



Universidad Autónoma de
Baja California

Facultad de Ciencias
Marinas

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE QUE ARRIBA A LA BAHÍA DE
SANTA ROSALÍTA, B.C., MÉXICO ABRIL 2002 – MARZO 2003.

T E S I S

Que para obtener el título de
O c e a n ó l o g o
presenta
Rogelio Cano Cetina

Ensenada, Baja California, octubre 2004

Presentación

El presente trabajo es una pieza más en el esfuerzo de conocer el comportamiento del oleaje en las costas mexicanas. Nuestro país es relativamente nuevo en el estudio de este campo en comparación con grandes potencias como Estados Unidos de Norteamérica o algunos países de Europa, que en su deseo por descubrir la conducta del oleaje que domina su territorio fueron desarrollando una serie de técnicas para estimarlo.

Específicamente en la región noroeste en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO), científicos como el Dr. Asdrúbal Martínez, M.C. Oscar Delgado, M.C. José Román Lizárraga, Oc. Cuauhtémoc Nava entre muchos otros llevan trabajando con oleaje por más de 20 años; y es en este tipo de trabajos donde con el esfuerzo de instituciones de investigación como el IIO, pretendemos estar a la vanguardia de los desarrollos tecnológicos de países de primer mundo.

Esperamos que este documento sea útil para futuras referencias en este campo.

Atte. Rogelio Cano Cetina

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE QUE ARRIBA A LA BAHÍA DE SANTA ROSALÍTA B.C. MÉXICO DE ABRIL 2002 - MARZO 2003.

Resumen.-

Se determina y analiza los parámetros estadísticos como altura significativa (H_s), periodo significativo (T_p) y dirección promedio predominante de las olas (θ), en la Bahía de Santa Rosalita B.C. México; con el propósito de establecer el comportamiento del oleaje durante un año de medición que comprendió de abril del 2002 a marzo del 2003 por medio de un ADCP (Acoustic Doppler Current Profile), de la compañía RD Instruments programado para grabar 2048 datos, con un intervalo en tiempo entre d de 0.5 seg, dato y dato de 3 horas. Se encontró que la dirección del oleaje dominante (θ) fue de sur suroeste. El periodo del pico espectral (T_p) del oleaje estudiado reveló que no hay un patrón establecido que rijan cada estación; debido a la combinación de cuatro situaciones de oleaje que convergen en la Bahía. La altura significativa (H_s) más significativa fue en la estación de invierno; sobresaliendo el mes de enero donde se encontró la altura significativa más alta con un valor de 2.35 m.

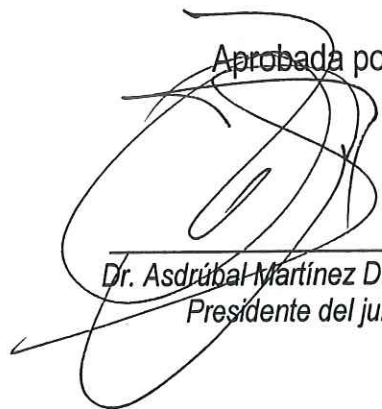
**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE QUE ARRIBA A LA BAHÍA DE
SANTA ROSALÍTA, B.C., MÉXICO, ABRIL 2002 – MARZO 2003.**

T E S I S

Que para obtener el título de Oceanólogo presenta

Rogelio Cano Cetina

Aprobada por:



Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León
Presidente del jurado



M.C. Rafael Blanco Betancourt
Sinodal Propietario



M.C. Román Lizárraga Arciniega
Sinodal Propietario



M.C. Oscar E. Delgado González
Sinodal Propietario

Dedicatorias.-

Dedico este trabajo a la familia Cano Cetina "el logro de uno es logro de todos".

A mi amigo Pavel Álvarez Silva, (1976-2004).

Agradecimientos.-

Al director de este trabajo el Dr. Asdrúbal Martínez por la gran oportunidad que me dio de aprender. Al M.C. Rafael Blanco, por dejarme formar parte de su equipo y por hacer que cada salida al campo sea amena por sus enseñanzas y anécdotas. Al M.C. José Román Lizárraga y M.C. Oscar Delgado por sus acertadas observaciones a este trabajo; más que todo lo que les pueda decir quiero agradecerles su amistad, la confianza que me tuvieron al permitirme trabajar con ustedes y muchas gracias por toda la experiencia que adquirí.

Mis más sinceros agradecimientos para todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en el transcurso de mi carrera entre ellas:

Familias Cota Martínez, Vallejo Fernández, Báez Rodríguez, Maccise Treviño, Ávila Silva, Pérez Parra, Mojica Abraham, Valenzuela de León, Batche Lecuanda, Yepis Ruiz.

A la sociedad escultista y Guía de Baja California, Asociación de Salvavidas y Rescate de Ensenada, B.C., equipo de fútbol americano categoría mayor Cuervos, Equipo de fútbol con banderolas de la FCM, Museo de Ciencias, personal de la clínica Ongley, personal del Centro de Investigaciones Marinas de la Universidad de la Habana, Cuba; personal académico de la UABC, al personal administrativo, de mantenimiento y de los almacenes de la Facultad de Ciencias Marinas, a todo el personal que labora en el Instituto de Investigaciones Oceanográficas, compañeros de las generaciones Hot Spot, Orclis, Iguanas, Parásitos, Muluk, Pólipos, Choros, Hierba Cultores, Opistobranquios, Escaramujos; amigos de la facultad de biología e ingeniería, amigos de la especialidad y de la maestría de la FCM. A mis caseras Cecilia Ramírez de Díaz y María Cristina Castro De Valdez; al poblado de Santa Rosalíita B.C. A la música, a Sudamérica y al buen café.

Contenido

Portada	I
Presentación	II
Resumen	III
Aprobación de la tesis	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
Contenido	VII
Lista de tablas	IX
Lista de Figuras	X
Capítulo I	
Introducción	1
Antecedentes generales	7
Antecedentes específicos	12
Objetivo General	14
Descripción del área de estudio	15
Capítulo 2	
Instrumentos usados para la medición de oleaje	17
Metodología	19
Capítulo 3	
Resultados	23
Análisis mensual	25
Análisis estacional	27
Capítulo 4	
Discusiones	47
Mensuales	48

Estacionales	57
Capítulo 5	
Conclusiones	61
Mensuales	62
Estacionales	63
Recomendaciones	65
Referencias Bibliográficas	66
Capítulo 6	
Anexos	69

Lista de tablas

Número de tabla	Descripción	Página
I	Parámetros estadísticos más relevantes para las alturas, periodos y direcciones de las olas registradas durante cada uno de los meses de medición considerados en este trabajo.	26
II	Dirección promedio de las cuatro estaciones de los datos estadísticos registrados en la Bahía de Santa Rosalíta, B.C., México, de abril 2002 a marzo 2003.	45
III	Resultados de los promedios obtenidos para cada estación a lo largo de un año de datos de oleaje de abril 2002 a marzo 2003 de los parámetros estadísticos de alturas, periodos y direcciones de olas registradas en la Bahía de Santa Rosalíta, B.C., México.	46

Lista de figuras

Número de figura	Descripción	Página
Figura 1.	Características más importantes de una ola.	3
Figura 2.	Localización de la Bahía de Santa Rosalita, en el municipio de Ensenada, Baja California, México.	16
Figura 3.	Mediciones de altura significativa (Hs), periodo del pico espectral (Tp) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de primavera, correspondientes a los meses marzo (2003), abril y mayo (2002).	28
Figura 4.	Mediciones de altura significativa (Hs), periodo del pico espectral (Tp) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de verano (correspondientes al los meses de junio, julio y agosto 2002).	29
Figura 5.	Mediciones de altura significativa (Hs), periodo del pico espectral (Tp) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de otoño (correspondientes al los meses de septiembre, octubre y noviembre 2002).	30
Figura 6.	Mediciones de altura significativa (Hs), periodo del pico espectral (Tp) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de invierno (correspondientes a los meses de diciembre (2002), enero y febrero (2003).	31
Figura 7.	Histograma de frecuencia para la Altura significativa (Hs) y para el periodo del pico espectral (Tp), para primavera, correspondientes a los meses marzo (2003), abril y mayo (2002).	33
Figura 8.	Histograma de frecuencia para la Altura significativa (Hs) y para el periodo del pico espectral (Tp), para la estación de	34

	verano (correspondientes al los meses de junio, julio y agosto 2002).	
Figura 9.	Histograma de frecuencia para la Altura significativa (Hs) y para el periodo del pico espectral (Tp), para la estación de otoño (correspondientes al los meses de septiembre, octubre y noviembre 2002).	35
Figura 10.	Histograma de frecuencia para la altura significativa (Hs) y para el periodo del pico espectral (Tp), en la estación de invierno (correspondientes a los meses de diciembre (2002), enero y febrero (2003)	36
Figura 11.	Rosa de oleaje correspondiente en la estación de primavera correspondientes a los meses abril y mayo (2002) y marzo (2003).	38
Figura 12.	Rosa de oleaje correspondiente en la estación de verano (correspondientes al los meses de junio, julio y agosto 2002).	39
Figura 13.	Rosa de oleaje correspondiente a la estación de otoño (correspondientes al los meses de septiembre, octubre y noviembre 2002).	40
Figura 14.	Rosa de oleaje correspondiente en la estación de invierno (correspondientes a los meses de diciembre (2002), enero y febrero (2003).	41
Figura 15.	Histogramas de frecuencia que nos permiten apreciar los meses que se caracterizaron por presentar las mayores alturas de oleaje noviembre y diciembre del 2002 y enero 2003.	49
Figura 16.	Histogramas de frecuencia de los meses que se caracterizaron por presentar las mayores alturas de oleaje noviembre y diciembre del 2002 y enero 2003.	51

Figura 17.	Histogramas de frecuencia en los que apreciamos los ejemplos de los meses más representativos del porcentaje de ocurrencia de registros de 2 hasta 26 s de periodo de pico espectral.	54
Figura 18.	Diagrama de rosa de oleaje que nos indica la predominancia del arribo de oleaje con dirección sur-sur oeste en todo el año de estudio.	56
Figura A1.	Aspecto del sensor de presión al ser recuperado en la superficie.	70
Figura A2.	Muestra de la forma en que son recuperados los datos con ayuda de una computadora personal.	71
Figura A3.	Ejemplo de cómo se visualizan los datos cuando se procesan en el programa WaveView.	72

Capítulo 1

Introducción.-

El conocimiento del ambiente costero es de suma importancia para el desarrollo de complejos industriales, turísticos y urbanos. Las costas son la frontera entre tres ambientes; el oceánico, el continental y el atmosférico, que interactúan entre sí hasta lograr de manera natural un estado de equilibrio. Estar al tanto de esto nos ayuda a comprender y prevenir los problemas que pudiesen originarse en la alteración de la zona costera por actividades antropogénicas o eventos extremos naturales (Komar, 1976).

El oleaje es uno de los fenómenos que no pasa desapercibido en el océano. Se origina como una consecuencia del efecto del viento al soplar sobre

la superficie del mar, transmitiendo así su energía sobre el océano y permitiendo la generación de olas (Thurman, 1985).

Desde la antigüedad la gente ha sido atraída por el fenómeno del oleaje; Aristóteles (384 – 322 a.C.) observó la relación entre el viento y las olas (The Open University 1999). La necesidad de aprender más sobre este fenómeno llevó a investigadores como Jeffreys (1925, 1926), Phillips (1957), Miles (1957) y Hasselmann (1967) entre otros a desarrollar teorías para entender y describir este fenómeno.

Aunque todavía falta mucho por descubrir acerca del oleaje, se sabe que las características más simples que describen una ola son su período (T), que es el intervalo de tiempo entre dos crestas o dos valles sucesivos (medido en segundos), su altura (H) que se define como la distancia vertical que existe entre una cresta y un valle sucesivos, su amplitud (a) que es la mitad de la altura de la ola, y su longitud de onda (L), que es la distancia horizontal entre dos crestas o dos valles (Neshyba, 1987) ver figura 1.

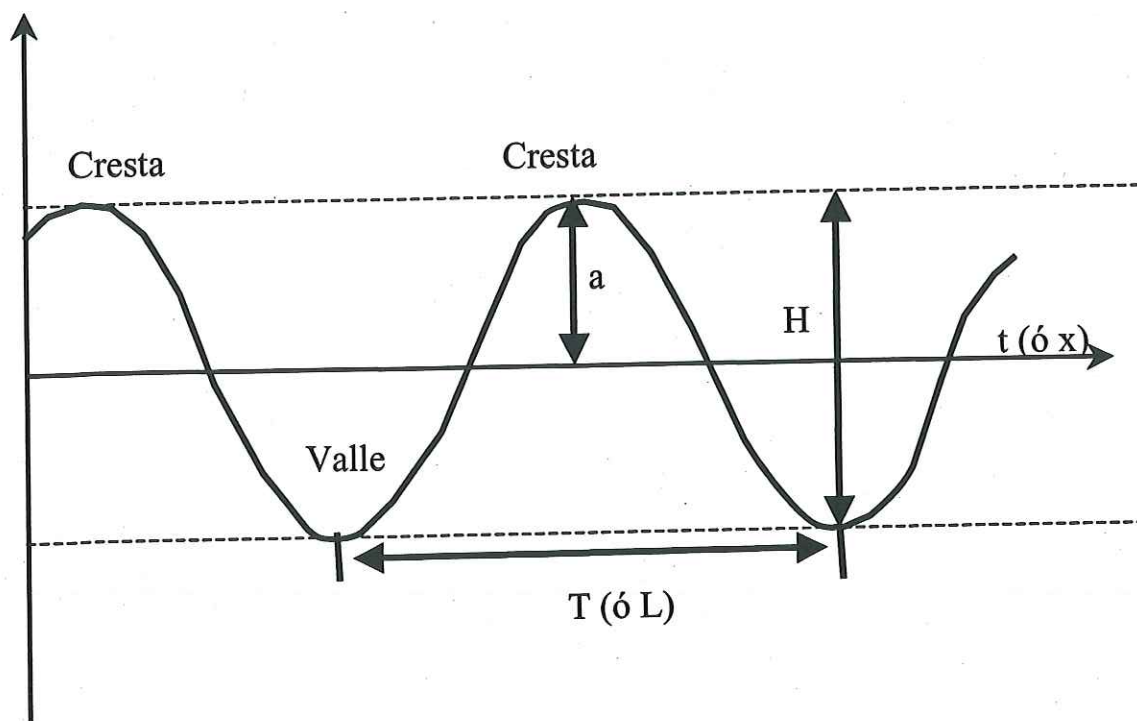


Figura 1. En la figura se muestran las características más importantes de una ola; para definirla tenemos que empezar por describir una onda senoidal y las partes que la componen, el periodo (T), la altura (H) y su longitud, en la figura representada por (L), y la amplitud (a) que es la mitad de la altura de la ola.

Cuando estudiamos un grupo de n olas, las propiedades estadísticas de éstas se pueden describir mediante parámetros como la altura significativa (H_s), el periodo de cruces por cero (T_z) y la dirección promedio de propagación (θ). Estos parámetros estadísticos se usan en el diseño de obras marítimas, como

los rompeolas; en el cálculo del transporte de sedimento paralelo y a lo largo de la costa; y en el cálculo de las fuerzas ejercidas sobre pilotes (Torres, 1986).

La cantidad de energía contenida en una ola, va a depender entre otras cosas de la magnitud del viento que sopla sobre la superficie del océano, del tiempo que tarde soplando dicho viento y del alcance o de las dimensiones del área de la superficie del mar sobre la cual el viento incida (Lizano, 1999).

Algunas de las características del movimiento de las olas al propagarse son las siguientes:

- La ola transfiere la perturbación de una parte del material a otro (ejemplo la perturbación causada al arrojar una roca sobre un estanque, es transmitida a lo ancho y largo del estanque por ondulitas).
- La perturbación es propagada a través del material sin desplazarlo; por ejemplo, si arrojamos un corcho en un campo de oleaje sólo se desplazará hacia arriba o hacia abajo sin mostrar un movimiento neto en la dirección de viaje de las olas.
- La perturbación se propaga sin una distorsión significativa de la forma de la ola.
- La perturbación parece propagarse con velocidad constante.

Esto nos lleva a pensar que si no es el material o la masa del fluido lo que traslada la propagación de la ola, entonces ¿Qué es lo que se transporta? La respuesta es su energía (The Open University 1999). Es precisamente esta energía la que al disiparse finalmente sobre las costas estará encargada de moldear la línea de costa (Komar, 1976).

Hay que recalcar que en México se han hecho pocos estudios sobre el comportamiento del oleaje; la utilidad de contar con información que nos permita apreciar un amplio panorama del comportamiento espacio – temporal del oleaje en alguna zona en particular, es una herramienta que nos llevará a un mejor aprovechamiento de la zona costera.

Es de suma importancia conocer el comportamiento del oleaje mediante el análisis estadístico en nuestras zonas costeras; esta información puede ser usada para fines científicos, industriales ó económicos como es el caso de la Bahía de Santa Rosalita, Baja California.

En el presente trabajo se propone determinar y describir las características estadísticas del oleaje que arriba a la Bahía de Santa Rosalita B.C. Cabe mencionar que estudios como éstos son necesarios para realizar el diseño adecuado de construcciones portuarias, como es el caso del puerto de

abrigo que se construye en dicha Bahía. Se espera que los resultados de este trabajo sean de utilidad para futuras referencias en este campo.

Si los trabajos de oleaje que existen actualmente en México son escasos, para la zona de estudio en particular, son nulos; es conveniente dejar claro que este trabajo es pionero en este tipo de análisis estadístico para el área en cuestión; por lo que tenemos la gran responsabilidad de hacer un trabajo de calidad que sirva como base para cualquier trabajo de diseño portuario o de transporte litoral.

