



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
VALPARAÍSO

*"ESTUDIO DE METODOLOGÍAS DE
ESTIMACIÓN DE OLEAJE LOCAL. APLICACIÓN
A SECTORES DE LA ZONA SUR DE CHILE".*

IVÁN ANTONIO ROJAS VÁSQUEZ

2017

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
VALPARAÍSO**

"ESTUDIO DE METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE OLEAJE LOCAL. APLICACIÓN A SECTORES DE LA ZONA SUR DE CHILE".

IVÁN ANTONIO ROJAS VÁSQUEZ

COMISIÓN REVISORA	CALIFICACIONES	
	Nota	Firma
PROFESOR GUÍA Sr. Matías Quezada L.	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE Sra. Catalina Aguirre G.	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE Sr. Mauricio Molina P.	_____	_____

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

VALPARAÍSO, CHILE
2017

DECLARACIÓN

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

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

La información de Cartas Náuticas SHOA utilizada en esta memoria ha sido facilitada por el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC), mientras las bases de datos de registros en terreno fueron cedidos por las direcciones regionales (X, XI y XII regiones) de la Dirección de Obras Portuarias (DOP), en todos los casos con el compromiso de su utilización en este proyecto de título exclusivamente. El uso en actividades de carácter comercial por parte de terceros de la información aquí contenida, será de su exclusiva responsabilidad.

Matías Fernando Quezada Labra
Profesor Guía

Iván Antonio Rojas Vásquez
Alumno Memorista

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1-1
2. OBJETIVOS	2-1
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3-1
3.1 OLEAJE	3-1
3.1.1 FUNDAMENTOS	3-1
3.1.2 OLEAJE REGULAR	3-1
3.1.3 OLEAJE IRREGULAR	3-3
3.2 ESTIMACIÓN DE OLEAJE	3-10
3.2.1 GENERACIÓN DEL OLEAJE	3-10
3.2.2 MODELOS EMPÍRICOS.....	3-10
3.2.3 MODELOS DE BASE FÍSICA.....	3-12
3.3 VIENTOS.....	3-14
3.3.1 INTRODUCCIÓN.....	3-14
3.4 REGISTROS.....	3-16
3.4.1 VIENTO.....	3-16
3.4.2 OLEAJE.....	3-19
3.5 ESTIMACIÓN DE OLEAJE SEGÚN ROM 04-95	3-22
3.5.1 LONGITUD DEL FETCH.....	3-22
3.5.2 PREVISIÓN DEL OLEAJE DE VIENTO EN AGUAS PROFUNDAS.....	3-23
3.6 ESTIMACIÓN DE OLEAJE SEGÚN ACES	3-24
3.6.1 CONSIDERACIONES DEL FETCH	3-25
3.6.2 CRECIMIENTO EN AGUAS PROFUNDAS.....	3-27
3.7 MODELO SWAN	3-28
3.7.1 ECUACIÓN DE BALANCE ESPECTRAL DE ACCIÓN.....	3-28
3.7.2 FUENTES Y SUMIDEROS	3-29
3.7.3 LIMITADORES PARA LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN EN SWAN.....	3-31
3.8 FENÓMENOS EXCLUÍDOS DE LOS ANÁLISIS	3-32
3.9 VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES.....	3-32
4. CARACTERIZACIÓN DE LOS LUGARES DE ESTUDIO.....	4-1
4.1 PUNTA CORONEL.....	4-2
4.1.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS	4-3
4.1.2 DATOS	4-3
4.2 SANTO DOMINGO.....	4-9
4.2.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS	4-10
4.2.2 DATOS	4-11
4.3 MELIMOYU	4-15
4.3.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS	4-16
4.3.2 DATOS	4-16
4.4 BAHÍA CATALINA.....	4-21
4.4.1 INFORMACIÓN REGISTROS.....	4-22
4.4.2 DATOS	4-22
4.5 PUERTO WILLIAMS	4-31
4.5.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS	4-32
4.5.2 DATOS	4-32

5. METODOLOGÍA	5-1
5.1 ESTIMACIÓN ESTACIONARIA	5-1
5.1.1 ROM	5-1
5.1.2 ACES	5-6
5.1.3 SWAN MODO ESTACIONARIO	5-11
5.1.4 CONDICIONES DE VIENTO	5-16
5.2 SWAN MODO NO ESTACIONARIO.....	5-18
5.2.1 ARCHIVOS ENTRADA SWAN MODO NO ESTACIONARIO	5-18
5.2.2 DIFERENCIAS CON EL CÁLCULO ESTACIONARIO	5-19
5.3 VALIDACIÓN	5-20
6. RESULTADOS.....	6-1
6.1 PUNTA CORONEL.....	6-1
6.1.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO.....	6-1
6.1.2 VALIDACIÓN	6-4
6.2 SANTO DOMINGO.....	6-4
6.2.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO.....	6-4
6.2.2 VALIDACIÓN	6-7
6.3 MELIMOYU	6-9
6.3.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO.....	6-9
6.3.2 ANÁLISIS NO ESTACIONARIO.....	6-11
6.3.3 VALIDACIÓN	6-16
6.4 BAHÍA CATALINA.....	6-16
6.4.1 INVIERNO	6-16
6.4.2 VERANO.....	6-31
6.5 PUERTO WILLIAMS	6-41
6.5.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO.....	6-41
6.5.2 ANÁLISIS NO ESTACIONARIO.....	6-44
6.5.3 VALIDACIÓN	6-48
7. DISCUSIÓN	7-1
7.1 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA.....	7-1
7.2 PROPAGACIÓN EN AGUAS SOMERAS	7-2
7.3 CONDICIONES DE VIENTO.....	7-2
7.4 REGISTRO ADCP	7-4
7.5 INFLUENCIA DE OLEAJE EXTERNO.....	7-4
7.6 INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES.....	7-6
7.7 DIFERENCIAS ENTRE ESTIMACIONES PARAMÉTRICAS Y SWAN	7-6
7.8 VALIDACIÓN	7-6
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	8-1
9. ANEXOS.....	9-1

Listado de Figuras

Figura 1: Clasificación de las olas.....	3-1
Figura 2: Parámetros característicos de una ola.	3-2
Figura 3: Parámetros característicos de una señal de desnivelación del nivel del mar.	3-4
Figura 4: Distribución de Rayleigh.	3-6
Figura 5: Representación espectro de frecuencias.	3-8
Figura 6: Representación espectro direccional.....	3-9
Figura 7: Perfil de viento en la capa límite.	3-14
Figura 8: Geometría de la toma de datos de los equipos ADCP.....	3-21
Figura 9: Procedimiento para el cálculo de la longitud del fetch en zonas interiores irregulares.....	3-23
Figura 10: Esquema de caracterización del fetch y viento generador.	3-26
Figura 11: Definición de forma de ingresar parámetros del fetch.	3-26
Figura 12: Imagen satelital de la ubicación de los lugares de estudio.	4-1
Figura 13: Imagen satelital zona general. Punta Coronel.....	4-2
Figura 14: Imagen satelital zona particular. Punta Coronel.....	4-3
Figura 15: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Punta Coronel.....	4-4
Figura 16: Imagen satelital zona general. Santo Domingo.....	4-9
Figura 17: Imagen satelital zona particular. Santo Domingo.....	4-10
Figura 18: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Santo Domingo.....	4-11
Figura 19: Imagen satelital zona general. Melimoyu.	4-15
Figura 20: Imagen satelital zona particular. Melimoyu.....	4-15
Figura 21: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Melimoyu.....	4-17
Figura 22: Imagen satelital zona general. Bahía Catalina.	4-21
Figura 23: Imagen satelital zona particular. Bahía Catalina.	4-21
Figura 24: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Bahía Catalina.	4-23
Figura 25: Imagen satelital zona general. Puerto Williams.....	4-31
Figura 26: imagen satelital zona particular. Puerto Williams.....	4-32
Figura 27: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Puerto Williams.....	4-33
Figura 28: Definición del fetch según ROM. Punta Coronel.....	5-2
Figura 29: Definición del fetch según ROM. Santo Domingo.....	5-3
Figura 30: Definición del fetch según ROM. Melimoyu.....	5-4
Figura 31: Definición del fetch según ROM. Bahía Catalina.....	5-5
Figura 32: Definición del fetch según ROM. Puerto Williams.....	5-6
Figura 33: Definición del fetch según ACES. Punta Coronel (1/2).	5-7
Figura 34: Definición del fetch según ACES. Punta Coronel (2/2).	5-8
Figura 35: Definición del fetch según ACES. Santo Domingo.....	5-8
Figura 36: Definición del fetch según ACES. Melimoyu.....	5-9
Figura 37: Definición del fetch según ACES. Bahía Catalina.....	5-10
Figura 38: Definición del fetch según ACES. Puerto Williams.....	5-11
Figura 39: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Punta Coronel (1/2).	5-12
Figura 40: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Punta Coronel (2/2).	5-13
Figura 41: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Santo Domingo.....	5-13
Figura 42: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Melimoyu.....	5-14
Figura 43: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Bahía Catalina (1/2).	5-15
Figura 44: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Bahía Catalina (2/2).	5-15
Figura 45: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Puerto Williams (1/2).	5-16
Figura 46: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Puerto Williams (2/2).	5-16
Figura 47: Ejemplos de falta de información batimétrica (Santo Domingo y Melimoyu).	7-1

Listado de Tablas

Tabla 1: Valores aproximados de los parámetros de rugosidad en función del tipo genérico de superficie.	3-16
Tabla 2: Factor para corrección de las intensidades de viento por efectos orográficos (1/2).	3-17
Tabla 3: Factor para corrección de las intensidades de viento por efectos orográficos (2/2).	3-18
Tabla 4: Coordenadas de ubicación de los lugares de estudio.	4-1
Tabla 5: Información equipos de registro de viento y oleaje. Punta Coronel.	4-3
Tabla 6: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Punta Coronel.	4-4
Tabla 7: Información equipos de registro de viento y oleaje. Santo Domingo.	4-10
Tabla 8: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Santo Domingo.	4-11
Tabla 9: Información equipos de registro de viento y oleaje. Melimoyu.	4-16
Tabla 10: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Melimoyu.	4-17
Tabla 11: Información equipos de registro de viento y oleaje. Bahía Catalina.	4-22
Tabla 12: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Bahía Catalina.	4-22
Tabla 13: Información equipos de registro de viento y oleaje. Puerto Williams.	4-32
Tabla 14: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Puerto Williams.	4-33
Tabla 15: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Punta Coronel.	5-2
Tabla 16: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Santo Domingo.	5-3
Tabla 17: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Melimoyu.	5-4
Tabla 18: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Bahía Catalina.	5-4
Tabla 19: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Puerto Williams.	5-6
Tabla 20: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Punta Coronel.	5-8
Tabla 21: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Santo Domingo.	5-9
Tabla 22: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Melimoyu.	5-9
Tabla 23: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Bahía Catalina.	5-10
Tabla 24: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Puerto Williams.	5-11
Tabla 25: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Punta Coronel.	5-17
Tabla 26: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Santo Domingo.	5-17
Tabla 27: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Melimoyu.	5-17
Tabla 28: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Bahía Catalina.	5-17
Tabla 29: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Puerto Williams.	5-17
Tabla 30: Resumen eventos de viento seleccionados, Melimoyu.	6-11
Tabla 31: Resumen eventos de viento seleccionados, Bahía Catalina, Invierno.	6-19
Tabla 32: Resumen eventos de viento seleccionados, Bahía Catalina, Verano.	6-34
Tabla 33: Resumen eventos de viento seleccionados, Puerto Williams.	6-44
Tabla 34: Límites de aguas intermedias y someras según periodo de la ola.	7-2
Tabla 35: Ejemplo de limitaciones de los periodos medibles con ADCP.	7-4

