



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

Sistema de percepción remota de oleaje, mediante el uso de una cámara de video.

Luis Rene Daza Zapata

Abril 2017

Sistema de percepción de oleaje, mediante el uso de una cámara de video.

Luis Rene Daza Zapata

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Jaime Francisco Leyton Espoz Profesor guía	_____	_____
Patricio Winckler Grez Revisor	_____	_____
Mauricio Molina Pereira Revisor	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Jaime Francisco Leyton Espoz
Profesor Guía

Luis Rene Daza Zapata
Alumno Memorista

En agradecimiento a Pablo Vera, Gustavo Hafemann, familia y profesores, quienes me brindaron el apoyo necesario para el desarrollo de este proyecto de título.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción	1
2. Objetivos.....	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
3. Marco teórico.....	3
3.1. El oleaje.....	3
3.1.1. El oleaje como proceso estocástico.....	4
3.1.2. Descripción espectral del estado de mar	4
3.1.3. Oleaje regular	6
3.1.4. Oleaje irregular	9
3.1.5. Medición del oleaje.....	15
3.1.6. Matlab toolbox “wafo”	16
3.2. Imagen digital	17
3.2.1. Fotografía digital	17
3.2.2. Video digital.....	17
3.3. Correlación estadística	20
4. Sistema de percepción de oleaje por video (S.P.O.V).....	21
4.1. Fondeo de boyas.....	21
4.2. Muestreo mediante S.P.O.V.	24
4.2.1. Preparación fotográfica.....	25
4.2.2. Perspectiva.....	27
4.2.3. Mediciones	30
4.2.4. Recorte y renderizado de video	32
4.2.5. Seguimiento de la boya	33
4.3. Ajuste fotográfico y perspectiva	34
4.3.1. Ajuste fotográfico.....	34
4.3.2. Ajuste de perspectiva	35
5. Sensor de presión.....	37
5.1. Fondeo sensor de presión	37
5.2. Muestreo mediante sensor de presión.....	39
5.2.1. Configuración del instrumento	39

5.2.2.	Activación	41
5.2.3.	Mediciones	42
6.	Resultados S.P.O.V.....	43
6.1.1.	Desplazamientos verticales de la boya	43
6.1.2.	Desplazamientos horizontales de la boya	44
6.1.3.	Observaciones.....	45
6.2.	Tendencia del nivel medio en desplazamientos verticales	46
6.2.1.	Teoría y demostración	46
6.2.2.	Solución.....	49
6.3.	Estiramiento, estrechamiento y desfase	50
6.3.1.	Movimientos orbitales	51
6.3.2.	Conclusión.....	54
6.4.	Análisis de desplazamientos horizontales	57
7.	Validación del S.P.O.V.....	59
7.1.	Variaciones del nivel del mar	59
7.2.	Análisis de cruces por cero	62
7.3.	Análisis espectral.....	65
7.4.	Observaciones.....	69
8.	Discusión	70
9.	Conclusiones	73
10.	Referencias bibliográficas	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Superficie libre del mar mediante la sumatoria infinita de las componentes sinusoidales.....	5
Figura 2: Definición de los términos en una ola progresiva, elemental sinusoidal.	7
Figura 3: Desplazamientos orbitales de las partículas de agua para aguas profundas y poco profundas.....	8
Figura 4: Perfil de un estado de mar irregular.	9
Figura 5: Definición de un proceso de oleaje irregular.	10
Figura 6: Espectro multidireccional de oleaje, junto con sus espectros de frecuencia y direcciones.	12
Figura 7: Ejemplo de Densidad espectral del oleaje.	13
Figura 8 Presentación de la distribución de pixeles en una fotografía.....	17
Figura 9: Posición de una boya sobre una superficie de agua agitada, representada en tres fotogramas consecutivos.	18
Figura 10: Imagen temporal (template), seleccionada para el seguimiento de un carro oscilatorio en un archivo de video de prueba.	19
Figura 11: seguimiento a la oscilación del carro, producida por un resorte, tiempo vs altura.	19
Figura 12: a) Correlación positiva alta de datos. b) Correlación positiva baja de datos	20
Figura 13: Preparación de las boyas y los muertos para su instalación en el sitio de interés.	21
Figura 14: Configuración de las boyas, amarradas entre sí y ancladas al fondo marino. .	22
Figura 15: Kayak doble junto con dos bolsas de escombros, las cuales funcionan como fijación de las boyas al fondo marino.	23
Figura 16: Instalación y ajuste de boyas en el sitio de interés.....	23
Figura 17: Influencia de la altura de observación en el monitoreo de la boya, con $H \gg h$	24
Figura 18: Vista satelital (izquierda) e in situ (derecha), del punto de observacion de las boyas.....	25
Figura 19: Fotografía a la boya desde el punto de medición (izquierda). Medición del diámetro de la boya en pixeles Dpx (derecha).	25
Figura 20: Fotografía (izquierda) y video (derecha).	26

Figura 21: Video inicial (izquierda), y video recortado (derecha).....	27
Figura 22: Distorsión en la apreciación del desplazamiento vertical de la boya	28
Figura 23: Presentación de los componentes necesarios para realizar el ajuste de perspectiva.	29
Figura 24: Presentación del recorte y renderizado de video.....	32
Figura 25: Resultado del seguimiento para el 12 de octubre del 2015, a las 16:51:21s. ...	33
Figura 26: Configuración de contraste de la boya con el resto del ambiente.....	34
Figura 27: Circunferencia final que logra envolver la imagen de la boya por completo	34
Figura 28: Punto de grabación de la boya.....	36
Figura 29: Sensor de presión, modelo TWR-2050.	37
Figura 30: Figura de ubicación del sensor de presión en relación a las boyas.....	37
Figura 31: Sensor de presión en su estructura rígida.....	38
Figura 32: Configuración de tiempo de muestreo.....	39
Figura 33: Configuración de instalación, muestreo de mareas y muestreo de oleaje.	40
Figura 34: Resumen de configuración del sensor.	41
Figura 35: Visualización de datos por muestreo del sensor de presión, utilizando RBR data loggers.....	42
Figura 36: Primeros 10 minutos de variaciones del nivel del mar (N) obtenido por el sensor de presión.....	43
Figura 37: Primeros 10 minutos de variaciones del nivel del mar (N) obtenido por el S.P.O.V	43
Figura 38: Fragmento de medición del 18-10-2015.....	44
Figura 39: Trayectoria de la boya (movimiento en sentido horario), producida por el oleaje	44
Figura 40: Desplazamientos horizontales de la boya con respecto al tiempo.....	45
Figura 41: Boya en presencia de oleaje y corrientes de direcciones perpendiculares entre sí, observados con la cámara de video	46
Figura 42: Proyección del movimiento de la boya captado por cámara.....	47
Figura 43: Trayectoria de la boya, observada desde el punto de vista de la cámara	47
Figura 44: Desplazamientos de la boya proyectados en Z'.	48
Figura 45 : Variaciones del nivel del mar captadas en la toma 1 del muestreo 4.	49
Figura 46: Imágenes obtenidas desde la cámara al inicio y termino de la toma 1 del muestreo 4.....	49

Figura 47: Variaciones del nivel del mar y sus rectas de tendencia, en los periodos especificados.....	50
Figura 48: Serie de datos corregida mediante el proceso demostrado en la Figura 47. ...	50
Figura 49: Conjunto de olas de alturas H_a , H_b , H_c y periodos T_a , T_b y T_c , propagándose en dirección a una boya en reposo.	51
Figura 50: Trayectorias orbitales de la boya producto de las olas observadas en la Figura 49.	51
Figura 51: Evolución del movimiento orbital de la boya con el paso de las olas c , b y a . .	52
Figura 52: Boya y sensor de presión en $t = 0$, con una ola de periodo T , longitud de onda L y altura H , propagándose en dirección a éstos.	53
Figura 53: Comparación entre el sensor de presión (medición euleriana) y el S.P.O.V (medición lagrangiana).	54
Figura 54: Series de tiempo resultantes de la medición de la cresta de ola en la Figura 52.	54
Figura 55: Componentes horizontales de desplazamientos en la serie del S.P.O.V.	55
Figura 56: Componentes verticales de desplazamientos en la serie del S.P.O.V. vs variaciones del nivel del mar registradas por el sensor de presión.....	55
Figura 57: Serie de trayectorias orbitales del S.P.O.V vs variaciones del nivel del mar registradas por el sensor de presión.	56
Figura 58: Movimientos orbitales en una ola según su cresta (sentido + en x) y su valle (sentido - en x).	57
Figura 59: Selección de ola mediante la identificación de valle y cresta, utilizando los desplazamientos horizontales del registro.	57
Figura 60: Series de oleaje en distintas líneas de tiempo.	59
Figura 61: Resultado de la interpolación de las series n_b y n_p bajo una misma línea de tiempo.....	59
Figura 62: Muestreo 1, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p	60
Figura 63: Muestreo 2, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p	60
Figura 64: Muestreo 3, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p	61

Figura 65: Muestreo 4, a) Comparación de las series completas de nb y np. b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre nb y np.	61
Figura 66: Identificación de los cruces por cero hacia abajo, para las dos series de oleaje obtenidas durante los muestreos	62
Figura 67: Muestreo 1, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	62
Figura 68: Muestreo 2, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	63
Figura 69: Muestreo 3, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	63
Figura 70: Muestreo 4, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	63
Figura 71: a) Comparación de Hs. b) Comparación de H1/10. c) Comparación de Hrms. 64	
Figura 72: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 1.....	65
Figura 73: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 2.....	65
Figura 74: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 3.....	66
Figura 75: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 4.....	66
Figura 76: a) Comparación del periodo peak espectral. b) Comparación del periodo medio. c) Comparación del periodo energético.....	68
Figura 77: a) Comparación de la altura significativa. b) Comparación de la pendiente significativa de ola (wave steepness). c) Comparación de la pendiente promedio de ola. 68	
Figura 78: a) Comparación de la varianza (m_0). b) Comparación del momento espectral de orden 2. c) Comparación del momento espectral de orden 4.	68
Figura 79: a) Comparación del momento espectral de orden -1. b) Comparación del momento espectral de orden 1.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de muestreos, días 12 y 15 de octubre del 2015 (Líneas diagonales corresponden a la repetición de los valores en las filas).	30
Tabla 2: Resumen de muestreos, días 16 y 18 de octubre del 2015 (Líneas diagonales corresponden a la repetición de los valores en las filas).	31
Tabla 3: Ajuste fotográfico para muestreo, el 12-10-2015.....	35
Tabla 4: Ajuste fotográfico para muestreo, los días 15, 16 y 18-10-2015.....	35
Tabla 5: Parámetro de ajuste por perspectiva, junto con los elementos involucrados en su cálculo.	36
Tabla 6: Alturas características de ola, para todos los muestreos.....	64
Tabla 7: Características espectrales resultantes del análisis	67

RESUMEN:

Utilizando una técnica de percepción remota por video, algoritmos para el procesamiento de imágenes y una boya de color, se logró realizar un registro de la desnivelación instantánea del nivel del mar producto del oleaje. Este método de medición puede ser visto como una alternativa a costosas boyas oceanográficas y radares. El sistema está en desarrollo y resultados preliminares muestran que, bajo condiciones normales, alturas y periodos de oleaje pueden ser registrados con un nivel de confianza aceptable, sin embargo, son necesarias pruebas en condiciones extremas (tormentas, visibilidad reducida debido a la neblina, mediciones posteriores al ocaso, etc) y automatización del procesamiento de imágenes para análisis en tiempo real.

La boya fué instalada en playa la Boca (Concón, Valparaíso) y luego monitoreada desde la costa utilizando la cámara de video. El desplazamiento vertical de la boya es inferido en cada fotograma y convertido a elevación de la superficie del agua mediante un software libre de procesamiento de imágenes. Experimentos de prueba del sistema de medición propuesto versus un sensor de presión, muestran coeficientes de correlación del 91 - 96%, 91 - 97% y 96 - 98% en variaciones del nivel del mar, altura y periodo de ola respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

El oleaje es considerado como una variable importante para operaciones portuarias, diseño de obras marítimas, caracterización de sitios para energías renovables, entre otros. Es por esto que instrumentos enfocados en la cuantificación de este fenómeno, son desarrollados y aplicados de forma global; desde boyas oceánicas hasta mediciones de oleaje por satélites.

Las metodologías existentes para medir el oleaje son diversas, pero su adquisición está limitada desde el punto de vista económico. Es por esto que se propone un sistema de medición de oleaje de bajo costo que podría presentar una alternativa a instrumentos de medición vigentes. Este método de medición corresponde al Sistema de Percepción de Oleaje por Video (en adelante S.P.O.V), el cual está compuesto por una boya de color, software de procesamiento de imágenes y una cámara de video.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un sistema de medición de oleaje mediante la percepción remota por video, apto para uso ingenieril y científico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener series de tiempo de oleaje, utilizando el sistema de percepción de oleaje por video y un sensor de presión de forma simultánea.
- Validar el sistema de percepción de oleaje por video mediante la comparación de datos adquiridos entre éste y el sensor de presión.

3. MARCO TEÓRICO

Para presentar este método de medición de oleaje, se debe entender que es el oleaje, cuál es su forma de análisis y además dominar los aspectos de la metodología utilizada para llevar a cabo las mediciones. Cabe destacar, que, en los temas exhibidos, solo se presentarán los aspectos teóricos más relevantes que tengan relación a esta tesis.

3.1. EL OLAJE

Una ola es una alteración en una superficie libre de agua que puede ser producida por vientos, fuerzas de atracción gravitacional ejercidas por el sol y la luna, terremotos, derrumbes, etc. Sin embargo, el oleaje producido por los vientos es el que más afecta a los océanos y las costas en el mundo de forma periódica.

Para analizar el oleaje, este se toma como un proceso estocástico, es decir, que el proceso de análisis debe cumplir una serie de propiedades, entre ellas, el que sea estacionario o débilmente estacionario. Esta condición implica que los estadísticos del proceso (por ejemplo, media y varianza) se mantengan invariables ante el paso del tiempo. Sin embargo, el oleaje es la respuesta de la superficie del mar a condiciones atmosféricas no estacionarias, entonces para poder asumir una estacionalidad es necesario trabajar con “instantáneas” del proceso de una duración tal que, durante ese tiempo la variación de los estadísticos del proceso sea imperceptible. Estos intervalos de tiempo en que el proceso se puede considerar débilmente estacionario se denominan estados de mar. La duración de los estados de mar es un compromiso entre un tiempo lo suficientemente corto como para que el proceso sea considerado débilmente estacionario y lo suficientemente largo como para que contenga la información estadística necesaria para el proceso de análisis.

El análisis estadístico y espectral del oleaje en estados de mar, se denomina análisis a corto plazo. Los resultados del análisis a corto plazo corresponden a una serie de funciones (función de densidad espectral, funciones estadísticas), que pueden ser descritas con parámetros de estado de mar (por ejemplo, altura de ola del momento de orden 0 espectral, H_{m0} , periodo de pico espectral, T_p , Altura de ola significativa, H_s , periodo medio, T_z , etc.). Los parámetros de estado de mar varían con cada estado de mar, con lo que pueden constituir, a lo largo del tiempo, una serie temporal de estados de mar, con lo que se determina el clima marítimo a largo plazo (Losada Rodríguez y otros, 2011).

3.1.1. EL OLEAJE COMO PROCESO ESTOCÁSTICO

El desplazamiento vertical de la superficie del mar generado por el viento en el océano cambia aleatoriamente con el tiempo. Por esta razón las olas generadas por viento, o SEA, en un punto representan características variables aleatoriamente de una ola a otra. Cuando las olas se propagan fuera del área de generación, es decir fuera del fetch, los procesos de dispersión y disipación, regularizan la superficie del mar resultando en un SWELL.

Con todas las variaciones que presentan en el oleaje, es imposible un análisis de ola a ola en el dominio del tiempo. Sin embargo, al considerar el oleaje como un proceso estocástico, es decir, como un proceso estacionario, en donde las propiedades estadísticas de las muestras de energía obtenidas del oleaje, no cambian durante un periodo determinado, entonces se pueden evaluar sus propiedades estadísticas en los dominios de la frecuencia y la probabilidad (Losada Rodríguez y otros, 2011).

3.1.2. DESCRIPCIÓN ESPECTRAL DEL ESTADO DE MAR

Para realizar una representación matemática del oleaje se utiliza el desplazamiento vertical de la superficie libre del mar. Se supone una onda progresiva en profundidades indefinidas en un sistema de coordenadas x, y, z fijo en el espacio, con $z = 0$ en el nivel medio positivo hacia arriba y sea θ el ángulo que forma la dirección de propagación con el eje x , con sentido positivo contrario a las agujas del reloj. Con estos ejes, la superficie libre $\eta(x, y, z)$, de una ola propagándose en profundidades indefinidas puede ser descrita, en primera aproximación, por una senoide definida por:

$$\eta(x, y, z) = a \cos \left\{ \frac{\omega^2}{g} (x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t + \varepsilon \right\}. \quad \text{Eq.1}$$

En donde a es la amplitud de la onda, ω su frecuencia angular y ε su fase.

Al asumir que la superficie puede ser interpretada como un número infinito de componentes sinusoidales de amplitudes, frecuencias y ángulos a_j , ω_j y θ_j aleatorios, cubriendo un rango $0 < a_j < \infty$, $0 < \omega_j < \infty$, $-\pi < \theta_j < \pi$, respectivamente. La fase $\hat{\varepsilon}$ es también aleatoria, con distribución uniforme en el rango $-\pi < \hat{\varepsilon} < \pi$ y su magnitud depende de la frecuencia y del ángulo. De esta manera, se puede describir el desplazamiento vertical de la superficie libre del mar debido a un oleaje irregular mediante la sumatoria:

$$\eta(x, y, z) = \sum_j a_j \cos \left\{ \frac{\omega_j^2}{g} (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_j t + \hat{\varepsilon}_j(\omega_j, \theta_j) \right\}. \quad \text{Eq.2}$$

Gráficamente, la ecuación 2 se observa en la Figura 1:



Figura 1: Superficie libre del mar mediante la sumatoria infinita de las componentes sinusoidales con dirección, periodo, amplitud y fase, diferentes. (Fuente: Losada Rodríguez y otros, 2011)

La energía total del oleaje por unidad de área horizontal, promediada en el tiempo y expresada en función de la frecuencia angular de las ondas componentes ω , se representan mediante la función de densidad espectral del espectro del oleaje $S(\omega)$.

Como las olas en el océano no se mueven todas en la misma dirección la energía es representada en el espectro como la suma de las energías propagándose en muchas direcciones. Es por esto que se considera una función de densidad espectral direccional $S(\omega, \theta)$, que representa la energía total por unidad de área horizontal, promediada en el tiempo, existente en cada intervalo de frecuencia $\Delta\omega$ y en cada intervalo de dirección $\Delta\theta$. Sabiendo que la energía por unidad de área total del oleaje, promediada en el tiempo en el espacio $(\Delta\omega, \Delta\theta)$, puede ser representada como $(1/2)\rho g a_j^2$, en donde a_j es una variable aleatoria positiva, entonces esto se puede representar ignorando el factor ρg :

$$S(\omega, \theta) \Delta\omega \Delta\theta \cong \frac{1}{2} a_j^2, \quad \text{Eq.3}$$

El promedio temporal de la energía total de las olas de todas las frecuencias y direcciones de un oleaje viene dado por:

$$\sum_{\Delta\omega} \sum_{\Delta\theta} \frac{1}{2} a_j^2 \cong \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad \text{Eq.4}$$

Esta ecuación, está representada como la descripción estocástica del oleaje. Desde el punto de vista físico, quiere decir que las condiciones externas que influyen en el oleaje permanecen constantes durante cierto tiempo, el cual como se mencionó con anterioridad, se denomina estado de mar (Losada Rodríguez y otros, 2011).

3.1.3. OLEAJE REGULAR

(La descripción de oleaje incluida en esta sección es adaptada de Demirbilek & Vincent, 2002).

En esta sección se presentan aspectos del oleaje regular e irregular, resumidos y enfocados a la metodología de medición presentada en este proyecto de título.

Las teorías de oleaje son una aproximación a la realidad. Pueden describir algunos fenómenos bajo ciertas condiciones que satisfacen suposiciones hechas en su derivación. A la vez, pueden fallar en describir otros tipos de fenómenos que violen estas suposiciones. Al adoptar una teoría, se debe asegurar que el fenómeno de oleaje de interés es razonablemente descrito, por la teoría utilizada.

Una ola progresiva puede ser representada por las variables x (espacial) y t (temporal) o, por la combinación de estas (fase) definida como $\theta = kx - \omega t$, en donde k y ω corresponden al número de ola y frecuencia angular de ola, respectivamente. Los valores de θ varían entre 0 y 2π . En la Figura 2, se esquematizan los parámetros que definen a una ola simple, progresiva a medida que pasa un punto específico en el océano. Una ola simple y periódica de forma permanente propagándose sobre un fondo horizontal, que se puede caracterizar de forma completa, por una altura de ola H , longitud de ola L y profundidad d .

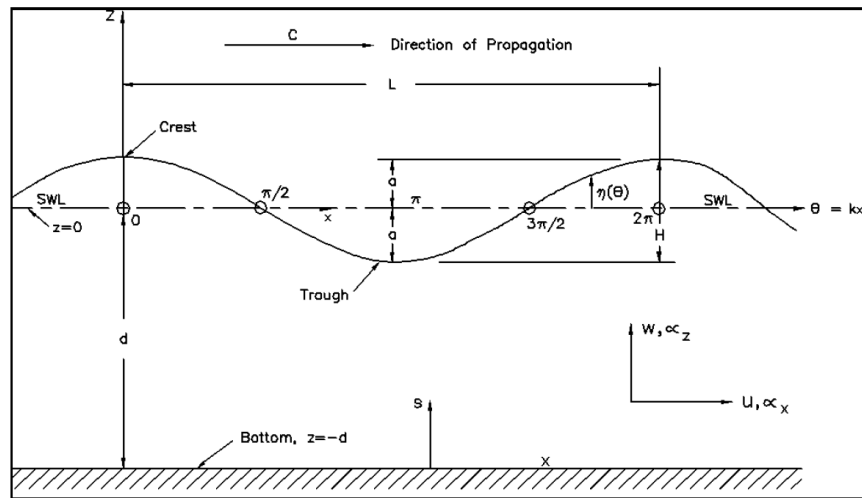


Figura 2: Definición de los términos en una ola progresiva, elemental sinusoidal. (Fuente: Demirbilek & Vincent, 2002).

Como se muestra en la Figura 2, el punto más alto de la ola es la cresta (crest) y el punto más bajo es el valle (trough). Para oleaje lineal u olas de amplitud baja, la altura de la cresta por sobre el nivel del mar y la distancia entre el valle y el nivel del mar, equivalen a la amplitud de ola a , por lo tanto $a = H/2$, en donde H es altura de ola. El intervalo de tiempo entre el paso de 2 crestas o valles de ola consecutivas en un punto definido corresponde al periodo de ola T . La longitud de ola L , es la distancia horizontal entre dos puntos idénticos en dos crestas o valles de ola consecutivas.

3.1.3.1. TEORÍA LINEAL DE OLAJE:

La teoría de oleaje más elemental, es la de amplitud pequeña o teoría lineal de oleaje. Esta teoría, desarrollada por Airy (1845), proporciona una aproximación razonable sobre las características del oleaje para un amplio rango de parámetros de oleaje. A pesar de ciertas limitaciones, si las siguientes suposiciones no son violadas de forma excesiva, esta teoría puede ser de gran utilidad.

1. Fluido incompresible y homogéneo.
2. Se desprecia la tensión superficial.
3. Se desprecia el efecto de coriolis.
4. La presión en la superficie libre es uniforme y constante.
5. El fluido es ideal (no viscoso).
6. La ola considerada en particular, no interactúa con ningún otro movimiento de agua. El flujo es irrotacional.
7. El suelo marino es horizontal e impermeable (velocidad vertical en el fondo es 0).
8. La amplitud de ola es pequeña y la forma de ola no varía en el tiempo y el espacio.
9. Las olas son planas o de cresta larga (dos dimensiones).

Las primeras tres suposiciones son válidas para casi todos problemas ingenieriles costeros. La cuarta, quinta y sexta, deben ser re observadas para algunos problemas especializados. Las tres últimas suposiciones también deben ser re observadas para muchos problemas.

3.1.3.2. DESPLAZAMIENTOS DE LA PARTICULA DE AGUA

Un importante aspecto de la teoría lineal de oleaje, se refiere al desplazamiento de las partículas individuales de agua, al interior de una ola. En lo general, las partículas de agua se mueven de forma elíptica, en aguas poco profundas o transitorias y en forma circular en aguas profundas.

En la Figura 3, ξ corresponde al desplazamiento horizontal desde el centro de la elipse o círculo, ζ corresponde al desplazamiento vertical, A y B corresponden a los radios de las orbitales, u corresponde a la velocidad horizontal y d/L corresponde a la profundidad relativa de la ola.

Las partículas de agua se mueven en orbitas cerradas en donde una partícula de fluido vuelve a su posición inicial (una vez completada la elipse o círculo), luego del ciclo individual de cada ola. Según experimentos realizados en laboratorio, se determina que en la realidad, estos movimientos orbitales no son cerrados. Esto es debido al transporte de masa del fluido.

