



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**MODULACIÓN DE LA FRECUENCIA ASOCIADA AL PICO
ESPECTRAL Y LA ALTURA SIGNIFICATIVA DE LAS OLAS
DEBIDO A LA PRESENCIA DE MANGLARES. CASO
ESPECÍFICO, MODELACIÓN EN UN CANAL DE OLEAJE**

Autor:

Daniela Andrea Ortiz Múnera

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Turbo, Colombia

2020



Modulación de la frecuencia asociada al pico espectral y la altura significativa de las olas debido a la presencia de manglares. Caso específico, modelación en un canal de oleaje

Daniela Andrea Ortiz Múnera

Trabajo de grado
como requisito para optar al título de:
Ingeniera Oceanográfica

Asesor: Vladimir Toro
Ph.D. Oceanografía Física; Profesor Universidad de Antioquia, Sede Ciencias del Mar

Co- Asesor: Andrés Osorio
Ph.D. Ciencias y tecnologías Marinas, Profesor Universidad Nacional de Colombia

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Turbo, Colombia
2020

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por permitirme cumplir este logro en mi vida llenándome cada día de tranquilidad, sabiduría y madurez para entender diferentes episodios que ocurrieron en el tiempo de realización de mi trabajo, entendí que como la marea hay subidas y bajadas, pero Él nos permite salir adelante. A mi mamá y a mi papá que, aunque en muchos momentos no comprendían la magnitud de la importancia de lo que era una tesis de grado, siempre respetaron cada uno de mis espacios, esperando que los días no tan buenos calmaran, consolándome en mis días tristes o calmando mis niveles de estrés con mi comida favorita y siempre siendo mis fans número 1 celebrando a todo furor cada éxito que iba sumando en este camino. A mi abuela que siempre ha estado ahí, con sus oraciones y la “sopita” para que me alimentara bien y mi familia en general que entendían cada vez que no podía reunirme con ellos.

Mis compañeros y amigos, todos de manera diferente aportaron en este trabajo de grado, sé que cada uno sabrá su rol y sé que no puedo mencionarlos a todos acá porque de seguro pondría a media Ciencias del Mar, sin embargo, gracias infinitas a mi amigo, compañero y colega Ferney Orejuela, siempre estuvo ahí con la paciencia y calma infinita del mar enseñándome a programar, hoy puedo decir que Matlab y yo ya somos muy buenos amigos y todo gracias a él. Te quiero Fer.

A mi amiga Gloria Londoño, agradezco se hermosa virtud de saber escuchar y enseñar, ella es de las buenas amistades que te deja este viaje de la Universidad.

A mi combo, a todos los Team que creé, mis amigos de semilleros, con los cuales bailé, sonreí, conocí y expuse 100 mil veces mi trabajo de grado, GRACIAS, siempre era bueno recargar energías con nuestros viajes y llegar nuevamente con la mejor actitud.

A mis profesores en general gracias por cada una de sus asesorías, sus correcciones unas suaves otras no tanto pero que hoy son el reflejo del trabajo que estoy terminando. Quiero resaltar entonces a mi profesor Alfredo Jaramillo, por su gestión, por despertar el interés de la investigación de muchos de nosotros y por querer tanto a sus “moachos”. A mi profe Parra, sus estrictas y rigurosas correcciones de seguro pulieron todas las tesis que hoy estamos entregando, sus palabras directas y profundas que en muchos casos nos dejaba sin que decir sirvieron para forjarnos incluso como personas.

Por último y no menos importante a mi profesor Vladimir Toro, admiraré siempre su calidad humana y su buena actitud, no hubo una sola asesoría en la que saliera triste, sus frases típicas “Excelente Dani, que buen trabajo Dani, mucho ánimo Dani, con toda la actitud pues “nos motivaban a seguir dándola toda por estos trabajos, que nos permitieron conocer y concursar en diferentes eventos académicos que sin duda alguna representamos de manera exitosa. Gracias profesor por conocernos, por moldearnos e inculcarnos disciplina, por estar ahí incluso en circunstancias no académicas...” Te queremos profe te queremos”.

A mi co-asesor Andrés Osorio que aceptó acompañarme en este viaje, al grupo oceánicos de la universidad Nacional de Colombia y a mi compañero Alejandro Henao, del cual resalto su actitud siempre positiva, gracias por darme la oportunidad de ser partícipe de sus investigaciones y depositar en mí la confianza para realizar las mediciones en el canal de olas, fue reconfortante realizar esta tarea. Gracias por las asesorías, cada uno de sus miembros son un mundo infinito profundo de conocimiento.

A la gobernación de Antioquia por hacerme parte de su equipo de trabajo y financiar mi trabajo de grado.

A mi hermosa universidad de Antioquia, mi sede Ciencias Del Mar, que fue mi segundo hogar en estos años, la cual nos apoyó sin duda alguna en cada actividad académica en la que deseábamos participar, siempre dispuesta prestándonos sus instalaciones, disculpándonos cada vez que vendíamos comidas en la sede sin un permiso autorizado, no tengo duda que mi paso en ella permitió que hoy Daniela Ortiz este enamorada de esta linda carrera y del mundo de la investigación.

Gracias UdeA, me diste una hermosa familia amantes a las ciencias del mar.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. HIPOTESIS	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 General	14
3.2 Específicos	14
4. MARCO TEORICO	15
4.1 Obras de protección costeras naturales	15
4.2 Ecosistemas de manglares	17
4.3 Anatomía Funcional de <i>Rhizophora mangle</i>	18
4.4 Mecánicas de ondas	20
4.5 Espectros del oleaje en función de la frecuencia	21
4.6 Modelo físico y prototipos de manglar	23
4.7 Canal de olas	26
5. METODOLOGÍA	27
5.1 Descripción canal de olas	27
5.2 Calibración de la pala y los sensores	30
5.2.1 Calibración de pala	30
5.2.2 Calibración de sensores	32
5.3 Prototipo y distribución de los bosques de manglar	33
5.4 Selección escenarios	36
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	38

6.1 Series de tiempo libre	38
6.2 Alturas de olas	38
8. RECOMENDACIONES	53
9. REFERENCIAS	54
10. ANEXO	59

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de obra de protección duras A) D) Dique exento B) Espigón C) Espolón, Fuente: Tomado de Invemar (A, B, D) y sites.google.com (D).....	15
Figura 2. Obras de protección naturales A) Manglares B) Dunas costeras C) Arrecifes de corales D) Pastos Marinos. Fuente: Tomado de sites.google.com	16
Figura 3. Modelos experimentales de manglares utilizando numerosas configuraciones de raíces. Fuente: Hursin (2012).	17
Figura 4. Perfil del sistema de raíces de <i>Rhizophora mangle</i> . Fuente: Gill & Tomlinson (1977).	18
Figura 5. Mediciones morfológicas del sistema de radicales <i>Rhizophora mangle</i> : A, diámetro máximo del tallo; B, diámetro mínimo del vástago; Y, altura del rizóforo de primer orden; Fuente: Mendez-Alonso et al. (2015).....	19
Figura 6. Esquemización del sistema ola-vegetación- raíces en ecosistemas marinos. Fuente: Burguer (2005).....	20
Figura 7. Espectro de densidad de energía en función de la frecuencia. Fuente: Van der Meer et al. (2000).....	22
Figura 8. Representación gráfica del espectro en frecuencia: el punto rojo muestra la frecuencia asociada al pico espectral.	22
Figura 9. Ilustración del montaje del canal de olas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. A) vista longitudinal B) vista desde la parte superior del canal.	27
Figura 10. Vista en perfil del canal de olas UNAL, se presentan las tres zonas de trabajo del canal. s1 a s8 son los sensores de superficie distribuidos al largo del canal.	28
Figura 11. Sensores resistivos canal de olas UNAL. A) vista superior. B) vista lateral.....	29
Figura 12. Función de transferencia: Teórica (línea continua), valores ajustados (puntos en colores). Fuente: (Osorio et al., 2018).....	32
Figura 13. Curva de calibración para los sensores de medición de nivel. Fuente: (Osorio et al., 2018).....	33
Figura 14. Esquema de la morfología de un árbol de a partir de la metodología planteada por Ohira et al. (2013)	34
Figura 15. Plantilla de dobleces para el diseño de la raíz del prototipo. Fuente: (Osorio et al., 2018).....	35
Figura 16. Prototipos finales de los manglares. Fuente: (Osorio et al., 2018).)	35
Figura 17. Distribuciones del bosque de mangle para la densidad 1. Fuente: Osorio et al. (2016).	36
Figura 18. Distribuciones del bosque de mangle para la densidad 2. Fuente: Osorio et al. (2016)	36
Figura 19. Series de tiempo altura(cm) vs tiempo(seg) para la densidad 1 como primera aproximación de visualización de los datos en bruto. En azul el sensor S2 antes del bosque, en rojo el sensor S7 luego de atravesar el bosque.	39
Figura 20. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 1, condiciones: $H=0.07m$ $T=1.2seg$ $h=0.49m$	40

Figura 21. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 4, condiciones: $H=0.13\text{m}$ $T=2.0\text{seg}$ $h=0.49\text{m}$	41
Figura 22. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 6, condiciones: $H=0.07\text{m}$ $T=1.2\text{seg}$ $h=0.53\text{m}$	42
Figura 23. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 7, condiciones: $H=0.07\text{m}$ $T=1.8\text{seg}$ $h=0.53\text{m}$	43
Figura 24. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 13, condiciones: $H=0.10\text{m}$ $T=2.0\text{seg}$ $h=0.57\text{m}$	44
Figura 25. Frecuencias asociadas al pico espectral. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias analizadas. Caso 15, condiciones: $H=0.16\text{m}$ $f=0.85\text{Hz}$, $h=0.57\text{m}$	45
Figura 26. Caso 6 para escenario D1. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias secundarias analizadas. Análisis para (a) 100 datos; (b) 1000 datos; (c) 10000 dat.....	46
Figura 27. Caso 9 para el escenario D1. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias secundarias analizadas. Análisis para (a) 100 datos; (b) 1000 datos; (c) 10000	47
Figura 28. Espectro en frecuencia para todos los ocho sensores. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 13: $H=0.10\text{m}$ $h=0.57\text{m}$	49
Figura 29. Representación del Espectro en frecuencia para el caso 8 $H=0.10\text{m}$ $f=0.50\text{ Hz}$ $h=0.53\text{m}$ de los 3 experimentos propuestos, el recuadro rojo representa la frecuencia en resonancia encontrada en los 3 escenarios.	50
Figura 30. Representación del Espectro en frecuencia para el caso 3 $H=0.10\text{m}$ $f=0.50\text{ Hz}$ $h=0.49\text{m}$ de los 3 experimentos propuestos, el recuadro rojo representa la frecuencia en resonancia encontrada en los 3 escenarios.	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Casos de probabilidad conjunta (Hs –Tp) seleccionados	25
Tabla 2. Alturas y Periodos para prototipo y el modelo	26
Tabla 3. Intervalos de operación de la pala.....	29
Tabla 4. Casos propuestos para los experimentos con los tres escenarios: sin manglar, con manglar densidad 1 y densidad 2.....	37
Tabla 5. Valores de las frecuencias encontradas para los diferentes experimentos en función de la frecuencia del caso.	48

1. INTRODUCCIÓN

Los manglares son una de las formaciones naturales más eficaces en la defensa de la costa frente a la energía del oleaje y al incremento del nivel del mar. Esto se debe a su estructura flexible que absorbe eficazmente la energía del oleaje a través de sus raíces aéreas, que les permiten hasta cierto punto disminuir el impacto de las olas.

Entre las especies más llamativa está *Rhizophora mangle* debido a sus esbeltas y arqueadas raíces aéreas, las cuales, por tener forma de zancos, les permiten estabilizarse sobre planos lodosos. (Prahl *et al.*,1990). Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017), los manglares de Colombia tienen una extensión aproximada de 285.049 Ha, distribuidos en los litorales Pacífico con 194.880 Ha. y el Caribe con 90.160.58 Ha. De acuerdo con Blanco *et al.*, (2016), *Rhizophora mangle* es la especie más abundante en el golfo de Urabá y de manera particular en el delta del río Atrato.

Precisamente en el Caribe, la zona de golfo de Urabá es una de las más afectadas por erosión costera. De manera específica se ha evidenciado un mayor impacto erosivo en las zonas de Zapata, Damaquiel y puerto Rey-Minuto de Dios, en donde se han presentado tasas de erosión entre 7 y 40m/año (Correa & Vernet,2004). A esta problemática, se suma la preocupante situación evidenciada por Estrada-Urrea (2014), quien determinó altas tasas de deforestación de estos ecosistemas debido a procesos agrícolas y construcción de viviendas, poniendo esta especie en un alto grado de vulnerabilidad.

Los manglares han demostrado ser eficaces en la atenuación de la energía de las olas. Husrin *et al.*, (2010) realizaron un experimento sobre la atenuación del tsunami utilizando un prototipo de *Rhizophora*. Sus resultados demuestran que la reducción de la energía de las olas es más alta cuando se propagan sobre manglares. En las costas de Vietnam un experimento realizado

por Bao (2011) sobre un parche de manglar, mostró una reducción del 21% de la altura de las olas en los primeros 40 metros del bosque y un 17% en los siguientes 40 metros. De igual manera, Hashim & Sim-Mong (2013), encontraron una reducción de la energía de las olas dos veces mayor debido a la vegetación.

Teniendo en cuenta lo anterior y basados en las características morfológicas de *Rhizophora mangle*, en este trabajo se estudió la modificación el periodo asociado al pico espectral del oleaje y su altura significativa en una zona con y sin manglar usando un canal de olas. Es de notar que pocos estudios dan cuenta de la modificación de la frecuencia asociada al pico espectral, lo cual puede ser importante, ya que se espera avanzar en el conocimiento de cómo se modifica la energía de las olas en función de esta frecuencia.

Con este fin, se realizó un modelamiento físico- experimental a escala laboratorio que permitió determinar la atenuación y distribución de la energía de las olas al atravesar el bosque de manglar. El canal de olas pertenece a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y los diseños a escala de *Rhizophora mangle* fueron construidos por el grupo de investigación OCEANICOS.

2. HIPOTESIS

Los manglares ubicados cerca de la línea de costa, son barreras naturales que han demostrado ser efectivos al reducir la energía del oleaje. La arquitectura de las raíces del *Rhizophora* Mangle tienen como ventaja el hecho que producen una interacción efectiva con la onda incidente, lo cual permite cambios en la frecuencia y una modulación en la energía de las olas al entrar en contacto con su estructura.

3. OBJETIVOS

3.1 General

Establecer la magnitud de disipación energética causada por los modelos de raíces de mangle, usando mediciones en canal de oleaje realizadas con distinta profundidad y régimen inicial de altura de ola y frecuencia.

3.2 Específicos

- Establecer los cambios en frecuencia asociada al pico espectral de las olas y su altura a lo largo del canal para cada uno de los casos.
- Comparar los resultados del análisis espectral para evaluar los cambios en la frecuencia asociada al pico espectral de las olas de cada caso.
- Comparar la disipación de energía, los cambios en la frecuencia asociada al pico espectral de las olas y su altura en cada uno de los casos.

4. MARCO TEORICO

4.1 Obras de protección costeras naturales

A nivel mundial se ha demostrado que el uso de estructuras duras como diques, rompeolas y espolones presentados (figura 1), son los más utilizados para tratar los problemas de erosión de la línea de costa (Ordoñez,1991). Sin embargo, estudios como el de Hursin (2012) y Vanegas (2015) han demostrado que las obras de protección costera naturales (figura 2), como manglares o corales son disipadores adecuados de la energía del oleaje. Autores como Dahdouh-Guebas *et al.* (2005), mostraron que en lugares donde hay bosques costeros, estos pueden desempeñar un rol importante en la defensa de las costas frente a eventos fuertes y extremos de oleaje como por ejemplo tsunamis.



Figura 1. Tipos de obra de protección duras A) D) Dique exento B) Espigón C) Espolón,
Fuente: Tomado de Invemar (A, B, D) y sites.google.com (D).