Listado de Gráficos

Gráfico 1: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Punta Coronel.....	4-5
Gráfico 2: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Punta Coronel.....	4-6
Gráfico 3: Series de tiempo de <i>Hs</i> (arriba), <i>Tp</i> (medio), y <i>Dirp</i> (abajo) del oleaje registrado. Punta Coronel.	4-7
Gráfico 4: Rosas de oleaje registrado con intervalos de <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo). Punta Coronel.	4-8
Gráfico 5: Comparación de series de tiempo de <i>Hs</i> y nivel del mar registrados. Punta Coronel.	4-9
Gráfico 6: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Santo Domingo.....	4-12
Gráfico 7: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Santo Domingo.	4-12
Gráfico 8: Series de tiempo de <i>Hs</i> (arriba), <i>Tp</i> (medio), y <i>Dirp</i> (abajo) del oleaje registrado. Santo Domingo.....	4-13
Gráfico 9: Rosas de oleaje registrado con intervalos de <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo). Santo Domingo.....	4-14
Gráfico 10: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Melimoyu.	4-18
Gráfico 11: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Melimoyu.	4-18
Gráfico 12: Series de tiempo de <i>Hs</i> (arriba), <i>Tp</i> (medio), y <i>Dirp</i> (abajo) del oleaje registrado. Melimoyu.	4-19
Gráfico 13: Rosas de oleaje registrado con intervalos de <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo). Melimoyu.	4-20
Gráfico 14: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Bahía Catalina, Invierno.	4-24
Gráfico 15: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Bahía Catalina, Invierno.....	4-24
Gráfico 16: Series de tiempo de <i>Hs</i> (arriba), <i>Tp</i> (medio), y <i>Dirp</i> (abajo) del oleaje estimado de las distintas mediciones realizadas por el ADCP. Bahía Catalina, Invierno.....	4-25
Gráfico 17: Series de tiempo de <i>Hs</i> (arriba), <i>Tp</i> (medio), y <i>Dirp</i> (abajo) del oleaje registrado. Bahía Catalina, Invierno.	4-26
Gráfico 18: Rosas de oleaje registrado con intervalos de <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo). Bahía Catalina, Invierno.	4-27
Gráfico 19: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Bahía Catalina, Verano.....	4-28
Gráfico 20: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Bahía Catalina, Verano.	4-29
Gráfico 22: Series de tiempo de <i>Hs</i> (arriba), <i>Tp</i> (medio), y <i>Dirp</i> (abajo) del oleaje registrado. Bahía Catalina, Verano.....	4-30
Gráfico 23: Rosas de oleaje registrado con intervalos de <i>Hs</i> . Bahía Catalina, Verano.	4-30
Gráfico 24: Rosas de oleaje registrado con intervalos de <i>Tp</i> . Bahía Catalina, Verano.	4-31
Gráfico 25: Series de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Puerto Williams.	4-34
Gráfico 26: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Puerto Williams.	4-34
Gráfico 27: Series de tiempo de <i>Hs</i> (arriba), <i>Tp</i> (medio), y <i>Dirp</i> (abajo) del oleaje registrado. Puerto Williams.	4-35
Gráfico 28: Rosas de oleaje registrado con intervalos de <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo). Puerto Williams.	4-36
Gráfico 29: Distribuciones de <i>Hs</i> , <i>Tp</i> y <i>Dirp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Punta Coronel.	6-2
Gráfico 30: No excedencia de <i>Hs</i> y <i>Tp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Punta Coronel.	6-3
Gráfico 31: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo), en comparación con los registros. Punta Coronel.	6-4
Gráfico 32: Distribuciones de <i>Hs</i> , <i>Tp</i> y <i>Dirp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Santo Domingo.....	6-5
Gráfico 33: No excedencia de <i>Hs</i> y <i>Tp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Santo Domingo.....	6-6
Gráfico 34: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo), en comparación con los registros. Santo Domingo.	6-7
Gráfico 35: Estimaciones método ROM para intensidades de viento amplificadas. Santo Domingo.	6-8
Gráfico 36: Distribuciones de <i>Hs</i> para intensidades de viento amplificadas. Santo Domingo.	6-8
Gráfico 37: Distribuciones de <i>Hs</i> y <i>Tp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Melimoyu.	6-9
Gráfico 38: Distribuciones de <i>Dirp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Melimoyu.....	6-10
Gráfico 39: No excedencia de <i>Hs</i> y <i>Tp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Melimoyu.	6-10
Gráfico 40: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo), en comparación con los registros. Melimoyu.	6-11
Gráfico 41: Condiciones y resultados evento de viento (A). Melimoyu.....	6-12
Gráfico 42: Condiciones y resultados evento de viento (B). Melimoyu.....	6-13

Gráfico 43: Condiciones y resultados evento de viento (C). Melimoyu.	6-14
Gráfico 44: Condiciones y resultados evento de viento (D). Melimoyu.	6-15
Gráfico 45: Distribuciones de <i>Hs</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.	6-16
Gráfico 46: Distribuciones de <i>Tp</i> y <i>Dirp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.	6-17
Gráfico 47: No excedencia de <i>Hs</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.	6-17
Gráfico 48: No excedencia de <i>Tp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.	6-18
Gráfico 49: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo), en comparación con los registros. Bahía Catalina, Invierno.	6-18
Gráfico 50: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, <i>Dirp</i> , en comparación con los registros. Bahía Catalina, Invierno.	6-19
Gráfico 51: Condiciones y resultados evento de viento (A). Bahía Catalina, Invierno.	6-20
Gráfico 52: Condiciones y resultados evento de viento (B). Bahía Catalina, Invierno.	6-21
Gráfico 53: Condiciones y resultados evento de viento (C). Bahía Catalina, Invierno.	6-23
Gráfico 54: Condiciones y resultados evento de viento (D). Bahía Catalina, Invierno.	6-24
Gráfico 55: Condiciones y resultados evento de viento (E). Bahía Catalina, Invierno.	6-25
Gráfico 56: Condiciones y resultados evento de viento (F). Bahía Catalina, Invierno.	6-26
Gráfico 57: Condiciones y resultados evento de viento (G). Bahía Catalina, Invierno.	6-27
Gráfico 58: Condiciones y resultados evento de viento (H). Bahía Catalina, Invierno.	6-28
Gráfico 59: Series de tiempo resultados estacionarios y no estacionarios mediante SWAN. Bahía Catalina, Invierno.	6-29
Gráfico 60: Histogramas resultados estacionarios y no estacionarios mediante SWAN. Bahía Catalina, Invierno.	6-30
Gráfico 61: Distribuciones de <i>Hs</i> , <i>Tp</i> y <i>Dirp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Verano.	6-32
Gráfico 62: No excedencia de <i>Hs</i> y <i>Tp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Verano.	6-33
Gráfico 63: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo), en comparación con los registros. Bahía Catalina, Verano.	6-34
Gráfico 64: Condiciones y resultados evento de viento (I). Bahía Catalina, Verano.	6-35
Gráfico 65: Condiciones y resultados evento de viento (J). Bahía Catalina, Verano.	6-36
Gráfico 66: Condiciones y resultados evento de viento (K). Bahía Catalina, Verano.	6-37
Gráfico 67: Condiciones y resultados evento de viento (L). Bahía Catalina, Verano.	6-38
Gráfico 68: Condiciones y resultados evento de viento (M). Bahía Catalina, Verano.	6-39
Gráfico 69: Distribuciones de <i>Hs</i> y <i>Tp</i> de datos registrados y estimados no estacionariamente. Bahía Catalina, Verano.	6-40
Gráfico 70: Series de tiempo de registros de oleaje y de estimaciones mediante SWAN en modo no estacionario (incluye condiciones de viento dentro del fetch). Bahía Catalina, Verano.	6-41
Gráfico 71: Distribuciones de <i>Hs</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Puerto Williams.	6-41
Gráfico 72: Distribuciones de <i>Tp</i> y <i>Dirp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Puerto Williams.	6-42
Gráfico 73: No excedencia de <i>Hs</i> y <i>Tp</i> de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Puerto Williams.	6-43
Gráfico 74: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, <i>Hs</i> (arriba) y <i>Tp</i> (abajo), en comparación con los registros. Puerto Williams.	6-44
Gráfico 75: Condiciones y resultados evento de viento (A). Puerto Williams.	6-45
Gráfico 76: Condiciones y resultados evento de viento (B). Puerto Williams.	6-46
Gráfico 77: Condiciones y resultados evento de viento (C). Puerto Williams.	6-47
Gráfico 78: Condiciones y resultados evento de viento (D). Puerto Williams.	6-48

