**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

# SISTEMA DE PERCEPCIÓN DE OLEAJE POR VIDEO

**LUIS RENE DAZA ZAPATA[1]**
**PATRICIO WINCKLER GREZ[2]**

## RESUMEN

Se presenta un sistema de bajo costo denominado SPOV para la medición de oleaje basado en i) percepción remota utilizando una cámara de video, ii) algoritmos de procesamiento de imágenes y iii) una boya de color utilizada para monitorear la posición de la superficie del agua. Este sistema provee una alternativa a los costosos instrumentos para el registro de oleaje que son utilizados en la actualidad. El sistema fue probado de forma experimental en Playa La Boca, Concón, mediante 4 monitoreos efectuados en octubre de 2015. El desplazamiento vertical de la boya fue inferido de cada imagen y convertido a elevación de la superficie del agua mediante un software libre de procesamiento de imágenes. Un sensor de presión (TWR-2050) fue utilizado de forma simultánea para efectuar una validación del sistema, el cual presentó un desempeño adecuado en condiciones de oleaje normales. En la actualidad se trabaja en la aplicación de SPOV en forma remota y en tiempo real para condiciones extremas (e.g. tormentas, neblina y oscuridad).

[1] Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso –luisrene.dazazapata@gmail.com
[2] Profesor Adjunto, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso – patricio.winckler@uv.cl

## 1 INTRODUCCIÓN

El oleaje es una variable fundamental para las operaciones portuarias, el diseño de obras marítimas y la caracterización de sitios para energías renovables, entre otras aplicaciones de la ingeniería oceánica. Existen diferentes instrumentos para medir oleaje in situ, entre los que destacan las boyas escalares y direccionales (Vlachos & Tsabaris, 2008), los perfiladores acústicos Doppler (Terray et al., 1999) y los sensores de presión (Laing et al., 1998). Existen además técnicas basadas en percepción remota, como los radares (Borge et al., 1999), el sistema Lidar (Hwang et al., 2000), los satélites meteorológicos (Robinson, 2010) y los videos. Estos instrumentos suelen ser costosos, de compleja mantención y pueden ser más o menos idóneos para aguas profundas, someras o zonas de rompiente.

Desafortunadamente, en Chile no existe una red permanente de medición del oleaje, como ocurre desde hace décadas en países como Estados Unidos (Hamilton, 1980), España (Clemente, 2001) e Italia (Arena et al., 2001). De hecho, existe una inmensa disparidad entre el acceso a datos en tierra y en el océano. Por ejemplo, en el Explorador climático[(i,ii)] se dispone de 1145 estaciones de registro de precipitación, 295 de temperatura y 788 de caudal en el territorio nacional. En el ámbito de la sismología, por su parte, hay 467 instrumentos de registro de aceleración, movimiento fuerte y posicionamiento satelital[(iii)] (Barrientos, com. pers.). En el océano, no obstante, existen solo 40 mareógrafos para medir variaciones lentas en el nivel del mar, y los escasos registros de oleaje corresponden a mediciones de boyas escalares y direccionales discontinuas (Beyá et al., 2015).

En este trabajo se propone un Sistema de Percepción de Oleaje por Video de bajo costo (en adelante SPOV) que podría presentar una alternativa a los instrumentos de medición vigentes. El sistema está compuesto por una boya de observación y su correspondiente sistema de anclaje, software libre de procesamiento de imágenes (Tracker[iv]) y una cámara de video. El uso de video a partir de cámaras se ha utilizado, por ejemplo, para medir la altura del oleaje en la zona costera (Holman & Stanley, 2007), dentro de la zona rompiente (Gal et al., 2014), en aguas profundas a partir de arreglos de cámaras (Benetazzo et al., 2012) y en un esquema similar al propuesto en este trabajo (Kim & Cho, 2005; Kim et al., 2011). Este último, no obstante, fue publicado poniendo énfasis en el desarrollo de algoritmos de adquisición y procesamiento de las imágenes (e.g. ruido, digitalización de imágenes de video análogo, reflexión de luz solar, intervención de objetos en la observación de las boyas), sin profundizar en la implementación en casos reales.

## 2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El SPOV se basa en el cálculo del desplazamiento vertical de la boya en el campo de observación de la cámara. Idealmente, el eje de colimación de ésta debe ser perpendicular al plano de movimiento de la boya, de modo de capturar con poca distorsión el desplazamiento vertical en una secuencia de imágenes (Figura 1)[3]. Debido a la altitud del punto en tierra

[3] Puesto que en esta versión del SPOV sólo se utiliza el desplazamiento vertical, no es necesario garantizar que el eje de colimación sea aproximadamente perpendicular al plano de movimiento de la boya. No obstante, en futuras aplicaciones en las que se espera utilizar el desplazamiento horizontal para inferir otras características

desde donde se realiza la observación ($z_l$), se deben realizar correcciones en base al ángulo de observación de la cámara con la horizontal ($\alpha$) y el ángulo de apertura de la cámara ($\beta$).