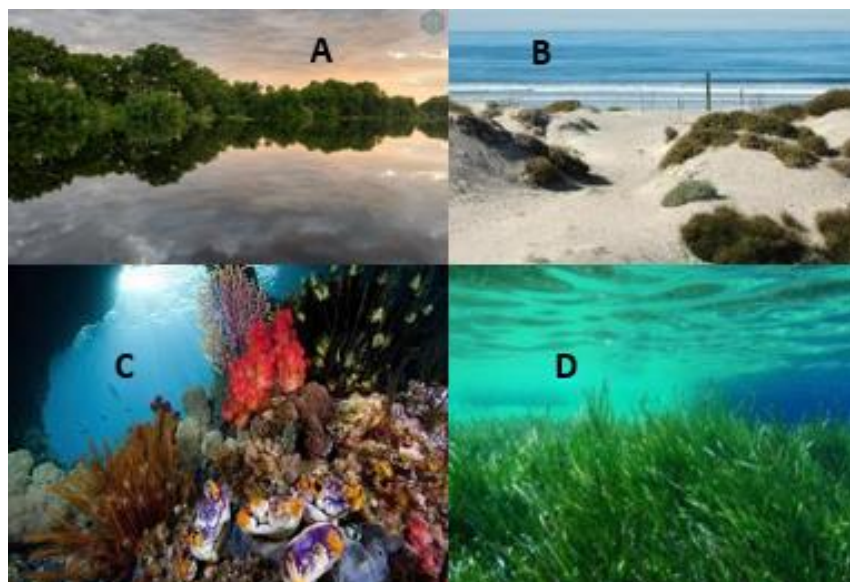


Figura 2. *Obras de protección naturales A) Manglares B) Dunas costeras C) Arrecifes de corales D) Pastos Marinos. Fuente: Tomado de sites.google.com*

Estas capacidades de las defensas naturales, han despertado el interés de numerosos científicos los cuales han realizado investigaciones principalmente en canales de olas y/o mediante modelaciones numéricas. Hursin (2012) determinó la efectividad de los bosques de mangles para reducir la energía de un tsunami. En su metodología realizó mediciones con y sin prototipos diseñados por él (figura 3). En su investigación, realizó variaciones de la altura incidente de ola, distancia lineal y ancho del bosque y densidad de los mangles.

Sus resultados sugieren que la tasa de reducción de energía del oleaje estaba gobernada por los modos de evolución de las olas, el cual clasificó con condiciones de ruptura y no ruptura. Por otro lado, encontró que la mayor disipación para el modelo de mangles se logró para los casos ejecutados con un bosque mucho más denso.

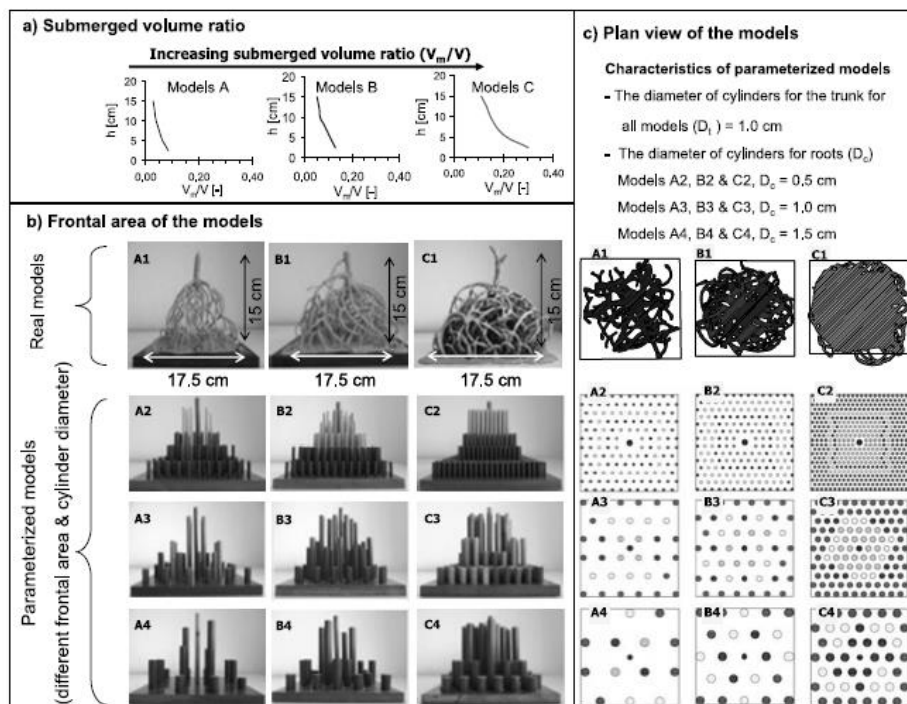


Figura 3. Modelos experimentales de manglares utilizando numerosas configuraciones de raíces. Fuente: Hursin (2012).

4.2 Ecosistemas de manglares

En general, los manglares son ecosistemas de bosques inundados que se encuentran principalmente en las regiones ecuatoriales y subtropicales. Su presencia se debe a la confluencia de aguas dulces y salobres, esto último debido a la variación del nivel producido por las mareas. Los manglares son árboles que en su proceso evolutivo desarrollaron mecanismos para eliminar los excesos de sal, sostenerse en suelos inestables y sobrevivir en sustratos sin oxígeno. Lograron además producir semillas flotantes en el mismo árbol como estrategia de reproducción (McLeod *et al.*, 2006).

En el área del golfo de Urabá, *Rhizophora mangle* se encuentra principalmente en los bordes ribereños del río Atrato, lugar apto para su desarrollo (Lugo *et al.*, 2014). De acuerdo con Menezes (2005), esta especie presenta una mayor resiliencia y adaptación a los cambios en las condiciones ambientales en la mayoría de las regiones que se encuentra.

4.3 Anatomía Funcional de *Rhizophora mangle*

El *Rhizophora mangle*, tiene un sistema de raíces aéreas, tipo zancos, que crecen desde el tallo principal y se asemejan a contrafuertes voladores, como se observa en la figura 4. (Gill & Toninos, 1969; Fisher, 1982). Estos zancos se derivan de los tallos y, por lo tanto, el término "rizóforo" es más apropiado para nombrar el apoyo o la raíz aérea (Menezes, 2006). Los rizóforos se desarrollan a partir del tallo principal, llegando con frecuencia al suelo y dividiéndose de manera simpodial, es decir, ramas laterales de orden diferentes (Menezes, 2006). De acuerdo con Gill & Tomlinson (1977) las raíces del *Rhizophora* presentan un alto grado de plasticidad, lo cual lo hace mucho más resistente y capaz de adaptarse a entornos cambiantes.

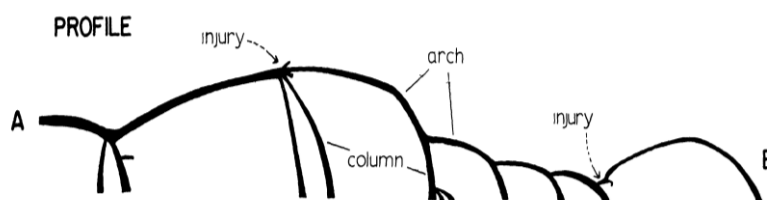


Figura 4. Perfil del sistema de raíces de *Rhizophora mangle*. Fuente: Gill & Tomlinson (1977).

En cuanto a su morfología, los rizóforos pueden presentarse como arcos perpendiculares al tronco principal o como columnas paralelas con arcos de diámetros diferentes (Gill & Tomlinson, 1969; Gill & Tomlinson, 1971; Gill & Tomlinson, 1977). En cuanto a su textura, es levemente rugosa debido a un mecanismo interno para respirar en épocas de inundación, y con la presencia de ramas con hojas aglomeradas. Por lo tanto, la presencia de los rizóforos es una razón por la cual los manglares pueden absorber la energía de las olas, debido a la fricción generada por la rugosidad de su estructura (Duke, 1992). En cuanto a su anclaje al terreno, de acuerdo con Brinkman *et al.* (1997), los rizóforos forman una especie de red sobre el sustrato, generando una resistencia y sustentación considerable lo cual adicionalmente permite la atenuación de la energía de las olas a medida que atraviesan el bosque.

En la figura 5 se presenta un esquema de la estructura radical de *Rhizophora mangle*, en donde se aprecia los diferentes diámetros de las raíces, así como las raíces principales y secundarias. Las características (parámetros) de estas raíces son importantes al momento de realizar el escalamiento del tamaño del manglar en trabajos de laboratorio. Entre los parámetros importantes están la altura, densidad del bosque de manglar y etapa de madurez en la que se encuentre el mangle, es decir, si joven o adulto ya que esto determina la rigidez de sus raíces (Mazda *et al.*, 1997). En cuanto a condiciones hidráulicas para la disipación de la energía de las olas, Darymple (1984) y Massel (1999), sugieren que uno de los parámetros físicos a tener en cuenta es la profundidad de interacción, ya que condiciona la manera cómo se verá influenciada la energía de las olas al encontrarse con las raíces del bosque de manglar (figura 6).

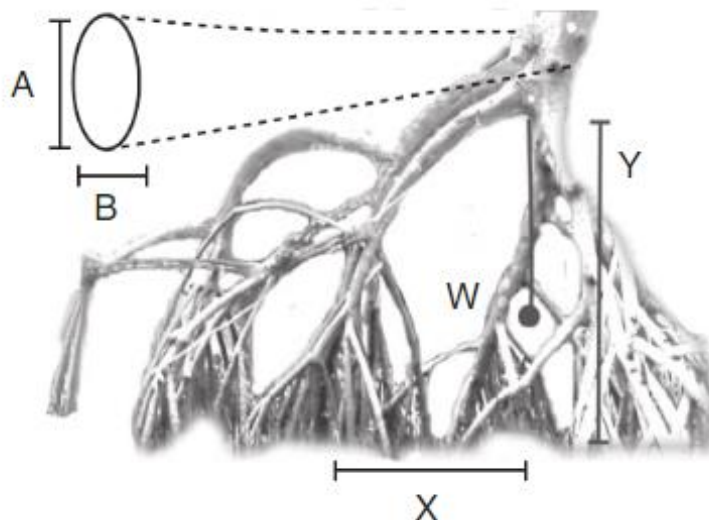


Figura 5. Mediciones morfológicas del sistema de radicales *Rhizophora mangle*: A, diámetro máximo del tallo; B, diámetro mínimo del vástago; Y, altura del rizóforo de primer orden; Fuente: Mendez-Alonso *et al.* (2015).

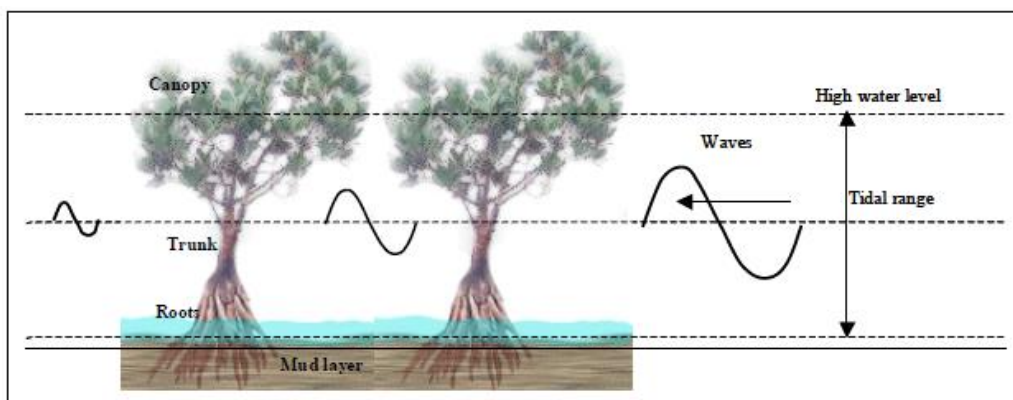


Figura 6. Esquemización del sistema ola-vegetación- raíces en ecosistemas marinos. Fuente: Burguer (2005).

4.4 Mecánicas de ondas

Teniendo en cuenta las bondades de los manglares en la reducción de la energía de las olas, a continuación, se presenta la definición de las principales variables y parámetros asociados al oleaje. Entendiendo que las olas son ondas, las variables fundamentales para su estudio son:

1. Valle: Parte más baja de una ola
2. Cresta: Parte más alta de una ola
3. Altura de ola: Diferencia entre las cresta y valle de una ola
4. Longitud de onda: Es la distancia que hay entre dos valles o dos crestas consecutivas. Su

expresión matemática es:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde:

C= velocidad de la onda

f = Frecuencia de la onda

5. Periodo de onda (T): Es el tiempo transcurrido entre dos valles o crestas.

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

6. Frecuencia de la onda(f): Es el inverso del periodo (T). Es el número de veces que se repite la onda por segundo.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

7. Altura significativa de ola significativa (H_s): Se define como la media aritmética del tercio de las olas de mayor altura del registro.

$$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (4)$$

El valor de H_s también puede ser calculado a partir de la información espectral. A pesar que el espectro direccional del oleaje (en función de la energía, frecuencia y dirección) es la mejor representación de un estado de mar, partiremos del espectro en función de la frecuencia. Este último espectro se obtiene a partir de la integración del espectro direccional en dirección. Cabe notar que el parámetro del oleaje llamado dirección media se obtiene a partir del espectro direccional.

Usamos el espectro en función de la frecuencia ya que, por la configuración del canal de oleaje, en nuestras mediciones y análisis, la dirección no es determinante. A continuación, se explica en detalle las principales características del espectro en frecuencia.

4.5 Espectros del oleaje en función de la frecuencia

El espectro del oleaje en función de la frecuencia (m^2/Hz) es la representación de su energía en función de la frecuencia de cada uno de los trenes de onda propagados. Este espectro permite calcular otro parámetro del oleaje llamado frecuencia asociada al pico espectral, como aquella frecuencia asociada al valor más alto de energía del espectro.

Este tipo de espectros permiten, entre otras cosas, determinar procesos oscilatorios que se presentan en un canal como la superposición de ondas o también conocido como “onda diamante” haciendo referencia a la presencia de la reflexión que estas experimentan. Usando los espectros en

función de la frecuencia es posible realizar análisis de la energía de la onda y ver en que dominio de frecuencia se encuentra su energía (Suastika, 2001). Van der Meer *et al.* (2000), sugieren que por medio de este espectro se puede estudiar la diferencia entre espectros incidentes y transmitidos en un canal (figura 7).

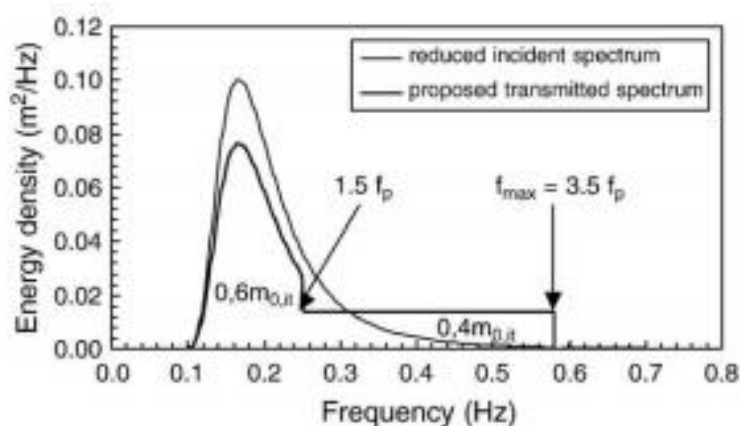


Figura 7. Espectro de densidad de energía en función de la frecuencia. Fuente: Van der Meer *et al.* (2000).

La metodología propuesta por Van der Meer *et al.* (2000) supone que la mayor diferencia entre los espectros incidentes y transmitidos radica en que los primeros presentan picos de más energéticos en comparación con los transmitidos alrededor de la frecuencia asociada al pico espectral. En la figura 8 se muestra un ejemplo un espectro del oleaje en función de la frecuencia y la ubicación de la frecuencia asociada al pico espectral.

