

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Evolución del espectro direccional del oleaje en presencia de
corrientes intensas**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Tenoch Israel Juárez Díaz

Ensenada, Baja California, México

2015

He sido un niño pequeño que, jugando en la playa, encontraba de tarde en tarde un guijarro más fino o una concha más bonita de lo normal. El océano de la verdad se extendía, inexplorado, delante de mi.

Isaac Newton

Tesis defendida por

Tenoch Israel Juárez Díaz

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Director del Comité

Dr. José Pedro Osuna Cañedo

Dr. Modesto Ortiz Figueroa

Dr. Juan García Abdeslem



Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Coordinador del Programa de Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Tenoch Israel Juárez Díaz como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Evolución del espectro direccional del oleaje en presencia de corrientes intensas

Resumen aprobado por:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres

Director de tesis

Es bien sabido que en regiones costeras, tales como en nuestro caso, la Boca del Estero de Punta Banda (B-EPB), olas y corrientes coexisten y la interacción entre estos procesos juega un papel importante en la dinámica del lugar. Este estudio investiga estas interacciones, con un fuerte enfoque en los cambios del espectro del oleaje inducidos por la corriente. Se colectaron datos de oleaje y corrientes en 3 puntos diferentes de la Boca del Estero de Punta Banda por medio de sensores ADCP. Los sensores fueron instalados el día 7 de marzo de 2014 y estuvieron en funcionamiento durante 15 días. Los datos colectados en la B-EPB revelan que la energía de las olas en marea alta puede propagarse en la Boca del Estero, en interacción con la corriente. También se observó que la altura de ola aumenta durante el flujo y disminuye dramáticamente durante el refluo de la marea (corriente opuesta a la propagación del oleaje). Se compararon datos de oleaje y corrientes en la Bahía de Todos Santos, colectados con un sensor ADCP, con datos de oleaje en presencia de flujo, refluo y sin corriente obtenidos en la Boca del Estero de Punta Banda. La altura significativa del oleaje dentro de la B-EPB representa un 8% - 16% de la altura significativa del oleaje en la Bahía. La corriente de refluo retarda el avance del oleaje, y una corriente de flujo aumenta el avance del oleaje. Debido a las variaciones de la profundidad de la columna de agua en la entrada de la Boca, las olas pueden romper, transfiriendo su energía en una ola impulsada por las corrientes y turbulencia.

Palabras Clave: **Interacción oleaje-corrientes, Espectro del oleaje**

Abstract of the thesis presented by Tenoch Israel Juárez Díaz as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Sciences in Physical Oceanography.

Evolution of wave spectra in presence of current flume

Abstract approved by:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres

Director de tesis

Many investigations reports that in coastal areas like in Boca del Estero de Punta Banda (B-EPB), waves and currents coexists. The interactions between these two processes plays an important role in the dynamics of this place. This investigation studied the interactions between waves and currents, with a strong focus on the changes of the wave spectrum induced by currents. The data about waves and currents were collected using ADCP sensors at three different places of the Boca del Estero de Punta Banda. The sensors were in operation during 15 days. The data collected in the B-EPB shows that the energy from waves at high tide can propagate in interaction with current at B-EPB. Furthermore, it was observed that the wave height at the entrance increases at high tide (for the current wave propagation) and this height decreases dramatically during ebb tide (as opposed to the current wave propagation). This data were compared with wave data collected from the Bay of Todos Santos. For the data from Bay of Todos Santos, they were also used ADCP sensors in the presence of currents positive, currents negative and non-currents obtained from the Boca del Estero de Punta Banda (B-EPB). The significant wave height in the Boca del Estero de Punta Banda (B-EPB) represents 8% - 16% of the significant wave height in the Bay of Todos Santos. The reflux stream delayed the progression of waves and a flow stream increase the progression of waves. Due to variations in the depth of the water column at the entrance of the Boca del Estero de Punta Banda (B-EPB), the waves can break and transferring his energy into a driven-wave and turbulence.

Keywords: **Wave current interaction, Wave spectra**

Dedicatoria

A mi madre, por depositar su confianza en mi.

A mi familia, por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Al Dr. Francisco J. Ocampo Torres por darme la oportunidad de trabajar bajo su tutela, por el apoyo, y por nunca dejarme atrás.

A mis sinodales, Dr. Pedro Osuna, Dr. Juan García, Dr. Modesto Ortiz, por el tiempo dedicado en la revisión/corrección y consejos de este trabajo.

Al grupo de oleaje por tanto aprendizaje, por su sincera amistad, por las críticas, por los consejos y sobre todo por escucharme en las reuniones.

Al equipo profesional de buzos del Grupo de Oleaje (GO), Vladimir Toro, Erick Lemus y Rodrigo Alcaraz por su ayuda en la instalación, revisión y recuperación de los ADCP. Al Cap. Ivan por mantenernos a flote abordo de las embarcaciones.

A la Dra. Amaia Ruiz de Alegría por facilitarme datos del ADCP anclado en el Sitio 0. Al Dr. Manuel Lopez por facilitarme un par de bases para instalar los ADCP's. Al Dr. Marvan por facilitarme datos de la batimetría de la Boca del Estero de Punta Banda.

A Joliann Alers por su compañía, amor y palabras de aliento.

A Marco Larrañaga por sus intensas pláticas, consejos sobre análisis de datos y por su amistad, a todos mis amigos, compañeros del posgrado, familia y a todos aquellos que hicieron más amena la realización de este trabajo.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	x
1. Introducción	1
1.1. Motivación.	4
1.2. Objetivos.	5
1.2.1. Objetivo general.	5
1.2.2. Objetivos Particulares	5
1.3. Antecedentes.	6
2. Métodos	9
2.1. Materiales.	9
2.2. Descripción del área de investigación.	11
2.3. Arreglo experimental.	14
2.4. Análisis de datos.	18
3. Resultados	19
3.1. Condiciones hidrodinámicas en el Sitio 0	19
3.2. Condiciones hidrodinámicas en la Boca del Estero de Punta Banda	23
3.3. Evolución temporal del espectro del oleaje.	30
3.4. Cambio de forma del espectro del oleaje	36
4. Conclusiones	41
Lista de referencias bibliográficas	42
A. Series de tiempo completas	45
B. Programación de los sensores ADCP	51

Lista de figuras

Figura	Página
1. Fotografía de los ADCP instalados durante la campaña de medición de oleaje y corrientes en la B-EPB; lado izquierdo Aquadopp profiler, a la derecha AWAC.	10
2. Sitio de investigación, Boca del Estero de Punta Banda, Ensenada, B.C. México.	11
3. Mapa de la B-EPB con la localización de los instrumentos utilizados e información de la batimetría, la escala de colores representa la profundidad en metros. En la esquina superior derecha se muestra el perfil de la profundidad que corresponde al eje del canal A'-A. El símbolo de diamante corresponde al Sitio 1, el símbolo de estrella al Sitio 2 y el pentagrama al Sitio 3.	12
4. Diagrama del arreglo espacial de los instrumentos de medición de oleaje y corrientes en la boca del EPB	15
5. Fotografía de las maniobras de instalación de los sensores en la B-EPB	16
6. Fotografía de las maniobras de instalación de ADCP AWAC en la B-EPB	17
7. Parámetros integrales del oleaje registrados en el Sitio 0, entre el 8 y 22 de marzo de 2014. a) altura significativa del oleaje; b) período asociado al pico espectral; c) dirección promedio del oleaje; y d) elevación de la superficie de mar.	20
8. Resultados de las observaciones realizadas en el Sitio 0 durante un burst, elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).	21
9. Resultados de las observaciones realizadas en el Sitio 0 durante un burst, elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).	22
10. Información general de la campaña de medición en la B-EPB del 7 al 22 de marzo. a) velocidad de la corriente registrada. b) elevación de la superficie de mar registrada por los instrumentos. c) altura significativa del oleaje estimada para los cuatro sitios de medición.	23
11. Vectores de velocidad de la corriente, datos rotados con respecto al eje de máxima variabilidad.	25
12. Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 1. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).	26

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
13. Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 1 durante un burst. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).	27
14. Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 3 durante un burst. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).	28
15. Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 3 durante un burst. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).	29
16. a) Serie temporal de la elevación de la superficie. b) Evolución temporal del espectro del oleaje en función de la frecuencia, la escala de colores indica la densidad de la energía. Sitio 0	30
17. Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. a) Sitio 1, b) Sitio 2 y c) Sitio 3. La escala de colores indica la densidad energética.	31
18. Evolución temporal del oleaje en función de la frecuencia comparativamente entre sitios. Banda de frecuencia 0.1 ± 0.005 Hz para los sitios 1 (a), 2 (b) y 3 (c).	33
19. Evolución temporal del oleaje en función de la frecuencia comparativamente entre sitios. Banda de frecuencia 0.08 ± 0.005 Hz para los sitios 1 (a), 2 (b) y 3 (c).	34
20. Evolución temporal del oleaje en función de la frecuencia comparativamente entre sitios. Banda de frecuencia 0.06 ± 0.005 Hz para los sitios 1 (a), 2 (b) y 3 (c).	35
21. Cambio de la forma espectral del oleaje debido a corrientes. Frecuencia normalizada con respecto a la frecuencia principal del oleaje en el Sitio 0	37
22. Cambio de la forma espectral del oleaje debido a corrientes. Frecuencia normalizada con respecto a la frecuencia principal del oleaje en el Sitio 0	38
23. Propagación del oleaje en la B-EPB, (a) Frecuencia principal, (b) Amplitud, (c) Pendiente.	40
24. Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 1 La escala de colores indica la densidad energética.	45
25. Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 2 La escala de colores indica la densidad energética.	46

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
26. Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 3 La escala de colores indica la densidad energética.	47
27. Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 0 La escala de colores indica la densidad energética.	48
28. Cambio de la forma espectral del oleaje debido a corrientes. Frecuencia normalizada con respecto a la frecuencia principal del oleaje en el Sitio 0 .	49
29. Diferencia de altura entre cada Sitio en la B-EPB, comparado con las velocidades de marea y señal de marea	50

Lista de tablas

Tabla		Página
1.	Posición geográfica y profundidad de los ADCP instalados durante la campaña de medición de olaje y corrientes.	9
2.	Características de los sensores ADCP instalados en la campaña de mediciones en la B-EPB y Bahía Todos Santos.	14

Capítulo 1. Introducción

Una de las suposiciones básicas que usualmente se hacen cuando se desarrollan teorías de oleaje es que las olas se propagan sobre un medio homogéneo: los únicos movimientos del agua son los inducidos por las olas. En realidad, las olas rara vez se propagan en aguas en reposo, generalmente, viajan sobre corrientes impulsadas por el viento, por la fuerza de marea o por la gravedad (Hedges, 1987).

Corrientes con velocidades mayores a 1 m/s pueden ser encontradas en muchas zonas costeras alrededor del mundo, tales como esteros, estuarios, lagunas costeras, canales de navegación, etcétera. En estas regiones costeras, las olas y las corrientes coexisten intercambiando momento.

Es bien sabido que la hidrodinámica y la configuración morfológica de los sistemas estuarinos dependen en gran medida de tres procesos: propagación de la marea, estado del mar (oleaje) y las descargas de los ríos. Dependiendo de la energía relativa de cada uno, un estuario puede exhibir una configuración de oleaje dominante, una configuración de marea dominante, o una de río dominante (Olabarrieta *et al.*, 2011).

La hidrodinámica de estuarios, cuando la descarga de agua dulce es insignificante, es controlada principalmente por el efecto combinado de las mareas y las olas. Las corrientes de flujo y refluo interactúan con el campo de oleaje incidente para dar lugar a patrones complejos de corrientes y olas en las proximidades de la boca. El mecanismo de este tipo de interacciones en un marco bidimensional fue formulado por Longuet-Higgins y Stewart (1964), que introdujeron el concepto de tensor de radiación y demostraron la existencia de la transferencia de momento entre las olas y las corrientes. Más tarde, Bretherton y Garrett (1968) formularon la ecuación de acción de la ola de los espectros de oleaje direccional, y Huang *et al.* (1972) describieron los efectos de las corrientes en la forma espectral de la energía de las olas (Dodet *et al.*, 2013).

Cuando las olas se propagan en una región con corrientes opuestas, algunos de los

parámetros característicos, tales como la longitud de onda, altura, pendiente, velocidad y dirección, sufren modificaciones. La presencia de una corriente altera la velocidad de las olas y afecta la relación entre la longitud de onda observada y el período. La corriente también produce cambios en otras propiedades de las olas, como sucede con la velocidad orbital. La interacción entre las olas y las corrientes no sólo cambia las características de las olas, al mismo tiempo ésta transforma el campo de corrientes (Soares y de Pablo, 2006).

Las olas que se propagan sobre una corriente a favor, incluso en el sentido lineal, crecen con una mayor pendiente, y si es así rompen con mayor frecuencia, alterando la disipación de energía de las olas de manera significativa (Babanin *et al.*, 2011).

Se han realizado varios estudios experimentales en canales de olas (Chawla y Kirby, 2002; Lai *et al.*, 1989) y en cuencas (Soares y de Pablo, 2006) para investigar la evolución de las características del oleaje en presencia de corrientes, aunque el entendimiento de este fenómeno sigue siendo parcial debido a limitaciones en la experimentación tales como longitud de onda o la profundidad.

El proceso de bloqueo de ola, particularmente, ha sido objeto de varios estudios (Ardhuin *et al.*, 2012; Babanin *et al.*, 2011; Chawla y Kirby, 2002), es un fenómeno que ocurre cuando una ola se propaga en una corriente opuesta intensa, reduciendo su velocidad de grupo, de modo que la energía de la ola es incapaz de propagarse aguas arriba y en este punto, la velocidad de grupo tiende a cero.

La interacción no-lineal entre el oleaje y las corrientes aún no es bien comprendida y como varios estudios (Chawla y Kirby, 2002; Lai *et al.*, 1989) han demostrado, puede desempeñar un papel importante en la dinámica de las olas, en hidrodinámica y también en los procesos de transporte de sedimentos (Olabarrieta *et al.*, 2010).

Desafortunadamente, no existen muchas mediciones a escala real de las interaccio-

nes entre el oleaje y las corrientes que puedan ser usadas para validar las formulaciones teóricas. Por lo tanto, las zonas costeras que son capaces de generar estados del mar con oleaje y corrientes son una buena opción para estudiar estos efectos (Soares y de Pablo, 2006).

En este trabajo investigaremos la interacción del oleaje y las corrientes en un cuerpo costero dominado por la marea, localizado al suroeste de la bahía de Todos Santos en Ensenada, B. C., mediante el análisis de datos *insitu*. El Estero de Punta Banda es un entorno muy dinámico sujeto a un régimen mesomareal y un clima de oleaje energético. Las interacciones entre olas y corrientes ocurren en un amplio rango de condiciones tanto para olas como para corrientes, aquí nos limitaremos a considerar a las olas de 0.04 a 0.12 Hz y corrientes barotrópicas de marea de hasta ~ 1.5 m/s.

1.1. Motivación.

Actualmente existen modelos espectrales propuestos en diferentes estudios como Chawla y Kirby (2002), Saustika (2004), Lai *et al.* (1989), Hedges *et al.* (1985), entre otros, donde muestran que existen cambios en la forma espectral del oleaje debido a la presencia de corrientes, pero existen muy pocos estudios a escala real, donde se obtienen resultados que puedan validar los resultados numéricos y teóricos sobre la interacción ola-corriente.

Existen estudios como el de Nwogu (1993) que fue probablemente el primero que llevó a cabo una investigación experimental sobre el efecto de las corrientes en espectros de oleaje direccional. Él llevó a cabo pruebas de laboratorio en una cuenca con olas multi-direccionales, usando tanto olas regulares como irregulares, con diferentes ángulos entre la corriente y las olas. Presentó resultados experimentales limitados en el cambio de los espectros del oleaje causado por corrientes en aguas profundas. Sin embargo, estos estudios todavía son demasiado escasos para dar una visión importante de este mecanismo en los sistemas costeros complejos tales como esteros.

Este trabajo tiene como objetivo proporcionar datos experimentales sobre el efecto de las corrientes en la evolución del espectro del oleaje y cambio de forma espectral.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Estudiar el efecto de una corriente intensa en la evolución del espectro del oleaje. En particular se aborda el caso de oleaje propagándose en la boca de un estero.

1.2.2. Objetivos Particulares

Analizar la evolución del espectro del oleaje en presencia de corrientes intensas.

Analizar el cambio de la forma espectral del oleaje en presencia de corrientes en la Boca del Estero de Punta Banda.

Proveer resultados experimentales a escala real que posteriormente puedan validar modelos numéricos espectrales y teóricos de la interacción entre el oleaje y las corrientes.

1.3. Antecedentes.

Longuet-Higgins y Stewart (1961) fueron los primeros en describir la interacción entre olas y corrientes. Ellos introdujeron el concepto del tensor de radiación (*radiation stress*) y probaron la existencia de una transferencia de energía entre olas y corrientes. Después, Bretherton y Garrett (1968) formularon la ecuación que describe la “Acción de la ola”, que es importante en el estudio de la interacción de olas y corrientes, ya que se conserva en la ausencia de la generación de olas o disipación. En la teoría lineal, la acción de la ola es igual a la relación entre la densidad de energía de las olas y la frecuencia con respecto a la corriente.

Los cambios de la forma espectral del oleaje debidos a corrientes opuestas y a favor han sido discutidos por Hedges (1981), Burrows y Hedges (1985) y Hedges *et al.* (1985). Generalmente, las corrientes a favor conducen a una reducción de la densidad espectral sobre todas las frecuencias, mientras que las corrientes opuestas conducen a un aumento de la densidad espectral (siempre y cuando la ola pueda viajar a través de la corriente). Sin embargo el aumento en la densidad espectral está limitado por el rompimiento de la ola como por parte de la saturación del espectro.

Huang *et al.* (1972) propusieron las primeras ecuaciones que describen el cambio de la forma espectral del oleaje debido a la presencia de corrientes. Sin embargo, no tomaron en cuenta la incidencia del rompimiento del oleaje inducido por corrientes opuestas, particularmente para las olas en el rango de equilibrio de los espectros. Hedges (1981) y Hedges *et al.* (1985) modificaron el modelo teórico propuesto por Huang *et al.* (1972) con la finalidad de incluir este efecto.

