observa mas marcado el comportamiento de los picos y los valles, donde los valores mas altos corresponden a los valores medidos durante las horas de la noche (aproximadamente desde 18:00 hasta 0:00) y los valores bajos, a los medidos en las horas del día, siendo los mas bajos los cercanos a las 12:00, lo cual muestra un comportamiento unimodal del oleaje, donde la predominancia corresponde al ciclo de marea.

El comportamiento registrado es similar para los 3 sensores de presión instalados y refleja como a medida que el oleaje se asomera (entre los sensores WG_3 y WG_2) el valor de H_s (Figura 4.5) disminuye y como al pasar por el obstáculo del manglar (entre los sensores WG_2 y WG_1) este valor disminuye mas notablemente, haciendo visible el efecto de la presencia de la vegetación costera en la disminución del oleaje incidente; sin embargo, es importante resaltar que los valores medidos corresponden a una zona donde la energía es menor que en zonas de rompiente y pre - rotura, ya que como se menciono anteriormente, estamos localizados en una zona post - rotura, donde el oleaje ya pasó por el obstáculo del arrecife de coral. Los valores medios de H_s y T_p calculados para cada sensor se presentan en la Tabla 4.2

Tabla 4.2: Valores medios de H_s y T_p

Sensor	H_s m	T_p s
WG1	0,06	10,01
WG2	0,08	6,15
WG3	0,09	5,97

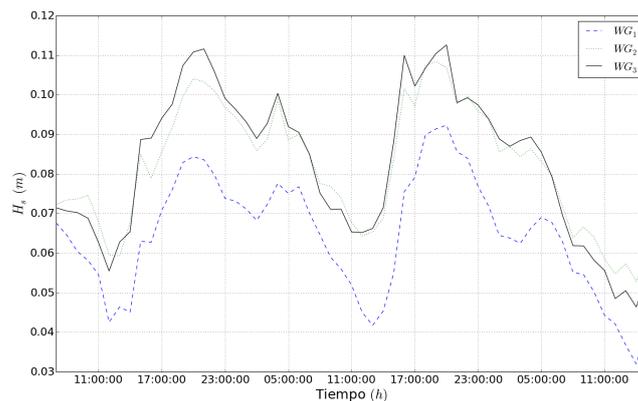


Figura 4.5: Altura de ola significativa. Desde 7:00 del 8 de Mayo hasta 16:00 del 11 de Mayo del 2014.

La Figura 4.6 muestra la variación espacial de los valores calculados de H_s a través de la zona de estudio, donde la línea punteada representa los valores medios y los puntos verticales representan los valores medidos en campo. Visualizando así la disipación generada en la zona de estudio por la presencia del obstáculo.

Es importante anotar que la disipación calculada como una reducción de los valores de H_s no considera el efecto de la disipación por fondo, asomeramiento, reflexión, viscosidad y otros factores diferentes al efecto de la vegetación que son relevantes en aguas someras, tampoco la disipación por rotura es considerada debido a la poca profundidad en la zona de estudio. Éstos factores deben ser considerados e incluidos con el fin de obtener los valores exactos de F_D y del porcentaje de disipación para determinar el efecto de la vegetación y evaluar su efectividad como estructura de protección. Para ello, en la sección 4.4 se calcula la evolución por fondo a partir de los valores de H_s del WG_3 y con la configuración del fondo medida en campo.

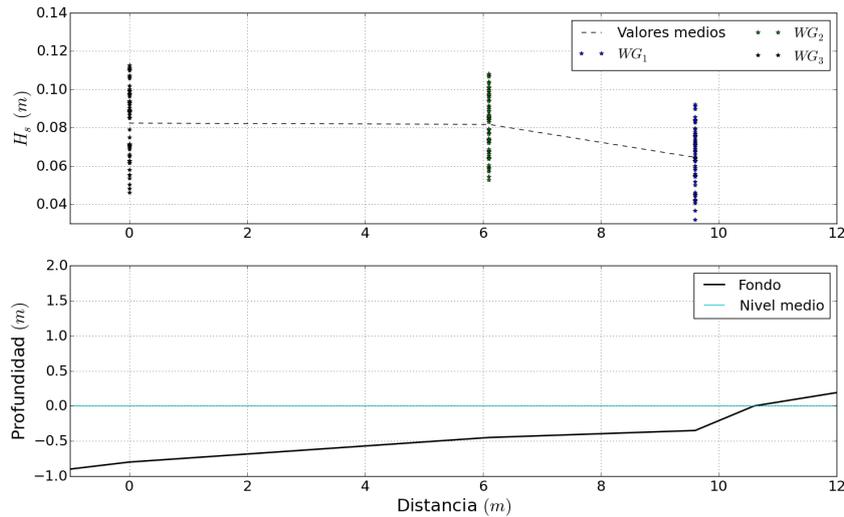


Figura 4.6: Evolución de H_s

Posteriormente, con los datos de presión obtenidos en el WG_3 se calcula la máxima velocidad horizontal incidente por estado de mar utilizando la relación entre los valores de superficie libre obtenidos del sensor de presión WG_3 y el espectro de velocidad, usando la teoría lineal (Svendsen, 2006). Este valor al ser incluido dentro de la ecuación 3.11 junto con el valor previamente calculado de L_e y con una viscosidad cinemática para el agua salada de $1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ permite calcular el valor del número de Reynolds para cada uno de los estados de mar. Estas 2 variables, al igual que la H_s se comportan según los picos y los valles registrados durante las 57 horas de toma de datos y los valores medio y máximo obtenidos para la velocidad, de $0,27 \text{ m/s}$ y $0,36 \text{ m/s}$ respectivamente corresponden a un orden de magnitud mayor en comparación con otros escenarios registrados en la literatura (ver Figura 4.7) (Mazda *et al.*, 1997a; Husrin & Oumeraci, 2009) debido a la localización estratégica del parche de manglar en frente del oleaje incidente.

Con los valores de velocidad, se puede calcular entonces los valores de C_D para las 2 metodologías mencionadas, la de Mazda *et al.* (1997a) (ecuación 2.4) y la de Dalrymple & Dean (1984) (ecuaciones 2.1 y 2.12). Los resultados se presentan en la Figura 4.8 donde la diferencia conceptual de ambos métodos se observa para los valores extremos especialmente cuando R_e registra los valores mas bajos, en cambio, para los valores medios la diferencia es de solo del 1,10 %. Dichos valores se encuentran entre 0,8 y 8,0.

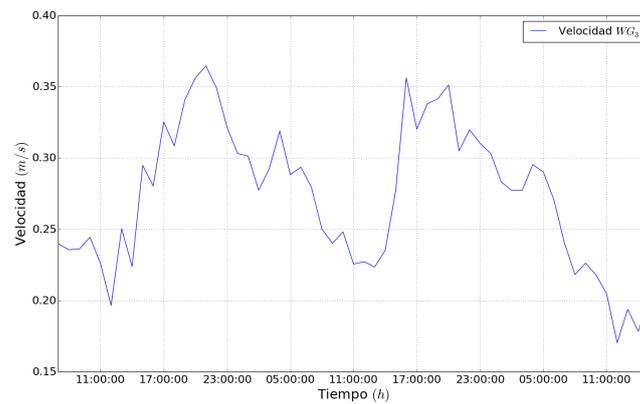


Figura 4.7: Velocidad incidente.