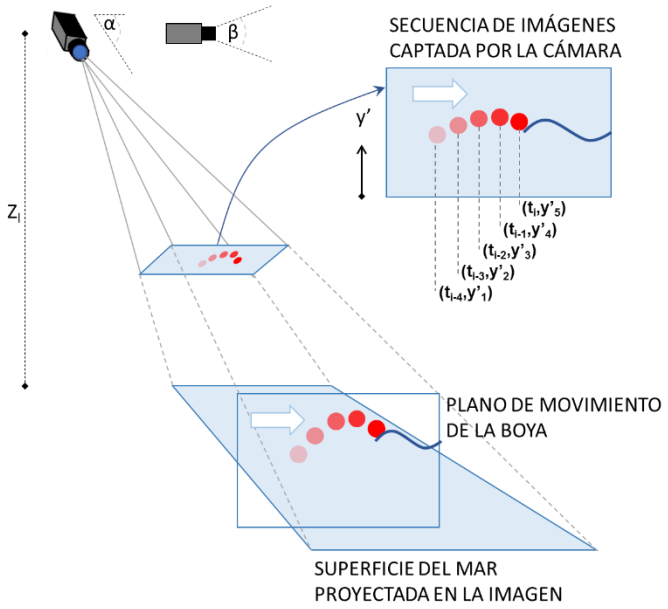



**Figura 1:** Esquema de funcionamiento del SPOV. Se muestran 5 imágenes sucesivas de la proyección de la boya y' sobre un plano inclinado, en pixeles, para tiempos $t_{i-4}$ a $t_i$.

A partir de la secuencia de imágenes obtenidas del video, se realiza un análisis para rastrear el movimiento de la boya de observación producto del oleaje. Como resultado se obtiene la posición del objeto, en pixeles, para cada imagen y se realiza un registro de la componente vertical del desplazamiento para análisis posterior. Puesto que el seguimiento de la boya de observación mediante el software *Tracker* implica un costo computacional considerable para un ordenador personal, los videos (Figura 2a) son acelerados a cuatro veces su velocidad original y redimensionados para enfocar solo la zona de movimiento de la boya (Figura 2b). También se modifican los colores del video para diferenciar la boya del resto del ambiente (Figura 2c). El seguimiento automático de la boya mediante *Tracker* proporciona su posición en cada imagen (Figura 2d), obteniendo como resultado la serie de desplazamiento vertical y', en pixeles (Figura 2e). Los datos son exportados en un archivo que contiene las coordenadas de la boya en el plano de la imagen $(x, y)$, con un intervalo temporal en tiempo real de $dt = 0.26$ [s]. Para los muestreos considerados en esta validación, este intervalo permitió capturar en forma adecuada el período de las olas individuales, que excedieron los 8 [s] para todos los muestreos.

---

del oleaje, sí se deberá garantizar la perpendicularidad entre el eje de colimación de la cámara y el movimiento de la boya.

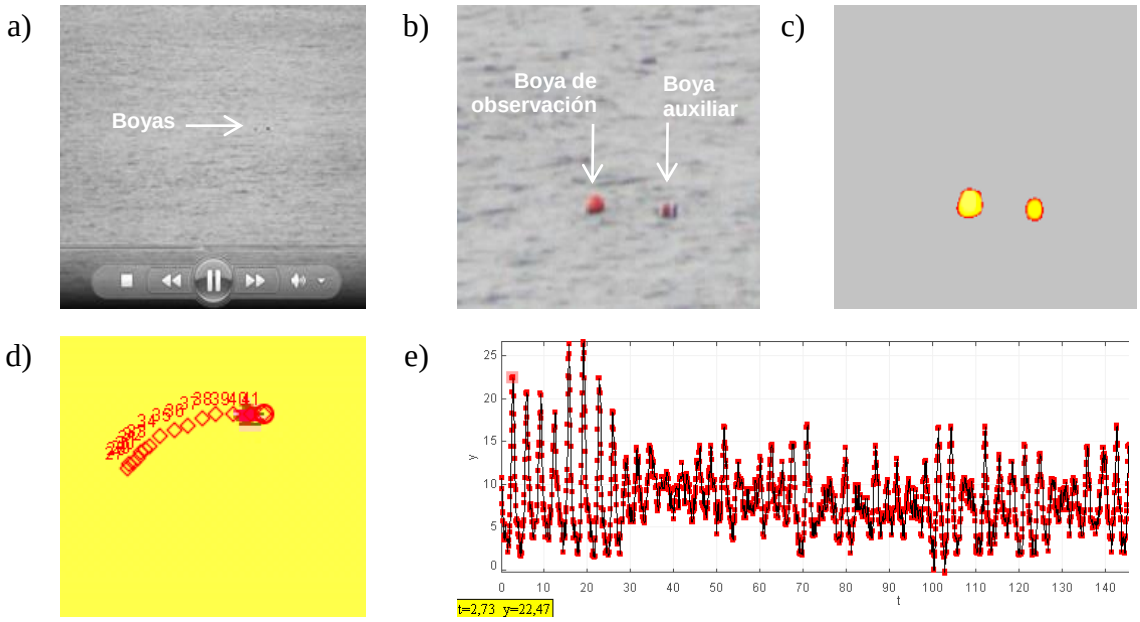



**Figura 2:** Procesamiento de la imagen. a) Video original, donde se observan las boyas a gran distancia. b) Imagen obtenida a partir del video original, con zoom acotado a la zona de desplazamiento de las boyas. c) Identificación de las boyas a partir de *Movie Studio Platinum*. d) Seguimiento de la boya de observación mediante *Tracker*, donde se muestran la coordenada vertical y' de la boya para diferentes fotogramas. e) Serie de tiempo de la coordenada y' obtenida a partir de d), en pixeles.