La importancia del análisis de oleaje propuesto en este trabajo radica en el hecho que la Bahía de Santa Rosalita, México, es uno de los sitios estratégicos del proyecto Escalera Náutica que comprende la zona costera de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa.

Antecedentes.-

Generales.-

Aunque no son muchos, hay algunos antecedentes que reflejan los esfuerzos que se han realizado por medir y caracterizar el oleaje que arriba a la costa Pacífico de Baja California. Dentro de estos podemos mencionar los siguientes trabajos:

Padilla Hernández (1986) con una base de datos de oleaje de octubre de 1985 a marzo de 1986, calculó la altura significativa y dirección del oleaje en Rosarito B.C. encontrando que la altura significativa para esta zona de estudio en particular es de 2.5 m y la dirección de arribo promedio predominante del oleaje registrado para los meses analizados resultó ser sur-oeste principalmente, sin embargo, la dirección nor-oeste presentó el oleaje más energético.

Martínez Díaz de León et al (1989) describen y analizan el oleaje en función del tiempo en la Bahía de Todos Santos Baja California. Determinaron, la altura significativa, el periodo por el método de cruces por cero y el espectro de energía, en el lapso de septiembre de 1986 a agosto de 1987; encontraron que el valor máximo de altura significativa se dio en invierno con un valor de 2.1

m y un mínimo de 0.4 m para verano. Para el periodo el valor máximo fue de 18 s y el mínimo de 5 s; ambos se presentaron en otoño.

Coria Méndez (1991) encontró que las alturas más grandes registradas en la Bahía de Todos Santos B.C., en el periodo comprendido de agosto de 1986 a julio de 1989 fueron de 2.4 y 2.2 m para la estación de invierno y para verano se presentaron alturas de 0.2 m.

Rivas Cáceres (1992) clasificó al oleaje de la costa oeste de la península de Baja California, México, como "oleaje bajo" aquellas olas cuya altura es menor que 0.5 m; "oleaje medio" a las olas con alturas entre 0.5 m y 2.5 m; y finalmente "oleaje alto" a aquellas olas con alturas mayores a los 2.5 m. Rivas Cáceres señala que se pueden registrar alturas hasta de 7 metros en condiciones de invierno.

Martínez Díaz de León A. (1993) analizó la altura significativa del oleaje medido dentro de la Bahía de Todos Santos B.C. de agosto de 1986 a julio de 1989; encontrando que las máximas alturas se dieron en invierno y fueron de 2.4 m y las mínimas de 0.2 m en verano.

Oropeza Rosales (1998) procesó datos de oleaje medidos en Punta Cabras y Eréndira; para la primer zona de estudio se midieron datos en

primavera, verano y otoño de 1990, verano de 1991 y las cuatro temporadas de 1992, para la segunda zona de estudio sólo se tuvieron datos de otoño de 1993, los datos se recabaron por medio de ológrafos instalados en las costas; se calcularon alturas y periodos empleando un modelo propuesto por Longuet Higgins (1975). Se eliminaron más del 50 % de los datos. Los datos procesados presentaron los valores máximos de altura significativa asociadas a la temporada otoño – invierno de 3.6 m y 1.1 m. Los periodos presentaron un comportamiento parecido en las diferentes épocas del año, presentando resultados que van de 1.8 s a 91.8 s. La mayor parte de los datos presentan valores de periodo superiores a los que se consideran cuando se analiza información de oleaje, esto es de 1 a 30 s, esto se debió a que Oropeza Rosales no distinguió oleaje de las ondas de infragravedad.

Marichal Gonzáles (2001), describió y analizó los parámetros estadísticos más sobresalientes de oleaje, como son la altura significativa (H_s), periodo significativo de cruces por cero (T_z) y dirección promedio predominante de las olas (θ). Por medio de un sensor de presión instalado enfrente de las estructuras de protección de la toma de agua de la Comisión Federal de Electricidad en Rosarito B.C. Con poco más de cuatro años de datos, observó en su análisis que los valores de altura significativa fueron superiores en invierno; los periodos de mayor frecuencia fueron de 11 y 12 s, dándose un valor extremo en primavera y otoño, alcanzando hasta 18 s. La dirección

promedio del oleaje fue sur-oeste. Asimismo agrega que la Hs y el Tz promedio aumentaron año con año asociadas con mayores alturas de ola pudiendo esto estar asociado con el fenómeno del Niño de 1998.

De Dios Sánchez (2002) realizó un análisis estadístico a una base de datos de altura significativa del oleaje generado por observaciones del altímetro a bordo del segundo satélite europeo ERS – 2. Esta base de datos contiene siete años de información para la costa del Pacífico de Baja California. Su análisis mostró que la altura significativa con valores máximos de 4.7 y 3.9 m se presentó en Punta Eugenia y 4.02 m para Cabo San Lucas.

Martínez Díaz de León (2004) tomó datos de oleaje con un ADP (Acoustic Doppler Profiler) en la boca del estero de Punta Banda y el Ciprés, y por otra parte con un WTR (Wave and Tide Recorder) en Punta Morro y Punta Banda, los cuatro puntos localizados dentro de la Bahía de Todos Santos B.C. en el periodo comprendido de diciembre de 2001 a enero del 2002; con base en el estudio de la variabilidad espacial de la altura de las olas en la Bahía de Todos Santos, encontró que la altura de ola frente al Ciprés puede ser superior a los 2.5 m; el autor indica que esto puede deberse a la combinación de efectos del cambio de profundidad, con las zonas de convergencia de energía inducidas por la refracción de las olas que entran a la Bahía.

Flick Reinhard (1994) menciona que el tamaño del océano Pacífico favorece a que en épocas de tormenta el fetch sea más largo, propiciando de esta manera las condiciones ideales para generar oleaje con alturas y periodos más grandes; esto es la causa que sea invierno la temporada en la que se presente el oleaje más alto en la región.

Appendini Albrechtsen (1998) explica que el oleaje que incide en las costas nor-occidental está influenciado por el oleaje que se origina en el hemisferio norte predominando en invierno, el cual es producido por vientos que están asociados a las tormentas extratropicales en latitudes altas y las tormentas subtropicales originadas al norte de Hawai. Durante los meses de verano el oleaje se ve influenciado por la temporada de huracanes que se originan en la costa oeste de México; este oleaje presenta menor altura en comparación con el oleaje que se origina en el hemisferio norte.

Específicos.-

De acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT 2001), la Bahía de Santa Rosalita, B.C., es una bahía abierta de forma de una media elipse, con una longitud de 12 Km entre sus extremos, su morfología le permite ser una bahía con cierto grado de protección contra el oleaje del océano Pacífico y las tormentas provenientes del norte. El clima general de esta zona es muy seco semicálido con lluvias en Invierno (BWh), la precipitación media anual es de 103.71 mm y la temperatura promedio se encuentra comprendida en un rango de 18 a 20 ° C. Los vientos dominantes provienen del norte y sur, al igual que el patrón general de corrientes, mientras que el oleaje proviene del oeste y en menor escala del noroeste. Se presentan tormentas ocasionalmente tanto del norte como del sur. En la zona costera se presenta tipo de suelo arenoso con formaciones de dunas con vegetación. El poblado más cercano a la zona del proyecto es el poblado Santa Rosalita, el cual cuenta con una población aproximada de 200 personas, la actividad principal de la zona es la pesca.

En lo que se referente a estudios del oleaje realizados específicamente en el área de interés, hasta donde se tiene conocimiento no se ha hecho ningún estudio de estadística de oleaje en la Bahía de Santa Rosalita, Baja California, que sea del dominio público; remarcando así, la importancia del presente trabajo para futuras referencias en diversos campos científicos y tecnológicos.

De manera general las características estadísticas del oleaje que arriba a las costas de Baja California se han venido infiriendo principalmente a partir de las mediciones de oleaje realizadas a lo largo de las costas de California, las cuales han sido complementadas con un reducido número de observaciones realizadas principalmente en los municipios de Rosarito y de Ensenada (Marichal-González, 2001; Martínez-Díaz-de-León, 2004, entre otros). Por lo anterior, la necesidad de contar con un mayor número de observaciones locales del oleaje que arriba a la costa oeste de Baja California es evidente, no sólo porque estas mediciones nos brindarían la oportunidad de conocer características básicas del oleaje, como lo son su altura, periodo y dirección, sino que a la vez nos permite revisar si verdaderamente la consideración de que el oleaje que arriba a California es coherente con el oleaje que arriba a las costas de Baja California.

Objetivo.-

Determinar y analizar las características estadísticas generales del oleaje que arriba a la costa de la Bahía de Santa Rosalita Baja California, mediante el análisis de datos de oleaje medidos en la zona de abril del 2002 a marzo del 2003.

Descripción del área de estudio.-

La Bahía de Santa Rosalíta se encuentra en el municipio de Ensenada, Baja California; en los paralelos $28^{\circ} 40' 04''$ N y $114^{\circ} 14' 05''$ O (Fig. 2). Está localizada al norte del poblado de Punta Prieta y al Sur con Nuevo Rosarito. La Bahía tiene una longitud de 12 Km entre sus extremos que son Punta Santa Rosalíta al norte y Punta Rosarito al sur. Los vientos dominantes son del oeste franco, la corriente litoral está regida por una orientación norte – sur, mientras que el oleaje proviene del oeste y en menor escala del noroeste. En la zona costera se presenta tipo de suelo arenoso con formaciones de dunas y cantiles (SEMARNAT, 2001).

Es importante mencionar que la Bahía de Santa Rosalíta forma parte del proyecto federal escalera náutica que consiste en la construcción de 27 puertos de abrigo que faciliten la navegación segura para embarcaciones en tránsito (SEMARNAT, 2003). El puerto de Santa Rosalíta como caso particular es de vital importancia por que conectará con el futuro puerto de abrigo que se pretende hacer en Bahía de Los Ángeles.

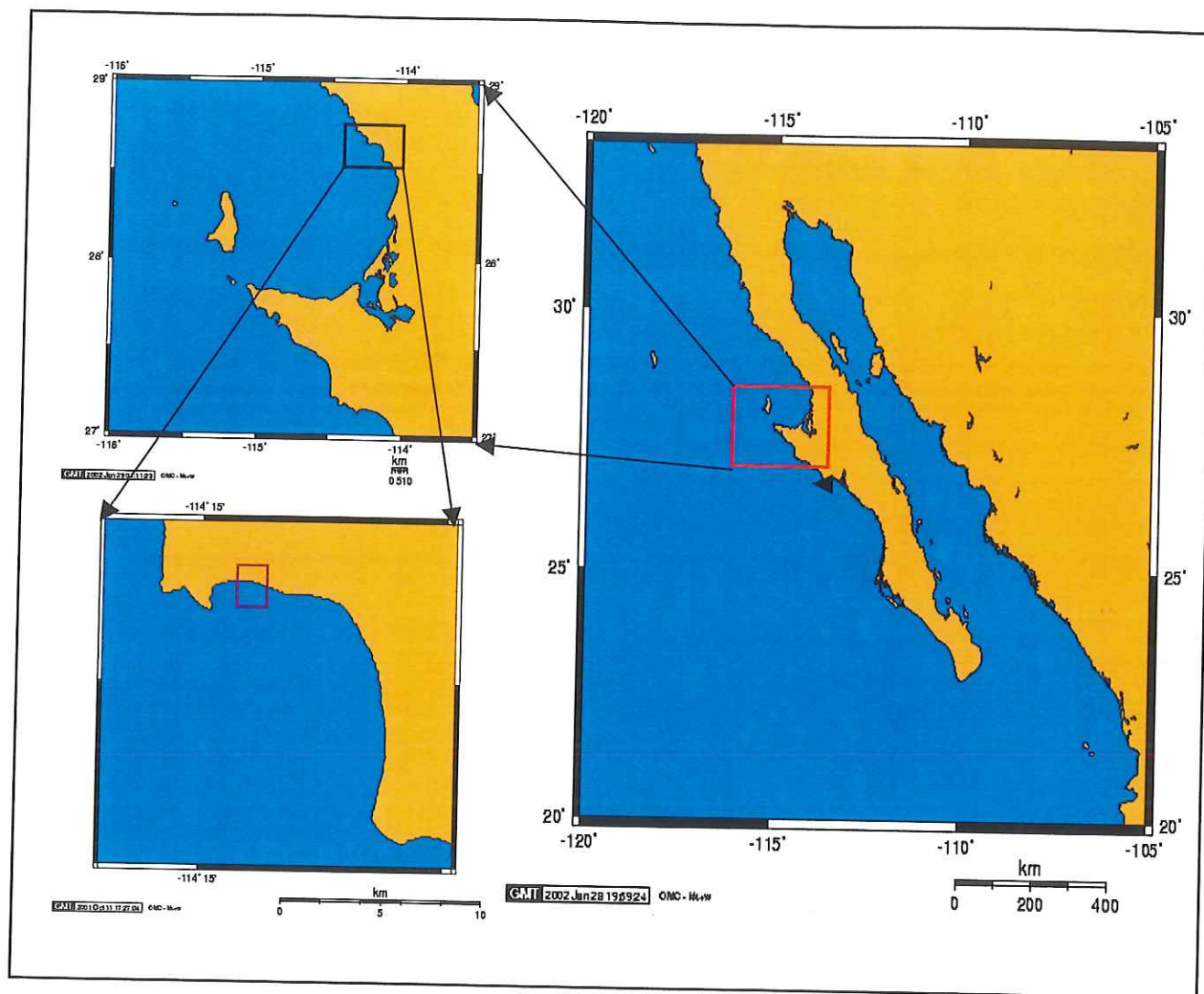


Figura 2. Localización de la Bahía de Santa Rosalita, en el municipio de Ensenada, Baja California, México, imagen proporcionada por Martínez de León, 2002.

Capítulo 2

Instrumentos usados para la medición de oleaje.-

La medición de datos de oleaje sirven para un rango amplio de propósitos como:

- Determinar las propiedades estadísticas de la climatología local de oleaje.
- Calibrar y validar modelos de oleaje y otros procesos oceánicos.
- Mejorar el entendimiento de los procesos físicos en la evolución de las olas.
- Diseñar y construir adecuadamente obras marítimas en la ingeniería portuaria.

A través del tiempo ha habido grandes cambios en las técnicas utilizadas para la obtención de datos oceanográficos, particularmente las encaminadas a medir oleaje. Estas técnicas de medición se pueden dividir en dos grupos (Young, 1999), instrumentos medidores *in situ*, e instrumentos de medición remota, esto es, que no están en contacto directo con el fluido.

Dentro de la instrumentación que recaba información *in situ* pero que trabajan instalados en el fondo marino sobresalen los aparatos que se valen del efecto doppler como medio para la obtención de datos de oleaje. Actualmente existen en el mercado varias marcas de ADP (Acoustic Doppler Profiler) como RD Instruments, Nortec, Sontek, entre otros; que han establecido una amplia gama de instrumentos con diferentes especificaciones, según las necesidades del usuario. El principio básico que por lo general todos estos siguen es medir la velocidad orbital de la ola con una alta exactitud por medio del efecto doppler. Otro tipo de instrumentos que se instalan en el fondo es el WTR de la compañía Aanderaa Instruments, éstos están diseñados con un sensor de presión en su interior que nos permite el monitoreo del oleaje en tiempo real.

Metodología.-

Este trabajo es parte de un proyecto de investigación que se ha venido desarrollando en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO), cuyo propósito es establecer el comportamiento del oleaje a través de sus propiedades estadísticas como son, altura significativa (H_s), periodo del pico espectral (T_p) y dirección promedio predominante de las olas (θ) en la zona de estudio.

Para establecer las características del oleaje que llega a la Bahía de Santa Rosalita, se instaló un medidor de oleaje tipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profile), modelo WorkHorse Sentinel 600 kHz, de la compañía RD Instruments. Este instrumento fue instalado en las coordenadas $28^{\circ} 39.245' N$ y $114^{\circ} 14.151' O$, en una profundidad promedio de 11 metros.

El instrumento utilizado combina un sensor de presión con un medidor de corriente del tipo doppler para resolver las principales características de las olas, esto es su altura, su periodo y su dirección de propagación. Este instrumento se programó para grabar 2048 muestras del perfil de las olas, con un intervalo en tiempo entre muestra y muestra de 0.5 s, cada 3 horas. A cada secuencia de 2048 datos se le referirá en lo sucesivo como medición o registro de oleaje.

El aparato graba de manera autónoma y tiene una capacidad de memoria tal que con la programación establecida puede operar hasta por tres meses. En todos los casos se realizaron las maniobras de recuperación de datos y mantenimiento del instrumento entre dos periodos de medición consecutivos, por lo que prácticamente no se perdió ningún registro de oleaje a lo largo de todo el año de medición. Las maniobras de recuperación de los datos consisten en ubicar el punto donde se encuentra el aparato con ayuda de un GPS (Sistema Posicional Geográfico) en las coordenadas antes mencionadas; acto seguido bajamos con ayuda del equipo de buceo, se retira de la estructura piramidal a la que se encuentra fijada y se sube con el aparato a la lancha. Una vez en la lancha se limpia con cepillos y espátulas de todo el material orgánico que pudiese tener, se seca y se abre, se le cambian las baterías y se le pone una bolsa de naftalina cuya función es evitar que la humedad se concentre en las partes eléctricas del instrumento (figura A1 en anexos).

De manera general el procedimiento del procesado de la información generada por el medidor de oleaje fue la siguiente. El aparato cuenta con dos memorias, cada una con una capacidad de memoria de 250 mega bites; de manera periódica y directamente en el campo, la información de la unidad de memoria del instrumento, cuyo lenguaje es binario; se retira del aparato, para posteriormente ser transferida al disco fijo de una computadora personal (figura

A 2 en anexos). Donde se hace el respaldo de dicha información en disco compacto.