De ésta forma, la Figura 4.8 (a) al igual que la Figura 4.7 muestra los valores picos para la variable C_D con el mismo comportamiento presentado en la Figura 4.5 en ambos métodos; sin embargo, los valores obtenidos al aplicar el método de Mazda *et al.* (1997a) son mas altos que los calculados aplicando la teoría de Dalrymple & Dean (1984), debido a que el primero esta calculado en base al gradiente de superficie libre, es una aproximación de los datos de campo y aunque incluye muchas simplificaciones para satisfacer la ecuación de balance de momento involucra la complejidad de las variables recolectadas en campo, mientras que la segunda es una aproximación analítica de la teoría del campo de presión a través del flujo potencial, considerando una simplificación de las variables geométricas de la zona de estudio.

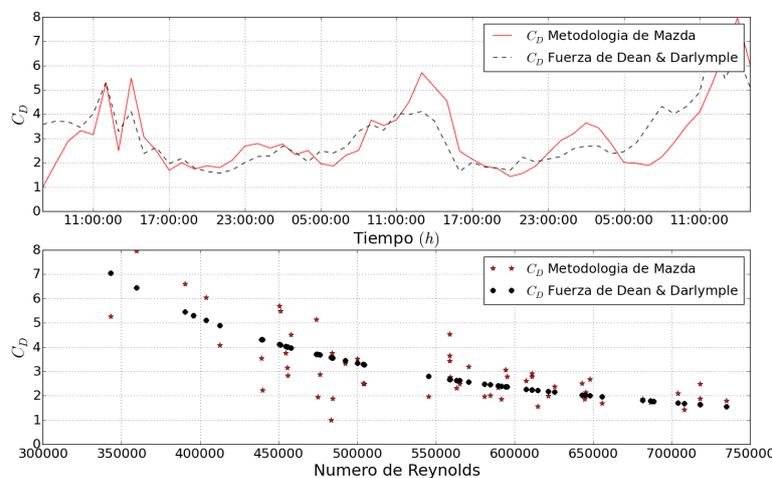


Figura 4.8: C_D . (a) Por estado de mar. (b) En función del número de Reynolds

Éstos resultados sugieren, en comparación con otros estudios (Ozeren *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2014), que el C_D debe ser calibrado de acuerdo al tipo de vegetación y a la geomorfología de la zona de estudio, para lo cual puede ser interesante realizar gráficas de R_e vs C_D según la vegetación con el fin de promover una metodología que estandarice el proceso de evaluar la efectividad de cada tipo de vegetación frente a diferentes eventos medios y extremos del oleaje.

Por otro lado, la F_D calculada por la ecuación de Morrison (ecuación 2.1) y el método de

Mazda *et al.* (1997a) (ecuación 2.4) se presenta en la Figura 4.9, donde se observa una notable diferencia entre la F_D calculada con el R_e (línea continua), la cual varía entre 14,0 N y 88,00 N según los cambios de cada estado de mar, y la F_D basada en la teoría de Dalrymple & Dean (1984) (línea punteada) la cual esta calculada en función de la velocidad incidente, teniendo un comportamiento entre 52,0 N y 52,9 N , siendo mas constante en el tiempo.

Aunque el valor medio entre las fuerzas muestra una variación del 27,0%, es necesario buscar otro criterio, ya sea físico o estadístico, que permita calcular un valor de F_D representativo para todos los datos medidos y que haga comparables los resultados obtenidos con otras metodologías. No obstante, los valores medios presentados en la Figura 4.9 muestran una buena aproximación entre los 2 métodos estudiados, lo que puede ser un camino para continuar con las investigaciones alrededor de la disipación de la energía del oleaje a través de un parche de *Rhizophora mangle*, en busca de estandarizar un método para evaluarla.

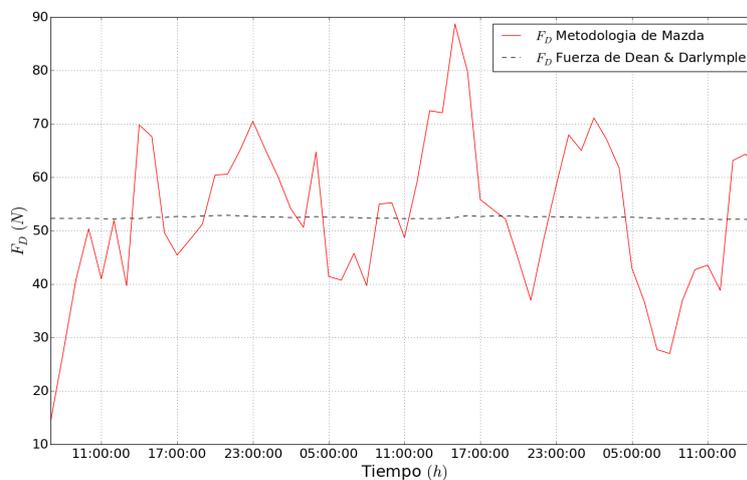


Figura 4.9: Fuerza de Dragado por estado de mar

Adicionalmente la disipación del oleaje debido al parche de manglar en estudio aumenta, como es de esperarse con el aumento del C_D (entre 0,98 y 7,95) y decrece con el aumento del R_e usando ambas metodologías. De ésta forma se tiene entonces una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de disipación, el C_D y el R_e , lo cual muestra el comportamiento esperado, ya que mientras mas turbulento es el flujo menor efecto ejerce la vegetación y mientras mayor oposición genere la presencia de la vegetación, mayor es la disipación asociada.

Ésta relación se encontró con el análisis de *Rhizophora mangle*, mientras que otros estudios encontraron comportamiento similar con diferentes especies de manglar. Mazda *et al.* (1997a) registraron esta relación inversa usando datos de campo de manglares de Nakama-Gawa en la Isla Iriomote (Japón) donde las especies dominante eran *Bruguiera gymnorrhiz* y *Rhizophora stylosa* y en la isla Hinchinbrook (Australia) donde dominaba *Rhizophora stylosa*, en ambos casos el C_D convergía a 0.4 y el R_e presentaba valores entre $0,5 - 9,0 * 10^4$, un orden de magnitud menor debido a la velocidad del flujo, probablemente por la localización de las zonas estudiadas por Mazda, que estaban protegidas del impacto directo del oleaje. De igual forma, con datos de laboratorio de Husrin & Oumeraci (2009) donde se parametriza el *R. apiculata* se registra valores de R_e del mismo orden de magnitud a los de Mazda, pero los valores de C_D convergen a 0.65 y con la información de Ozeren *et al.* (2009) para vegetación de ciénagas como *partina alterniflora* y *Juncus roemerianus* se registran valores de R_e con 2 ordenes de magnitud menores presentando menores valores de fuerza y C_D debido a la configuración de la vegetación en comparación a los

manglares y pinos.

Las fluctuaciones obtenidas en el cálculo del C_D mediante las 2 metodologías implementadas muestran la necesidad de incluir el tipo de vegetación dentro de los modelos numéricos, y preferiblemente calibrar su comportamiento con datos de campo y laboratorio. Sin embargo, existen otras calibraciones, como el número de Keulegan-Carpenter, calibrado por Mendez & Losada (2004) con *Laminaria hyperbore*, el cual sugiere valores de C_D entre 0,0 y 1,0. Dichos valores contrastan con los valores sugeridos por el modelo SWAN, con los resultados de campo de Mazda *et al.* (1997a) y con los resultados tanto numéricos como de campo del presente trabajo.

En particular el modelo SWAN, en su herramienta de disipación por vegetación, incluye dentro del manual de usuario un rango para seleccionar el valor del C_D , de acuerdo a los resultados de Mendez & Losada (2004) con *Laminaria hyperbore*, en la Tabla 4.3 se presenta una comparación entre los valores obtenidos con la información en campo y las sugerencias del modelo SWAN. Los resultados muestran una diferencia entre los valores máximos de 15,2% y 28,45% para los valores medios; éstos porcentajes de diferencia pueden estar relacionados con las diferencias estructurales entre los tipos de vegetación estudiada, con la configuración batimétrica de la zona de estudio y con los procesos no lineales presentes en la interacción ola - vegetación.