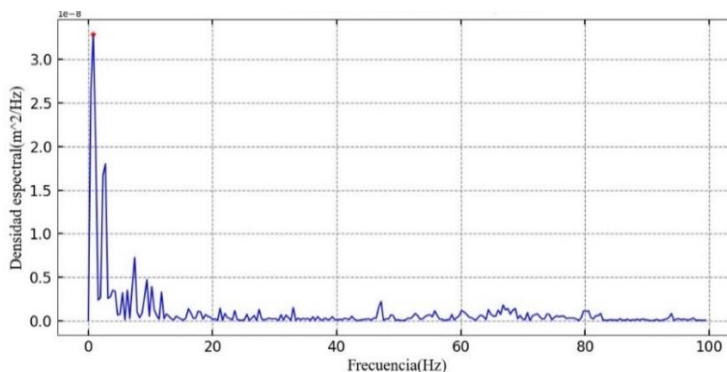


Figura 8. Representación gráfica del espectro en frecuencia: el punto rojo muestra la frecuencia asociada al pico espectral.

El espectro en función de la frecuencia puede ser integrado en términos de la frecuencia con lo cual se obtiene el momento de orden cero (M_0) del oleaje. A partir de este valor es posible calcular H_s como:

$$H_s = 4.004 \sqrt{M_0} \quad (5)$$

A partir del valor de H_s , es posible calcular la energía del oleaje (E), como la cual la suma de la energía cinética y energía potencial para un tiempo promedio, representada matemáticamente por la ecuación (6):

$$E = \frac{1}{8} \rho g (H_s^2) \quad (6)$$

donde, ρ es la densidad del agua de mar y g es aceleración de la gravedad.

4.6 Modelo físico y prototipos de manglar

Los modelos físicos son representaciones a escalas reales de un objeto de estudio que cumple criterios y parámetros específicos. En estos modelos se debe garantizar consideraciones físicas y matemáticas del sistema real. De acuerdo con Cid Solé (2004), en el caso de flujos hidráulicos el número de Froude se considera el más idóneo, ya que permite garantizar la semejanza geométrica y cinemática del modelo físico y del prototipo. El número adimensional de Froude matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (7)$$

Donde:

V: velocidad de onda

L= longitud de onda

Tanto el prototipo como el modelo deben garantizar las mismas relaciones entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales. En la ecuación 8 se describe esta relación, teniendo en cuenta que los subíndices (m) y (p) hacen referencia al modelo y prototipo, respectivamente:

$$\frac{V_p}{\sqrt{g_p * L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m * L_m}} \quad (8)$$

El modelo y el prototipo trabajan bajo el mismo campo gravitacional, de esta manera la expresión 9, se reescribe como:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} \quad (9)$$

Por otro lado, se puede obtener una relación entre las velocidades de la parte real y modelada de la siguiente manera:

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p}{t_p} * \frac{t_m}{L_m} \quad (10)$$

donde t_m y t_p son el periodo del modelo y del prototipo respectivamente. Igualando las ecuaciones 9 y 10, obtenemos la escala para t_m en función de la escala geométrica escogida como se expresa en la ecuación (11):

$$t_m = \frac{t_p}{\sqrt{\frac{L_p}{L_m}}} \quad (11)$$

El cálculo de la altura de ola en el modelo es realizado teniendo en cuenta el intervalo de operación de la pala que produce las olas en el canal de olas y la construcción del bosque de manglar. A partir de diferentes pruebas de escalamiento se consideró la escala 1:10 como la más adecuada. De este modo la altura de ola del modelo es presentada mediante la ecuación (12):

$$\frac{H_m}{H_p} = \frac{1}{10} \quad H_m = \frac{1}{10} * H_p(12)$$

Con el fin de obtener los parámetros integrales del oleaje (H_s y T_p), se realizó un análisis de probabilidad conjunta que permite relacionar dos de esos parámetros (Walpole *et al.*, 1999). De acuerdo a los resultados planteados por Osorio *et al.*, (2016) se obtuvieron series de oleaje sintético para todo el Caribe Colombiano, en 4 sitios cercanos al golfo de Urabá, con el fin de determinar los valores de las condiciones del oleaje de la región. Con esta información se realizó el análisis de probabilidad conjunta, en donde a cada altura de ola significativa se le asignó un periodo pico (tabla 1).

Tabla 1. Casos de probabilidad conjunta ($H_s - T_p$) seleccionados

Casos	Altura de ola [m]	Periodo [s]
1	0.7	5.8
2	1.0	6.2
3	1.3	6.4
4	1.6	6.6

Utilizando la ecuación (12), se realizaron los escalamientos de H_s y T_p . En la tabla 2 se presentan los casos de alturas de ola tanto para el modelo como para el prototipo

Tabla 2. Alturas y Periodos para prototipo y el modelo

CASO	PROTOTIPO		MODELO	
	Altura (Hp [m])	Periodo (Tp [s])	Altura (Hm [m])	Periodo (Tm[s])
1	0.7	5.8	0.07	1.8
2	1.0	6.2	0.10	2.0
3	1.3	6.4	0.13	2.0
4	1.6	6.6	0.16	2.2

4.7 Canal de olas

Un canal de olas es un montaje estructural en laboratorio que sirve para realizar estudios de ingeniería marítima y costera, y que teniendo en cuenta aspectos físicos e hidrodinámicos a pequeñas escalas bajo condiciones impuestas, permite obtener valores de los parámetros integrales del oleaje (Welti, 2005). Los estudios de oleaje a escala de laboratorio y sus procesos de interacción con estructuras naturales o artificiales han sido de amplio estudio en las últimas dos décadas. Los canales permiten simular escenarios particulares, en condiciones controladas y representar las condiciones del mar y su interacción con estructuras flotantes y de protección costera, realizar estudios de interacción ola-corriente y ola-estructura, entre otros (Roberto *et al.*, 2008).

Las mediciones experimentales de este trabajo se llevaron a cabo en el canal de olas de la universidad Nacional de Colombia, sede Medellín –UNAL- (figura 9). El canal cuenta con una pala tipo pistón que permite la generación del oleaje con variación únicamente en sentido horizontal sobre la profundidad. La pala fue diseñada por la empresa HR Wallingford y los datos en bruto medidos son procesados mediante el software Data Acquisition (HR DAQ).



Figura 9. Ilustración del montaje del canal de olas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. A) vista longitudinal B) vista desde la parte superior del canal.

5. METODOLOGÍA

5.1 Descripción canal de olas

El canal de olas de la UNAL cuenta con una longitud total de 25 metros, una profundidad y ancho de 1x1 m (figura 10). Este canal tiene tres zonas que se definirán a continuación:

Zona de generación: (longitud de 4m) dentro de esta zona se encuentra la pala cual es la encargada de la generación del movimiento del agua. La pala genera olas con una amplitud y un periodo asignado desde el programa. Este instrumento requiere una calibración previa cuyos parámetros fueron tomados de Osorio *et al.* (2018). Este autor utilizó una función de transferencia la cual tiene la siguiente expresión:

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh^2(Kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (13)$$

Dónde:

H – Altura de ola

S₀ – Stroke de la pala (movimiento longitudinal)

h – Profundidad del nivel de agua

k – Número de onda

T - Periodo.

Zona de propagación: (longitud de 15 metros) es la segunda zona del canal de oleaje y en ella se desarrolla completamente el tren de olas. Las paredes del canal en esta zona son de vidrio templado.

Zona de disipación: (longitud de 6 metros) es la última zona del canal de olas, la cual tiene paredes construidas en concreto. Presenta una pendiente al final del canal conformado por gravas y espuma que tienen como objetivo reducir la reflexión en el canal.



Figura 10. Vista en perfil del canal de olas UNAL, se presentan las tres zonas de trabajo del canal. s1 a s8 son los sensores de superficie distribuidos a lo largo del canal.

Este canal dispone de una serie de instrumentos y accesorios para medir las diferentes variables del oleaje. A continuación, se nombran algunos de ellos:

Sensores de superficie libre tipo resistivos: a lo largo del canal se encuentran distribuidos 8 sensores (s1 a s8; figura 10) que se ubican de acuerdo a los alcances de cada trabajo. En estos sensores la corriente fluye sobre dos alambres de acero inoxidable con una longitud de 60 cm de largo que quedan en el centro del canal de olas (figura 11). Por lo tanto, se registran los cambios de voltaje en un intervalo entre 0 y 10 voltios, los cuales posteriormente se convierten en series de tiempo digitales mediante un convertidor analógico digital.

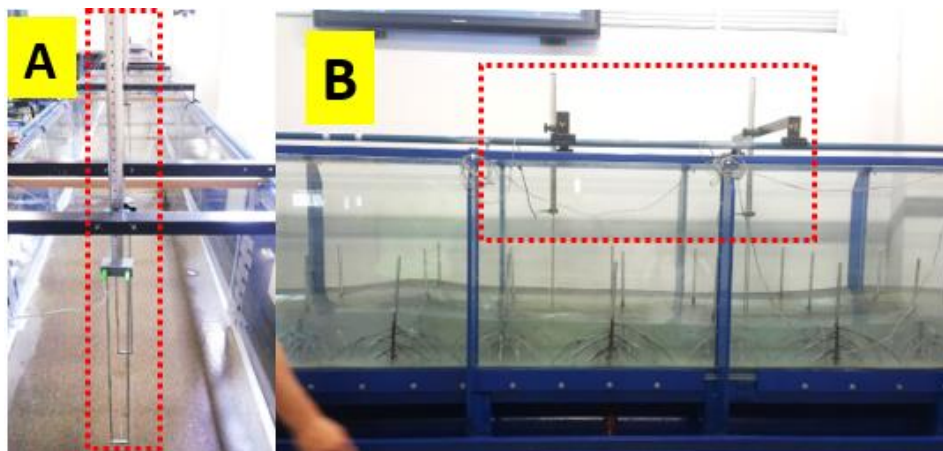


Figura 11. Sensores resistivos canal de olas UNAL. A) vista superior. B) vista lateral.

Pala: es un dispositivo tipo pistón que permite el movimiento de la masa de agua. Tiene intervalos de operación que se presentan en la tabla 3. En cada experimento, desde el software, se programa la profundidad de la columna de agua del canal (h), la altura de ola (H) y el periodo (T).

Tabla 3. Intervalos de operación de la pala

Variable	Intervalo
Profundidad del agua - h [m]	$0.3 < h < 0.6$
Altura de ola - H [m]	$0.07 < H < 0.3$
Periodo de la ola - T [s]	$0.7 < T < 3.5$

Falso fondo: Dentro del canal se instaló un falso fondo construido en madera. El objetivo de esta construcción era simular las condiciones batimétricas del entorno marino y permitir que las raíces de los prototipos de manglar no estuvieran totalmente sumergidas. Además, se diseñó de tal manera que se crearon zonas profundas, someras e intermedias, con el fin de obtener rompimiento de oleaje tipo spilling y no tipo surfing o collapsing. De acuerdo con Holthuijsen (2007) estos dos últimos se asocian a rompimientos bruscos generando una mayor disipación de energía y esto

podría alterar las condiciones del experimento. Bajo estas condiciones, la pendiente del falso fondo se diseñó bajo las variables del número de Irrabarren (ξ), el cual debe ser menor a 0.5 para garantizar el rompimiento mencionado (ecuación 14):

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H_b}{L_o}}} \quad (14)$$

donde α es el ángulo de la pendiente de la playa, H_b la altura de ruptura de la ola y L_o la longitud de onda en aguas profundas.

Pendiente: Se diseñó una playa con gravas de tamaños variados entre 10 cm y 2cm siguiendo los criterios de Hughes (1993) y Ouellet & Datta (1986) en el diseño de pendientes para la absorción de ondas en canales de oleaje. Es de notar que ésta pendiente abarca todo el ancho del canal dentro de la última zona y mide 3 metros de largo y 1m de alto.

5.2 Calibración de la pala y los sensores

5.2.1 Calibración de pala

En primer lugar, se determinó la función de transferencia de la pala como parte del procedimiento de calibración. Este procedimiento se realiza debido a que la forma de la pala se modifica debido a la fricción, desgaste y vibraciones del motor producidas por ondas generadas por fuera de la curva teórica. A partir del software que controla la pala se ajustan los valores de la función de transferencia con el fin de obtener las condiciones necesarias de onda. Para esto es necesario calcular la relación entre la altura de la ola y el movimiento longitudinal de la pala de la siguiente manera:

$$\frac{H}{S_o} = \frac{4 \sinh^2(Kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (15)$$

dónde:

H – Altura de ola

S_0 – Stroke de la pala (movimiento longitudinal)

h – Profundidad del nivel de agua

k – Número de onda

T - Periodo

El número de onda, k , se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (16)$$

donde L es la longitud de onda en aguas someras y se calcula como:

$$L = L_0 \left(\tanh \left(\frac{2\pi * h}{L_0} \right)^{3/4} \right)^{2/3} \quad (17)$$

donde L_0 es la longitud de onda para aguas profundas, expresión que se puede determinar por medio de la ecuación:

$$L_0 = \frac{9.81 * T^2}{2\pi} \quad (18)$$

A continuación, el paso a paso planteado por Osorio *et al.* (2018) para realizar este procedimiento:

1. Se ingresaron los valores de la profundidad (h) y los valores de $(H/S_0)_{\text{real}}$ para cada una de las frecuencias.
2. Se generaron olas con el número de Ursell ($U < 20$) de tal manera que fueran lo más lineales posible.
3. Se midió el nivel del agua en la zona más cercana a la pala y en el momento que inició el experimento, con el fin de evitar modulaciones por ondas reflejadas.
4. Se midió el movimiento horizontal de la pala.
5. Se determinó para la altura de ola simulada la relación $(H/S_0)_{\text{real}}$.

6. Se repitieron los numerales del 2 al 5 para dos ensayos más con diferentes alturas de ola y se calculó el valor $(H/S_0)_{\text{real}}$ promedio.
7. Finalmente se obtuvo el valor que es ingresado en la función de transferencia para la frecuencia indicada.

En la figura 12 se observan los valores de kh en función de H/S_0 , la cual se construye a partir de los pasos mencionados. La gráfica permite determinar el valor de transferencia (Tomado de Osorio *et al.*, 2018)

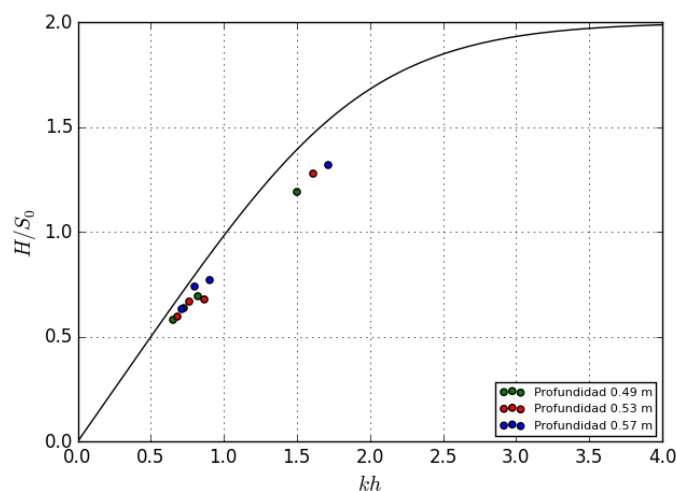


Figura 12. Función de transferencia: Teórica (línea continua), valores ajustados (puntos en colores). Fuente: (Osorio *et al.*, 2018).

2.2.2 Calibración de sensores

Se realizó la calibración respectiva de los sensores de nivel del canal de olaje. Estos instrumentos tienen en su estructura agujeros equi-espaciados a 20mm permitiendo subirlos o bajarlos en ese intervalo. Por medio del método de 3 puntos (20 mm; 0 mm; -20 mm) se llevó a cabo la calibración. Los datos fueron compilados en el software Wallingford y se produjo la curva de calibración (figura 13).