Sakai y Saeki (1984) reportan en su estudio que la transformación de olas irregulares debida a corrientes opuestas en un fondo con pendiente es caracterizado por la descarga (gasto) por unidad de ancho y la pendiente de la ola en aguas profundas, que es cualitativamente la misma que la de olas regulares. Recientemente Chawla y Kirby (2002) reportan observaciones y modelación de olas irregulares bloqueadas por corrien-

tes opuestas.

Para el caso general de refracción en aguas profundas y refracción de olas direccionales debida a la corriente, Phillips (1977) derivó una ecuación para una cantidad invariante, la llamada densidad espectral de acción de ola, que establece que la densidad espectral de la acción de ola en el dominio k , $N(k) = E(k)/\sigma$, donde $E(k)$ es la densidad espectral de energía de las olas en el dominio k y σ es la frecuencia intrínseca del oleaje, es invariante a lo largo del rayo de la ola. Tayfun *et al.* (1976) presento una transformación explícita de la densidad de la acción de ola en el dominio k , $N(k)$, en uno más conveniente, densidad de acción de ola en el dominio de frecuencia y dirección $N(\omega, \alpha)$, donde ω es la frecuencia relativa a un fondo fijo y α es el ángulo dado por la orientación de la ortogonal de la ola.

Se han desarrollado modelos numéricos basados en el balance de acción de ola espectral (WAMDI-group 1988, Tolman 1990 y Ris 1997). En particular Ris (1997) presenta un tratamiento del fenómeno de bloqueo del oleaje basado en el balance de acción de ola espectral (aproximación de rayos) y compara los resultados de este modelo con los experimentos realizados por Lai *et al.* (1989), los resultados del modelo demuestran que la disipación de la energía de las olas es subestimada por el modelo en casos de bloqueo. En el caso con corriente, en la versión pública de SWAN, la energía del oleaje es removida (artificialmente) del modelo donde la densidad espectral excede a un valor debido al bloqueo. Sin embargo, este es un artificio carente de sustento físico.

Los estudios de las olas sobre las corrientes se concentran principalmente en una relación con el desplazamiento linear y cuasi-lineal Doppler o con efectos de la refracción. Una gran parte de la atención se ha prestado a las olas que viajan en corrientes adversas y específicamente, a las condiciones del bloqueo de energía de las olas (Chawla y Kirby, 2002; Saustika, 2004; Ardhuin *et al.*, 2007).

Chawla y Kirby (2002), mencionan que la transformación de la ola en una región de

bloqueo es simplemente el resultado de la propagación y disipación asociadas con la rompiente de las olas. Un posible aspecto del comportamiento no lineal del sistema ola-corriente, son los intercambios de energía de manera no lineal entre las olas y las corrientes. Aunque en las corrientes, tales intercambios son aparentemente insignificantes, en las olas esto puede indicar potencialmente una pérdida o ganancia de energía, y en consecuencia disminuir o aumentar su pendiente que está relacionado con la probabilidad de rompiente.

Tales alteraciones de la pendiente dan lugar a variaciones en la disipación de la energía de las olas que se propagan a través de la corriente, así como a cambios en el espectro del oleaje a través de efectos no lineales de las olas que no rompen, tales como reducción de energía espectral y un corrimiento de esta energía hacia las bajas frecuencias (Babanin *et al.*, 2011).

Ardhuin *et al.* (2012), observaron fuertes efectos en corrientes y modulaciones de la altura de ola por las corrientes de marea. Para variaciones de corriente en escalas pequeñas, el rápido aumento de la pendiente en el oleaje aumenta la probabilidad de rotura. Babanin *et al.* (2011), encontraron que en el caso de las corrientes adversas, el comportamiento de las olas es fuertemente no lineal y conduce a una reducción de la energía de las olas en las frecuencias bajas, permitiendo a las olas penetrar en la corriente.

Capítulo 2. Métodos

Los datos usados en este estudio fueron obtenidos a partir de una campaña de mediciones de oleaje y corrientes en la Boca del Estero de Punta Banda (B-EPB) y la Bahía de Todos Santos, del 7 al 22 de marzo de 2014. Estas mediciones fueron realizadas con cuatro instrumentos tipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) instalados en el fondo.

Tres de los cuatro instrumentos fueron instalados en diferentes puntos estratégicos de la B-EPB, simulando la configuración de un canal de olas de laboratorio (ver tabla 1 y Fig. 4), mientras que el cuarto instrumento fue instalado en la Bahía de Todos Santos, a 3 km al noroeste de la Boca del Estero de Punta Banda.

Tabla 1: Posición geográfica y profundidad de los ADCP instalados durante la campaña de medición de oleaje y corrientes.

Sitio	Lat. [°]	Lon [°]	Prof. [m]
Sitio 0	31°48'24.70"N	116°38'14.00"W	20
Sitio 1	31°46'37.90"N	116°37'9.50"W	5
Sitio 2	31°46'36.60"N	116°37'6.30"W	11
Sitio 3	31°46'35.80"N	116°37'3.10"W	8.5

2.1. Materiales.

Para la realización del presente estudio se utilizaron instrumentos de medición de corrientes y oleaje tipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), con capacidad para resolver el campo direccional del oleaje.

Los Perfiladores de corriente (ver Figura 1), se han utilizado para medir corrientes y oleaje en aguas someras y zonas costeras por al menos dos décadas. El principio de medición básico de un ADCP es emitir pulsos cortos de sonido y detectar el cambio de frecuencia en la señal que se refleja hacia el sensor. Los vectores de velocidad (a lo largo del haz acústico) son calculados con base en el desplazamiento Doppler y sus profundidades se determinan a partir del intervalo de tiempo entre la emisión del pulso acústico y la recepción de la señal reflejada (backscattered). La señal es reflejada por partículas en



Figura 1: Fotografía de los ADCP instalados durante la campaña de medición de oleaje y corrientes en la B-EPB; lado izquierdo Aquadopp profiler, a la derecha AWAC.

suspensión tales como sales, sedimentos o plancton.

Con los perfiladores se puede medir el oleaje direccional además del perfil vertical de la corriente. Una función específica de los ADCP que se utilizaron en este trabajo es obtener también datos de presión y las dos componentes horizontales de la velocidad, muestreando a 1 ó 2 Hz, en una determinada sección de un ancho específico (celda). Estos datos son usados para estimar el oleaje direccional mediante el método PUV (presión, componente U y V de la corriente) (Godon y Lohrmann, 2001). Dicho método es aconsejable para equipos que se instalan en intervalos de profundidad de entre 2 y 20 m.

En este trabajo se utilizaron cuatro instrumentos tipo ADCP de dos modelos diferentes, (2) Nortek AWAC y (2) Nortek Aquadopp profiler. Uno de los instrumentos Nortek Aquadopp Profiler, contiene un firmware HR (High Resolution) mientras que el otro funcionó en modo estándar. El firmware HR convierte al perfilador Aquadopp en un equipo

de alta resolución capaz de medir perfiles de velocidad con una resolución vertical de manera fina, en capas menores que 1 centímetro de largo y velocidades de muestreo de hasta 8 Hz.

2.2. Descripción del área de investigación.

El Estero de Punta Banda (EPB) es una laguna costera que se localiza dentro de la Bahía de Todos Santos, en el noreste de la península de Baja California (ver Figura 2). El Estero de Punta Banda está separado de las aguas de la Bahía de Todos Santos por una barra de arena de ~ 7.5 km de longitud que se extiende en dirección NNE desde la base de una cadena de cerros que conforma la Punta Banda; y tiene una abertura angosta en su extremo norte, que constituye la boca del estero (Pritchard *et al.*, 1978). Es en esta boca donde se llevó a cabo parte de la campaña de mediciones de oleaje y corrientes.

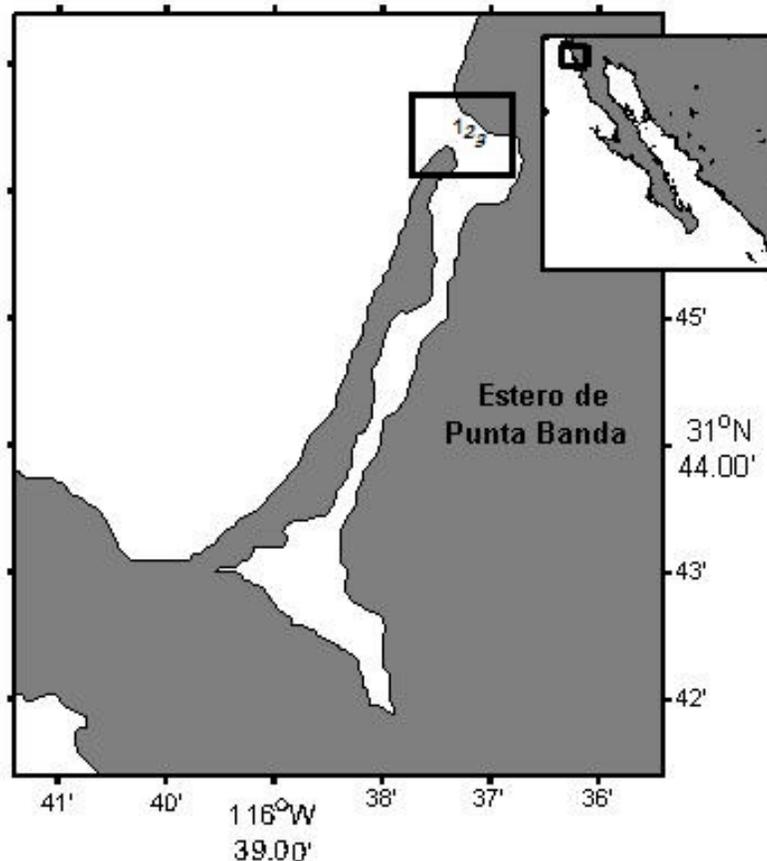


Figura 2: Sitio de investigación, Boca del Estero de Punta Banda, Ensenada, B.C. México.

Dicho cuerpo costero tiene una longitud de ~ 10 Km y un ancho de ~ 2 Km, el intercambio de agua y de sedimento entre la bahía y el Estero de Punta Banda está dominado fuertemente por la marea y se lleva a cabo a través de la boca natural de ~ 125 m de ancho. La velocidad máxima del flujo y reflujo de agua es de $\sim \pm 1.5$ m/s en la boca durante las mareas vivas (Pritchard *et al.*, 1978)

La batimetría de la B-EPB se caracteriza por un canal bien definido en la parte NE, con profundidades máximas de ~ 10 m; a los lados del canal la profundidad no supera los 2 metros (ver Figura 3).

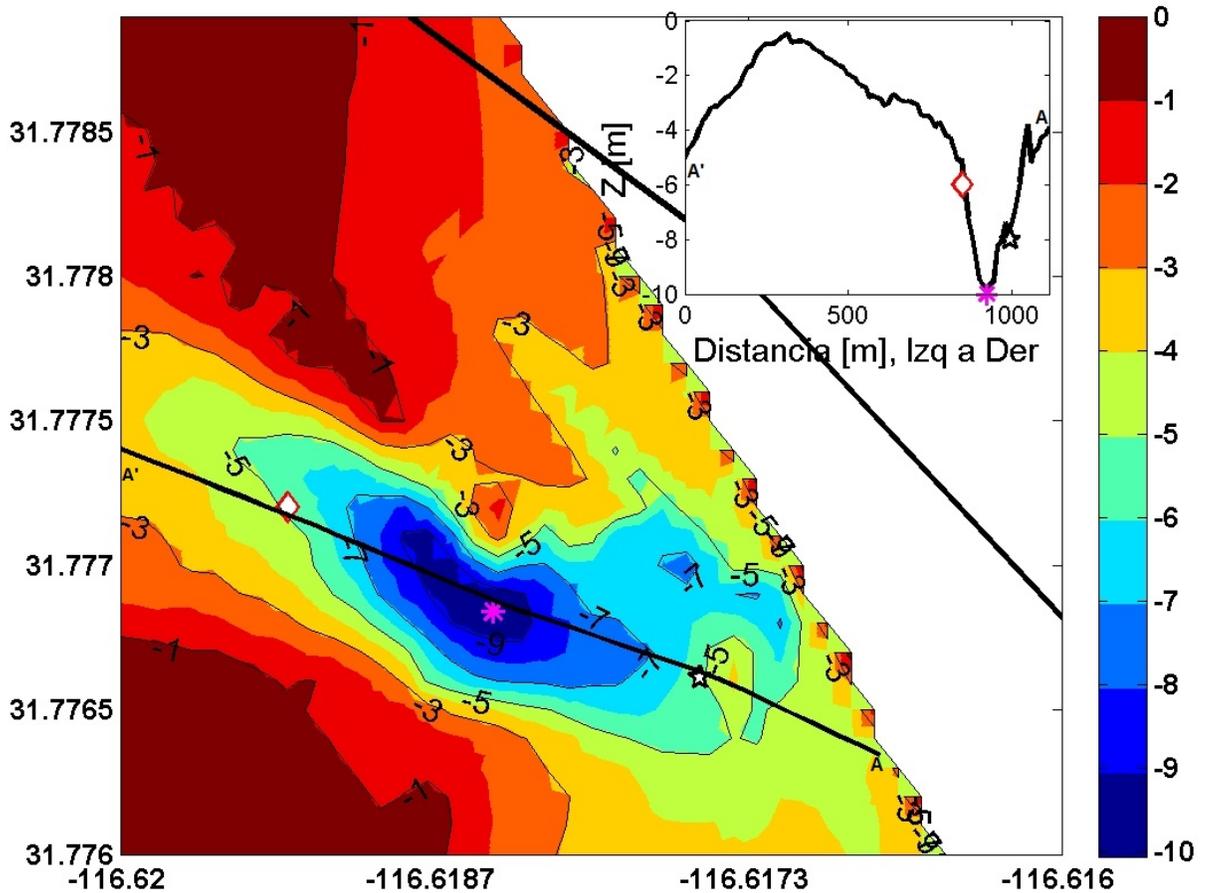


Figura 3: Mapa de la B-EPB con la localización de los instrumentos utilizados e información de la batimetría, la escala de colores representa la profundidad en metros. En la esquina superior derecha se muestra el perfil de la profundidad que corresponde al eje del canal A'-A. El símbolo de diamante corresponde al Sitio 1, el símbolo de estrella al Sitio 2 y el pentagrama al Sitio 3.

En la frontera de la B-EPB con la bahía tenemos la presencia de una barra de arena sumergida que queda expuesta durante marea baja, dando como resultado la disipación casi total de la energía del oleaje en dicha fase de la marea.

La Figura 3 muestra la batimetría de la zona donde se fijaron los instrumentos de medición de oleaje y corrientes en la B-EPB, se observa en escala de colores la profundidad en metros. En la parte superior derecha se muestra el perfil de profundidad que corresponde al eje A'-A; el eje de las abscisas representa la distancia en metros desde la costa hasta el interior de la boca y el eje de las ordenadas representa la profundidad del perfil en metros.

2.3. Arreglo experimental.

En la campaña de mediciones en la Boca del Estero de Punta Banda, tres de los cuatro perfiladores acústicos Doppler de corrientes con sensores de presión fueron sincronizados e instalados durante la marea baja de la mañana del 06 de marzo de 2014. Los instrumentos fueron instalados a lo largo del canal principal como se indica en la Figura 4, otro sensor se instaló en la Bahía de Todos Santos a 3 km al noroeste de la B-EPB. Los instrumentos colectaron datos de las variaciones de la presión y corrientes a diferentes frecuencias de medición (ver Tabla 2). En la Figura 3 se muestra la localización de los instrumentos instalados en la B-EPB, así como la topografía propia de la B-EPB.

Tabla 2: Características de los sensores ADCP instalados en la campaña de mediciones en la B-EPB y Bahía Todos Santos.

	Sitio 0	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Perfilador	AWAC	Aquadopp	Aquadopp	AWAC
Intervalo de medición	3600 s	1800 s	1800 s	1800 s
Frecuencia de medición	1 Hz	2 Hz	2 Hz	1 Hz
Ancho de celda	1 m	0.3 m	1 m	1 m
Duración del muestreo	1024 s	1024 s	1024 s	1024 s
Firmware HR	No	Si	No	No

Los ADCP instalados en la B-EPB colectaron datos durante 19 minutos y los datos colectados durante el muestreo se almacenan en paquetes de información, a los que se les denomina “burst”. El sensor mide el perfil vertical de la velocidad de la corriente en los primeros dos minutos de funcionamiento y de los datos recabados durante este período, se obtiene el promedio para cada sección vertical del haz (celdas). Cada sensor cuenta con 3 haces.

Posteriormente el sensor muestrea la velocidad orbital del oleaje durante 17 minutos, simultáneamente recaba información de la elevación de la superficie con el sensor de presión que tiene integrado.

En la figura 4 se muestra un diagrama del arreglo espacial de los sensores instalados en la B-EPB y en la Bahía de Todos Santos, se señala la dirección de la corriente y la propagación del oleaje así como las profundidades a las que quedaron instalados los ADCP.