La información es posteriormente analizada en laboratorio, donde se utilizaron los paquetes de cómputo WaveView y WaveMon (RDInstruments 1999); los cuales son proporcionados por el fabricante junto con el ADCP. El primer paquete (WaveView) permite la conversión de la información de un lenguaje binario a decimal, realiza las operaciones necesarias para asignar unidades ingenieriles (sistema inglés m k s) a la información y separa la información en registros cuyo nombre incluye información relativa a la fecha y hora en la que se generaron y al nombre de la estación de medición cabe mencionar que el software se encarga de verificar la calidad de los datos durante el proceso. Un ejemplo de la visualización de la información ya analizada al utilizar el paquete WaveView se muestra en la Figura A3 del anexo. El segundo paquete de cómputo (WaveMon) contiene las rutinas necesarias para obtener los principales parámetros estadísticos del oleaje (H_s , T_p y θ) a partir del análisis de cada uno de los registros de oleaje.

Una vez generada toda la información estadística para cada uno de los archivos de oleaje se procedió a analizar esta información de manera conjunta para poder establecer las principales características y el comportamiento del oleaje que llega a la Bahía de Santa Rosalíta, B.C.

Para tener una mejor visión de la variabilidad temporal de la información se decidió elaborar los histogramas de frecuencia con el programa MatLab v12, en el cual se graficó el porcentaje de ocurrencia de la altura significativa (H_s) y el periodo de pico espectral (T_p), para cada mes del año de estudio.

Asimismo, se elaboraron los diagramas de rosas de oleaje también con ayuda del programa MatLab, con la finalidad asociar a cada altura de ola significativa su dirección de arribo, también para cada mes en el periodo que comprendió de abril 2002 a marzo 2003.

En la segunda parte del tratamiento de los datos, con ayuda del programa Excel para Windows Xp se sacó la media ponderada de los datos de altura significativa, periodo de pico espectral y dirección del oleaje en la Bahía de Santa Rosalíita para todo el año de estudio.

Capítulo 3

Resultados.-

Con el propósito de evidenciar el mayor detalle posible en los resultados de las mediciones de oleaje se decidió dividir el análisis de los datos en dos partes; en la primera parte la información estadística del oleaje correspondiente a cada uno de los meses de medición es considerada. Esta información consiste básicamente en la altura significativa del oleaje (H_s), la cual se define como el promedio de la tercera parte de las alturas de ola más grandes contenidas en una medición (17 minutos en este caso en particular), el periodo correspondiente a la frecuencia del pico del espectro de cada registro de olas, o

mejor conocido como periodo del pico espectral (T_p); y la dirección promedio en la que se propagaron las olas contenidas en cada registro (θ).

En la segunda parte del trabajo se realizó un análisis similar, con la diferencia de que ahora se agrupó la información de oleaje por cada estación del año (primavera, verano, otoño e invierno), donde se presentan gráficas de variabilidad temporal, histogramas de frecuencia del porcentaje de ocurrencia de alturas y periodos; por último se elaboran diagramas de rosas de oleaje. Esto con la finalidad de apreciar con mayor facilidad cómo se comporta el oleaje para la zona de estudio de manera estacional. Cabe mencionar que no quiere decir que el oleaje va a tener el mismo comportamiento cada año, pero los resultados darán una idea de cómo es el patrón estacional del arribo del oleaje para el área de estudio en cuestión en el periodo de estudio comprendido de abril 2002 a marzo 2003.

Parte I

Análisis mensual.-

La estadística general de todos los datos de oleaje obtenidos de la Bahía de Santa Rosalita Baja California, se presenta en la Tabla I. En esta tabla podremos apreciar los valores de los parámetros estadísticos como son las alturas significantes (en cm), los periodos de pico espectral (en segundos) y las direcciones predominantes del oleaje (en ° con respecto al norte), para cada mes del periodo de estudio comprendido de abril 2002 hasta marzo 2003.

Tabla I. Parámetros estadísticos más relevantes para las alturas, periodos y direcciones de las olas registradas durante cada uno de los meses de medición considerados en este trabajo.

Mes	Parámetro Estadístico	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Est.
	Hs [cm]	21	43	70	12
Abril	Tp [s]	4	10	13	1
	Dir. [°]	195	211	224	4
	Hs	25	46	94	13
Mayo	Tp	2	10	25	5
	Dir.	19	209	356	35
	Hs	29	47	89	10
Junio	Tp	2	10	25	4
	Dir.	15	206	317	24
	Hs	23	38	60	6
Julio	Tp	2	9	25	6
	Dir.	31	205	330	35
	Hs	25	37	75	6
Agosto	Tp	2	10	26	7
	Dir.	17	201	329	44
	Hs	26	42	68	6
Septiembre	Tp	2	10	26	5
	Dir.	3	195	331	40
	Hs	26	59	167	24
Octubre	Tp	2	13	26	5
	Dir.	27	200	346	35
	Hs	33	76	228	30
Noviembre	Tp	2	13	21	2
	Dir.	168	200	260	10
	Hs	41	100	227	42
Diciembre	Tp	7	14	18	2
	Dir.	159	200	336	14
	Hs	42	91	235	32
Enero	Tp	10	15	21	2
	Dir.	173	200	265	11
	Hs	35	69	153	23
Febrero	Tp	4	14	21	3
	Dir.	141	201	230	11
	Hs	38	75	196	32
Marzo	Tp	2	13	26	3
	Dir.	22	201	331	18

Parte II

Análisis estacional.-

Las gráficas de la información correspondiente a cada estación del año están acomodadas en tres diferentes grupos de gráficas; en las primeras podemos observar la variabilidad temporal (Figuras 3, 4, 5 y 6) de la altura significativa del oleaje (H_s) en la gráfica superior; del periodo del pico espectral (T_p), en la gráfica central, y de la dirección de propagación del oleaje (θ) en la gráfica inferior. Las gráficas están acomodadas de tal manera que se presentan en grupos que corresponden a los diferentes meses considerados en cada una de las estaciones del año.

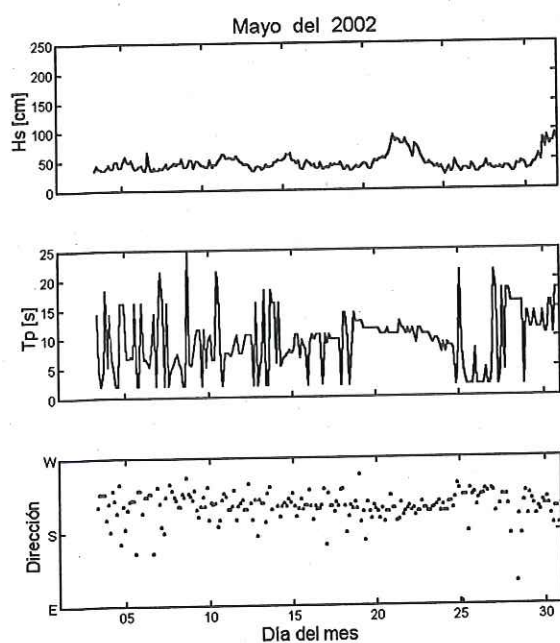
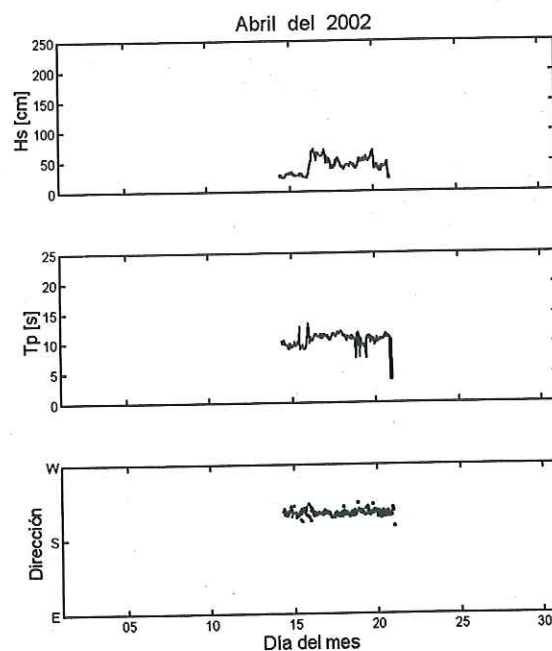
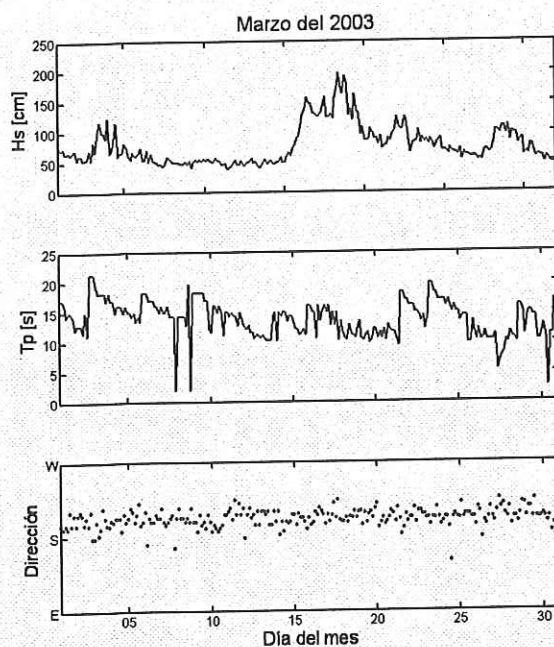


Figura 3. Mediciones de altura significativa (Hs), periodo del pico espectral (Tp) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de primavera, correspondientes a los meses marzo (2003), abril y mayo (2002), se distinguió por encontrarse valores de altura con un promedio de 0.56 m; sobresale el valor máximo de ola registrado a mediados de marzo, con un valor de 1.96 m. el promedio del periodo del espectro fue de 11 s, con una dirección promedio del SSO (206 °).

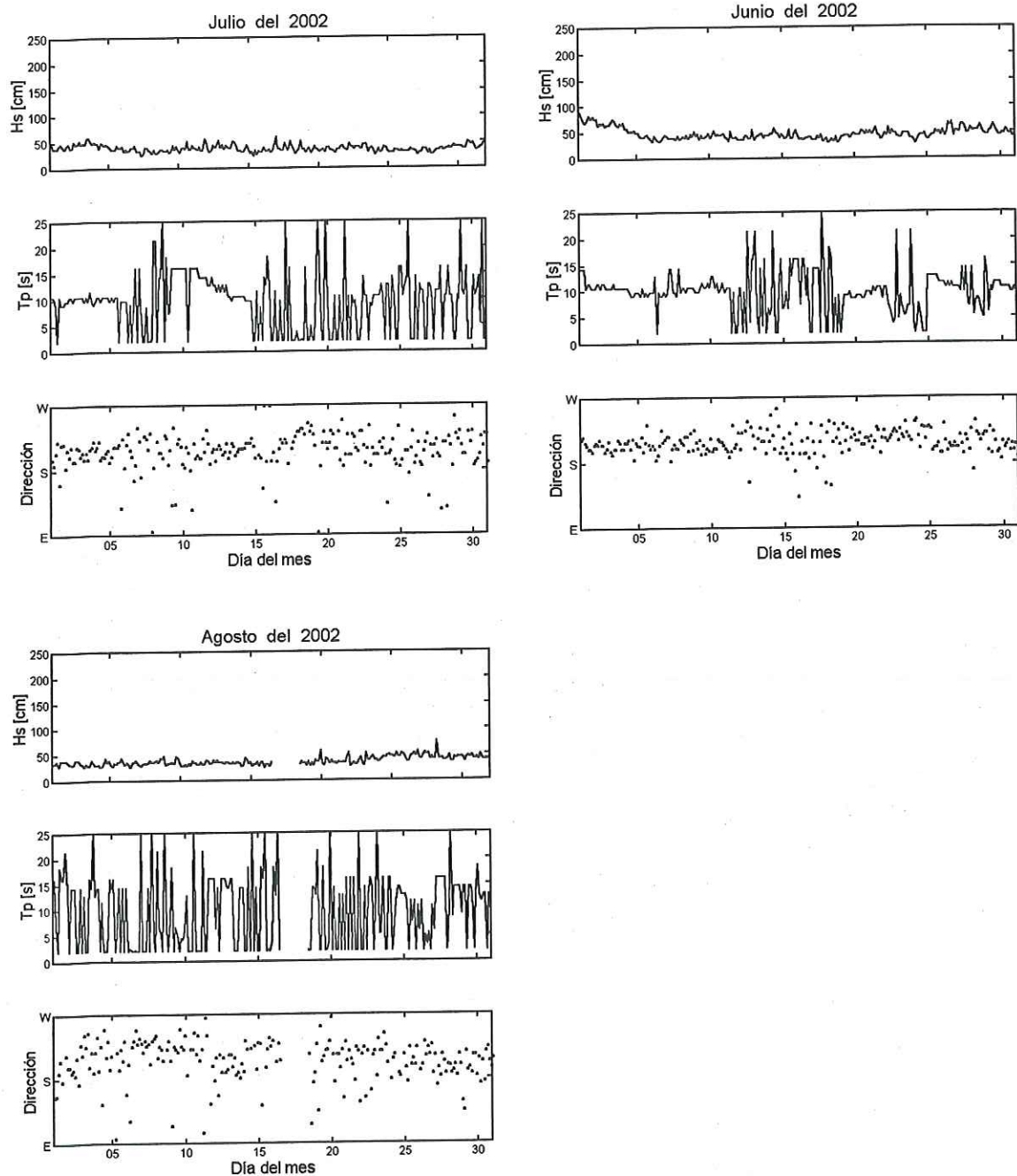


Figura 4. Mediciones de altura significativa (Hs), periodo del pico espectral (Tp) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de verano (correspondientes a los meses de junio, julio y agosto 2002), en esta estación en particular encontramos el oleaje más bajo de todo el año con una altura significativa promedio del oleaje de 0.41 m, registrando a principios de junio la altura máxima de .89 m; asimismo el periodo de pico espectral más bajo fue encontrado en esta estación, con un valor de 2 s y en promedio registrado fue de 9.7 s; la dirección del oleaje que predominó fue de 204 °,(SSO) aunque también se registró oleaje proveniente del NO (325 °).

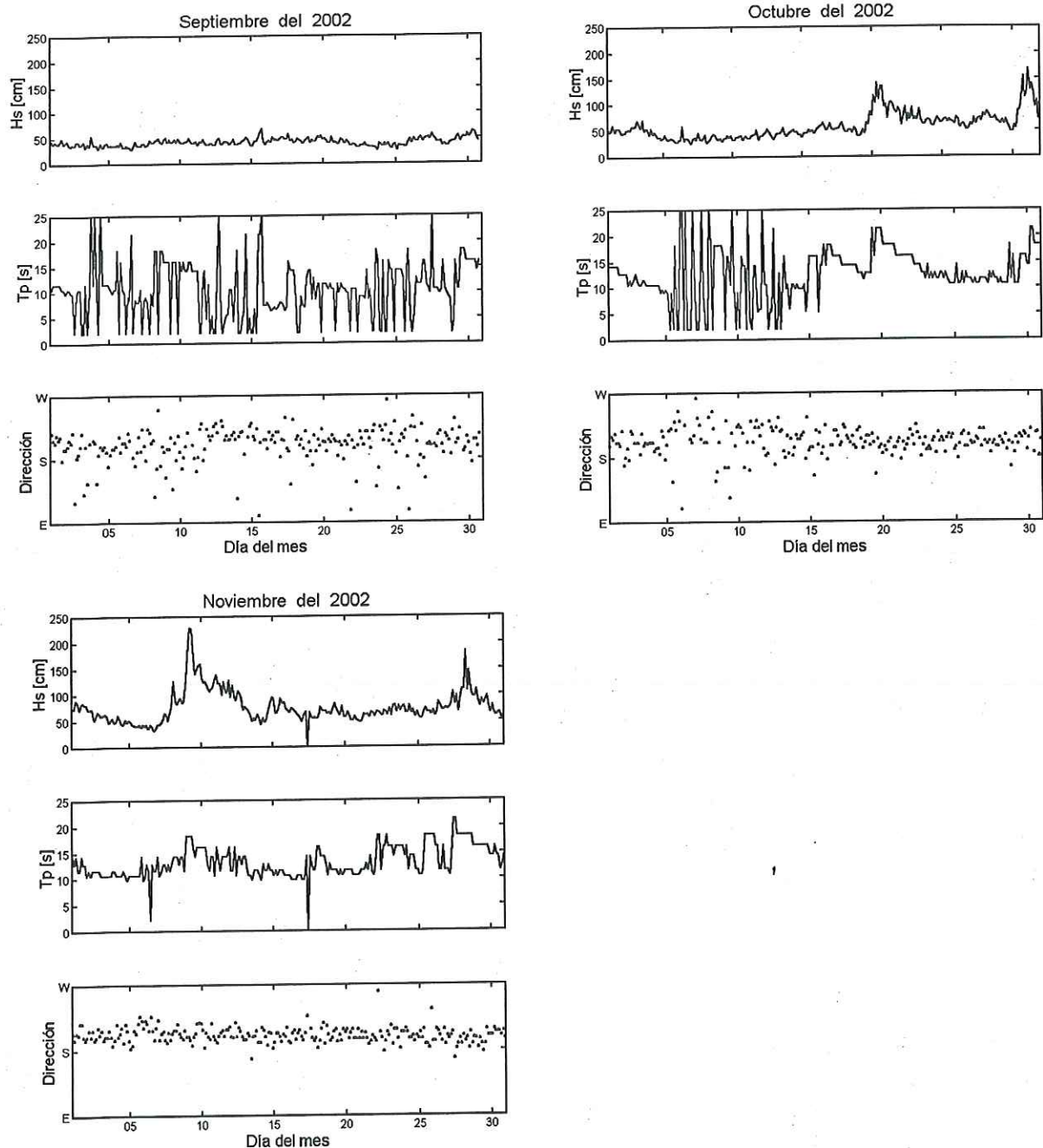


Figura 5. Mediciones de altura significativa (H_s), periodo del pico espectral (T_p) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de otoño (correspondientes a los meses de septiembre, octubre y noviembre 2002), el promedio de la altura significativa para esta temporada aumenta considerablemente pero sin ser la máxima presentada en todo el año; encontrando valores promedio de .59 m, el valor máximo encontrado de altura de ola se registró a principios del mes de noviembre con un valor de 2.28 m, el periodo del pico espectral observa un pequeño incremento encontrando valores promedio de 12 s; la dirección de oleaje que predominó en esta temporada fue de 198° , (SSO), con una influencia mínima del NO, (66°).