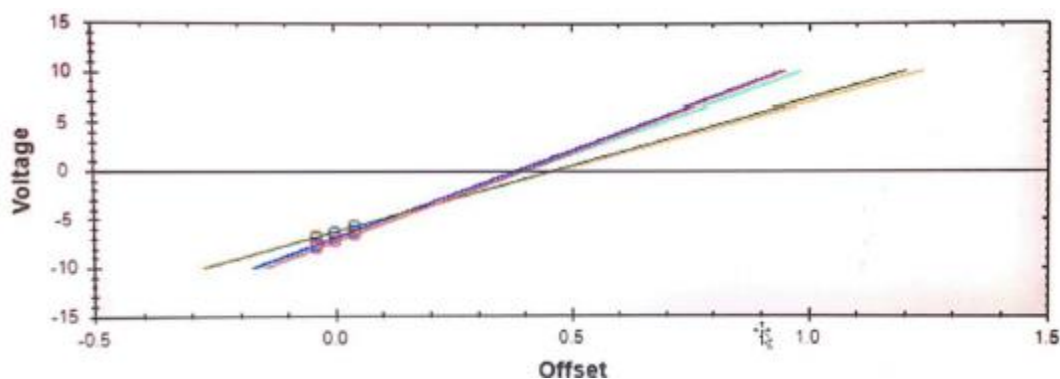


Figura 13. Curva de calibración para los sensores de medición de nivel. Fuente: (Osorio *et al.*, 2018).

Luego de calibrados los sensores, esto se ubicaron en el canal de la siguiente manera: tres en la zona de generación, tres en la zona de propagación (entre el bosque de manglar) y dos en la zona de disipación (figura 10). Durante cada uno de los días de los experimentos se realizó una calibración de los sensores, la cual sirvió para todos los casos que se ejecutaban durante esa jornada. Los sensores tomaron datos a una frecuencia de 100 Hz durante 15 minutos, por lo tanto, para cada caso experimental se obtuvieron alrededor de 150.000 datos por sensor.

5.3 Prototipo y distribución de los bosques de manglar

Las construcciones de los prototipos fueron realizadas por personal de la UNAL y los detalles de los mismos pueden consultar en Osorio *et al.*, 2018. A continuación, se presentan algunas de las consideraciones tenidas en cuenta en la parametrización de la especie *Rhizophora*.

Las características morfológicas fueron obtenidas del trabajo realizado por Blanco *et al* (2012), en donde realizaron mediciones en 9 sitios de la región del golfo de Urabá y se muestrearon 23,690 árboles de la especie *Rhizophora*. Entre las variables que se caracterizaron se encuentran la altura del árbol y el diámetro a la altura del pecho.

Para su dimensionamiento se utilizaron los datos de Blanco *et al.* (2012) y la metodología propuesta por Ohira *et al.* (2013), la cual permite obtener las dimensiones de la estructura raizal de los manglares utilizando solo el valor del diámetro a la altura del pecho (figura 14).

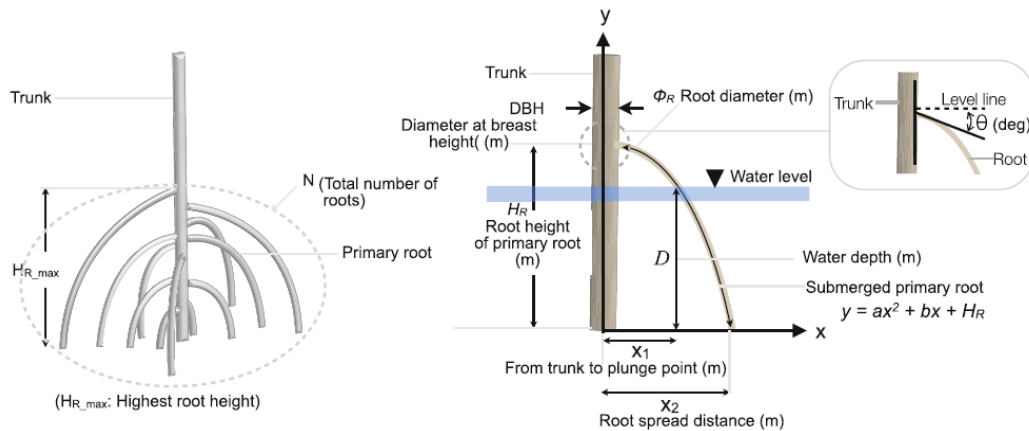


Figura 14. Esquema de la morfología de un árbol de a partir de la metodología planteada por Ohira *et al.* (2013)

Con el fin de tener mayor rigidez y un sistema más estable se consideró incluir las raíces secundarias a partir de la metodología de Järvelä (2004). Esta metodología permite estimar las dimensiones del sistema de ramas de la copa del modelo de un árbol.

Los modelos de mangle fueron construidos en acero inoxidable buscando conseguir una rigidez similar a la de *Rhizophora*. Este material, además, evitará procesos de oxidación teniendo en cuenta que estarían por mucho tiempo sumergidos. Se diseñaron plantillas para cada raíz en AutoCAD para realizar los dobleces a cada raíz (figura 15; Osorio *et al.*, 2018).

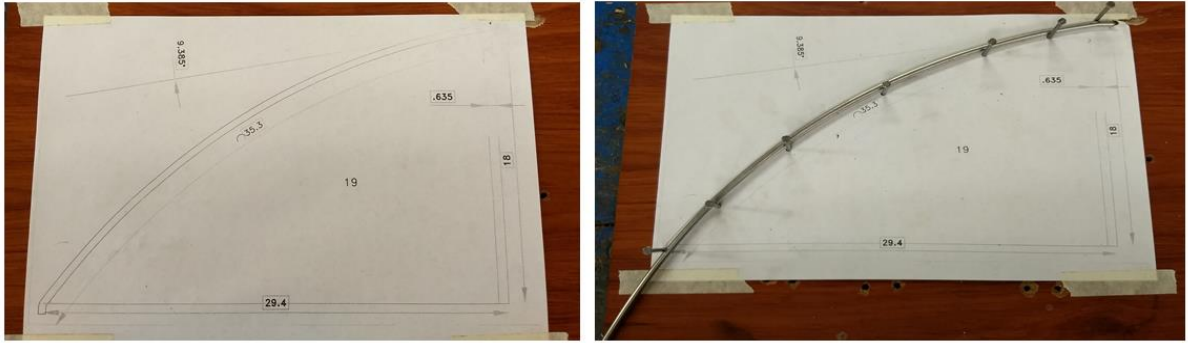


Figura 15. Plantilla de dobles para el diseño de la raíz del prototipo. Fuente: (Osorio et al., 2018).

Una vez terminado el diseño de las raíces, estas fueron soldadas al tallo principal obteniendo así el bosque para los experimentos (figura 16).



Figura 16. Prototipos finales de los manglares. Fuente: (Osorio et al., 2018).)

En este trabajo se realizaron tres escenarios:

- 1) Escenarios sin manglar: se realizan los 15 experimentos sin el bosque de manglar dispuesto en el canal de olas.
- 2) Escenario con manglar D1: Se realizan los experimentos ubicando los manglares en longitud de 5 m dentro del canal de olas.
- 3) Escenario con manglar D2: Se realizan los experimentos ubicando los manglares en una longitud de 4 metros dentro del canal de olas.

Las distribuciones D1 y D2 se realizan basadas en los estudios mostrados por Blanco *et al.*, (2012) e Ismail *et al.*, (2012), con el fin de observar si la D2 disipaba mayor energía por tener el bosque más denso, en relación con la D1. Las distribuciones se ilustran en las figuras 17 y 18.

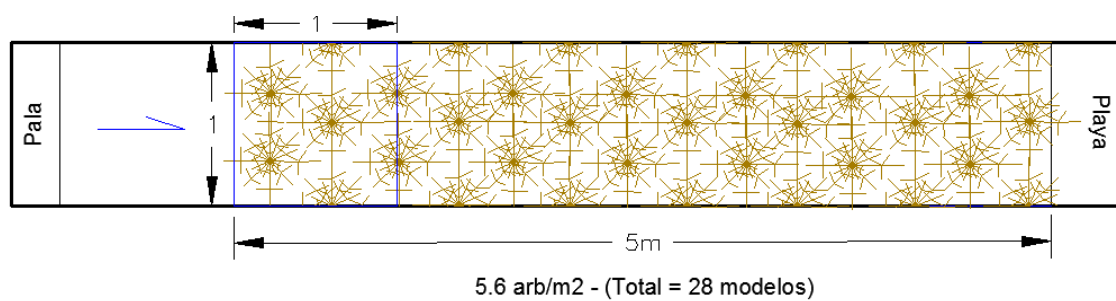


Figura 17. Distribuciones del bosque de mangle para la densidad 1. Fuente: Osorio *et al.* (2016).

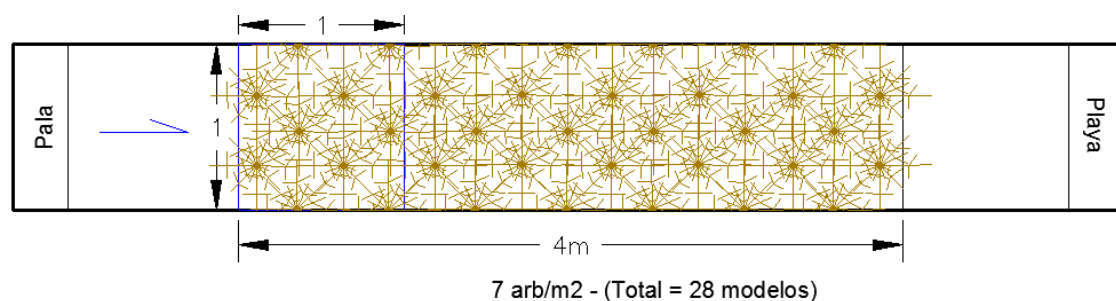


Figura 18. Distribuciones del bosque de mangle para la densidad 2. Fuente: Osorio *et al.* (2016)

5.4 Selección escenarios

De acuerdo a los resultados obtenidos en las tablas 1 y 2, en donde ya tiene escalados los valores de H_s y T_p , se realizó una combinación de estos valores. De esta manera se propusieron los experimentos con variaciones en la profundidad, H_s y T_p .

Se tuvieron en cuenta tres profundidades para simular condiciones someras, intermedias y profundas. Respecto a H_s y T_p se seleccionaron los valores que hacían referencia a condiciones normales y extremas del oleaje. Los casos propuestos se observan en la tabla 4.

Tabla 4. Casos propuestos para los experimentos con los tres escenarios: sin manglar, con manglar densidad 1 y densidad 2.

CASOS	ALTURA OLA H(M)	PERIODO (S)	PROFUNDIDAD H(M)
C1	0.07	1.18	0.49
C2	0.07	1.80	0.49
C3	0.10	2.00	0.49
C4	0.13	2.00	0.49
C5	0.16	2.20	0.49
C6	0.07	1.18	0.53
C7	0.07	1.80	0.53
C8	0.10	2.00	0.53
C9	0.13	2.00	0.53
C10	0.16	2.20	0.53
C11	0.07	1.18	0.57
C12	0.07	1.80	0.57
C13	0.10	2.00	0.57
C14	0.13	2.00	0.57
C15	0.16	2.20	0.57

El procesamiento de los datos se realizó mediante los lenguajes de programación Python y Matlab, los cuales permitieron tener representaciones gráficas de series de tiempo y espectros en función de la frecuencia para los experimentos realizados.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Series de tiempo libre

En primero lugar se analizaron las series de tiempo de variación del nivel de los datos en bruto en los sensores ubicados antes y después del bosque S2 y S7, respectivamente. En la figura 19 se observa en azul S2 y en rojo S7 en función del tiempo. Las series se hicieron bajo los mismos regímenes de altura y periodo de ola ($H=0.07$ m $T=1.58$ seg), pero cambiando las profundidades de 0.43 m, 0,53 m y 0.57 m respectivamente. Esto se hizo para analizar de manera preliminar el comportamiento de las olas en el canal.

En esta primera aproximación se observa como la profundidad modula las variaciones del canal. Para 0.43m, 0,53 m y 0.57 m, los niveles promedio para S2 son -0.03 m, -0.02 y 0.02 respectivamente. De igual manera, los niveles promedio para S7 es en promedio -0.02 m para los tres casos. Es de notar que en este caso los valores negativos de la variación del nivel se deben a que por ser una onda monocromática presenta un seno y un valle y cuando la superficie libre está en el seno de la onda se presentan estos valores.

En el caso primero y último caso (0.43m y 0.57 m) se observa como las alturas de ola son mayores antes de atravesar el bosque y disminuyen tras el paso de este. Caso contrario se presentó para la profundidad intermedia (0,53 m), lo cual probablemente se debe a la configuración del canal.

6.2 Alturas de olas

Los datos para obtener las alturas de olas se procesaron mediante el lenguaje computacional Python. El código proporcionado por el personal de la UNAL y modificado por la autora de este trabajo. A continuación se presentan 5 casos considerados los más representativos :

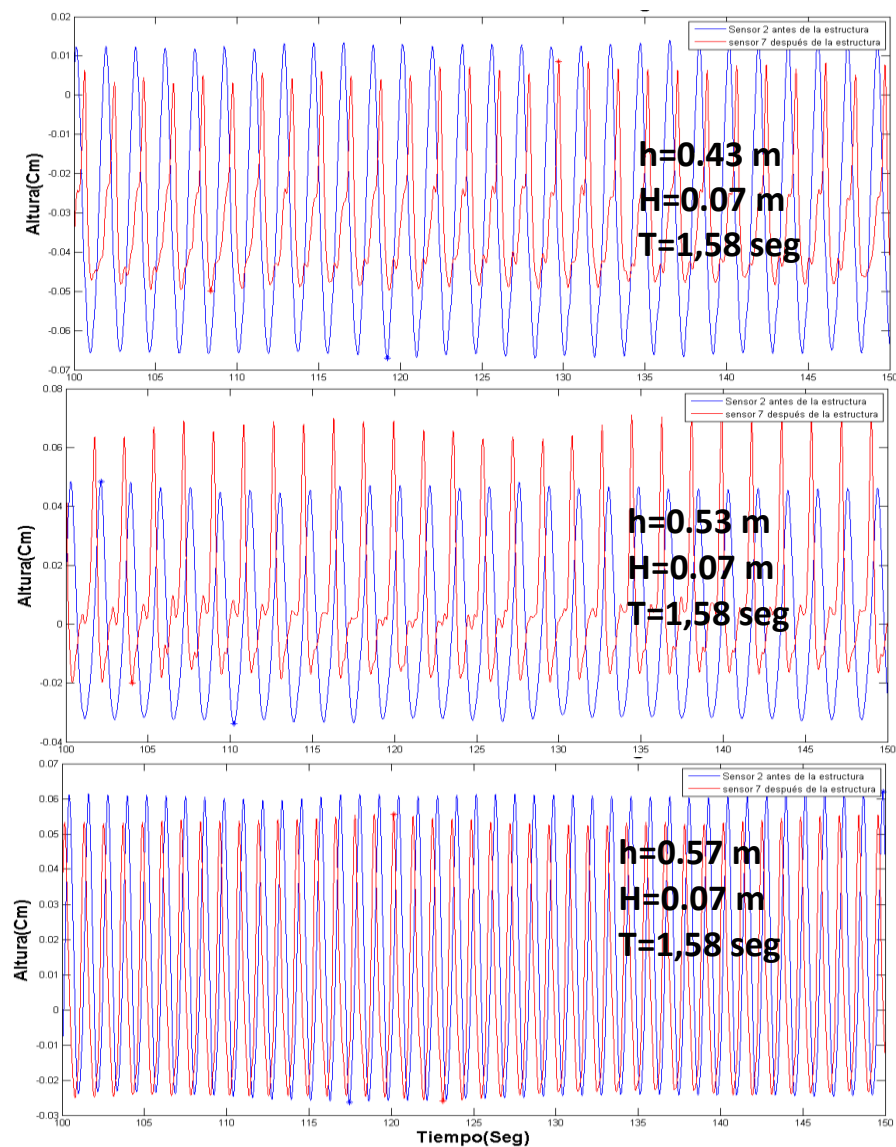


Figura 19. Series de tiempo altura(cm) vs tiempo(seg) para la densidad 1 como primera aproximación de visualización de los datos en bruto. En azul el sensor S2 antes del bosque, en rojo el sensor S7 luego de atravesar el bosque.