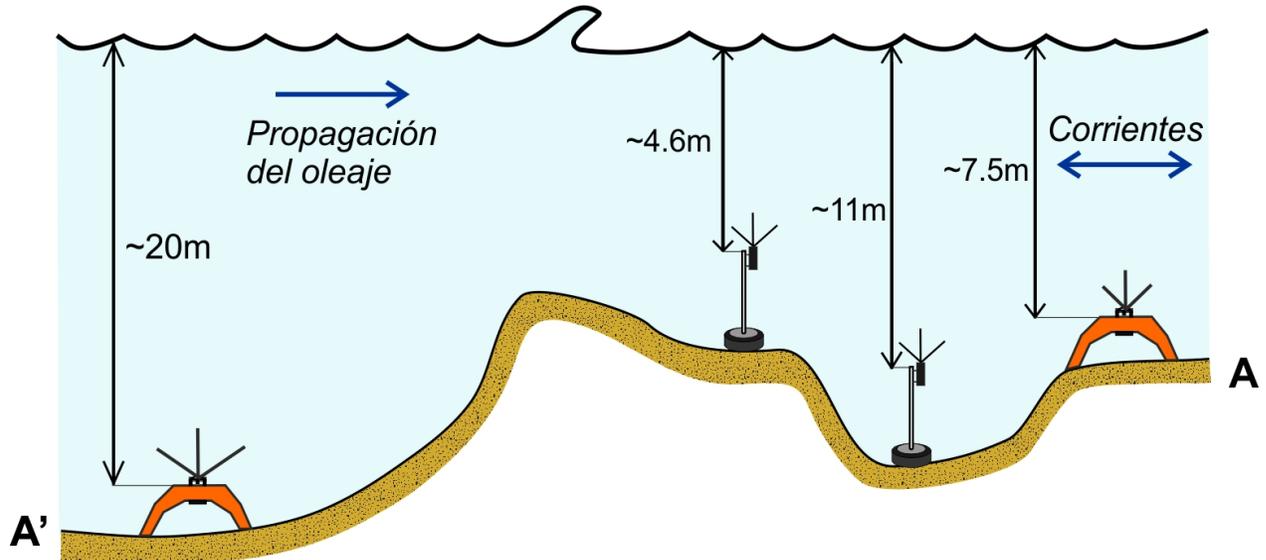


Figura 4: Diagrama del arreglo espacial de los instrumentos de medición de oleaje y corrientes en la boca del EPB

Los instrumentos instalados en la B-EPB fueron programados para iniciar mediciones el día 7 de marzo de 2014 a las 15:00 hrs horario GMT (Greenwich Mean Time). La última medición registrada fue el día 22 de marzo del mismo año a las 21:00 hrs GMT. El instrumento instalado en el Sitio 0 comenzó a coleccionar datos el día 14 de enero de 2014 a las 10:00 hrs, finalizando el muestreo el día 28 de mayo a las 8:40 hrs GMT, es decir los cuatro instrumentos midieron simultáneamente durante toda la campaña de mediciones.

Previo a la instalación

Antes de realizar la instalación de los ADCP's se llevo a cabo una visita de prospección al lugar, en la que se marcaron, con ayuda de un GPS marca Garmic modelo 100, las coordenadas donde quedarían instalados los equipos. En esta visita también se analizó el sustrato donde quedarían anclados los instrumentos. Se encontró que el material es de arenas a lodos en algunos sitios, información que se tomó en cuenta para el diseño de las bases de los instrumentos.

Estas bases, como se puede observar en la Figura 1, tienen una llanta en la parte inferior rellena de cemento colado con grava y varillas de acero, en la parte central se

insertó un mástil de aluminio de 1.3 m de alto y en la parte superior se encuentra una pinza del mismo material que sostiene al aquadopp.

Instalación

Como se ilustra en las Figuras 5 y 6, el día 7 de Marzo de 2014 se instalaron los ADCP en la Boca del Estero de Punta Banda, utilizando la embarcación Genus propiedad de CI-CESE, en compañía de los buzos M.C. Erick Rivera Lemus, Dr. Vladimir Toro y el Oc. Rodrigo Alcaraz. En el sitio 1 el instrumento quedó sujeto al fondo a una profundidad de 6 m, en el sitio 2 el ADCP se instaló a una profundidad de 11 m y en el sitio 3 la profundidad registrada fue de 8 m.



Figura 5: Fotografía de las maniobras de instalación de los sensores en la B-EPB

Recuperación:

El día 21 de marzo de 2014 se realizó la recuperación de los ADCP, utilizando la embarcación Genus propiedad de CICESE, con ayuda del mismo grupo de buzos con que se realizó la instalación. La recuperación del equipo instalado en el Sitio 0 se realizó el día 28 de mayo a bordo de la embarcación Calhypso.

Los instrumentos colocados en el fondo estuvieron separados estratégicamente, con la finalidad de cubrir la B-EPB longitudinalmente semejando la forma de un laboratorio de canal de olas, tal y como se observa en la figura 4.



Figura 6: Fotografía de las maniobras de instalación de ADCP AWAC en la B-EPB

2.4. Análisis de datos.

Con la finalidad de analizar los datos y de comparar los resultados obtenidos en los cuatro sitios, los registros de los instrumentos se procesaron de la siguiente manera:

- De los registros de presión, se obtuvieron series de tiempo de la elevación de la superficie, para olas y mareas.
- La información de velocidad de las corrientes es el resultado de un promedio de 2 minutos en cada muestreo.
- A las series de datos de elevación la de superficie en cada sitio se les aplicó la Transformada de Fourier (FFT), así como un factor de corrección a cada intervalo de densidad de energía espectral $S(f)$ para tomar en cuenta la atenuación del oleaje con la profundidad.
- Los parámetros integrales del oleaje (H_s , T_m , D_m , etc) fueron calculados usando el método PUV (Presión, componente U y V de la corriente) propuesto por Godon y Lohrmann (2001).
- La altura significativa (H_s) fue calculada integrando $S(f)$ en el intervalo de frecuencia $0.04 < f < 0.15$ Hz donde f es la frecuencia y S la energía del espectro. Se seleccionó un límite inferior igual a 0.04 Hz para incluir la mayor cantidad de energía del oleaje tipo *swell* que domina en la bahía.

Nota: En el Sitio 1, la información de la velocidad de la corriente de marea no pudo ser extraída del equipo, ya que al instalarse el firmware HR, el equipo disminuye la resolución midiendo corrientes intensas. Para el caso de medición de oleaje por medio del sensor de presión no se presentó problema. El Sitio 2 no cuenta con la información de velocidad orbital del oleaje, se presume de una falla en el equipo, sin embargo si se tiene información de la presión y velocidades de la corriente.

Capítulo 3. Resultados

3.1. Condiciones hidrodinámicas en el Sitio 0

En el Sitio 0, localizado a 3 km al noroeste de la B-EPB, se instaló un ADCP modelo AWAC (600kh) que trabajó de enero a mayo de 2014, este instrumento recopiló información de la elevación de la superficie de mar, oleaje y corrientes marinas (ver Tabla 2). En este trabajo solo se presentan y analizan datos del 8 al 22 de marzo, que fue el intervalo de tiempo en el cual se realizó la campaña de mediciones en la B-EPB.

Las condiciones de oleaje, marea y corrientes marinas medidas en el Sitio 0 con el equipo AWAC se presentan como referencia al analizar la evolución del espectro del oleaje en presencia de corrientes intensas en de la Boca del Estero de Punta Banda (B-EPB).

La figura 7 muestra las series de tiempo de los parámetros integrales del oleaje. La altura significativa del oleaje (H_s , Fig. 7a) muestra valores de más de 2 metros y el periodo promedio (T_p , Fig. 7b) muestra valores de hasta 20 segundos, característicos de eventos de oleaje generados en tormentas distantes (*swell*), la mayor altura de ola se presenta el día 13 de marzo ($H_s \sim 3$ m).

La altura de ola significativa registrada durante la campaña de mediciones oscila entre 1 y 2.5 m, con períodos asociados al pico espectral (T_p , Fig. 7b) entre 10 y 20 segundos. La figura 7d representa la elevación de la superficie del mar referida a la profundidad a la cual estaba fondeado el ADCP AWAC.

La serie de tiempo de H_s del Sitio 0, nos muestra eventos de oleaje generado en tormentas distantes, alcanzando alturas máximas de 2.5 y 3 m, este oleaje es debido a forzamientos locales de viento (escala oceánica), la serie de tiempo de T_p muestra un patrón de dispersión del oleaje clásico de eventos de oleaje *swell*, donde arriban primero las olas largas y después olas con menor longitud de onda. La dirección de propagación

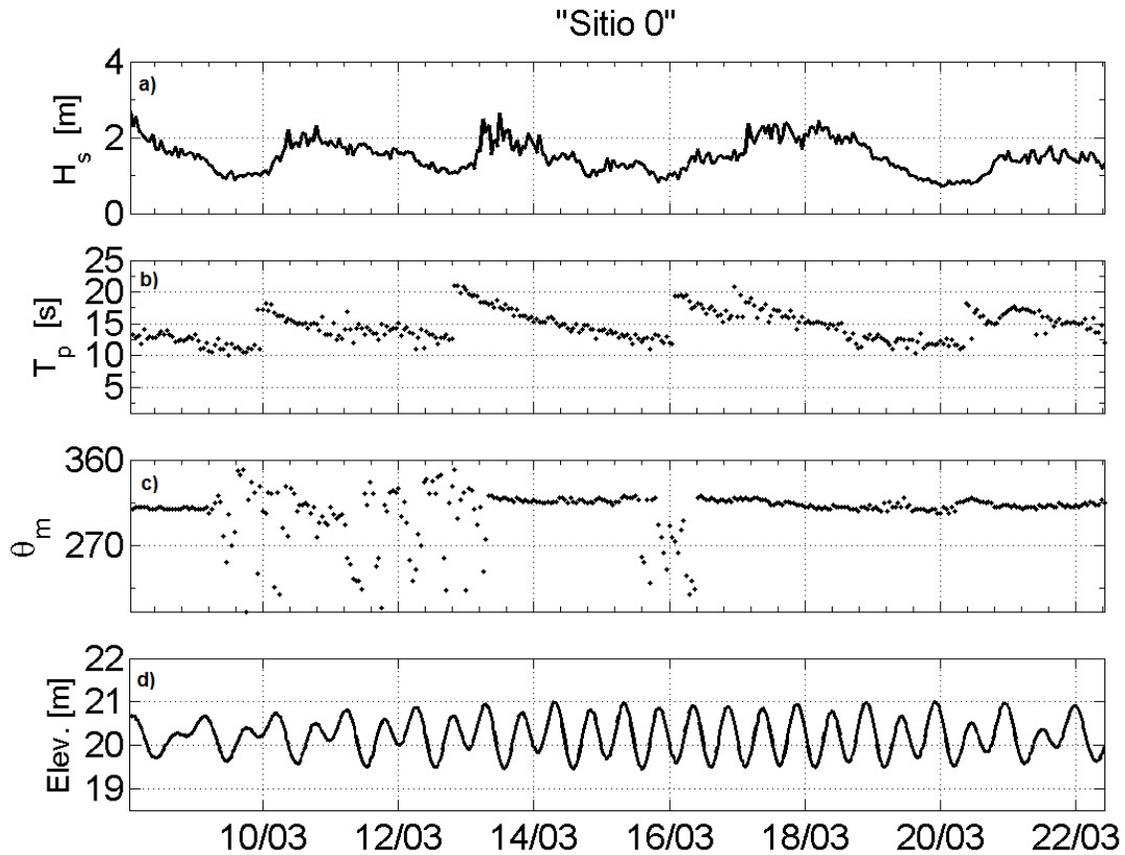


Figura 7: Parámetros integrales del oleaje registrados en el Sitio 0, entre el 8 y 22 de marzo de 2014. a) altura significativa del oleaje; b) período asociado al pico espectral; c) dirección promedio del oleaje; y d) elevación de la superficie de mar.

del oleaje es de 120 grados.

En las figuras 8d y 9d se muestran ejemplos del espectro direccional del oleaje estimado durante un burst, indicando la densidad energética y dirección de propagación del oleaje. La flecha roja nos indica el vector dirección de la corriente.

En las figuras 8e y 9e se muestran ejemplos del espectro en frecuencia del oleaje, con picos espectrales en 0.06-0.07 Hz, así como la densidad energética del oleaje. En la figura se indica la fecha de toma de datos, la velocidad de la componente horizontal de la corriente (U) y la altura significativa del oleaje (H_s).

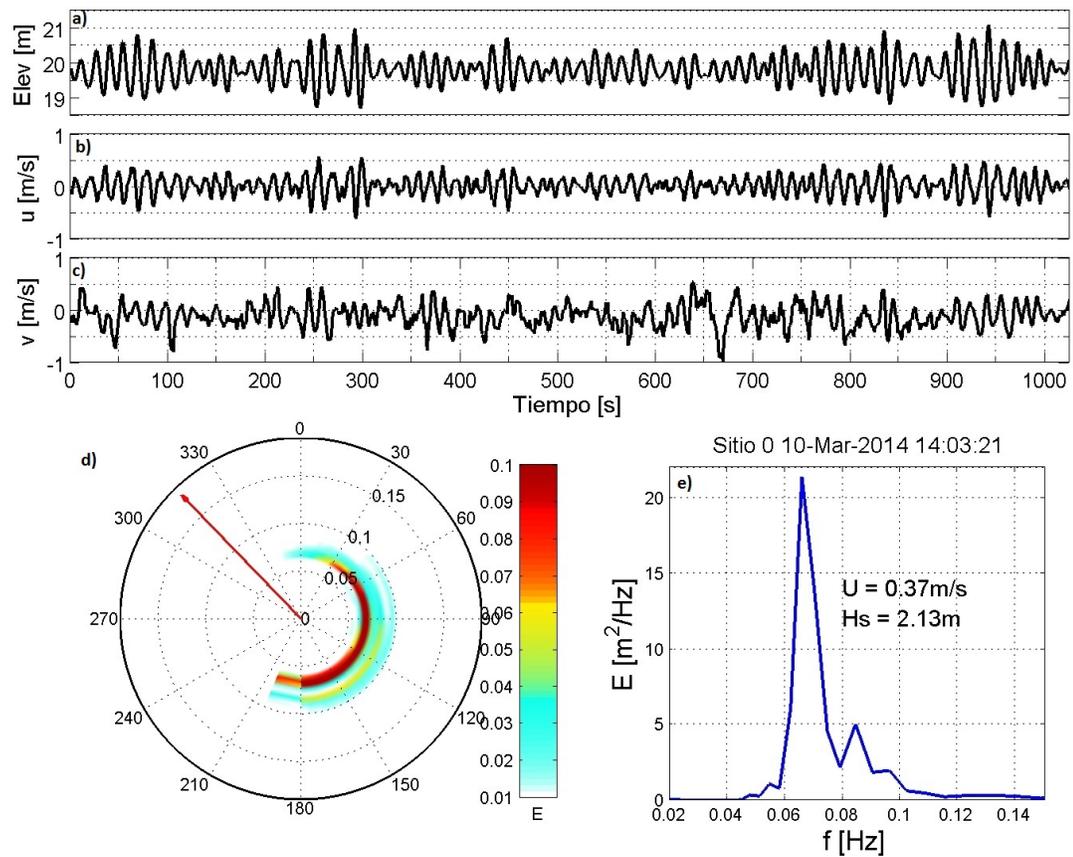


Figura 8: Resultados de las observaciones realizadas en el Sitio 0 durante un burst, elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).

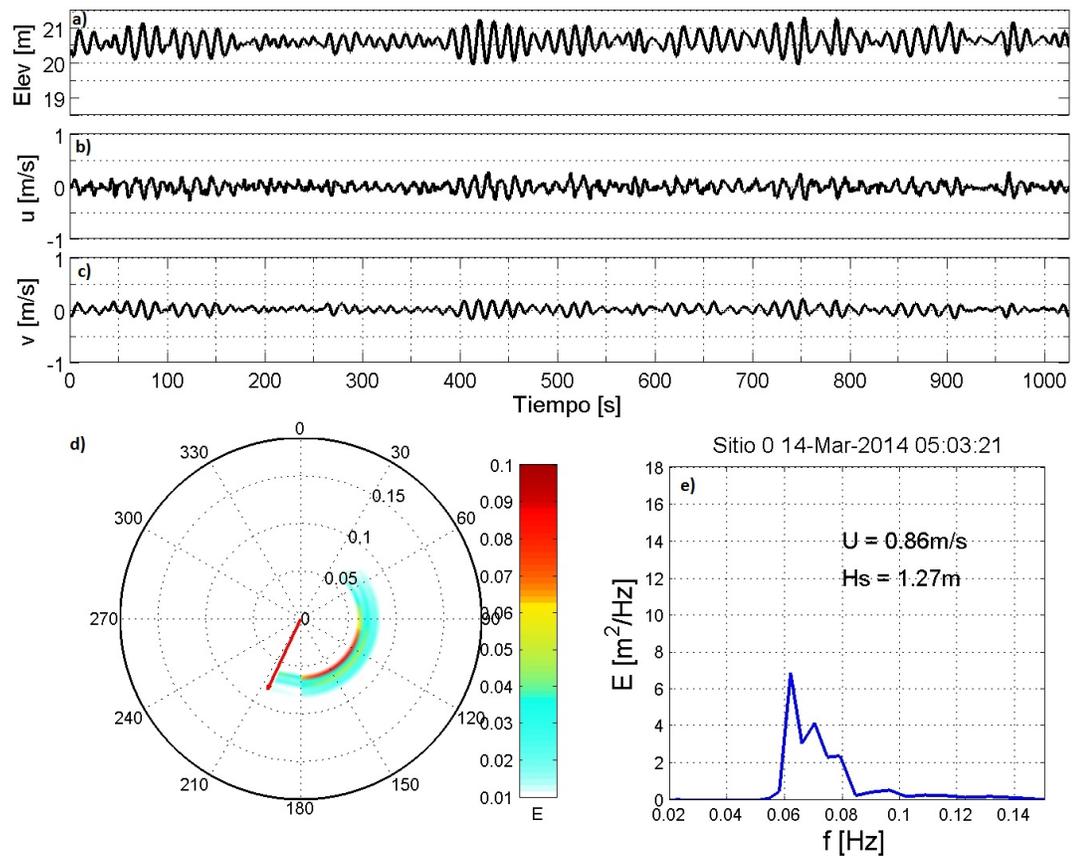


Figura 9: Resultados de las observaciones realizadas en el Sitio 0 durante un burst, elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).

3.2. Condiciones hidrodinámicas en la Boca del Estero de Punta Banda

En esta sección se describen los datos colectados en los 3 sitios de medición en el canal de la B-EPB (ver figura 3). En los Sitios 1, 2 y 3, se obtuvieron datos de perfiles de velocidad de la corriente con una resolución espacial vertical de 1 m, elevación del nivel del mar y oleaje cada 30 minutos.

La figura 10 muestra las series de tiempo de algunos parámetros hidrodinámicos durante el período de medición en la B-EPB. En la Fig. 10a se puede apreciar la velocidad de la corriente registrada en los sitios 2 y 3, los valores positivos indican la entrada de flujo al Estero de Punta Banda.