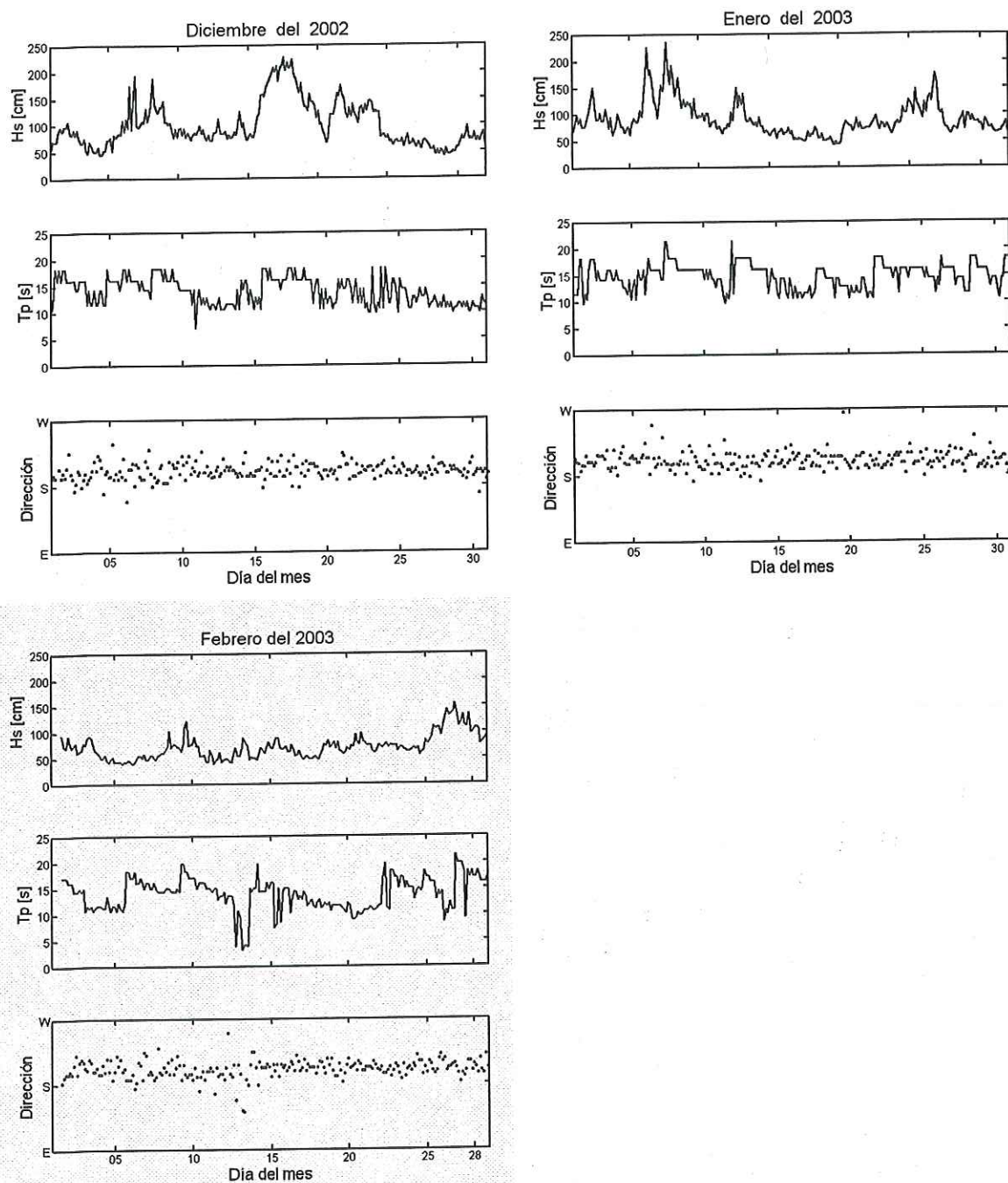


Figura 6. Mediciones de altura significativa (Hs), periodo del pico espectral (Tp) y dirección de arribo del oleaje, en la estación de invierno (correspondientes a los meses de diciembre (2002), enero y febrero (2003), lo más significativo de esta estación es que encontramos las mayores alturas de olas con un promedio de altura significativa de 0.87 m, cabe mencionar que la altura máxima registrada en todo el estudio fue registrada en esta estación, específicamente a principios del mes de enero con una altura de 2.35 m, asimismo el promedio del periodo del pico espectral es superior al de las otras estaciones, registrando el valor de 14 s, también encontramos que la dirección promedio predominante en esta época del año varía un poco hasta llegar a casi del sur franco, (200 °).

El segundo juego de gráficas son los histogramas de frecuencia elaborados con el programa MatLab v12; éstas nos representan el porcentaje de ocurrencia de las diferentes alturas significantes y periodos del pico espectral del oleaje para cada uno de los meses de medición. En cada gráfica superior se observa la información de altura significativa (H_s), cuyas clases se seleccionaron con incrementos de 0.5 m, y en la gráfica inferior encontramos el histograma de periodo de pico espectral (T_p), cuyas clases se fijaron con incrementos de 1 segundo. El número de datos considerado en la generación de cada histograma se presenta en la parte superior derecha del histograma correspondiente a las alturas del oleaje de las alturas y los periodos del pico espectral para cada mes (Figuras 7, 8, 9 y 10).

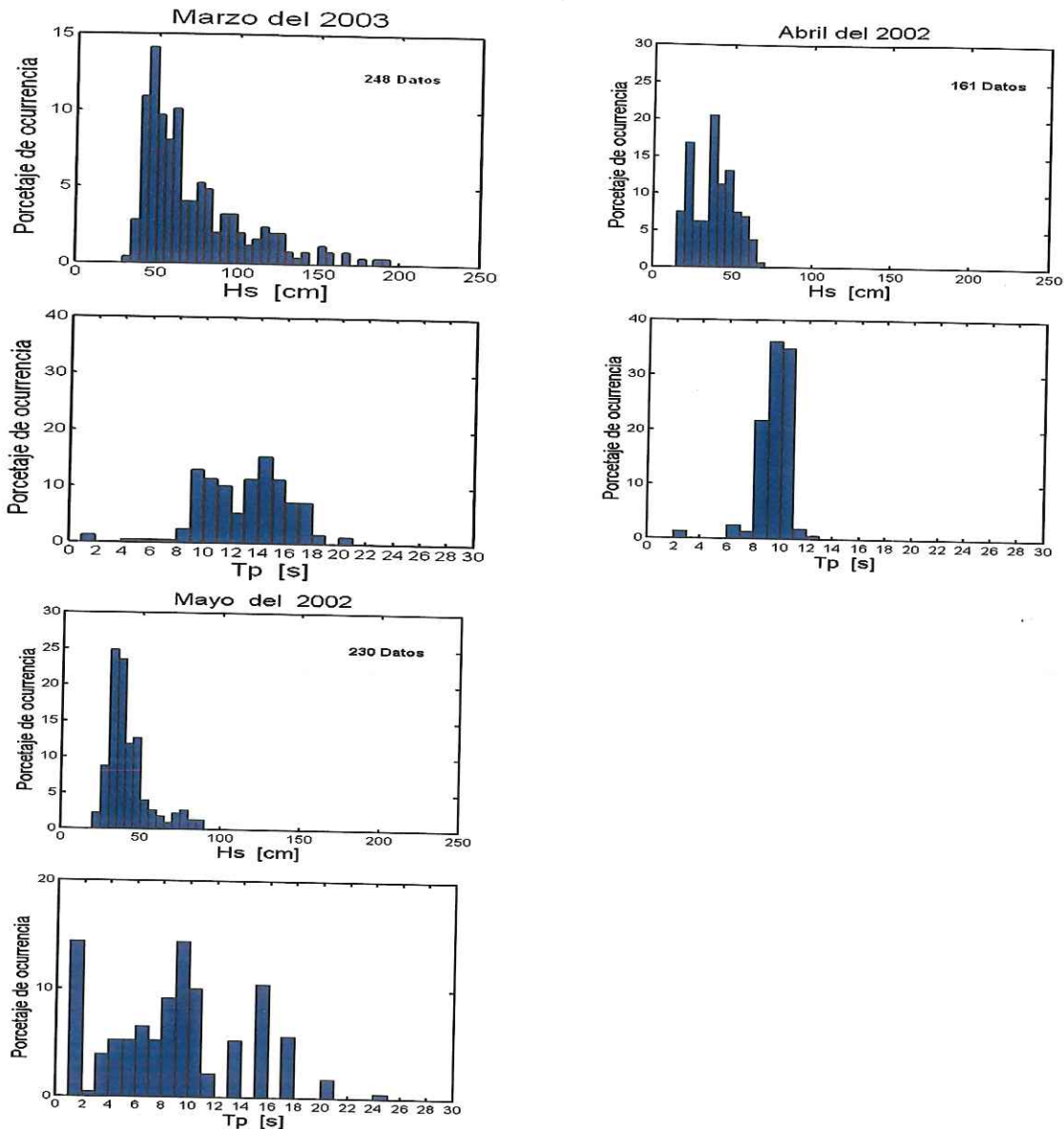


Figura 7. Histograma de frecuencia para la Altura significativa (H_s) y para el periodo del pico espectral (T_p), para primavera, correspondientes a los meses marzo (2003), abril y mayo (2002), la altura de ola significativa de 0.5 m presentó el máximo porcentaje de ocurrencia con casi el 15 % del total de los datos del mes de marzo, el periodo de pico espectral que más se presentó para este mes fue de 14 s. Para el caso del mes de abril 0.4 m presentó la altura de ola con más ocurrencia, más del 20 % de las olas registradas presentaron esa altura significativa. Y más del 35 % de los datos registrados de oleaje presentaron periodos de 10 s. En mayo la altura promedio que más se presentó fue de 0.35 m, con casi un 25 % de ocurrencia; los periodos 2 s y 10 s fueron los más representativos; cada uno con un 15 % de ocurrencia para este mes.

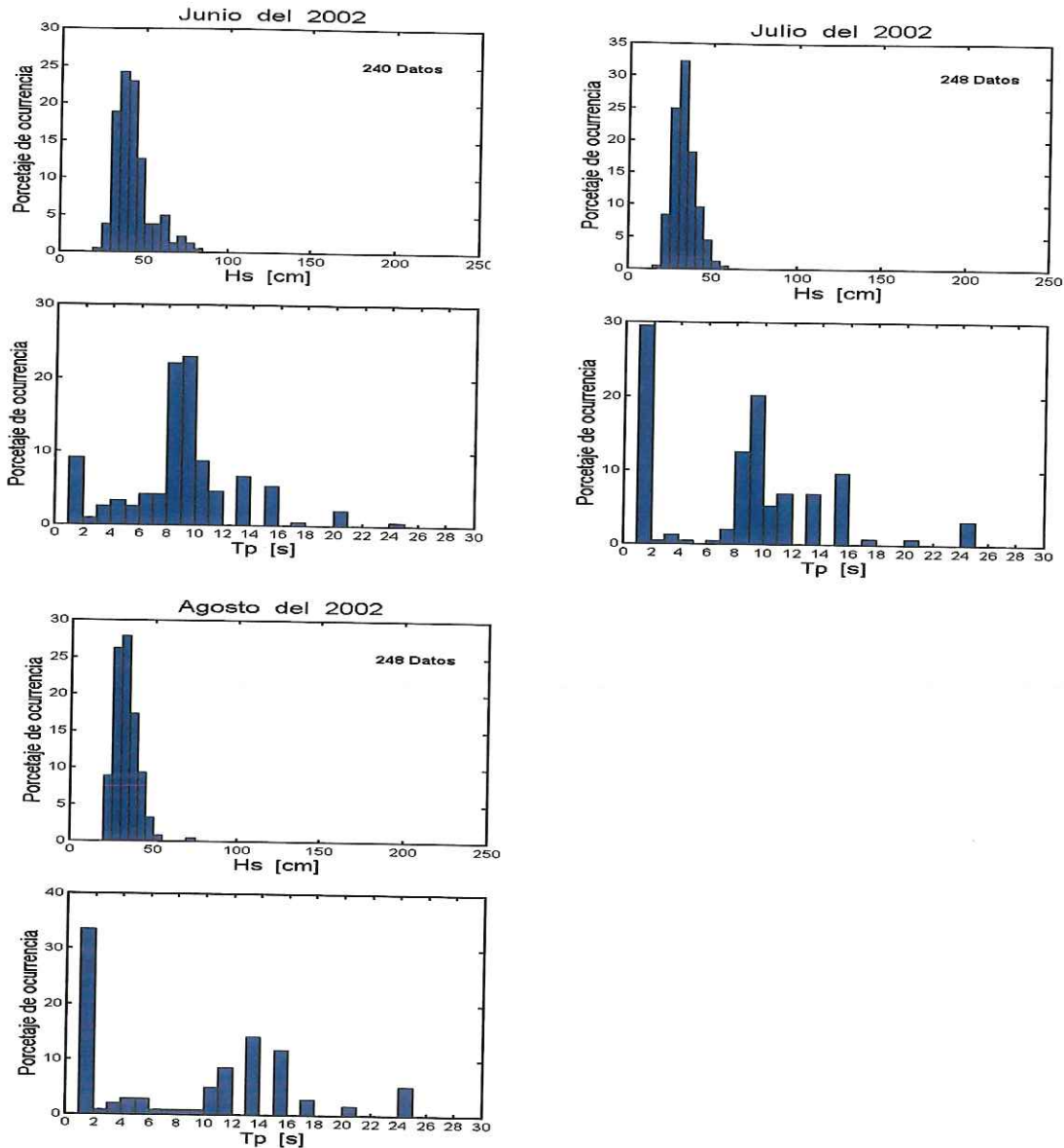


Figura 8. Histograma de frecuencia para la Altura significativa (H_s) y para el periodo del pico espectral (T_p), para la estación de verano (correspondientes a los meses de junio, julio y agosto 2002); para el mes de junio las olas con alturas de 0.3 m tuvieron casi un 25 % de ocurrencia, dominando los periodos de 10 s, con un 25 % de ocurrencia. En julio las olas con alturas de 0.35 m representaron un 33 % de ocurrencia, y el periodo de 2 s represento un 29 % de frecuencia. En el caso del mes de agosto las olas de mayor ocurrencia fueron las de 0.35 m con casi 28 % de ocurrencia y los periodos de 2 s representaron casi 35 % de los datos de oleaje para este mes.