Caso 1

Las condiciones de este caso fueron $h=0.43$ m (somera), altura de ola de 0.07 m y periodo de 1.2 seg. En el primer escenario, en amarillo aparece el caso sin manglar, en púrpura el caso con la densidad 1 (D1) y en rojo el caso con la densidad 2 (D2; figura 20). En los primeros escenarios se observa un comportamiento similar hasta aproximadamente 13 metros del canal, mientras que H_s

para el caso 3 disminuye 0.03m. A partir de los 14 m, se observan cambios significativos en los tres casos. Mientras que el caso en el escenario 1 H_s varia, en promedio su valor es similar al de los 14m. Para los escenarios 2 y 3 se observa una disminucion similar de 0.075 m en el último sensor (S8). Es de notar que para el escenario 2 la disminucion es lineal, mientras que para el escenario 3 la disminucion es variable.

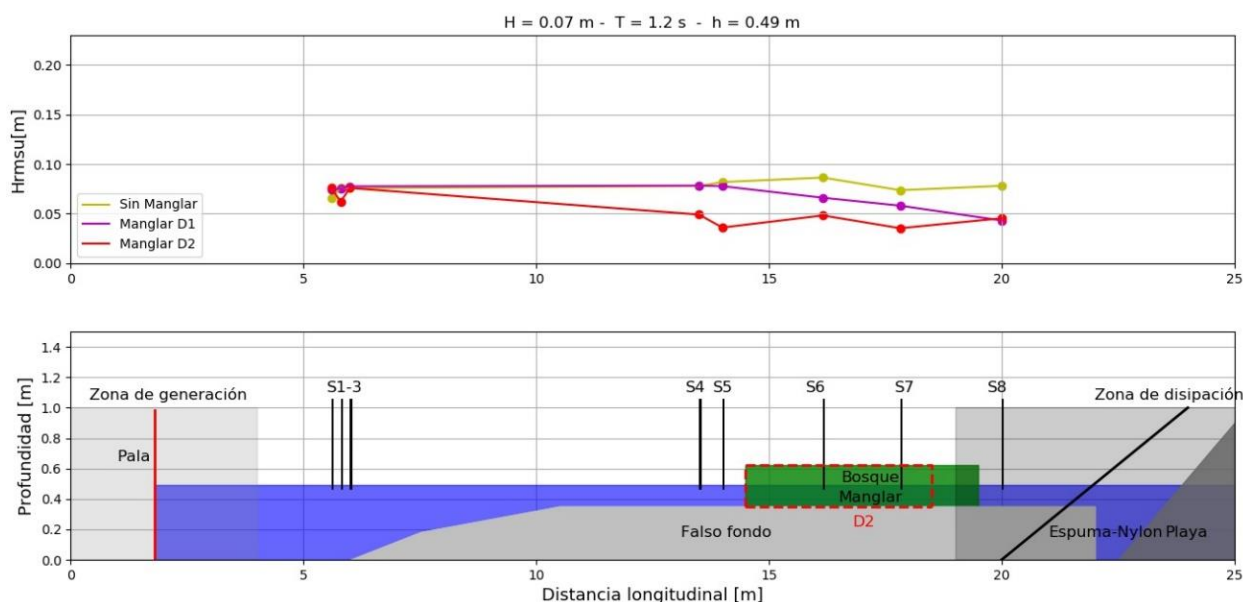


Figura 20. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 1, condiciones: $H=0.07m$ $T=1.2seg$ $h=0.49m$

Caso 4

Las condiciones de este caso fueron $h= 0.49$ m, altura de ola de 0.13 m y un periodo de 2.0 seg (figura 21). Este caso se registraron alturas máximas en S1 de 0,17 m sin manglar, 0,14 m en D1 y 0,05 m en D2. En S6 (dentro del bosque de manglar) se observan una disminucion de H_s con valores de 0,04 m sin manglar, 0,03 m en D1 y 0,02 m en D2. Al inicio los tres escenarios registraron valores promedio de H_s de 0.15 m, con disminuciones significativas en S8, con valores de H_s para D1 y D2 de 0.04 m. Estos resultados muestran una diferencia importante en los valores de H_s entre experimentos sin manglar y D1 y D2. La diferencia de H_s entre D2 y

D1/sin manglar en S2, no tiene nada que ver con la configuración del bosque de manglar, sino a posibles perturbaciones en el canal o mala calibración de este instrumento al momento de realizar el experimento.

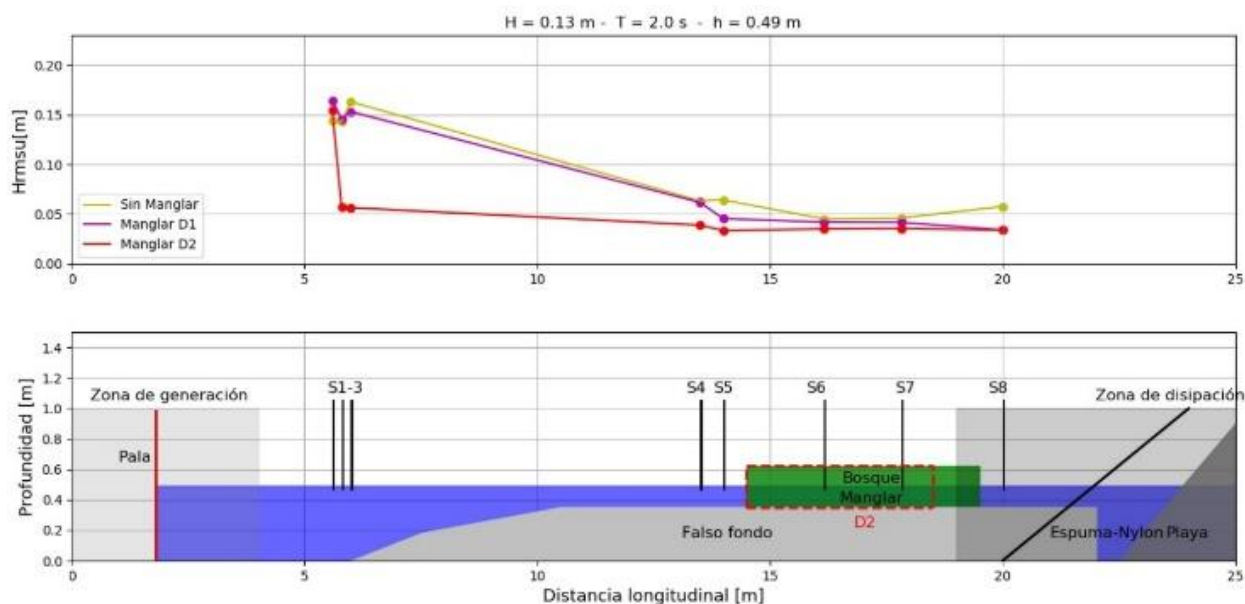


Figura 21. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 4, condiciones: $H=0.13m$ $T=2.0seg$ $h=0.49m$

Caso 6

Las condiciones de este caso fueron $h= 0,53$ m, altura de ola de $0,07$ m y un periodo de $1,2$ seg (figura 22). Este caso mostró un comportamiento similar a los casos anteriores. Se observa como en los tres escenarios H_s fue $0,075$ m en S4. Sin embargo, luego H_s disminuyen desde el S6, en donde para el caso sin manglar D1 y D2 se presentaron los valores más bajos en el canal de $0,08$ m, $0,05$ m y $0,05$ respectivamente.

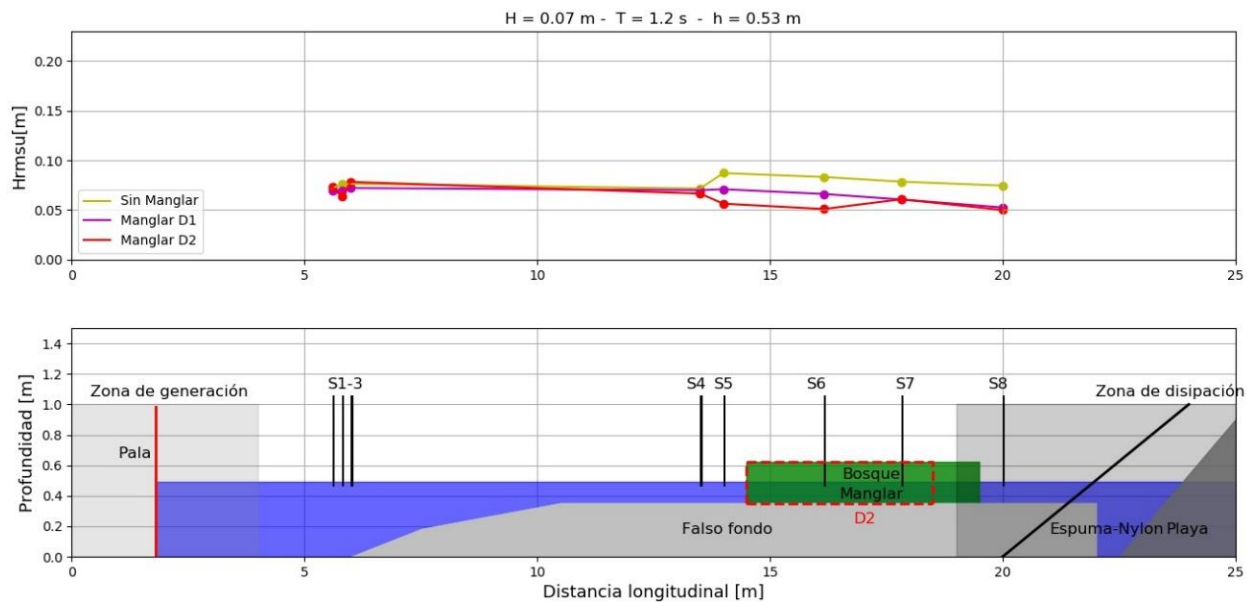


Figura 22. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 6, condiciones: $H=0.07m$ $T=1.2seg$ $h=0.53m$

Caso 7

Las condiciones de este caso fueron $h= 0.49$ m (condición somera), altura de ola de $0,07$ m y un periodo de $1,8$ seg (figura 23). Se observó que un patrón similar al de los casos anteriores, los escenarios sin manglar y D1 alcanzaron valores de H_s de 0.11 m, $0.08m$, respectivamente, siendo este último valor mas elevado comparado con los casos anteriores. De otro lado, D2 aunque presentó disminución en H_s entre S6 y S7) de 0.06 m, tuvo un pequeño aumento de $0,03$ m al final del experimento. Esto posiblemente se debe a la configuración del canal. Finalmente, se observó que la mayor diferencia en los valores de H_s se sigue presentando respecto a los escenarios sin manglar y D2, siendo para este caso de $0,04$ m.

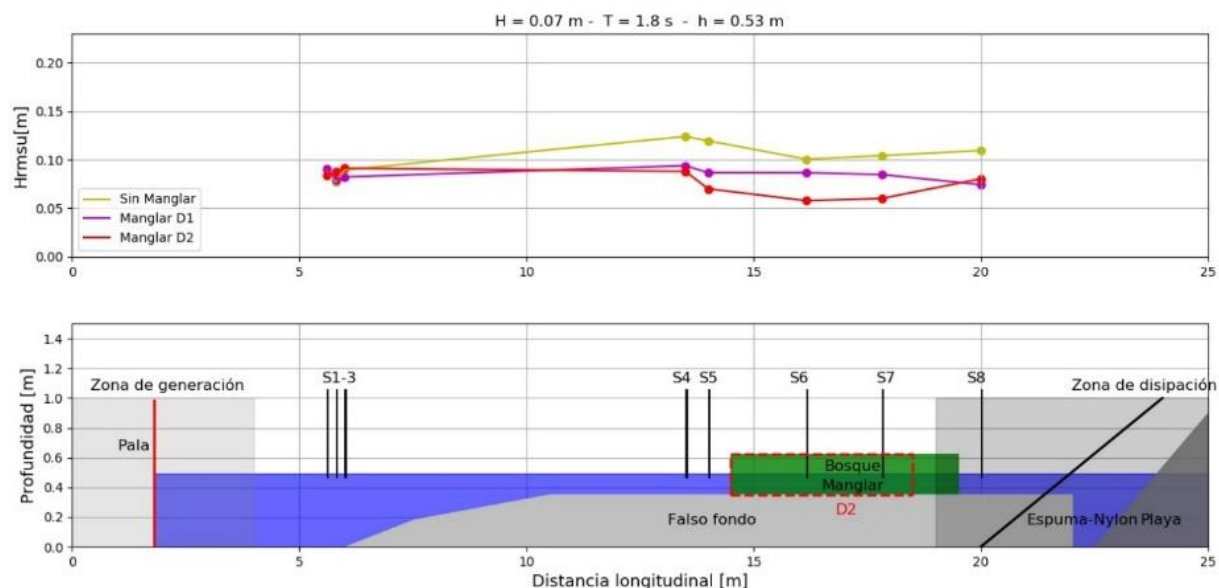


Figura 23. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 7, condiciones: $H=0.07m$ $T=1.8seg$ $h=0.53m$

Caso 13

Las condiciones de este caso fueron $h= 0.57$ m (condición somera), altura de ola de 0,10 m y un periodo de 2,0 seg (figura 24). Se encontró que las diferencias en H_s no eran tan significativas, ya que S7 registró valores de H_s para el caso sin manglar, D1 y D2 de 0,10 m, 0,09 m y 0,08 m. Los resultados sugieren una modulación de H_s cuando la onda pasa por el bosque de manglar, de manera particular para D2. Resaltamos de este caso que el sensor final (S8) registró los menores valores de H_s para D1 (0,05 m). Aunque el valor final de D2 es 0,06 m (diferencia de 0,01m), se esperaría que ocurriera lo de los casos anteriores.

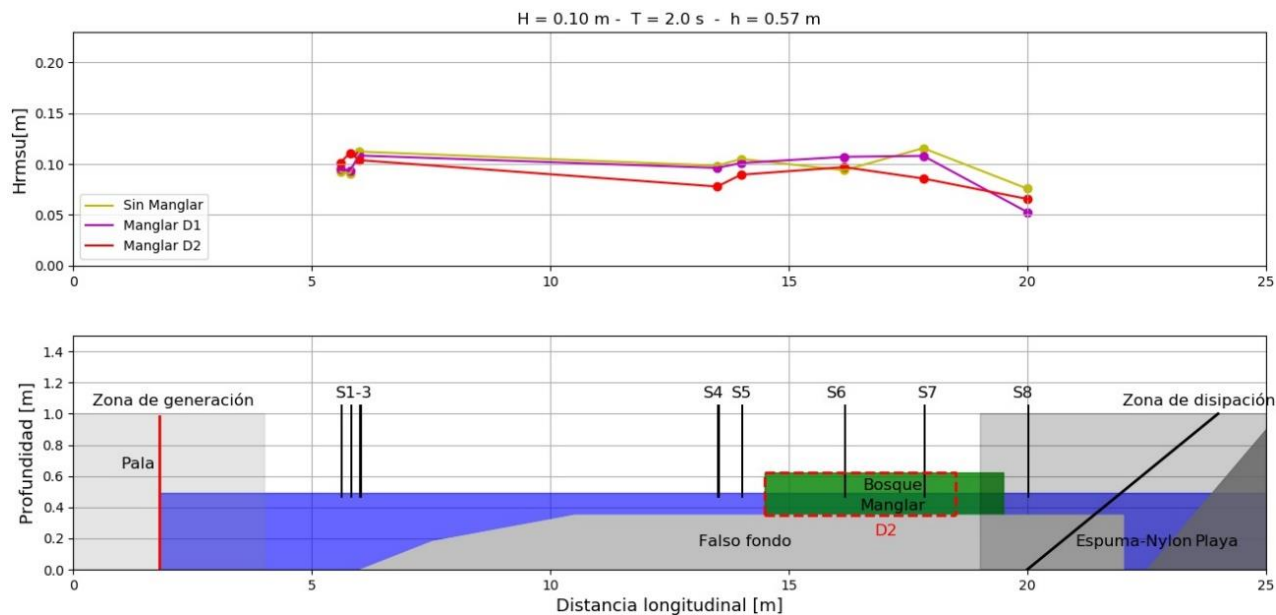


Figura 24. Variación a lo largo del canal de: (a) Altura significativa (H_s). (b) Disposición de instrumentos y zona de manglar. Caso 13, condiciones: $H=0.10m$ $T=2.0seg$ $h=0.57m$

En general, los resultados sugieren que los valores de H_s se modifican a lo largo del canal, presentando disminuciones promedio de 0,05 m, 0,04 m, y 0,03 m para los escenarios sin manglar, D1 y D2, respectivamente. El oleaje al pasar por el bosque de manglar, presenta comportamientos diferentes para D1 y D2. Mientras que para D1 las variaciones promedio de H_s fueron de 0,05 m, para D2 fueron de 0,04 m. Estos resultados muestran como el establecimiento de un bosque de manglar con una densidad D2 es mucho más efectiva para disminuir el valor de H_s y por lo tanto la energía del oleaje.