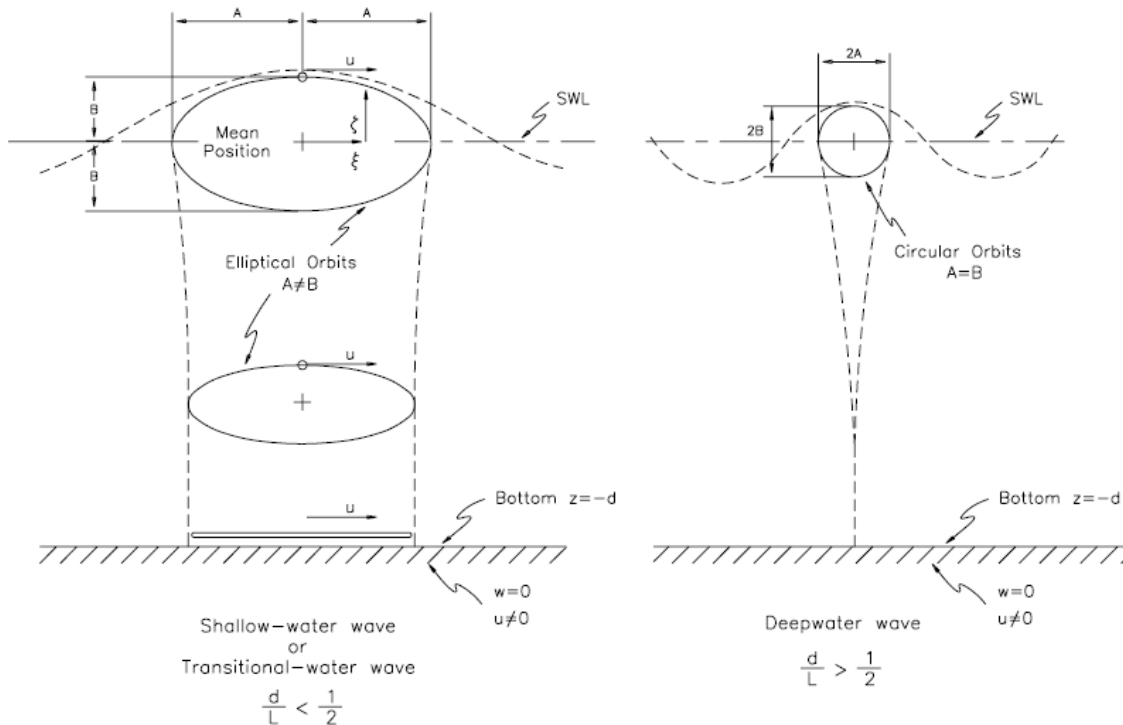


Figura 3: Desplazamientos orbitales de las partículas de agua para aguas profundas y poco profundas. (Fuente: Demirbilek & Vincent, 2002).

3.1.4. OLEAJE IRREGULAR

(La descripción de oleaje incluida en esta sección es adaptada de Demirbilek & Vincent, 2002).

3.1.4.1. ANÁLISIS DEL TREN DE OLEAJE (OLA A OLA)

El análisis de ola a ola, requiere una medición directa de oleaje irregular en el sitio de interés. Un registro típico obtenido de un dispositivo de medición de oleaje, se presenta en la Figura 4. Los trazos de oleaje registrados deben ser de longitud finita, con mediciones de la superficie del agua a un intervalo determinado (normalmente un segundo o menos).

La serie de tiempo de elevación del nivel del mar en una zona determinada, es una señal aparentemente aleatoria con muchos máximos y mínimos, como se muestra en la Figura 5. Se necesita utilizar un criterio de selección, para identificar las distintas olas individuales que se presentan en el registro de datos.

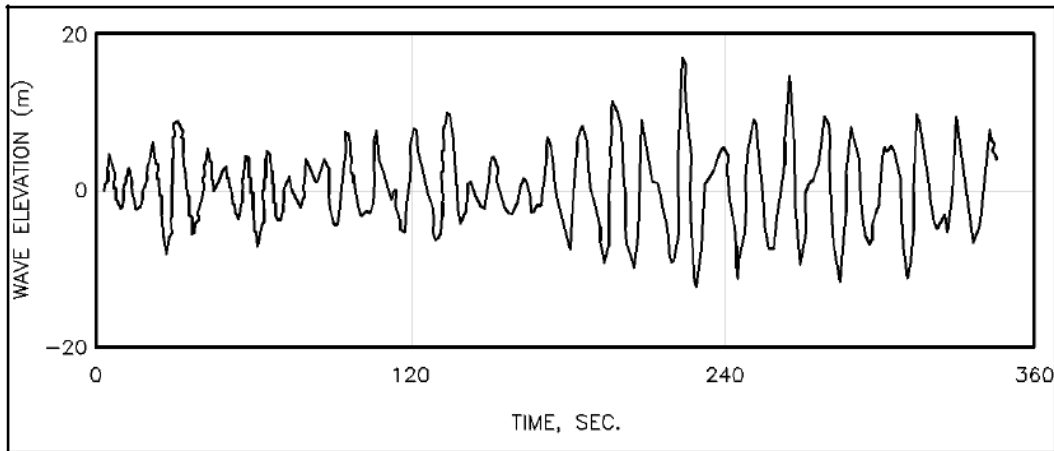


Figura 4: Perfil de un estado de mar irregular. (Fuente: Demirbilek & Vincent, 2002).

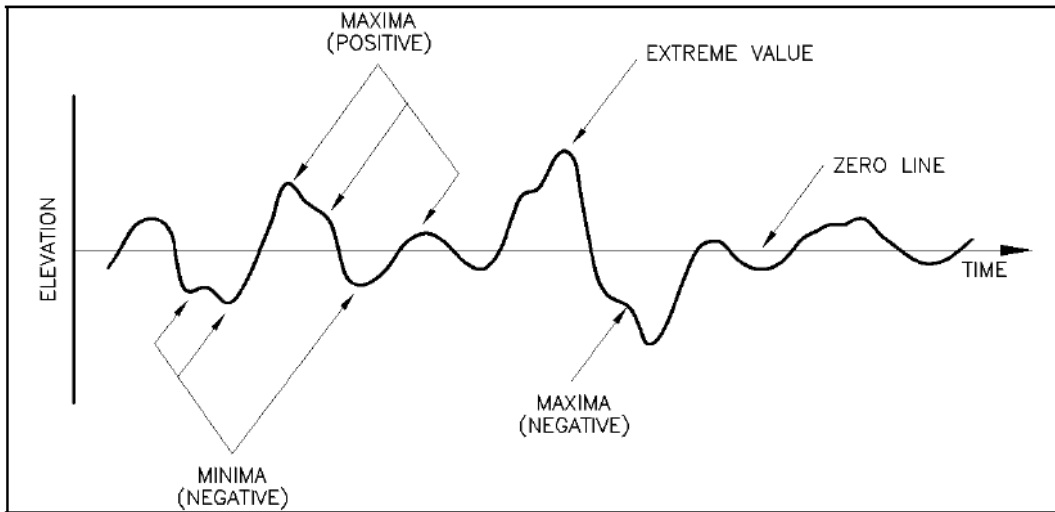


Figura 5: Definición de un proceso de oleaje irregular. (Fuente: Demirbilek & Vincent, 2002).

La ondulación de la serie de tiempo de la superficie debe ser dividida en una serie de segmentos, los cuales son considerados como olas. Para cada ola se calcula la altura y el periodo y se determinan los parámetros estadísticos del registro.

Conocer las estadísticas de un registro de oleaje puede ser útil, para analizar un evento de oleaje que haya hecho fallar una estructura marina. También puede ser útil para saber si los parámetros estadísticos de ciertos registros de oleaje individuales siguen algún tipo de patrón consistente, ya que podrían ser fácilmente predichas sabiendo solo un poco sobre las condiciones de oleaje en un sector determinado.

3.1.4.2. MÉTODO DE CRUCES POR CERO:

Un método para seleccionar olas individuales en un registro de oleaje es el método de cruces por cero, en donde una ola se define cuando la elevación de la superficie cruza el nivel del agua en reposo, hacia arriba hasta el siguiente punto de cruce. Este es considerado como el método de cruces hacia arriba, mientras que cuando la ola se selecciona según los cruces por debajo de la línea de nivel 0 se le determina método de cruces abajo.

La altura de ola de cruces por cero es la distancia vertical entre el nivel más alto y el más bajo de agua entre dos cruces por cero consecutivos. Por otro lado, el periodo de ola se considera como la distancia horizontal entre dos cruces por cero consecutivos. La definición de altura y periodo de ola va a depender de que método de cruces por cero se utilice, ya sea cruces arriba, o, cruces abajo. A partir de esta información, se pueden calcular una serie de parámetros estadísticos de oleaje.

La estadística de oleaje involucra el procesamiento de la información de ola utilizando los principios de la teoría estadística. La finalidad de esto es la generación de estimaciones estadísticas de las series de tiempo analizadas, para describir un estado irregular de mar,

de forma paramétrica. En ingeniería es necesario contar con parámetros que sean capaces de explicar que tan severo es un estado de mar, de forma que sea posible estimar cuales son las características estadísticas que el registro de oleaje podría haber tenido.

Para parametrización, existen varios candidatos al corto plazo, para definir estadísticas de estados de mar irregulares. Dos de los más importantes son las alturas y periodos característicos de ola, H y T respectivamente. Los parámetros característicos de T y H, de interés para este proyecto de título son:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad \text{Eq.5}$$

$$H_{1/n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N/n} H_i \quad \text{Eq.6}$$

$$T_z = \frac{T_r}{N_z} \quad \text{Eq.7}$$

En donde,

- H_{rms} corresponde a la altura media cuadrática de ola.
- $H_{1/n}$ corresponde al promedio de la enésima parte, de las olas más grandes del registro. En este proyecto de título, se usará $H_{1/3}$ (H_s , altura significativa) y $H_{1/10}$.
- H_i y H_j corresponden a las alturas de oleaje del registro, ordenadas de mayor a menor.
- n corresponde a la enésima parte de olas en el registro.
- N corresponde al número total de olas en el registro
- T_z corresponde al periodo de cruces por cero.
- T_r corresponde al largo total del registro de oleaje.
- N_z corresponde al número de cruces por cero del registro.

En proyectos costeros, los ingenieros deben diseñar estructuras en base a las olas más grandes de un registro, por lo que $H_{1/10}$ (promedio de la décima parte de alturas de ola más grandes), es el parámetro más utilizado. H_{rms} es un parámetro de oleaje comúnmente utilizado para determinar la energía de ola en un registro. $H_{1/3}$ o H_s , es el parámetro que mejor representa un estado de mar irregular.

3.1.4.3. ANÁLISIS ESPECTRAL DEL OLAJE:

Si se considera una serie de tiempo que contenga la desnivelación de un punto, el análisis espectral observa el registro desde el punto de vista de la variación de la media y reconoce que esta variación contiene características periódicas. El análisis espectral busca describir la distribución de la varianza de una muestra de variaciones de la superficie del mar con respecto a la frecuencia de la señal. Por convención, esta distribución de varianza vs frecuencia es escrita de la forma $E(f)$, asumiendo que esta función es continua en el espacio de frecuencias. A pesar de que $E(f)$ es una medición de la varianza, se le denomina espectro energético de frecuencia ya que, basándose en la teoría lineal del oleaje,

se puede estimar la energía contenida en el espectro, multiplicándolo por $\rho * g$ (densidad del agua de mar y gravedad respectivamente).

Un avance inmediato en la información proporcionada por la aproximación espectral son las frecuencias que contienen energía significativa, lo cual actúa de una forma análoga al diagrama de periodo vs altura. Existe una desventaja en el análisis espectral que consiste en la pérdida de información individual sobre cada ola. Para que el registro de oleaje sea de uso, las características generales de la muestra no deberían cambiar si el registro fuera un poco más corto, o largo, o incluso, si este empieza más tarde o antes, o si el registro fue tomado una corta distancia en otra dirección.

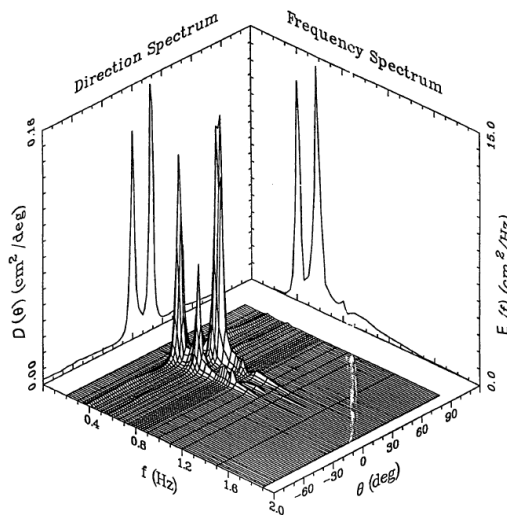


Figura 6: Espectro multidireccional de oleaje, junto con sus espectros de frecuencia y direcciones. (Fuente: Demirbilek V, 2002)

En la Figura 6 se observa un espectro energético multidireccional de oleaje junto con sus respectivos espectros de dirección y frecuencias. Esta es una forma de visualizar la superficie del mar, como una superficie tridimensional que representa el desplazamiento desde la media de la varianza como periódico, en el tiempo y el espacio. En la Figura 7, se muestra un ejemplo de densidad espectral del oleaje, con respecto a las frecuencias en un registro.

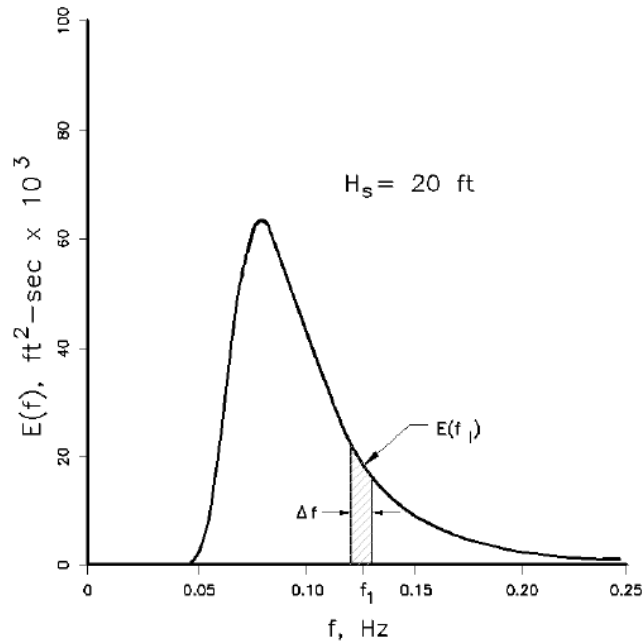


Figura 7: Ejemplo de Densidad espectral del oleaje. (Fuente: Demirbilek & Vincent, 2002).

Del análisis al espectro de frecuencias se puede obtener el momento del orden 0 espectral (varianza). Físicamente m_0 representa el área bajo la curva del espectro de frecuencias $E(f)$. La obtención de m_0 se realiza como sigue:

$$m_0 = \int_0^{\infty} E(f) df \quad \text{Eq.8}$$

En general, los momentos del espectro energético se obtienen de la siguiente integral:

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i E(f) df \quad i = 1,2,3, \dots \quad \text{Eq.9}$$

Se utiliza la definición de varianza de una señal aleatoria, para proporcionar una tercera definición de la altura significativa del oleaje, la que corresponde a una estimación de la altura de ola del espectro. Cuando se trata de olas que cumplan los requisitos de una distribución de Rayleigh, H_s puede ser aproximado de la siguiente forma:

$$H_s = 3.8\sqrt{m_0} \approx 4\sqrt{m_0} \quad \text{Eq.10}$$

Por lo tanto, el momento de orden cero m_0 , que corresponde al área total por debajo del espectro de densidad energética, define a la altura significativa de ola para un espectro $E(f)$ determinado.

Existen algunas generalidades sobre la morfología de los espectros de oleaje. Principalmente durante grandes eventos de viento, los espectros tienden a tener fuertes picos centrales y forma muy predecible. Para olas del tipo swell las cuales se han propagado lejos del foco de generación, las olas tienden a tener un único pico energético. Olas en aguas poco profundas, cercanas al rompiente, tienden a tener un pico en la frecuencia pico,

y también una serie de picos pequeños en el espectro que corresponden a armónicos de la ola significativa.

3.1.4.4. OBTENCION DEL ESPECTRO DE OLAJE:

El método de análisis espectral determina la distribución de energía y promedios estadísticos para cada frecuencia del oleaje, convirtiendo las series de tiempo de una muestra de oleaje, en un espectro. Esto se realiza mediante una transformación por dominio de tiempo a dominio de frecuencias y se consigue mediante la “Fast Fourier Transformation (FFT, Transformada rápida de Fourier).

El espectro de oleaje puede ser obtenido directamente desde una serie de tiempo de la superficie del agua $\eta(t)$ con la ayuda del análisis de Fourier. Usando un análisis de Fourier la huella de tiempo del perfil de oleaje puede ser escrita como una suma infinita sinusoidal de amplitud A_n , frecuencia ω_n , y fase relativa ε_n , como se muestra:

$$\eta(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \text{Cos}(\omega_n t - \varepsilon_n) \quad \text{Eq.11}$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} a_n \text{Cos } n\omega t + b_n \text{Sin } n\omega t \quad \text{Eq.12}$$

Los coeficientes a_n y b_n pueden ser determinados basándose en la ortogonalidad de funciones circulares. Hay que destacar que a_0 corresponde a la media del registro. Ya que las observaciones de oleaje corresponden a un periodo de tiempo finito, el número de términos en n también lo es.

Por inducción, una estimación del espectro continuo de energía obtenido de $\eta(t)$, se puede obtener a través de:

$$E(f) = \frac{1}{T_r} \left[\sum_{n=0}^N \eta(n\Delta t) e^{2\pi i f(n\Delta t)} \Delta t \right]^2 \quad \text{Eq.13}$$

En donde T_r es la longitud del registro y Δt es el intervalo de muestreo. Esta es la presentación teórica de la obtención del espectro de oleaje, sin embargo, para su obtención práctica, dentro del desarrollo de esta tesis, se utilizará una herramienta de Matlab llamada WAFO, (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography). Esta herramienta se presentará en la sección 3.1.6.

3.1.5. MEDICIÓN DEL OLEAJE

(La descripción incluida en esta sección es adaptada de A. K. Laing, 1998)

Existen numerosas técnicas de medición de oleaje, sin embargo, no existe un instrumento o metodología universal para todos los tipos de medición. Un instrumento utilizado en cierta localidad puede ser completamente inservible en otras zonas, por lo que el tipo de instrumento utilizado para realizar una medición depende de la aplicación que se le quiere hacer al registro de oleaje. En general las técnicas de medición de oleaje pueden ser agrupadas en 3 categorías:

- Mediciones por debajo de la superficie: estos sistemas de medición tienen la ventaja de no ser tan vulnerables a daños como lo son los que están en la superficie del agua. Sin embargo, existe el problema de llevar la data a la costa, ya que el cableado es costoso y puede ser dañado. Existen soluciones a esto mediante la transmisión por radio de boyas cercanas a estos instrumentos. Dentro de este conjunto se encuentran generalmente sensores de presión de oleaje. Éstos son usados generalmente en aguas poco profundas, mientras que en profundidades mayores los valores de medición deben ser corregidos, debido a las altas presiones.
- Mediciones en la superficie: en aguas poco profundas, en donde existen plataformas o estructuras marinas disponibles, es posible obtener mediciones de oleaje mediante varas de resistencia eléctrica. La altura de oleaje es inferida de las variaciones de resistividad del instrumento entre agua y aire. En aguas profundas se utilizan boyas oceanográficas que transforman los desplazamientos verticales de la boya a altura de oleaje por acelerómetros montados en giroscopios al interior del instrumento.
- Mediciones por sobre la superficie: el oleaje puede ser medido desde arriba de la superficie del agua por láser, infra-rojo, radar, instrumentos acústicos, o foto y video.

3.1.6. MATLAB TOOLBOX “WAFO”

MATLAB es una plataforma computacional optimizada para resolver problemas ingenieriles y científicos. Puede ser utilizada para aprendizaje de máquinas, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión computacional, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, control robótico, entre otros. Existe una gran cantidad de “TOOLBOXES”, herramientas más complejas de MATLAB, las cuales permiten emplear rápidamente algoritmos esenciales para ciertos tipos de trabajos (MathWorks, Inc. 2005).

WAFO (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography) es una toolbox de rutinas de MATLAB para análisis y simulaciones estadísticas de oleaje irregular. Utilizando WAFO, se puede calcular características de oleaje de forma teórica, mediante el procesamiento de espectros energéticos y data de oleaje ((WAFO, A. 2000).

Entre los parámetros espectrales entregadas por WAFO, están:

m_0, m_2 y m_4

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad \text{Eq.14}$$

$$T_{m01} = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad \text{Eq.15}$$

$$T_{m_{-10}} = 2\pi \frac{m_{-1}}{m_0} \quad \text{Eq.16}$$

$$Tp = \frac{1}{\max(S(f) \text{ o } E(f))} \quad \text{Eq.17}$$

$$Ss = \frac{2\pi H_{m0}}{gT_{m02}^2} \quad \text{Eq.18}$$

$$Sp = \frac{2\pi H_{m0}}{gTp^2} \quad \text{Eq.19}$$

En donde,

- H_{m0} corresponde a la altura significativa de ola.
- T_{m01} corresponde al periodo medio de ola.
- $T_{m_{-10}}$ corresponde al periodo energético de ola.
- Tp corresponde al periodo peak de oleaje en el espectro.
- Ss corresponde a la pendiente de ola significativa.
- Sp corresponde a la pendiente de ola promedio.

(WAFO, A. 2000)

3.2. IMAGEN DIGITAL

El método propuesto para la medición de oleaje se apoya en ciertos elementos de la imagen y video digital, como resolución de imagen, píxeles, seguimiento de partículas y software, entre otros. Esta sección se divide en dos partes, “fotografía digital” y “video digital”, en las cuales se presentan solo los aspectos más relevantes que influyen en la metodología de medición de oleaje aplicada.

3.2.1. FOTOGRAFIA DIGITAL

(La descripción incluida en esta sección es adaptada de Curtin, D. P. 2007)

Una fotografía digital es una imagen que se compone de millones de píxeles de distintos colores distribuidos en forma de grilla, según las características de la imagen. En la Figura 8 (izquierda), se muestra una boya ubicada sobre una superficie de agua. A la derecha, una ampliación de ésta, en donde se aprecian los píxeles que componen la fotografía. Si se toman en consideración las dimensiones reales de la boya, junto con la cantidad de píxeles que ocupa en la imagen, se pueden determinar las dimensiones reales de la fotografía, considerando la inclinación de la cámara y sus aspectos técnicos.



Figura 8 Presentación de la distribución de píxeles en una fotografía. (Fuente: Elaboración propia)

La resolución de una imagen digital corresponde a la dimensión de la grilla en píxeles. Por ejemplo, una imagen de 5184 x 3456, corresponde a 5184 píxeles de ancho y 3456 píxeles de alto y un total aproximado de 18 millones de píxeles o 18 mega píxeles.

3.2.2. VIDEO DIGITAL

El video digital se refiere a la captura, manipulación y adquisición de imágenes en movimiento, las cuales pueden ser reproducidas en pantallas de computador (The lycos Tech Glossary, 1999).

Éste se compone de una serie de imágenes estáticas llamadas fotogramas, que son capturadas y reproducidas a una velocidad determinada, lo que crea en consecuencia, una ilusión de movimiento (Poynton, 1996).

Mediante simple observación de la boya en cada fotograma (Figura 8), se puede obtener la posición de ésta, con respecto al tiempo, en todo el periodo que alcance a durar el video. La representación de lo anterior se puede apreciar en la Figura 9, en donde se ve cómo varía la posición de la boya en el tiempo. La cantidad de fotogramas por segundo registrada por el video determina la exactitud de la información sobre el desplazamiento de una partícula.

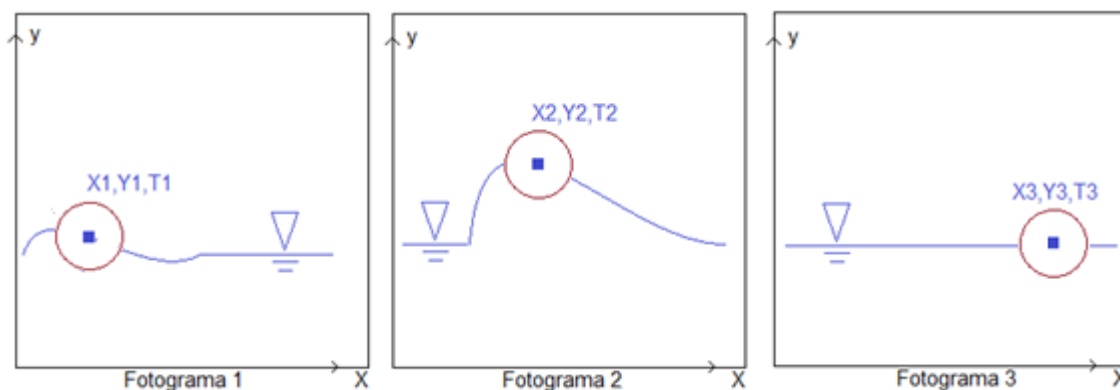


Figura 9: Posición de una boya sobre una superficie de agua agitada, representada en tres fotogramas consecutivos. (Fuente: elaboración propia).

3.2.2.1. TRACKER

(La descripción incluida en esta sección es adaptada de Brown, D. 2012)

Tracker software es una herramienta gratuita para el análisis y modelación de videos creada en OSP (Open source physics), JAVA. Está diseñada para ser usada en ciencias físicas.

La característica más relevante de este programa, es que permite el seguimiento automático de partículas en movimiento (autotracker), infiriendo así la posición, velocidad, aceleración y exportación de datos en formato de texto.

Autotracker funciona creando una imagen temporal (Template) de una partícula o zona de interés en un archivo de video (Figura 10), para luego buscar dentro de una región determinada, la mayor coincidencia de imagen posible (Match) en cada fotograma consecutivo. La región de búsqueda, del autotracker corresponde a un área rectangular inteligente, capaz de predecir posiciones futuras de la partícula de estudio, utilizando valores anteriores de velocidad, aceleración, posición y dirección.

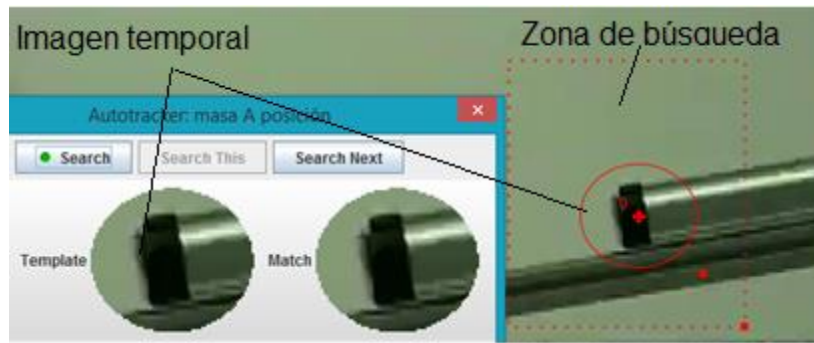


Figura 10: Imagen temporal (template), seleccionada para el seguimiento de un carro oscilatorio en un archivo de video de prueba. (Fuente: elaboración propia)

En la Figura 10 se muestra la selección de la imagen temporal que se desea seguir en los siguientes fotogramas (selección circular), junto con la zona de búsqueda (selección rectangular). La posición en el espacio generada por el programa corresponde al centro de masa del círculo que contiene la imagen.