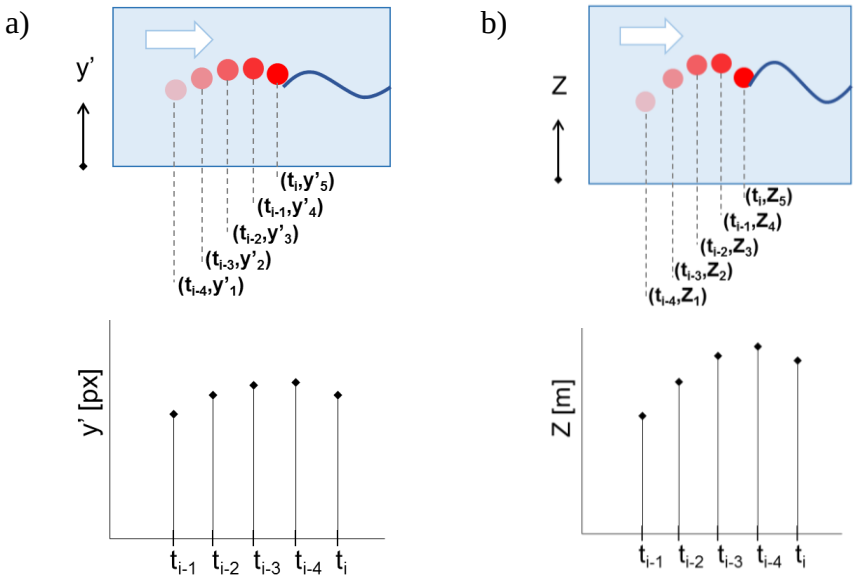



**Figura 3:** a) Imagen captada por la cámara (ver Figura 1), donde se registra la proyección de la boya y' sobre un plano inclinado, en pixeles, para tiempos $t_{i-4}$ a $t_i$. b) Desplazamiento vertical de la boya, z, en metros, definido en un plano rectificado. Se muestran 5 imágenes sucesivas.

En base a las dimensiones del objeto flotante y la inclinación de la cámara, se utilizan medios de rectificación de imágenes para determinar, a partir de la proyección de la boya y' sobre un plano inclinado, el desplazamiento vertical en metros (Figura 3). Los detalles de la rectificación se incluyen en Daza (2017). Finalmente, se generan series de tiempo de desplazamiento vertical de oleaje, bajo el supuesto de que la boya se mueve solidaria al nivel del mar, sin hundirse ni aflorar.

## 3 APLICACIÓN DEL SPOV EN ESTE TRABAJO

El SPOV fue implementado en una campaña de carácter exploratorio, efectuada en la playa de La Boca, Concón, Chile, entre los días 12 y 18 de octubre de 2015 (Figura 4a). El seguimiento de la boya de observación se efectuó desde un punto ubicado al sur de Playa La Boca, a una cota de 56 m, que resultó suficiente para la visibilidad de la boya debido a la presencia del oleaje. Ambos puntos se encontraban a una distancia horizontal de 760 m (Figura 1b).

El fondeo de la boya de observación se efectuó mediante dos muertos (Figuras 1c y 1d), una línea de amarre cuyas dimensiones determinan la escala horizontal del movimiento (Curtin, 2007; Poynton, 1996) y una boya auxiliar cuya función fue evitar que la boya de observación se hundiera. Se utilizaron boyas esféricas de Polietileno PE virgen, de 33 [lt] de volumen, 40 [cm] de diámetro y 25 [mm] de espesor. La boya auxiliar se fondeó unida a los muertos y se conectó a la boya de observación. Con esta configuración se evita que la boya de observación experimente una tensión vertical producida por el sistema de fondeo.

El monitoreo de la boya de observación consistió en 4 muestreos de duración inferior a 2 horas cada uno (Tabla 1). Debido a restricciones de almacenamiento de la cámara, cada muestreo fue subdividido en 8 a 10 tomas consecutivas, cuya duración fue ligeramente menor a 10 minutos. A modo de ejemplo, la Figura 7a ilustra las tomas correspondientes al muestreo 1. A partir del registro del desplazamiento vertical instantáneo de la superficie se calcularon las características estadísticas del oleaje (e.g. altura, período y espectro de frecuencia).

**Tabla 1:** Fecha y duración de los muestreos utilizados en la validación del SPOV.

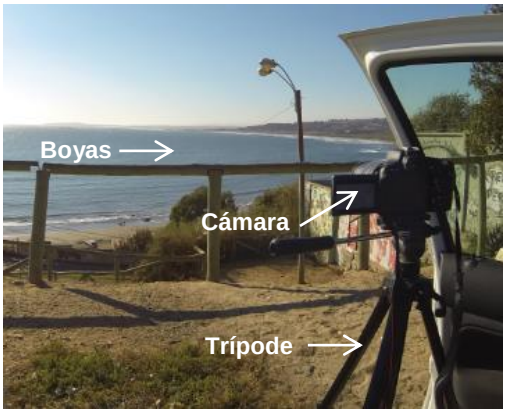
| Muestreo | Fecha (aa-mm-dd) | Inicio primera toma (hh:mm:ss) | Inicio última toma (hh:mm:ss) | Número de tomas |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2015-10-12 | 16:00:11 | 17:34:50 | 10 |
| 2 | 2015-10-15 | 12:57:34 | 14:23:22 | 9 |
| 3 | 2015-10-16 | 15:49:15 | 16:58:30 | 8 |
| 4 | 2015-10-18 | 16:17:18 | 17:48:40 | 10 |