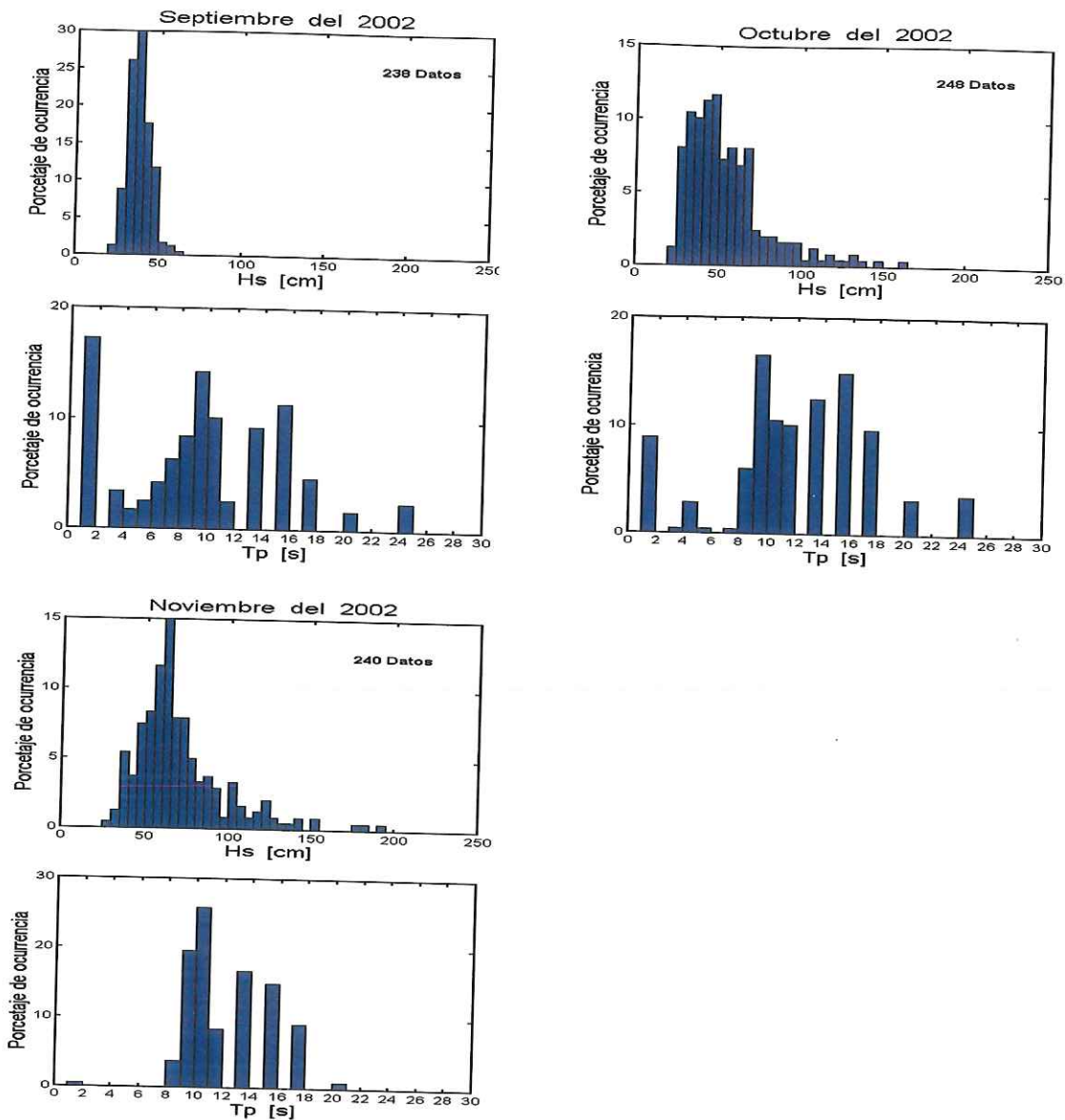


Figura 9. Histograma de frecuencia para la Altura significativa (H_s) y para el periodo del pico espectral (T_p), para la estación de otoño (correspondientes a los meses de septiembre, octubre y noviembre 2002); para el mes de septiembre las olas de mayor ocurrencia tuvieron alturas de 0.4 m con el 30 % de ocurrencia, el periodo de 2 s representó el 18 % de los datos, seguido por las olas de periodo de 10 s con el 15 % de ocurrencia. Octubre presentó olas de 0.45 m como las de mayor ocurrencia, el 15% del total de olas registradas presentaron el comportamiento con estas dimensiones y a partir de este mes este comportamiento se vio en aumento; el periodo de 10 s fue el que presentó mucha mayor frecuencia con el 17 % de ocurrencia. Noviembre presentó olas de 0.6 m con un 15 % de ocurrencia, y el oleaje con los periodos de 11 s ocuparon un 27% de ocurrencia.

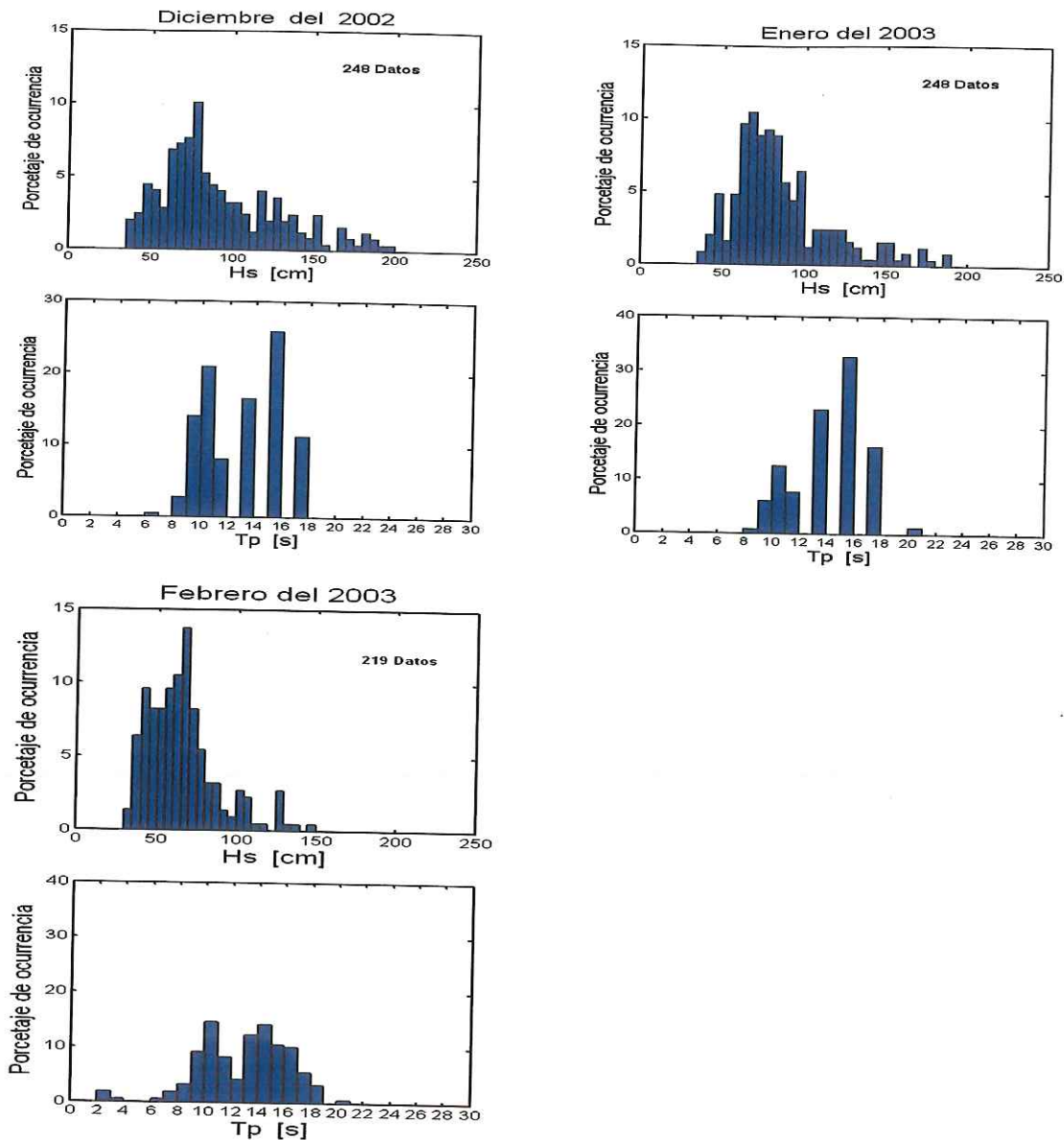


Figura 10. Histograma de frecuencia para la altura significativa (H_s) y para el periodo del pico espectral (T_p), en la estación de invierno (correspondientes a los meses de diciembre (2002), enero y febrero (2003); en esta estación sobresale el oleaje con mayor altura; en el caso de diciembre el oleaje con 0.75 m presentó un porcentaje de ocurrencia del 10 % y se registraron olas de hasta 2.27 m, el periodo espectral de más ocurrencia en este caso fue el de 16 s con un 27 % de ocurrencia. Enero se caracteriza por presentar el oleaje más alto de todo el análisis estadístico, presentando olas de 0.65 m con el 11 % de ocurrencia y periodos de 16 s representan un 33 % de ocurrencia de los datos. Para febrero sigue el mismo comportamiento, olas de 0.65 m de altura significativa observan un 14 % de ocurrencia para la zona de estudio en este mes; con periodos de 11 s como los dominantes con un 15% seguidos por los periodos de 15 s con un 14.5% de ocurrencia.

Las gráficas que a continuación se presentan son diagramas de rosas de oleaje; hechos también con el programa MatLab v12 (Figuras 11, 12, 13 y 14); el propósito de estas gráficas es asociar a cada altura su dirección de arribo para cada mes del año de estudio, y al agruparse por cada estación del año poder apreciar si hay un cambio significativo entre cada mes que conforma la temporada.

En estas figuras las diferentes clases de altura de oleaje (a intervalos de 0.5 m) están graficadas con barras de diferente grosor y color, donde la barra más delgada y de color azul corresponde a alturas entre 0.0 y 0.5 m y la barra más gruesa y de color rojo corresponde a alturas entre 2.0 y 2.5 m. Para la dirección se utilizan clases de 22.5° , donde el centro de cada clase de dirección se indica con acrónimos, como por ejemplo SOO (sur-oeste-oeste), que corresponde al oleaje que proviene del 247.5° de dirección. La frecuencia de ocurrencia para las diferentes parejas de valores de altura y dirección se indica con círculos concéntricos en los que se utilizan líneas segmentadas. Las frecuencias de ocurrencia correspondientes a 20, 40 y 60% se indican explícitamente. Así mismo, se indica la frecuencia total de ocurrencia de parejas de valores en cada una de las direcciones consideradas al final de cada secuencia de barras.

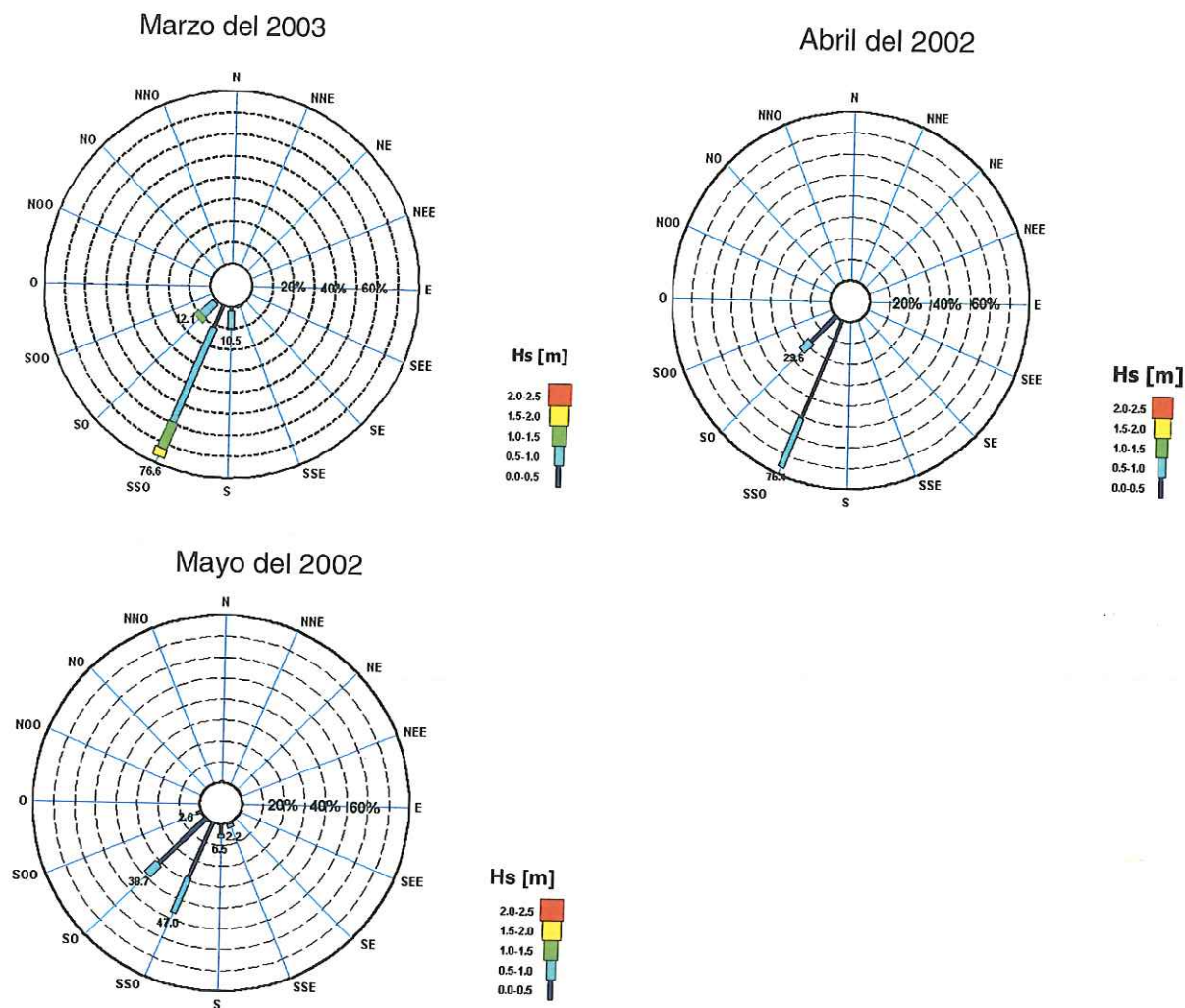


Figura 11. Rosa de oleaje correspondiente en la estación de primavera correspondientes a los meses abril y mayo (2002) y marzo (2003); el comportamiento de la dirección del oleaje en la estación de primavera fue muy similar en los tres meses que lo comprenden (marzo – mayo); para todos los meses la dirección predominante fue de SSO (206 °), y la de segunda mayor incidencia del SO (202.5 °).

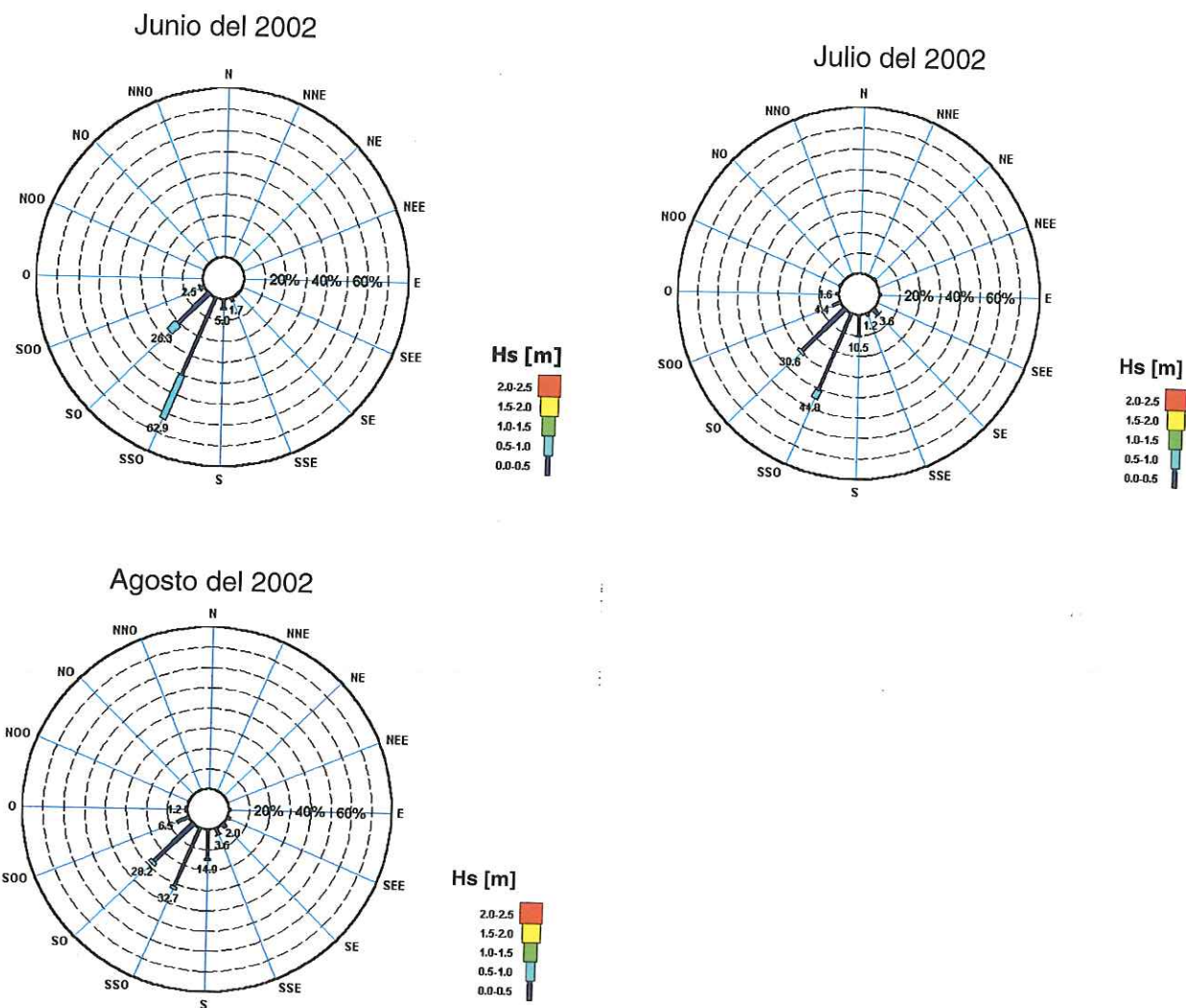
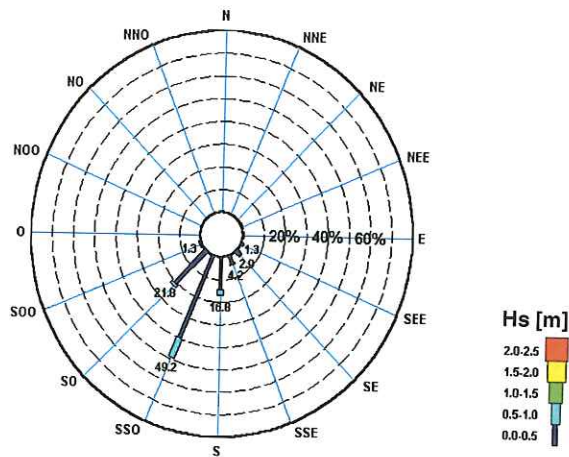
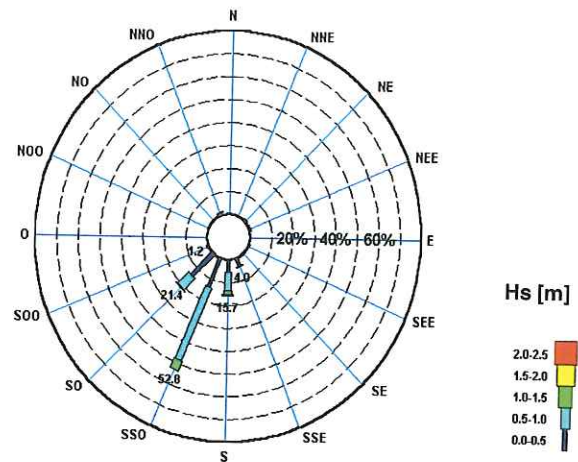


Figura 12. Rosa de oleaje correspondiente en la estación de verano (correspondientes a los meses de junio, julio y agosto 2002); el oleaje con dirección SSO, sigue predominando, pero en menor escala en proporción con primavera, la dirección SO es la segunda que más se distingue, y comienzan a verse otras direcciones poco frecuentes pero que no se registraron en otras estaciones, como es el caso del oleaje oeste.