REFERENCIAS

- Ref. 1:** Booij N., Ris R.C. and Holthuijsen L. H.. "A Third-Generation Wave Model for Coastal Region. 1. Model Description and Validation". Delft University of Technology, Países Bajos, 1998.
- Ref. 2:** Boyd, J. D.. "Evaluation of ADCP Wave Measurements". Tesis de Maestría. Naval Postgraduate School, E.U.A., 2006.
- Ref. 3:** Danish Hydraulic Institute. "MIKE ZERO, Mesh Generator, Step-by-Step Training Guide". Dinamarca, 2012.
- Ref. 4:** Dietrich J. C. et al.. "Limiters for Spectral Propagation Velocities in SWAN". Ocean Modell, 2012.
- Ref. 5:** Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. "*Documentos de Referencia, Volumen I. Dinámicas*". Universidad de Cantabria, España, 2000.
- Ref. 6:** Gusdal Y. and Carrasco A.. "Validation of the Operational Wave Models – Report 2011". Norwegian Meteorological Institute, Noruega, 2012.
- Ref. 7:** Integrated Ocean Observing System. "Manual for Real-Time Quality Control of In-Situ Surface Wave Data: A Guide to Quality Control and Quality Assurance of In-Situ Surface Wave Observations". E.U.A., 2015.
- Ref. 8:** Integrated Ocean Observing System. "Manual for Real-Time Quality Control of Wind Data: A Guide to Quality Control and Quality Assurance of Coastal and Oceanic Wind Observation". E.U.A., 2014.
- Ref. 9:** Leenknecht D., Szuwalski A., and Sherlock A.. "Automated Coastal Engineering System: Technical Reference". Capítulos 1-1 y 1-3. Coastal Engineering Research Center, E. U. A., 1992.
- Ref. 10:** Ministerio de Obras Públicas. "Anexo II", Recomendaciones de Obras Marítimas Españolas; ROM 04-95, "Acciones Climáticas II: Viento". España, 1995.
- Ref. 11:** Montoya R. D. y Osorio A.. "Los Modelos de Generación de Oleaje de Viento: Características, Evolución y Futuras Aplicaciones en Colombia". Avances en Recursos Hidráulicos, N° 15, pp. 47-74. Colombia, 2007.
- Ref. 12:** Ministerio de Obras Públicas. "Recomendaciones de Obras Marítimas Españolas; ROM 04-95, Acciones Climáticas II: Viento". España, 1995.
- Ref. 13:** NORTEK A.S. "Comprehensive Manual". Noruega. 2013.

- Ref. 14:** Ris R.C., Booij N. and Holthuijsen L. H. "A Third-Generation Wave Model for Coastal Region. 2. Verification". Delft University of Technology, Países Bajos, 1998.
- Ref. 15:** Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Publicación 3201, "Instrucciones Oceanográficas N°1: Especificaciones Técnicas para Mediciones y Análisis Oceanográficos". Valparaíso, Chile, 2012.
- Ref. 16:** Stewart R., "Introduction to Physical Oceanography". E.U.A., 2008.
- Ref. 17:** Teledyne RD Instruments. "Waves Primer: Wave Measurements and the RDI ADCP Waves Array Technique".
- Ref. 18:** The SWAN Team. "SWAN Scientific and Technical Documentation". Delft University of Technology, Países Bajos, 2009.
- Ref. 19:** The SWAN Team. "SWAN User Manual". Delft University of Technology, Países Bajos, 2009.
- Ref. 20:** U.S. Army Corps of Engineers. "Coastal Engineering Manual". Volumen II, Capítulo 1: "Wave Water Mechanics ". E.U.A., 2003.
- Ref. 21:** U.S: Army Corps of Engineers. "Coastal Engineering Manual". Volumen II, Capítulo 2: "Meteorology and Wave Climate". E.U.A., 2003.
- Ref. 22:** World Meteorological Organization. "Guide to Wave Analysis and Forecasting". Suiza, 1998.

RESUMEN

En el presente documento se aborda el tema de la estimación de oleaje de generación local, mediante la aplicación de distintas herramientas de cálculo (ROM, ACES y SWAN) en casos reales de cinco lugares de la zona sur del país. Para ello, se partió por la revisión de los datos de batimetría, viento y oleaje conseguidos para cada sector, implementando luego cálculos estacionarios por los tres medios nombrados, y no estacionarios con SWAN donde resultó necesario. Con los resultados obtenidos se buscó aplicar distintos procedimientos que permitieran llegar a concluir sobre la validación de las estimaciones realizadas, para luego entregar recomendaciones sobre la forma de abordar el tipo de estudios en cuestión.

En cada uno de los lugares analizados se encontraron problemas en los registros que no habían sido advertidos en el uso original dado a los datos. Estas anomalías implicaron que para la mayoría de los intervalos de tiempo analizados no se obtuviera la información adecuada para una correcta comparación con las estimaciones. No obstante lo anterior, se encontraron lugares e intervalos de tiempo donde sí pudo obtenerse corroboración del desempeño de las distintas metodologías, y otros donde pudo encontrarse explicaciones a los comportamientos anómalos identificados.

En base a lo anterior, se plantearon algunas alternativas para primero, evitar el levantamiento de datos con los problemas descritos, y luego, para aplicar procedimientos documentados para identificar y tratar de corregir algunos de ellos en la etapa de procesamiento. Por otra parte se entregan lineamientos para la aplicación de las herramientas utilizadas, según las características de cada lugar, y también se dan recomendaciones sobre los procedimientos que llevan a la validación correcta de las estimaciones, y por tanto del método de cálculo a utilizar en posteriores pronósticos.

1. INTRODUCCIÓN

Al realizar un proyecto de ingeniería en una zona costera es necesario estimar el clima de oleaje representativo de la zona, y obtener condiciones de diseño y operación para los parámetros que tienen incidencia en las solicitaciones generadas sobre las distintas partes de una estructura. En zonas costeras protegidas del oleaje oceánico, la generación de oleaje responde a la acción del viento local sobre un cuerpo de agua de dimensiones reducidas (en comparación con el océano).

En la actualidad, existen varios métodos que permiten abordar esta tarea, contando cada uno de ellos con distintos niveles de complejidad y exactitud. Los métodos más usados están basados en los llamados modelos paramétricos de estimación de oleaje, que consisten en formulaciones que entregan resultados para los distintos parámetros de oleaje en función de la magnitud y dirección del viento, y de la geometría del cuerpo de agua sobre el que este actúa. Dichas formulaciones se obtienen mediante el ajuste de curvas a bases de datos de viento y oleaje medidos en zonas protegidas, y en las mismas publicaciones en que se presentan se hace notar que este tipo de método es una simplificación del proceso de generación de oleaje local, y que como tal debe ser usado para realizar primeras aproximaciones al clima de oleaje del sector, especialmente para obras donde el oleaje sea relevante sobre la operatividad y seguridad del proyecto, pudiendo usarse como única herramienta y tomando todas las consideraciones posibles, solo donde la reducida magnitud de las obras, o el bajo costo del proyecto no permitan un análisis más acabado.

Para los casos en donde no es adecuado utilizar métodos paramétricos, se recomienda la aplicación de una metodología que incluya la modelación de las condiciones de oleaje mediante un Modelo Numérico Avanzado de Tercera Generación. Este tipo de modelos, resuelven ecuaciones diferenciales que representan la física de los fenómenos involucrados en la generación, transformación y disipación del oleaje. La metodología o forma de aplicación de dichos modelos avanzados no se presenta en normativas o recomendaciones oficiales.

En base a lo expuesto anteriormente, se plantea realizar un Estudio de Metodologías de Estimación de Clima de Oleaje Local, considerando para ello lo concerniente a la teoría y aplicación de dos de los métodos paramétricos más usados en el medio nacional; el expuesto en la *ROM 04-95*, y el implementado en el software *ACES*, y además, desarrollando una metodología de estimación mediante el Modelo de Tercera Generación *SWAN*.

El fin de esta investigación es evaluar el nivel de desempeño que se puede obtener de las herramientas citadas, para cinco lugares de la zona sur del país, buscando llegar a definir las características de los datos de entrada, la forma correcta de aplicación, y el nivel de exactitud de los resultados obtenidos. Se plantea como eje central del estudio lo concerniente a la validación de las estimaciones en base a distintos procedimientos de comparación con la información de oleaje levantada en terreno, ya que es dicho factor el que determina la confiabilidad de los pronósticos hechos mediante cada uno de los métodos.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es evaluar qué nivel de desempeño se puede obtener usando distintas metodologías en estudios de oleaje de generación local, en casos reales de la zona sur del país que presentan distintas características topo-batimétricas y condiciones naturales.

Objetivos específicos para alcanzar el fin planteado son:

- Identificar lugares que cuenten con la información necesaria para la implementación de los cálculos.
- Analizar la información de vientos, oleaje y batimetría recopilada para cada lugar.
- Estimar las condiciones de oleaje en cada sector usando los métodos seleccionados.
- Validar los resultados obtenidos.
- Entregar propuestas de procedimientos a aplicar en estudios de oleaje local.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 OLEAJE

3.1.1 FUNDAMENTOS

El océano es un medio por el que constantemente se está propagando energía en forma de ondas, es decir, oscilaciones de las partículas de agua de las que este está formado. Dichas ondas se clasifican en distintos tipos, según las diferentes fuerzas que las generan y las que controlan su propagación (Figura 1). Para los problemas de ingeniería portuaria y costera son especialmente importantes las ondas generadas por el viento cuyos periodos se ubican entre 3 y 30 segundos, debido a que las fuerzas que ellas generan sobre las estructuras son esenciales para el diseño de los proyectos. A este tipo de ondas se les llama oleaje generado por viento (o simplemente oleaje u olas como se usará en este documento), y están controladas por la gravedad.

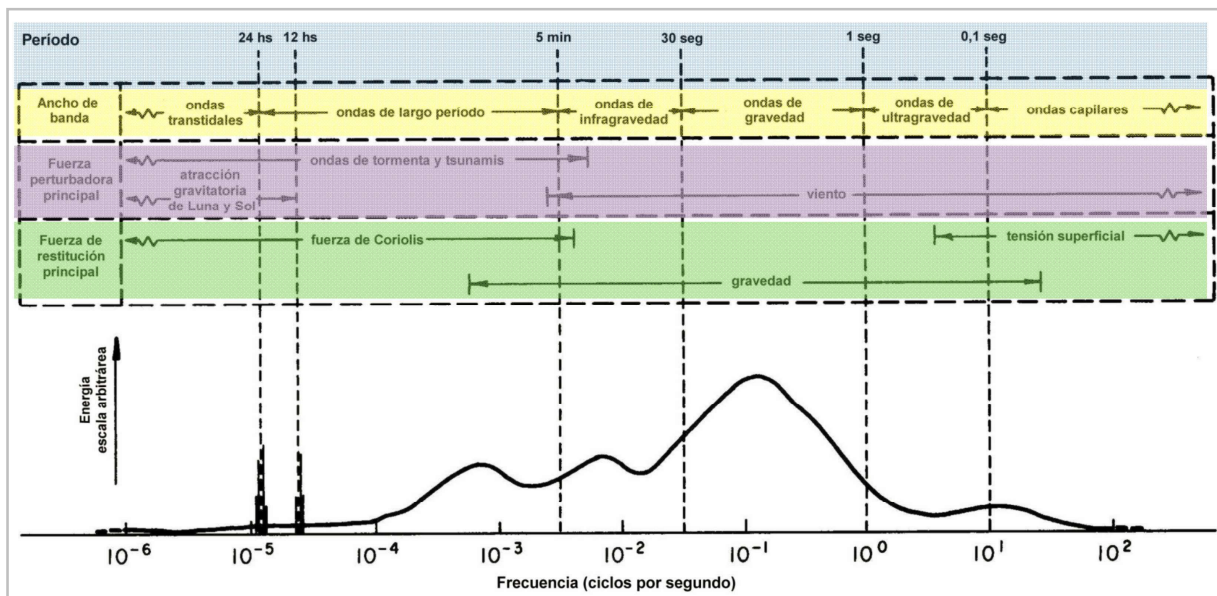


Figura 1: Clasificación de las olas.