**Figura 4:** Implementación del SPOV en Playa La Boca, Concón. a) Fotografía satelital con ubicación de la boya de observación (265018 m E, 6355399 m S) y la cámara (264906 m E,

6354639 m S). b) Perspectiva desde el punto de observación de la cámara. c) Muertos de anclaje y kayak utilizado en el fondeo. d) Maniobra de fondeo de las boyas.

a)

b)




c)

d)

## 4 VALIDACIÓN

La validación se basó en comparar los resultados obtenidos mediante el SPOV y un sensor de presión (TWR-2050) instalado en el punto de fondeo de las boyas para los muestreos realizados los días 12, 15, 16 y 18 de octubre del 2015 (Tabla 1). Se compararon las (series de tiempo de desplazamiento vertical, altura y período de ola individual, los espectros de oleaje y magnitudes derivadas a partir de estos. Cabe mencionar que la medición del SPOV es de naturaleza lagrangiana (se sigue a la boya de observación) en tanto que la del sensor de presión es euleriana, pues se mide el nivel del mar en un punto fijo. La naturaleza de ambas mediciones se ilustra en la
Figura **5**. Para efectos comparativos, sólo se explotó el desplazamiento vertical de la boya de observación obtenida con SPOV como un proxy para el nivel instantáneo del mar obtenido del sensor de presión (en adelante utilizaremos desplazamiento vertical de la boya como nivel del mar).

La señal de desplazamiento vertical medida mediante el SPOV fue procesada de modo de eliminar la deriva de la boya asociada a corrientes (esto es, el desplazamiento de masa asociado a fenómenos que ocurren a una escala temporal superior al período típico de las olas). La Figura 6 ilustra la deriva de la boya por efecto de las corrientes. El efecto de la deriva fue eliminado mediante la aplicación de un ajuste de tendencia lineal, por tramos.

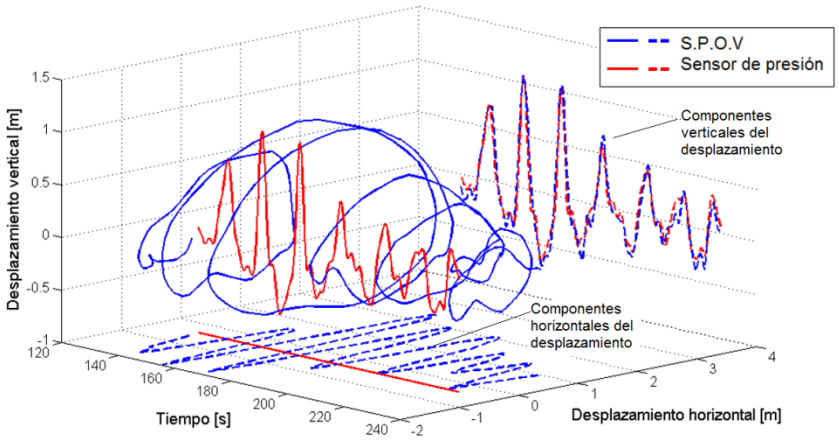



**Figura 5:** Trayectorias de la boya utilizada por el SPOV (azul) y del nivel del mar registrada por el sensor de presión (rojo). En el cálculo de las características del oleaje sólo se utiliza el desplazamiento vertical. El desplazamiento horizontal medido, no ha sido rectificado y no se utiliza en esta versión del SPOV. El sensor de presión no mide desplazamiento horizontal, por lo que se proyecta en el plano horizontal en un valor arbitrario.

a)

b)

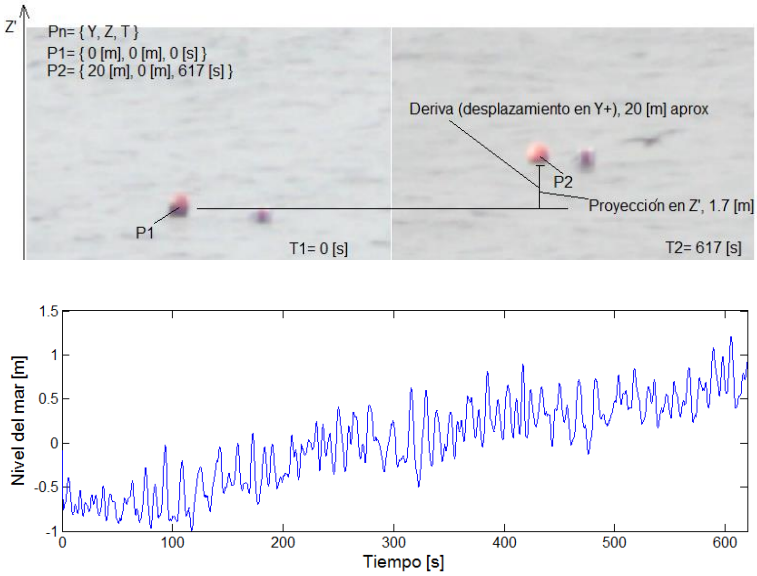



**Figura 6:** Efectos de la deriva la boya por efecto de corrientes. a) Posiciones P1 de la boya de observación en el instante t = 0 [s] y P2 en el instante t = 617 [s]. La deriva en el plano de la cámara corresponde a 1.7 [m] que corresponden a 20 [m] aproximadamente en el plano horizontal que coincide con el nivel del mar. b) Nivel del mar obtenido a partir del SPOV para la serie de tiempo correspondiente al panel a). Se observa una clara tendencia al alejamiento de la boya de observación por efecto de las corrientes; tendencia que es eliminada para el posterior procesamiento del registro del nivel del mar.