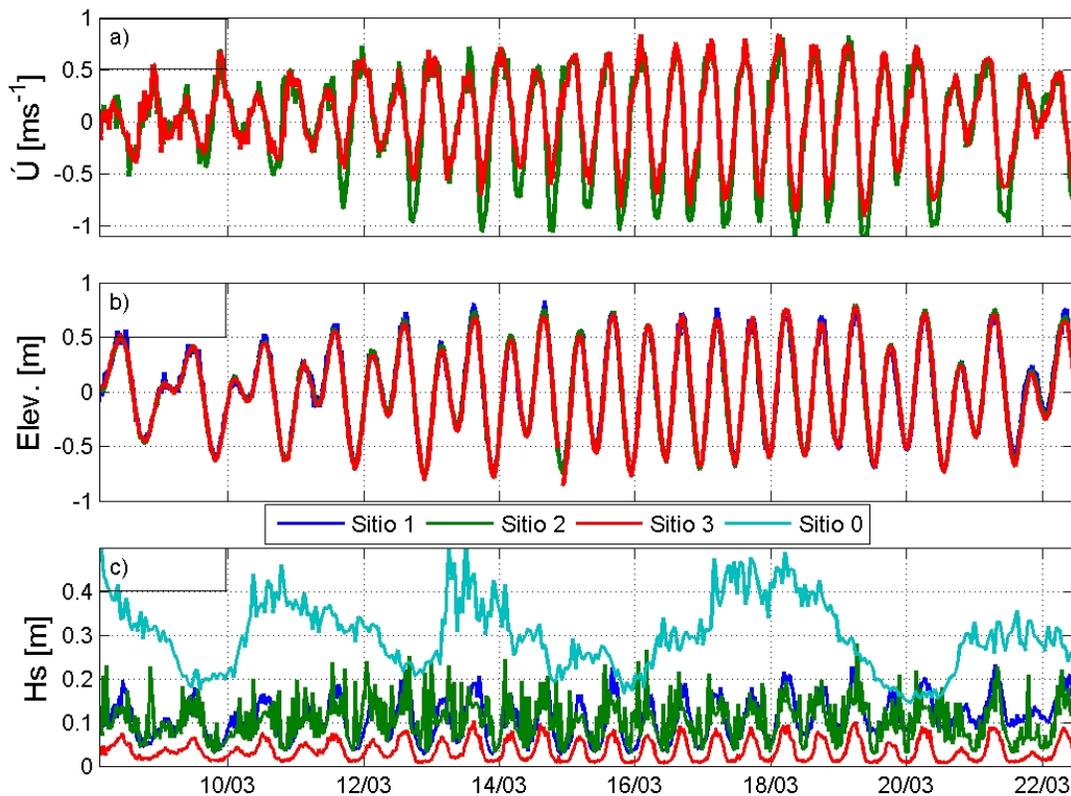


Figura 10: Información general de la campaña de medición en la B-EPB del 7 al 22 de marzo. a) velocidad de la corriente registrada. b) elevación de la superficie de mar registrada por los instrumentos. c) altura significativa del oleaje estimada para los cuatro sitios de medición.

Los valores negativos de la corriente indican el reflujó de la marea en el EPB. Los valores negativos son mayores que los valores positivos, dando como resultado una mayor variación de la velocidad de la corriente. No se pudo recuperar información de la velocidad de la corriente en el Sitio 1, debido a su característica de Alta Resolución.

Los datos de velocidad de la corriente de marea obtenidos en los Sitios 2 y 3 se presentan referidos a lo largo del eje de máxima variabilidad independientemente de la posición de los instrumentos u orientación del canal (ver figura 11).

La velocidad de la corriente en los sitios 2 y 3 está fuertemente dominada por las mareas (figura 10 a y b), después de las mareas muertas, las velocidades de los ciclos de flujo/reflujó son ligeramente mayores que en mareas muertas, con máximos que ocurren entre la marea alta y baja.

Se observa que en el sitio 2 las variaciones en la velocidad de la corriente son mayores que en el sitio 3, es probable que la velocidad aumenta en este sitio debido a que el ancho de la boca es menor, simulando un efecto de embudo y por continuidad, la velocidad aumente.

En la figura 10b se muestra la señal de la elevación de la superficie registrada en los sitios 1, 2 y 3. En otras palabras es la señal de marea que se observa en la boca del estero.

En la figura 10c, se graficó la altura significativa del oleaje para los 4 sitios. En cada sitio de medición en la B-EPB y durante cada ciclo de mareas, la señal de la H_s varía en el tiempo, con valores mínimos que ocurren durante la marea baja.

Los valores de la serie de tiempo de H_s del Sitio 0 fueron divididos entre 5 para ser mostrados en la misma escala gráfica, se aprecia que no existe una modulación de la altura del oleaje debido a corrientes de marea, a diferencia de lo que se puede apreciar

en los sitios 1, 2 y 3 (Fig. 10c).

El oleaje al llegar al banco de arena sumergido que se encuentra situado justo frente a la B-EPB rompe y disipa la mayor parte de su energía, depende de la marea, ya que con marea alta, las olas logran propagarse en la B-EPB. La altura de ola que se propaga en el canal de la B-EPB se reduce debido a la interacción con la corriente de marea.

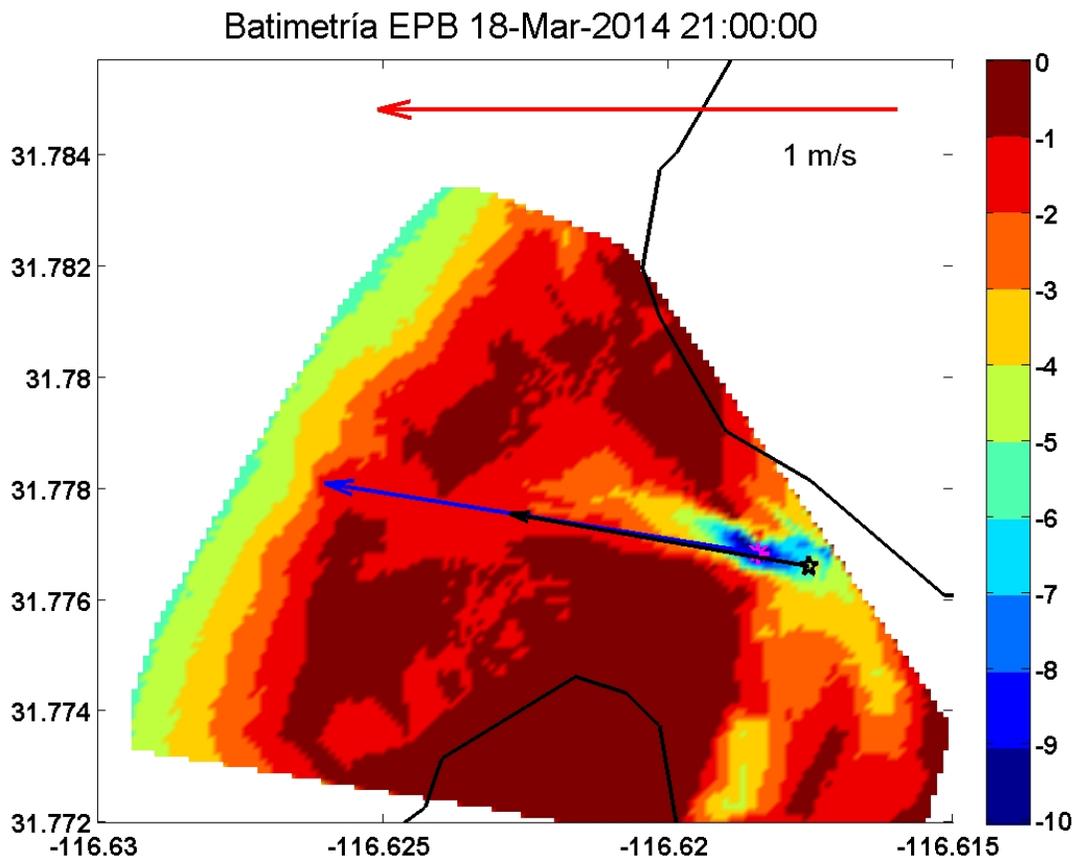


Figura 11: Vectores de velocidad de la corriente, datos rotados con respecto al eje de máxima variabilidad.

Se puede observar que la H_s del oleaje decrece conforme se propaga en la boca del Estero, la altura del oleaje en el Sitio 1 es mayor que en el Sitio 2 y mayor que en el Sitio 3, esto puede deberse a diferentes factores, uno de ellos es la fricción del oleaje con el fondo, la interacción con las corrientes de marea, y por rompimiento debida a la pendiente del oleaje.

Ejemplos de los datos obtenidos en los sitios 2 y 3 se muestran en las figuras 12-15, donde se presentan las series de tiempo de elevación de la superficie (asociada con el oleaje), componente u y v de la velocidad orbital del oleaje, mismas que fueron usadas para calcular la densidad de varianza espectral y los parámetros del oleaje H_s y T_p .

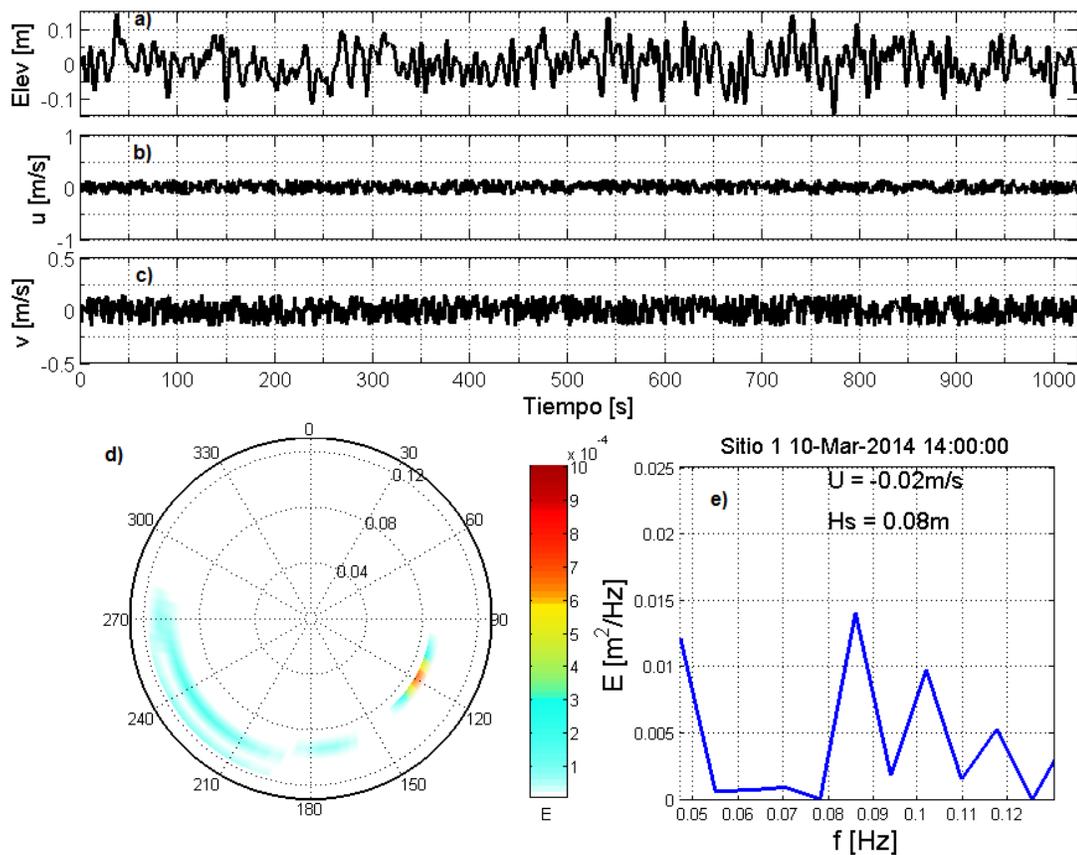


Figura 12: Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 1. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).

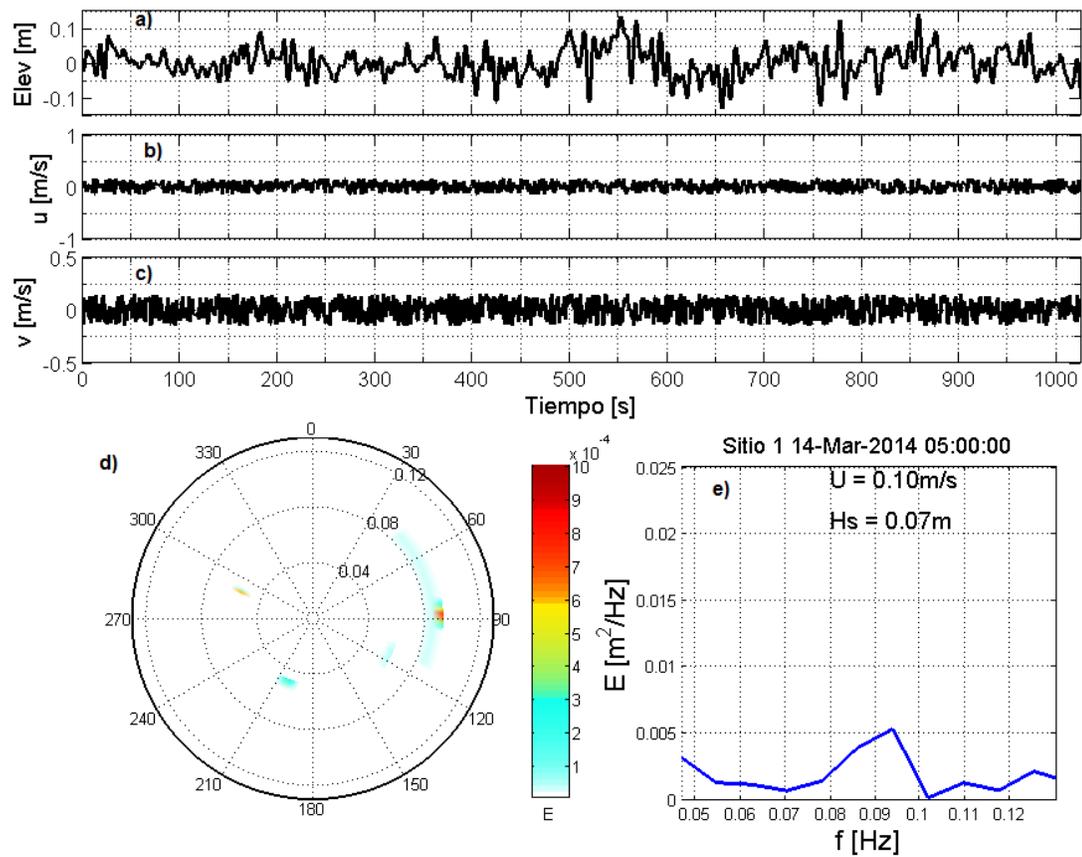


Figura 13: Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 1 durante un burst. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).

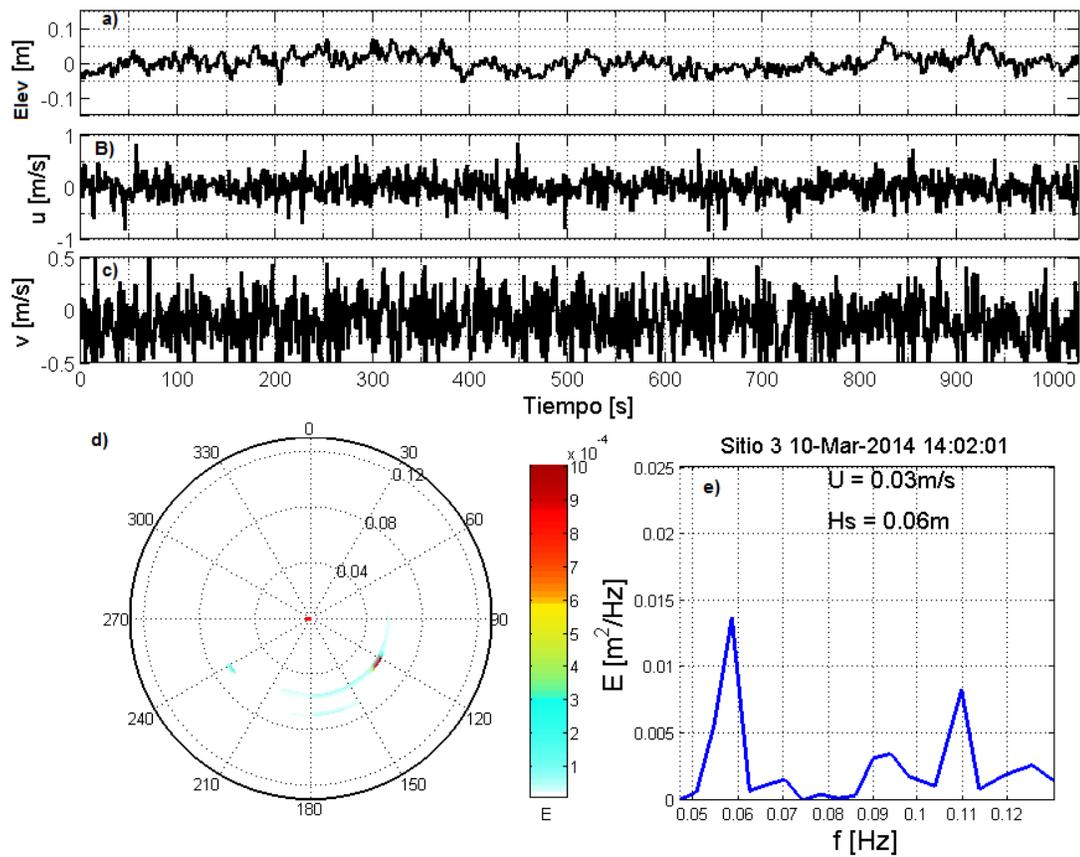


Figura 14: Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 3 durante un burst. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).