Tabla 4.3: Comparación C_D

Datos	C_{Dmax}	C_{Dmin}	C_{Dmedio}
Modelo SWAN	6,90	0,06	3,48
Datos propios	7,95	0,98	4,47
Diferencia	1,05	0,92	0,99
Peso (%)	15,22	-	28,45

4.4. Disipación por fondo

Debido a que en campo no fue posible realizar la toma de datos hidrodinámicos en un perfil de playa sin manglar, por motivos de tiempo y disponibilidad de equipos, es necesario realizar el cálculo de la disipación por fondo a partir de un modelo numérico, ya que se debe analizar el efecto de la vegetación considerando el comportamiento del oleaje sin la presencia del obstáculo. Para ello, como se mencionó previamente se utilizó la teoría lineal a través del planteamiento de Battjes & Janssen (1978) dentro de un modelo que promedia la fase como lo es el PETRA (Modelo de Evolución de Perfil TRAnsversal) del SMC (Sistema de Modelado Costero) (González *et al.*, 2004).

Partiendo de la información de H_S , T_P y marea del WG_3 , que se encuentra localizado fuera del manglar y del perfil de playa medido en la zona del manglar, se ejecuta el modelo mencionado mediante la configuración de 9 casos divididos en 6 horas cada uno según el ciclo de marea predominante en cada situación y se obtiene la evolución de H_S para un Δ_X de 0,1 m a lo largo de todo el perfil y para cada hora. De allí se extrae la información correspondiente a la localización en x de los sensores WG_2 y WG_1 para cada una de las 54 horas simuladas y se comparan con la información medida en campo. Los valores obtenidos en estos puntos se presentan en la Figura 4.10 y los valores medios de H_s en la Tabla 4.4.

Comparando los valores de H_s medidos en campo con los calculados usando el modelo PETRA, es decir, del escenario con manglar contra el escenario sin manglar, se tiene la Figura 4.11. En la

parte (a), la cual corresponde al WG_1 localizado en la parte posterior del manglar, se observa un comportamiento esperado donde la H_s es mayor para el caso sin manglar (WG_1M), evidenciando el efecto de la estructura. Sin embargo, en la parte (b) correspondiente al WG_2 , se observa como la H_s es menor para el caso sin manglar (WG_2M), lo que refleja un comportamiento similar al presentado con la modelación numérica (ver Figuras 3.15 y 3.19), donde el manglar funciona como una barrera del oleaje, aumentando los valores de H_s .

Tabla 4.4: Valores medios de H_s para el caso modelado (PETRA)

Sensor	H_s m
WG1	0,07
WG2	0,065

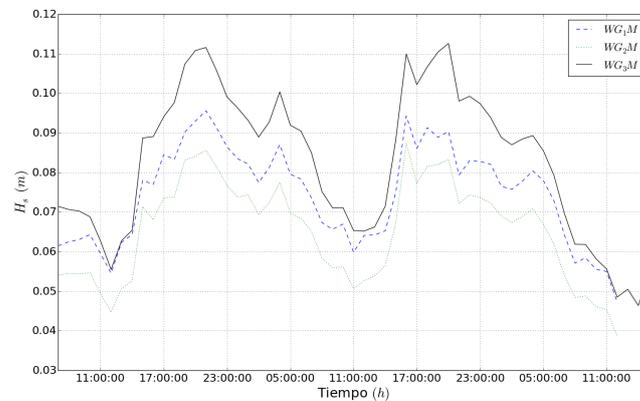


Figura 4.10: Altura de ola significativa calculada con la teoría lineal y Battjes & Janssen (1978)

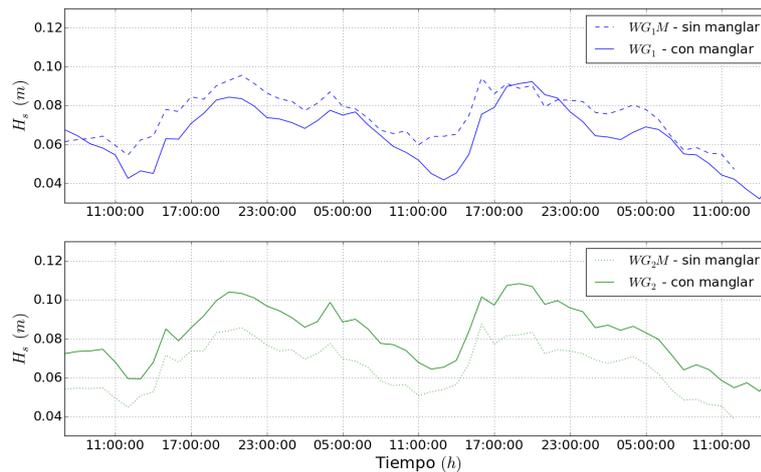


Figura 4.11: Comparación de H_s . (a) WG_1 (b) WG_2

El resultado medio de ambos escenarios, partiendo de los mismos valores para el WG_3 se presenta en la Figura 4.12, donde se puede observar mas claramente la respuesta del escenario con manglar frente al caso sin manglar, y como el resultado final es una mayor disipación para el caso con

manglar, aunque en medio de éste el comportamiento hidráulico sea contrario.

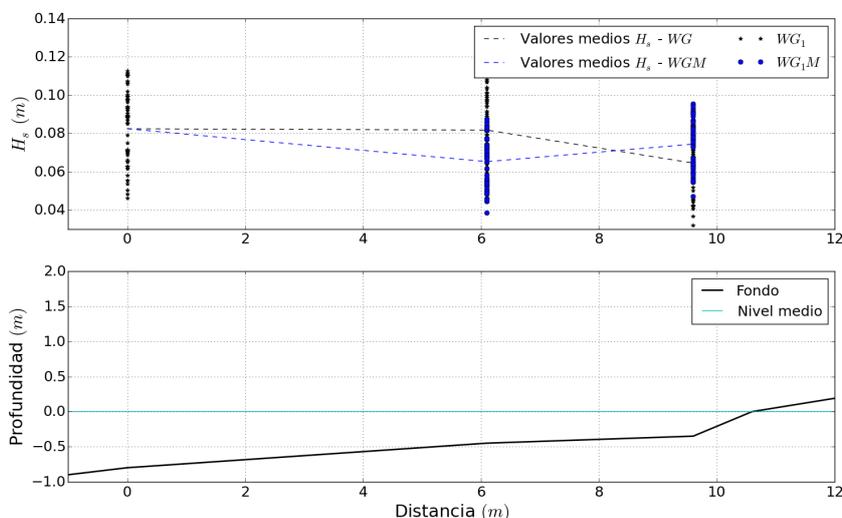


Figura 4.12: Comparación de la evolución de H_s .

El comportamiento particular presentado en el WG_2 , donde para el caso con manglar se registran valores de H_s mayores en comparación a los calculados sin manglar, representa la función del manglar como un obstáculo que en su punto medio genera un efecto barrera al oleaje incidente, lo que genera una sobre elevación del nivel medio del mar debido a que el flujo no puede seguir su curso como en el caso sin manglar. Dicho efecto es importante analizarlo ya que al emplear ecosistemas costeros como sistemas de protección costera es importante conocer con exactitud la evolución del oleaje a lo largo de estos y así establecer las condiciones medias y máximas para un diseño funcional.