Septiembre del 2002



Octubre del 2002



Noviembre del 2002

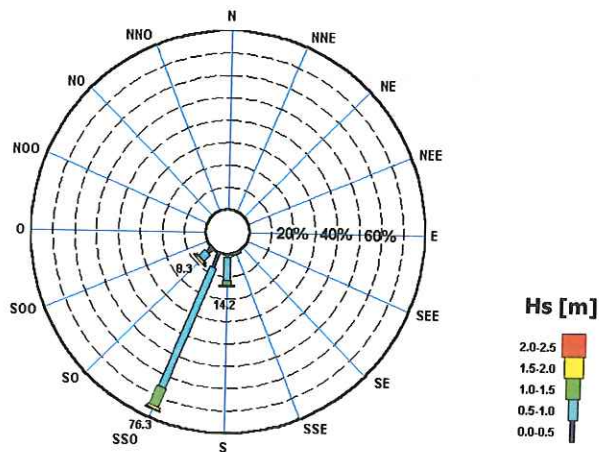


Figura 13. Rosa de oleaje correspondiente a la estación de otoño (correspondientes a los meses de septiembre, octubre y noviembre 2002); la estación de otoño observa un oleaje predominante del SSO predominantemente; la dirección SO le siguen pero en menor escala; a fines de la temporada la influencia del oleaje con dirección sur comienza a ser más representativa que la dirección SO.

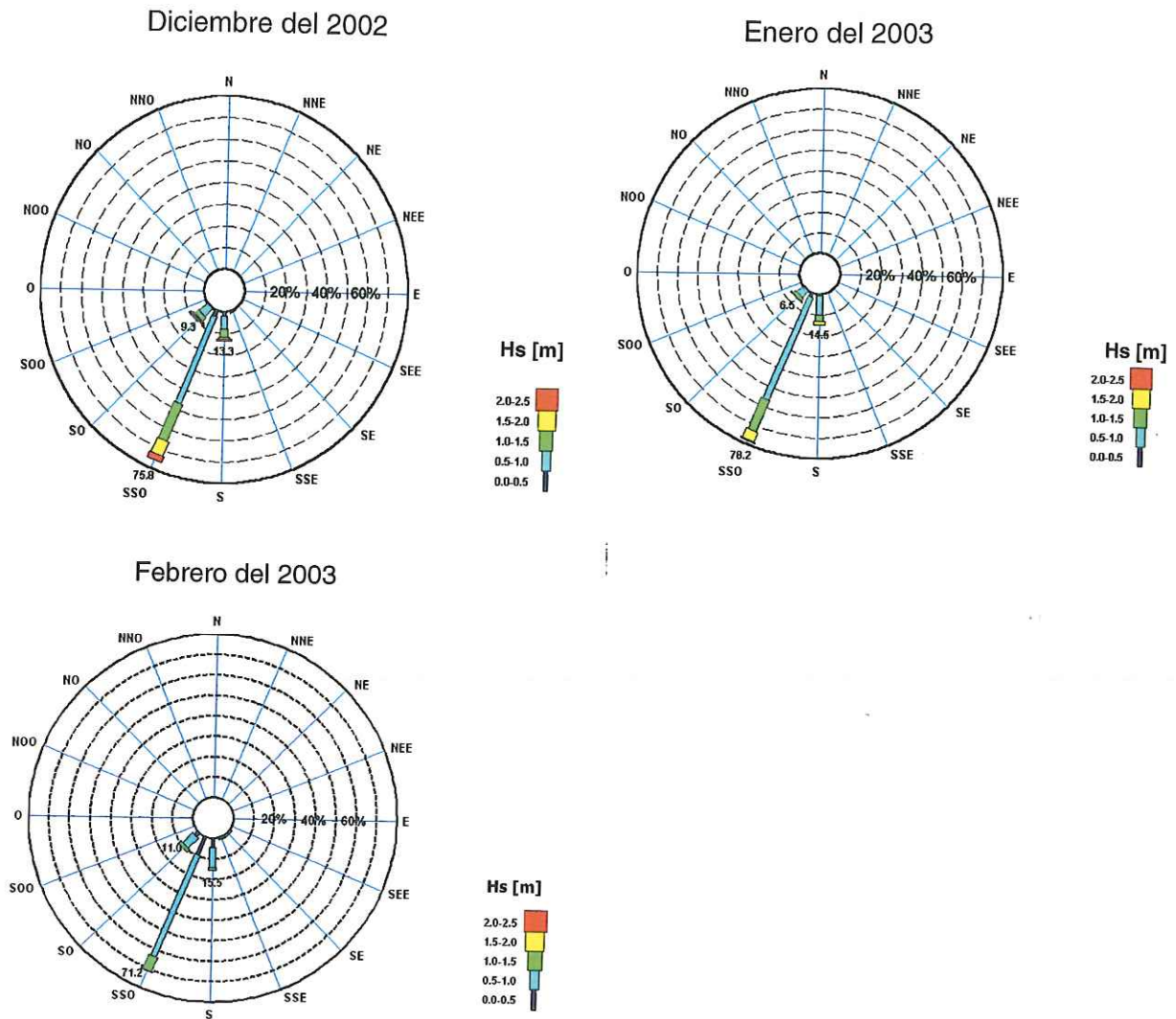


Figura 14. Rosa de oleaje correspondiente en la estación de invierno (correspondientes a los meses de diciembre (2002), enero y febrero (2003); es la época de invierno la que observa un cambio más representativo en comparación a las demás estaciones; la dirección del oleaje que proviene del SSO sobrepasa más del 70% en todos los meses que comprende esta temporada; la segunda dirección más frecuente de arribo es el oleaje con dirección Sur; el oleaje con menor incidencia proviene del SO.

En la segunda parte de los resultados se agruparon los meses por temporadas (invierno, primavera, verano y otoño); posteriormente se sacó la media ponderada de los valores mensuales para los tres meses que conforman cada estación, de cada uno de los resultados mínimos, máximos y promedios, de los tres parámetros analizados (tabla III), esto es altura significativa (H_s), periodo de pico espectral (T_p), y dirección promedio (θ).

Se tomó la determinación de sacar la media ponderada al encontrar que no todos los meses del año de estudio tenían la misma cantidad de datos; de esta forma asignamos la misma importancia a cada conjunto de datos contenidos en un mes al promediar los tres meses para obtener el promedio de toda la estación; esta ponderación nos permite mejorar la precisión de la estimación.

La fórmula general que se utilizó para calcular la media ponderada fue la siguiente:

$$M_p = \sum_{i=1}^{N_{\text{meses}}} \frac{(NM_i) \cdot (PA_i)}{NT_i}$$

Donde i representa el número de mes, NM el número total de datos medidos, NT el número total de datos que debieron haber sido considerados en

la obtención del promedio aritmético (PA). En este caso particular i varió de 1 a 3 (N_{meses}), ya que se consideraron 3 meses por estación del año. Se observa también que si $NM = NT$ el promedio ponderado resulta exactamente igual a el promedio aritmético.

Los valores estadísticos correspondientes a cada una de las estaciones del año se dan en la Tabla II, en donde se sacó la media ponderada de los valores promedios, mínimos y máximos por cada estación. En la tabla III encontraremos el promedio del total de los datos de las direcciones mínimas, máximas y promedios del oleaje medido en la Bahía de Santa Rosalita B.C. pero traducidas en su respectivo punto cardinal; durante el tiempo de estudio que duró de abril 2002 a marzo 2003.

Resultados de la media ponderada de los valores obtenidos en la primera parte de los resultados.-

Para primavera (marzo – mayo), (figura 3), se obtuvo el promedio ponderado para la altura significativa de los tres meses comprendidos en esta temporada obteniendo un valor de 0.56 m, con un mínimo de altura de olas de 0.29 m y un máximo de 1.28 m; para verano (junio – agosto) los valores de altura significativa que se presentaron fueron de 0.41 m, cabe mencionar que de todo el año es en esta estación en donde se encuentran los valores más bajos

de altura significativa de las olas; las alturas máximas de oleaje fue de 0.75 m y el valor de la altura significativa de olas mínima para esta temporada fue de 0.26 m. Para la estación de otoño (comprendido de septiembre - noviembre) se obtuvieron valores de altura significativa de 0.59 m, con alturas mínimas de 0.28 m y alturas máximas de oleaje de 1.55 m. Para la temporada de invierno (diciembre - febrero) podemos apreciar las mayores alturas del oleaje que arribó a la Bahía de Santa Rosalita, B.C., los valores para esta época del año fueron de 0.87 m, observándose una altura máxima de 2.07 m y una altura mínima de ola de 0.40 m (Tabla III).

De la media ponderada para los resultados de pico espectral para la estación de primavera (marzo – mayo), se obtuvo el valor de 11 s, con un periodo mínimo de 3 s y un periodo máximo de 22 s. Para la estación de verano se presentó un valor promedio de 10 s, el promedio del valor máximo de periodo fue de 25 s y el valor mínimo de periodo de pico espectral que se presentó fue de 2 s. Para la estación de otoño el valor promedio fue de 12 s, con un valor mínimo de periodo de 2 s y un periodo máximo de 24 s. Para invierno se presentó un valor de 14 s, con un máximo de 20 s, y un mínimo de 7 s (Tabla II).

La dirección promedio para primavera presentó un valor de 206 ° (SSO), con un valor mínimo de 65 ° (NEE) y 313 ° (NOO) es el valor máximo de

dirección de arribo para esta estación. Para la estación de verano tenemos un valor de 204 °(SSO), siendo 21 ° (NNE) la dirección mínima y 325 ° (NO) la máxima. Para la temporada de otoño, la dirección promedio fue de 198 ° (SSO) con una dirección mínima de 66 ° (NE) y una dirección máximas de 312 ° (NO). Finalmente la media ponderada para los valores de dirección de arribo del oleaje para invierno fueron de 200 ° (S) con un mínimo de 158 ° (SSE) y un máximo de 279 ° (O) (Tabla II).

Tabla II. Dirección promedio de las cuatro estaciones de los datos estadísticos registrados en la Bahía de Santa Rosalíita, B.C., México, de abril 2002 a marzo 2003.

PARÁMETRO	ESTACIÓN del año			
Dir	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
Mínimo	SSE	NEE	NNE	NO
Máximo	O	NOO	NO	NE
Promedio	S	SSO	SSO	SSO

Tabla III. Resultados de los promedios obtenidos para cada estación a lo largo de un año de datos de oleaje de abril 2002 a marzo 2003 de los parámetros estadísticos de alturas, periodos y direcciones de olas registradas en la Bahía de Santa Rosalita, B.C., México.

PARÁMETRO	ESTACIÓN del año			
	Invierno (diciembre- febrero)	Primavera (marzo-mayo)	Verano (junio-agosto)	Otoño (septiembre- noviembre)
Hs (cm)				
Mínimo	40	29	26	28
Máximo	207	128	75	155
Promedio	87	56	41	59
Tp (seg)				
Mínimo	7	3	2	2
Máximo	20	22	25	24
Promedio	14	11	10	12
Dir (°)				
Mínimo	158	65	21	66
Máximo	279	313	325	313
Promedio	200	206	204	198

Capítulo 4

Discusiones.-

Para seguir con el orden de los resultados obtenidos dividiremos esta sección en dos partes; la primera constará de las discusiones de los resultados mensuales, con los acontecimientos más relevantes de cada evento; en la segunda parte de este trabajo se realizarán discusiones pero ahora enfocadas a discernir como se comporta el oleaje en la Bahía de Santa Rosalíta pero por estación de todo el año que conformó el estudio.

Parte I

Discusiones mensuales.-

Los meses que se caracterizaron por presentar las mayores alturas de oleaje fueron de noviembre a enero. Durante estos meses se registraron por lo menos seis eventos en los que la altura significativa del oleaje fue mayor a 1.5 m (Figura 15). En tres de los seis eventos la altura del oleaje rebasó los 2.0 metros (Tabla I). Cabe recordar que las alturas que se están reportando son alturas promedio (H_s); es necesario recalcar lo anterior por que a pesar de mostrar una tendencia hacia las alturas más grandes de olas registradas debe considerarse que definitivamente se presentaron olas de mayor altura en los meses anteriormente mencionados.

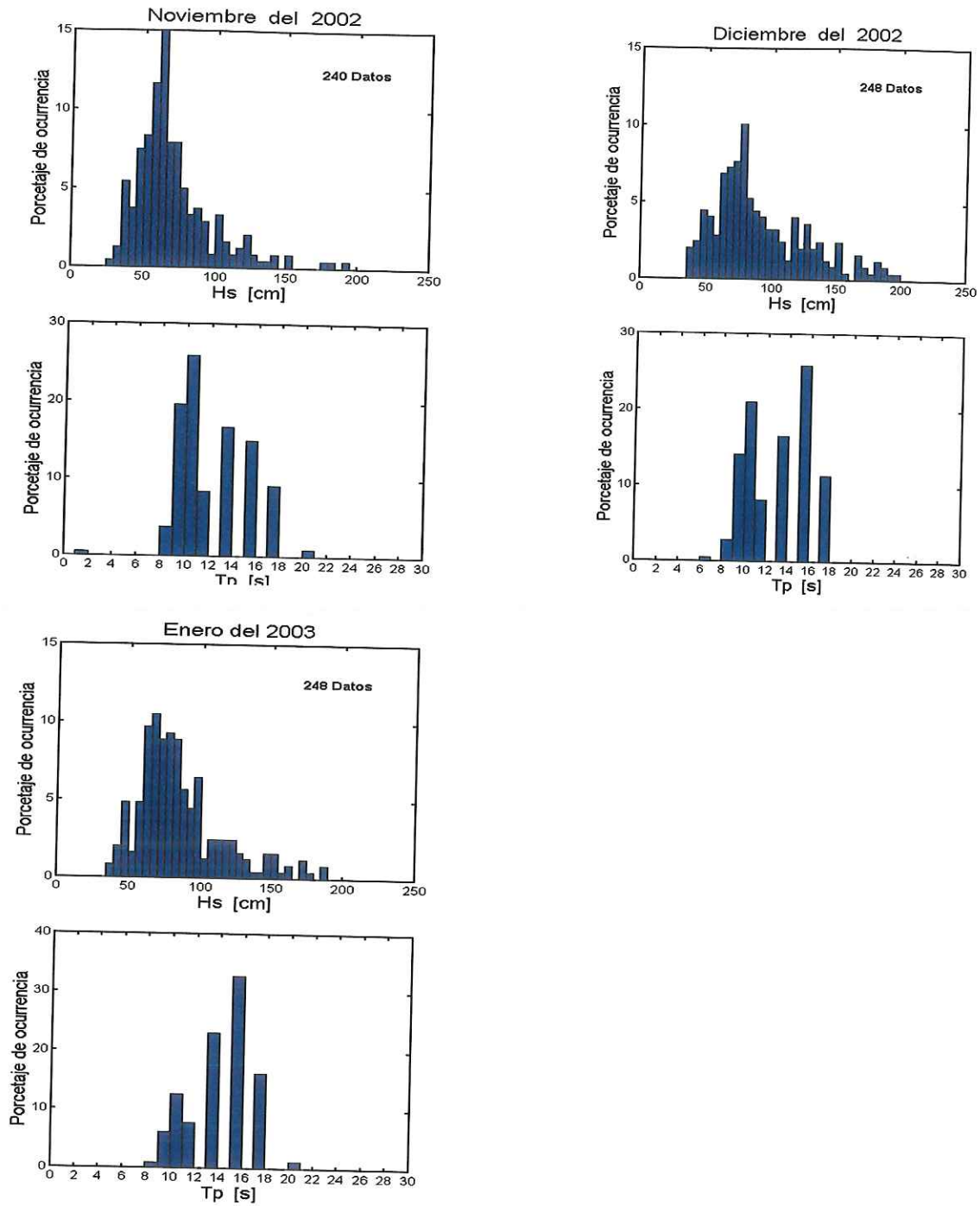


Figura 15. Histogramas de frecuencia que nos permiten apreciar los meses que se caracterizaron por presentar las mayores alturas de oleaje noviembre y diciembre del 2002 y enero 2003.

El hecho de que fuera durante estos meses cuando se registraran las máximas alturas del oleaje no es sorprendente, ya que es durante esta época del año cuando se presentan las principales tormentas en el Pacífico Norte, (Appendini Albrechtsen, 1998) las cuales generan las olas de mayor altura que arriban a la costa noroeste de Baja California, donde se localiza geográficamente nuestra área de estudio, la Bahía de Santa Rosalita.

Como se puede observar, durante los meses de abril a septiembre las alturas del oleaje con mayor porcentaje de ocurrencia oscilaron entre 0.3 y 0.4 m, mientras que de octubre a marzo fueron aquellas entre 0.5 y 1.0 m. Igualmente se observa claramente como la frecuencia de ocurrencia de alturas mayores a 1 m se empiezan a incrementar a partir de octubre (Figura 16).