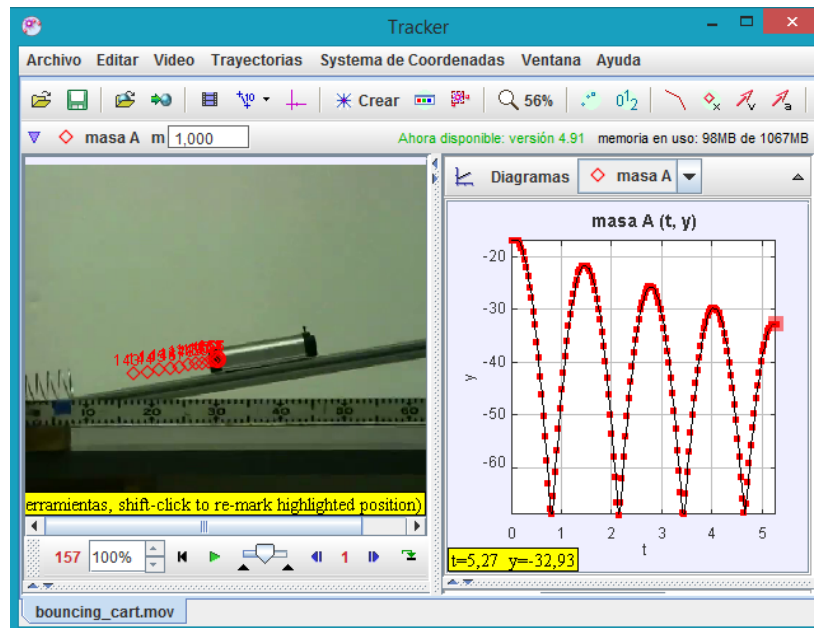


Figura 11: seguimiento a la oscilación del carro, producida por un resorte, tiempo vs altura. (Fuente: elaboración propia)

Una vez seleccionada la imagen temporal junto con el área de búsqueda, se procede a correr el modo de autotracker y así obtener la posición del objeto en estudio, con respecto al tiempo (Figura 11). También existen las opciones de determinar velocidad, aceleración, velocidad angular y aceleración angular, entre otras propiedades cinemáticas del objeto.

3.3. CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

(La descripción incluida en esta sección es adaptada de Butler, C. 1985)

La correlación lineal es el área de la estadística enfocada en el estudio de relaciones sistemáticas entre dos (o más) variables, determinando si existe una relación lineal entre los valores de una variable "X" con respecto a una variable "Y". Ésta responde preguntas como, ¿Acaso los valores de "X" tienden a valores altos en la misma forma que "Y"?, ¿O ocurre lo contrario?, ¿O si existe una relación más complicada entre "X" e "Y"?, ¿O quizás ninguna relación?.

El primer paso en un estudio de la posible correlación de dos variables, es la generación de un Figura de dispersión entre éstas. Éste, es un Figura en el cual los ejes representan a cada variable y cada miembro de la población de muestreo siendo investigada es representado por un marcador cuya posición está definida por los valores de las dos variables para ese miembro. Posibles Figuras de dispersión de datos son mostrados en la Figura 4:

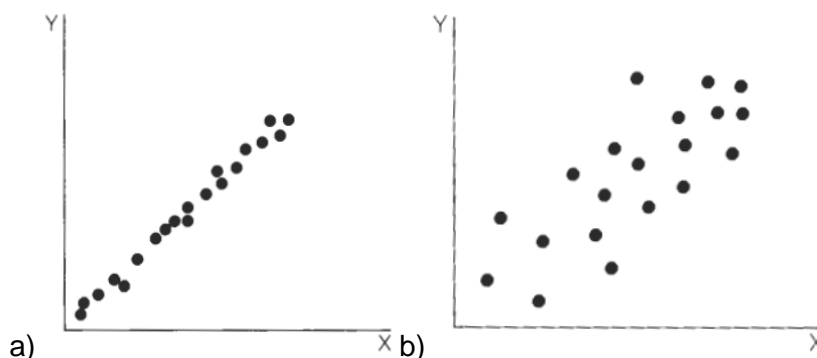


Figura 12: a) Correlación positiva alta de datos. b) Correlación positiva baja de datos (Fuente: Butler 1995)

El coeficiente de correlación es un valor que va de -1 a 1 (valores negativos para relación inversa entre variables comparadas y valores positivos para relación directa).

$$R = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{\{N \sum x^2 - (\sum x)^2\} \{N \sum y^2 - (\sum y)^2\}}} \quad \text{Eq.20}$$

En donde N corresponde al número de observaciones y x e y corresponden al par de series que se están comparando.

4. SISTEMA DE PERCEPCIÓN DE OLAJE POR VIDEO (S.P.O.V)

El S.P.O.V se compone de tres elementos: una cámara de video, una boya flotante de color llamativo y algoritmos para el procesamiento de imágenes. El método consiste en el monitoreo de la boya (cámara de video) en donde el desplazamiento vertical de ésta, es transformado a datos de altura y periodo de oleaje (algoritmos de procesamiento de imágenes). La boya fué instalada utilizando embarcaciones menores y un equipo de apnea (Figura 13).



Figura 13: Preparación de las boyas y los muertos para su instalación en el sitio de interés. En la fotografía: Pablo Vera (Izquierda) y Rene Daza (Derecha). (Fuente: elaboracion propia).

El funcionamiento de este sistema de medición requiere una serie de procedimientos que serán explicados en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3.

4.1. FONDEO DE BOYAS

Se cuenta con dos boyas de plástico, amarradas entre sí, las cuales fueron instaladas en un sector de aguas poco profundas antes de la rompiente de oleaje y posteriormente ancladas al fondo marino utilizando muertos (Figura 14).

Esta configuración de amarre considera una boya de observación y una sostenedora. Con esta configuración la boya de observación no sufre del peso y arrastre de la cuerda que conecta a los muertos y reduce la fuerza de tensión que podría interferir en el movimiento producido por el oleaje que se desea estudiar.

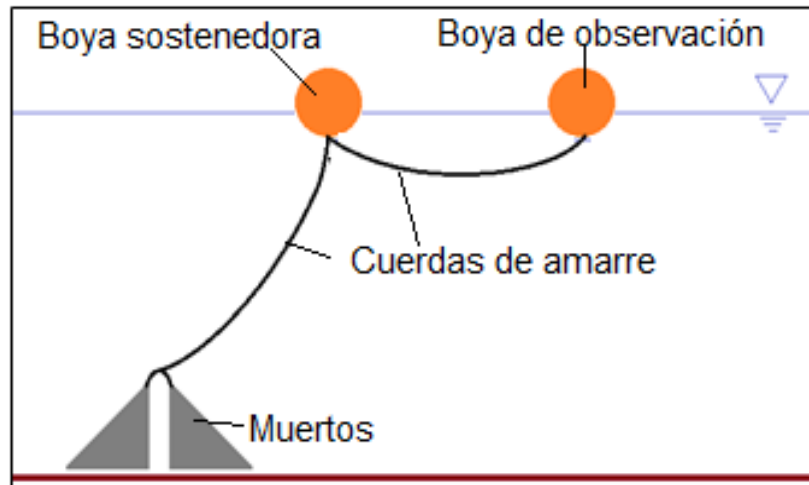


Figura 14: Configuración de las boyas, amarradas entre sí y ancladas al fondo marino. (Fuente: elaboración propia)

METODOLOGÍA DE FONDEO:

Los elementos necesarios para el fondeo se presentan según su función:

Navegación (Transporte hacia el sitio de interés):

- Embarcaciones básicas (kayak doble y simple)

Soporte de las boyas con el fondo marino (Muertos):

- Bolsas de escombros (4)
- Piedras y arena
- Cuerdas de amarre

Boyas de observación:

- Boyas esféricas (2 unidades, 33 litros, Polietileno PE virgen, 40 cm de diámetro y 25mm de espesor. 30 kg boyantes)

Maniobras in situ (instalación de muertos en el fondo marino):

- Equipo de apnea.

Procedimiento:

Se prepararon 2 bolsas de escombros rellenas de piedras y arena (tomadas de la playa), cada una con una masa de 50 kg. Estos muertos fueron trasladados con el kayak doble (Figura 15), mientras que las dos boyas son arrastradas con un kayak individual hasta el sitio de fondeo.



Figura 15: Kayak doble junto con dos bolsas de escombros, las cuales funcionan como fijación de las boyas al fondo marino. (Fuente: elaboración propia)

Una vez en el lugar de fondeo, los muertos fueron ubicados en el fondo, en donde se les amarró la boya sostenedora.



Figura 16: Instalación y ajuste de boyas en el sitio de interés. (Fuente: Elaboración propia).

Las dos boyas son separadas a una distancia prudente entre sí, para que no exista colisión entre ellas. El amarre de la boya sostenedora, se deja de un largo que garantice que la boya no se sumerja producto de las subidas de marea (Figura 16).

4.2. MUESTREO MEDIANTE S.P.O.V.

Existen muchas formas para realizar el seguimiento visual de objetos en movimiento, sin embargo, en este proyecto de título se utilizaron los siguientes elementos:

- Cámara Canon EOS600D
- Trípode
- Boya de observación

Estos elementos fueron elegidos por su facilidad de obtención y también porque la mayoría ya estaba disponible para su uso.

Para monitorear la boya desde la costa, se escogió un punto de observación en altura para que la visualización no fuese interrumpida por el oleaje (Figura 17).

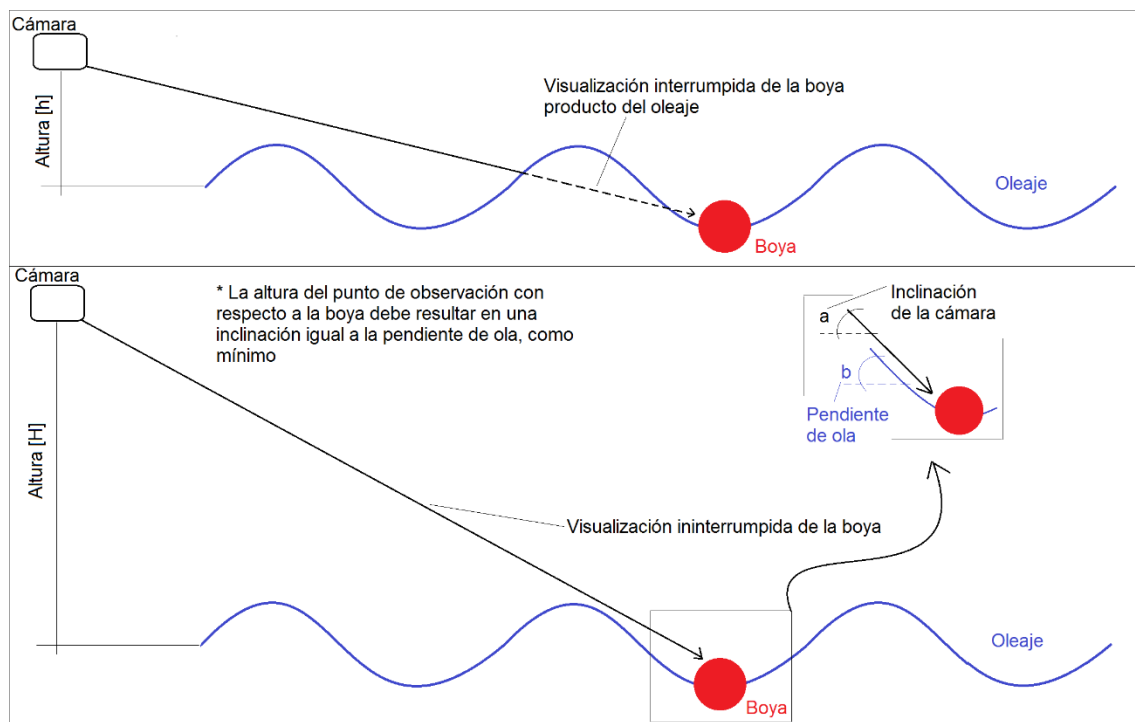


Figura 17: Influencia de la altura de observación en el monitoreo de la boya, con $H \gg h$. Una elevación óptima de la cámara resulta en " $a > b$ ". (Fuente: elaboración propia)

Se decidió realizar el monitoreo de la boya con la cámara ubicada en una posición perpendicular a la dirección del oleaje en el punto de interés. Esto fue realizado para tener constancia de los movimientos orbitales de la boya producidos por el oleaje.

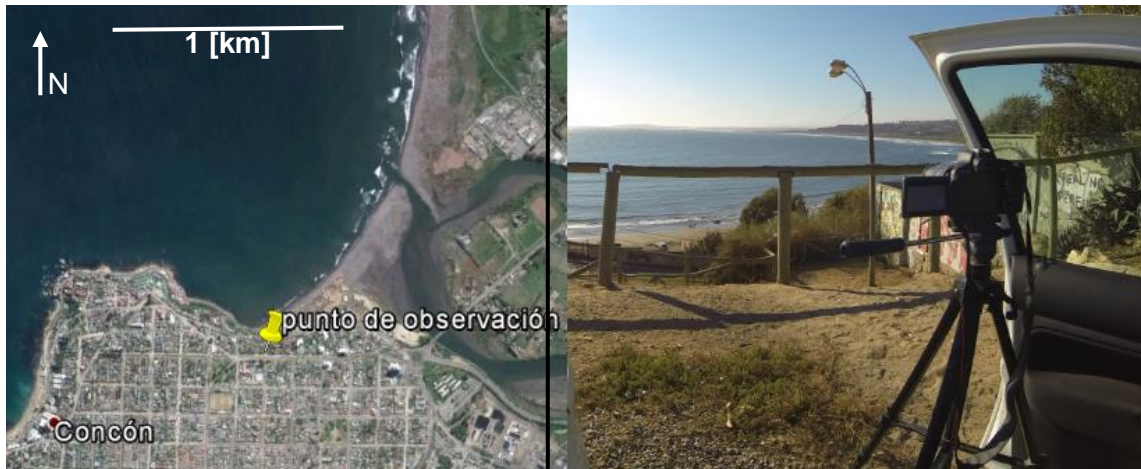


Figura 18: Vista satelital (izquierda) e in situ (derecha), del punto de observación de las boyas. (Fuente: elaboración propia)

Una vez seleccionado el punto de observación (Figura 18), se efectuó el monitoreo de la boya. Debido a la diferencia de altura que existe entre la cámara y la boya de observación, se esperan distorsiones en la imagen producto de la perspectiva. Este problema será observado en 4.2.2.

4.2.1. PREPARACIÓN FOTOGRÁFICA

Se tomó una fotografía a las boyas, utilizando la máxima resolución de la cámara para determinar el tamaño de la boya en el video (Figura 19). Esto se realiza, para transformar el desplazamiento de la boya desde escala de píxeles a una escala real, en metros.

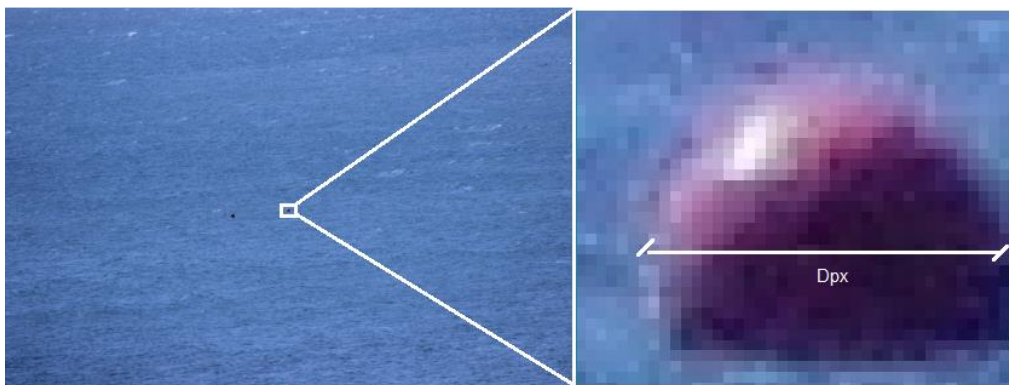


Figura 19: Fotografía a la boya desde el punto de medición (izquierda). Medición del diámetro de la boya en píxeles D_{px} (derecha). (Fuente: elaboración propia).

Obteniendo el diámetro de la boya dentro de la fotografía se elaboró una transformación de escala en donde “1 [px]” corresponde a “X [m]” según:

$$\frac{X [m]}{1 [px]} = \frac{Dr}{D_{px}} \rightarrow X [m] = \frac{Dr}{D_{px}} [px] \quad \text{Eq.21}$$

donde D_{px} corresponde al diámetro de la boya en pixeles y D_r al diámetro de la boya en metros.

El video y la fotografía de la cámara tienen resoluciones máximas distintas (Figura 20). Por esto, se debe corregir la escala del video, en relación a la escala de la imagen mediante la siguiente expresión:

$$D_{vpx} = D_{px} * \frac{H_{video}}{H_{foto}} \quad \text{Eq.22}$$

En donde D_{vpx} , H_{video} y H_{foto} , corresponden al diámetro de la boya en relación al video final, altura del video en pixeles y altura de la foto en pixeles, respectivamente. Como ejemplo, en la Figura 20 se presentan dos imágenes con igual área de visualización, sin embargo, la altura en pixeles de la foto (H_{foto}), es mayor a la altura del video (H_{video}). Para apreciar el desplazamiento de la boya en el video en escala de metros, primero se debe tomar en cuenta la ecuación 22.



Figura 20: Fotografía (izquierda) y video (derecha). Las resoluciones son de 5184 x 3456 y 1920 x 1088 para la fotografía y el video respectivamente. (Fuente: elaboración propia)

Finalmente, el video fue recortado para abarcar un área más pequeña, como se muestra en la Figura 21 (esto resulta en un video más liviano y fácil de procesar). La altura de recorte inicial del video ($H_{recorte}$), es una fracción del video inicial, por lo tanto, no afecta en escala. Sin embargo, si la resolución de corte es muy grande, el video final debe ser modificado para tener una nueva resolución más pequeña (sin afectar el área de visualización del video). Esto resulta en una nueva altura de video (H_{video}'), a la que se le debe asociar un nuevo diámetro de boya (D_{vpx}').

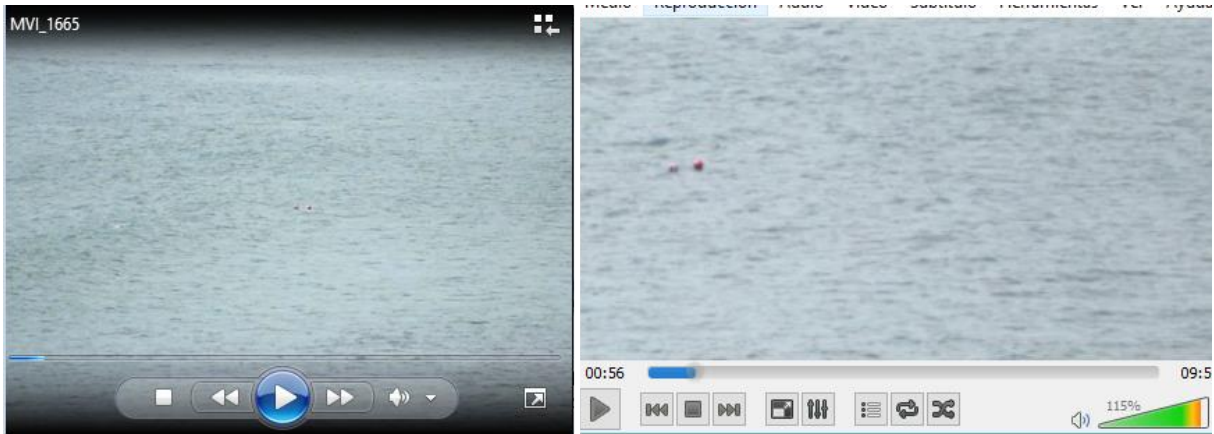


Figura 21: Video inicial (izquierda), y video recortado (derecha). (Fuente: elaboración propia)

En caso que se deba cambiar la escala de resolución del video final (luego de ser recortado), se procede a realizar la siguiente transformación:

$$Dvpx' = Dvpx * \frac{Hvideo'}{Hrecorte} \quad \text{Eq.23}$$

En donde $Dvpx'$, $Hvideo'$ y $Hrecorte$, corresponden al diámetro de la boya en el video final, altura de video final y altura de recorte del video inicial, respectivamente.

4.2.2. PERSPECTIVA

Otro aspecto que se debe corregir de la imagen es el punto de vista de la cámara que corresponde a la dirección desde la que se está observando y la imagen obtenida es un plano perpendicular a esta inclinación (proyección AB en la Figura 22).

Si se quisiera estudiar el desplazamiento vertical de una partícula mediante observación, la dirección ideal del punto de vista, tiene que ser perpendicular a la vertical, de lo contrario, la distancia recorrida observada, sería distinta a la real, debido a la inclinación de observación (comparación entre proyección AB y CB en la Figura 22).

En la Figura 22 se presenta una cámara en altura, observando una boya realizando desplazamientos verticales. F corresponde a la imagen observada por la cámara, que es representada como la proyección AB.

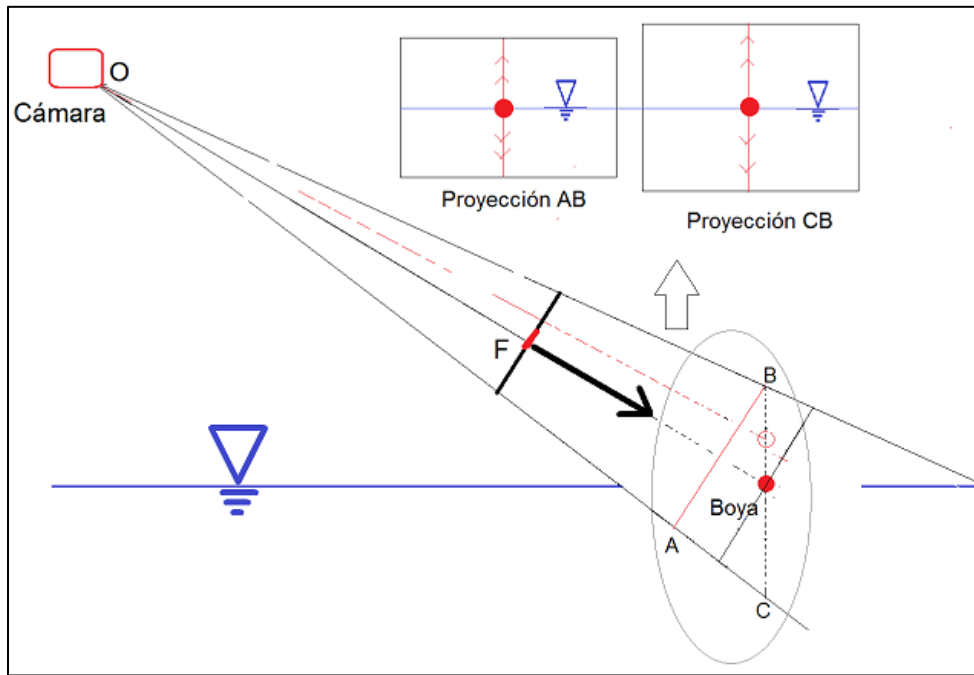


Figura 22: Distorsión en la apreciación del desplazamiento vertical de la boya, ocasionado por la inclinación de la observación. En la imagen, la proyección AB corresponde al desplazamiento de la boya observado por la cámara, mientras que la proyección CB muestra el desplazamiento real. (Fuente: elaboración propia)

Producto de la inclinación con la que se observó la boya, no se puede percibir la escala real de su desplazamiento, por lo que se realizaron correcciones geométricas, para normalizar el desplazamiento observado.

Para la corrección se determinaron los siguientes componentes:

- Inclinación de observación in situ, "a".
- Angulo de apertura de la cámara (especificaciones técnicas Canon) "b".
- Distancia virtual recorrida "Di".
- Distancia real recorrida "Dr".

El ángulo de inclinación del punto de vista, se mide desde el plano horizontal, en el punto de observación hasta el centro de la imagen (Figura 23). Para realizar la transformación, se multiplicó CB/AB, al desplazamiento virtual. Ya que la distancia AB es conocida, se debe determinar la distancia CB utilizando teorema de senos.

$$\sphericalangle A = 90 + \frac{b}{2}, \sphericalangle B = a, \sphericalangle C = 90 - \frac{b}{2} - a \quad \text{Eq.24, 25, 26}$$

$$\frac{CB}{\sin(\sphericalangle A)} = \frac{AB}{\sin(\sphericalangle C)}; CB = \frac{AB \cdot \sin(\sphericalangle A)}{\sin(\sphericalangle C)} \quad \text{Eq. 27}$$

Luego se determina la distancia real recorrida Dr:

$$Dr = Di * \frac{CB}{AB} = Di * \frac{\sin(\sphericalangle A)}{\sin(\sphericalangle C)} \quad \text{Eq.28}$$

En donde $\frac{\sin(\sphericalangle A)}{\sin(\sphericalangle C)}$, es considerado como el parámetro de ajuste, de punto de vista.