6.3 Frecuencias asociadas al pico espectral (f_p)

Los resultados y discusiones presentados en este apartado solo se presentan para el caso 15 donde $h=0,57$ m, altura de ola de 0,16 m y un periodo de 2,2 seg. Los demás casos se presentan en los Anexos A1. Se muestra este caso debido a que presenta las condiciones más extremas de los experimentos que se realizaron, mayor altura de ola, profundidad y periodo respectivamente.

Además, es uno de los casos que presenta la mayor cantidad de frecuencias secundarias encontradas (3) como se observa en los recuadros rojos de la figura 25.

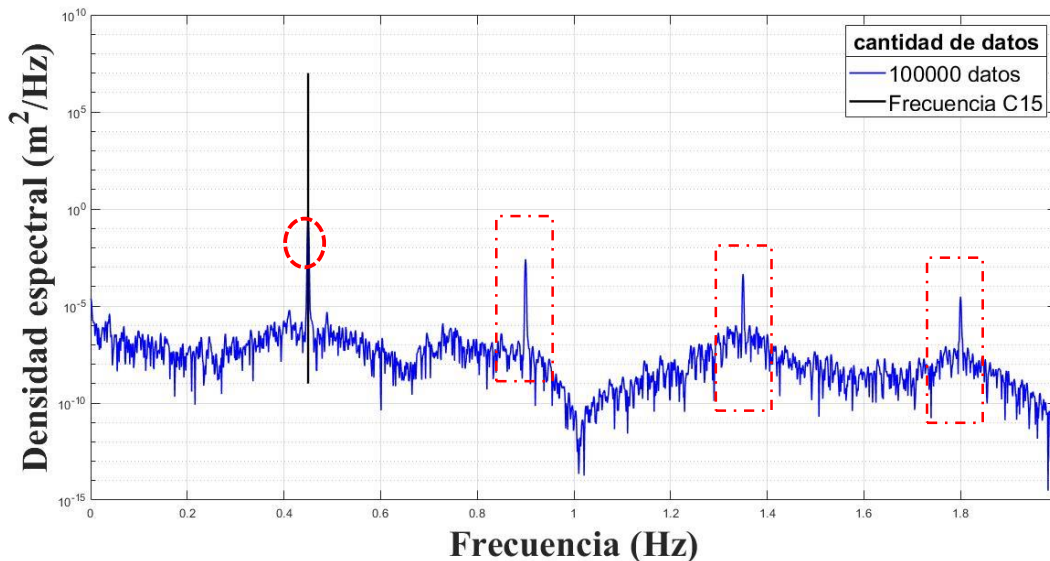


Figura 25. Frecuencias asociadas al pico espectral. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias analizadas. Caso 15, condiciones: $H=0.16m$ $f=0.85Hz$, $h=0.57m$

Se muestran los análisis de las frecuencias para el escenario D1, aunque al final de presentará la comparación de los tres escenarios (sin manglar, D1 y D2). Inicialmente se analizaron los registros del sensor (S1) asociado al caso 6. Se escogió S1 ya que se esperaba obtener que la frecuencia asociada al máximo pico energético era similar a la frecuencia del oleaje generada por la pala. Es necesario recordar que la frecuencia a la que median estos sensores era de 100 Hz. Por lo tanto, en un periodo de medición de 15 minutos (tiempo promedio de cada uno de los experimentos) se tenía un total de 150000 datos.

Con el fin de escoger el número de datos mínimo para analizar la variación de la energía en función de la frecuencia, se analizaron los primeros 1000 datos de registro y se calculó el espectro en frecuencia. Esto se hizo de manera consecutiva tomando datos 1000 datos más y calculando los

espectros hasta completar los 150.000 datos. En la figura 28, se presentan los espectros de energía en función de la frecuencia para 1000, 10000, 50000 y 100000 datos.

Para este caso en particular, se observa en primer lugar que la frecuencia asociada al máximo pico de energía (f_p) (0,84 Hz) es similar a la frecuencia generada por la pala (0,85 Hz). Este primer resultado sugiere la validez de estos resultados.

De otro lado, se observa en los recuadros rojos un intervalo de frecuencias secundarias entre 1,6 Hz y 1,8 Hz (diferente a la frecuencia asociada al pico espectral) que aparece desde los 1000 datos (6 seg), es decir desde el inicio de las mediciones de oleaje. Las gráficas generadas para otros sensores (Anexo A2) para este caso específico muestra la presencia de estas frecuencias.

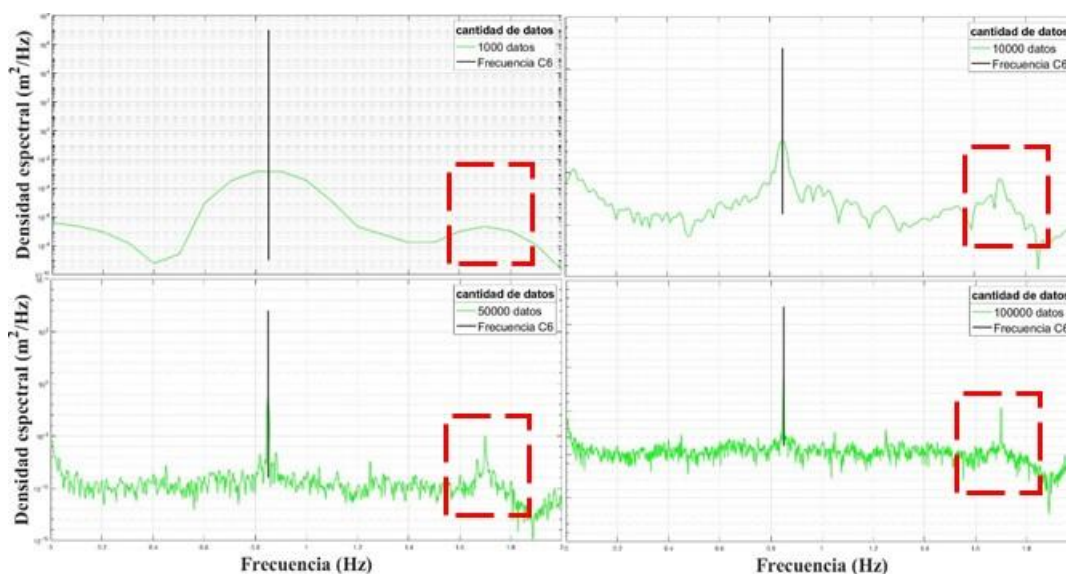


Figura 26. Caso 6 para escenario D1. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias secundarias analizadas. Análisis para (a) 100 datos; (b) 1000 datos; (c) 10000 dat

Siguiendo esta metodología fueron analizados todos los casos mencionados en la Tabla 5. Algunos de los gráficos de los demás casos se pueden observar en los Anexos A3. Algunos de estos casos

presentaron dos intervalos de frecuencias secundarias. A manera de ejemplo se presenta el caso 9 (figura 27).

Al igual que el caso anterior, el valor de la f_p (0,49 Hz) coincide con el valor de la frecuencia generada por la pala (0,50 Hz). De igual manera se observa como desde el inicio del experimento (1000 datos ó 6 seg), se observan los dos picos secundarios, muchos más notorios con más datos.

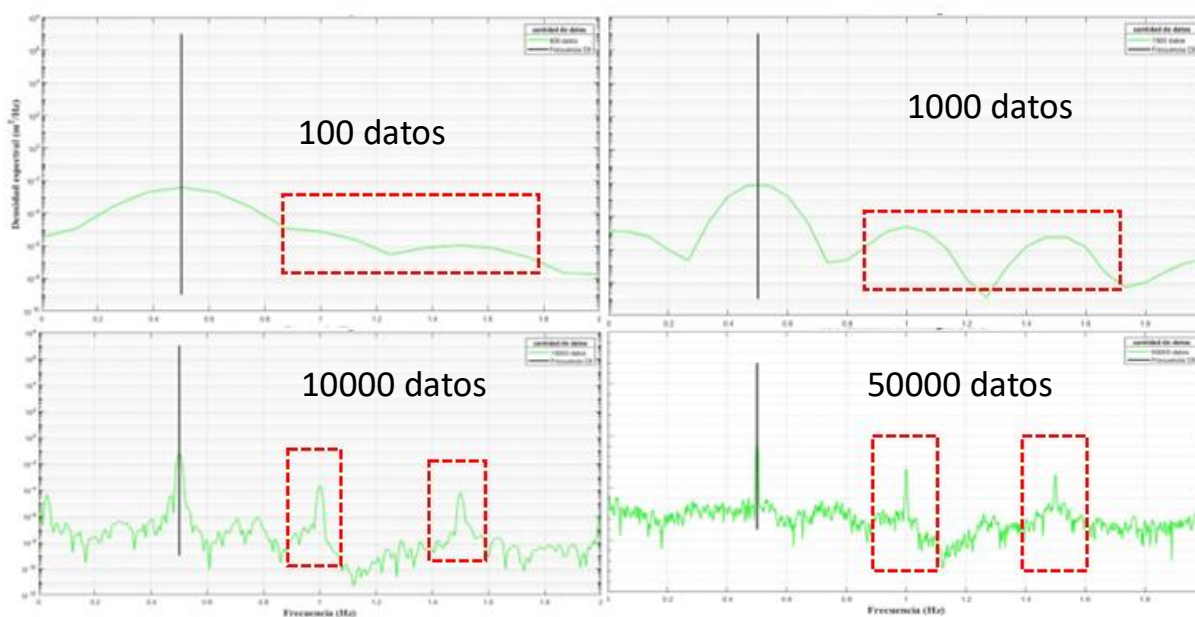


Figura 27. Caso 9 para el escenario D1. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias secundarias analizadas. Análisis para (a) 100 datos; (b) 1000 datos; (c) 10000

Los resultados obtenidos permitieron definir que para esta variable era suficiente el análisis de 10000 datos. Esto ya que a partir de este valor no se encontró una diferencia significativa en los gráficos de frecuencias.

En la Tabla 5, se presentan los valores de f_p (similares a los de la pala) y los valores de las frecuencias secundarias, identificadas como 1, 2 y 3 (ubicación de izquierda a derecha).

Tabla 5. Valores de las frecuencias encontradas para los diferentes experimentos en función de la frecuencia del caso.

CASO	FRECUENCIA ASOCIADA AL PICO ESPECTRAL (PALA) (HZ)	1° FRECUENCIA SECUNDARIA (HZ)	2° FRECUENCIA SECUNDARIA (HZ)	3° FRECUENCIA SECUNDARIA (HZ)
1	0,85	1,70		
2	0,55	1,10	1,65	
3	0,50	1,00	1,50	
4	0,50	1,00	1,50	
5	0,45	0,90	1,35	1,80
6	0,85	1,70		
7	0,55	1,10	1,65	
8	0,50	1,00	1,50	
9	0,50	1,00	1,50	
10	0,45	0,90	1,35	1,80
11	0,85	1,70		
12	0,55	1,10	1,65	
13	0,50	1,00	1,50	
14	0,50	1,00	1,50	
15	0,45	0,90	1,35	1,80

A continuación, se analizan los casos 13, 3 y 8 los cuales se muestran por presentar características diferentes. Los demás casos se pueden consultar en el Anexo A4. Los casos mencionados tienen la misma frecuencia, misma altura de ola, pero diferente profundidad, esto con el fin de observar si existía algún tipo de influencia en la variación de la columna de agua respecto a la frecuencia.

En la figura 28 se observa el espectro de frecuencia para el caso 13 y en él se muestran las mediciones de los 8 sensores instalados en el canal de oleaje. La línea vertical negra hace referencia a la frecuencia con la que se realizó el caso (0,50 Hz). Se observa como en general las series de frecuencias tienen el mismo comportamiento. Se evidencia pequeños cambios de energía de $10^{-5} \frac{m^2}{Hz}$ entre 1 Hz y 1.5 Hz, este patrón se repite cada 0.5 Hz. Se observa como en los

primeros sensores la energía llega hasta $10^{-12} \frac{m^2}{Hz}$ que comparada con S8 que tiene un valor cercano a $10^{-2} \frac{m^2}{Hz}$. Esto es un posible indicador que si existe una disminución en la energía y que esta podría estar pasando de bajas a altas frecuencias. Sin embargo, es necesario recordar que la escala del eje Y es logarítmica y que por lo tanto estas diferencias podrían ser no significativas.

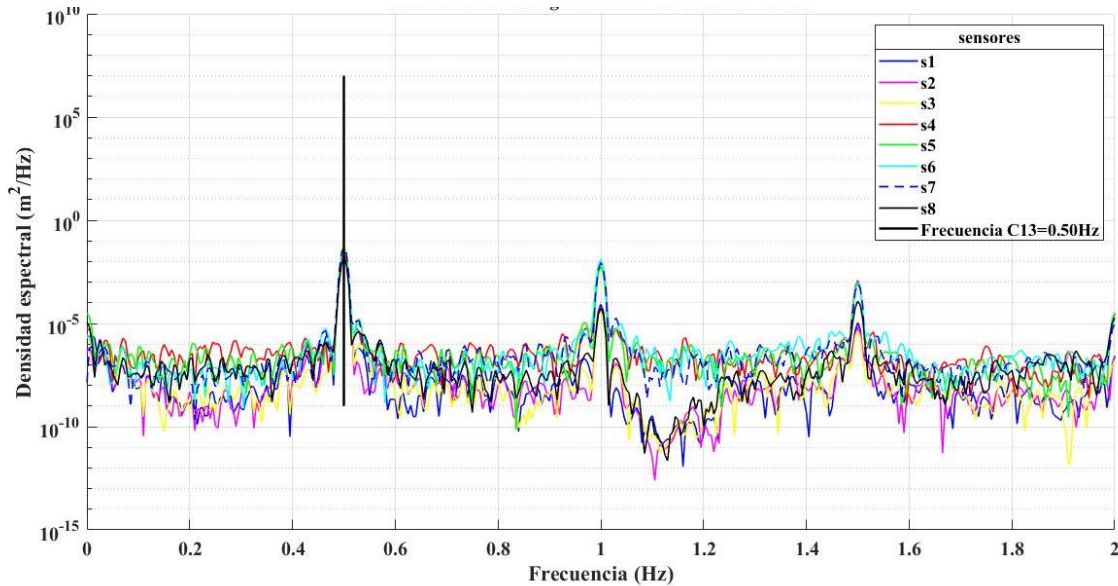


Figura 28. Espectro en frecuencia para todos los ocho sensores. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 13: $H=0.10m$ $h=0.57m$.

Con el fin de analizar las diferencias de los escenarios sin manglar, D1 y D2, se muestran los espectros en función de las frecuencias para los casos 3 y 8 en S6. Los picos asociados a las frecuencias secundarias se presentan en los tres escenarios (figuras 29 y 30). Para el caso 8 se observa que en los tres escenarios tienen una frecuencia secundaria similar cercana a 1,0 Hz y 1,5 Hz, y no presenta una variación significativa de la energía entre los tres escenarios (figura 29).