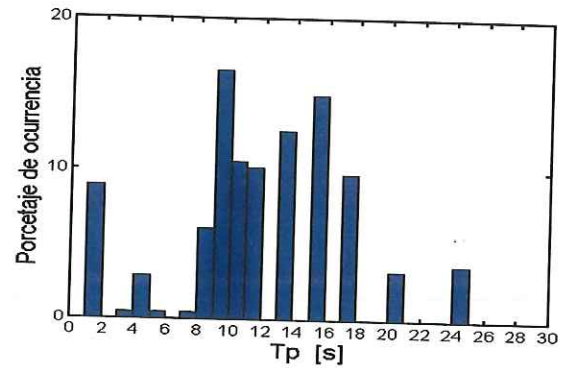
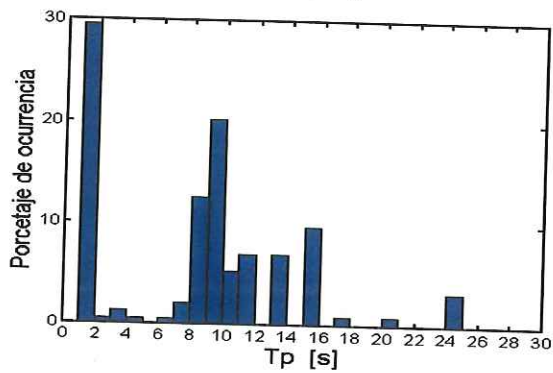
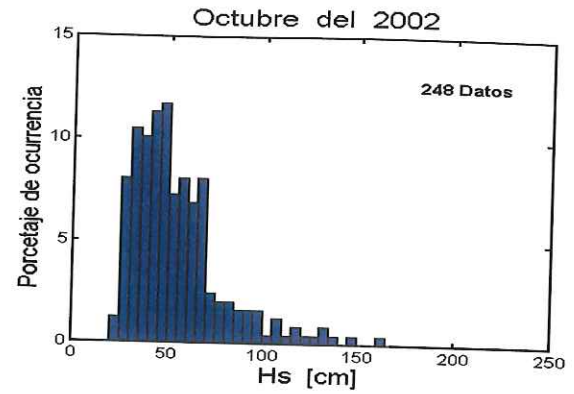
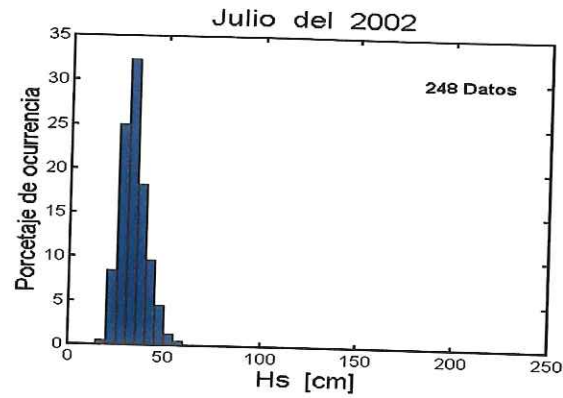


Figura 16. Histogramas de frecuencia que nos muestran como hay un incremento a partir del mes de octubre del 2002 comparado con el mes de julio del 2002 en la altura significativa del olaje.

Con respecto al análisis del periodo del pico espectral se observa que éste mostró un comportamiento variable desde mayo hasta octubre (Figura, 17), donde los valores oscilan continuamente en un intervalo comprendido entre los 2 a 26 segundos (Tabla I).

Este comportamiento pudiera ser la consecuencia de la interacción del oleaje que es generado localmente dentro de la Bahía de Santa Rosalita, el cual se caracteriza por presentar periodos entre 2 y 9 segundos (Uribe Rojo, 1996), y el arribo esporádico de oleaje distante, cuyos periodos oscilan entre 10 y 20 segundos (Uribe Rojo, 1996), así como periodos de 21 a 26 segundos que son causadas por la resonancia de la bahía originadas por los trenes de olas (Uribe Rojo, 1996) (Tabla I).

Como se puede observar en la Tabla I, durante los meses de abril hasta septiembre es posible encontrar días que se caracterizan por una completa calma, así mismo se observa que durante los meses de octubre a marzo el arribo de oleaje distante a la Bahía sucede prácticamente todos los días, de tal manera que el oleaje local queda enmascarado.

El comportamiento de los histogramas de frecuencia correspondientes a la ocurrencia del periodo del pico espectral (T_p) es poco común, en el sentido de que no es posible asociar a estos, por lo menos de manera visual, una

función de distribución teórica de las más comunes al fenómeno del oleaje. Esto, nuevamente, puede ser asociado al hecho de que en la Bahía de Santa Rosalíta es marcada la ocurrencia indistinta de cuatro situaciones de oleaje; las calmas completas, situaciones donde sólo se observa el oleaje local; la mezcla de oleaje local con oleaje distante; y la ocurrencia únicamente de oleaje distante.

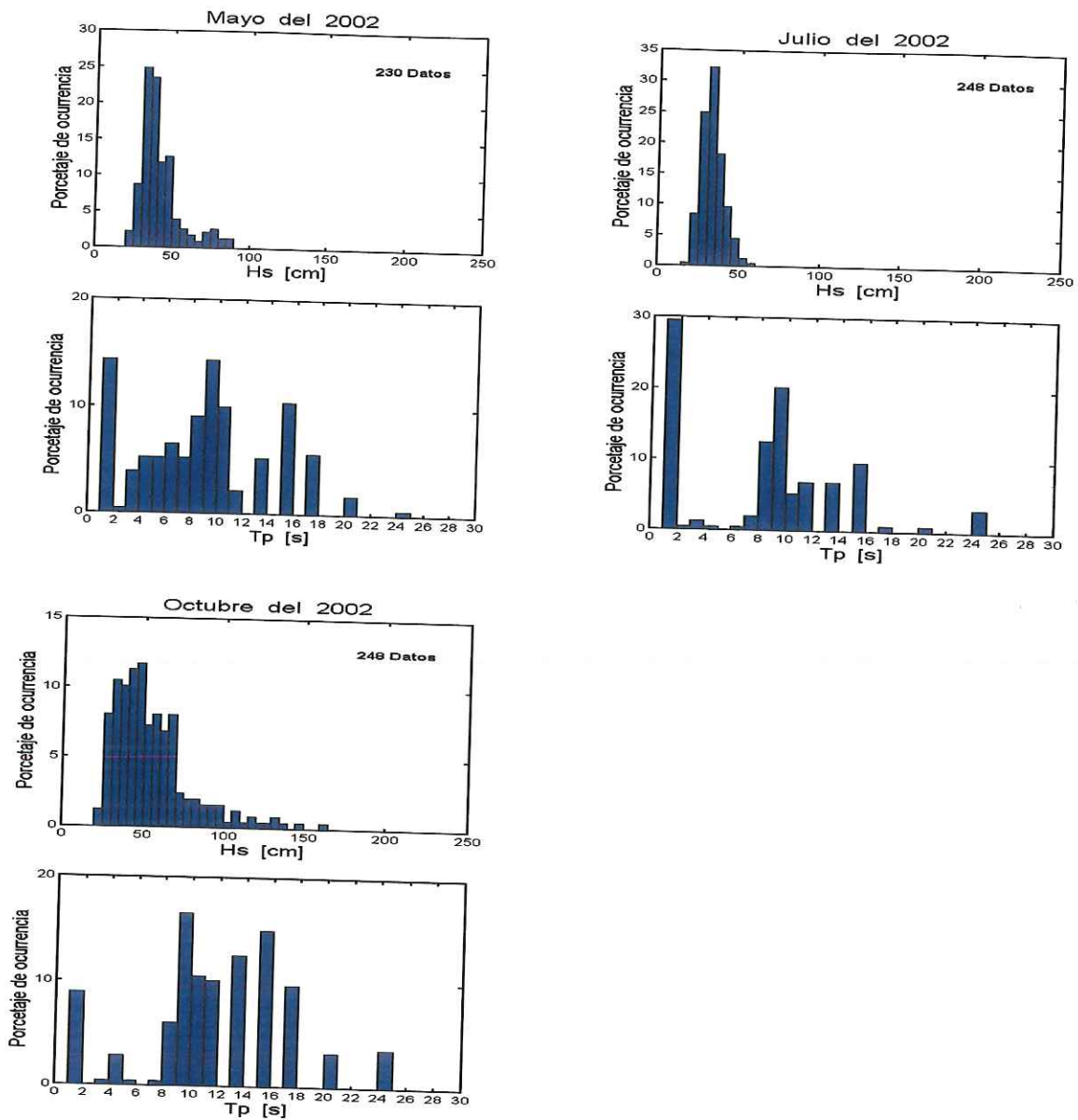


Figura 17. Histogramas de frecuencia en los que apreciamos los ejemplos de los meses más representativos del porcentaje de ocurrencia de registros de 2 hasta 26 s de periodo de pico espectral.

En lo que respecta a los histogramas conjuntos de altura y dirección de oleaje al punto de medición, ésta osciló principalmente entre las direcciones sur-sur-oeste y sur-oeste en los meses de abril a octubre. No obstante a partir de noviembre y hasta febrero se comenzó a observar oleaje con dirección sur como el segundo más dominante.

En las gráficas de rosas de oleaje nos permite observar de una manera más clara cómo la dirección dominante de arribo de las olas correspondió a la sur-oeste-oeste en todo el año de estudio; sin embargo, las mayores alturas de ola registradas, en los meses de noviembre y diciembre, arribaron del sur-oeste (Figura 18).

Noviembre del 2002

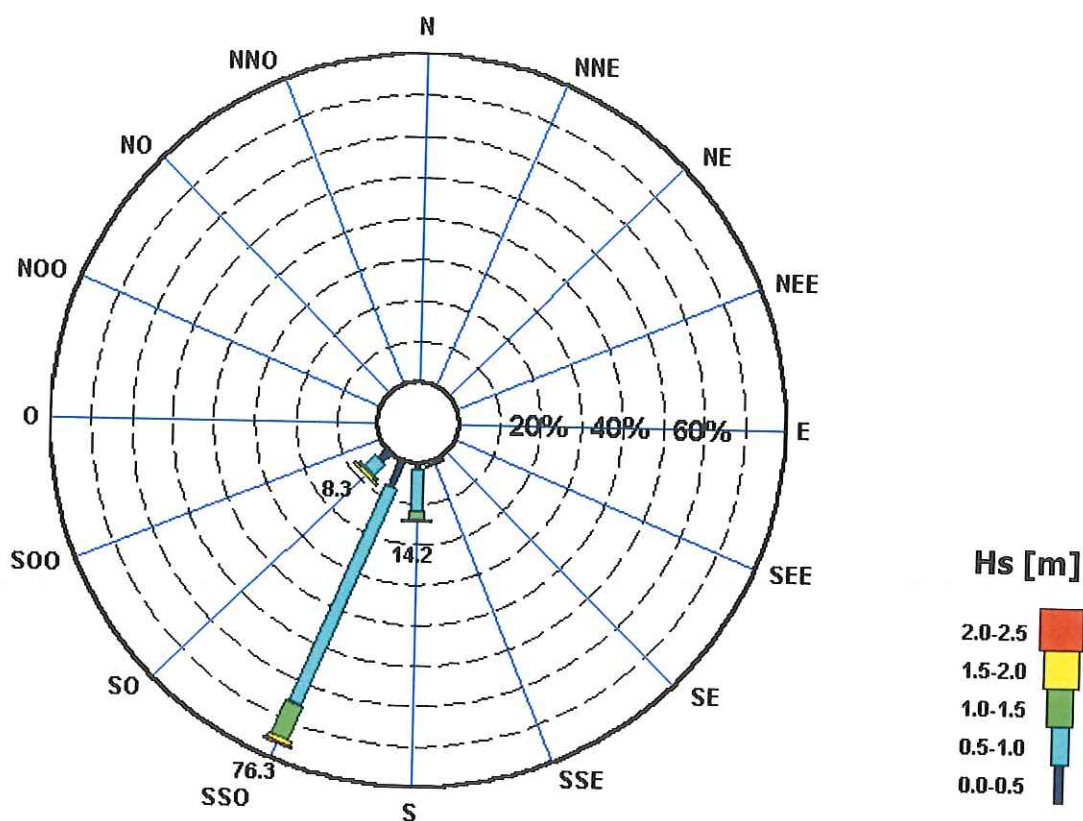


Figura 18. Diagrama de rosa de oleaje que nos indica la predominancia del arribo de oleaje con dirección sur-sur oeste en todo el año de estudio, la dirección sur-oeste fue la de segunda mayor incidencia con excepción de la época de invierno, y el mes de noviembre en donde esta dirección quedó como la tercera más registrada, siendo la dirección sur la segunda más frecuente.

Parte II

Discusiones estacionales.-

Como se puede observar, durante los meses correspondientes a las estaciones del año de primavera, verano y principios de otoño del 2002 las alturas del oleaje dentro de la Bahía se caracterizaron por presentar valores relativamente bajos, con un promedio de 0.41 m. para verano, 0.56 m para primavera y 0.59 m y otoño (Tabla III). Invierno fue la época del año de estudio que presentó la mayor altura de oleaje significativo, con un valor de 0.87 m.

El comportamiento del oleaje que arribó a la Bahía de Santa Rosalita fue similar por lo menos en la temporada de verano, a lo encontrado por Martínez Díaz de León (1989) en la Bahía de Todos Santos, donde encontró valores de 0.4 m para esta temporada. Esto es, las menores alturas de ola se presentaron durante esta época.

Al igual que en las mediciones de oleaje realizadas en localidades más al norte (i.e. Ensenada y Rosarito), se encontró que las mayores alturas se presentaron durante la época de invierno. Esto era de esperarse, ya que como señala Flick Reinhard (1994) las tormentas que se originan en la región nor-occidental, y las dimensiones que tiene el océano Pacífico ayudan a que el

fetch sea más largo, generando oleaje con alturas y periodos sobresalientes en comparación con otras épocas del año.

El análisis del periodo del pico espectral (T_p) nos revela que el comportamiento general de la Bahía de Santa Rosalita B.C. presenta un comportamiento muy variable; al observar los valores de los histogramas de frecuencia, nos podemos percatar que no hay un patrón marcado que rijá cada estación; esto es debido a la combinación del oleaje local (sea) con oleaje distante (swell), prácticamente hay incidencia de oleaje lejano en todo el año lo cual hace que el oleaje local en ocasiones no se distinga o quede encubierto sobresaliendo únicamente el oleaje con periodos largos (hasta 26 s). Hay que dejar claro que en la Bahía de Santa Rosalita existe cuatro situaciones de oleaje, éstas son estado de calmas completas, eventos donde sólo se observa el oleaje local; la mezcla de oleaje local con oleaje distante; y la ocurrencia únicamente de oleaje distante.

Este comportamiento observado en los periodos no contrasta con lo que se ha observado en localidades de medición más al norte; en donde se ha encontrado un periodo máximo de 18 s y un mínimo de 5 (Martínez Díaz de León et al 1989, Marichal Gonzáles, 2001). Una posible razón para observar estas diferencias pudiera ser el hecho de que estamos tratando aquí con información medida en una bahía protegida y no en una costa expuesta como

en el caso de Rosarito, o inclusive la mayoría de las localidades al sur de California, y por otro lado una bahía mucho más protegida en comparación a la bahía de Ensenada. De tal manera que es posible observar períodos de tiempo mucho más largos en los que el viento no es capaz de generar olas que puedan ser detectadas por un sensor de presión a una profundidad de 10 m, lo que se refleja como un periodo de calma total, más las combinaciones de los diferentes periodos ya mencionados con anterioridad.

Por último, la media ponderada de la dirección del oleaje que arribó a la Bahía de Santa Rosalita, B.C., en el periodo comprendido de abril 2002 a marzo 2003 (tabla II), nos muestra que de primavera a otoño la dirección promedio del oleaje fue sur-sur-oeste; en la temporada de invierno esa dirección se modificó hasta llegar a sur franco.

Podemos apreciar que el oleaje que predominó en todo el año de estudio para la Bahía de Santa Rosalita Baja California fue proveniente del sur-sur-oeste, siguiéndole la dirección de sur oeste como la más significativa en todo el año, a excepción de la temporada de invierno que fue prácticamente sur franco la de segunda mayor incidencia (Tabla II).

La dirección del oleaje proveniente del sur oeste resulta ser diferente a lo encontrado en otras partes de la Península de Baja California donde ha sido la

dirección noroeste la que predomina según la estación del año; sin embargo en esta localidad en particular la dirección de arribo del oleaje al punto de medición pudiera estar altamente influenciada por Punta Santa Rosalíta, la cual para oleaje de aguas profundas proveniente del noroeste debe estar induciendo un fuerte proceso de refracción y difracción. El probar esta hipótesis se sale de los alcances de este trabajo, sin embargo procesos similares en la propagación del oleaje de aguas profundas a aguas someras se han observado en otros puntos de medición de oleaje en la costa noroeste de Baja California, como los de Padilla Hernández (1986), Marichal Gonzáles (2001), donde encontraron que para Rosarito B.C. la dirección sur oeste es la que predominó, a pesar de que en aguas profundas el oleaje se aproximaba del noroeste.

Los resultados presentados en la Figura 12, indican que el oleaje de verano comprendido de junio a agosto del 2002, tuvieron una influencia de oleaje poco frecuente en comparación con las demás temporadas; se comenzó a registrar oleaje del oeste, sur oeste, sur sureste y sureste. Esto puede deberse a lo comentado por Appendini Albrechtsen (1998) de que el oleaje que incide en la costa nor-occidental, particularmente durante los meses de verano se ven influenciados por la temporada de huracanes que se originan en la costa oeste de México; también concuerda con que fue precisamente este oleaje el que presentó una menor altura para la Bahía de Santa Rosalíta B.C., en comparación con las demás épocas del año.