## 4.1 Análisis en el dominio del tiempo

La Figura 7a y 7b compara las series de tiempo del nivel del mar obtenidas mediante el SPOV y el sensor de presión para el muestreo 1, utilizado como ejemplo. La Figura 7c muestra un gráfico de dispersión de datos individuales de nivel de mar, donde se observa una buena correspondencia reflejada mediante el coeficiente de correlación (Butler, 1985) de R = 0.96125.

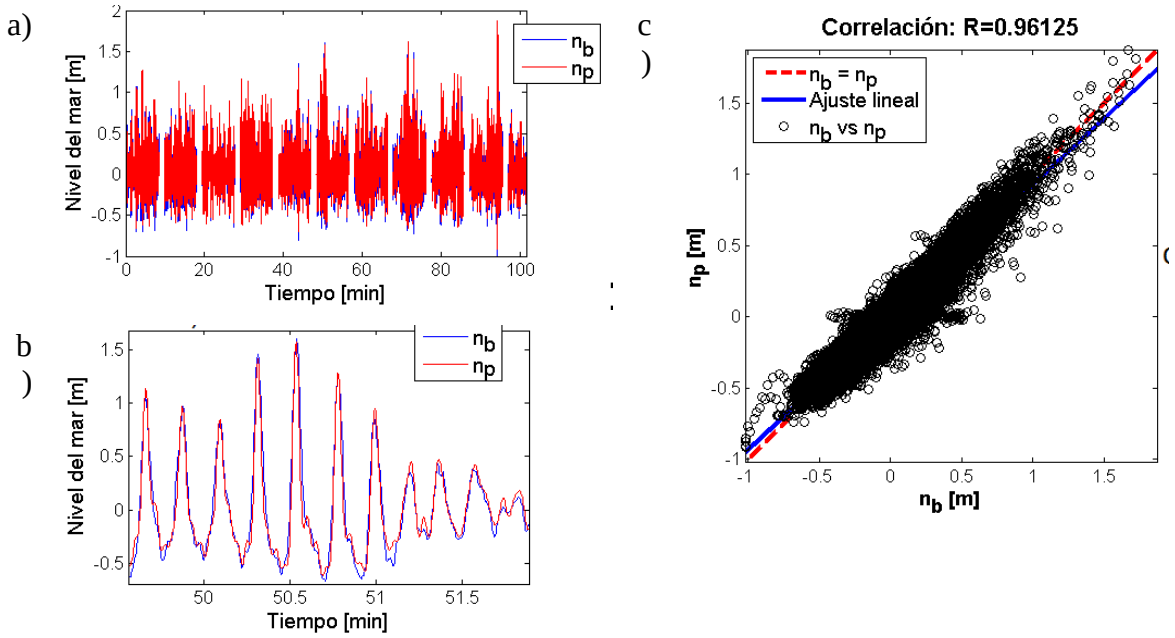



**Figura 7.** Análisis en el dominio del tiempo del nivel del mar obtenido mediante el SPOV y el sensor de presión. a) Serie de tiempo del desplazamiento vertical para el muestreo 1, donde se muestran 11 tomas (la última fue descartada debido a su corta duración). b) zoom de la serie mostrada en a). c) Correlación entre las series de tiempo del desplazamiento obtenidas mediante SPOV (nb) y el sensor de presión (np). El coeficiente de correlación es de R = 0.96125.

Con el objeto de calcular parámetros estadísticos asociados al estado de mar, se identificaron las olas individuales para cada registro mediante análisis de cruces descendientes por cero (USACE, 2002). La
Figura 8a ilustra el proceso de cálculo de las olas individuales en tanto que las Figuras 8b y 8c muestran gráficos de dispersión para la altura y el período de cada ola, cuyos coeficientes de correlación son de R = 0.976 y R = 0.960, respectivamente.

La Figura 9 ilustra los valores de la altura significativa estadística Hs y los parámetros $H_{1/10}$ y $H_{rms}$, obtenidos a partir de la serie de olas individuales para los cuatro muestreos indicados en la Tabla 1. Se observa una buena correspondencia entre los valores obtenidos mediante SPOV y aquellos derivados del sensor de presión, tanto para estados de mar relativamente energéticos (muestreos 1 y 2) como calmos (muestreos 3 y 4).