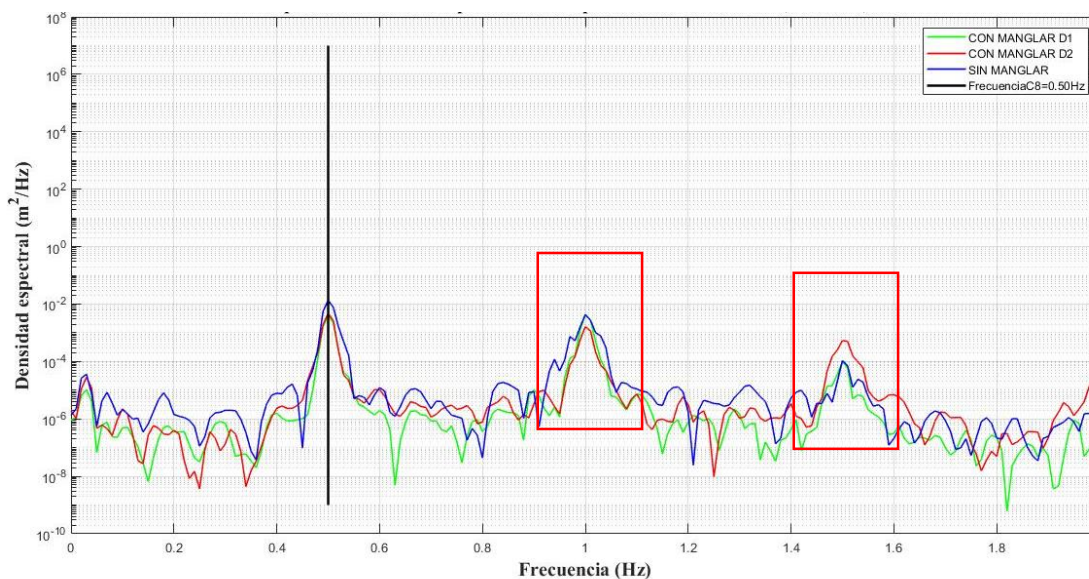


Figura 29. Representación del Espectro en frecuencia para el caso 8 $H=0.10m$ $f=0.50$ Hz $h=0.53m$ de los 3 experimentos propuestos, el recuadro rojo representa la frecuencia en resonancia encontrada en los 3 escenarios.

Para el caso 3 (figura 30), similar al caso 8, se presentan dos frecuencias secundarias con valores significativos de energía. Igual que en el caso anterior, no se observa una diferencia representativa entre la energía de los 3 casos que se propagaron.

Los resultados muestran que sin importar los escenarios (sin manglar, D1 y D2), los valores de las frecuencias secundarias y sus energías asociadas no se modifican. Por lo tanto, los resultados sugieren que estas frecuencias probablemente son producto de la configuración del canal de olas y que no se deben a la presencia del bosque de manglar. Suponemos que estas frecuencias secundarias son armónicos de la frecuencia principal y que podría estar asociadas a la resonancia del canal.

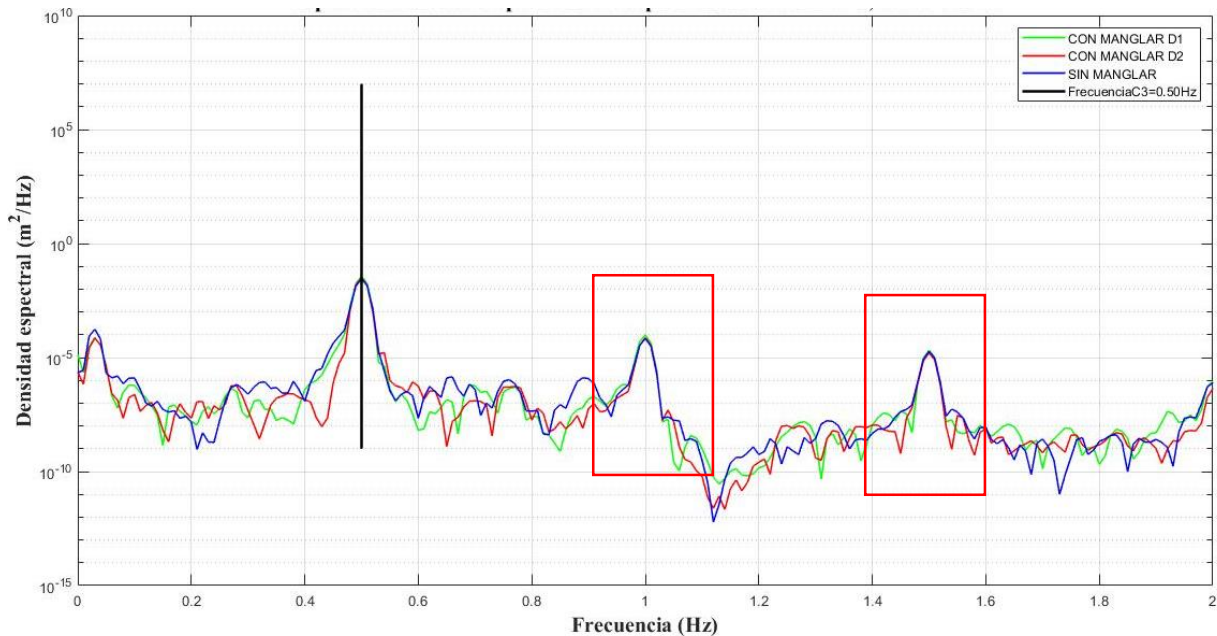


Figura 30. Representación del Espectro en frecuencia para el caso 3 $H=0.10m$ $f=0.50$ Hz $h=0.49m$ de los 3 experimentos propuestos, el recuadro rojo representa la frecuencia en resonancia encontrada en los 3 escenarios.

Con el fin de realizar análisis detallados de la modulación de la fp asociada a los escenarios planteados, probablemente es necesario realizarlo en canales de olas de mayor longitud o en canales con un ancho mayor. Sin embargo, es de notar que los resultados obtenidos dan pistas de la modificación de la fp que podrían evidenciar el traspaso de energía de las bajas a las altas frecuencias.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, la altura de ola se presentó una mayor disminución para los casos someros que para los casos profundos, al parecer la profundidad inicial tiene influencia definitiva en la disminución de la energía. Además de esto se observó que los casos con olas más pequeñas mostraron alturas de olas más bajas con valores entre 0,04m y 0,05m y no generaron cambios abruptos. Esta disipación de energía o disminución de la altura de oleaje, puede ser producto de una mayor interacción entre las olas y las raíces del manglar, ya que a profundidades intermedias y profundas se presentaba interacción con el tallo del árbol y debido a la poca fricción que hay por el material, podía generar un pequeño aumento de las olas.

En términos de la frecuencia asociada al pico espectral, se encontró que independiente del caso y escenario estudiado, se pudo obtuvo un valor cercano al generado por la pala. Sin embargo, se observaron frecuencias secundarias que van desde 1 hasta 3 intervalos. Se pudo determinar que el número de frecuencias secundarias que aparecen están en función de la frecuencia con la que se realiza el experimento.

En cada caso analizado las frecuencias secundarias que se observaron, presentaron intervalos similares y valores de energía muy cercanos entre sí. Esto sugiere que estas frecuencias secundarias no necesariamente están asociadas a la presencia del bosque de manglar y podrían estar relacionada con el canal.

Al parecer, las dimensiones y accesorios podrían tener una influencia en el estudio de la frecuencia asociada al pico espectral. Es posible que debido a esto no se haya podido detectar si la energía de las olas se transporta de frecuencias más altas o bajas ya que podrían estar enmascaradas por las frecuencias secundarias. Suponemos que estas frecuencias, encontradas en todos los casos, podrían estar asociadas a procesos de resonancia en el canal de olas de la universidad Nacional.

8. RECOMENDACIONES

Sugerimos utilizar otros métodos matemáticos como el cálculo de co-espectros con el fin de analizar si allí, se enmascaran o no la posible modificación a la frecuencia asociada al pico espectral (f_p).

Se sugiere realizar experimentos similares con el fin de estudiar el comportamiento de la f_p en canal de olas de mayor amplitud o en una piscina. Esto con el fin de evitar que las paredes del canal (piscina) puedan influir en los resultados.

9. REFERENCIAS

- Bao, T. Q. (2011). Effect of mangrove forest structures on wave attenuation in coastal Vietnam. *Oceanologia*, 53(3), 807-818.
- Blanco, J. F. (2016). Cambios globales en los manglares del golfo de Urabá (Colombia): entre la cambiante línea costera y la frontera agropecuaria en expansión. *Actualidades Biológicas*, 18. Obtenido de [http://matematicas.udea.edu.co/~actubiol/actualidadesbiologicas/6MssRAB38\(104\)2016.pdf](http://matematicas.udea.edu.co/~actubiol/actualidadesbiologicas/6MssRAB38(104)2016.pdf)
- Blanco, J. F., Estrada, E. A., Ortiz, L. F., & Urrego, L. E. (2012). Ecosystem-wide impacts of deforestation in mangroves: The Urabá Gulf (Colombian Caribbean) case study. *ISRN Ecology*, 2012.
- Brinkman, R. M., S. R. Massel, P. V. Ridd, and K. Furukawa. 1997. Surface wave attenuation in mangrove forests. *Proceedings of the 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference 2*: 941–79.
- Burguer, B., Wave attenuation in mangrove forests M.Sc. Thesis., Faculty of Civil Engineering and Geosciences., Section of Hydraulic Engineering
- Cid Solé, J. 2004. “Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esqu”: 6–9.
- Correa, I D Vernet G 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes Turbo) costa caribe colombiana *Bol Invest Mar Cost*

- Dahdouh-Guebas, F., Jayatissa, LP, Di Nitto, D., Bosire, JO, Seen, DL y Koedam, N. (2005). ¿Cuán efectivos fueron los manglares como defensa contra el reciente tsunami? *Biología actual*, 15 (12), R443-R447.
- Dalrymple, RA, Kirby, JT y Hwang, PA (1984). Difracción de onda debido a áreas de disipación de energía. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 110 (1), 67-79.
- Duke, C. 1992. Coastal and Estuarine studies: Tropical Mangrove Ecosystems, American
- Estrada-Urrea EA. 2014. Pérdida y fragmentación de los manglares asociada a factores antrópicos y naturales en el golfo de Urabá. [Tesis Maestría en Biología]. [Medellín]: Universidad de Antioquia. p. 81.
- Fisher JB. 1982. A survey of buttresses and aerial roots of tropical trees for presence of reaction wood. *Biotropica* 14: 56–61.
- Gill AM, Tomlinson PB. 1969. Studies on the growth of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) 1. Habit and general morphology. *Biotropica* 1: 1–9.
- Gill AM, Tomlinson PB. 1971. Studies on the growth of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) 2. Growth and differentiation of aerial roots. *Biotropica* 3: 63–77.
- Gill AM, Tomlinson PB. 1977. Studies on the growth of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) 4. The adult root system. *Biotropica* 9:145–155
- Hashim, A. M., & Catherine, S. M. P. (2013). Effectiveness of mangrove forests in surface wave attenuation: a review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(18), 4483-4488.
- Holthuijsen, L.H., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge. ed.

- Husrin, S., Strusinska, A., Oumeraci, H., 2012. Global and local processes of Tsunamic attenuation by mangrove forests-laboratory test results. In: 8th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, IIT Madras, Chennai, INDIA, p. 12.
- Ismail, H., Abd Wahab, A.K., Alias, N.E., 2012. Determination of mangrove forest performance in reducing tsunami run-up using physical models. *Nat. Hazards* 63, 939–963. <https://doi.org/10.1007/S11069-012-0200-y>
- Järvelä, J., 2004. Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation. *Int. J. River Basin Manag.* 2, 61–70. <https://doi.org/10.1080/15715124.2004.9635222>
- Lugo AE, Medina E, McGinley K. 2014 Issues and challenges of mangrove conservation in the Anthropocene. *Madera y Bosques*, 20: 11-38.
- Massel, SR, Furukawa, K. y Brinkman, RM (1999). Propagación de ondas superficiales en manglares. *Investigación de dinámica de fluidos*, 24 (4), 219.
- Mazda, Y., Magi, M., Kogo, M. y Hong, PN (1997). Los manglares como protección costera de las olas en el delta de Tong King, Vietnam. *Manglares y marismas*, 1 (2), 127-135.
- McLeod, E. y Salm, RV (2006). *Gestión de manglares para la resiliencia al cambio climático*. Unión Mundial para la Naturaleza (UICN).
- Mendez-Alonzo, Rodrigo, et al. “Root Biomechanics in Rhizophora Mangle: Anatomy, Morphology and Ecology of Mangrove’s Flying Buttresses.” *Annals of Botany*, vol. 115, no. 5, 2015, pp. 833–840., doi:10.1093/aob/mcv002.
- Menezes, N. L. (2005). Rhizophores in Rhizophora mangle L: an alternative interpretation of so-called “aerial roots”. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 14.

Menezes NL. 2006. Rhizophores in *Rhizophora mangle* L: an alternative interpretation of so-called 'aerial roots'. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 78: 213–226.

Menezes NL. 2006. Rhizophores in *Rhizophora mangle* L: an alternative interpretation of so-called 'aerial roots'. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 78: 213–226.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). MINAMBIENTE. Recuperado el agosto de 2017, de MINAMBIENTE: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=412:plantilla-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos-14>

Ohira, W., Honda, K., Nagai, M., Ratanasuwana, A., 2013. Mangrove stilt root morphology modeling for estimating hydraulic drag in tsunami inundation simulation. *Trees* 27, 141–148. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0782-8>

Osorio, A.F., Montoya, R.D., Ortiz, J.C., Peláez, D., 2016. Construction of synthetic ocean wave series along the Colombian Caribbean Coast: A wave climate analysis. *Appl. Ocean Res.* 56, 119–131. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2016.01.004>

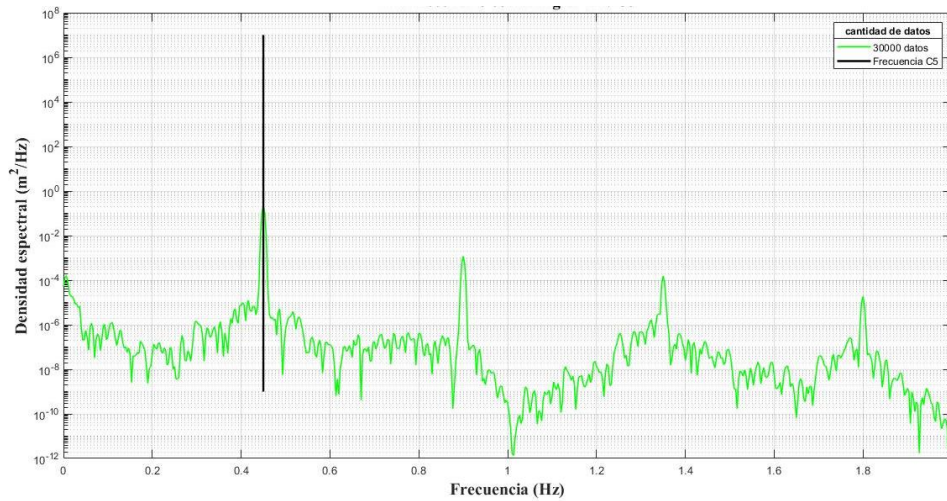
Osorio, J.D.; Osorio, A.F, Toro, M.F, Arredondo, M, Henao, C.A, Delgado, J.K, Piedrahita M.A. 2018. Informe avance presentado de acuerdo a las actividades realizadas en el mes de enero del año 2019 Recuperado de: componente de mediciones físicas y de laboratorio. Proyecto " Investigación para la reversión del proceso de erosión de las costas del mar de Antioquia"

Ouellet, Y., Datta, I., 1986. A survey of wave absorbers. *J. Hydraul. Res.* 24, 265–280. <https://doi.org/10.1080/00221688609499305>

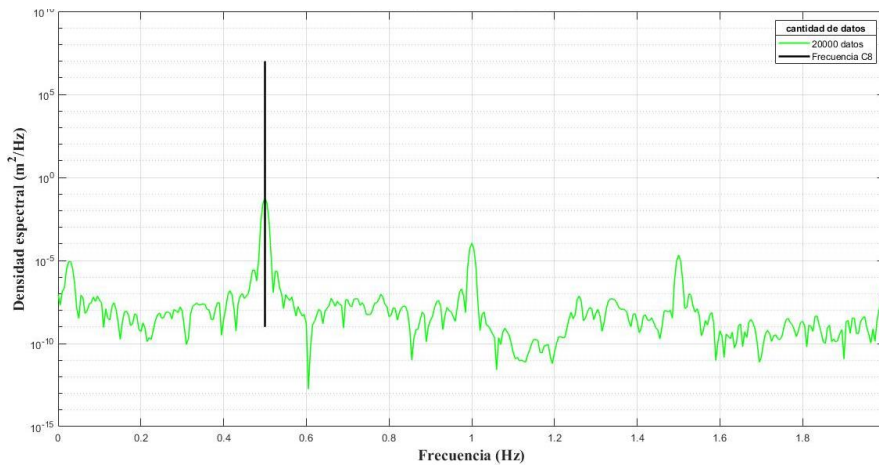
- Prahl, H. V., Cantera, J. R., & Contreras, R. (1990). Manglares y hombres del Pacífico colombiano (No. 333.91809861 P898). Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales (Colombia) Ministerio de Educación Nacional (Colombia).
- Roberto, J, Flores Z, y Fragoso L. 2008. “Transmisión del oleaje en rompeolas sumergidos permeables”. *Ingeniería hidráulica en México XXIII*: 161–72.
- Suastika, IK, Jong, MD, y Battjes, JA (2001). Estudio experimental del bloqueo de olas. En *Coastal Engineering 2000* (pp. 227-240). Urabá (sector Arboletes Turbo) costa caribe colombiana Bol Invest Mar Cost
- Van der Meer, J.W., Regeling, H.J., de Waal, J.P., 2000. Wave transmission: spectral changes and its effects on run up and overtopping. Proc 27th Int. Conf on Coastal Engineering, pp. 2156– 2168.
- Vanegas, C., 2015. Análisis del comportamiento hidráulico del Rhizophora Mangle frente a eventos medios del oleaje. Tesis Maest. - Univ. Nac. Colomb. - Sede Medellín 78
- Walpole, R, Raymond M, Sharon M, y Cruz R. 1999. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Prentice Hall.
- Walti, R. 2005. “La física del Tsunami. Ondas superficiales en el agua”. *Walti, Reinaldo* 18: 83–92.