Capitulo 5

Conclusiones.-

Para seguir con la mecánica del documento, se dividirá este capítulo en dos partes, en la primera parte podremos encontrar las conclusiones con base a las discusiones mensuales de los datos obtenidos para cada mes del año de estudio; y la segunda parte del capítulo podremos encontrar las conclusiones de las discusiones estacionales para las cuatro temporadas que abarco el estudio.

Parte I

Conclusiones mensuales.-

La altura significativa máxima del oleaje que se presentó en la Bahía de Santa Rosalíta, B.C. México, ocurrió durante el mes de enero del 2003, donde se encontró un valor de 2.35 m.

El comportamiento mensual del periodo de pico espectral del oleaje que arriba a la Bahía de Santa Rosalíta B.C. presenta un comportamiento muy variable; por lo que no se encontró un patrón típico de T_p que pudiera ser asociado a cada uno de los meses del año analizado.

El mayor porcentaje de incidencia de la dirección del oleaje en la Bahía de Santa Rosalíta para cada mes del tiempo comprendido de abril 2002 a marzo 2003 fue la dirección sur-sur-oeste.

Las mayores alturas registradas en el periodo de estudio fueron de la dirección sur-oeste en los meses de noviembre y diciembre.

Parte II

Conclusiones estacionales.-

La estación de verano registró la altura promedio más baja en todo el periodo del análisis de datos, comprendidos en la ciclo de estudio de abril 2002 a marzo 2003, con un valor de 0.41 m; asimismo, la altura significativa promedio mas alta fue en la estación de invierno (diciembre-febrero), registrando el valor de 0.87 m para el mismo periodo de estudio.

No se encontró un comportamiento estacional del periodo del pico espectral (T_p) para la Bahía de Santa Rosalita B.C. en el tiempo muestreado.

Las direcciones de incidencia del oleaje para la Bahía de Santa Rosalita para la temporada abril 2002 a marzo 2003 tuvo un arribo promedio predominante de sur-sur-oeste en primavera, verano y otoño, en invierno tuvo una modificación de 22.5° incidiendo de sur franco.

El comportamiento estacional del oleaje en la Bahía de Santa Rosalita B.C. mostró un comportamiento estacional similar al que se presenta en otros puntos de la península con oleaje más energético en invierno y para verano con menor energía.

La altura significativa presentó el valor más alto en invierno con un valor promedio de 0.87 m y para verano un valor de 0.41 m. de igual forma son valores que si no son similares a los medidos a en otros puntos de la Península de Baja California, presentan valores típicos de comportamiento estacional.

La dirección de arribo del oleaje, mostró un comportamiento diferente a lo comúnmente observado en otros puntos de estudio de la península, encontrando una dirección predominante de arribo sur suroeste para el punto en donde se instaló el aparato de medición.

A pesar de que el comportamiento cualitativo de las alturas del oleaje se comparan muy bien con el comportamiento observado en localidades de medición más al norte de la Bahía de Santa Rosalita, no es el caso de los periodos y las direcciones asociadas al oleaje. Lo que demuestra el valor asociado a mediciones locales de oleaje, donde éstas reflejan todos los factores físicos que pudieran estar influenciando el comportamiento de las olas al propagarse de aguas profundas a aguas someras. Factores que no siempre son entendidos de una manera adecuada y en consecuencia no es posible considerarlos al simular la propagación del oleaje.

Recomendaciones.-

Se recomienda hacer un estudio de refracción y difracción para el área de estudio en cuestión, ya que estos fenómenos pueden ser los que influyan en la Bahía de Santa Rosalíta al hacer un efecto de sombra que ocasiona que el oleaje que incide del oeste se vea modificado por procesos de refracción y difracción, esto es que la energía se transfiera transversal o lateralmente a sotavento respecto al obstáculo, en este caso punta Santa Rosalíta localizada al norte de la Bahía, (Neshyba, 1987). Pensamos que es por estos fenómenos que la dirección predominante del oleaje fue registrada de la dirección sur-sur-oeste; cuando pudiéramos esperarnos que el oleaje incidente provenga del oeste o noroeste.

Referencias bibliográficas.-

- Appendini Albrechtsen Christian M. (1998) Plan de manejo de la erosión costera para Playas de Rosarito, Baja California, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Marinas e Instituto de Investigaciones Oceanográficas, UABC, 117 pp.
- Coria Méndez P. (1991) Distribución de probabilidad de la altura significativa del oleaje y el cálculo de periodos de retorno para el puerto de Ensenada, B.C. México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 40 pp.
- De Dios Sánchez Diego Racial (2002) Climatología del oleaje frente a la costa del Pacífico de Baja California a partir de datos del altímetro a bordo del satélite ERS – 2; Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 66 pp.
- Flick Reinhard E. (1994) Shoreline Erosion Assessment and Atlas of the San Diego Region. Department of Boating and Waterways and the San Diego Association of Governments, Vol. I, Sacramento, California.
- Komar, D. P. (1976) Beach processes and sedimentation. New Jersey. Prentice – Hall, 429pp.
- Marichal González A. E. (2001) Análisis del oleaje medido frente a las costas de Rosarito, B.C., de 1994 a 1998. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 70 pp.

- Martínez Díaz de León A., C. Nava Buttom y F. Ocampo Torres (1989) Estadística de oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C. de septiembre de 1986 a agosto de 1987; Ciencias Marinas, 15 (3): 1 a 20.
- Martínez Díaz de León A., Coria Méndez P. (1993) Distribución de probabilidad de la altura de oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos, B.C. México; Ciencias Marinas, 19 (2): 203 a 216.
- Martínez Díaz de León A. (2004) Spatial variability of wave data from Todos Santos Bay, Baja California, México; Journal of Coastal Research, En prensa.
- Neshyba Steve. (1987) Oceanography Perspectives on a fluid earth John Wiley & Sons, 506 pp.
- Oropeza Rosales F. (1998) Descripción del clima de oleaje par las costas mexicanas del Océano Pacífico en los estados de Baja California, Sonora, Colima, Michoacán y Guerrero. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 219 pp.
- Padilla Hernández Roberto (1989) Potencia y dirección del oleaje en la costa noroeste de la península de Baja California y su aprovechamiento. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 58 pp.
- RDInstruments (1999); Workhorse technical manual version 8.20; Acoustic Doppler Current Profile, 200 pp.

- Rivas Cáceres Héctor S. (1992) Conversión de energía del oleaje; diseño usos y aplicaciones. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 62 pp.
- Lizano R. Omar (1999) Fundamentos de Oceanografía, Escuela de física, Universidad de Costa Rica pdf
- Thurman Harold V. (1985) Introductory Oceanography, Charles E. Merrill Publishing Company, Fourth Edition 503 pp.
- The Open University (1999) Waves, Tides and Shallow – Water Processes. The Open University, Walton Hall, and Butter Worth – Heinemann. Second Edition 227 pp.
- Torres Navarrete C. R. (1986) Comparación y análisis de registros de oleaje obtenidos en una localidad al sur de la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 73 pp.
- Uribe Rojo Marco Antonio (1996) Procesos litorales. Apuntes docentes UABC, 59 pp.
- Young R. Ian (1999) Elsevier ocean engineering book series volume 2; Wind generated ocean waves. Ocean engineering editors. 255 pp.

Páginas electrónicas

- www.semarnat.gob.mx

Capítulo 6

Anexos.-

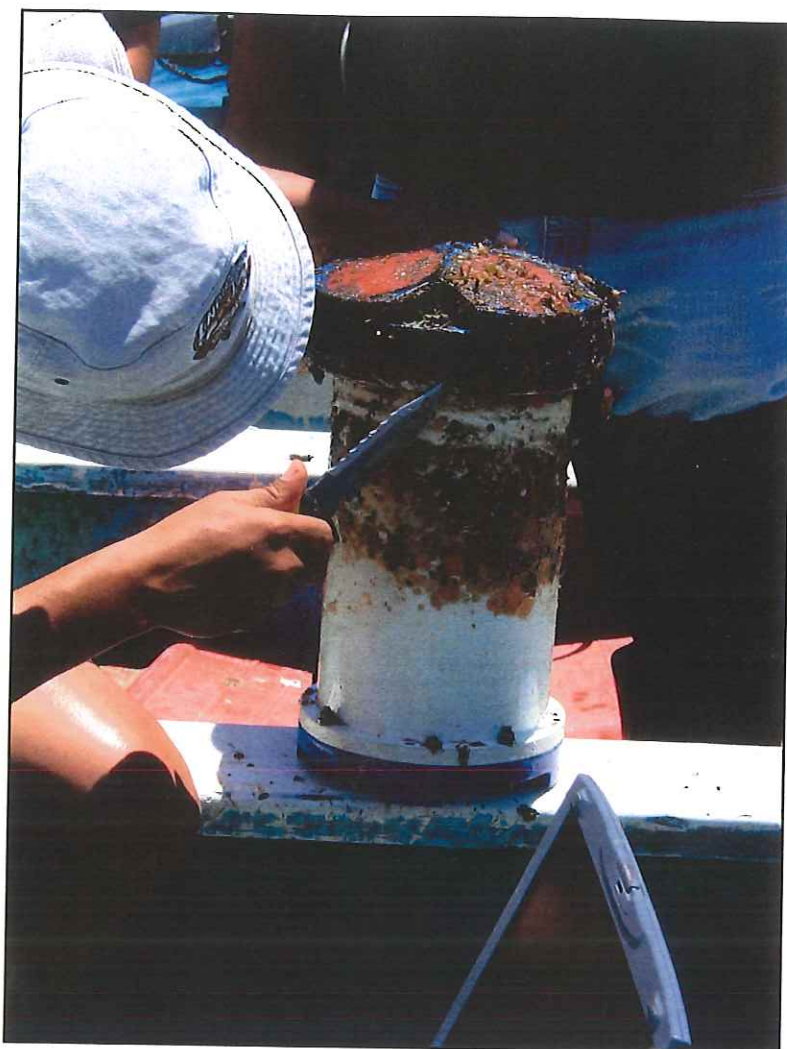


Figura A1. Aspecto del sensor de presión al ser recuperado en la superficie; se limpia de todo material orgánico que se le incrusta durante los dos o tres meses de medición, y en el transcurso de recuperación de los datos se le cambian las baterías y la bolsa de naftalina por otras nuevas,

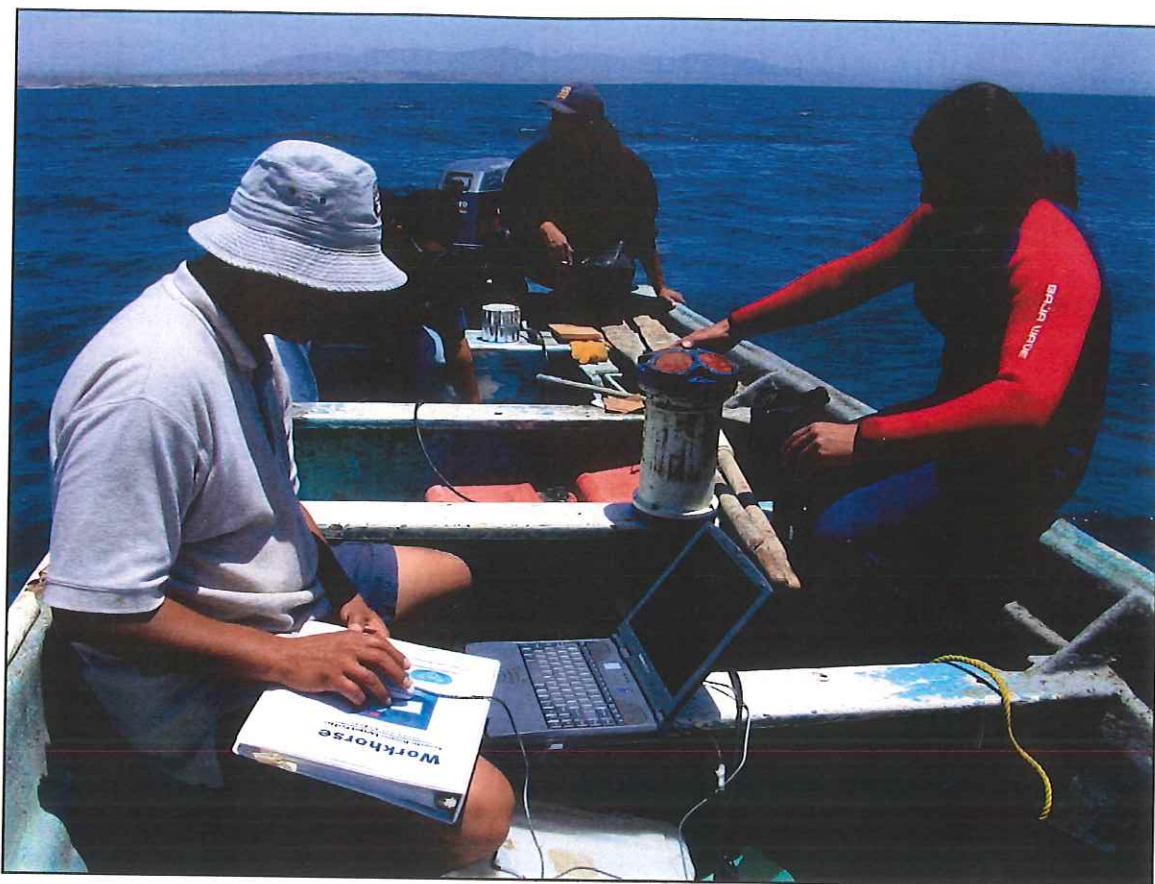


Figura A2. Muestra de la forma en que son recuperados los datos con ayuda de una computadora personal; en la imagen el buzo se encarga de abrir el instrumento para sacar los datos que se encuentran registrados en la memoria del aparato, que posteriormente, dicha memoria se inserta en la computadora personal para poder ser recuperados.

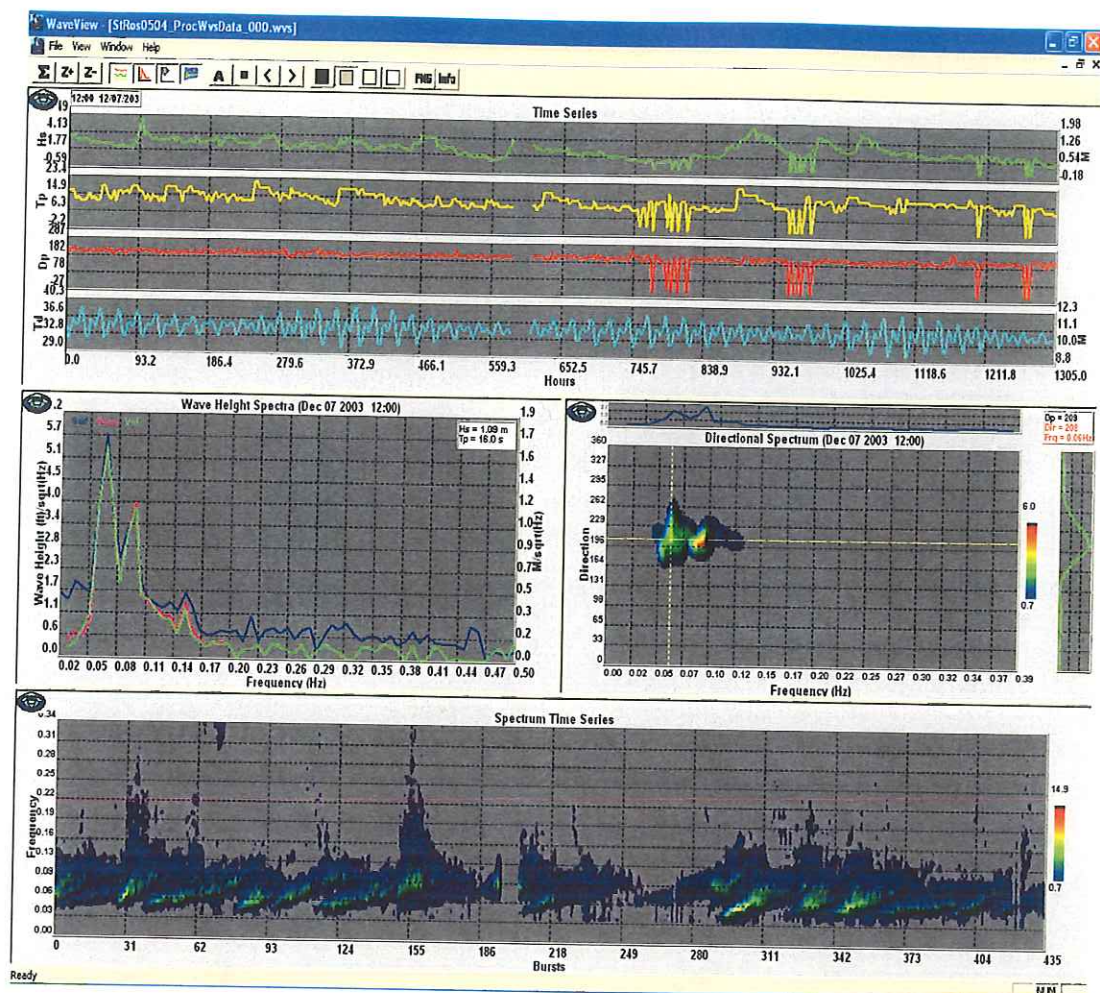


Figura A3. Ejemplo de cómo se visualizan los datos cuando se procesan en el programa WaveView.