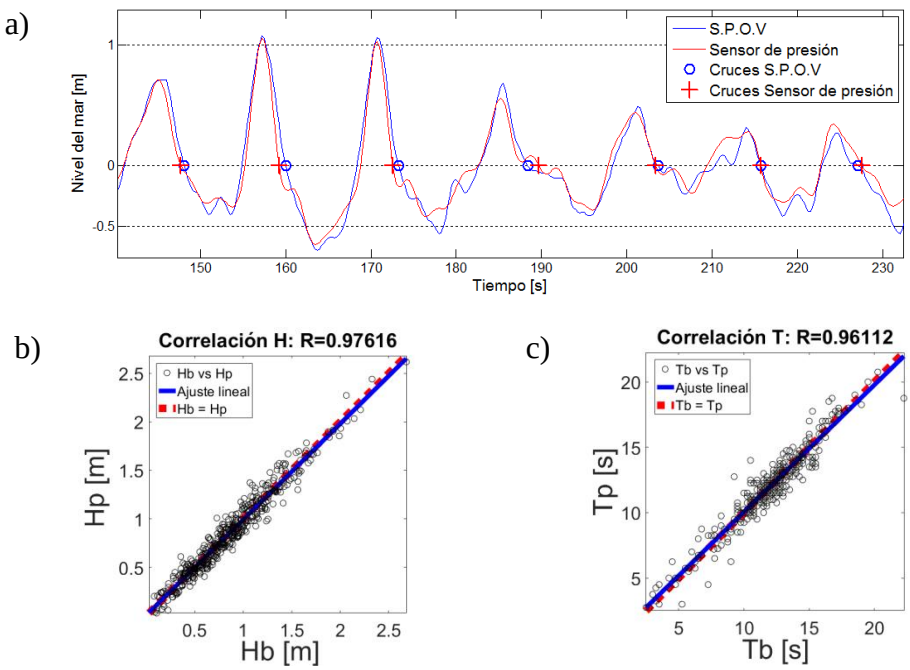



**Figura 8.** Parámetros estadísticos del estado de mar del muestreo 1. a) Análisis de cruces descendientes por cero a partir de la serie de tiempo del nivel del mar. b) Gráfico de dispersión de alturas individuales obtenidas del SPOV (Hb) y sensor de presión (Hp). b) Gráfico de dispersión de períodos obtenidos del SPOV (Tb) y sensor de presión (Tp).

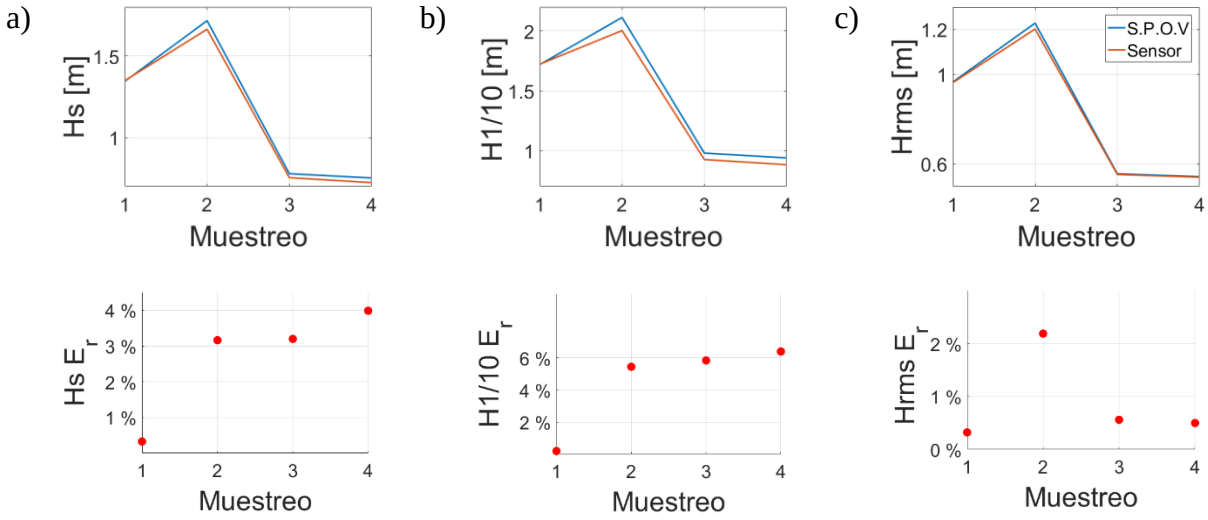
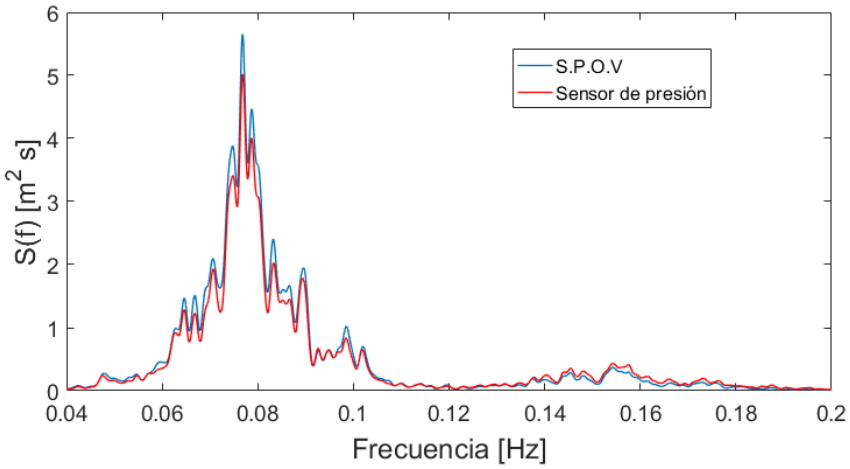



**Figura 9:** Magnitudes derivadas a partir de la serie de tiempo de nivel del mar obtenidos para los cuatro muestreos mediante SPOV y el sensor de presión. a) Altura significativa estadística Hs, b) H1/10 y c) Hrms. Se incluye también el error relativo entre ambos sistemas**,** definido como 100* [$H_{presión}$ - $H_{SPOV}$] / $H_{presión}$.