Con el fin de poder diferenciar los procesos debidos a la presencia de la vegetación de los demás procesos de disipación presentes en la zona de estudio, se realizó un ejercicio teórico a partir de los resultados obtenidos con el modelo PETRA y los valores medidos en campo. Se asumió que el modelo empleado, a través de sus formulaciones basadas en teoría lineal logra representar todos los procesos físicos presentes en la zona de estudio, excepto el manglar; de ésta forma, se restaron los valores de H_s medidos de los simulados, para el WG_1 , el cual registra el efecto favorable de la presencia del manglar, y se calculó el peso de esta diferencia en relación a los valores de H_s medidos en campo (información total). Dicho peso se presenta en la Tabla 4.5 con un valor medio de 14,30 % para los estados de mar analizados.

Tabla 4.5: Diferencia porcentual de H_s en el WG_1

Caso	$H_s max$ (m)	$H_s min$ (m)	$H_s medio$ (m)
Medido	0,092	0,032	0,064
Modelado	0,096	0,047	0,074
Peso de la diferencia (%)	53,86	-9,03	14,30

La variación registrada tanto en la Tabla 4.5 como en la Figura 4.13, bajo las hipótesis planteadas para este ejercicio, representa el porcentaje de H_s disipado debido a la presencia del manglar en la zona de estudio. Teniendo de esta forma un rango muy amplio de resultados que sugiere una

alta variabilidad en la respuesta del manglar estudiado.

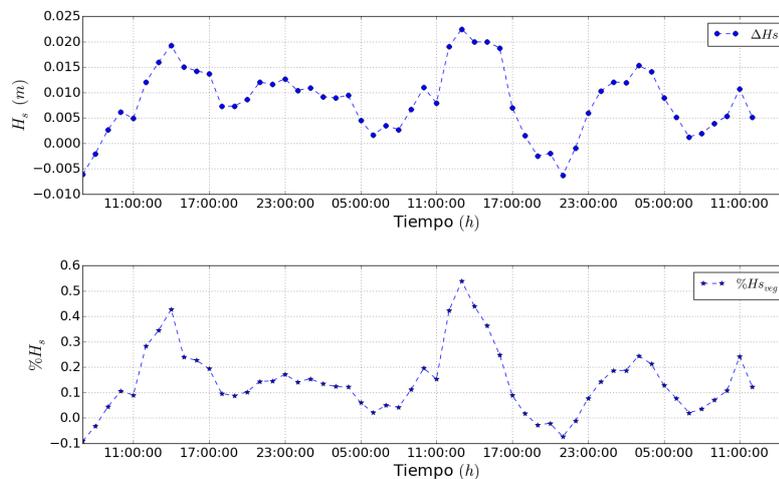


Figura 4.13: Comparación H_s en el WG_1

Con esta información y la presentada en la Tabla 4.3 se puede observar el comportamiento de las variables en función del porcentaje de disipación. De ésta forma los resultados para H_s por vegetación y por otros procesos podrían representar el porcentaje de incremento de C_D ; sin embargo, para el caso de H_s se tiene un porcentaje medio de influencia en la disipación de 14,30 % por la existencia de la vegetación y para el caso del C_D existe una diferencia entre puntos medios de 28,45 % con los valores sugeridos por la literatura, con lo cual no puede asegurarse que el aumento del C_D este debido a los demás procesos de disipación.

4.5. Disipación de H_s

Así como se analizaron los datos del modelo numérico para los casos simulados, con los valores de H_s y empleando las ecuaciones 3.14 a 3.19 se puede calcular el flujo de energía entre los 3 sensores ubicados a lo largo del parche de manglar y los coeficientes de disipación asociados por la presencia del fondo y de la vegetación. Todo ello para los 57 estados de mar analizados y considerando un valor de C_D para cada estado de mar en toda la zona de estudio, es decir, en los 3 sensores, bajo la hipótesis de que todos los sensores se encuentran afectados por la presencia del manglar.

De esta forma en la Figura 4.14 se presenta el flujo de energía entre el WG_1 y el WG_2 representado mediante la línea azul y entre el WG_2 y el WG_3 representada con la línea roja. Allí es importante resaltar, que el flujo es mayor entre el sensor que esta en el manglar y el que esta detrás del manglar, haciendo notar la predominancia de la disipación generada por la vegetación existente.

También es importante notar la diferencia en el orden de magnitud de los valores calculados de D en comparación a los obtenidos con la modelación numérica, debido principalmente a las condiciones de H_s y T_p , que para los estados de mar medidos en campo difieren considerablemente de las condiciones simuladas en *openFoam*. Esta diferencia se mantiene en el cálculo de los coeficientes de disipación por fondo y por vegetación, los cuales se presentan en la Figura 4.15, donde los valores de disipación por fondo son mas bajos en comparación a los de la disipación

por vegetación.

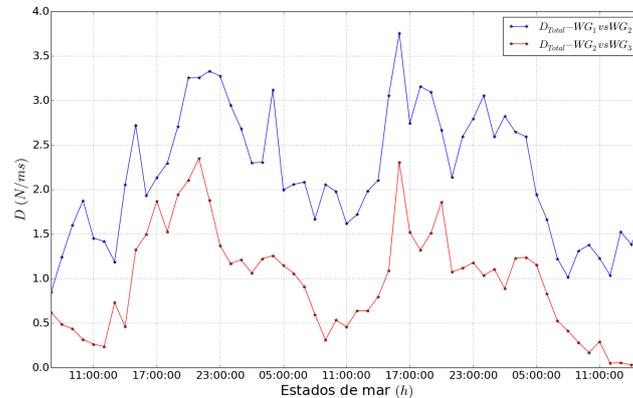


Figura 4.14: Flujo de energía para los estados de mar analizados en campo

Para cada uno de los estados de mar puede observarse el comportamiento de D_{slope} , D_{veg} y $D_{C-Total}$, el cual, así como en el caso del modelo numérico, está en función de los valores de H_S medidos y la predominancia en uno u otro sensor depende de la localización de estos en la zona del manglar.

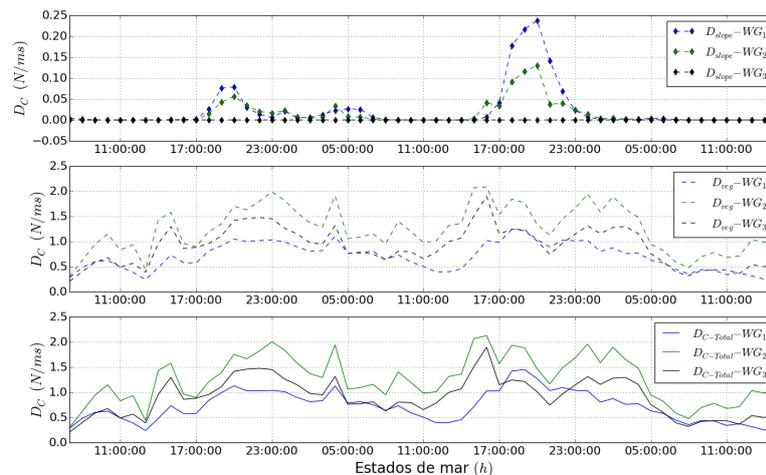


Figura 4.15: Coeficientes de disipación para los estados de mar analizados en campo

De ésta forma se tiene que en el caso de la disipación por pendiente los valores mas altos corresponden al sensor WG_1 debido a que es el sensor donde el oleaje mas siente el fondo y donde se generan mayores procesos no lineales debido a que esta ubicado a poca profundidad. En contraste, el sensor que registra mayores valores de disipación por vegetación corresponde al WG_2 seguido por el sensor WG_3 y WG_1 respectivamente, lo cual indica un comportamiento del oleaje incidente en función de la presencia de la vegetación, mientras que pasado el obstáculo, así como con los datos del modelo numérico, el efecto de ésta es menor.