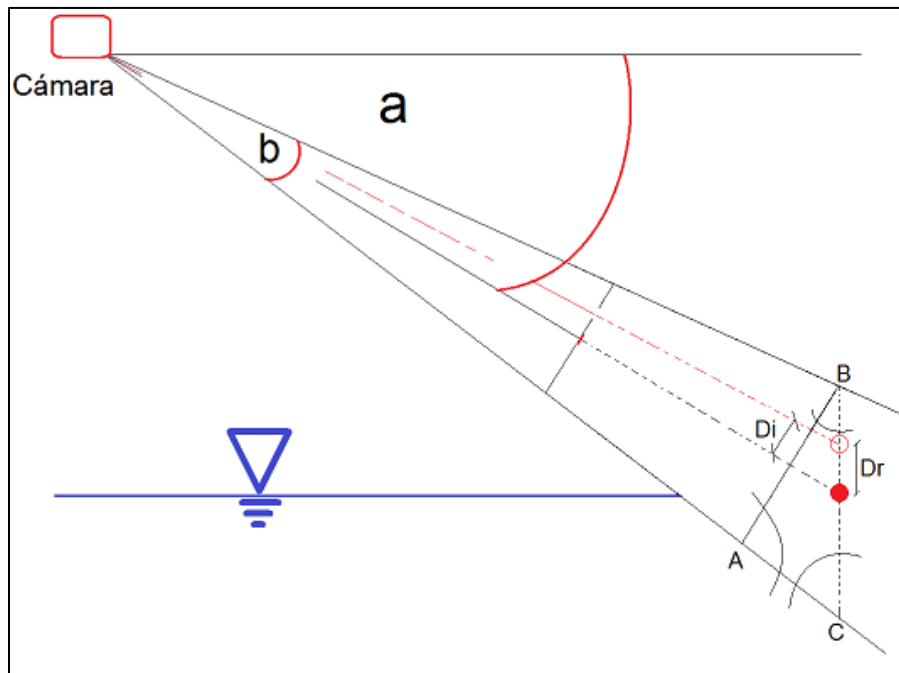


Figura 23: Presentación de los componentes necesarios para realizar el ajuste de perspectiva. (Fuente: elaboración propia)

4.2.3. MEDICIONES

Se tomaron mediciones los días 12, 15, 16 y 18 de octubre del 2015 (Tabla 1 y Tabla 2), durante las cuales se realizaron videos de 10 a 17 minutos de duración, por un periodo aproximado de 1 hora y 40 minutos. Ya que la resolución de los videos es grande, estos fueron recortados y a la vez renderizados. También se aceleró cada video a 1/4 de su duración original, realizando un “Time lapse”, para una mayor eficiencia al momento de ser procesados.

Tabla 1: Resumen de muestreos, días 12 y 15 de octubre del 2015 (Líneas diagonales corresponden a la repetición de los valores en las filas). (Fuente: elaboración propia).

		año	mes	día	hora	min	seg	DR [s]	DA [s]	DR/DA	Resolucion inicial		Resolucion de corte		Resolucion final	
											w	h	w	h	w	h
muestreo 1	toma 1	2015	10	12	16	0	11	599.56	149.89	4	640	480	160	120	160	120
	toma 2				16	10	14	600.72	150.18	4	640	480	160	120	160	120
	toma 3				16	20	16	609.52	152.38	4	640	480	420	315	420	315
	toma 4				16	30	27	648.96	162.24	4	640	480	160	120	160	120
	toma 5				16	41	18	601.16	150.29	4						
	toma 6				16	51	21	736.6	184.15	4						
	toma 7				17	3	39	627.44	156.86	4						
	toma 8				17	14	8	601.56	150.39	4						
	toma 9				17	24	11	638.12	159.53	4						
	toma 10				17	34	50	603.4	150.85	4						
muestreo 2	toma 1	2015	10	15	12	57	34	637.08	159.27	4	1920	1088	480	270	214	120
	toma 2				13	8	13	727.2	181.8	4						
	toma 3				13	20	22	627.72	156.93	4						
	toma 4				13	30	51	658.8	164.7	4						
	toma 5				13	41	51	768.04	192.01	4						
	toma 6				13	54	41	332.96	83.24	4						
	toma 7				14	0	24	771.88	192.97	4						
	toma 8				14	13	19	601.4	150.35	4						
	toma 9				14	23	22	386.16	96.54	4						

En la Tabla 1 y Tabla 2 se muestran los itinerarios de muestreos realizados, en donde se observa la fecha y horas exactas de comienzo, duración (DR), duración acelerada (DA), resolución inicial, resolución de corte y resolución final. Los parámetros “w” y “h” significan ancho y alto del fotograma respectivamente y su unidad está en pixeles.

Es necesario registrar estos datos por que se utilizarán para calcular la escala final en metros de los datos obtenidos del software Tracker.

Tabla 2: Resumen de muestreos, días 16 y 18 de octubre del 2015 (Líneas diagonales corresponden a la repetición de los valores en las filas). (Fuente: elaboración propia)

											Resolucion inicial		Resolucion de corte		Resolucion final	
											w	h	w	h	w	h
		año	mes	dia	hora	min	seg	DR [s]	DA [s]	DR/DA	w	h	w	h	w	h
muestreo 3	toma 1	2015	10	16	15	49	15	611.48	152.87	4	1920	1088	480	270	214	120
	toma 2				15	50	28	622.16	155.54	4						
	toma 3				16	0	52	753.96	188.49	4						
	toma 4				16	13	28	697.76	174.44	4						
	toma 5				16	25	8	634.12	158.53	4						
	toma 6				16	35	43	759.4	189.85	4						
	toma 7				16	48	25	601.32	150.33	4						
	toma 8				16	58	30	749.08	187.27	4						
muestreo 4		año	mes	dia	hora	min	seg	DR [s]	DA [s]	DR/DA	w	h	w	h	w	h
	toma 1	2015	10	18	16	17	18	621.36	155.34	4	1920	1088	480	270	214	120
	toma 2				16	27	41	765.16	191.29	4						
	toma 3				16	40	28	698.96	174.74	4						
	toma 4				16	52	9	620.8	155.2	4						
	toma 5				17	2	31	602.28	150.57	4						
	toma 6				17	12	36	60.64	15.16	4						
	toma 7				17	13	39	655.16	163.79	4						
	toma 8				17	24	36	750.04	187.51	4						
	toma 9				17	37	9	689	172.25	4						
toma 10				17	48	40	137.28	34.32	4							

4.2.4. RECORTE Y RENDERIZADO DE VIDEO

A cada video se le seleccionó una zona específica de 480 x 270 píxeles de resolución. Esto fue realizado con el fin acotar la región de observación en la imagen.



Figura 24: Presentación del recorte y renderizado de video, desde la vista superior (original), a inferior, respectivamente (nota: los colores reales de la última imagen se cambiaron para mejor visualización). (Fuente: elaboración propia).

A la vez, se le aplicaron filtros de color para resaltar los colores de la boya, lo que aumentó la velocidad de análisis en el software Tracker. En la Figura 24 se muestra la imagen inicial,

el recorte y el renderizado del video con resoluciones de 1920x1088, 480x270 y 214x120 pixeles, respectivamente.

4.2.5. SEGUIMIENTO DE LA BOYA

El archivo de video final fue ejecutado en Tracker para registrar el movimiento de la boya, producido por el oleaje (Figura 25).

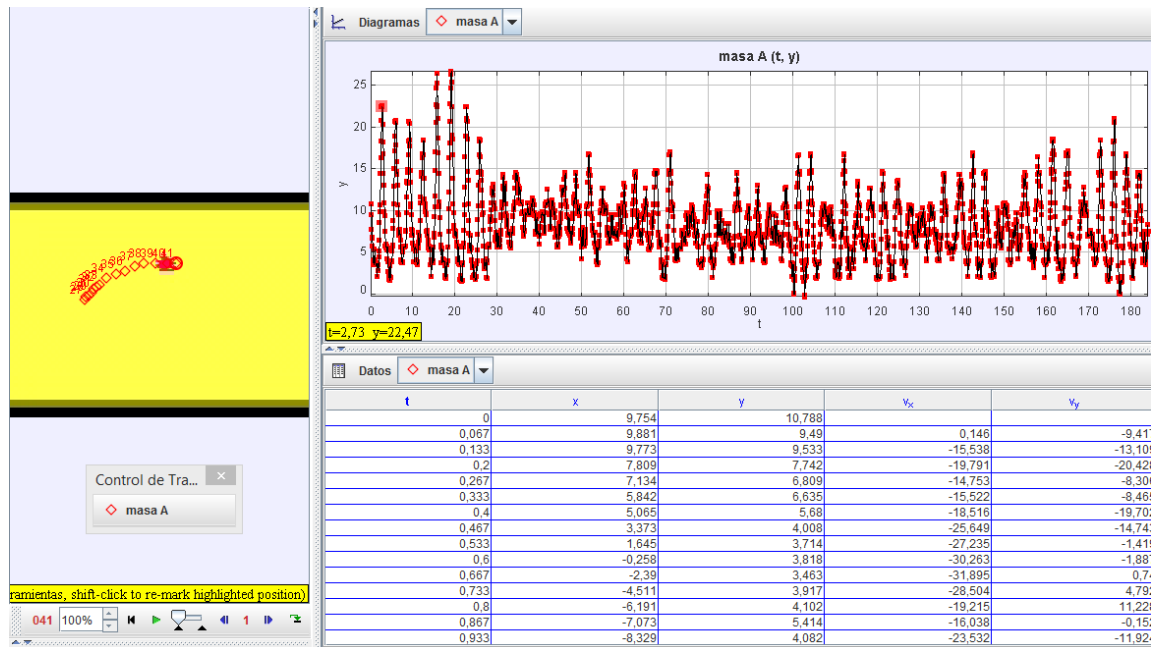


Figura 25: Resultado del seguimiento para el 12 de octubre del 2015, a las 16:51:21s. Duración de muestra: 736.6 s. (Fuente: Elaboración propia)

Del análisis de movimiento realizado en el video, se obtiene altura de ola, desplazamiento horizontal y componentes verticales y horizontales de velocidad en series de tiempo. En la Figura 25, se observa en la esquina superior derecha, la serie de tiempo de alturas del registro y a la izquierda, se muestra como se realiza el seguimiento de la boya. Esta operación se realizó para 4 muestreos con un total de 37 videos y 6.4 horas de grabación.

Los datos son exportados y luego visualizados utilizando MATLAB.

4.3. AJUSTE FOTOGRÁFICO Y PERSPECTIVA

Los datos obtenidos del seguimiento de la boya, son arreglados mediante los ajustes fotográficos y de perspectiva para que estos presenten las características reales del oleaje observado (formulaciones en 4.2.1 y 4.2.2).

4.3.1. AJUSTE FOTOGRÁFICO

El ajuste fotográfico transforma el desplazamiento de la boya en el video (distancia en pixeles), al desplazamiento real (metros). La fotografía se tomó antes de realizar el monitoreo y se modificó su configuración de color para resaltar el área ocupada por la boya (Figura 26).

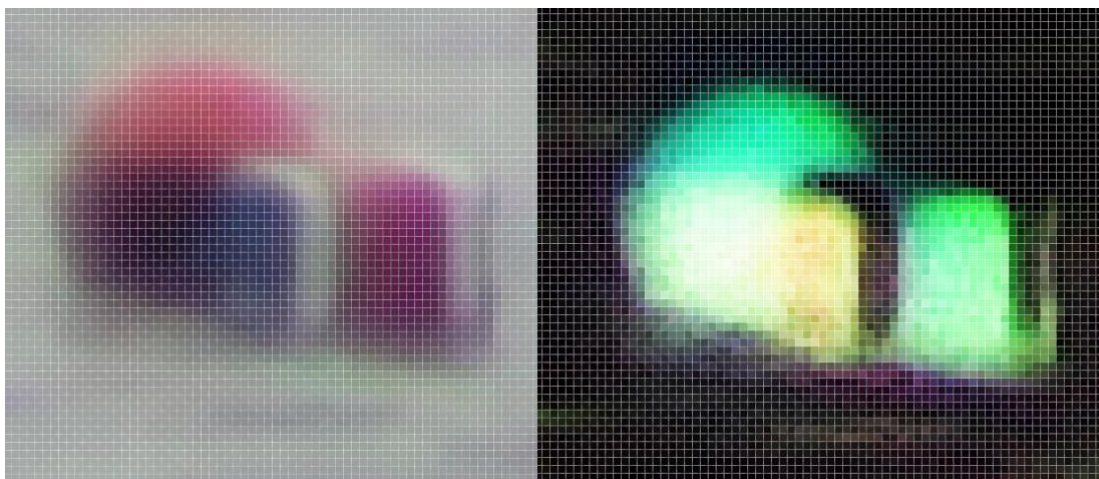


Figura 26: Configuración de contraste de la boya con el resto del ambiente. (Fuente: elaboración propia.)

A la imagen modificada (derecha en Figura 26), se le dibujó una circunferencia envolvente a la boya, para diferenciarla del resto de la imagen (Figura 27), el diámetro de esta circunferencia fue la referencia para determinar D_{px} .

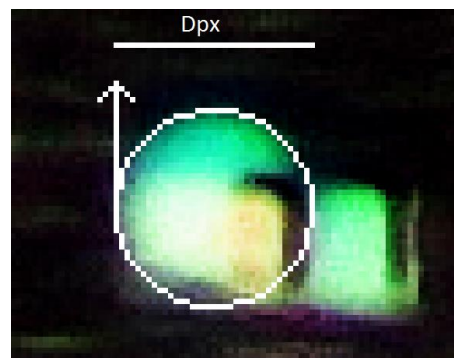


Figura 27: Circunferencia final que logra envolver la imagen de la boya por completo, separándola del resto de la imagen. (Fuente: elaboración propia)

Con este arreglo se calculó el factor de transformación (escala), a los datos de altura del nivel del mar que se obtuvieron del análisis de videos. Con respecto a la confianza del ajuste, se consideró que para este caso Dpx está entre 35 y 37 pixeles. Esto varía el factor de transformación entre 0.0778 y 0.0822, por lo que el error es de -2.7% y +2.8% considerando un Dpx final de 36 pixeles.

Tabla 3: Ajuste fotográfico para muestreo, el 12-10-2015. (Fuente: elaboración propia)

H Foto [px]	3456	Dr [m]	0.4					Escala, 1[px] : "" [m]
		Dpx	Hvideo	Hrecorte	Dvpx			-
muestreo 1	toma 1	36	480	120	5.00			0.08
	toma 2	36	480	120	5.00			0.08
	toma 3	36	480	315	5.00			0.08
	toma 4	36	480	120	5.00			0.08
	toma 5							
	toma 6							
	toma 7							
	toma 8							
	toma 9							
	toma 10							

Tabla 4: Ajuste fotográfico para muestreo, los días 15, 16 y 18-10-2015. (Fuente: elaboración propia)

H Foto [px]	3456	Dr [m]	0.4					Escala, 1[px] : "" [m]
		Dpx	Hvideo	Hrecorte	Dvpx	Hvideo'	Dvpx'	
muestreo 2, 3 y 4	Todas las tomas	36	1088	270	11.33	120	5.037	0.079

4.3.2. AJUSTE DE PERSPECTIVA

El ajuste de perspectiva, corrige la variación en la apreciación del movimiento vertical de la boya, producido por la diferencia de altura que existe entre ésta y la cámara.

En la Figura 28, se esquematiza el enfoque de la cámara, a la zona en donde se encuentran las boyas (circunferencia amarilla). El ángulo de inclinación de la cámara con respecto al plano horizontal, definirá el ajuste de perspectiva, para los datos obtenidos de esta medición.

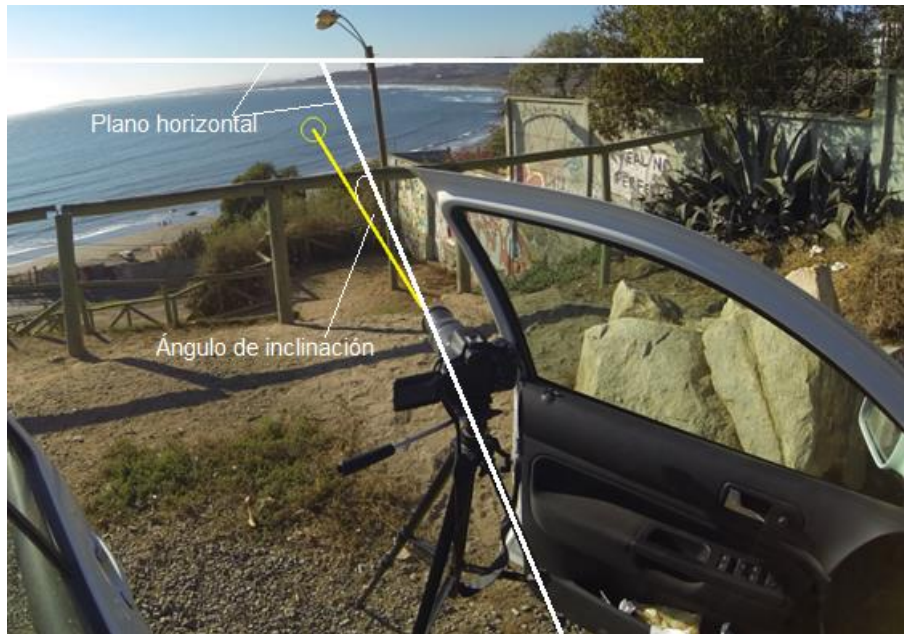


Figura 28: Punto de grabación de la boya. Se puede observar la recta de inclinación de la cámara (línea amarilla) y el plano horizontal tangente a la cámara (líneas blancas). (Fuente: elaboración propia)

Los elementos calculados, correspondientes al ajuste, se muestran en Tabla 5.

Tabla 5: Parámetro de ajuste por perspectiva, junto con los elementos involucrados en su cálculo. (Fuente: elaboración propia)

Altura de imagen (AB) [px]	3456	
Angulo apertura (diagonal) [°]	8.25	
Angulo apertura (vertical) [°]	4.58	"b"
Inclinación de observación (con respecto a la horizontal) [°]	4.2	"a"
$\angle A$ [°]	92.29	
$\angle B$ [°]	4.2	
$\angle C$ [°]	83.51	
Altura real de imagen (BC), [px]	3475.51	
Parametro de ajuste	1.006	

En este caso el ajuste de perspectiva (parámetro de ajuste, Tabla 5), no representa una gran influencia para el valor de la data obtenida, debido a la gran relación que existe entre la distancia y altura de observación.

5. SENSOR DE PRESIÓN

Un sensor de presión es un instrumento que utiliza la presión de la columna de agua sobre éste para determinar la profundidad a la que se encuentra, a un intervalo de tiempo determinado. De esta forma, es capaz de determinar la desnivelación de la superficie del mar y entregar series de tiempo de datos en base a una configuración estipulada por el usuario.

5.1. FONDEO SENSOR DE PRESIÓN

Se cuenta con un sensor modelo TWR-2050 (Figura 29) “Tide and wave recorder” (registro de marea y oleaje). Este corresponde a un instrumento sumergible diseñado para la medición de oleaje y mareas y puede ser montado en cualquier estructura estática y también en el suelo marino.



Figura 29: Sensor de presión, modelo TWR-2050. (fuente: TWR-2050 datasheet).

Este instrumento tiene unas dimensiones de 265 mm de largo y 38 mm de diámetro. En su interior cuenta con el hardware y software que realiza el registro, asimilación y análisis de los datos oceanográficos.

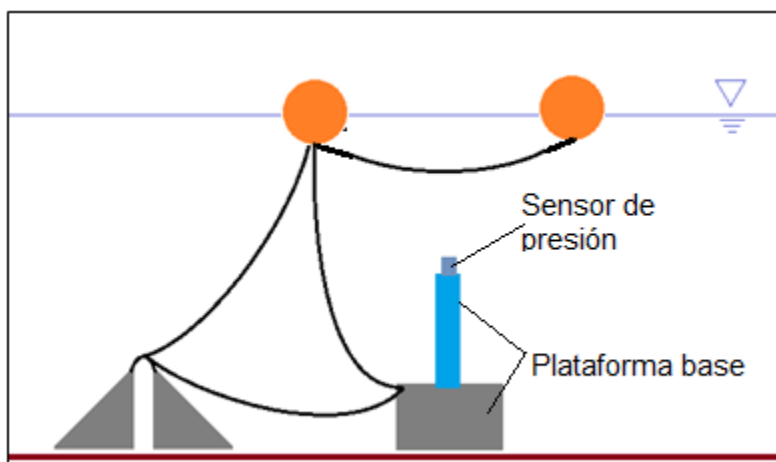


Figura 30: Figura de ubicación del sensor de presión en relación a las boyas. (Fuente: elaboración propia)

El sensor fue instalado al interior de un tubo de pvc, el cual se montó sobre una plataforma de cemento. Debido al gran transporte de sedimentos que ocurre en la zona de estudio, el

sensor de presión se ubicó a 1 m sobre el fondo marino para evitar que quedara sumergido por arena.

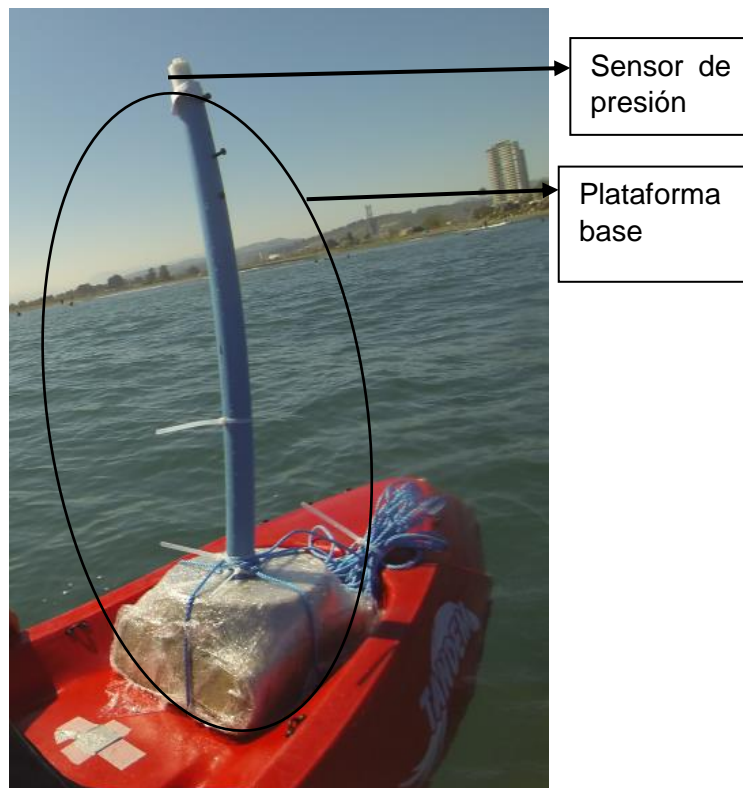


Figura 31: Sensor de presión en su estructura rígida (plataforma base) montado en la parte trasera de la embarcación, en traslado al sitio de fondeo. (Fuente: elaboración propia)

METODOLOGÍA DE FONDEO:

Los elementos necesarios para la actividad de fondeo se presentan según su función:

Navegación (Transporte hacia el sitio de interés):

- Embarcación básica (kayak doble)

Plataforma base:

- Plataforma de cemento para quitasol.
- Tubo de PVC.

Instrumento de medición:

- Sensor de presión.

Maniobras in situ (instalación del sensor en fondo marino):

- Equipo de apnea.

Estos elementos fueron adquiridos en el marco de este proyecto de título, a excepción del equipo de apnea.

Procedimiento:

Se ubicó la plataforma base en la embarcación (Figura 31) y luego se llevó hasta el sitio de interés, en donde se instaló por debajo de la boya de observación.

Se utilizó una cuerda que conectó a la plataforma junto con los muertos para mayor seguridad.

5.2. MUESTREO MEDIANTE SENSOR DE PRESIÓN

Para la realización del muestreo de datos de oleaje mediante el sensor de presión se debe realizar una configuración previa del producto. En este caso, se configuró para que la data registrada fuera adaptable a los resultados obtenidos con el S.P.O.V.

5.2.1. CONFIGURACIÓN DEL INSTRUMENTO

Para preparar el instrumento de medición, se utilizó el software “RBR data loggers” el cual se especializa en configuraciones de instrumentos de medición oceanográficas. La configuración se divide en 2 partes: el tiempo de muestreo (Figura 32) y las características de muestreo (Figura 33).

The screenshot displays the configuration interface for the RBR data logger, specifically the time selection section. It is divided into two main panels: "Start time" and "End time".

Start time panel: Features a calendar for "Octubre-2015". The days of the week are labeled as "lun.", "mar.", "mié.", "jue.", "vie.", "sáb.", and "dom.". The dates 28, 29, 30, 1, 2, 3, 4 are in the first row; 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 in the second; 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 in the third; 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 in the fourth; 26, 27, 28, 29, 30, 31, 1 in the fifth; and 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 in the sixth. The date 12 is highlighted with a blue circle. Below the calendar is a time selection dropdown menu set to "16:00:00" and a "Now" checkbox.

End time panel: Features an identical calendar for "Octubre-2015". The date 19 is highlighted with a blue circle. Below the calendar is a time selection dropdown menu set to "16:00:00".

Estimates: memory usage is 74.3%
battery usage is 217mAH.

Wave analysis bandwidth: 0.0020 to 0.2244 (Hz) - Wave periods 4.46 to 512.00 (secs)

Figura 32: Configuración de tiempo de muestreo. (Fuente: Elaboración propia)

Tiempo de muestreo: En esta parte de la configuración se determina la fecha y hora exacta, de inicio y término de la medición (“Start time” como inicio y “End time” como término). En la parte inferior de la imagen se encuentra la información sobre la estimación de memoria y batería consumida en el tiempo de muestreo como “memory usage” y “battery usage” respectivamente.

The image shows a configuration window with three main sections: Deployment plan, Tide Data, and Wave Data. The Deployment plan section includes two input fields: 'Expected mean depth of water (m)' with a value of 10.00 and 'Expected height of logger above seabed/river bed (m)' with a value of 1.00. The Tide Data section includes a dropdown for 'Rate for both Tide and Wave Data' set to 4Hz, a time input for 'Sample Period for Tide' set to 00:10:00, a checked checkbox for 'Enable averaging', and a time input for 'Averaging Time for Tide' set to 00:01:00 @ 4Hz. The Wave Data section includes a checked checkbox for 'Enable wave data', a time input for 'Sample Period for Waves' set to 00:10:00, and a dropdown for 'Burst Length' set to 2048 samples @ 4Hz.

Figura 33: Configuración de instalación, muestreo de mareas y muestreo de oleaje. (Fuente: Elaboración propia)

Características del muestreo: Estas se dividen en tres partes:

- Plan de instalación (Deployment plan): profundidad en el sitio de interés, altura del sensor sobre el suelo marino.
- Datos de marea (Tide data): periodo de muestra, periodo de promediado.
- Datos de oleaje (Wave data): periodo de muestreo, ráfaga de medición por muestreo.

Se configuró el sistema de medición para obtener características detalladas de oleaje comparables al S.P.O.V, por lo que se realizaron ráfagas de 2048 datos de altura de oleaje, cada 10 minutos, a 4 Hz, por una semana de muestreo.

5.2.2. ACTIVACIÓN

Una vez realizadas las configuraciones necesarias, se activó el software interno (Figura 34), para que el sensor comenzara su funcionamiento a la fecha y hora estipulada por el usuario. Este se apagaría automáticamente en el momento especificado por el plan del registro.