Fuente: Ref. 5, pág. 1.

La parte teórica del estudio del oleaje está dividida en dos grandes secciones, estas son el *Oleaje Regular*; que trata sobre las representaciones matemáticas que se utilizan para obtener parámetros cinemáticos y dinámicos en base a condiciones de oleaje esperadas, y el *Oleaje Irregular*; que provee dichas condiciones en base a análisis estadísticos y probabilísticos que permiten cuantificar la severidad de las condiciones medidas y pronosticar eventos extremos.

3.1.2 OLEAJE REGULAR

Las teorías de oleaje son aproximaciones matemáticas elaboradas para describir el fenómeno del oleaje, y pueden determinar algunas de sus características de manera

acertada donde se cumplan ciertos supuestos. De no darse las condiciones asociadas a una teoría, las estimaciones obtenidas mediante esta pueden alejarse considerablemente de la realidad, por lo que es preciso discriminar correctamente que teoría es adecuada para cada caso.

3.1.2.1 Propiedades básicas del oleaje

La definición de las propiedades de una ola parte de una situación base con el agua en reposo. Al no haber movimiento la superficie toma un nivel constante en el tiempo y espacio con profundidad d , al que se llama “nivel de agua en reposo” (en inglés “Still Water Level”, SWL).

Al propagarse una onda por el agua se generan oscilaciones periódicas de la superficie libre, generando un perfil de desnivelación (η) que presenta una serie de parámetros geométricos característicos (Figura 2).

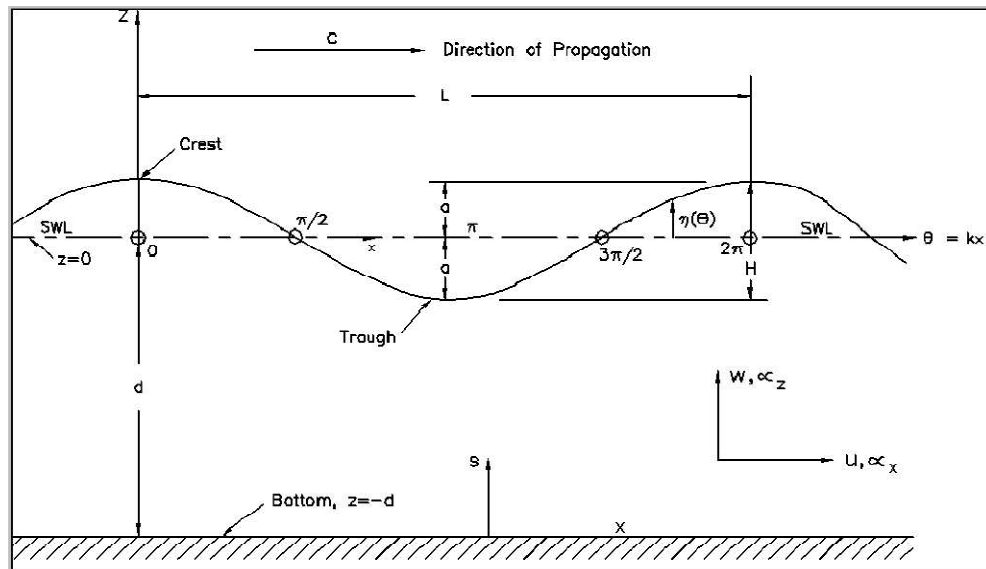


Figura 2: Parámetros característicos de una ola.

Fuente: Ref. 20.

Donde:

Longitud (L): Distancia horizontal entre dos puntos en fase sucesivos.

Periodo (T): Intervalo de tiempo que demora un punto de la superficie en pasar por la misma posición moviéndose en la misma dirección.

Cresta: Punto en que se da la mayor desnivelación sobre el SWL.

Valle: Punto en que se da la mayor desnivelación bajo el SWL.

Amplitud (a): Distancia vertical entre el SWL y la cresta o el valle (A_c o A_v). Si $A_c = A_v$ ambos se denominan simplemente a .

Altura (H): Distancia vertical entre un valle y la cresta siguiente ($H = A_c + A_v$ o $H = 2a$).

Otros parámetros de la ola usados comúnmente incluyen la **frecuencia absoluta** $f = 1/T$, la **frecuencia angular** $\omega = 2\pi/T$, el **número de ola** $k = 2\pi/L$, la **celeridad** $C = L/T = \omega/k$ (velocidad a la que se propaga la onda), y la **fase de la ola** $\theta = kx - \omega t$.

También se definen; la *esbeltez* de la ola $\varepsilon = H / L$ que entrega la variación del movimiento vertical de la onda en una longitud de ola, la *altura relativa* de la ola $\delta = H / d$ que indica la importancia de la oscilación vertical de la onda respecto a la profundidad, y la *profundidad relativa* $\mu = d / L$ que muestra la penetración del movimiento de la onda con la profundidad, y que sirve además como medida de la dispersión de las ondas ya que indica si la celeridad está afectada por el periodo.

Según la profundidad relativa en la que se propague, una ola se puede clasificar en tres regímenes distintos en base su nivel de interacción con el fondo. Para algunos valores de este parámetro las ecuaciones de movimiento se pueden simplificar notablemente.

$$\begin{array}{ll} \frac{d}{L} > \frac{1}{2} & \text{aguas profundas} \\ \frac{1}{20} > \frac{d}{L} > \frac{1}{2} & \text{aguas intermedias} \\ \frac{d}{L} < \frac{1}{20} & \text{aguas someras} \end{array}$$

En función de los números adimensionales presentados, se obtiene un parámetro que compara la relación entre la no linealidad de la onda con la información relativa a la dispersión de la misma. Dicho parámetro (*Ursell*) sirve para definir el régimen al cual corresponden las ondas y ayuda a seleccionar la teoría de oleaje más adecuada para describir cada caso.

$$U_r = H \frac{L^2}{h^3} = \frac{\delta}{\mu^2}$$

Ecuación 1

3.1.3 OLEAJE IRREGULAR

Al reconocer la variabilidad fundamental de la superficie del océano, se hace necesario tratar sus características en términos estadísticos para obtener una descripción realista del oleaje. Así, el término oleaje irregular se usa para denominar a estados de mar naturales en los que las características del oleaje tienen variabilidad estadística, en contraste al oleaje monocromático (regular) donde las propiedades se asumen constantes.

Durante la generación de oleaje por viento, la superficie del mar se muestra muy confusa, con muchas olas de distintas alturas y periodos, donde no se puede identificar las ondas individuales. A este tipo de oleaje se le llama "Sea" o "Mar de Viento". El oleaje de periodos largos que ha viajado lejos de la zona de generación tiende a ser más uniforme en altura, periodo y dirección, y muestra crestas individuales de mayor extensión. A este segundo tipo de oleaje se le denomina "Swell" o "Mar de Fondo".

3.1.3.1 Análisis estadístico

El enfoque estadístico de estudio del oleaje está basado en el "Método Ola a Ola", el cual consiste en un análisis a una serie de tiempo de desnivelación medida en un solo punto. Las ondulaciones en el registro se definen como olas individuales y se rescatan los parámetros

de altura y periodo de cada una, para luego calcular los diversos estadísticos que describen las características del oleaje medido (Figura 3).

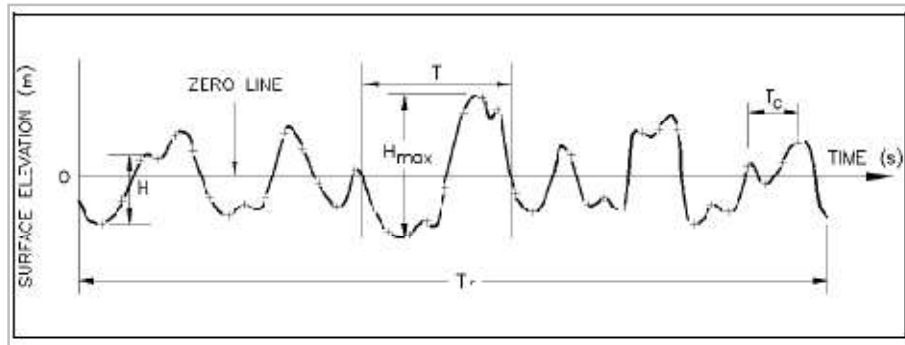


Figura 3: Parámetros característicos de una señal de desnivelación del nivel del mar.
 Fuente: Ref. 20.

La forma de separar la serie de tiempo en olas individuales es mediante el “Método de Cruces por Cero”, donde cada vez que la señal medida pasa por cero siguiendo un mismo sentido (se elige ascendente o descendente) comienza una nueva ola. Luego de la separación del registro, se recoge la altura de cada ola H_j como la diferencia de desnivelación entre la cresta más alta y el valle más bajo entre dos cruces por cero, y el periodo T_j como el tiempo entre dos cruces por cero.

Es necesario que el registro tenga una extensión de por lo menos varios cientos de olas para que los resultados sean confiables.

a) *Definición de Parámetros de Oleaje*

En base al conjunto de valores de altura y periodo obtenidos del registro, se pueden calcular una serie de parámetros indicadores de las características del oleaje, cada uno de ellos con utilidad para distintas aplicaciones de ingeniería. A continuación se muestran los más comunes:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j \quad \text{Ecuación 2}$$

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$H_{1/3}$: Promedio de las $N/3$ alturas mayores (*Altura Significativa H_s*).

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \quad \text{Ecuación 4}$$

$T_{1/3}$: Promedio de los $N/3$ periodos mayores.

Las alturas y periodos individuales dentro de un registro presentan distribuciones estadísticas que se aproximan a una distribución teórica. Esto permite resumir una determinada condición de oleaje con un solo valor de H y T , y luego obtener aproximaciones de los otros estadísticos útiles en base dicha distribución. Esto se basa en que la desnivelación puede ser tratada como un proceso aleatorio (con media igual a cero) gobernado por leyes de la Teoría de Probabilidades.