Finalmente, la suma de los coeficientes de disipación se presenta en la tercera parte de la Figura 4.15, donde los valores mas altos corresponden a los periodos de tiempo entre las 17:00 horas y las 5:00 horas, es decir, donde el oleaje es mas fuerte y su comportamiento está en función de los valores obtenidos para la disipación por vegetación. Ésto da lugar a buscar la contribución

de cada fenómeno físico involucrado en los valores totales, ya que la suma de los coeficientes de disipación por fondo y vegetación no representa completamente el flujo de energía y a su vez, según los resultados del modelo numérico, no representa la totalidad del efecto combinado (fondo - vegetación).

Sin embargo, como ejercicio de comparación entre los sensores $WG_1 - WG_2$, los cuales tienen información de todo el proceso de disipación por vegetación, se realizó la suma de los coeficientes de disipación asociados al fondo y a la vegetación en ambos sensores, buscando la forma teórica de representar la disipación registrada celda a celda entre 2 puntos fijos. Es decir, se asume que el WG_2 corresponde a la celda inicial de una malla de estudio, donde los valores de los coeficientes de disipación representan el contorno inicial de la malla y que la celda del WG_1 corresponde al contorno final de la malla; este resultado muestra la disipación total en la malla planteada y se puede comparar posteriormente con el flujo de energía calculado entre los 2 puntos.

Tabla 4.6: Comparación flujo de energía vs coeficientes de disipación $WG_1 - WG_2$

	<i>max</i> (N/ms)	<i>min</i> (N/ms)	<i>medio</i> (N/ms)
Flujo de energía	3,752	0,849	2,178
Suma disipación	3,358	0,592	1,990
Peso de la diferencia (%)	107,90	56,95	90,38

Ésta comparación se presenta en la Tabla 4.6 y en la Figura 4.16, donde la diferencia registrada corresponde a los procesos no lineales que no son representados por los coeficientes de disipación por vegetación y por fondo. Con un valor medio de 90,38 % y con un máximo que supera los valores del flujo de energía en un 7,90 %, se tiene una buena representación de los procesos de disipación entre los sensores $WG_1 - WG_2$, donde el porcentaje no explicado o sobre explicado esta en función de procesos como refracción, asomeramiento, etc.

Es importante anotar que ésta metodología solo es aplicable a la relación entre los sensores $WG_1 - WG_2$ ya que se encuentran delimitando la zona de manglar, mientras que los sensores $WG_2 - WG_3$ representan mas cantidad de procesos, donde la predominancia no es del manglar.

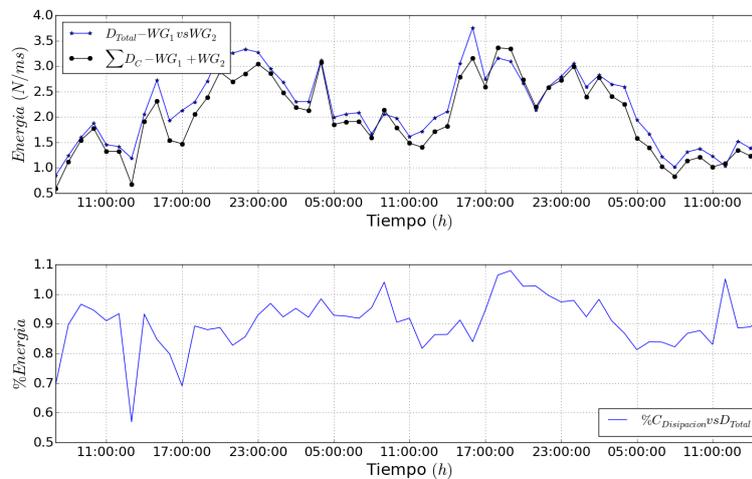


Figura 4.16: Comparación flujo de energía vs coeficientes de disipación

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente trabajo se combinaron metodologías de modelamiento numérico y campo para analizar la respuesta hidráulica de las estructuras del *Rhizophora mangle*, considerando la configuración geométrica de sus raíces, la batimetría de la zona de estudio y las condiciones medias del oleaje incidente. Esto, se realizó mediante el cálculo de los coeficientes de dragado asociados a cada proceso, la transferencia de flujo de energía entre puntos conocidos desde la teoría lineal y los coeficientes de disipación asociados a la presencia de la vegetación y el fondo. Las conclusiones y los aportes de este trabajo hacen referencia a cada uno de los objetivos específicos planteados, los cuales se presentan a continuación:

- Objetivo 1. Caracterizar la estructura del *Rhizophora mangle* y del perfil de playa, para la configuración de la malla dentro del modelo numérico.

En la implementación de un modelo numérico en el análisis de la respuesta hidráulica de la estructura del manglar se debe considerar la forma geométrica como se representa la vegetación. En la sección 3.3 se presenta la configuración de la malla que se realizó incluyendo una parametrización para el manglar con cilindros rígidos distribuidos de forma tal que representen de forma cercana a *Rhizophora stylosa* a partir de las investigaciones de Husrin & Oumeraci (2009). Esta estructura es similar a *Rhizophora mangle*, por lo que su implementación es válida para comparar con los resultados de las mediciones en campo. De esta forma, el modelo original de Husrin & Oumeraci (2009) se escaló 4 veces según las ecuaciones de Oumeraci (2014) para cilindros rígidos (Tabla 3.5) y sin rugosidad. Tomando como hipótesis de trabajo que los efectos por rugosidad de la estructura, mecanismos de falla, presencia de *flocs* de sedimentos y aporte de ramas y hojas eran despreciables para determinar la respuesta hidráulica del manglar. Es por ello que los resultados encontrados son limitados y debe buscarse la forma de incluir las demás características del manglar dentro del modelo numérico.

Para la configuración de la malla se consideró una batimetría donde el manglar se localizara sobre una pendiente inclinada, que se incluyó mediante el montaje del esquema analizado en laboratorio por Løvås (2000) con pendiente de $1,96^\circ$ (1:30), que diferentes autores han tomado como referencia para estudiar procesos de disipación por fondo y vegetación (Mendez & Losada, 2004; Tang *et al.*, 2015), y se calibró bajo regímenes de flujo y teoría de oleaje (sección 3.2). De esta forma se definió la configuración de la vegetación, del fondo y de la malla para el trabajo dentro del modelo numérico.

- Objetivo 2. Analizar numéricamente la respuesta de *Rhizophora mangle* para condiciones medias del oleaje, implementando el modelo numérico *openFoam* junto con el módulo

waves2Foam para la configuración de escenarios controlados y a escala de laboratorio.

Los procesos hidrodinámicos asociados a la respuesta de *Rhizophora mangle*, se presentan en el Capítulo 3, donde se analiza el comportamiento del coeficiente de dragado, la transferencia de energía entre los sensores ubicados en la zona del manglar (*WG7* a *WG1-JunT*) y la influencia de los coeficientes de disipación por vegetación y por fondo. Estos últimos sirven para verificar el comportamiento no lineal de la interacción flujo - estructura - pendiente. Para ello, con los 20 casos simulados se encontró que los valores del C_D contrastan con los sugeridos por el modelo SWAN, con valores entre 0,06 - 6,90, con los resultados de Suzuki *et al.* (2012) que registra valores entre 0,2 - 1,0 calculados en función del K_C , con los de Mendez & Losada (2004) que tiene valores entre 0,0 - 0,6, también en función de K_C y con los de Massel *et al.* (1999), quienes usan valores del C_D entre 0,7 - 1,2, calculados a partir de ecuaciones paramétricas en función del número de Re . Los valores aquí registrados tienen un rango de variación mayor, entre 4,63 y 10,37 para los escenarios con pendiente de $1,96^\circ$, y entre 4,91 y 11,01 para los casos sin pendiente, asemejándose a las investigaciones en campo de Mazda *et al.* (1997a) para *Bruguiera gymnorrhiza* y *Rhizophora stylosa*, con variaciones entre 0,1 - 10,0 (ver sección 3.4.2). El comportamiento encontrado en comparación a otras investigaciones presenta la necesidad de diferenciar los tipos de vegetación costera, y en función de su estructura poder plantear valores aproximados de C_D , ya que la respuesta de la vegetación leñosa es mayor en comparación a la no leñosa. De igual forma, la diferencia en rangos en función de las pendientes estudiadas muestra la influencia del efecto del fondo, donde además la suposición de fondo plano no es aplicable en todos los casos, ya que la disipación total involucra ambos procesos físicos.