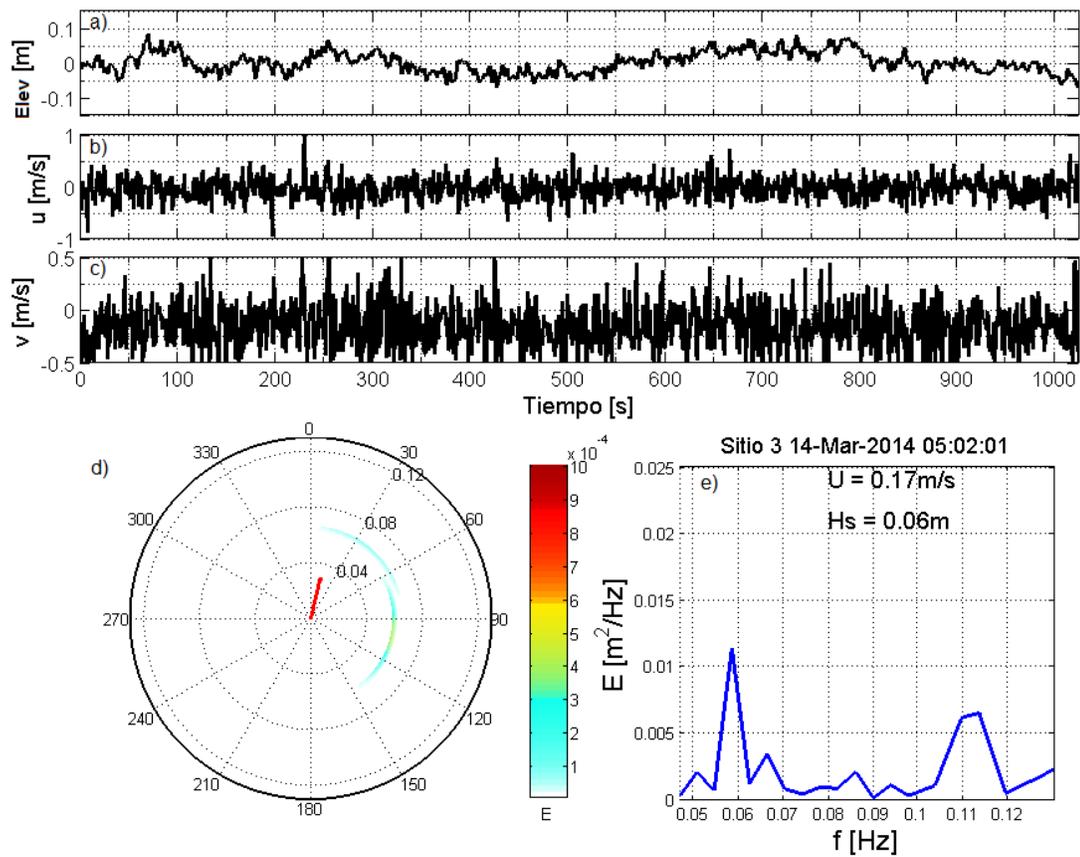


Figura 15: Resultados de las mediciones de oleaje realizadas en el Sitio 3 durante un burst. Elevación (a), componente u (b) y v (c) de la velocidad orbital del oleaje, parámetros necesarios para calcular el espectro direccional del oleaje (d) y el espectro en frecuencias (e).

3.3. Evolución temporal del espectro del oleaje.

Para obtener una mejor comprensión de la variación temporal de la energía del oleaje en la Boca del Estero de Punta Banda, se generó una serie de tiempo de densidad de varianza espectral de los sitios 0, 1, 2 y 3, calculada a partir de las series de tiempo de elevación de la superficie.

En la figura 16a, se presenta la información de la señal de la marea para el período presentado. La información del oleaje en la Bahía de Todos Santos nos es útil para conocer las características del oleaje antes de sufrir deformación por la profundidad e interactuar con la corriente al propagarse en la Boca del Estero de Punta Banda.

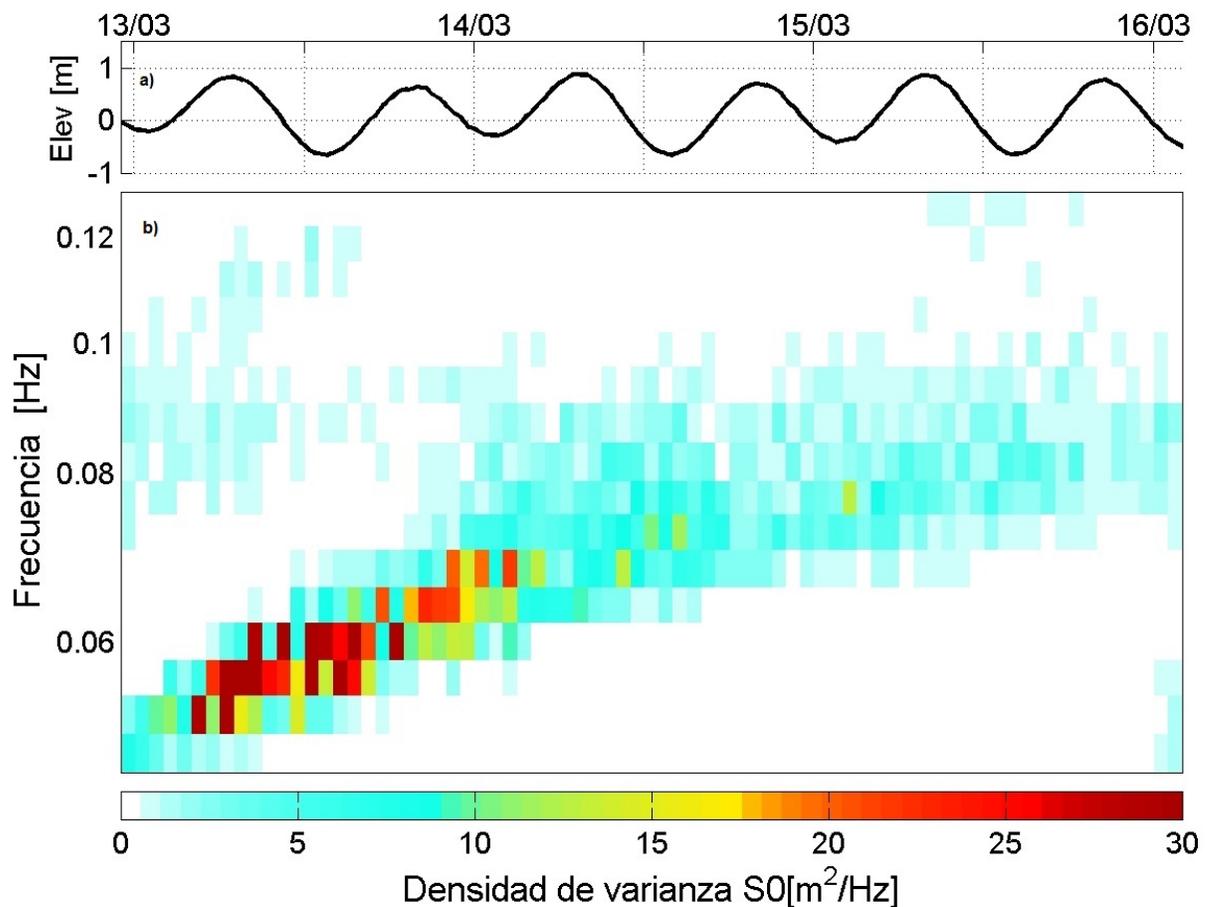


Figura 16: a) Serie temporal de la elevación de la superficie. b) Evolución temporal del espectro del oleaje en función de la frecuencia, la escala de colores indica la densidad de la energía. Sitio 0

En la figura 16b se presenta la evolución temporal del espectro en frecuencias del

oleaje registrado en el Sitio 0, del 13 al 16 de marzo del 2014. De la figura 7 sabemos que el oleaje arribó con un período de entre 12 y 16 segundos y que en el día 13 la altura del oleaje oscila entre los 2 y 2.5 m ($H_s = 4 * \sqrt{(S(f) * df)}$).

La evolución espacio-temporal del oleaje en la B-EPB se muestra en la figura 17, en la que es claro que la marea controla las condiciones de oleaje en la B-EPB, se observa que en marea baja, la energía del oleaje es mínima (color blanco) mientras que en marea alta, la energía del oleaje aumenta (colores más cálidos).

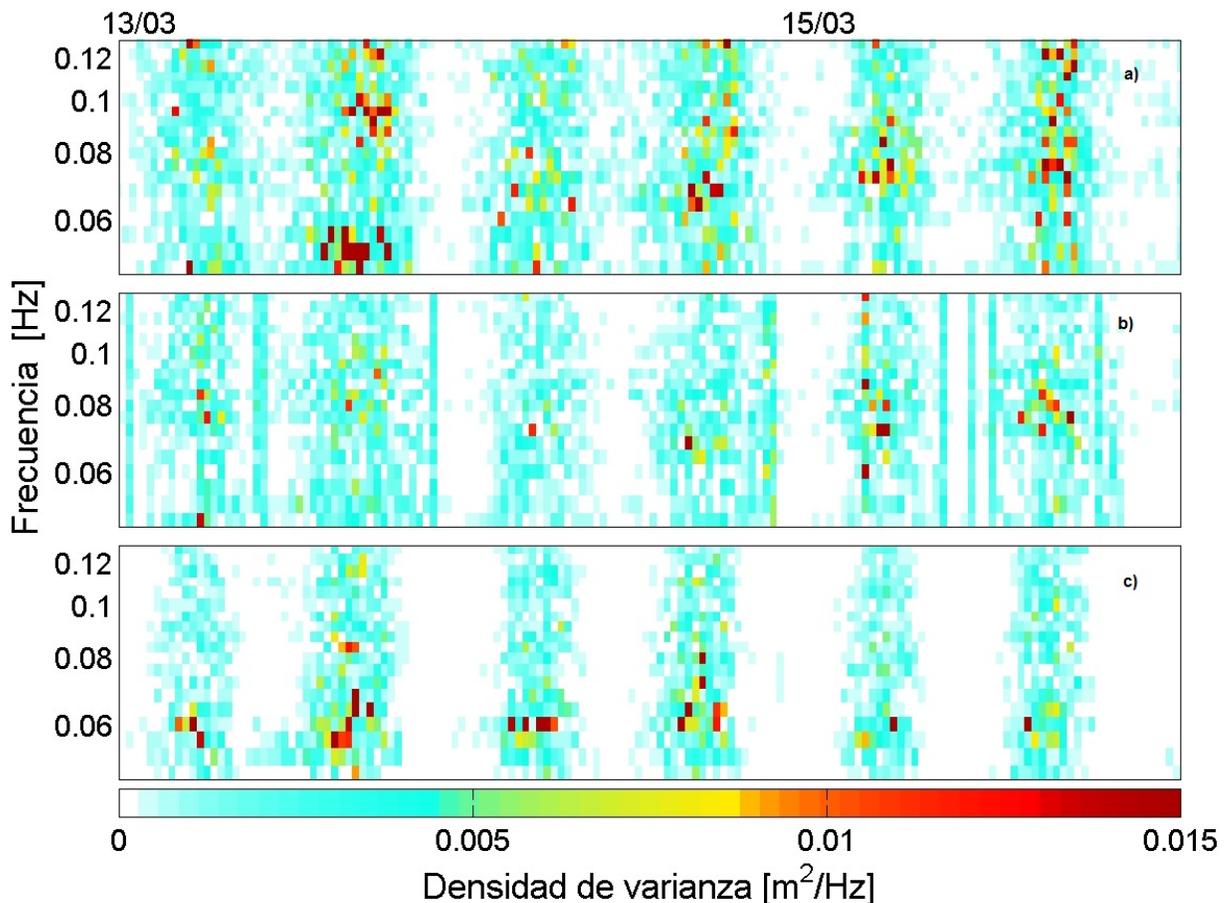


Figura 17: Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. a) Sitio 1, b) Sitio 2 y c) Sitio 3. La escala de colores indica la densidad energética.

La característica principal del espectro del oleaje en la B-EPB, deducida a partir de los datos, fué la presencia de grandes cantidades de energía no solo en la frecuencia principal (F_p) del oleaje registrada en el Sitio 0, sino también a frecuencias más bajas

que la F_p , correspondiente a ondas infragravatorias, cerca de $2F_p$.

La figura 17 representa la energía del oleaje que se propaga desde el Sitio 1 hasta el Sitio 3, del 13 al 16 de marzo. Durante la etapa del reflujo, se nota una disminución abrupta de la energía en los tres sitios, en todas las frecuencias en un corto período. El Sitio 1 parece ser menos influenciado por los ciclos de la marea.

Nótese que la energía del oleaje registrada en el Sitio 1 durante el mismo período, aparece en las mismas frecuencias que en el Sitio 0 (ver Fig. 16) y se observa el mismo patrón de dispersión del oleaje, es decir que el oleaje que se propaga desde la Bahía conserva características como la frecuencia F_p , aunque con dos ordenes de magnitud menos en cuanto a la densidad de energía se refiere.

En los Sitios 2 y 3 la energía del oleaje se concentra en bandas de frecuencia específicas. Para el caso del Sitio 2 la energía del oleaje se concentra en la banda de frecuencia equivalente a 0.08 ± 0.05 Hz, mientras que en el Sitio 3 la energía del oleaje se concentra en la banda de frecuencias equivalente a 0.06 ± 0.05 Hz durante el mismo intervalo de tiempo.

Esto representa una disminución de la frecuencia asociada al pico espectral del oleaje. Otros estudios como Babanin *et al.* (2011), Chawla y Kirby (2002), etc. han reportado estas disminuciones de la frecuencia asociada al pico espectral del oleaje por interacción con las corrientes.

En las figuras anteriores se han mostrado resultados que corresponden a los días 13, 14, 15 y 16 de marzo, por considerar que los datos son más claros y se puede apreciar de mejor forma los resultados, aunque los mismos resultados se pueden apreciar en los 15 días de muestreo. Para ver la series de datos completa se puede revisar el Apéndice A

Con la finalidad de tener una visión más clara de la evolución temporal de energía del oleaje en función de la frecuencia, hemos extraído la información de bandas de frecuencia específicas y comparado entre sitios.

En la figura 18 observamos la información de la energía en función de la frecuencia del oleaje registrada en los 3 Sitios de la B-EPB. En la banda de frecuencia de 0.10 ± 0.005 Hz. a) Sitio 1, b) Sitio 2 y c) Sitio 3.

Se observa que la mayor energía es registrada en el Sitio 1 y disminuye progresivamente conforme se propaga al interior de la B-EPB.

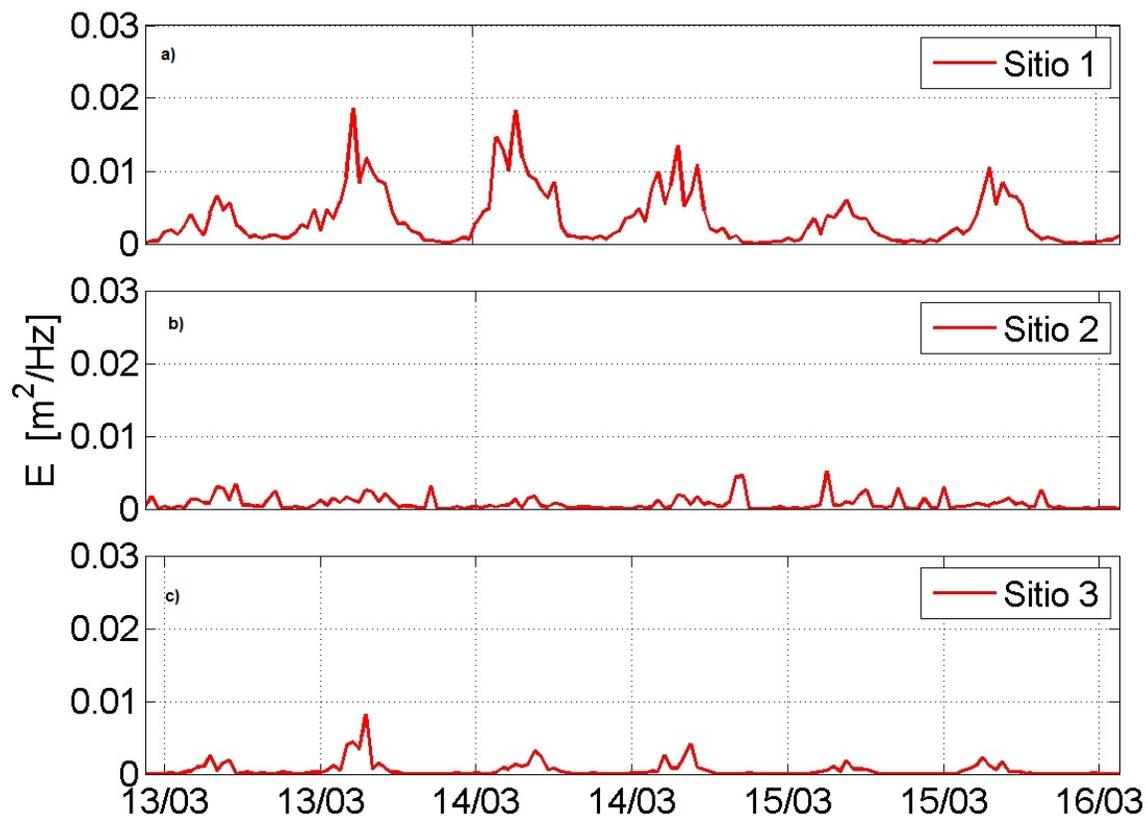


Figura 18: Evolución temporal del oleaje en función de la frecuencia comparativamente entre sitios. Banda de frecuencia 0.1 ± 0.005 Hz para los sitios 1 (a), 2 (b) y 3 (c).

Al igual que en el figura 18, la figura 19 muestra la energía del oleaje en los 3 Sitios del experimento, donde se puede observar que la energía del oleaje disminuye conforme el oleaje se propaga al interior de la B-EPB con una frecuencia de 0.08 hz .