Para determinar las propiedades de la desnivelación se asume:

Estacionariedad: El fenómeno presenta estadísticos prácticamente invariables por un periodo de tiempo determinado.

Homogeneidad: El fenómeno presenta estadísticos prácticamente invariables en un área determinada.

Ergodicidad: Los estadísticos de una muestra aproximan a los del universo de datos.

Con estos tres supuestos se desarrolla una distribución de probabilidad para H y T .

Se definen:

Probabilidad de Excedencia:

$$P(x) = \text{prob}\{x > x_0\} \quad \text{Ecuación 5}$$

Densidad de Probabilidad:

$$p(x) = \frac{d(P(x))}{dx} \quad \text{Ecuación 6}$$

Tanto para el caso de las alturas como para los periodos se puede ocupar la *Distribución de Rayleigh* (Figura 4), donde;

$$p(x) = \frac{\pi x}{2\mu_x^2} e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{x}{\mu_x}\right)^2} \quad \text{para } x \geq 0 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$P(x) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{x}{\mu_x}\right)^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

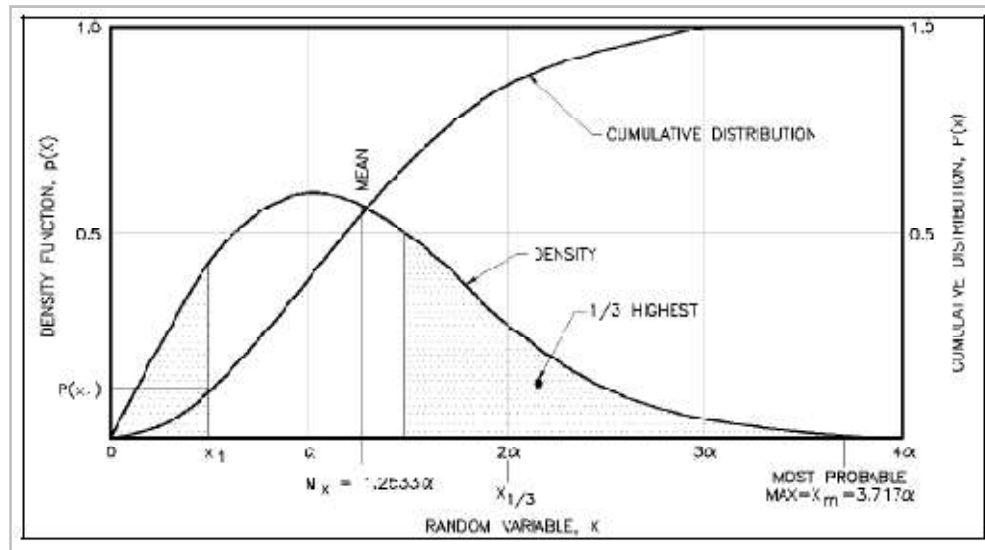


Figura 4: Distribución de Rayleigh.
 Fuente: Ref. 20.

Para las alturas se alcanzan las siguientes fórmulas

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-\left(\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$P(H) = 1 - e^{-\left(\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right)} \quad \text{Ecuación 10}$$

En base a esta distribución se pueden estimar varios parámetros:

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 1.416H_{rms} \\ H_{1/10} &= 1.27H_{1/3} = 1.8H_{rms} \\ H_{1/100} &= 1.67H_{1/3} = 2.36H_{rms} \\ H_{max} &= 1.86H_{1/3} \quad \text{para 1000 olas en el registro} \end{aligned}$$

Para los periodos se asume que T^2 sigue la Distribución de Rayleigh.

$$p(T) = 2.7 \frac{T^3}{\bar{T}} e^{-0.67\tau^4} \quad \text{con } \tau = \frac{T}{\bar{T}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Mientras

$$T_{max} \approx T_{1/3} \approx c\bar{T} \quad \text{con } c \text{ entre } 1.1 \text{ y } 1.3$$

3.1.3.2 *Análisis espectral*

Una señal de desnivelación de la superficie del mar se reconoce similar a una señal de ruido. Asumiendo que es un muestreo discreto de un fenómeno continuo se le puede aplicar una versión simplificada del *Análisis de Fourier* para obtener una representación espectral del oleaje. Este enfoque tiene la desventaja de que se pierde la información de las olas individuales.

Se asume la desnivelación como una suma de componentes de distintas periodicidades, y se busca describir la distribución de la varianza con respecto a la frecuencia de las señales. Por convención la distribución de la varianza se escribe como $E(f)$ o $S(f)$ asumiendo que la función es continua en el espacio de frecuencia. Si bien $E(f)$ es una medida de la varianza, se le llama espectro de energía porque asumiendo teoría lineal de oleaje, la energía del campo de oleaje puede ser estimada al multiplicar $E(f)$ por ρg .

Esencialmente, en el análisis espectral se realiza una transformación del dominio del tiempo al de las frecuencias, mediante la técnica de la *Transformada Rápida de Fourier (FFT)*.

a) *Espectro de frecuencias*

Para una medición puntual, el perfil de desnivelación puede ser escrito como una suma infinita de sinusoides de amplitud A_n , frecuencia ω_n y fase relativa ε_n .

$$\eta(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_n) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega_n t) + b_n \text{sen}(n\omega_n t) \quad \text{Ecuación 12}$$

Como las observaciones reales tienen una longitud finita, se ocupa la transformada finita y el número de términos en la sumatoria es también finito.

La covarianza de $\eta(t)$ está relacionada con el espectro de energía como sigue:

$$\bar{\eta}^2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^2 \Delta f \quad \text{Ecuación 13}$$

Y un estimado del espectro continuo de energía puede obtenerse como:

$$E(f) = \frac{1}{T_r} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \eta(n\Delta t) e^{2\pi i f(n\Delta t) \Delta t} \right]^2 \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde T_r es la longitud del registro y Δt es el intervalo de muestreo.

Considerando una sola componente

$$\eta(t) = a \text{sen}(\omega t) \quad \text{Ecuación 15}$$

La varianza para un periodo de 2π es

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a^2 \sin^2 2\pi ft \, d(2\pi ft) = \frac{a^2}{2} = 2 \int_0^\infty E^1(f) df = \int_0^\infty E^2(f) df \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde $a^2/2$ representa la contribución a la varianza asociada a la componente de frecuencia $\omega = 2\pi f$, con E^1 y E^2 los espectros unilateral y bilateral de energía (Figura 5).

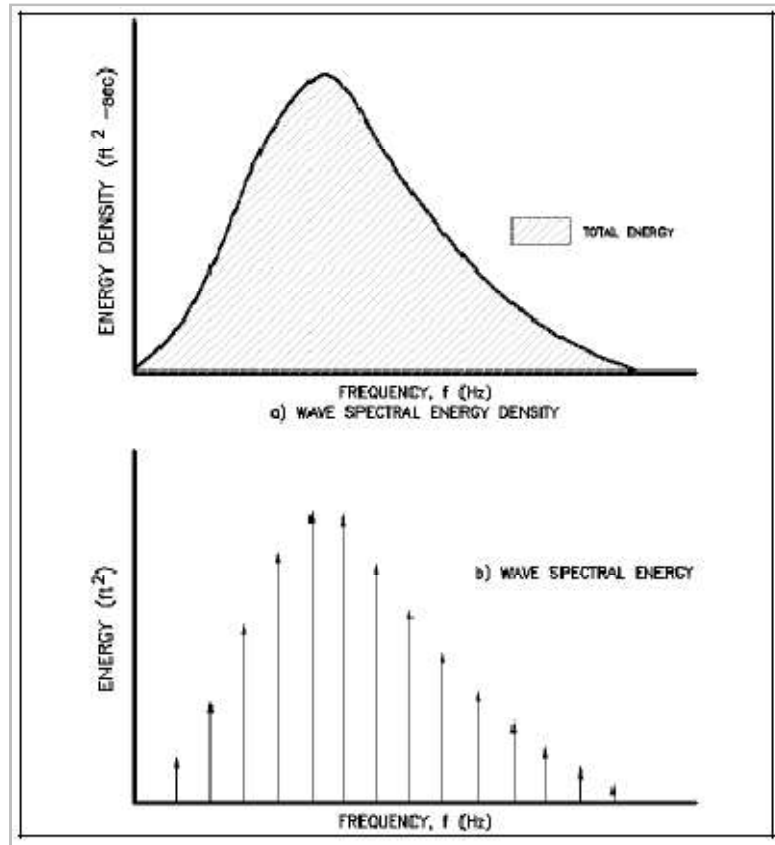


Figura 5: Representación espectro de frecuencias.
 Fuente: Ref. 20.

Luego por extensión de este caso simple, usando las ecuaciones anteriores para una señal aleatoria queda:

$$\sigma_n^2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n^2}{2} = \int_0^\infty E(f) \, df = m_0 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde el momento espectral de orden cero m_0 representa el área bajo la curva de $E(f)$.

Se definen los momentos espectrales de orden n del espectro como:

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i E(f) df \quad \text{con } i = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Ecuación 18}$$

En base a esto se puede obtener una nueva definición de altura significativa, ya que suponiendo que las alturas siguen la Distribución de Rayleigh, se tiene que:

$$H_s = 3.8\sqrt{m_0} \approx 4\sqrt{m_0} \quad \text{Ecuación 19}$$

b) *Espectro direccional*

En un registro real de oleaje, cada componente de frecuencia está formada por olas que llegan de distintas direcciones, por lo que el espectro de energía que represente el oleaje de forma completa debe incluir esta característica. Se define en consecuencia al *espectro bidimensional o direccional de energía* como $E(f, \theta)$ (Figura 6).

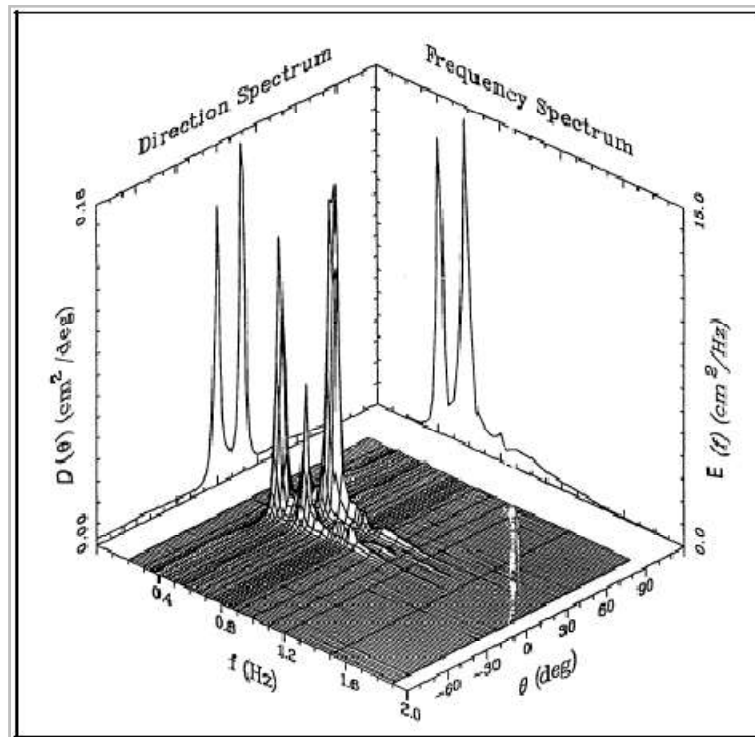


Figura 6: Representación espectro direccional.