## 4.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

A partir de la serie de tiempo de desnivelación, se compararon los espectros de oleaje mediante la herramienta WAFO, elaborada en Matlab (WAFO Group, 2001; Mathworks, 1996). La Figura 10 muestra el espectro de frecuencias obtenido para el muestreo 1 mediante SPOV y el sensor de presión. Se observa que la forma espectral es similar para ambos sistemas, siendo ligeramente mayor (menor) el SPOV para frecuencias bajas (altas).

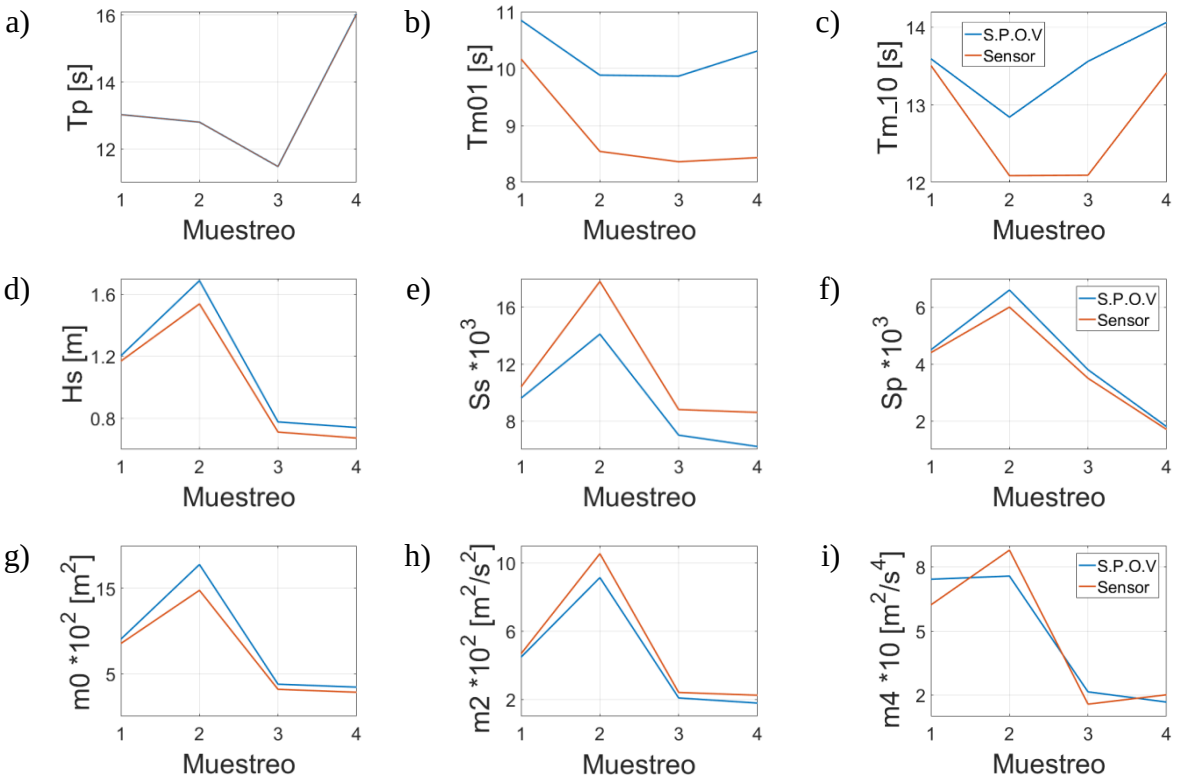
**Figura 10.** Espectro de frecuencias derivado a partir de la serie de tiempo de nivel del mar para el muestreo 1 mediante SPOV y el sensor de presión.




La Figura 11 ilustra la comparación de los parámetros espectrales de altura significativa espectral, períodos, pendientes y momentos de diferente orden, derivados a partir del espectro de frecuencias para los cuatro muestreos mediante ambos sistemas. El SPOV tiende a sobrestimar ligeramente la altura significativa espectral para todos los espectros. El período peak presenta una correspondencia casi perfecta entre ambos sistemas, en tanto que el SPOV tiende a sobreestimar los períodos $Tm_{01}$ y $Tm_{-10}$ entre 1 y 2 [s]. Las pendientes y los momentos, por su parte, tienden a ser similares entre ambos sistemas de medición.

Las diferencias entre los parámetros espectrales obtenidos mediante ambos sistemas se explican, en parte, en que el desplazamiento orbital de la boya ocurre fuera de un plano vertical, introduciendo errores en la estimación del periodo producto del i) estrechamiento, ii) estiramiento y iii) desfase de la serie de desplazamiento vertical (Daza, 2017). La otra fuente de error, aparentemente menor, se debe al hecho de que durante el paso de la ola, la boya varía su volumen sumergido y por tanto el área expuesta que se utiliza para el cálculo del desplazamiento vertical. Estas distorsiones generan una leve diferencia en la distribución de energía en el espectro de oleaje y las magnitudes derivadas.

**Figura 11:** Magnitudes derivadas a partir del espectro de frecuencias para los cuatro muestreos mediante SPOV y el sensor de presión. Se presentan los períodos a) Tp, b) $Tm_{01}$ y c) $Tm_{-10}$, d) la altura significativa espectral Hs, e) la pendiente de la ola significativa definida como $S_s = 2\pi Hs/(gTm_{02}^2)$, f) la pendiente de la ola promedio definida como $S_p = 2\pi Hs/(gTp^2)$ y los momentos de g) orden cero $m_0$, h) orden 2 $m_2$ y i) orden 4 $m_4$.