Para evidenciar la influencia de la pendiente en la respuesta del manglar frente al oleaje, se calcula la transferencia de energía (sección 3.4.3), donde se obtiene una diferencia en los puntos de máxima transferencia de energía (sensor *WG12* a sensor *WG13*) correspondiente a un porcentaje entre $-6,8\%$ y $26,9\%$, valores que representan los procesos no explicados por la suma lineal de los casos con vegetación sobre fondo plano (V1S0) y sin vegetación, con fondo inclinado (V0S1). Con esto se puede concluir que existe una serie de procesos no lineales, que no pueden ser representados mediante la superposición lineal de los escenarios, haciendo necesario el estudio en futuras investigaciones de la afectación de la pendiente dentro de la disipación por vegetación y viceversa. Este efecto que se valida con los resultados obtenidos al calcular los coeficientes de disipación propuestos en la literatura, los cuales se comparan en base a la diferencia registrada entre los coeficientes de disipación asociados a los casos con vegetación sobre fondo inclinado (V1S1) y la suma lineal de los casos con vegetación sobre fondo plano (V1S0) con los casos sin vegetación sobre fondo inclinado (V0S1); esta comparación se realiza sobre el sensor de mayor registro (*WG12*) y se obtienen resultados de diferencia relativa entre $1,4\%$ a $18,8\%$.

Con el análisis numérico de la influencia del manglar bajo las condiciones mencionadas se obtiene que tanto los valores para C_D sugeridos por la literatura, como la suma lineal de los procesos por fondo y por vegetación subestiman el efecto real de *Rhizophora mangle*.

- Objetivo 3. Analizar y caracterizar la resistencia hidráulica de la estructura de manglar *Rhizophora* frente al oleaje medio, a partir de la toma de datos en campo.

Los resultados obtenidos muestran un rango de variación para C_D entre 0,98 y 7,95, lo cual, al igual que los resultados del modelo numérico, contrasta con los valores sugeridos por el modelo SWAN (0,09 a 6,90) dados los diferentes tipos de vegetación. Esto indica que el comportamiento hidrodinámico dentro de los manglares cambia según la configuración de las raíces, de las variables geométricas como densidad y distribución y de las condiciones

de la zona. De esta forma, las diferentes aproximaciones al C_D registradas para cualquier tipo de vegetación pueden inducir errores en el cálculo de la disipación total. De igual forma, el comportamiento hidráulico del manglar se representó con el cálculo del flujo de energía y de los coeficientes de disipación asociados al fondo y a la vegetación; con ello se obtiene información del comportamiento energético en los 3 sensores, donde la mayor transferencia de energía se presenta en el sensor WG_1 a WG_2 (ver sección 4.4) durante periodos de tiempo entre las 17:00 horas y las 5:00 horas. También se encontró que los procesos de disipación por fondo son más notorios en el WG_1 ya que es el que está más somero, mientras que en el sensor WG_2 , predomina la disipación por vegetación. La suma de los coeficientes de disipación en la zona del manglar (entre sensores WG_1 - WG_2) representa en promedio el 90,38 % de la transferencia total de energía, con lo cual se tiene una predominancia de los efectos aquí analizados y un porcentaje no explicado de 9,62 % correspondiente a los procesos no lineales. De esta forma, se obtiene la misma tendencia de subestimación registrada con los resultados del modelo numérico.

- Objetivo 4. Determinar la densidad, configuración y extensión del manglar con la información tomada en campo para evaluar la atenuación del oleaje en diferentes escenarios.

Con la información del manglar recolectada en campo, para determinar la densidad y disposición de las raíces en frente del oleaje; y con la posibilidad de simular un escenario sin manglar, se verifica la efectividad del ecosistema como estructura natural de protección costera. Para ello, se compararon los valores de H_s medidos a partir de la información recolectada en campo, donde la distribución de las raíces influye en la respuesta del parche de manglar, con los valores calculados a lo largo del perfil de playa sin manglar mediante el modelo PETRA (ver sección 4.4). Los resultados obtenidos a partir de este ejercicio muestran un comportamiento particular en la zona del manglar (WG_2), donde para el caso sin manglar los valores de H_s son menores a los obtenidos con el caso con manglar; mientras que en la zona detrás del manglar (WG_1) los valores de menor H_s corresponden al caso con manglar. De esta forma, se tiene un comportamiento similar al registrado en el modelo numérico, donde la presencia del manglar genera un efecto barrera que impide el paso del flujo y favorece la sobre elevación de H_s , generando otros procesos físicos que se reflejan en los máximos encontrados por el flujo de energía. Al comparar los valores de H_s medidos y calculados en la zona de mayor disipación (WG_1), donde los calculados por el modelo representan todos los procesos físicos presentes menos los debidos a la presencia del manglar; se obtiene un valor medio de 14,30 % en el porcentaje de atenuación del oleaje debido a la presencia del manglar. Así, la disipación total asociada a la presencia del manglar fluctúa en función a las condiciones del oleaje incidente, registrando valores de H_s hasta 53,86 % más bajos que sin presencia del manglar.

- Objetivo 5. Comparar y relacionar los resultados del modelo numérico a escala de laboratorio con el comportamiento medido en campo, con el fin de determinar las variables de mayor peso y evaluar la capacidad del manglar para disipar la energía del oleaje.

Los resultados obtenidos mediante la implementación de las diferentes metodologías descritas en este trabajo están en función del oleaje incidente, la configuración de la estructura y las consideraciones de la pendiente de fondo; variables que influyen en el cálculo de C_D y de la disipación. También se tiene que los procesos de transferencia de energía tienen un flujo predominante en la zona de mayor densidad de raíces (para el caso de campo) o de cilindros mayores (para el modelo numérico), lo cual indica que el efecto de la vegetación es importante y superior en ese punto a otros procesos como la disipación por fondo. De esta forma, en ambos casos se registró un efecto barrera en la zona de la vegetación que

se ve reflejado en el aumento de H_s en esos puntos.

Los valores de C_D obtenidos en el caso de campo, son 28,45% más altos en promedio en comparación con los datos de otras investigaciones, como las sugeridas por el SWAN. Dicha variación puede estar influenciada por una o varias de las variables que más pesan en este estudio como la pendiente del fondo, sin embargo, los resultados encontrados con el análisis de la información recolectada en campo, tanto para los valores de H_s con presencia de manglar como para el porcentaje de diferencia de H_s para los casos con y sin manglar (ver sección 4.4), no es posible concluir una dependencia del C_D por efectos de fondo, para lo cual sería necesario el análisis de diferentes escenarios en campo. Por otro lado, para el caso del modelo numérico (sección 3.4.3), donde la diferencia máxima registrada en comparación a los valores sugeridos por el modelo SWAN fue de 60,14%, si fue posible visualizar una diferencia media de 21,49% para los valores de C_D entre los escenarios con y sin pendiente; registrando valores más altos en la mayoría de los casos sin pendiente. De donde se obtiene una influencia directa de la pendiente de fondo en la respuesta final del manglar, con lo cual se concluye que la capacidad de respuesta del *Rhizophora mangle* difiere a la de otros tipos de vegetación y varía en función de la batimetría.