10. ANEXO

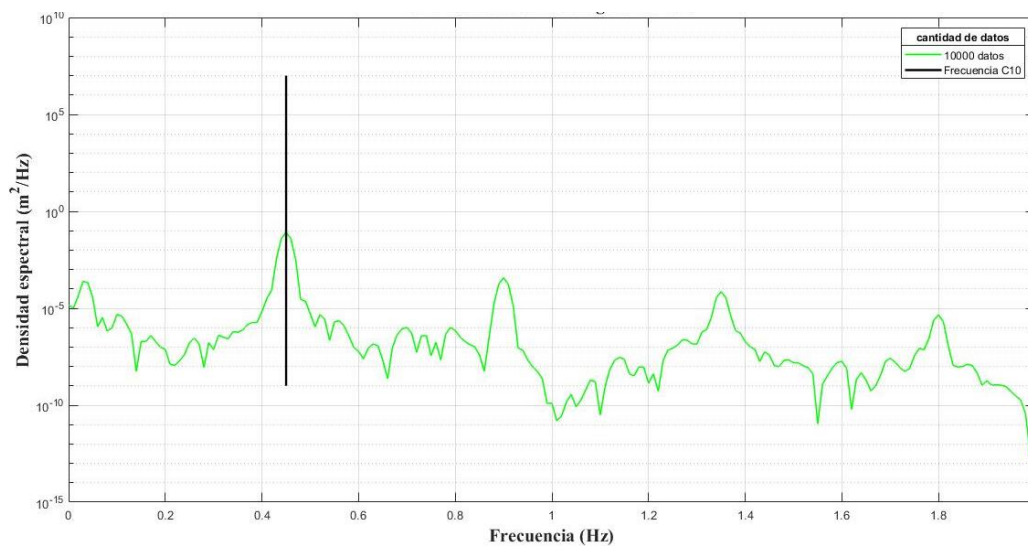
ANEXO A1



Anexo A1-1. Frecuencias asociadas al pico espectral. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 5, condiciones: $H=0.16\text{m}$ $f=0.45\text{Hz}$, $h=0.49\text{m}$

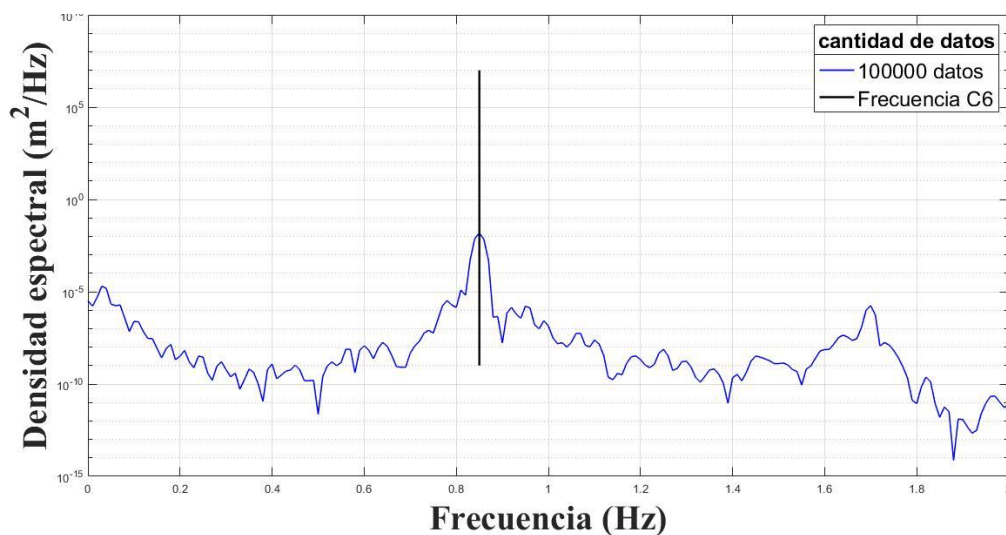


Anexo A1-2. Frecuencias asociadas al pico espectral. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 8, condiciones: $H=0.10\text{m}$ $f=0.50\text{Hz}$, $h=0.53\text{m}$



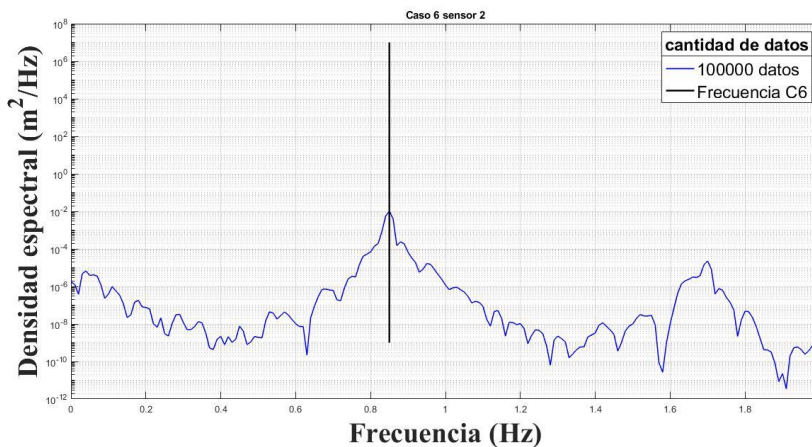
Anexo A1-3. Frecuencias asociadas al pico espectral. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 10, condiciones: $H=0.16\text{m}$ $f=0.45\text{Hz}$, $h=0.53\text{m}$

Anexo A2



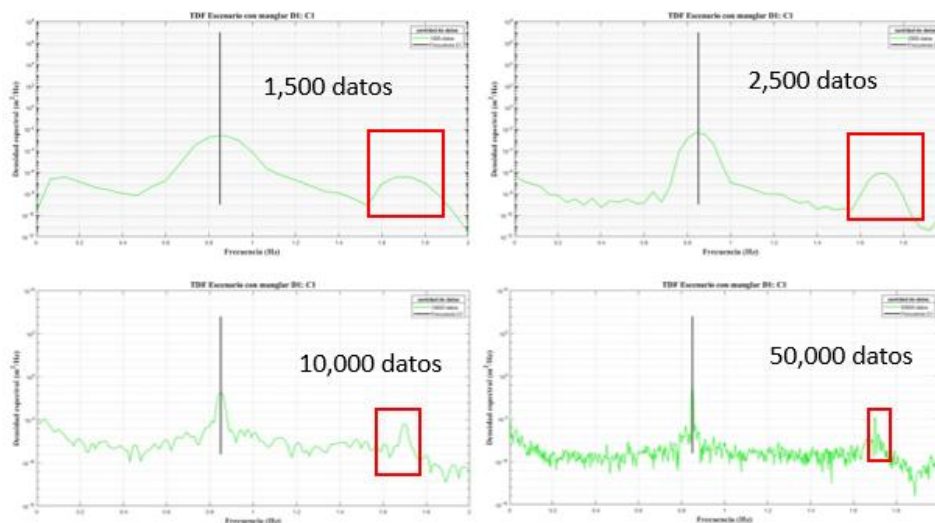
Anexo A2-1. Frecuencias asociadas al pico espectral. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 6, sensor 2, condiciones: $H=0.07\text{m}$

$f=0.85\text{Hz}$, $h=0.53\text{m}$.



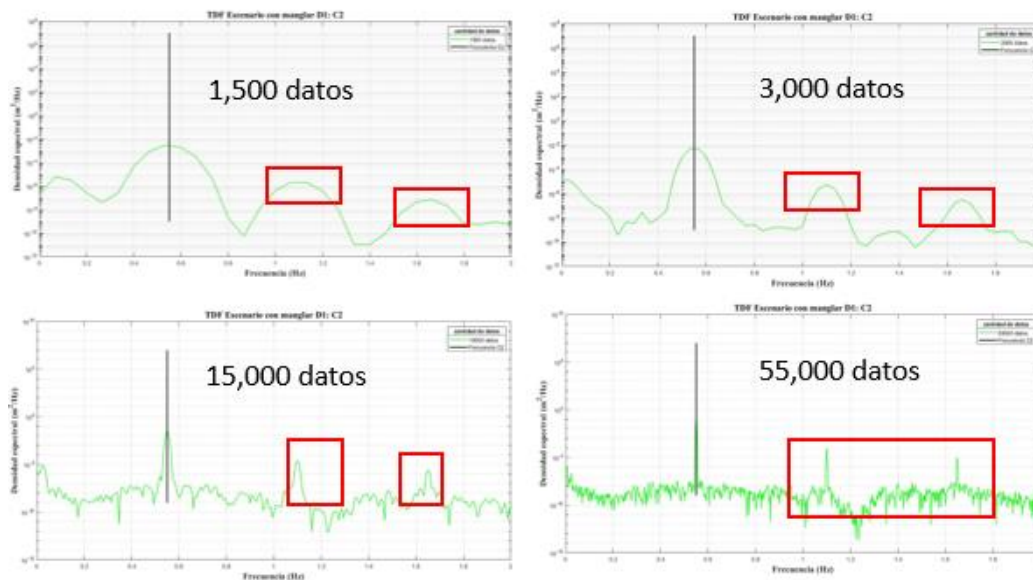
Anexo A2-2. Frecuencias asociadas al pico espectral. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 6, sensor 6, condiciones: $H=0.07\text{m}$ $f=0.85\text{Hz}$, $h=0.53\text{m}$

Anexo A3.



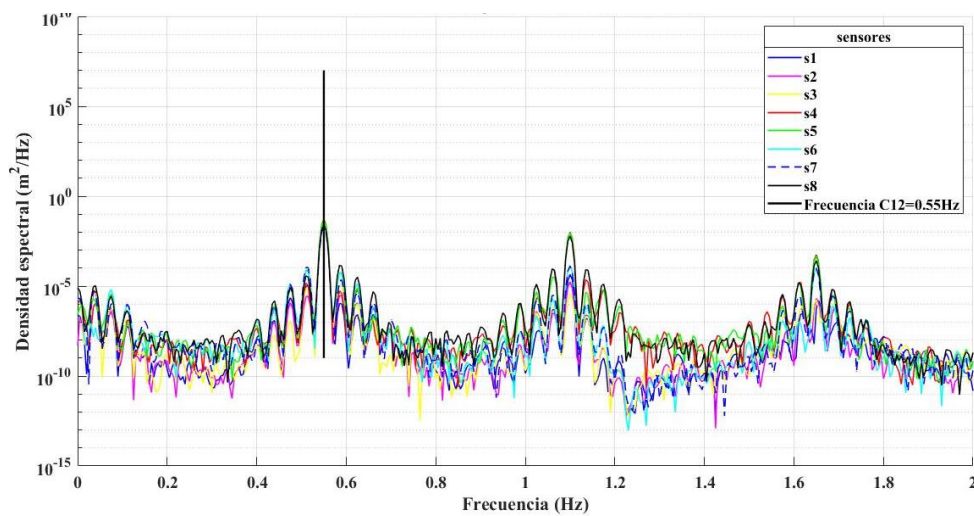
Anexo A3-1. Caso para D1. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias secundarias analizadas. Análisis para (a)

1500 datos; (b) 2500 datos; (c) 10000 datos; (d) 50000 datos. Caso 1, condiciones: $H=0.07\text{m}$ $f=0.85\text{Hz}$, $h=0.49\text{mA7}$

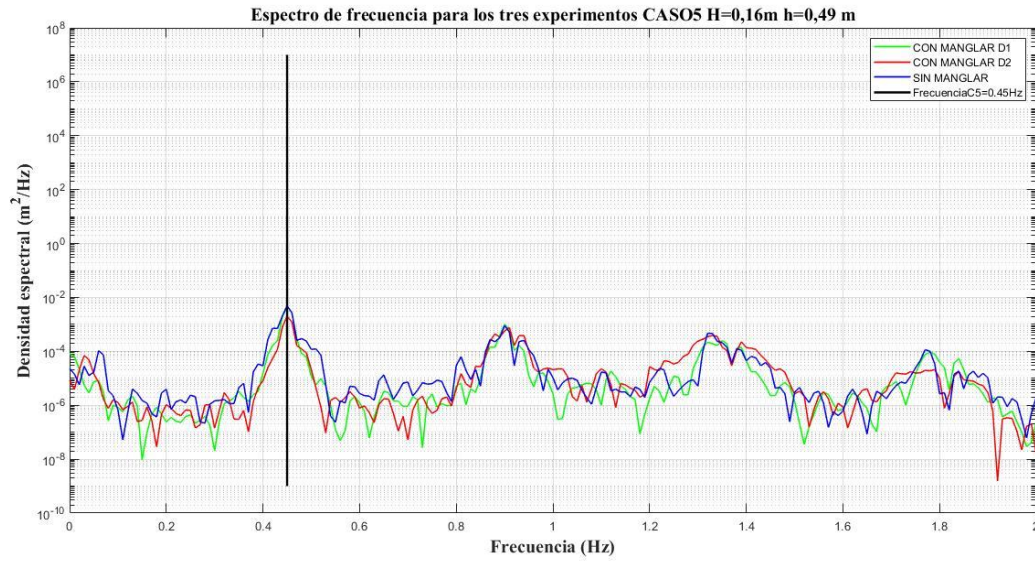


Anexo A3-2. Caso para D1. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. En los recuadros rojos se muestran las frecuencias secundarias analizadas. Análisis para (a) 1500 datos; (b) 3000 datos; (c) 15000 datos; (d) 55000 datos. Caso 2, condiciones: $H=0.07\text{m}$ $f=0.55\text{Hz}$, $h=0.49\text{m}$.

ANEXO A4



Anexo A4-1. Espectro en frecuencia para todos los ocho sensores. La línea vertical muestra el valor de f_p que es similar a la frecuencia generada por la pala. Caso 12: $H=0.07\text{m}$ $h=0.57\text{m}$



Anexo A4-2. Representación del Espectro en frecuencia para el caso 5 $H=0.16\text{m}$ $f=0.45\text{Hz}$ $h=0.49\text{m}$ de los 3 experimentos propuestos.