## 5 COMENTARIOS FINALES

En este trabajo se presenta un conjunto de experimentos exitosos (y otros fallidos) que permitieron validar un sistema de percepción de oleaje por video (SPOV) de potencial aplicación científica e ingenieril. Este sistema presenta las ventajas de ser de bajo costo y de prescindir de componentes eléctricas y mecánicas dispuestas en el agua; limitaciones que complican el uso de otros instrumentos que deben ser fondeados y luego rescatados para la obtención de datos. A pesar de ser de naturaleza diferente, las mediciones lagrangianas del desplazamiento vertical de la boya obtenidas mediante el SPOV resultaron replicar con bastante exactitud aquellas obtenidas mediante un sensor de presión, que provee mediciones eulerianas del nivel del mar.

Esta primera versión del SPOV presenta las limitaciones de i) no registrar durante la noche y en presencia de neblina o lluvia, ii) estar limitada a olas relativamente pequeñas cuya pendiente y altura permiten la visualización de la boya y iii) permitir la generación de estadísticas (solo) *a posteriori*, producto del post-proceso efectuado una vez que se rescatan los datos de la cámara.

Actualmente se trabaja en la prueba de una cámara termográfica con un sensor infrarrojo UFPA que esperamos permita la percepción de la boya en todas las condiciones meteorológicas y diurnas. Asimismo, se está testeando el uso de *streaming* de datos por medio de internet, con el objeto de medir en tiempo real y en forma remota los datos de oleaje. En una tercera línea se trabaja en un sistema de almacenamiento instantáneo de datos en una nube digital de libre acceso.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Matías Alday por haber facilitado el sensor de presión utilizado en este trabajo y a Pablo Vera, quien fue indispensable en la instalación de las boyas y el sensor de presión, en la zona marítima de interés.

## 7 REFERENCIAS

Arena, G., Briganti, R., Corsini, S., & Franco, L., 2001. The Italian wave measurement buoy network: 12 years management experience. In Proceedings of the waves 2001 conference, San Francisco (pp. 86-95).

Benetazzo, A., Fedele, F., Gallego, G., Shih, P. C., & Yezzi, A. 2012. Offshore stereo measurements of gravity waves. Coastal Engineering, 64, 127-138.

Beyá, J.; Álvarez, M.; Gallardo, A.; Hidalgo, H.; Aguirre, C.; Valdivia, J.; Parra, C.; Méndez, L.; Contreras, C.; Winckler, P.; & Molina, M. 2016. Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. ISBN: 978-956-368-194-9. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.

Borge, J. C. N., Reichert, K., & Dittmer, J. 1999. Use of nautical radar as a wave monitoring instrument. Coastal Engineering, 37(3), 331-342.

Butler, C. 1985. Statistics in linguistics.

Clemente, M. M., 2001. La red española de medida y registro de oleaje (REMRO): Un proyecto en continuo desarrollo. Ingeniería civil, (121), 117-126.

Curtin, D. 2007. The textbook of digital photography. A short courses book. Second Edition. www.shortcourses.com.

Daza, R. 2017. Sistema de percepción remota de oleaje mediante el uso de una cámara de video marzo. Memoria de titulación de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso.

Gal, Y., Browne, M., & Lane, C. 2014. Long-term automated monitoring of nearshore wave height from digital video. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(6), 3412-3420.

Hamilton, G. D., 1980. NOAA data buoy office programs. Bulletin of the American Meteorological Society, 61(9), 1012-1017.

Holman, R. A., & Stanley, J. 2007. The history and technical capabilities of Argus. Coastal engineering, 54(6), 477-491.

Hwang, P. A., Krabill, W. B., Wright, W., Swift, R. N., & Walsh, E. J. 2000. Airborne scanning lidar measurement of ocean waves. Remote Sensing of Environment, 73(2), 236-246.

Kim, B. O., & Cho, H. Y. 2005. Image processing for video images of buoy motion. Ocean Science Journal, 40(4), 213-220.

Kim, B. O., Cho, H. Y., Lim, D. I., Yoon, G. L., & Park, Y. A. 2008. Nearshore wave measurement using single-video images of buoy motions. Journal of Coastal Research, 24(6), 1481-1486.

Laing, D. A., Gemmill, W., Magnusson, A. K., Burroughs, L., Reistad, M., Khandekar, M., ... & Carter, D. J. T. 1998. Guide to Wave Analysis And Forecasting. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Mathworks 1996. MATLAB. The Language of Technical Computing. Using MATLAB Version 5.

Poynton, C. 1996. A Technical Introduction to Digital Video, Chapter 1. John Wiley & Sons.

Robinson, I. S. 2010. Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography. Springer Science & Business Media.

Terray, E. A., Brumley, B. H., & Strong, B. 1999. Measuring waves and currents with an upward-looking ADCP. In Current Measurement, 1999. Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on (pp. 66-71). IEEE.

USACE. 2002. CEM II 1 - Water wave mechanics. Coastal Engineering Manual.

Vlachos, D. S., & Tsabaris, C. 2008. The use of vertical and horizontal accelerations of a floating buoy for the determination of directional wave spectra in coastal zones. Mathematical and Computer Modelling, 48(11), 1949-1956.

WAFO Group 2001. WAFO – a Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads. Tutorial for WAFO version 2.5. Lund University.

---

[i] http://explorador.cr2.cl/
[ii] http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/#observacionales
[iii] Barrientos, com. pers., 2016
[iv] http://physlets.org/tracker/8