Fuente: Ref. 20.

La medición de un espectro bidimensional involucra el registro del mismo parámetro hidrodinámico (como desnivelación o presión subsuperficial) en una serie de locaciones cercanas, o de diferentes parámetros (como presión y dos componentes de velocidad del flujo) en un mismo punto. A estos registros se les aplica un análisis de correlación cruzada para estimar el espectro direccional.

Dentro de los sistemas de medición y estimación de espectros se encuentran las boyas direccionales que miden inclinaciones de los ejes de la boya para luego aplicar un método matemático sobre dichos valores, y los arreglos de medidores de presión y correntómetros, que procesan los datos de presión y las componentes horizontales del flujo para obtener los parámetros de oleaje.

3.2 ESTIMACIÓN DE OLAJE

3.2.1 GENERACIÓN DEL OLAJE

La transferencia de energía del viento al oleaje se considera producto dos mecanismos; uno de resonancia y otro de retroalimentación (Ref. 16, pág. 288).

El primero indica que un patrón relativamente fijo de distribución de las presiones generadas por el viento se propaga sobre la superficie del agua. La aplicación de una Transformada de Fourier permite producir ondas armónicas de presión que transmiten energía al oleaje cuando se ponen en fase con los movimientos de desnivelación del nivel del mar. La variación generada por este fenómeno es de carácter lineal (Phillips, 1957).

Cuando una ola ya ha sido generada, los movimientos más amplios de la superficie generan una distorsión del perfil de viento sobre esta, lo que se traduce en diferencias de presión en los lados de sotavento y barlovento de la cresta. Las presiones siguen el mismo movimiento de la superficie del agua, transfiriendo más energía al oleaje, en cantidad proporcional a la magnitud del mismo, generando un efecto exponencial en el tiempo (Miles, 1957).

Idealizando las condiciones de viento y geometría del fetch y dejando fuera el análisis de las direcciones, un oleaje que sale de la zona de generación y comienza a desplazarse a través del océano debiera mantener la forma del espectro de frecuencia que lo define, pero en la realidad se observa que la energía va disminuyendo en algunas frecuencias y aumentando otras. El cambio de forma espectral se debe a una transferencia no lineal de energía entre distintos componentes resonantes del oleaje.

En aguas profundas este fenómeno es dominado por la interacción entre sets de 4 componentes (cuadruquetas), lo que deriva en la transferencia de energía desde la frecuencia peak hacia frecuencias más bajas (moviendo a la vez la frecuencia peak), y hacia frecuencias más altas (donde se disipa por descrestamiento).

Cuando el oleaje alcanza aguas poco profundas, las transferencias entre sets de 3 componentes (tripletas) se hacen más importantes en la medida que aumenta la esbeltez, generando movimiento de energía de las bajas a las altas frecuencias. Cantidades importantes de energía pueden transferirse en cortas distancias, cambiando drásticamente la forma del espectro.

3.2.2 MODELOS EMPÍRICOS

Durante la época de la Segunda Guerra Mundial se presentaron los primeros trabajos en que se abordaron técnicas científicas para estimar condiciones de oleaje. En ellas se utilizó el análisis dimensional para generar formulaciones que definían la forma en que los parámetros

de altura y periodo significativos dependían de variables independientes como la intensidad del viento, profundidad del agua, etc.

Una de la investigaciones que obtuvo mayor aceptación fue la presentada por Bretschneider (1952 y 1958), donde en base a los trabajos realizados por Sverdrup y Munk (1947), desarrolla una relación semiempírica que permite relacionar la altura y el periodo significativos (H_s y T_s) con la intensidad del viento en la superficie, la longitud de cuerpo de agua sobre la que actúa (*fetch*), y la profundidad en dicha zona. Esta relación se hizo conocida como método SMB, siendo la altura de oleaje descrita por:

$$H_s(V_s, d, F) = \frac{V_s^2}{g} H_\infty \tanh\left(K_3 \left(\frac{dg}{V_s^2}\right)^{m_3}\right) \tanh\left(\frac{K_1 \left(\frac{Xg}{V_s^2}\right)^{m_1}}{\tanh\left(K_3 \left(\frac{dg}{V_s^2}\right)^{m_3}\right)}\right) \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde H_s es la altura de ola significativa [m], V_s es la velocidad del viento en la superficie [m/s], g es la aceleración de gravedad [m/s^2], d es la profundidad del agua [m], X es la longitud del fetch y H_∞ , K_1 , K_3 , m_1 , m_3 son coeficientes adimensionales iguales a 0.283, 0.0125, 0.53, 0.42 y 0.75, respectivamente.

En tanto, el periodo significativo es descrito por:

$$T_s(V_s, d, F) = \frac{V_s^2}{g} T_\infty \tanh\left(K_4 \left(\frac{dg}{V_s^2}\right)^{m_4}\right) \tanh\left(\frac{K_2 \left(\frac{Xg}{V_s^2}\right)^{m_2}}{\tanh\left(K_4 \left(\frac{dg}{V_s^2}\right)^{m_4}\right)}\right) \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde T_s es el periodo significativo [s], V_s , g , d y X son los mismos de la ecuación anterior y T_∞ , K_2 , K_4 , m_2 y m_4 son coeficientes adimensionales iguales a 7.54, 0.077, 0.833, 0.25 y 0.375, respectivamente.

Datos posteriores llevaron a Hasselmann et al. (1973) a generar nomogramas que permitían el pronóstico en casos con fetch y tiempo limitado.

Para fetch limitado

$$H_{mo} = 0.0016g^{-1/2}U_{10}X^{1/2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Para duración limitada

$$H_{mo} = 8.29 \times 10^5 g^{-2/7} U_{10}^{9/7} t^{5/2} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde H_{m0} es la altura de ola asociada con el momento de orden cero, U_{10} es la velocidad del viento a 10 metros de altura [m/s], X es la distancia del fetch [m], y t es el tiempo durante el cual actúa el viento [s].

El tiempo necesario para alcanzar la mayor altura para una determinada combinación de X y U_{10} se calcula como:

$$t = 68.8(gU_{10})^{-1/3} X^{2/3} \quad \text{Ecuación 24}$$

Los modelos empíricos permiten obtener pronósticos puntuales de la altura y el periodo de ola significativos, cuando las condiciones de viento se mantienen relativamente constantes, y si existen condiciones de aguas profundas. De acuerdo a lo anterior, este tipo de modelos pierde exactitud al ser aplicado en zonas someras donde se produce disipación de la energía por efectos del fondo marino, y su aplicación en estudios de dos dimensiones horizontales se hace poco eficiente.

Ante lo anterior, nuevos modelos basados en la física de los procesos involucrados en la generación y propagación del oleaje surgieron para darle más rigor a la determinación del fenómeno, al considerar la evolución espacial y temporal de la energía que influye en el aumento y decaimiento del oleaje.

3.2.3 MODELOS DE BASE FÍSICA

Este tipo de modelos espectrales resuelven la ecuación de energía del oleaje dada por

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla(c_g F) + \sigma \frac{\partial \left(c_\sigma \frac{F}{\sigma} \right)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta)}{\partial \theta} = S_t \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde S_t puede calcularse como

$$S_t = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde $F(t,x,y,\sigma,\theta)$ es el espectro de frecuencias, t es el tiempo, σ es la frecuencia intrínseca, θ es la dirección del oleaje, C_g es la celeridad de propagación del grupo de ondas ($C_g = \delta\omega / \delta k$), C_σ y C_θ son las velocidades de propagación en el espacio espectral, y S_t es la suma de todos los sumideros o fuentes de energía, esto es; la energía suministrada por el viento, las interacciones no lineales entre ondas, la disipación de energía por descrestamiento, la rotura por fondo en aguas someras, y la disipación por fricción con el fondo marino.

La forma en que ha evolucionado la descripción y el cálculo de cada uno de los términos que componen las fuentes o sumideros de energía, ha ido derivando en la separación de los modelos numéricos de pronóstico de oleaje en primera, segunda, y tercera generación.

3.2.3.1 *Primera Generación*

La principal característica de los modelos de primera generación es que cada componente espectral evoluciona independientemente, es decir, cada *bin* de energía correspondiente a cierta frecuencia y dirección se propaga con su propia velocidad de grupo a lo largo de su propio rayo director, y no hay ninguna transferencia entre bins.

Por otra la parte la entrada de energía a causa del viento contempla solo un crecimiento lineal, debido a las fluctuaciones turbulentas de la presión en la superficie del mar. Se usa un término de disipación como limitante del crecimiento, no permitiéndose que la energía supere un nivel de saturación definido para cada componente, modelado por ω^{-5} .

Las interacciones no lineales no son consideradas, o son simplemente parametrizadas y no afectan considerablemente en el balance total de energía. Lo anterior genera que estos modelos sobreestimen la acción del viento y subestimen la fuerza de la transferencia no lineal.

3.2.3.2 *Segunda Generación*

A diferencia de los anteriores, estos modelos incluyen un acoplamiento entre las componentes individuales de forma no lineal, y adicionalmente el oleaje tipo Sea es manejado por una forma espectral independiente de los otros procesos. El oleaje tipo Swell se propaga con una forma espectral en la que no se contempla influencia del viento.

Este tipo de modelos sufren de limitaciones debido a la parametrización de las transferencias no lineales de energía. En general, modelan adecuadamente para características de fetch y duración cercanas a las utilizadas en su diseño, pero no para condiciones de cambios rápidos de viento.

3.2.3.3 *Tercera Generación*

En los modelos de tercera generación no se impone una forma definida al espectro, de forma que tanto la ecuación de transporte de energía como los términos no lineales son descritos de manera que pueden calcularse sin restricciones. A raíz de esto, la evolución a través del tiempo y el espacio puede ir siendo conocida en cada uno de los puntos del dominio modelado.