5.1. Recomendaciones

- Debido a la versatilidad del modelo numérico implementado, la calibración de la parametrización idónea de *Rhizophora mangle* puede hacerse a partir del análisis de la estructura real, mediante la representación, bien sea por fotografías, por imágenes 3D o por planos, de un manglar real, como el medido en Islas del Rosario, con lo cual podría calcularse la influencia real de la geometría del manglar y también, verificar las calibraciones realizadas por Husrin & Oumeraci (2009) dentro de su modelo físico, con el fin de optimizar el uso del modelo numérico y hacerlo más operativo para casos prácticos. De igual forma, es necesaria la implementación y el análisis de otras pendientes de fondo con el fin de analizar la respuesta del manglar en función de la predominancia de los procesos físicos, es decir, poder determinar desde qué punto la disipación por fondo es predominante y cuál es el esquema óptimo para la localización horizontal y vertical del manglar y así lograr su máxima efectividad.
- La disipación asociada a la presencia de manglar, implementada dentro de un modelo numérico, abarca algunas simplificaciones que pueden ser involucradas paulatinamente, dentro de modelos como el *openFoam*, mediante la consideración de los mecanismos de falla de la estructura de manglar, la rugosidad de las raíces, la fricción con el fondo arenoso, etc. De esta forma e involucrando la estructura real del manglar, puede calibrarse un caso real dentro del modelo numérico y evaluar la respuesta del manglar bajo diferentes escenarios difíciles de reproducir en trabajos de campo.
- Para determinar el efecto correspondiente a la implementación del modelo turbulento, es necesario realizar un análisis detallado de su inclusión dentro del modelo numérico, así como calibrar los resultados obtenidos bajo diferentes esquemas turbulentos, ajustando los valores óptimos para cada una de las variables necesarias ($l', \kappa, \omega, \epsilon$). De esta forma, los resultados obtenidos en este trabajo son válidos bajo las suposiciones asumidas, pero pueden ser ajustados bajo otras consideraciones del esquema turbulento.
- Con los resultados obtenidos se observa la necesidad de tener más información de campo, caracterizando mejor tanto las condiciones de la zona, como mejorando la adquisición de

variables hidrodinámicas (velocidad, fuerza, presión, etc), para poder evaluar y aplicar otras metodologías multiparametricas para el calculo de C_D y de los porcentajes de disipación de energía asociados a la presencia de la vegetación costera. De esta forma, poder hacer contribuciones cuantitativas de la respuesta de los manglares como estructuras de protección costera dentro de los planes de manejo y gestión costera. Información que podría ser comparable con la respuesta de otros ecosistemas para la toma óptima de decisiones.

- La disipación total asociada a la presencia del manglar, es un comportamiento que debe ser estudiado tanto en campo como en laboratorio, con el fin de determinar el aporte energético de cada uno de los procesos que allí se observan y que pueden favorecer o no la disipación de H_s por la presencia de la vegetación costera, además la evolución de la superficie libre a través de todo el manglar debe ser medida para garantizar los niveles máximos y mínimos dentro de obras de diseño que incluyan la respuesta de estos ecosistemas.

Referencias

- Aceh, Banda. 2012. Experimental study on tsunami attenuation by mangrove forest. *Earth, Planets and Space*, **64**(10), 973–989. 1
- Alongi, Daniel M. 2008. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **76**(1), 1–13. 3, 58
- Alsina, J.M., & Baldock, T.E. 2007. Improved representation of breaking wave energy dissipation in parametric wave transformation models. *Coastal Engineering*, **54**(10), 765–769. 2, 14, 49, 52, 53
- Álvarez León, R. 2003. Los manglares de Colombia y la recuperación de sus áreas degradadas: revisión bibliográfica y nuevas experiencias. *Madera y Bosques*, 3–25. 9
- Anderson, Mary E, Smith, Jane Mckee, & Mckay, S Kyle. 2011. Wave Dissipation by Vegetation. VIII, 3, 9, 10, 62
- Anthony, Edward J., & Gratiot, Nicolas. 2012. Coastal engineering and large-scale mangrove destruction in Guyana, South America: Averting an environmental catastrophe in the making. *Ecological Engineering*, **47**(Oct.), 268–273. 3
- Aswani, Shankar, Christie, Patrick, Muthiga, Nyawira a., Mahon, Robin, Primavera, Jurgene H., Cramer, Lori a., Barbier, Edward B., Granek, Elise F., Kennedy, Chris J., Wolanski, Eric, & Hacker, Sally. 2012. The way forward with ecosystem-based management in tropical contexts: Reconciling with existing management systems. *Marine Policy*, **36**(1), 1–10. 1, 3
- Augustin, Lauren N., Irish, Jennifer L., & Lynett, Patrick. 2009. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation. *Coastal Engineering*, **56**(3), 332–340. 4, 62
- Battjes, JA, & Janssen, J. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering Proceedings*. IX, 53, 62, 68, 69
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, **104**(C4), 7649. 9
- Burger, B. 2005. Wave Attenuation in Mangrove Forests. 2, 62
- Dalrymple, By Robert A, Asce, M, & Kirby, James T. 1984. WAVE DIFFRACTION DUE TO AREAS. **110**(1), 67–79. III, III, 3, 4, 12, 40, 62
- Dalrymple, RA, & Dean, RG. 1984. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. 4, 10, 11, 13, 40, 58, 65, 66, 67

- Das, Saudamini, & Crépin, Anne-Sophie. 2013. Mangroves can provide protection against wind damage during storms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **134**(August), 98–107. 2
- Duke, C. 1992. Coastal and Estuarine studies: Tropical Mangrove Ecosystems, American Geophysical Union. *Robertson A. I and Alongi D. M (Eds), Washington DC, USA*, 63–100. 9
- Foundation, OpenFoam. 2015a. *OpenFoam web page www.openfoam.org*. 4, 15, 18, 38, 45
- Foundation, Python. 2015b. *Python web page www.python.org*. 18
- González, M, Medina, R, Osorio, A, & Lomónaco, P. 2004. Sistema de Modelado Costero Español (SMC). . . . de *Hidráulica, São Pedro, Estado De* 62, 68
- Hashim, Ahmad Mustafa, & Catherine, Sim Mong Pheng. 2013. A Laboratory Study on Wave Reduction by Mangrove Forests. *APCBEE Procedia*, **5**(Jan.), 27–32. 1, 4
- Higuera, Pablo, Lara, Javier L, & Losada, Inigo J. 2013a. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models. *Coastal Engineering*, **71**, 102–118. 16, 22, 23, 27
- Higuera, Pablo, Lara, Javier L, & Losada, Inigo J. 2013b. Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM®. *Coastal Engineering*, **71**, 119–134. 14, 15, 16, 22
- Higuera, Pablo, Lara, Javier L, & Losada, Inigo J. 2014a. Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part I: Formulation and validation. *Coastal Engineering*, **83**, 243–258. 27
- Higuera, Pablo, Lara, Javier L, & Losada, Inigo J. 2014b. Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part II: Application. *Coastal Engineering*, **83**, 259–270. 27
- Hu, Zhan, Suzuki, Tomohiro, Zitman, Tjerk, Uittewaal, Wim, & Stive, Marcel. 2014. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current wave flow. *Coastal Engineering*, **88**, 131–142. 46, 62, 66
- Huang, Zhenhua, Yao, Yu, Sim, Shawn Y., & Yao, Yao. 2011. Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation. *Ocean Engineering*, **38**(10), 1080–1088. 4
- Husrin, Semeidi, & Oumeraci, Hocine. 2009. Parameterization of Coastal Forest Vegetation and Hydraulic Resistance Coefficients for Tsunami Modelling. 78–86. III, III, X, X, 1, 2, 4, 9, 11, 17, 18, 28, 29, 30, 32, 45, 46, 47, 49, 56, 62, 65, 67, 74, 77
- Husrin, Semeidi, & Strusi, Agnieszka. 2012. Experimental study on tsunami attenuation by mangrove forest. *Earth, Planets and Space*, **64**(10), 973–989. 1, 4
- Iimura, Kosuke, & Tanaka, Norio. 2012. Numerical simulation estimating effects of tree density distribution in coastal forest on tsunami mitigation. *Ocean Engineering*, **54**(Nov.), 223–232. 4
- Jacobsen, Niels G., Fuhrman, David R., & Fredsø e, Jø rgen. 2012. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **70**(9), 1073–1088. 2, 15, 16, 18, 33
- Jimenez, Jorge A. 1980. *Rhizophora mangle L. Red mangrove. ITF-SM-2. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.* 1, 3, 9