RBR Logger - Setup

Essential features		Advanced features	
Logger:	RBR TWR-2050 0.00 000010	Tide and Wave Modes	
Host time and date	2016/Mar/01 16:14:29	Sampling period for Tide	00:10:00
Logger time and date	2016/Mar/01 16:14:29	Rate for both Tide and Wave Data	4Hz
Start of logging	2015/Oct/12 16:00:00	Averaging time for Tide	240 seconds
End of logging	2015/Oct/19 16:00:00	Wave settings	2048 samples every 00:10:00
Memory usage			
Logger status			
<input type="button" value="Enable logging"/> <input type="button" value="Cancel"/>			

Figura 34: Resumen de configuración del sensor. (Fuente: Elaboración propia)

Se configuró el sensor de presión para iniciar el muestreo el día 12 de octubre de 2015, a las 16:00:00, para lo que fue instalado el día anterior. El sensor de presión se mantuvo activo hasta el día 19 de octubre de 2015 hasta la misma hora. Durante este periodo el sensor de presión tomó 2048 datos de oleaje a una frecuencia de 4 Hz cada diez minutos, lo que significa que entregó 512 [s] de datos de oleaje y 88 [s] de data vacía cada 10 minutos y por una semana (un ejemplo de data vacía es observado en la Figura 36).

5.2.3. MEDICIONES

El sensor de presión permanece por debajo de las boyas en el fondo marino. El instrumento determina la presión según la frecuencia de lectura estipulada en la configuración, para luego estimar la desnivelación de la columna de agua, asociada a un cierto valor de presión. Esto puede ser interpretado como variaciones del nivel del mar.

Una vez retirado el sensor del sitio de interés, este es conectado en un computador, para extraer los datos obtenidos durante el periodo de muestreo. Utilizando el programa RBR se obtienen los resultados de las mediciones y también parámetros de resumen sobre altura, periodo de oleaje y energía de ola, cada 10 minutos de medición (Figura 35).

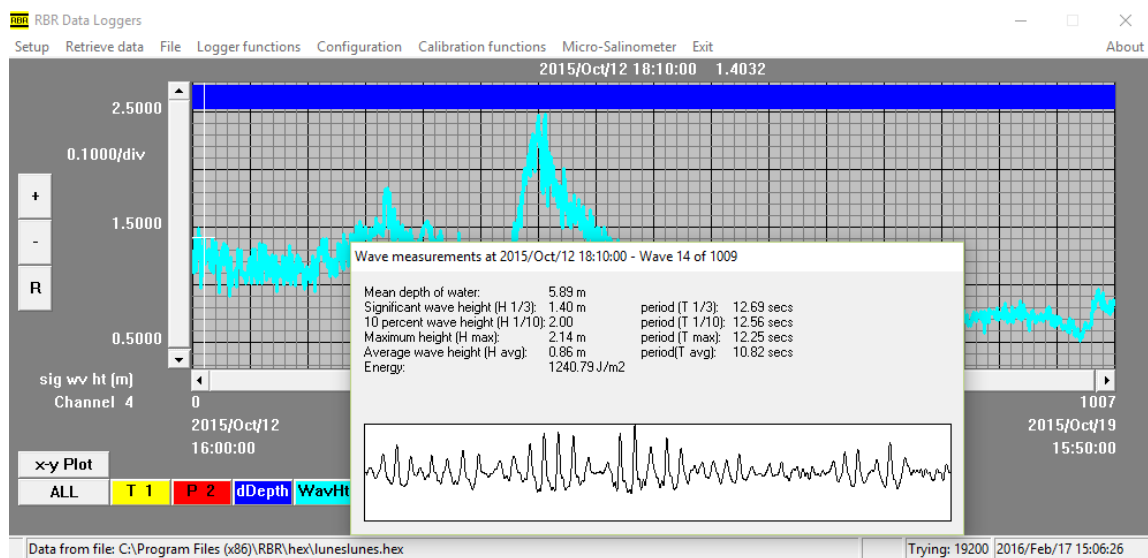


Figura 35: Visualización de datos por muestreo del sensor de presión, utilizando RBR data loggers. (Fuente: Elaboración propia)

6. RESULTADOS S.P.O.V

El monitoreo de la boya entrega su posición, en el plano $p(x, y)$ de la proyección AB (Figura 22), en un tiempo determinado. A partir de esta medición se obtienen desplazamientos verticales y horizontales de la boya.

6.1.1. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE LA BOYA

Las mediciones realizadas por el S.P.O.V (desplazamientos verticales), presentaron gran semejanza con las obtenidas mediante el sensor de presión, según se observa en la Figura 36 y la Figura 37.

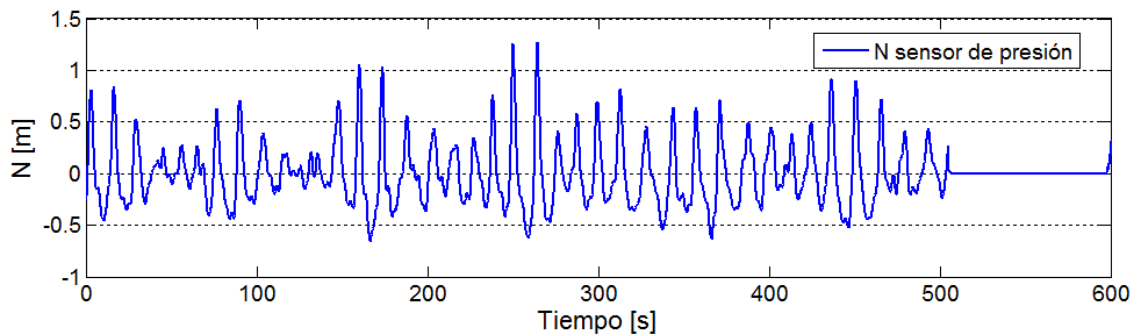


Figura 36: Primeros 10 minutos de variaciones del nivel del mar (N) obtenido por el sensor de presión el 12-10-2015. (Fuente: elaboración propia).

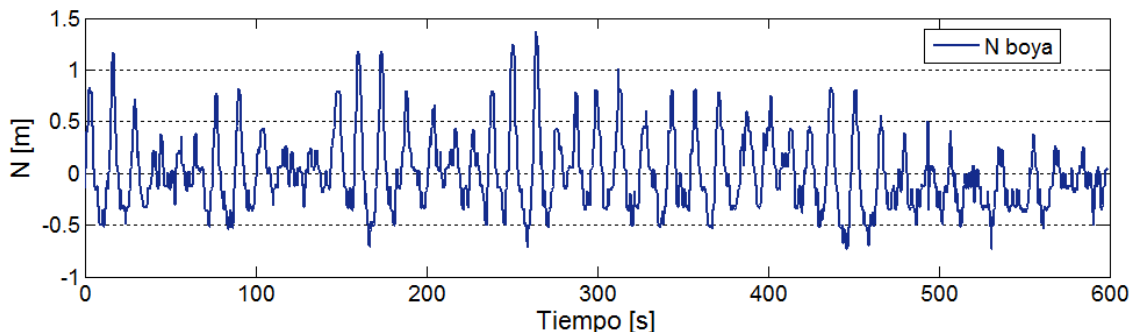


Figura 37: Primeros 10 minutos de variaciones del nivel del mar (N) obtenido por el S.P.O.V el 12-10-2015. (Fuente: elaboración propia).

En algunas series de datos, se observa una tendencia del nivel medio del agua (Figura 38). Esta tendencia corresponde al desplazamiento de la boya de forma transversal a la imagen de la cámara, lo que da la impresión de un aumento en el nivel medio del mar cuando ésta se aleja en la imagen y una disminución cuando se acerca, debido a las corrientes. Esto se debe a que la cámara está observando a las boyas desde una posición de altura (demostración en 6.2).

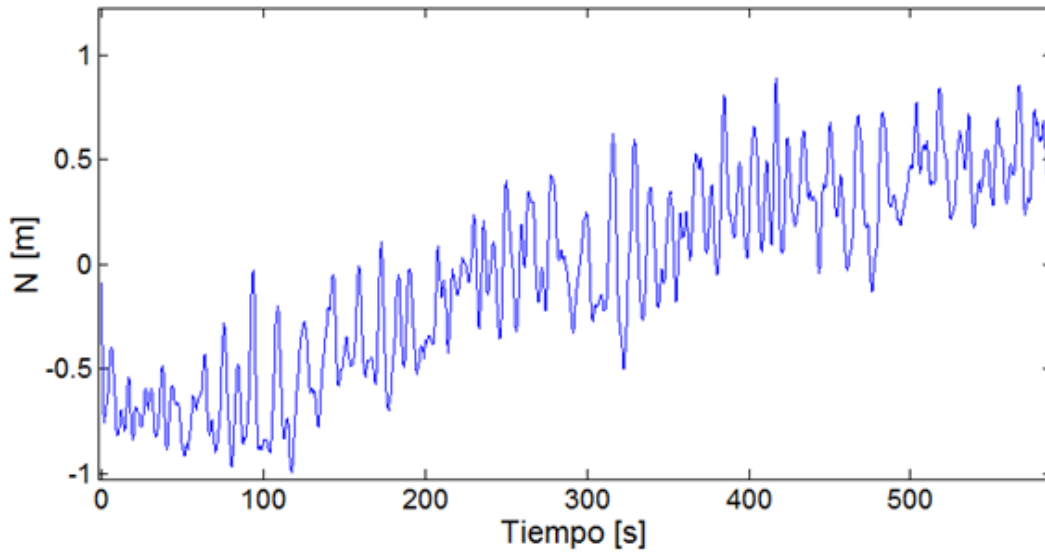


Figura 38: Fragmento de medición del 18-10-2015. (Fuente: elaboración propia).

6.1.2. DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES DE LA BOYA

Los desplazamientos horizontal y vertical de la boya, son producto del movimiento ondulatorio de partículas provocados por el oleaje. Combinando estos desplazamientos registrados por el S.P.O.V, podemos obtener la gráfica de la trayectoria total de la boya durante el periodo de medición (Figura 39).

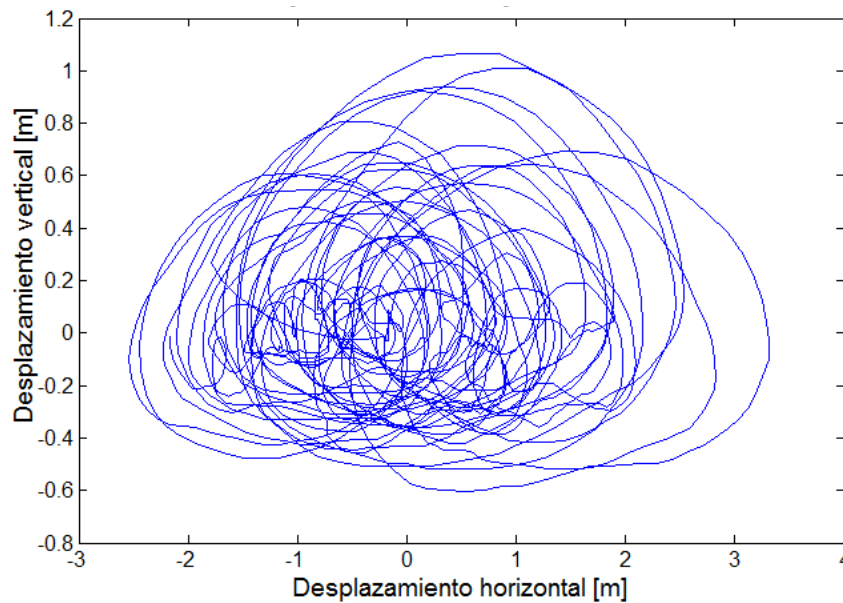


Figura 39: Trayectoria de la boya (movimiento en sentido horario), producida por el oleaje en 10 minutos de medición. (Fuente: elaboración propia)

Se puede rescatar que el centro de cada ondulación (en donde ξ y ζ son iguales a 0, véase 3.1.3.2) es aleatorio debido a que el oleaje es irregular; esto significa que cada ola es medida en un punto físico distinto, a diferencia de un sensor de presión, que mide todas las variaciones del nivel del mar en un punto fijo. Producto de este fenómeno se producen estiramientos, contracciones y desfases en la serie de tiempo de oleaje registrada por el S.P.O.V respecto de las medidas con el sensor.

Los distintos centros de ondulación son mejor presentados en una serie de tiempo de desplazamientos horizontales (Figura 40).

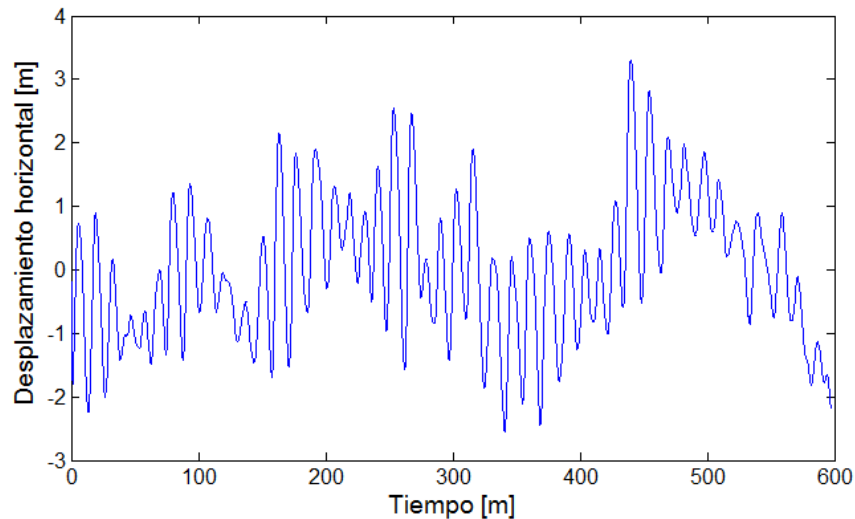


Figura 40: Desplazamientos horizontales de la boya con respecto al tiempo (misma data de la Figura 39). (Fuente: elaboración propia).

Si se divide una ola entre cresta y valle, cada movimiento en la dirección positiva corresponde a una cresta de ola, mientras que cada movimiento en el sentido negativo, correspondería a un valle de ola (Figura 40). Se observan distintos centros de ondulaciones para los distintos trenes de oleaje identificados. El desplazamiento de los centros de ondulación de la boya se atribuye principalmente al transporte de masa y a las distintas características de oleaje que se presentan en un tiempo dado, lo que produce distintas magnitudes de corrientes en el sentido positivo y negativo, en relación a la dirección de propagación del oleaje.

6.1.3. OBSERVACIONES

La revisión de resultados del S.P.O.V resultó en 2 observaciones importantes:

- Tendencia de nivel medio en desplazamientos verticales: esta tendencia es producida por el desplazamiento de la boya, de forma transversal, a la vista de la cámara. Este tema será abordado en la sección 6.2.
- Variación en centros de ondulación de cada ola, junto con los constantes desplazamientos horizontales de la boya, producen un estiramiento, estrechamiento

y desfase en la serie de tiempo de oleaje. Este tema será abordado en la sección 6.3.

6.2. TENDENCIA DEL NIVEL MEDIO EN DESPLAZAMIENTOS VERTICALES

Las tendencias encontradas en la serie de tiempo de oleaje deben ser corregidas para su análisis en el futuro. Debido a que la causa de estas tendencias está directamente relacionada al uso del S.P.O.V, se explicará su generación y un método aceptable para su corrección.

6.2.1. TEORÍA Y DEMOSTRACIÓN

Por efecto explicativo, se considerará un sistema en el que una boya en una superficie de agua es afectada por oleaje y corrientes de direcciones perpendiculares entre sí (Figura 41). En este sistema se consideran tres trenes de oleaje con los periodos T1, T2 y T3 y se suponen los siguientes movimientos en la boya en el plano X, Y respecto al tiempo:

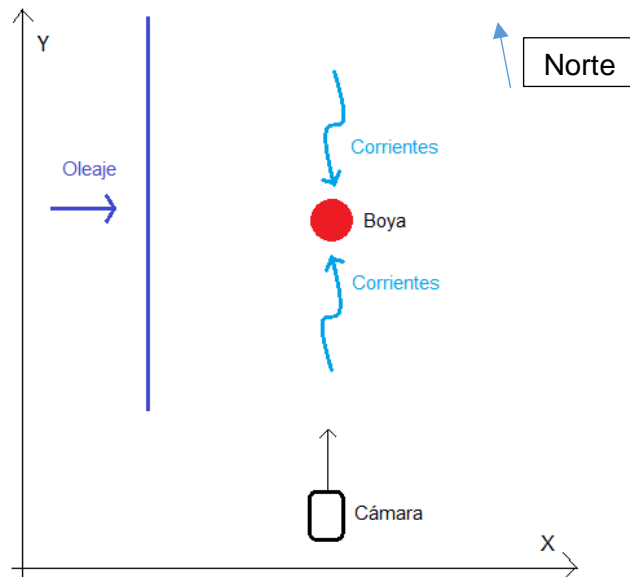


Figura 41: Boya en presencia de oleaje y corrientes de direcciones perpendiculares entre sí, observados con la cámara de video. (Fuente: elaboración propia).

- T1: desplazamiento en X+ por oleaje, no hay desplazamiento en Y (Ya).
- T2: desplazamiento en X+ por oleaje y desplazamiento en Y+ por corrientes (Yb).
- T3: desplazamiento en X+ por oleaje y desplazamiento en Y- por corrientes (Yc).

La posición inicial de la boya en T1, T2 y T3 en el plano Y, Z se presenta en la Figura 42 desde el punto de vista de la cámara, la proyección F resulta en una imagen con un eje vertical alternativo Z', que es sensible a los movimientos de la boya en Z y en Y.

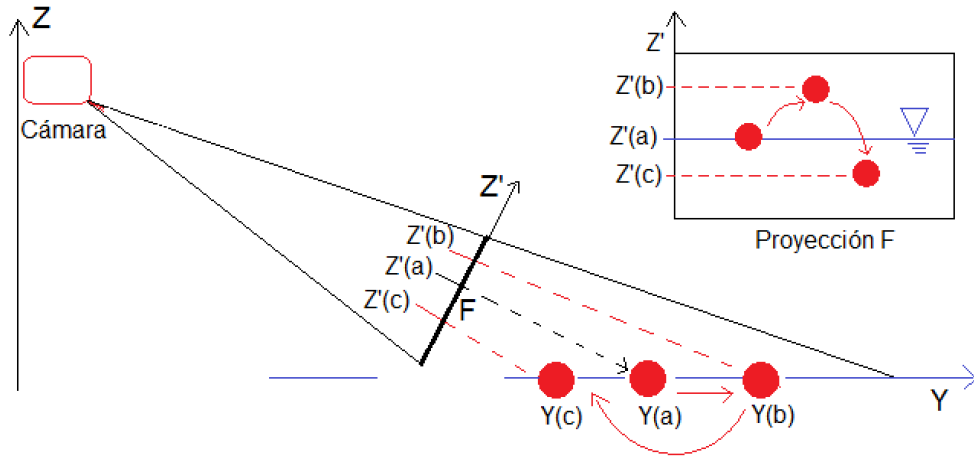


Figura 42: Proyección del movimiento de la boya captado por cámara según el punto de vista. (Fuente: elaboración propia).

Es por esta razón que los movimientos de la boya en el eje Y son interpretados en la cámara como variaciones en el eje Z', es decir, variaciones de altura.

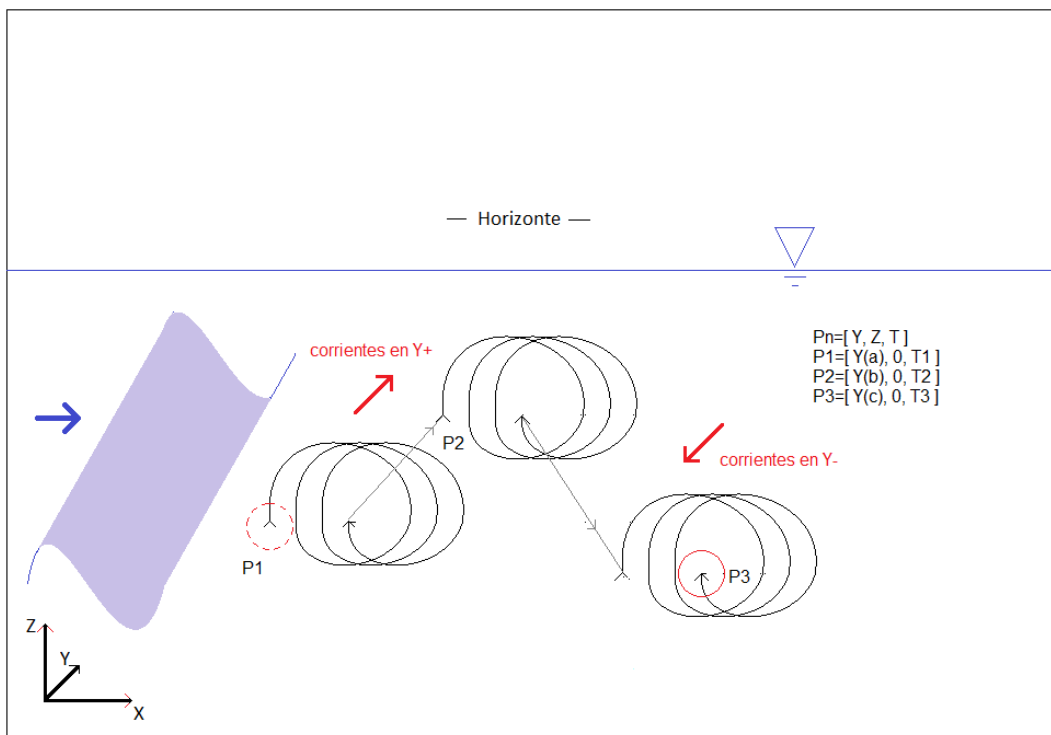


Figura 43: Trayectoria de la boya, observada desde el punto de vista de la cámara, en donde los vectores azul y rojos corresponden a dirección del oleaje y corrientes de agua, respectivamente. (Fuente: elaboración propia).

Al observar este sistema desde el punto de vista de la cámara (Figura 43) se obtiene el registro de la trayectoria de la boya producto de los trenes de oleaje y las corrientes en el plano de la proyección F (Figura 42). Éste consiste en el eje horizontal X y el eje vertical Z' que está compuesto por la combinación entre el eje Z e Y.

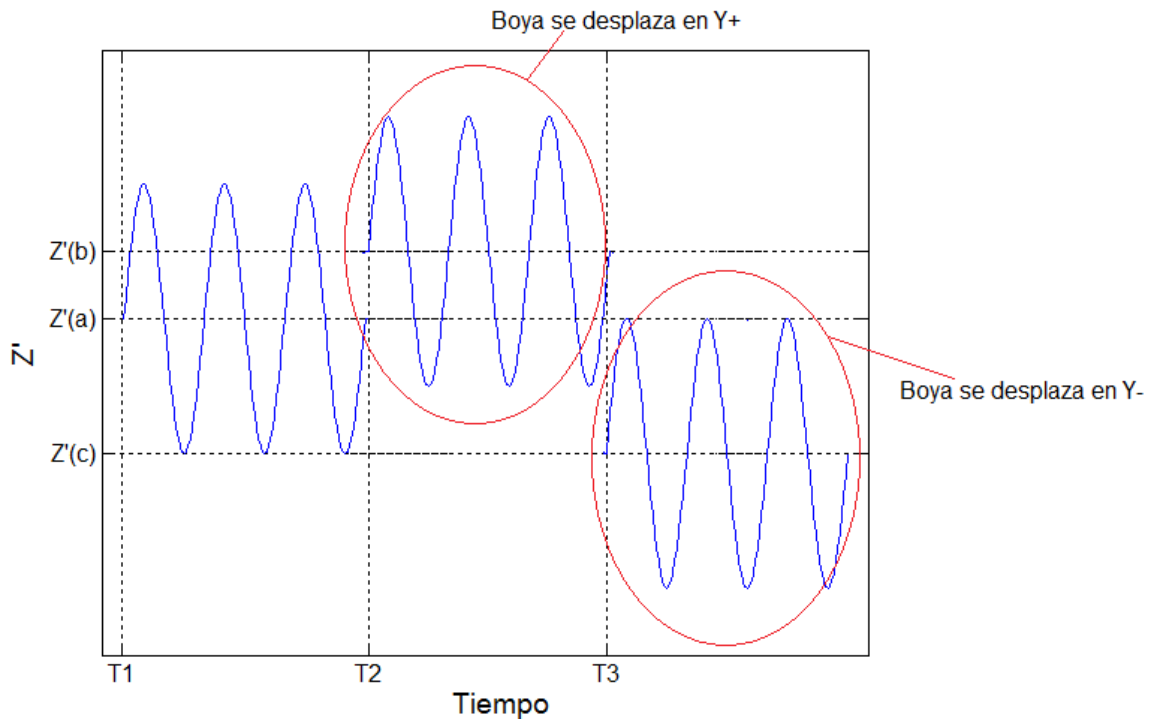


Figura 44: Desplazamientos de la boya proyectados en Z'. (Fuente: elaboración propia).

Finalmente, desde el punto de vista de la cámara (plano X, Z'), las variaciones del nivel del mar observadas en la trayectoria total de la boya (Figura 43) van a ser interpretadas como se muestra en la Figura 44 (serie de tiempo de Z').

Este efecto de deriva, puede ser observado en una serie de desnivelaciones, con tendencia pronunciada (Figura 45) en comparación con las imágenes de video inicial y final de la toma correspondiente (Figura 46).