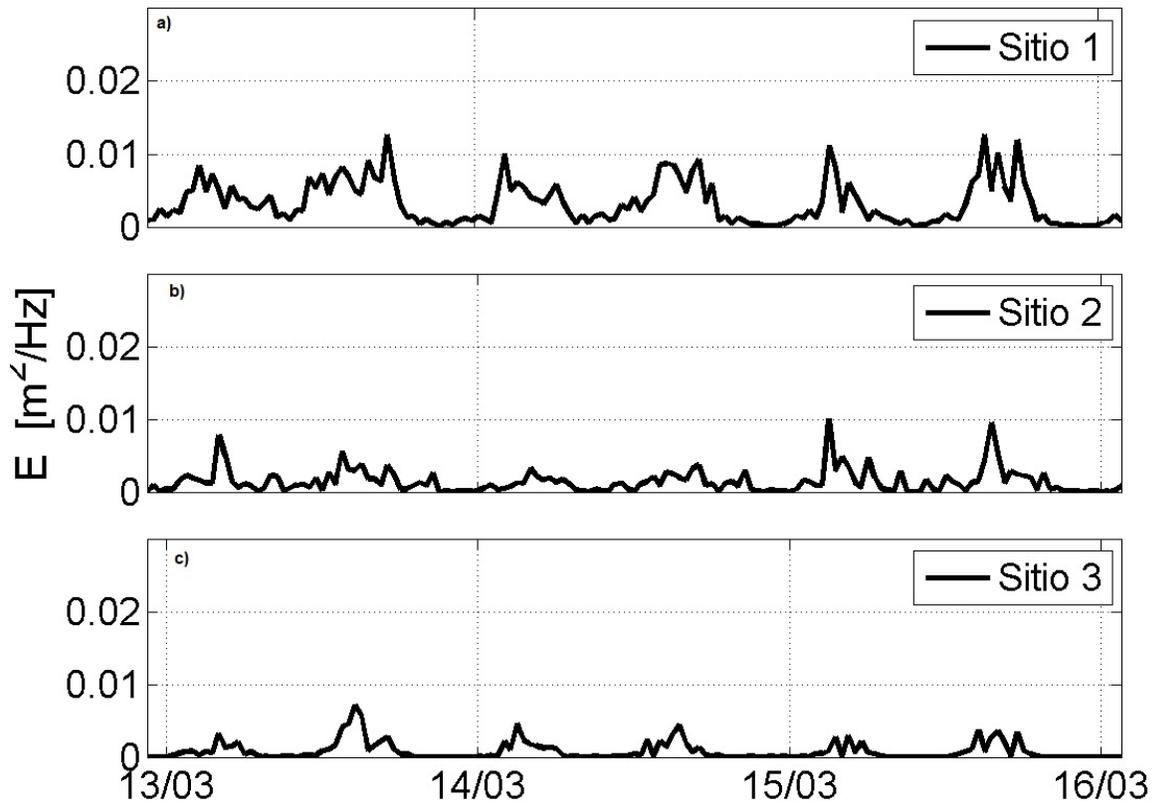


Figura 19: Evolución temporal del oleaje en función de la frecuencia comparativamente entre sitios. Banda de frecuencia 0.08 ± 0.005 Hz para los sitios 1 (a), 2 (b) y 3 (c).

A diferencia de las bandas de frecuencia 0.10 y 0.08 Hz, en la banda de frecuencia 0.06 hz (Fig. 20) se observa que la energía del oleaje no disminuye al llegar al Sitio 3. Vemos que la energía en este punto es mayor que en el Sitio 2 pero menor que en el Sitio 1. Este fenómeno es el mismo que se observa en la figura 17.

(Longuet-Higgins y Stewart, 1964) mencionan que existe una transferencia de energía entre las olas y las corrientes. Muy probablemente es lo que se observa en este caso, ya que en el Sitio 2, la energía del oleaje es inferior que en el Sitio 3, se registra un aumento de la energía del oleaje y solo se puede explicar que la corriente transfirió energía a las olas.

También es probable que exista un reajuste del oleaje en frecuencias, ya que en

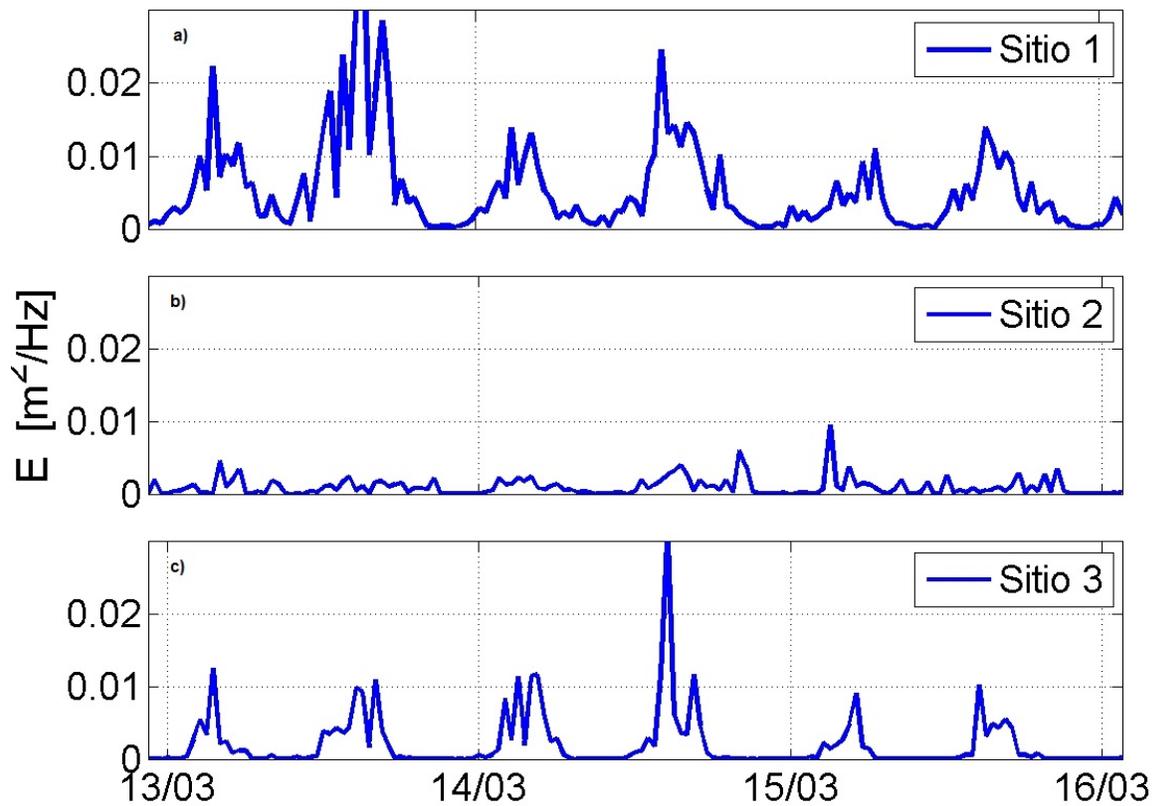


Figura 20: Evolución temporal del oleaje en función de la frecuencia comparativamente entre sitios. Banda de frecuencia 0.06 ± 0.005 Hz para los sitios 1 (a), 2 (b) y 3 (c).

la parte externa de la boca el oleaje rompe por efecto del fondo y cuando este oleaje se propaga en la B-EPB lo hace en diferentes frecuencias, pero al llegar al Sitio 3 este oleaje se ha acomodado con una frecuencia similar con la que se propagaba en el Sitio 0.

3.4. Cambio de forma del espectro del oleaje

En esta sección se analiza el cambio de la forma espectral del oleaje en presencia de corrientes. Los resultados del análisis de los sitios 1, 2 y 3 serán comparados con los resultados obtenidos en el Sitio 0, al tener esta información del oleaje sin modificación de su espectro de energía, debido a la presencia de corrientes de marea.

En las figuras 21 y 22 se muestra información de mediciones de oleaje, en 3 horas distintas (continuas) de medición, en la que suponemos el oleaje no varió mucho. Supondremos que tenemos el mismo estado de mar con 3 diferentes casos de corrientes, la primera con corrientes a favor (+), la segunda sin corrientes y por último con corrientes en contra de la propagación del oleaje (-). En dichas figuras podemos ver la evolución espacial del espectro del oleaje desde el Sitio 0 hacia el Sitio 3, en cada una de 3 diferentes fases de la corriente.

Como se muestra en las figuras 21 y 22, existe una conservación de la frecuencia asociada al pico espectral entre los espectros con y sin corrientes, cualquiera que sea la dirección de la corriente. En ambas figuras la frecuencia es normalizada con respecto a la frecuencia asociada al pico espectral del Sitio 0 al tiempo correspondiente.

La corriente afecta a la altura significativa del oleaje que se propaga en la B-EPB, incrementando con corrientes positivas y la disminuye cuando está influenciada por la corriente negativa. Esto se traduce en un aumento o disminución de la energía del espectro del oleaje.

También se observa una tendencia de aumento relativo de la energía en el pico espectral conforme el oleaje se propaga del Sitio 1 al Sitio 3, de igual forma se aprecia un aumento de la energía cuando la altura del oleaje en el Sitio 0 es menor (ver Fig. 22), en todos los casos se observa más energía en la cola de los espectros con corriente opuesta que con corriente a favor. Este aumento de la energía en el pico espectral y en cola

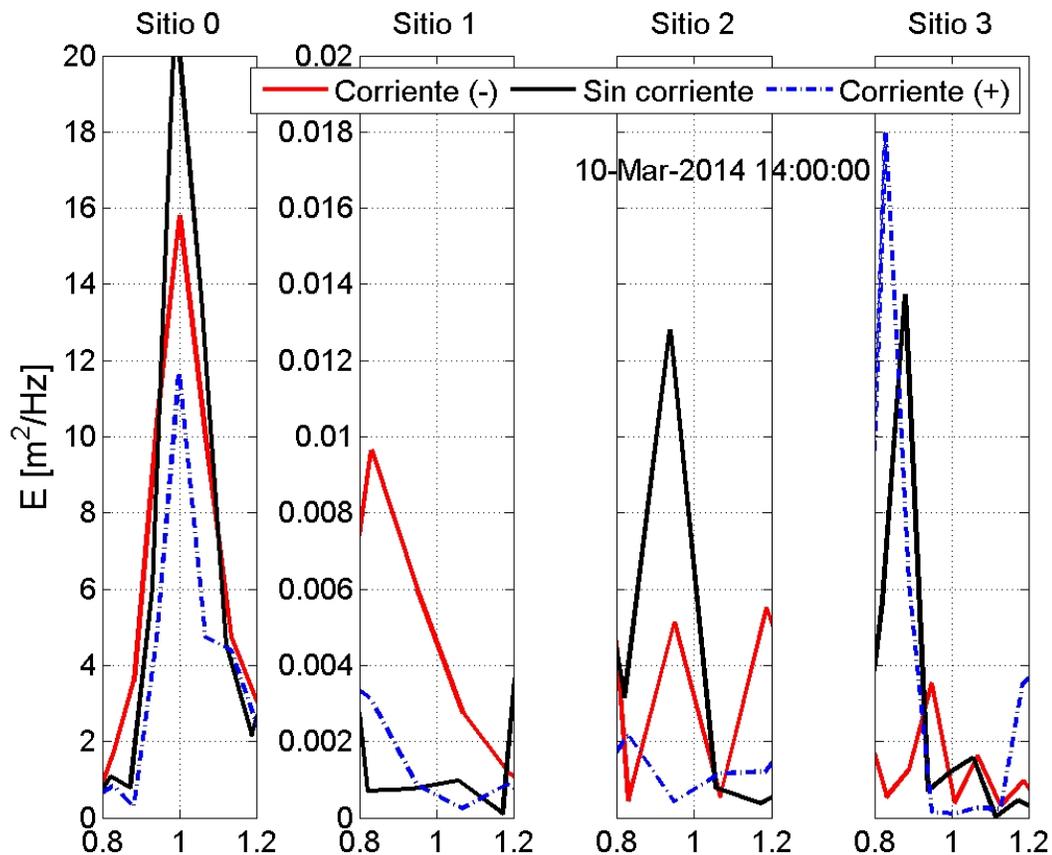


Figura 21: Cambio de la forma espectral del oleaje debido a corrientes. Frecuencia normalizada con respecto a la frecuencia principal del oleaje en el Sitio 0

de los espectros puede explicarse por una transferencia de energía desde la corriente al sistema de olas.

Para el caso de corrientes a favor (línea azul discontinua) el oleaje en el Sitio 0 se propaga con una frecuencia asociada al pico espectral de 0.06 Hz. En el Sitio 1 la frecuencia pico del oleaje y la densidad de energía espectral es menor respecto al Sitio 0, debido principalmente al rompimiento del oleaje por efecto del fondo en la Boca del Estero. El oleaje al propagarse en la boca del Estero disipa parte de su energía en la barra de arena sumergida, a pesar de esta disipación de energía, la ola se sigue propagando con la corriente a favor.

Entre los Sitio 1 y Sitio 2, observamos lo que parece ser un reajuste y aumento de

la energía del oleaje a una frecuencia diferente conforme se propaga hasta llegar al Sitio 3, donde termina con una frecuencia pico similar a la registrada en el Sitio 0.

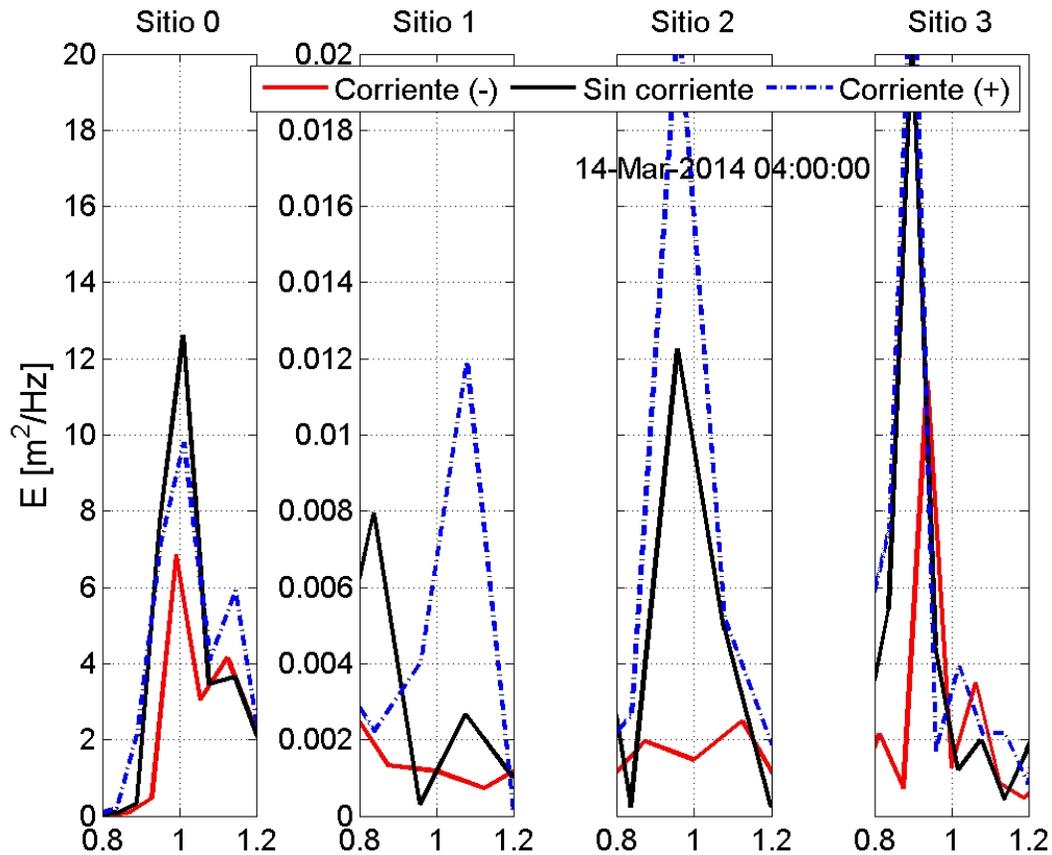


Figura 22: Cambio de la forma espectral del oleaje debido a corrientes. Frecuencia normalizada con respecto a la frecuencia principal del oleaje en el Sitio 0

Cuando el oleaje se propaga en la boca del Estero sin corrientes (línea negra) también sufre algunas modificaciones, como vemos en la figura 21. En Sitio 1 y Sitio 2, la frecuencia principal del oleaje es claramente diferente a la registrada en el Sitio 0, además de cambiar la frecuencia principal, la densidad de energía espectral también disminuye. En el Sitio 3 se observa que el oleaje ha cambiado su frecuencia y vemos una señal clara y definida del espectro del oleaje, una vez más centrándose en una frecuencia pico similar con la que se propagaba en el Sitio 0.

La propagación del oleaje en corrientes opuestas (línea roja) es diferente, ya que cuando la corriente es negativa, baja el nivel medio del agua en el estero, por lo que la barra

externa de arena sumergida queda más expuesta y el oleaje rompe continuamente. Si bien vemos que la información espectral del oleaje en los sitios 1 y 2 no es bien definida, en el Sitio 3 la señal es apenas registrada por el instrumento.

Soares *et al.* (2000) han confirmado que cuando una corriente se encuentra con un oleaje, se observan diferencias en la distribución de la energía espectral de las olas. Cuando un campo de olas se encuentra con una corriente a favor de la propagación del oleaje, el espectro del oleaje disminuye en términos de su energía, y lo contrario sucede cuando la corriente tiene la dirección opuesta. Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos por Soares *et al.* (2000) encontramos todo lo contrario, esto puede ser debido a que en el presente trabajo tenemos ciertas limitantes como la profundidad, la altura y velocidad de la corriente, además de no tener control sobre las condiciones experimentales como sucede cuando se realizan experimentos en canales de ola de laboratorio.

En todos los casos se observa más energía en los espectros con corriente positiva que con corriente negativa. Este aumento de la energía en el pico espectral y en frecuencias bajas de los espectros sólo se puede explicar por una transferencia de energía de la corriente hacia el sistema de olas.

En la figura 23 se muestra una representación de las características principales del oleaje, mismo que se muestra en la figura 21, en el panel superior se indica la frecuencia principal del oleaje registrada por los instrumentos y en colores vemos la información del oleaje en cada Sitio para los casos de corrientes negativas, positivas y sin corrientes.