Estos modelos presentan una mejora considerable en la estimación de las transferencias de energía de oleaje tipo Sea a Swell.

En la actualidad hay varios modelos de tercera generación de uso común (WAM, WAVEWATCH III, SWAN, entre otros). Cada uno de ellos estima de forma diferente los sumideros y fuentes de energía, e implementa distintos esquemas numéricos en su programación. Además, cada uno de ellos ha sido sometido a validación usando distintos datos de campo, y ha sido optimizado en base a esto.

3.3 VIENTOS

3.3.1 INTRODUCCIÓN

La atmósfera terrestre es una estructura gaseosa que rodea a la superficie del planeta extendiéndose más allá de 100 kilómetros sobre esta. Las masas de aire al interior de la atmósfera se ven perturbadas por la acción de la energía solar que genera diferencias de temperatura entre distintos sectores, y en consecuencia, gradientes de densidad que tienden a ponerse en equilibrio generando desplazamientos internos, los que son contrarrestados por la compensación debido a la conservación de la masa. Todo esto es modulado por la rotación de la tierra, y en las capas más cercanas a la superficie, por la influencia de la topografía y de la rugosidad del terreno.

La mayoría de los fenómenos meteorológicos relevantes ocurren en la *Tropósfera* (hasta 11 kilómetros de altura), cuya porción superior es denominada como *Nivel Geostrófico*, región en donde se asume no hay la influencia de la superficie terrestre, y donde el flujo depende solamente del gradiente de presiones. Bajo los 2 kilómetros de altura se ubica la llamada *Capa Límite Atmosférica* (Figura 7) donde las fuerzas de arrastre provocan una continua merma en la intensidad del viento al disminuir la altura, y dentro de la cual se distinguen dos subcapas; en la parte superior la *Capa de Ekman*, donde el *Efecto de Coriolis* genera cambios de dirección significativos con la altura (mayores a latitudes altas), y en la parte inferior la *Capa de Esfuerzo Constante*, zona donde la dirección media del viento se puede asumir invariable con la altura.

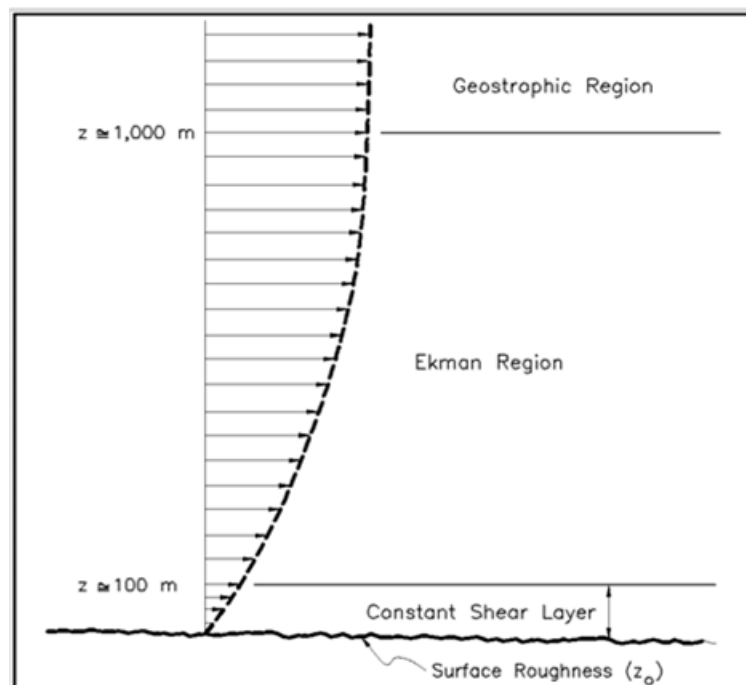


Figura 7: Perfil de viento en la capa límite.

Fuente: Ref. 21.

Si bien en las capas más cercanas a la tierra la rugosidad de la superficie y las diferencias de temperatura entre el aire y la tierra modifican los flujos controlados por las fuerzas de presión e inerciales, para vientos fuertes ($U > 15$ [m/s]) los efectos térmicos son despreciables frente a los de origen mecánico. De acuerdo a lo anterior, la velocidad del viento cerca de la superficie seguiría un perfil logarítmico de la forma:

$$U_z = \frac{U_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde

U_z = velocidad del viento a una altura z sobre la superficie

U_* = velocidad de fricción

k = constante de Von Karman (aproximadamente 0.4)

z_0 = altura de la rugosidad superficial

En este caso, la tasa de transferencia de momentum hacia la columna de agua (por unidad de área de superficie) desde la atmósfera puede ser escrita en la forma paramétrica.

$$\tau_0 = \rho \cdot U_*^2 \Rightarrow U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad \text{Ecuación 28}$$

ρ : Densidad del aire

Para la estimación de condiciones de oleaje es preciso contar con información de vientos correspondiente a una altura de 10 metros sobre la superficie del agua. A menudo no es posible realizar directamente las mediciones óptimas para cada proyecto, pero se puede recurrir a otras fuentes de datos de viento, haciendo las correcciones necesarias para llevar los valores medidos a la altura y lugar de interés.

La fuerza de arrastre puede expresarse en función de la velocidad a 10 metros de altura como

$$\tau_0 = \rho \cdot C_D \cdot U_{10}^2 \Rightarrow C_D = \left(\frac{U_*}{U_{10}}\right)^2 \Rightarrow C_D = \left(\frac{k}{\ln\frac{10}{z_0}}\right)^2 \quad \text{Ecuación 29}$$

con lo que la corrección necesaria para registros de viento medidos a alturas distintas a la estándar corresponde a

$$U_{10} = U_z \frac{\ln\frac{10}{z_0}}{\ln\frac{z}{z_0}} \quad \text{Ecuación 30}$$

Distintos rangos de la rugosidad superficial z_0 están definidos en la Ref. 12 (pág. 53) según lo indicado en la Tabla 1. Para los casos de este estudio se utilizó un coeficiente de valor 0.005 [m], dentro de lo indicado para Superficies Tipo I. Este se elige en base a que los datos a utilizar en la generación de oleaje corresponden vientos medidos en la costa soplando desde agua (asumidos iguales a que si se midieran sobre agua), y tomando en cuenta que en general las condiciones de oleaje involucradas no son demasiado severas, lo que implica una rugosidad baja de la superficie del mar.

Tabla 1: Valores aproximados de los parámetros de rugosidad en función del tipo genérico de superficie.
 Fuente: Ref. 12.

TIPO DE SUPERFICIE	z_0 (m)	z_g (m)	$10^3 \cdot C_g$	$10^3 \cdot C_D$	β
I. Mar abierto y campo abierto llano sin obstáculos (p.e. zonas costeras llanas, desiertos,...).	0.001-0.01	200	0.7-1.2	1.9-3.4	0.12
II. Mar con oleaje muy fuerte y campo abierto, llano u ondulado, con obstáculos dispersos (p.e. praderas, páramos, ...).	0.01-0.3	300	1.2-2.2	3.4-13	0.16
III. Superficies boscosas, campo con obstáculos abundantes y pequeñas zonas urbanas (obstáculos con alturas entre 9 y 15 m).	0.3-1.0	400	2.2-2.8	13-30	0.28
IV. Superficies con grandes y frecuentes obstáculos, y grandes ciudades.	1.0-5.0	500	2.8-3.5	30-300	0.40

3.3.1.1 Factor topográfico

Este factor considera el efecto de las particularidades topográficas locales sobre el perfil de velocidades medias. Los efectos de la topografía local no se consideraran significativos para una determinada dirección del viento cuando la pendiente media del terreno a barlovento en una distancia de 5 [km] desde el punto considerado no exceda de 0.05. En esos casos la superficie se considerará llana, tomando F_T el valor 1. Otros casos posibles se indican en la Tabla 2.

Las direcciones del viento pueden variar entre dos lugares en comparación, por influencia de la rugosidad superficial y de las irregularidades topográficas, y estos fenómenos deben analizarse por separado.

3.4 REGISTROS

3.4.1 VIENTO

En la actualidad existe una variedad de equipos capaces de medir las condiciones de viento, utilizando distintas tecnologías. Entre ellos están los anemómetros mecánicos (de copa o hélice, y paleta), los acústicos basados en el efecto Doppler, los de microondas, etc.. Según el tipo de sensor usado para llevar a cabo las mediciones, un instrumento puede entregar la información de los datos primarios registrados, y/o los valores finales de los distintos parámetros del viento estimados en base a estos.

Tabla 2: Factor para corrección de las intensidades de viento por efectos orográficos (1/2).

Fuente: Ref. 12.