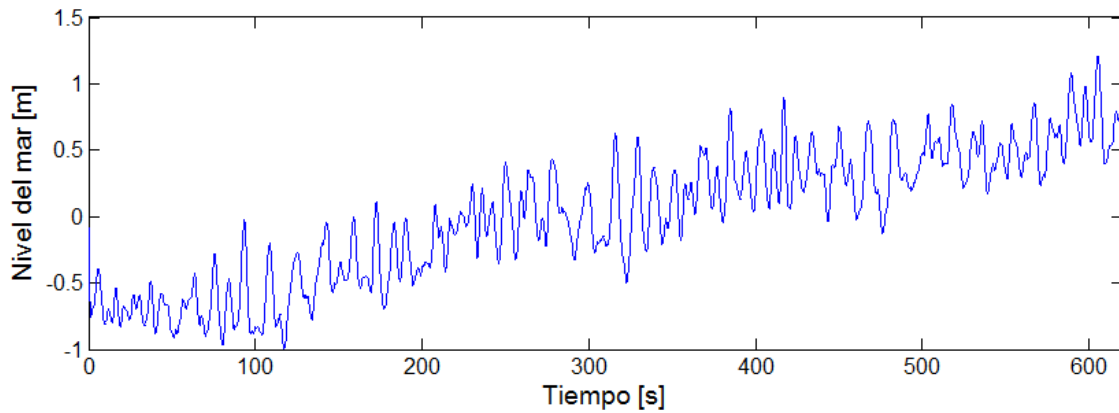


Figura 45 : Variaciones del nivel del mar captadas en la toma 1 del muestreo 4. (Fuente: elaboración propia)

La tendencia de nivel medio del agua observada en la Figura 45, es en realidad una deriva de la boya en dirección Y+ de aproximadamente 20 [m]. Esta deriva, fue calculada basándose en la inclinación del punto de vista (Tabla 5), y el desplazamiento de la boya proyectado en Z' según P1 y P2 (Figura 46).

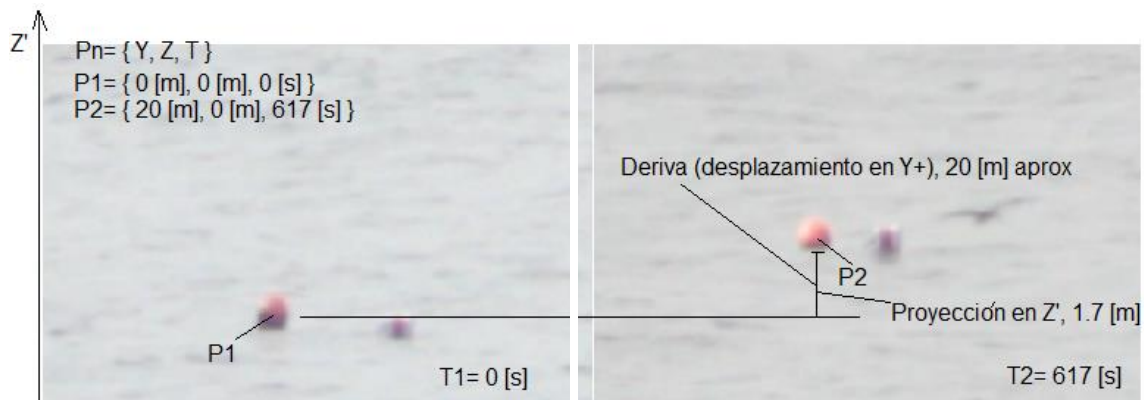


Figura 46: Imágenes obtenidas desde la cámara al inicio y termino de la toma 1 del muestreo 4. (Fuente elaboración propia).

La diferencia que existe entre los desplazamientos de la boya en Y proyectados en Z' y las variaciones de marea, está en la diferencia de periodos entre ambos, ya que los desplazamientos en Y ocurren en periodos de tiempo mucho más reducidos (segundos) a lo que son los periodos de marea (horas).

6.2.2. SOLUCIÓN

La solución para eliminar la tendencia en la serie corresponde a un proceso simple, en el cual se identifican las tendencias a lo largo de la data y se corrige en relación a la recta de tendencia detectada.

El primer paso es dividir la serie de datos en conjuntos iguales e identificar las tendencias en éstos (Figura 47).

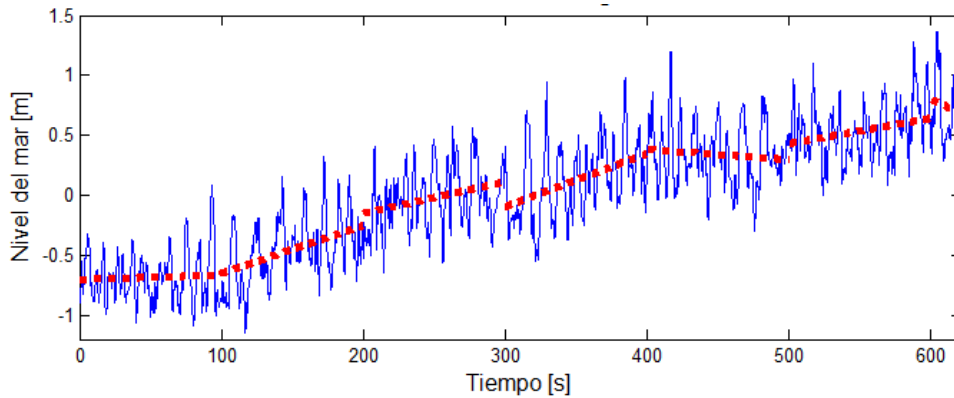


Figura 47: Variaciones del nivel del mar y sus rectas de tendencia, en los periodos especificados. (Fuente: elaboración propia).

Luego se generan rectas de tendencia en los conjuntos y se corrige cada dato según la línea de tendencia correspondiente.

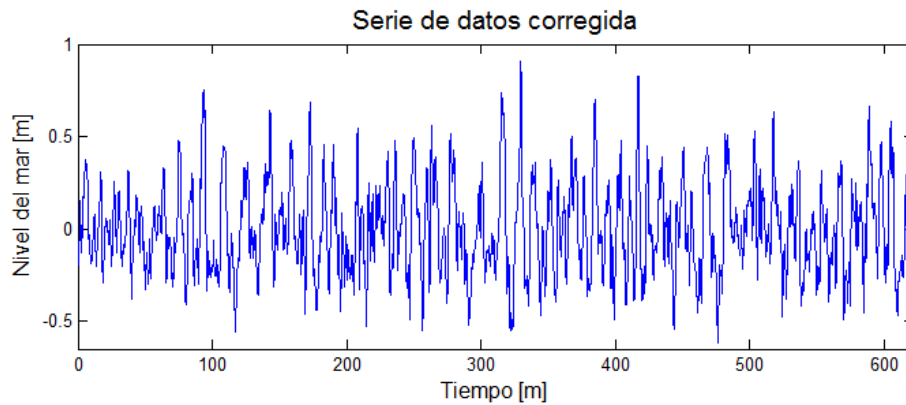


Figura 48: Serie de datos corregida mediante el proceso demostrado en la Figura 47. (Fuente: elaboración propia).

Una vez terminado el proceso de eliminación en tendencias, se obtiene la serie corregida, como se muestra en la Figura 48. Un método más exacto para corregir la tendencia es el uso de un filtro de media móvil, sin embargo, la solución ejecutada entregó resultados satisfactorios.

6.3. ESTIRAMIENTO, ESTRECHAMIENTO Y DESFASE

Un estiramiento, estrechamiento o desfase en la serie de datos, corresponde a una distorsión de las mediciones por el S.P.O.V. Esta distorsión afecta a los periodos de ola calculados tanto con técnicas de análisis en el dominio del tiempo como en la frecuencia y está relacionada con los movimientos orbitales de la boya (Figura 3).

6.3.1. MOVIMIENTOS ORBITALES

Se presenta un caso en el que tres olas se propagan en dirección a una boya en reposo (Figura 49).

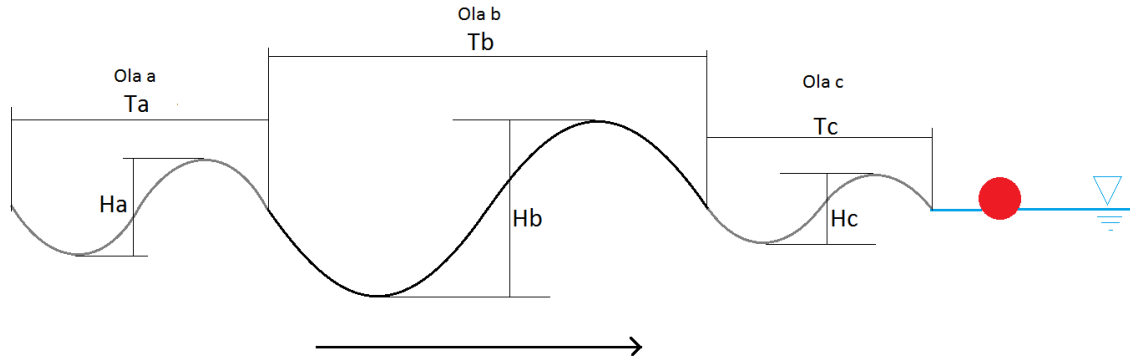


Figura 49: Conjunto de olas de alturas H_a , H_b , H_c y periodos T_a , T_b y T_c , propagándose en dirección a una boya en reposo. Se asume ausencia de superposición de ondas. (Fuente: elaboración propia).

El paso del grupo de olas por la boya se esperaría en un tiempo igual a la suma de los periodos T_a , T_b y T_c y el movimiento inducido en la boya durante este tiempo presentaría trayectorias orbitales con un centro definido (Figura 50).

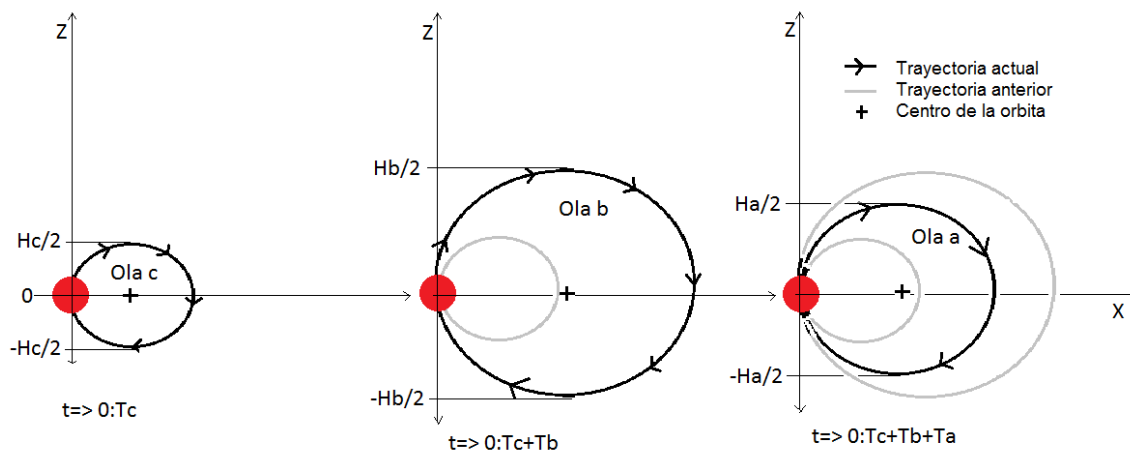


Figura 50: Trayectorias orbitales de la boya producto de las olas observadas en la Figura 49. La esquematización de la trayectoria está dividida en tres fases de tiempo, entre 0 y T_c (ola c), entre 0 y T_c+T_b (ola b) y entre 0 y $T_c+T_b+T_a$ (ola a) (de izquierda a derecha). (Fuente: elaboración propia).

De acuerdo a la teoría lineal, la trayectoria de la boya sería una orbital con altura H_c inicialmente, luego una segunda orbital con altura H_b y finalmente una tercera orbital de altura H_a . Todos estos movimientos comienzan y terminan en el origen $X = 0$ y $Z = 0$. La trayectoria de la boya con respecto al tiempo, se muestra en un Figura de 3 dimensiones (Figura 51) en donde se observa el movimiento según el paso de las olas c, b y a.

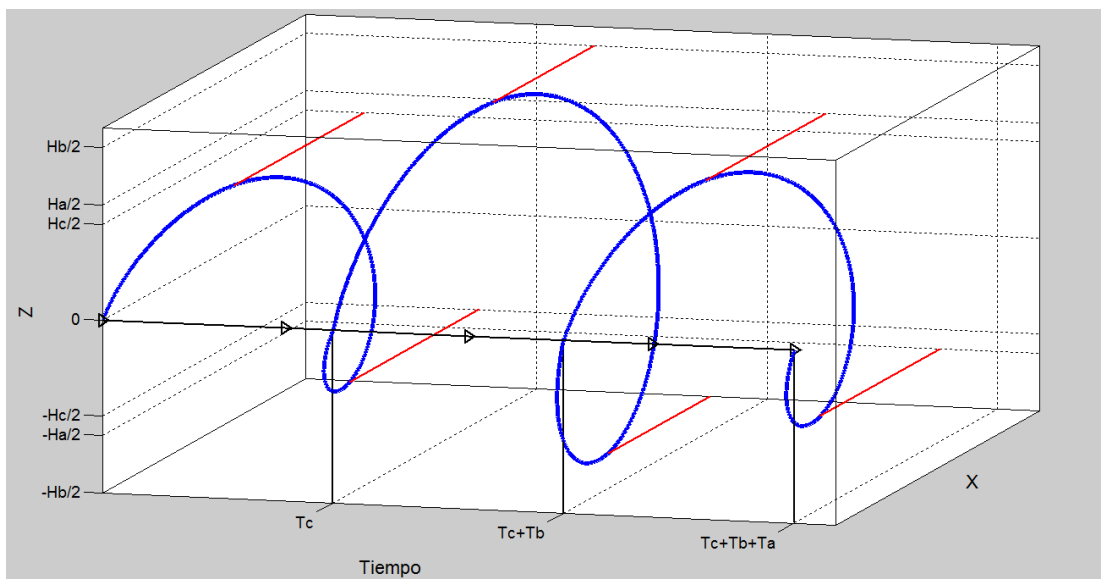


Figura 51: Evolución del movimiento orbital de la boya con el paso de las olas c, b y a. (Fuente: elaboración propia).

Ésta es la trayectoria que se espera de la boya en el tiempo y es el resultado obtenido por el S.P.O.V.

A continuación, a modo de explicación se expone la diferencia de medición entre el sensor de presión y el S.P.O.V.

Una medición de oleaje realizada por el sensor de presión (euleriana) registra variaciones del nivel del mar en un punto fijo, según la expresión:

$$z_p(t, x_p) - h = n_p$$

Por otra parte, el S.P.O.V realiza mediciones de forma lagrangiana, es decir, registra la posición de la boya en un plano con respecto al tiempo:

$$P_b(t, x_b, z_b)$$

Cuya componente vertical es:

$$z_b(t) = n_b$$

En donde:

- z_p es altura del nivel del mar, con respecto al sensor de presión.
- x_p es constante.
- t es el tiempo.
- h es la distancia entre el fondo y el nivel medio del agua.
- n_p es el desnivel de la superficie de agua medida por el sensor de presión.
- P_b es la posición de la boya en el plano (x_b, z_b) con respecto al tiempo.

- z_b es el componente vertical de posición de la boya.
- x_b es el componente horizontal de posición de la boya.
- n_b es el desnivel de la superficie del agua, medida por el S.P.O.V.

Un sistema en donde una ola de altura H y periodo T se propaga en dirección a la boya y el sensor de presión (Figura 52), resultaría en dos series de tiempo de oleaje distintas (Figura 54).

Debido a que la boya es trasladada en la dirección de propagación del oleaje (ambos sentidos), existe una diferencia en la velocidad relativa de la ola respecto a los elementos de medición. En la cresta, la ola se desplaza más rápido sobre el sensor de presión y más lento sobre la boya (estiramiento en la serie). Lo contrario ocurre con el valle, en donde la ola es más rápida en la boya y más lenta en el sensor de presión (estrechamiento en la serie). Esta variación en la velocidad relativa es producto de los movimientos orbitales de la boya. Un ejemplo de estiramiento se muestra en las series de la Figura 54, en donde n_p corresponde a la serie normal y n_b a la serie estirada. El proceso de medición de la cresta de la ola por ambos métodos es observado en la Figura 53.

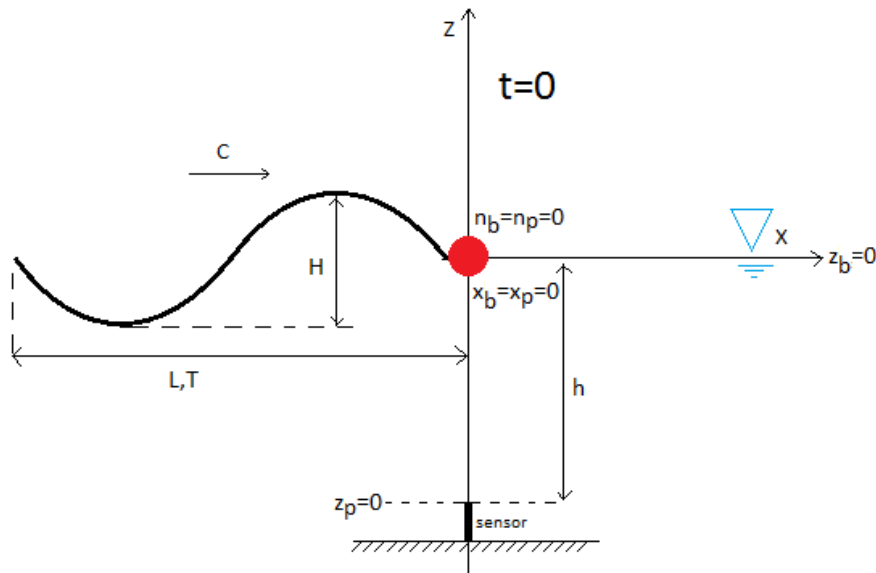


Figura 52: Boya y sensor de presión en $t = 0$, con una ola de periodo T , longitud de onda L y altura H , propagándose en dirección a éstos. (Fuente: elaboración propia)

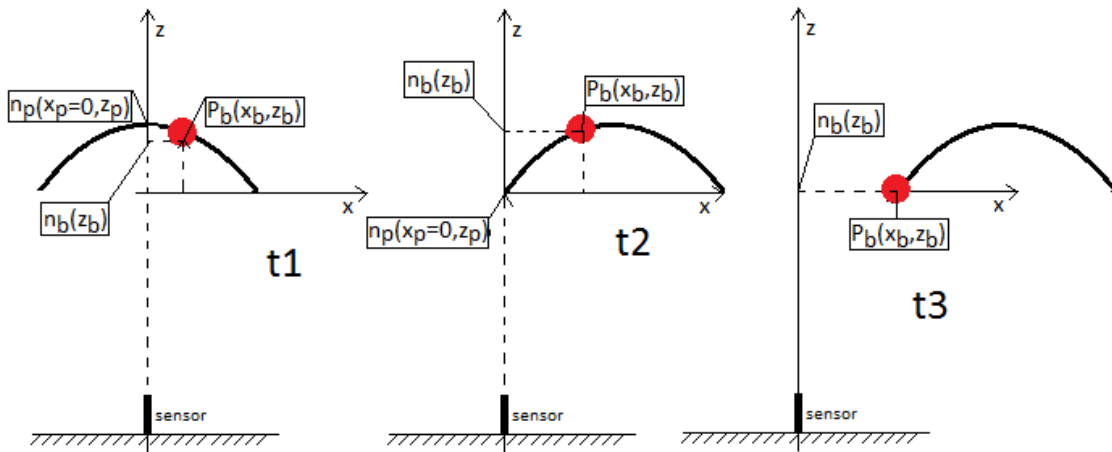


Figura 53: Comparación entre el sensor de presión (medición euleriana) y el S.P.O.V (medición lagrangiana). (Fuente: elaboración propia).

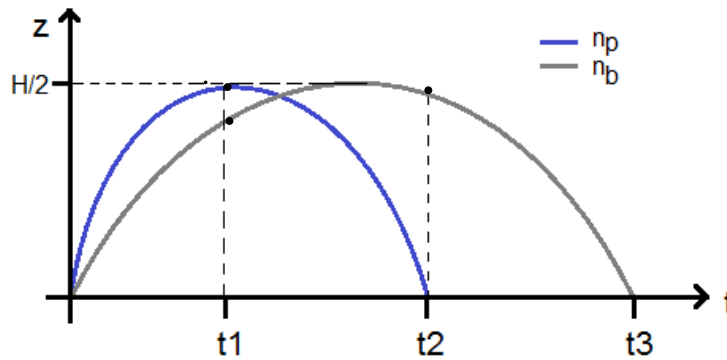


Figura 54: Series de tiempo resultantes de la medición de la cresta de ola en la Figura 52. (Fuente: elaboración propia)

6.3.2. CONCLUSIÓN

A pesar de que existe una distorsión en el tiempo de los datos entregados por el S.P.O.V, en la práctica no existe una gran influencia en el resultado final de los datos de oleaje. Esto se demuestra mediante una comparación entre los resultados del sensor de presión y el S.P.O.V (Figura 55, Figura 56 y Figura 57).

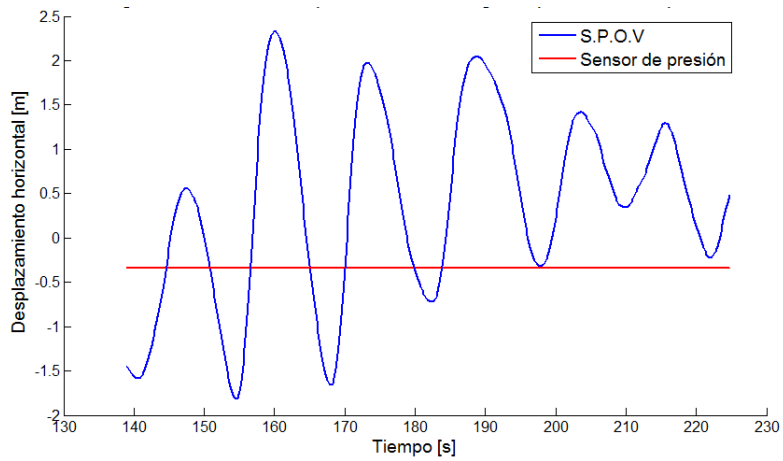


Figura 55: Componentes horizontales de desplazamientos en la serie del S.P.O.V. El sensor de presión no presenta variaciones. Fragmento de 90 segundos de la primera toma del día 12-10-2015. (Fuente: elaboración propia).

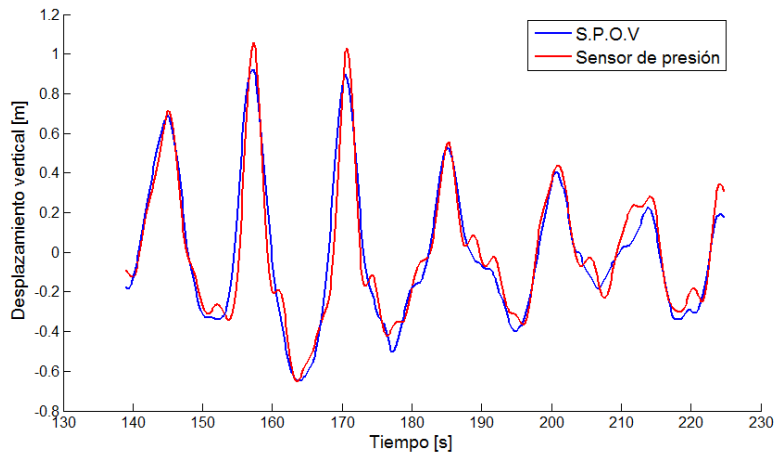


Figura 56: Componentes verticales de desplazamientos en la serie del S.P.O.V. vs variaciones del nivel del mar registradas por el sensor de presión. Fragmento de 90 segundos de la primera toma del día 12-10-2015. (Fuente: elaboración propia).

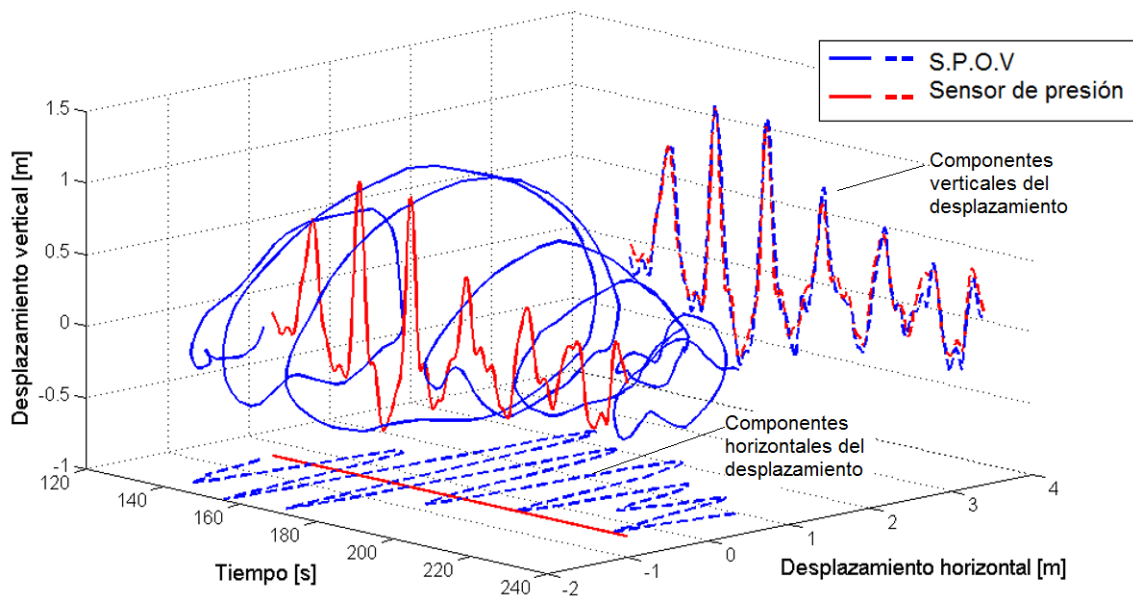


Figura 57: Serie de trayectorias orbitales del S.P.O.V vs variaciones del nivel del mar registradas por el sensor de presión. Fragmento de 90 segundos de la primera toma del día 12-10-2015. (Fuente: elaboración propia).

Se concluye que las órbitas de la boya en comparación a la longitud de onda de las olas son irrelevantes (de 1 a 4 metros en desplazamientos horizontales de la boya versus 100 a 200 metros de longitud de onda de las olas), es por esto que los dos registros no presentan diferencias de tiempo importantes en relación al estiramiento, estrechamiento y desfase de la serie.

6.4. ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES

Según observaciones de las boyas en movimiento, se concluyó que los desplazamientos horizontales de éstas pueden ser utilizados para análisis de ola a ola, debido a que las boyas siguen la misma trayectoria orbital de las partículas de agua en una ola y el sentido de estos desplazamientos están directamente relacionados a la cresta y el valle de la ola (Figura 58).