En el panel intermedio se presenta la evolución de la amplitud del oleaje y es definida como $a = \sqrt{2} * std(\eta)$ donde η es la serie de tiempo de la elevación de la superficie. Vemos que la amplitud decae rápidamente después de pasar por el Sitio 1. La distancia entre cada sitio es de aproximadamente 100 metros. Esta evolución de la amplitud aparentemente es inducida por la corriente.

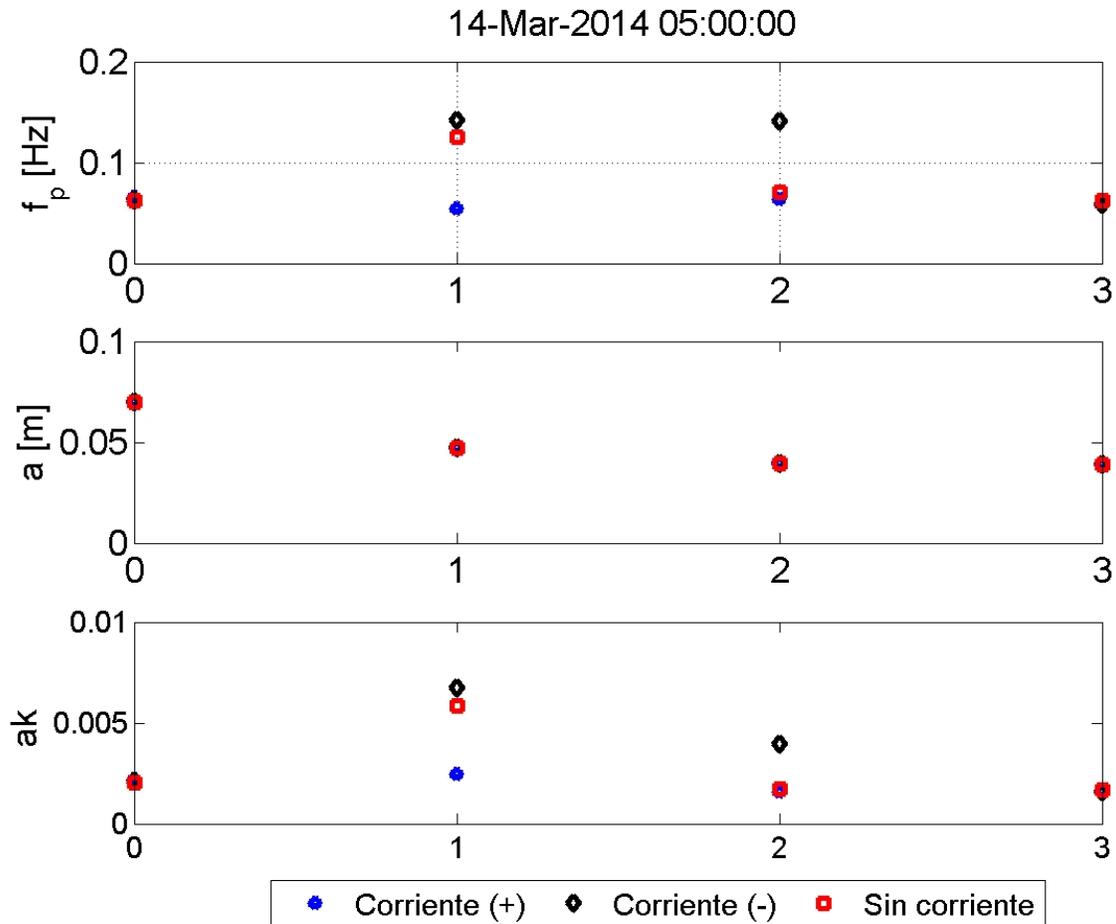


Figura 23: Propagación del oleaje en la B-EPB, (a) Frecuencia principal, (b) Amplitud, (c) Pendiente.

En el panel inferior se muestra la evolución de la pendiente del oleaje a través de la boca del Estero. Esta pendiente es de un valor bajo y tales olas logran penetrar en la corriente sin rompimiento, incluso si la frecuencia principal original de las olas fuera bloqueada por una corriente adversa.

Capítulo 4. Conclusiones

Basados en las observaciones parece que el proceso de interacción olas y corrientes modifica de manera apreciable la forma espectral del oleaje en presencia de corrientes intensas.

El oleaje dentro de la B-EPB es fuertemente modulado por la marea. La altura significativa del oleaje y el período son controladas por las condiciones del oleaje en alta mar y las variaciones de la profundidad. Los períodos de las olas son afectados también por las corrientes, a través del efecto Doppler.

Los efectos del oleaje en la Boca del Estero están limitados por el tiempo, debido a la presencia de bancos de arena en la boca, que disipan la energía del oleaje. Los procesos relacionados con el oleaje son mayores durante la marea alta, cuando la disipación del oleaje en los bancos de arena es menor.

En este estudio se muestra que existe un cambio en la forma espectral del oleaje debido a la presencia de corrientes de marea. En todos los casos se observa más energía en el pico espectral cuando la corriente es positiva o no existe corriente, que con corrientes negativas. Los datos revelan que el oleaje logra propagarse en la B-EPB, incluso en corriente negativa, aunque con muy poca energía.

Las condiciones naturales no siempre permiten tener resultados idóneos, ya que en condiciones controladas se puede tener control del periodo de la ola, de la altura, de la frecuencia, etc. Sin embargo en este trabajo a pesar de trabajar en condiciones naturales no controladas, se lograron observar resultados que concuerdan con las observaciones reportadas en otros trabajos.

Lista de referencias bibliográficas

- Ardhuin, F., Belibassakis, K., Lavrenov, I., Magne, R., y Tolman, H. (2007). Wave propagation. *Progress in Oceanography*, **75**: 622–632.
- Ardhuin, F., Roland, A., Dumas, F., Bennis, A. C., Sentchev, A., Forget, P., Wolf, J., Giraldo, F., Osuna, P., y Benoti, M. (2012). Numerical wave modeling in conditions with strong currents: Dissipation, refraction, and relative wind. *Journal of Physical Oceanography*, **42(12)**: 2101–2120.
- Babanin, A., Hwung, H. H., Shugan, I., Roland, A., van der Westhuysen, A., Chawla, A., y Gautie, C. (2011). Nonlinear waves on collinear currents with horizontal velocity gradient. *In Proc. 12th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and 3rd Coastal Hazards Symp., Big Island, Hawaii, October 30–November, 4*: 24.
- Bretherton, F. P. y Garrett, C. J. (1968). Wavetrains in inhomogeneous moving media. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **302(1471)**: 529–554.
- Burrows, R. y Hedges, T. S. (1985). The influence of currents on ocean waves climates. *Coastal Engng*, **9**: 247–260.
- Chawla, A. y Kirby, J. (2002). Monochromatic and random wave breaking at blocking points. *J. Geophys. Res*, **107**: 19.
- Dodet, G., Bertin, X., Bruneau, N., Fortunato, A. B., Nahon, A., y Roland, A. (2013). Wave-current interactions in a wave-dominated tidal onlet. *J. Geophys. Res*, **118**: 1857–1605.
- Dong, Z. y Kirby, J. T. (2012). Theoretical and numerical study of wave-current interaction in strongly-sheared flows. *Coastal Engineering Proceedings*, **33**: waves.2.
- Godon, L. y Lohrmann (2001). Near-shore doppler current meter wave spectra. *Proceedings of the 4th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, pp. 33–43.
- Hedges, T. S. (1981). Some effects of currents on waves spectra. *Proceedings of the first Indian Conference in Ocean Engineering*, **1**: 30–50.
- Hedges, T. S. (1987). Combinations of waves and currents: an introduction. *Proc. Inst. Civ. Eng*, **82**: 567–585.
- Hedges, T. S., Anastasiou, K., y Gabriel, D. (1985). Interaction of random waves and currents. *J. Waterway, port, Coastal and Ocean Engineering*, **111 (2)**: 275–288.
- Huang, N., Chen, D., Tung, C., y Smith, J. (1972). Interactions between steady non-uniform currents and gravity waves with application for current instruments. *J. Phys. Oceanogr.*, **2**: 220–231.
- Janssen, T. y Herbers, T. (2009). Nonlinear wave statistics in a focal zone. *Phys. Oceanogr*, **39**: 863–884.
- Jonsson, I. (1990). Wave-current interactions. in the sea, ocean engng. science. *Eds. B. Le Mehaute and D.M. Hanes*, **1**: 65–120.

- Kuik, A. J., Vledder, G. V., y Holthuijsen, L. H. (1988). A method for the routine analysis of pitch-and-roll bouy wave data. *Journal of Physical Oceanography*, **18**: 1020–1034.
- Lai, R., Long, S., y Huang, N. (1989). Laboratory studies of wave-current interaction: kinematics of the strong interaction. *J. Geophys. Res*, **94**: 16201–16214.
- Longuet-Higgins, M. S. y Stewart, R. W. (1961). The changes in amplitude of short gravity waves on a steady non-uniform current. *J. Fluid. Mech.*, **10**: 529–549.
- Longuet-Higgins, M. S. y Stewart, R. W. (1964). Radiation stress in water waves; a physical discussion with applications. *Deep Sea Res*, **11**: 529–562.
- Olabarrieta, M., Medina, R., y Castanedo, S. (2010). Effects of wave–current interaction on the current profile. *Coastal Engineering*, **57**(7): 643–655.
- Olabarrieta, M., C. Warner, J., y Kumar, N. (2011). Wave-current interaction in willapa bay. *Journal of Geophysical Research*, **116**: 1–27.
- Onorato, M., Proment, D., y Toffol, A. (2009). Triggering rogue waves in opposing currents. *Phys. Rev. Lett*, **107**: 184502.
- Ortiz, M., Huerta-Tamayo, L., y Hinojosa, A. (2003). Transporte de sedimento por tracción de marea en el estero de punta banda, baja california, México. *GEOS*, **23**: 283–294.
- Peregrine, D. H. (1976). Interaction of waves and currents. *Adv. Appl. Mech.*, **16**: 9–117.
- Peregrine, D. H. y Jhonsson, I. G. (1983). Interaction of waves and currents. *US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Miscellaneous Report*: 83–6.
- Phillips, O. M. (1977). The dynamics of upper ocean. *Cambridge University Press, Cambridge*.
- Pritchard, D. W., la Paz-Vega, R. D., Cabrera-Muro, H., Farreas-Sanz, S., y Morales, E. (1978). Hidrografía física del estero de punta banda. parte i: Análisis de datos. *Ciencias Marinas*, **5**: 23.
- Ris, R. (1997). Spectral modelling of wind waves in coastal waters. *PH.D Thesis, Fac. of Civil. Eng. Delft Univ. of Tech.*, **1**: 160.
- Sakai, S. y Saeki, H. (1984). Effects of opposing current on wave transformation. *Proc. 19th Internat. conf. on Coastal Engng*, **ASCE**: 1132–1148.
- Saustika, I. (2004). Wave blocking. *PhD Thesis, Technische Universiteit Delft*, **1**: 157.
- Soares, G. y de Pablo, H. (2006). Experimental study of the transformation of wave spectra by a uniform current. *Ocean Eng*, **33**: 293–310.
- Soares, G., Rodriguez, G., Cavaco, P., y Ferrer, L. (2000). Experimental study on the interaction of wave spectra and currents. *Proceedings of the ETC/OMAE Joint Conference Energy for the New Millenium*, **200/SR-6133**: 293–310.
- Tayfun, M., Dalrymple, R., y Yang, C. (1976). Random wave-current interactions in water of varying depth. *Ocean Eng.*, **3**: 403–420.

Thomas, G. y Klopman, G. (1997). Wave-current interactions in the nearshore region. en gravity waves in water of finite depth. *Ed. J. N. Hunt*, 1: 215–319.

Apéndice A. Series de tiempo completas

Evolución del espectro del oleaje en presencia de corrientes de marea

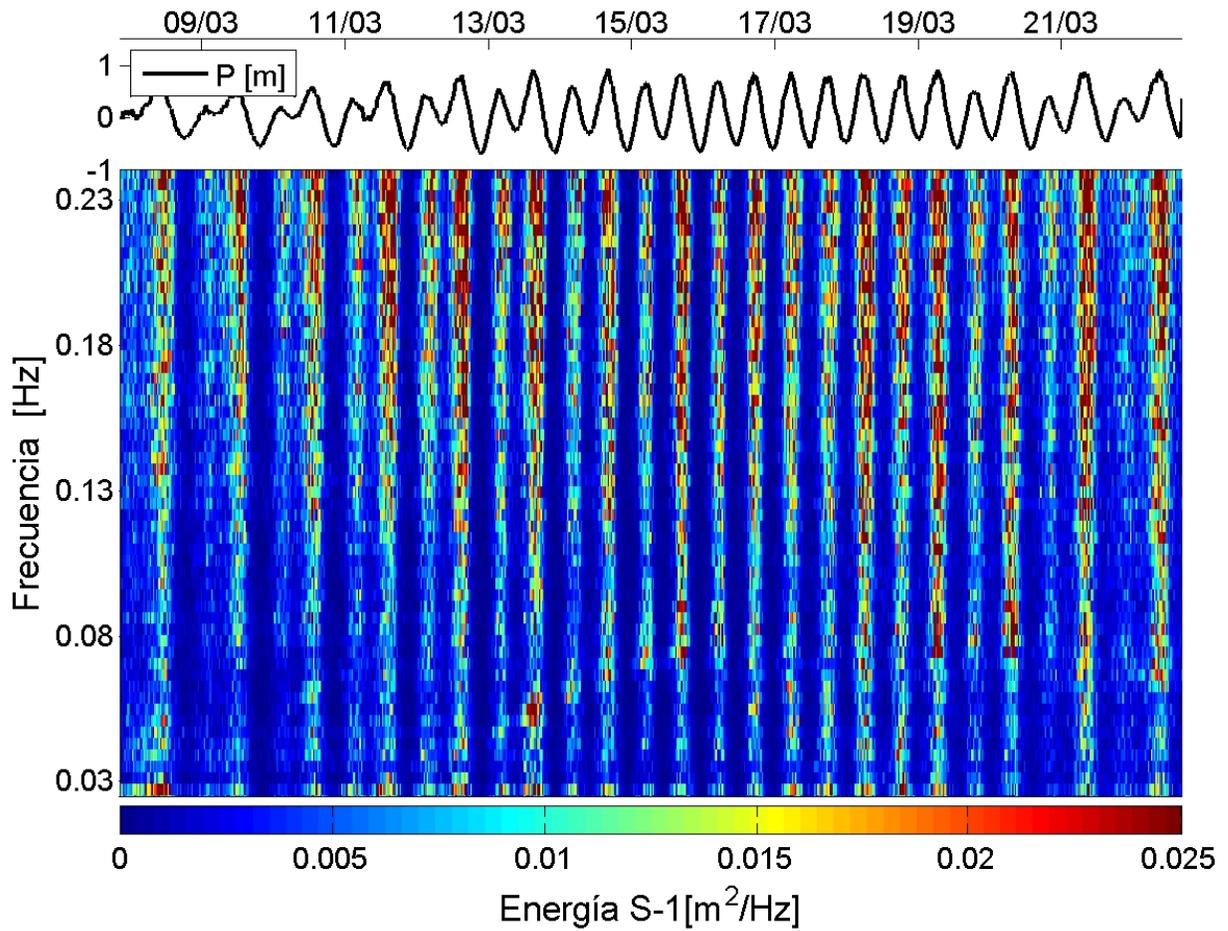


Figura 24: Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 1 La escala de colores indica la densidad energética.

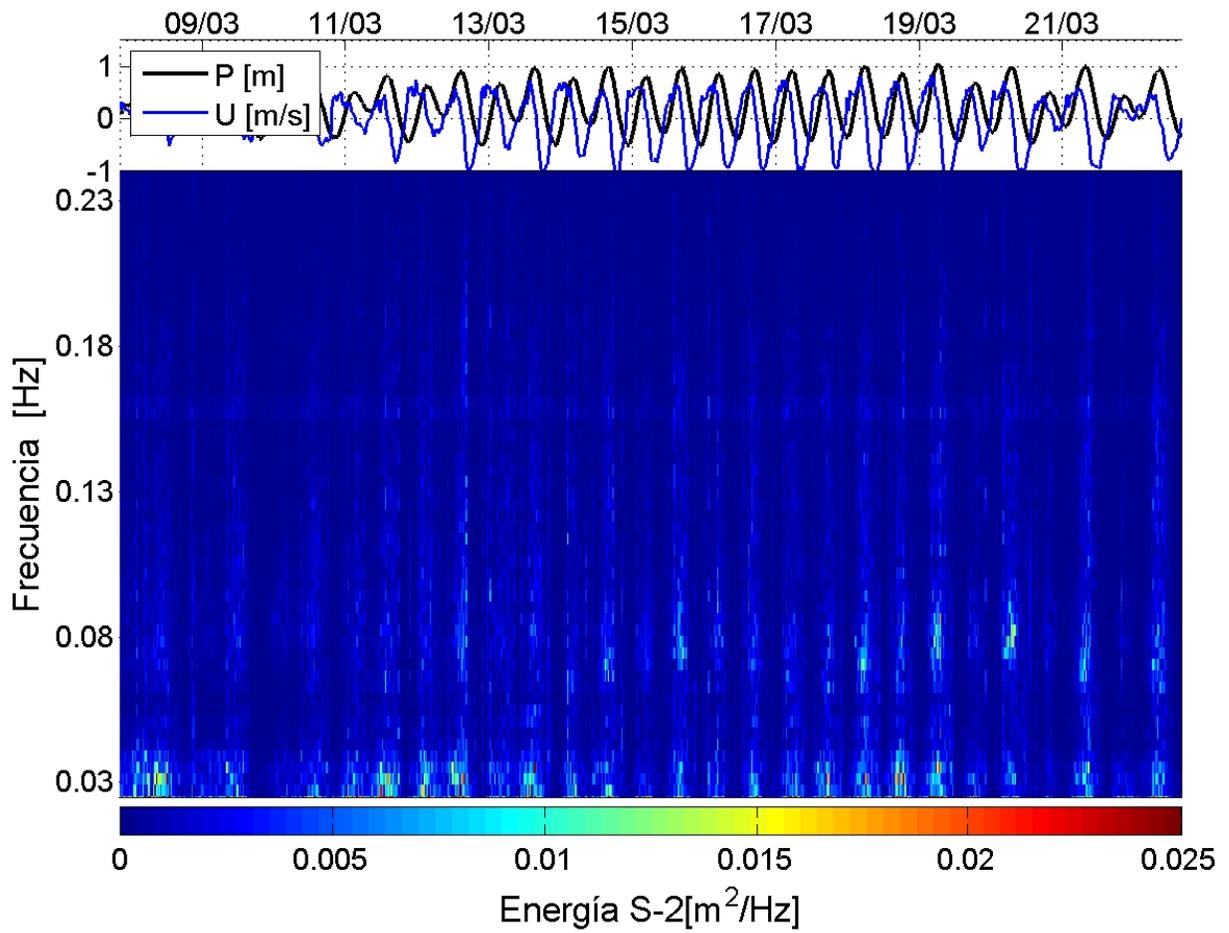


Figura 25: Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 2 La escala de colores indica la densidad energética.