- Komiyama, Akira, Ong, Jin Eong, & Pongparn, Sasitorn. 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, **89**(2), 128–137. 58
- Lacambra, Carmen. 2015. Los ecosistemas de manglar como barreras de protección costera. *In: II SEMINARIO-TALLER INTERNACIONAL DE ESTUARIOS Y MANGLARES*. 6
- Lewis, Roy R. 2005. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering*, **24**(4), 403–418. 1, 3
- López, Isabel, & Tinoco, Hugo. 2015. *Ondas Superficiales en el Mar (Review)*. Tech. rept. JUNE 2014. 36
- Løvås, Stig Magnar. 2000. *Hydro-physical conditions in kelp forests and the effect on wave damping and dune erosion: A case study on Laminaria hyperborea*. Norwegian University of Science and Technology. VIII, VIII, 4, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 36, 38, 74
- Massel, S R, Furukawa, K, & Brinkman, R M. 1999. Surface wave propagation in mangrove forests. *Fluid Dynamics Research*, **24**(4), 219–249. 2, 75
- Maza, Maria, Lara, Javier L., & Losada, Inigo J. 2013. A coupled model of submerged vegetation under oscillatory flow using Navier–Stokes equations. *Coastal Engineering*, **80**(Oct.), 16–34. 14, 27
- Maza, Maria, Lara, Javier L., & Losada, Inigo J. 2015. Tsunami wave interaction with mangrove forests: A 3-D numerical approach. *Coastal Engineering*, **98**(Apr.), 33–54. 2, 13, 14, 16, 22, 25
- Mazda, Yoshihiro. 2014. Outline of the Physical Processes Within Mangrove Systems. 3
- Mazda, Yoshihiro, Wolanski, Eric, King, Brian, Sase, Akira, Ohtsuka, Daisuke, & Magi, Michimasa. 1997a. Drag force due to vegetation in mangrove swamps. 193–199. VIII, 2, 4, 9, 10, 11, 13, 40, 45, 46, 47, 53, 58, 61, 62, 65, 66, 67, 68, 75
- Mazda, Yoshihiro, Magi, M, Kogo, M, & Hong, PN. 1997b. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam. *Mangroves and Salt marshes*, **1**, 127–135. III, III, 62
- Mazda, Yoshihiro, Magi, Michimasa, Ikeda, Yoshichika, Kurokawa, Tadayuki, & Asano, Tetsumi. 2006. Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp. *Wetlands Ecology and Management*, **14**(4), 365–378. 4
- Mendez, Fernando J., & Losada, Iñigo J. 2004. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, **51**(2), 103–118. 1, 4, 10, 14, 19, 45, 48, 49, 52, 53, 55, 56, 62, 68, 74, 75
- Méndez, Fernando J., Losada, Iñigo J., & Losada, Miguel a. 1999. Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field. *Journal of Geophysical Research*, **104**(C8), 18383. 2
- Menter, Florian R. 1993. Zonal two equation k-turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA paper*, **2906**, 1993. 23
- Oumeraci, Hocine. 2014. Wave loads on marine structures - slender pile structures. *In: LatinAmerican WAVES 2014*. VIII, 28, 74
- Ozeren, Y, Asce, A M, Wren, D G, Asce, M, & Wu, W. 2009. Experimental Investigation of Wave Attenuation through Model and Live Vegetation. 1–12. 4, 9, 13, 46, 62, 66, 67

- Robertson, A.I., & Alongi, D.M. 1992. *Tropical Mangrove Ecosystems*. 1, 8
- Silva, Rodolfo, Martínez, M. Luisa, Hesp, Patrick a., Catalan, Patricio, Osorio, Andres F., Martell, Raul, Fossati, Monica, Miot da Silva, Graziela, Mariño Tapia, Ismael, Pereira, Pedro, Cienguegos, Rodrigo, Klein, Antonio, & Govaere, Georges. 2014. Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research*, **71**(Sept.), 1–16. 3
- Silvestri, S, & Kershaw, F. 2010. *Framing the flow: innovative approaches to understand, protect and value ecosystem services across linked habitats*. UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK. VIII, 6, 7, 8
- Spencer, T, & Möller, I. 2013. Mangrove systems. *Treatise on Geomorphology (ed. JF Shroder)*, **10**, 360–391. VIII, 7, 8
- Sutherland, J., a.H. Peet, & Soulsby, R.L. 2004a. Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, **51**(8-9), 917–939. 26
- Sutherland, J, Walstra, D J R, Chesher, T J, Van Rijn, L C, & Southgate, H N. 2004b. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, **51**(2), 119–142. 26
- Suzuki, Tomohiro, & Eng, M. 2009. The Effectiveness of Mangroves in Attenuating Cyclone-induced Waves Graduation Committee :. 10
- Suzuki, Tomohiro, Zijlema, Marcel, Burger, Bastiaan, Meijer, Martijn C., & Narayan, Siddharth. 2012. Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN. *Coastal Engineering*, **59**(1), 64–71. 1, 14, 75
- Svendsen, IA. 2006. Introduction to nearshore hydrodynamics. 13, 65
- Tanaka, Norio, Sasaki, Yasushi, Mowjood, M. I. M., Jinadasa, K. B. S. N., & Homchuen, Samang. 2006. Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landscape and Ecological Engineering*, **3**(1), 33–45. 1
- Tang, Jun, Shen, Shaodong, & Wang, Hui. 2015. Numerical model for coastal wave propagation through mild slope zone in the presence of rigid vegetation. *Coastal Engineering*, **97**, 53–59. VIII, 18, 20, 21, 25, 32, 33, 74
- Teh, Su Yean, Koh, Hock Lye, Li, Philip, Liu, Fan, Ismail, Ahmad Izani, & Lee, Hooi Ling. 2009. Analytical and numerical simulation of tsunami mitigation by mangroves in Penang, Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **36**(1), 38–46. 38
- Thesis, M Sc, & Hendriks, J M. 2014. Wave Dissipation in Mangroves. 62
- Verschaeve, Joris C G, & Pedersen, Geir K. 2014. Coastal Engineering. **91**, 1–17. 15
- Vo-Luong, Phuoc, & Massel, Stanislaw. 2008. Energy dissipation in non-uniform mangrove forests of arbitrary depth. *Journal of Marine Systems*, **74**(1-2), 603–622. 10
- Wilcox, David C. 1993. *Turbulence modeling for CFD*. Vol. 1. DCW industries La Canada, CA. 23
- Willmott, Cort J., Ackleson, Steven G., Davis, Robert E., Feddema, Johannes J., Klink, Katherine M., Legates, David R., O'Donnell, James, & Rowe, Clinton M. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, **90**(C5), 8995. 26

Willmott, Cort J., Robeson, Scott M., & Matsuura, Kenji. 2012. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, **32**(13), 2088–2094. 26, 27