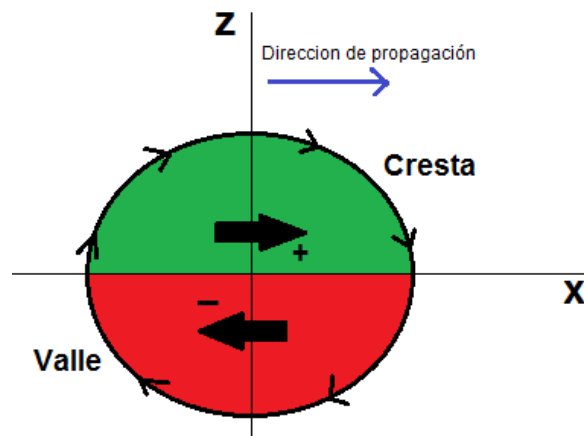


Figura 58: Movimientos orbitales en una ola según su cresta (sentido + en x) y su valle (sentido - en x). (Fuente: elaboración propia)

Para seleccionar las olas individuales dentro de un registro de desplazamientos horizontales se agrupan las olas en el orden valle-cresta, es decir, la ola comienza en el inicio de movimiento en el sentido - (cuarto cuadrante) y termina al final del movimiento en el sentido + (primer cuadrante, Figura 58).

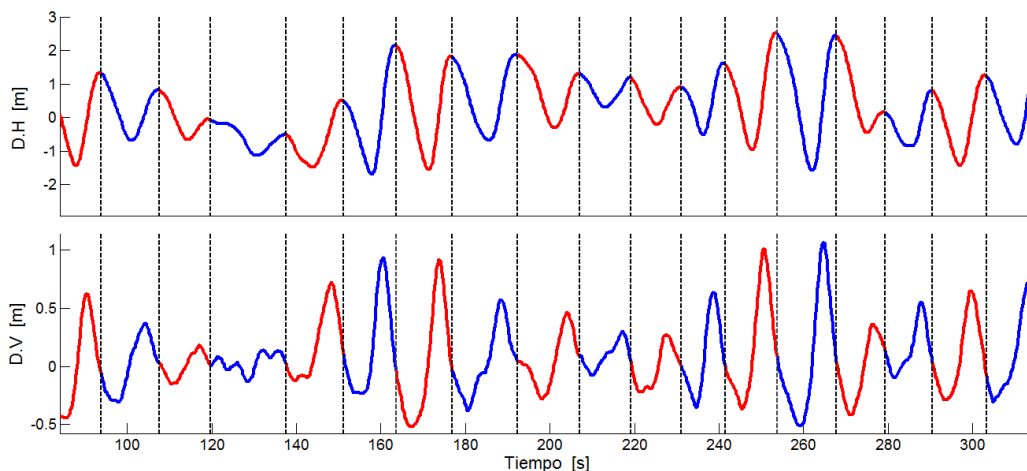


Figura 59: Selección de ola mediante la identificación de valle y cresta, utilizando los desplazamientos horizontales del registro. D.H y D.V corresponden a desplazamientos horizontales y desplazamientos verticales respectivamente. (Fuente: elaboración propia)

La agrupación de valles y crestas según el sentido del desplazamiento horizontal resulta en la identificación de cada ola individual en el registro de oleaje (Figura 59).

7. VALIDACIÓN DEL S.P.O.V

La validación se desarrolló comparando los registros de oleaje obtenidos el 12, 15, 16 y 18 de octubre del 2015. El criterio de validación se basó en la semejanza de datos obtenidos entre los dos métodos de medición utilizados. También se tomó en cuenta el resultado de análisis de ambas series en el dominio del tiempo y la frecuencia (análisis de cruces por cero y análisis espectral). El resultado de validación, es determinante para calificar el S.P.O.V como un método de medición viable.

En adelante, se denota a variaciones del nivel del mar como “ n_b ” para el S.P.O.V y “ n_p ” para el sensor de presión.

7.1. VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR

Se tienen variaciones del nivel del mar entregadas por ambos métodos, en intervalos de tiempo distintos (0.26 [s] y 0.25 [s]). La comparación, se realiza mediante la interpolación (lineal) de los datos cada 0.25 [s] (Figura 61). Se presentan los 4 muestreos realizados y sus correlaciones de datos correspondientes a las variaciones del nivel del mar.

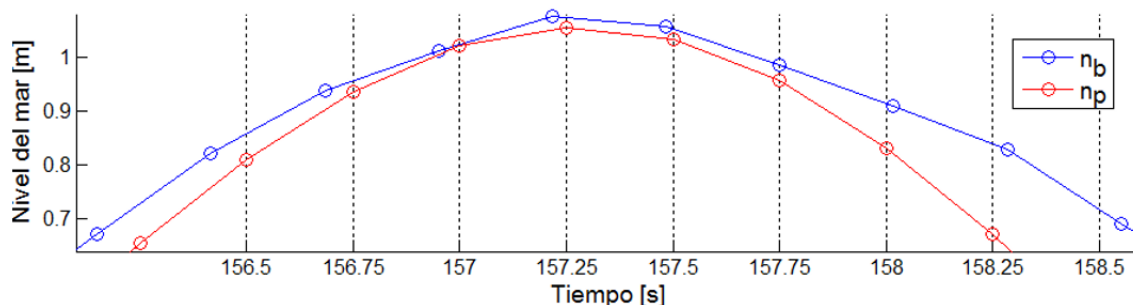


Figura 60: Series de oleaje en distintas líneas de tiempo. (Fuente: elaboración propia).

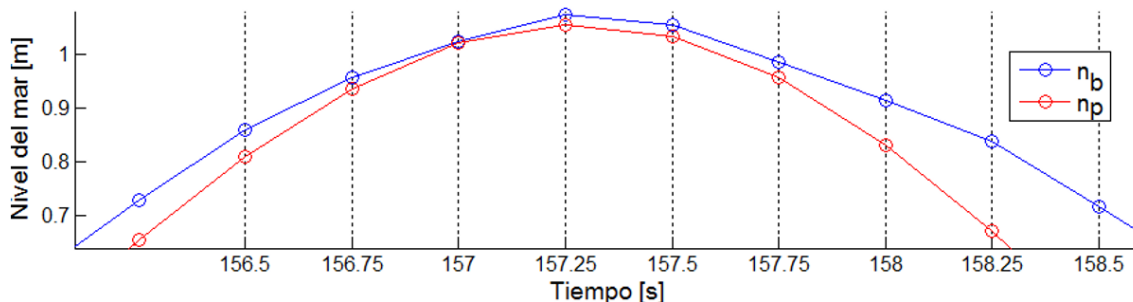


Figura 61: Resultado de la interpolación de las series n_b y n_p bajo una misma línea de tiempo, en intervalos de 0.25 [s]. (Fuente: elaboración propia).

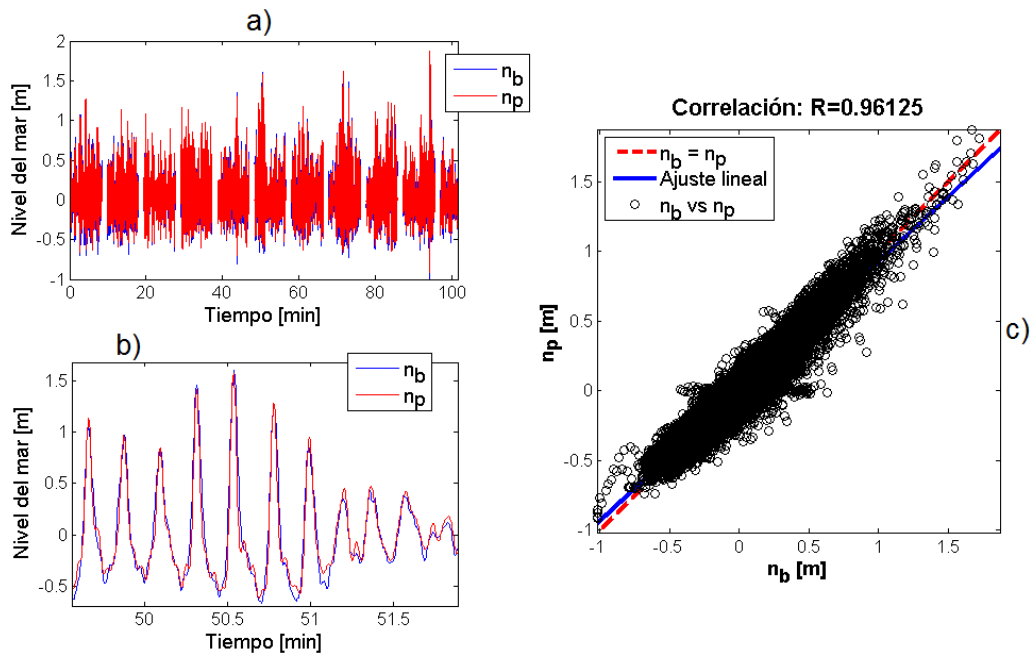


Figura 62: Muestreo 1, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p . (Fuente: elaboración propia).

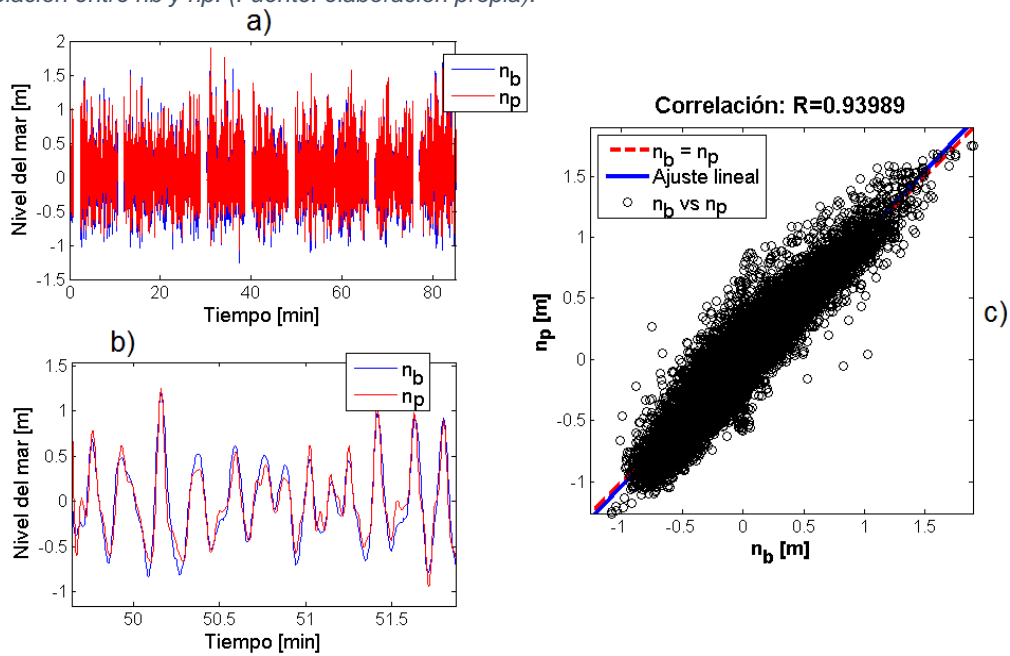


Figura 63: Muestreo 2, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p . (Fuente: elaboración propia).

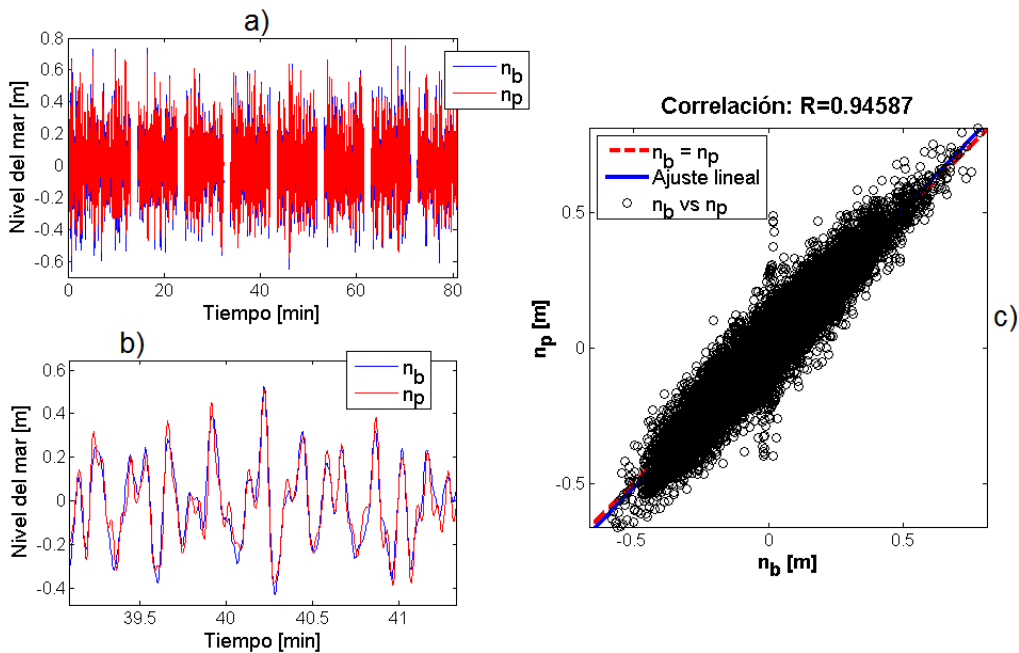


Figura 64: Muestreo 3, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p . (Fuente: elaboración propia).

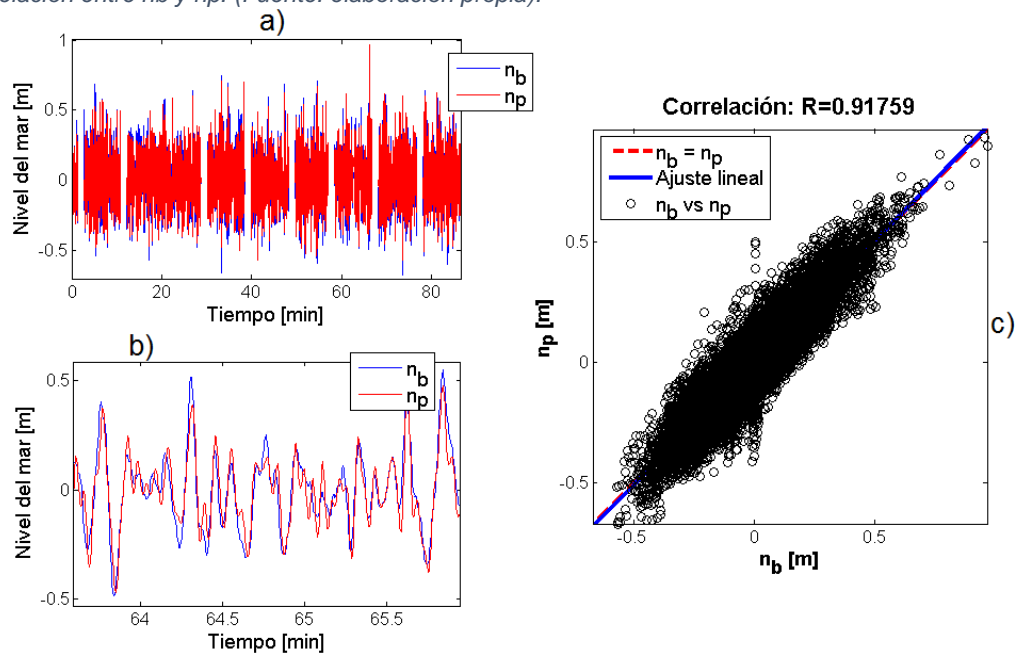


Figura 65: Muestreo 4, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p . (Fuente: elaboración propia).

Las correlaciones presentadas (Figura 62, Figura 63, Figura 64 y Figura 65), demuestran una relación lineal con alto coeficiente de correlación. La disminución de correlación en los muestreos 2, 3 y 4 se atribuye principalmente a las condiciones de oleaje presentes en los periodos de muestreo (mar de viento). Se estima que la pequeña diferencia que existe en

los registros se debe a que la boya se desplaza por el plano horizontal durante el monitoreo a diferencia del sensor de presión.

7.2. ANÁLISIS DE CRUCES POR CERO

Se identificaron olas individuales mediante el análisis de cruces por cero hacia abajo (Figura 66), para realizar una comparación entre los parámetros de oleaje más utilizados en estudios oceanográficos.

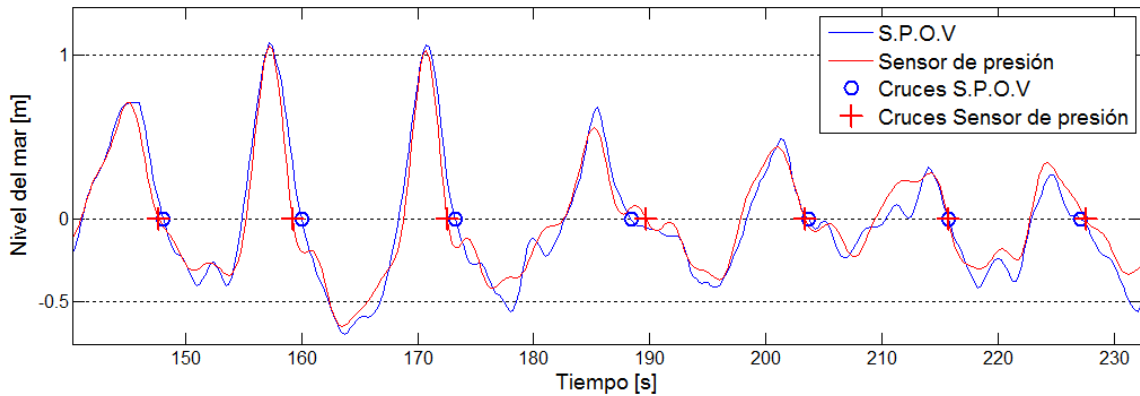


Figura 66: Identificación de los cruces por cero hacia abajo, para las dos series de oleaje obtenidas durante los muestreos. (Fuente: elaboración propia)

Se calcularon los periodos y alturas de oleaje de cada serie y se compararon mediante una relación lineal (Correlación de T y H en la Figura 67, Figura 68, Figura 69 y Figura 70). Para el sensor de presión, periodo y altura son denominados T_p y H_p respectivamente. Para el S.P.O.V, estos parámetros se denominan T_b y H_b .

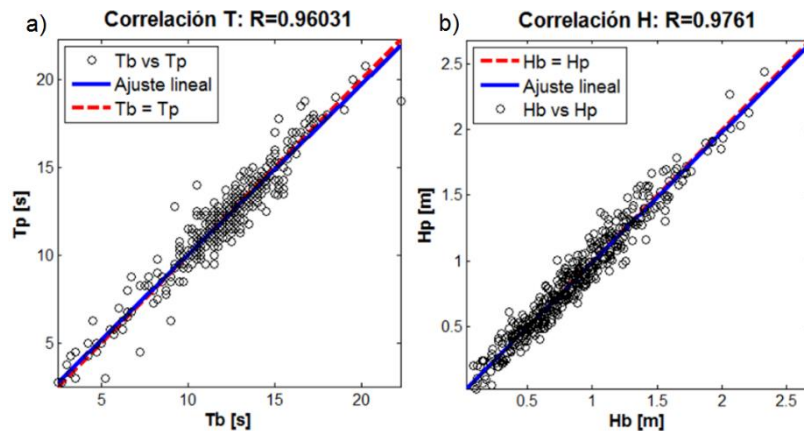


Figura 67: Muestreo 1, a) Correlación T_b y T_p . b) Correlación entre H_b y H_p . (Fuente: elaboración propia).

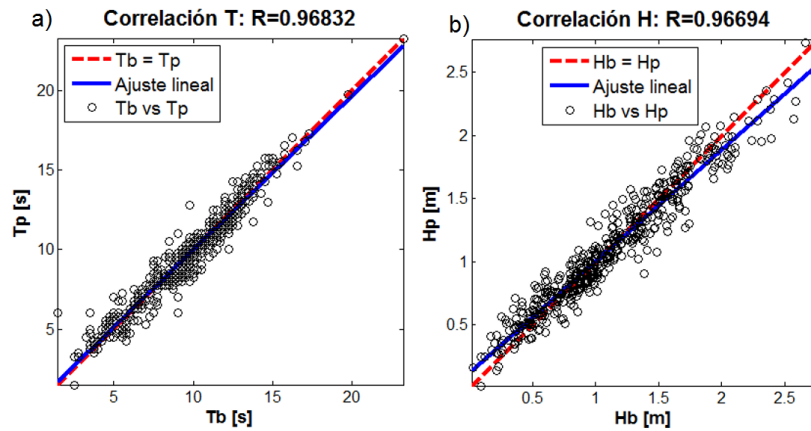


Figura 68: Muestreo 2, a) Correlación T_b y T_p . b) Correlación entre H_b y H_p . (Fuente: elaboración propia).

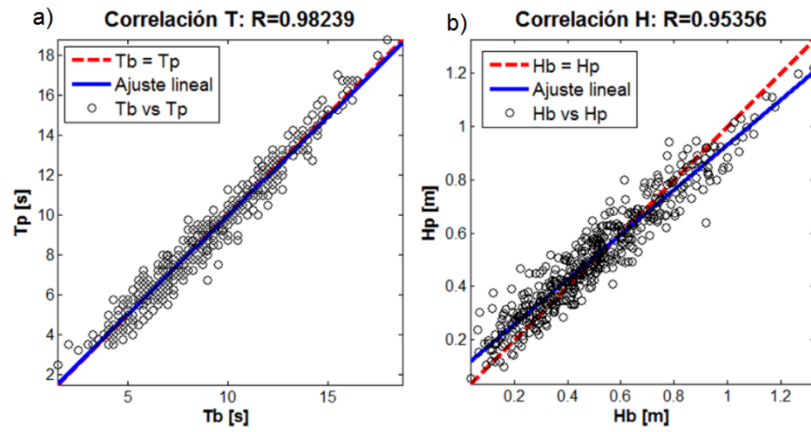


Figura 69: Muestreo 3, a) Correlación T_b y T_p . b) Correlación entre H_b y H_p . (Fuente: elaboración propia).

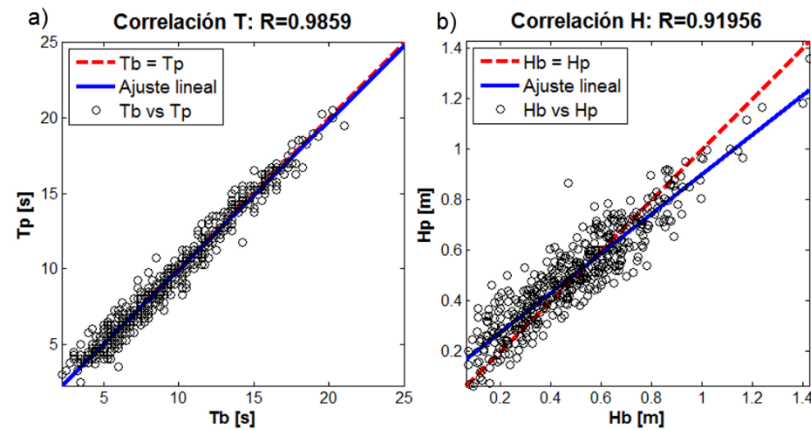


Figura 70: Muestreo 4, a) Correlación T_b y T_p . b) Correlación entre H_b y H_p . (Fuente: elaboración propia).

Se destaca una aceptable correlación entre ambos sistemas de medición. Se observa un aumento en la correlación de T y disminución en H en los muestreos 3 y 4. Esto se atribuye a las condiciones de oleaje, las cuales serán concluidas del análisis espectral en 7.3.

Las siguientes alturas características se comparan en la Tabla 6 y la Figura 71:

- Hs o H1/3: altura significativa de oleaje, promedio de la tercera parte de las olas más grandes.
- H1/10: altura promedio de la décima parte de las alturas más grandes.
- Hrms: altura media cuadrática de ola.

Tabla 6: Alturas características de ola, para todos los muestreos (S.P corresponde al sensor de presión). (Fuente: elaboración propia).

	MUESTREO 1		MUESTREO 2		MUESTREO 3		MUESTREO 4	
	S.P.O.V	S.P	S.P.O.V	S.P	S.P.O.V	S.P	S.P.O.V	S.P
Hs [m]	1.3447	1.3491	1.7171	1.6645	0.7781	0.7540	0.7519	0.7231
H1/10 [m]	1.7196	1.7228	2.1136	2.0043	0.9792	0.9251	0.9387	0.8822
Hrms [m]	0.9660	0.9629	1.2287	1.2024	0.5565	0.5534	0.5439	0.5412

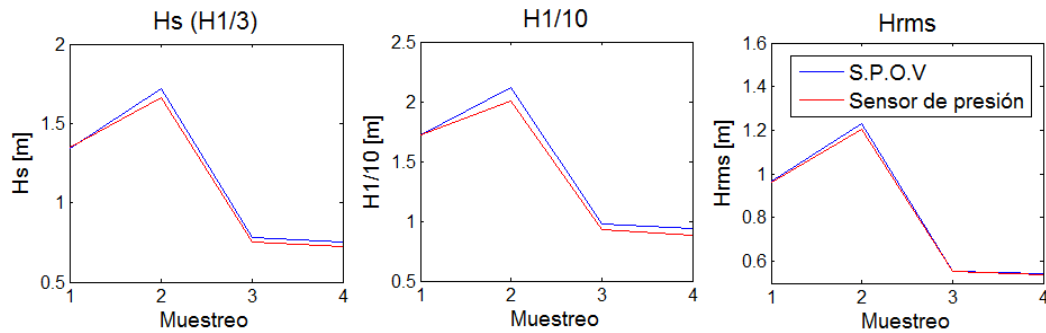


Figura 71: a) Comparación de Hs. b) Comparación de H1/10. c) Comparación de Hrms. (Fuente: elaboración propia).

Finalmente, el análisis de cruces por cero para las series obtenidas por el S.P.O.V y el sensor de presión resulta en valores de gran similitud.

7.3. ANÁLISIS ESPECTRAL

Se compararon los espectros de frecuencia de oleaje para los datos obtenidos y se calcularon parámetros espectrales correspondientes para su comparación. Los resultados del análisis fueron obtenidos gracias a la herramienta, "WAFO Toolbox".