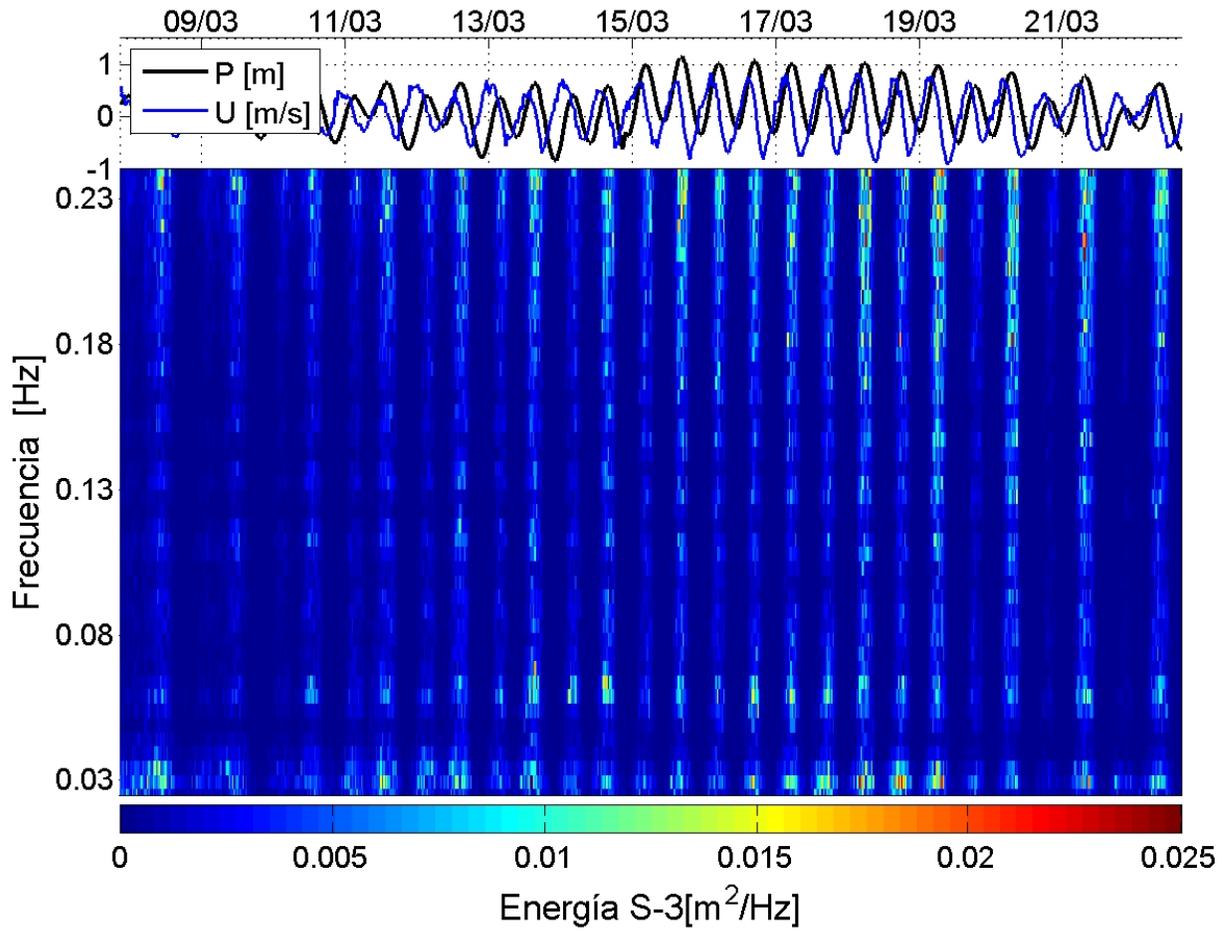


Figura 26: Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 3 La escala de colores indica la densidad energética.

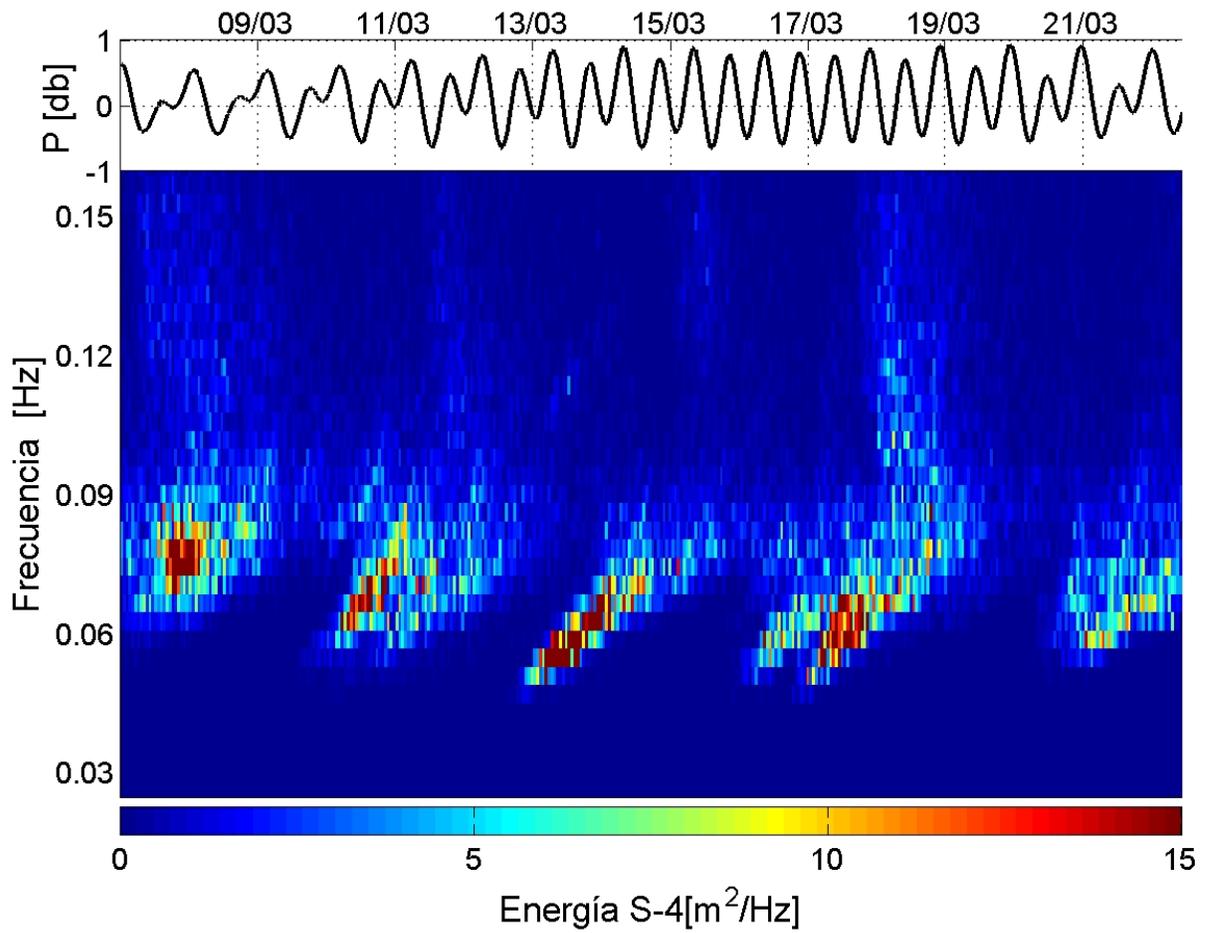


Figura 27: Evolución temporal del espectro del oleaje en frecuencias. Sitio 0 La escala de colores indica la densidad energética.

Cambio de la forma espectral del oleaje en presencia de corrientes de marea

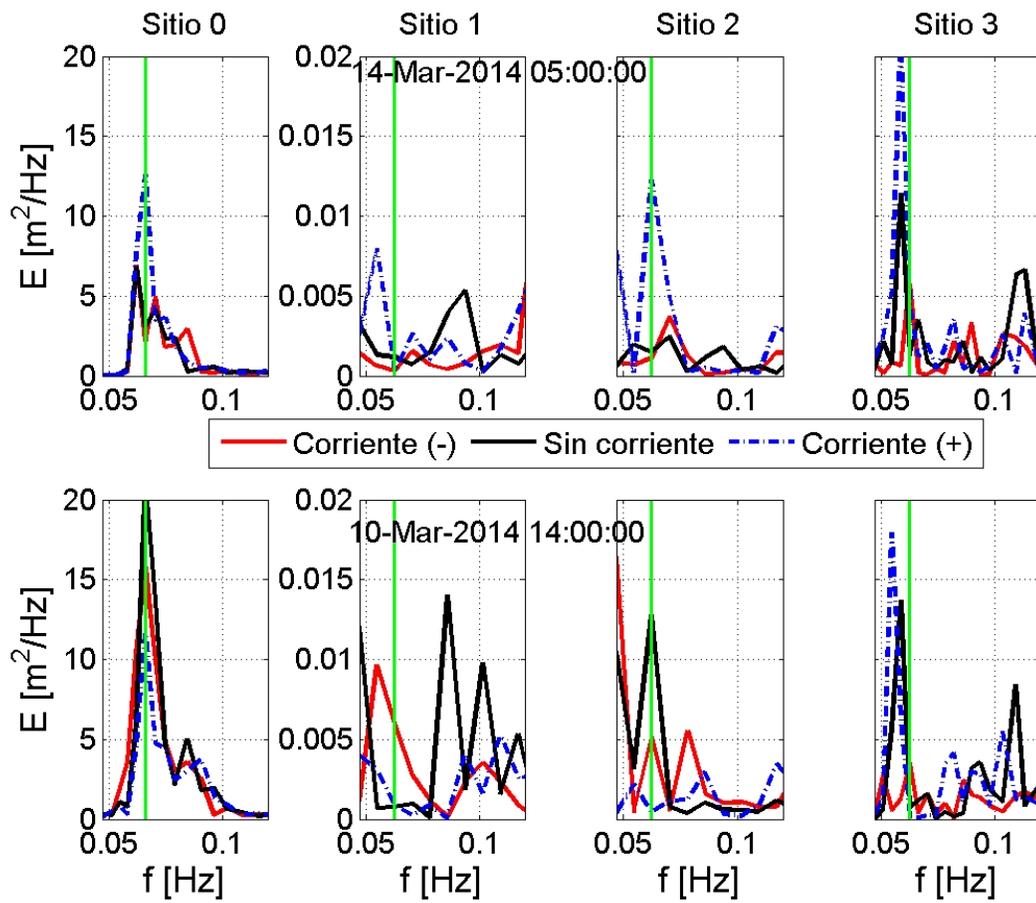


Figura 28: Cambio de la forma espectral del oleaje debido a corrientes. Frecuencia normalizada con respecto a la frecuencia principal del oleaje en el Sitio 0

Apéndice B. Programación de los sensores ADCP

```

=====
Deployment      : PM2014
Current time   : 13/01/2014 12:02:02 p.m.
Start at      : 14/01/2014 10:00:00 a.m.
Comment:
PROGRAMA FINAL enero 13 RAFAEL BLANCO
-----
Profile interval      (s) : 1200
Number of cells      : 25
Cell size            (m) : 1.00
Average interval     (s) : 200
Blanking distance    (m) : 0.41
Measurement load     (%) : 13
Power level          : HIGH
Number of wave samples : 1024
Wave interval        (s) : 3600
Wave sampling rate   (Hz) : 1
Wave AST Ice mode    : DISABLED
Wave AST SUV mode    : DISABLED
Compass upd. rate    (s) : 1200
Coordinate System    : ENU
Speed of sound       (m/s) : MEASURED
Salinity             (ppt) : 34
Analog input 1       : NONE
Analog input 2       : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping        : OFF
TellTale             : OFF
Acoustic modem       : OFF
Serial output        : OFF
Baud rate            : 9600
-----
Onboard wave processing : DISABLED
-----
Assumed duration (days) : 100.0
Battery utilization (%) : 90.0
Battery level (V) : 13.8
Recorder size (MB) : 361
Recorder free space (MB) : 360.973
Memory required (MB) : 59.8
Vertical vel. prec (cm/s) : 0.7
Horizon. vel. prec (cm/s) : 2.1
-----
Instrument ID      : WPR 2058
Head ID           : WAV 6647
Firmware version  : 3.37 AST
-----
AWAC AST Version 1.46.07
Copyright (C) Nortek AS
=====

```

```

=====
Deployment      : AQHRPB
Current time   : 07/03/2014 01:07:06 a.m.
Start at      : 07/03/2014 03:00:00 p.m.
Comment:
Aquadopp HR instalado a una prof. de 10m aprox. TIJ
-----
Measurement interval (s) : 1800
Cell size           (mm) : 300
Orientation         : UPLOOKING SHALLOW WATER
Distance to surface (m) : 2.00
Pulse distance     (m) : 5.00
Profile range      (m) : 4.20
Horiz. vel. range  (m/s) : 0.36
Vert. vel. range   (m/s) : 0.15
Number of cells    : 14
Average interval   (s) : 1
Blanking distance  (m) : 0.400
Measurement load   (%) : 30
Samples per burst  : 2048
Sampling rate      (Hz) : 2
Compass upd. rate  (s) : 1
Coordinate System  : ENU
Speed of sound     (m/s) : MEASURED
Salinity           (ppt) : 0
Analog input 1    : NONE
Analog input 2    : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping     : ON
TellTale          : ON
Acoustic modem    : ON
Serial output     : ON
Baud rate         : 9600
-----
Assumed duration  (days) : 30.0
Battery utilization (%) : 123.0
Battery level     (V) : 10.9
Recorder size     (MB) : 361
Recorder free space (MB) : 360.973
Memory required   (MB) : 630.0
-----
Instrument ID     : AQD 9119
Head ID          : AQP 4283
Firmware version  : 3.14 HR
-----
AquaProHR Version 1.10.09
Copyright (C) Nortek AS
=====

```

```

=====
Deployment      : AquaPB
Current time   : 06/03/2014 09:55:48 p.m.
Start at      : 07/03/2014 03:00:00 p.m.
Comment:
Aquadoop instalado en el estero de punta banda a 10 m de prof. aprox. TIJ
-----

```

```

Profile interval      (s) : 1800
Number of cells      : 10
Cell size            (m) : 1.00
Blanking distance    (m) : 0.41
Measurement load     (%) : 38
Average interval     (s) : 120
Power level          : HIGH
Number of wave samples : 2048
Wave interval        (s) : 1800
Wave sampling rate   (Hz) : 2
Wave cell size       (m) : 1.00
Compass upd. rate    (s) : 600
Coordinate System    : ENU
Speed of sound       (m/s) : MEASURED
Salinity             (ppt) : 35
Analog input 1      : NONE
Analog input 2      : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping        : OFF
TellTale            : ON
Acoustic modem       : ON
Serial output        : ON
Baud rate            : 9600
-----

```

```

Assumed duration     (days) : 30.0
Battery utilization   (%) : 67.0
Battery level        (V) : 11.3
Recorder size        (MB) : 81
Recorder free space   (MB) : 80.973
Memory required      (MB) : 67.7
Vertical vel. prec   (cm/s) : 0.5
Horizon. vel. prec   (cm/s) : 1.6
-----

```

```

Instrument ID        : AQD 1038
Head ID              : AQP 0811
Firmware version     : 1.17
-----

```

```

AquaPro Version 1.36.06
Copyright (C) Nortek AS
=====

```

```

=====
Deployment      : AWA-PB
Current time   : 06/03/2014 09:17:44 p.m.
Start at      : 07/03/2014 03:00:00 p.m.
Comment:
Awac Instalado en el estero de punta banda a una profundidad de aporx,
10m, TIJ

```

```

-----
Profile interval      (s) : 1800
Number of cells      : 10
Cell size             (m) : 1.00
Average interval     (s) : 120
Blanking distance    (m) : 0.50
Measurement load     (%) : 50
Power level          : HIGH-
Number of wave samples : 1024
Wave interval        (s) : 1800
Wave sampling rate   (Hz) : 1
Wave AST Ice mode    : DISABLED
Wave AST SUV mode    : DISABLED
Compass upd. rate    (s) : 1800
Coordinate System    : ENU
Speed of sound       (m/s) : MEASURED
Salinity             (ppt) : 35
Analog input 1      : NONE
Analog input 2      : NONE
Analog input power out : DISABLED
File wrapping       : OFF
TellTale            : OFF
Acoustic modem      : OFF
Serial output       : OFF
Baud rate           : 9600

```

```

-----
Onboard wave processing : DISABLED

```

```

-----
Assumed duration (days) : 30.0
Battery utilization (%) : 33.0
Battery level (V) : 12.6
Recorder size (MB) : 3886
Recorder free space (MB) : 3885.972
Memory required (MB) : 34.5
Vertical vel. prec (cm/s) : 1.1
Horizon. vel. prec (cm/s) : 3.2

```

```

-----
Instrument ID      : WPR 2202
Head ID           : WAV 6528
Firmware version   : 3.37 WPC
ProLog ID         : 564
ProLog firmware version : 4.13

```

```

-----
SD Card Inserted   : YES
SD Card Ready      : YES
SD Card Write protected : NO
SD Card Type       : SDHC

```