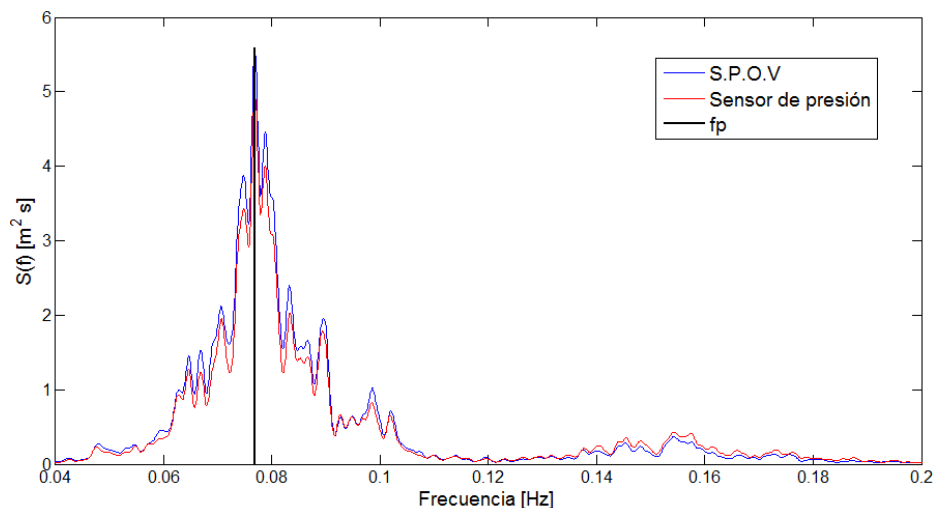


Figura 72: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 1 (f_p = periodo peak). (Fuente: elaboración propia).

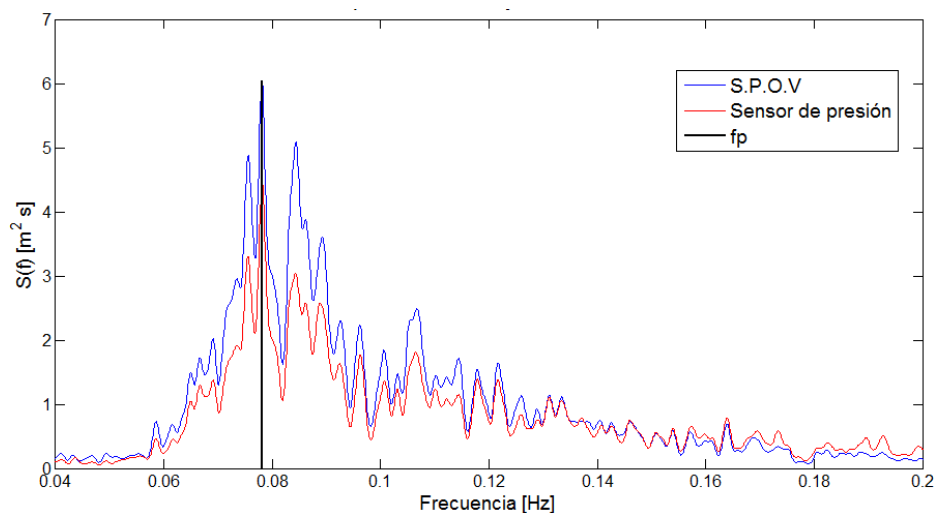


Figura 73: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 2. (Fuente: elaboración propia).

Existe una gran similitud entre los espectros de oleaje, pero se advierte una diferencia de energía entre las series. La energía presentada por el S.P.O.V es mayor a la observada en el sensor de presión, esto es observado en la Figura 72, Figura 73, Figura 74 y Figura 75.

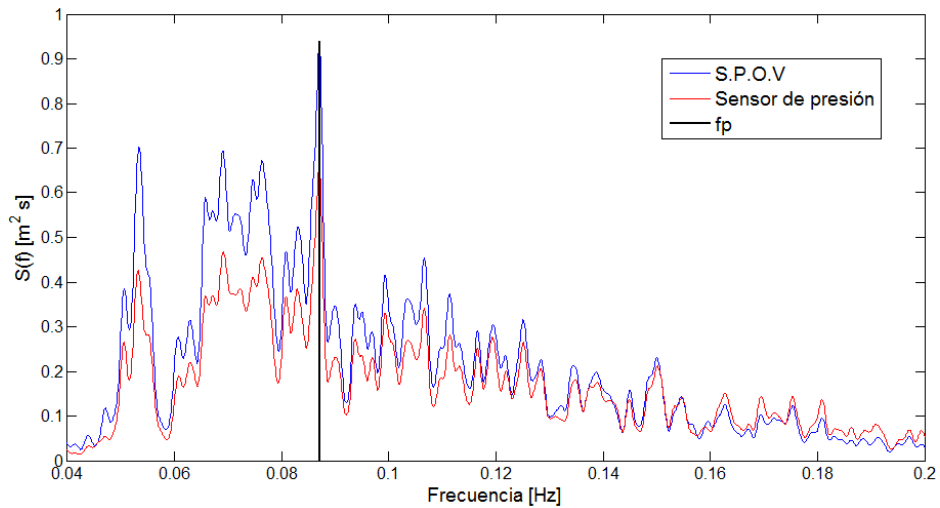


Figura 74: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 3 (f_p = periodo peak). (Fuente: elaboración propia).

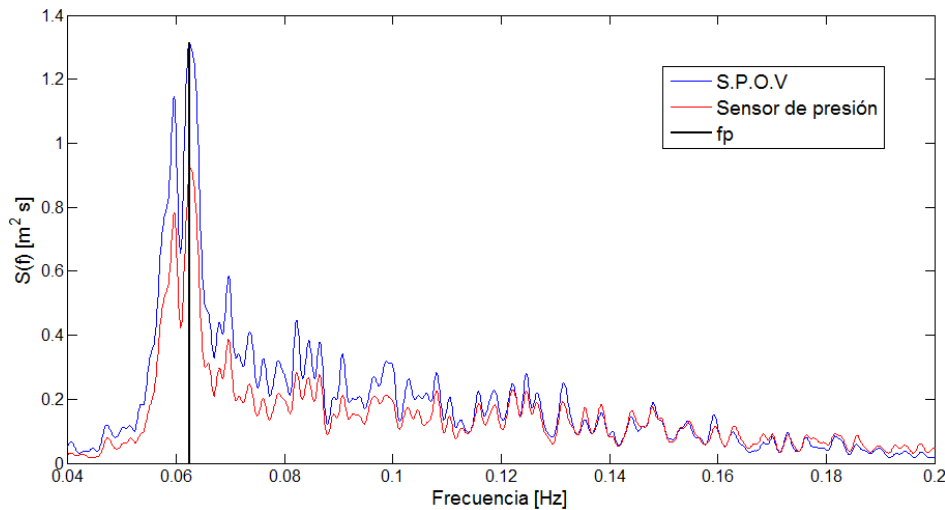


Figura 75: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 4. (Fuente: elaboración propia).

Con respecto a la comparación de los espectros, se comenta lo siguiente:

Muestreo 1 (Figura 72): Se observa un peak de frecuencia contundente (f_p) y poca actividad en frecuencias de oleaje mayores. Por esto, se concluye que, durante el muestreo, existían condiciones predominantes de swell de moderada amplitud, con mínima presencia de oleaje local (sea).

Muestreo 2 y 3 (Figura 73 y Figura 74): Mayores niveles de energía son observados en altas frecuencias, lo que indica mayor presencia de oleaje local. En el muestreo 2 (Figura 73), se observa un swell de similar magnitud al muestreo 1. En el muestreo 3, existen dos porciones de energía diferentes que corresponden a oleaje proveniente de distintas zonas de generación. También se observa presencia de oleaje local predominante.

Muestreo 4 (Figura 75): Se observa un swell de pequeña amplitud y también una leve presencia de oleaje local. El swell presentado es el de mayor periodo en los muestreos realizados.

Finalmente se calcularon los parámetros espectrales más relevantes de las series de oleaje (véase 3.1.6):

- Altura significativa de ola.
- Periodo medio de oleaje.
- Periodo energético de oleaje.
- Periodo peak.
- Pendiente de ola significativa.
- Pendiente de ola promedio.
- Momento de orden -1 (obtenido de $T_{m_{-10}}$).
- Varianza.
- Momento de orden 1 (obtenido de $T_{m_{01}}$).
- Momento de orden 2.
- Momento de orden 4.

Tabla 7: Características espectrales resultantes del análisis (S.P corresponde al sensor de presión). (Fuente: elaboración propia).

	MUESTREO 1		MUESTREO 2		MUESTREO 3		MUESTREO 4	
	S.P.O.V	S.P	S.P.O.V	S.P	S.P.O.V	S.P	S.P.O.V	S.P
Hs [m]	1.2034	1.1689	1.6871	1.5375	0.7769	0.7117	0.7410	0.6729
Tm01 [s]	10.8475	10.1680	9.8842	8.5441	9.8673	8.3622	10.3097	8.4354
Tm_10 [s]	13.5931	13.5074	12.8409	12.0874	13.5602	12.0932	14.0616	13.4122
Tp [s]	13.0238	13.0238	12.8000	12.8000	11.4734	11.4734	16.0313	16.0156
Ss	0.0096	0.0104	0.0141	0.0178	0.0070	0.0088	0.0062	0.0086
Sp	0.0045	0.0044	0.0066	0.0060	0.0038	0.0035	0.0018	0.0017
m_1	0.1958	0.1836	0.3636	0.2842	0.0814	0.0610	0.0768	0.0604
mo	0.0905	0.0854	0.1779	0.1477	0.0377	0.0317	0.0343	0.0283
m1	0.0524	0.0528	0.1131	0.1086	0.0240	0.0238	0.0209	0.0211
m2	0.0447	0.0467	0.0913	0.1053	0.0208	0.0240	0.0178	0.0224
m4	0.7427	0.6224	0.7576	0.8790	0.2149	0.1574	0.1670	0.2013

Las características espectrales para los cuatro muestreos, se comparan en la Figura 76, Figura 77, Figura 78 y Figura 79.

A diferencia de los periodos medio y energético, las características espectrales se mantienen muy similares en los 4 muestreos realizados. El periodo peak es igual para ambos métodos de medición. Existe una sobre-estimación de energía de oleaje por parte del S.P.O.V a lo largo de los muestreos. Las diferencias entre pendiente significativa y promedio, son despreciables.

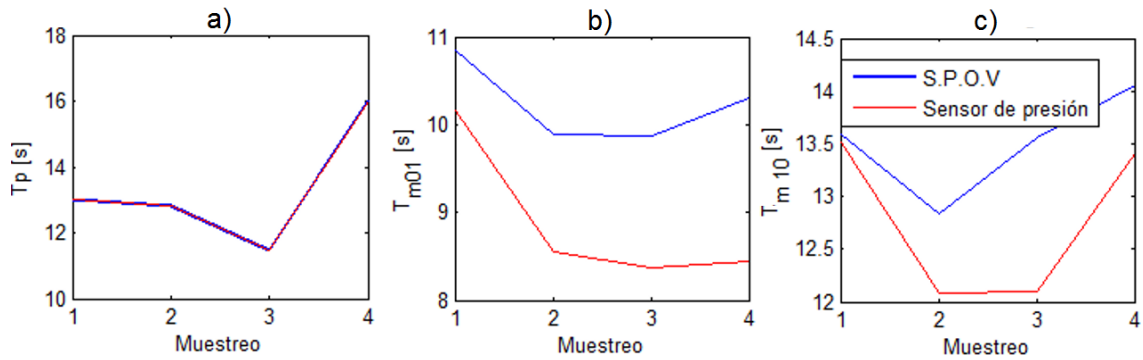


Figura 76: a) Comparación del periodo peak espectral. b) Comparación del periodo medio. c) Comparación del periodo energético. (Fuente: elaboración propia).

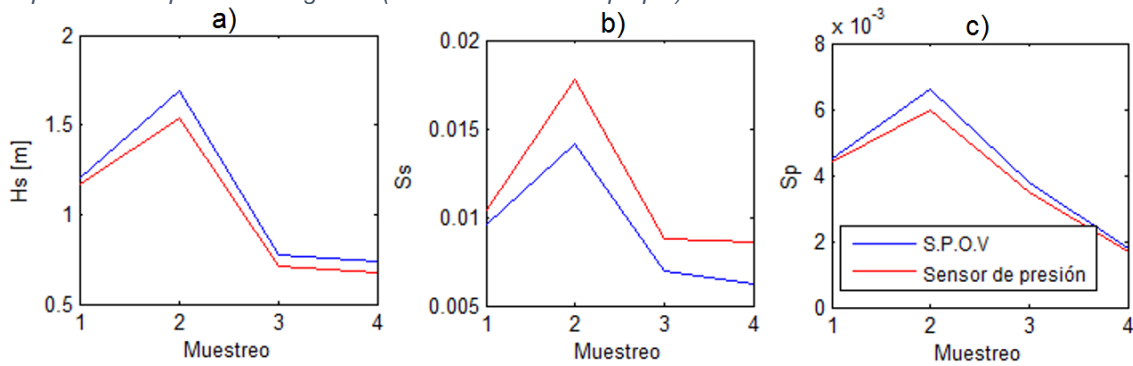


Figura 77: a) Comparación de la altura significativa. b) Comparación de la pendiente significativa de ola (wave steepness). c) Comparación de la pendiente promedio de ola. (Fuente: elaboración propia).

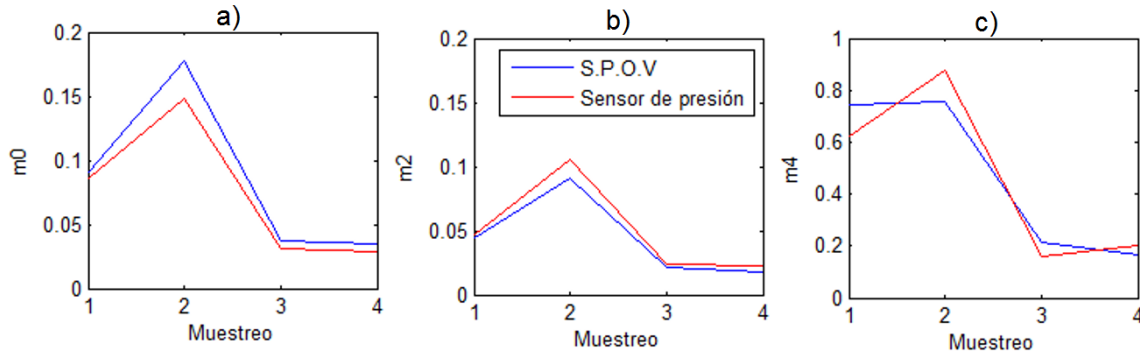


Figura 78: a) Comparación de la varianza (m_0). b) Comparación del momento espectral de orden 2. c) Comparación del momento espectral de orden 4. (Fuente: elaboración propia).

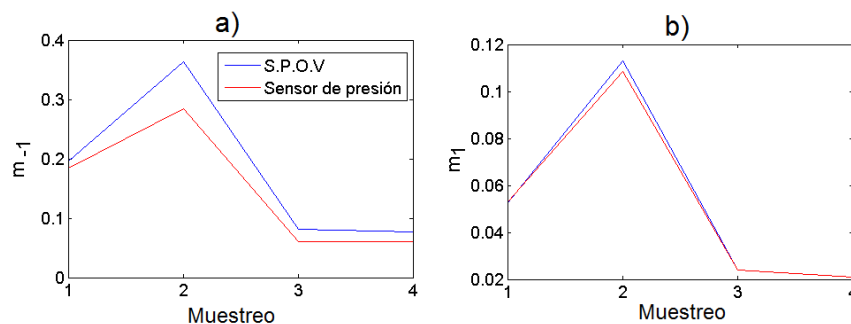


Figura 79: a) Comparación del momento espectral de orden -1. b) Comparación del momento espectral de orden 1. (Fuente: elaboración propia)

7.4. OBSERVACIONES

Los resultados de los muestreos presentaron altos niveles de correlación lineal en relación al sensor de presión por lo tanto se considera al S.P.O.V como un método de medición de oleaje viable bajo las condiciones de oleaje presentes en los muestreos.

Considerando las distintas características de oleaje presentes en los días de medición, se creyó importante resumir los rasgos principales sobre la relación entre la correlación lineal de los muestreos con sus respectivas condiciones de oleaje. Esto está relacionado, a las diferencias entre el funcionamiento del S.P.O.V y el sensor de presión.

- La correlación de alturas disminuye con la presencia de oleaje de generación local (Figura 73, Figura 74 y Figura 75). La configuración de amarre utilizada, le permitió a la boya gran libertad de movimiento lo que causó que la posición de esta influyera en diferencias de mediciones con el sensor.
- Las semejanzas entre periodos de oleaje aumentan en la presencia de oleaje de baja amplitud. Esto se relaciona con los desplazamientos orbitales, que al ser importantes (producto de oleaje de amplitud moderada o alta) producen una distorsión en las series de tiempo (6.3).

8. DISCUSIÓN

La aplicación del S.P.O.V en este proyecto de título:

La aplicación del sistema de percepción de oleaje por video corresponde a un conjunto de experimentos exitosos y fallidos que resultaron en una metodología de medición de oleaje viable desde el punto de vista científico e ingenieril. Sin embargo, se debe resaltar que las formas para aplicar este sistema no están limitadas a las presentadas en este documento, pudiendo existir otras metodologías que mejoren los resultados encontrados en este trabajo.

A grandes rasgos, el S.P.O.V corresponde a la percepción por video de un fenómeno y su análisis, lo que resulta en datos de oleaje. La forma de aplicación del S.P.O.V en este proyecto de título se discute a continuación:

El sistema de percepción de oleaje por video fue aplicado de la siguiente forma (en orden cronológico):

1. fondeo de boyas
2. localización de un punto de observación
3. monitoreo de boyas (videos grabados)
4. procesamiento de videos (para eficiencia de análisis)
5. seguimiento de la boya en videos procesados (software Tracker)
6. exportación de datos

El monitoreo de boyas consistió en un conjunto de videos digitales de 14 minutos de duración y 3.2 Gb aproximadamente. El seguimiento de las boyas mediante el software Tracker debe repasar completamente cada video lo que implica un costo computacional considerable para un ordenador personal. Por esta razón, el procesamiento de videos buscó disminuir el volumen y la duración de éstos (a 3 Mb y 3 minutos de duración) para aumentar la eficiencia del proceso (5). El seguimiento de la boya en videos procesados determina de forma automática la posición de la boya en cada fotograma de los videos y esto es interpretado como la trayectoria de una partícula sometida a la acción del oleaje.

Considerando lo anterior, se concluyó que la aplicación del S.P.O.V requiere una cantidad de tiempo importante para el procesamiento de imágenes. Esto presenta una limitación para periodos de medición prolongados (meses, años). Sin embargo, esta limitación no se le atribuye al S.P.O.V en general y solo se le atribuye a una forma de su aplicación, por ejemplo, se podría realizar un seguimiento de la boya en tiempo real lo que resultaría en un incremento de la eficiencia de medición.

Limitaciones del S.P.O.V:

En el sistema de medición propuesto, la percepción de la boya desde tierra es fundamental ya que su interrupción resultaría en la pérdida de datos de oleaje. Los agentes limitantes principales del S.P.O.V son la neblina y la oscuridad, pues limitan la visión de la boya. Por lo tanto, nuevas medidas para contrarrestar estas situaciones deben ser estudiadas (cámaras nocturnas, infrarrojas, objetos brillantes, luces).

La altura de observación es otro agente limitante, ya que, si la cámara no se ubica a una altura adecuada, el monitoreo de la boya se ve interrumpido por el oleaje. Por ende, para aplicar el sistema se debe recurrir a sitios elevados naturalmente cerca de la costa o plataformas artificiales que cumplan con los requisitos de altura para la observación (véase 4.6).

Fortalezas del S.P.O.V:

La principal fortaleza del sistema de percepción de oleaje por video está en su costo y en las ventajas potenciales de uso. Si se considera un anclaje adecuado, condiciones extremas de oleaje no presentarían una amenaza para las boyas (la boya de observación se mantuvo anclada durante todos los temporales del 2015, puesto que se instaló el 27/5/2015 y su permanencia se confirmó el 18/10/2015). El fondeo de las boyas puede ser realizado desde cualquier tipo de embarcación (en el caso de este proyecto de título se utilizó un kayak doble) y en condiciones adversas de oleaje, ya que al interior de los elementos flotantes no existen mecanismos que puedan ser dañados (las boyas previamente amarradas al anclaje pueden ser desplegadas desde una embarcación en movimiento).

Este sistema de medición puede ir en desarrollo constante, sin la necesidad de interactuar con las boyas de observación, ya que todo el proceso de muestreo, asimilación de datos y análisis es realizado desde tierra, a excepción de pequeños mantenimientos para limpieza de vegetación en la superficie sumergida de la boya y cuerdas de amarre (fouling).

El bajo costo de este sistema puede facilitar la instalación masiva de boyas de observación, para analizar la variabilidad espacial del oleaje en áreas más grandes. También se puede utilizar este sistema para la medición de oleaje en toda la costa de Chile, luego de mejorar la eficiencia del método. Este punto es importante, ya que en Chile no hay un sistema global de medición de oleaje.

Aspectos generales en la aplicación del S.P.O.V:

Se puede utilizar la influencia del oleaje sobre el movimiento de boyas livianas (3 kg) para realizar un análisis dinámico de los orbitales (véase 6.3.1) y determinar la energía superficial de una forma más directa (sin recurrir a la teoría lineal del oleaje). Esto se realizaría tomando en consideración la masa, trayectoria y aceleraciones de la boya para determinar el trabajo realizado por la porción de agua que interactúa con ésta. Aplicando esta hipótesis se podría especular el trabajo superficial realizado en toda la ola (a considerar: configuración de las cuerdas de amarre y tensión de estas).

La elevación del punto de observación en relación a las boyas genera una distorsión en la percepción del movimiento de éstas en los resultados (véase 4.2.2 y 6.2), esto se puede analizar para inferir el desplazamiento de las boyas en 3 dimensiones.

La inercia de la boya puede generar un error en la determinación del nivel del agua durante el proceso de medición, debido a que las aceleraciones de la boya inducidas por el oleaje generan variaciones en el volumen sumergido de ésta que no están relacionadas con el nivel del agua y por lo tanto se harán deducciones erradas sobre los datos del oleaje (debido

al análisis de imagen utilizado, véase 3.2.2 y 3.2.2.1). En este documento se asume que la boya observada no varía su volumen sumergido en reposo (boyantes) durante las mediciones. A pesar de que no se vieron grandes inconsistencias al momento de validar el S.P.O.V, el análisis sobre la variación en el volumen sumergido de la boya en presencia de oleaje es necesario para la evolución del S.P.O.V y permitirá obtener resultados de análisis (seguimiento de la boya, dinámica) más precisos.

A pesar de que este documento no presenta registros del desempeño de las boyas en condiciones extremas, existen ideas de lo que se puede esperar al momento de realizar mediciones en estos periodos gracias a observaciones en el sitio de interés durante temporales importantes del 2015. Estas ideas se resumen a continuación:

- Inmersión de las boyas: producto de corrientes y oleaje con picos pronunciados
- Desplazamientos horizontales (dirección del oleaje) reducidos significativamente debido a la tensión en el amarre de las boyas.
- Agitación del mar (llovizna producida por agitación, salpicaduras de agua, rompientes) que genera interrupción de la visibilidad de las boyas
- Desplazamiento de los anclajes producto del arrastre de las boyas.

9. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de medición de oleaje con un presupuesto de nivel “estudiante” y con materiales y elementos de fácil alcance.

El S.P.O.V (Sistema de Percepción de Oleaje por Video), puede ser considerado como una alternativa a costosas boyas oceanográficas y radares. Los resultados preliminares, muestran que, bajo condiciones normales, características empíricas y paramétricas del oleaje, pueden ser registradas con un nivel de confianza aceptable.

El funcionamiento del S.P.O.V requiere de ciertas condiciones para su funcionamiento, a saber:

- Vista desde altura: para realizar una correcta medición, es fundamental estar a una altura de observación elevada, de modo que la observación de las boyas no se vea obstaculizada por el oleaje.
- Visibilidad: existen situaciones en las cuales las condiciones atmosféricas (niebla o lluvia), o la poca cantidad de luz en el ambiente (noche), pueden imposibilitar el seguimiento de la boya. Se deberá experimentar con materiales y elementos adecuados (visión nocturna, luces para neblina, etc), para encontrar una solución.
- Según lo observado en la sección 6.3, para evitar distorsiones en las series de tiempo de oleaje se podría limitar la libertad de movimiento horizontal de las boyas, de forma que la posición de éstas no varíe de forma importante con respecto a su posición inicial.
- Técnicas fotográficas utilizadas para desarrollar este sistema de medición pueden ser perfeccionadas para aumentar el nivel de confianza del método y también emplear una automatización del proceso para la presentación y análisis de datos de oleaje en tiempo real.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brown, D. (2012). Tracker Free Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education. *Open Source Physics comPADRE, USA*.
- Bouws, E., Draper, L., Shearman, E. D. R., Laing, A. K., Feit, D., Mass, W., ... & Battjes, J. A. (1998). Guide to Wave analysis and forecasting. WMO-No. 702. World Meteorological Organization.
- Canada. Department of the Environment. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, & Bell, W. H. (1977). Static analysis of single-point moorings.
- Butler, C. (1985). Statistics in linguistics.
- Curtin, D. P. (2007). The Textbook of Digital Photography. ShortCourses. com.
- Demirbilek, Z., & Vincent, C. (2002). Water Wave Mechanics Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100). US Army Corps of Engineers, USA.
- Oceandata. (n.d.). TWR-2050 Tide & Wave Recorder. [online] Available at: <http://www.oceandata.co.kr/GroupWare/Home/product/brochure/rbr/TWR-2050.pdf> [Accessed 31 Aug. 2016].
- Losada Rodríguez y otros, 2011. Evaluación del potencial de la energía de las olas. Estudio Técnico PER 2011-2020. 1st ed. [ebook] Madrid: IDAE. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e13_olas_b31fcafb.pdf [Accessed 31 Aug. 2016].
- WAFO, A. (2000). Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads. The WAFO group, Lund University, Lund Institute of Technology, Centre for Mathematical Sciences, Mathematical Statistics.
- MathWorks, Inc. (2005). MATLAB: the language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7 (Vol. 9). MathWorks.
- Poynton, C. A. (1996). A technical introduction to digital video. John Wiley & Sons, Inc..
- The lycos Tech Glossary (1999). <http://webopedia.lycos.com/Multimedia/Video/video.html>