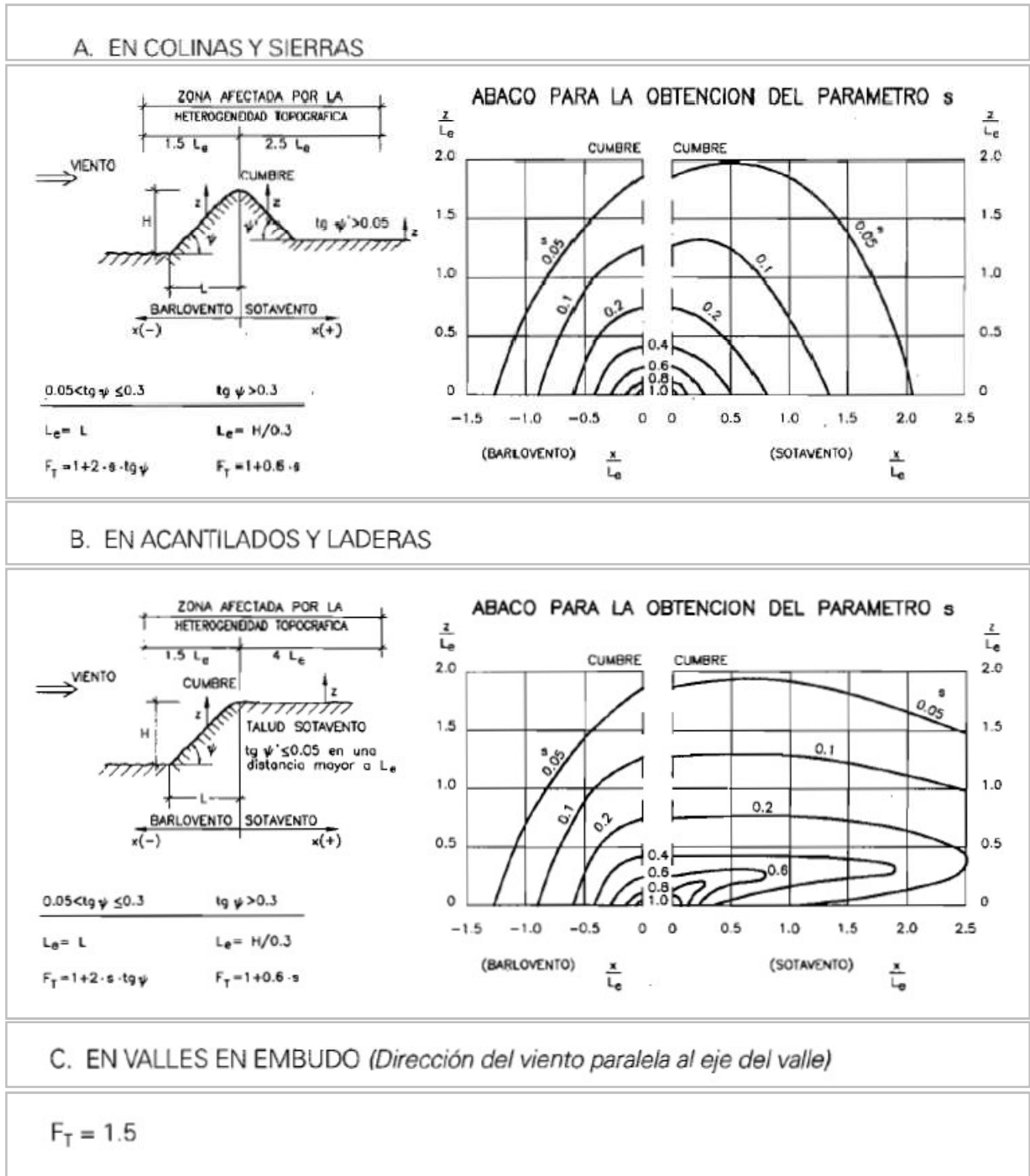
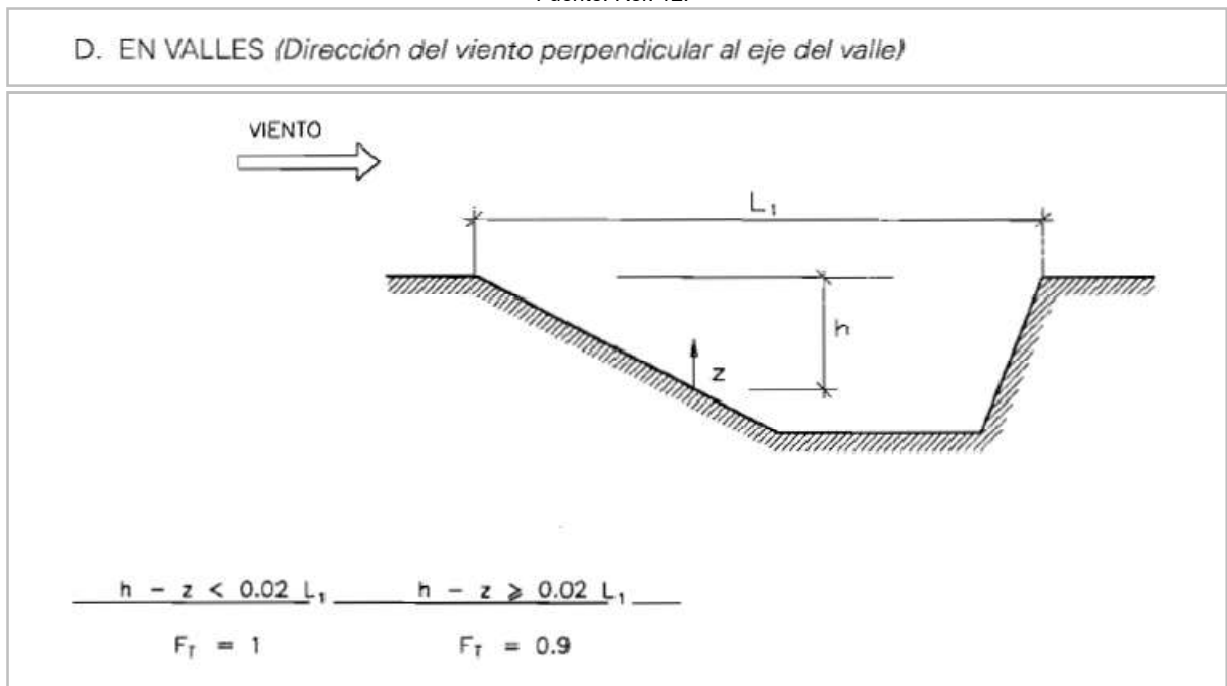


Tabla 3: Factor para corrección de las intensidades de viento por efectos orográficos (2/2).

Fuente: Ref. 12.



En general, los sensores muestrean a resoluciones altas (p.e. 1 [s]) durante un intervalo acotado (p.e. 2 [min]), y con el conjunto de datos formado calculan condiciones promedio de viento representativas de un periodo definido (p.e.10 [min]). Este proceso se repite tantas veces como sea necesario para obtener un registro del largo deseado. Los valores de resolución temporal, ventana de medición, y distancia entre registros, se configuran para satisfacer distintas necesidades según la aplicación práctica para la que se requieran los datos.

3.4.1.1 Control de Calidad

Los primeros pasos para asegurar que los equipos produzcan datos precisos, son la calibración permanente y la realización de chequeos in situ de manera previa a cada levantamiento. Cada fabricante da pautas para la correcta calibración de sus equipos en los documentos técnicos que elaboran para cada uno. Estos procedimientos son altamente específicos para cada tipo de instrumento.

En una segunda instancia, la información ya procesada y entregada en forma de series de tiempo de intensidades y direcciones del viento, puede ser sometida a un conjunto de chequeos para descartar posibles errores, de manera de aumentar la certidumbre de que la estadística con la que se trabajará es correcta.

En la Ref. 8 (sección 3.3) se entregan directrices para realizar pruebas sobre algunas características de las series de valores registrados, entre las que se encuentran:

- Rango: Los valores deben estar dentro del rango de funcionamiento del equipo, y/o de un rango definido por el usuario en función de la varianza que presentan los datos.
- Peaks: Valores extremos locales que no muestren relación con los medidos en su vecindad temporal deben ser marcados como atípicos.
- Tasa de Cambio: El usuario define un valor máximo para la variación entre datos consecutivos.
- Línea Plana: Se identifica si se presentan registros demasiado similares durante algún intervalo de tiempo definido.

La elección de los rangos apropiados para realizar cada prueba debe ser basada en el conocimiento de las condiciones históricas u otra estadística recientemente levantada, o en el entendimiento de las distintas características del fenómeno, y no debe ser definida de manera arbitraria.

Indicaciones sobre la forma de posicionar los equipos de registro en el lugar en estudio, incluyen principalmente la medición exacta de la altura a la que se instala, y el cuidado de ubicarlo a una distancia adecuada de estructuras y particularidades topográficas que puedan modificar las condiciones generales de viento del sector.

3.4.2 OLEAJE

Existen varias tecnologías disponibles para realizar registros de oleaje. Entre las que trabajan sobre la superficie están los altímetros que miden la distancia hacia esta mediante microondas, láser, u ondas sonoras, satélites que pueden medir la rugosidad del océano utilizando microondas, y radares emplazados en la costa (Ref. 7). Bajo la superficie, la desnivelación del nivel del mar puede ser medida mediante sensores de presión o transductores acústicos, y las velocidades orbitales pueden observarse mediante múltiples haces sonoros. En la misma superficie, las boyas pueden utilizar una combinación de acelerómetros y sensores de inclinación y rotación, para luego calcular las condiciones de oleaje existentes.

Los equipos medidores de oleaje en primera instancia recogen datos formando series de tiempo de corto plazo, es decir muestreando datos cada 0.5 o 1.0 [s], durante un periodo acotado (usualmente 1024 o 2048 [s], en base a la cantidad de datos necesaria para la aplicación de Transformadas Rápidas de Fourier). El procesamiento de cada una de estas series genera la determinación de un set de parámetros de resumen que definen las condiciones de un solo estado de mar (H_s , T_p , $Dirp$, dispersión direccional, etc.). las mediciones se van haciendo y procesando a intervalos regulares de tiempo (generalmente entre 1 y 3 [hr] entre comienzo de cada intervalo), de manera que se generan series de largo plazo de parámetros de resumen, que son las que van definiendo la evolución de las condiciones de oleaje a lo largo del periodo de registro.

3.4.2.1 Muestreo de la superficie

Como el registro de desnivelación de la superficie del mar se hace de forma discreta (directa o indirectamente), una cantidad infinita de información de la señal original es dejada de lado. Sin embargo, el *Teorema de Muestreo* dicta que si una función continua muestreada a un intervalo Δ no está formada por componentes de frecuencias inferiores a la crítica (Ec. 31),

resulta ser de ancho de banda limitado y entonces la función queda completamente determinada por sus muestras (Ref. 16, pág. 280). Lo anterior indica que las características de una función continua pueden almacenarse rigurosamente usando un volumen de información reducido.

$$N_y \equiv 1/(2\Delta)$$

Ecuación 31

N_y : Frecuencia Crítica de Nyquist.

Por otra parte, este mismo enunciado tiene un lado negativo en el caso que la señal original presente efectivamente frecuencias bajo el valor de N_y , ya que en ese caso el procedimiento de pasar la información del dominio del tiempo al de la frecuencia, genera que la energía fuera del rango $-N_y \leq nf \leq N_y$ sea trasladada falsamente a otros componentes de frecuencia dentro del rango indicado, fenómeno conocido como *aliasing*.

En consecuencia de lo anterior, un registro de oleaje contendrá información de componentes en el rango de

$$\frac{1}{T} < f < \frac{1}{2\Delta}$$

3.4.2.2 Control de Calidad

Al igual que en el caso de las mediciones de viento (y de cualquier parámetro en general) las primeras medidas a adoptar para intentar obtener datos lo más precisos posibles, son mantener los equipos regularmente calibrados, y realizar antes de cada levantamiento las pruebas referentes a corroborar el funcionamiento adecuado del instrumento (Ref. 7, sección 3.3.1).

Luego, dependiendo del tipo de medidor utilizado, pueden realizarse distintas pruebas sobre los diferentes datos crudos levantados, de manera de revisar que las observaciones que se realizan no presentan anomalías que pueden generar posteriormente alguna irregularidad en las condiciones derivadas de estas. También deben observarse los detalles relativos al procesamiento que convierte aquellos datos crudos en parámetros de resumen, advirtiendo y de ser posible corrigiendo los problemas que pueden presentarse en cada paso.

Después de obtenida la serie de parámetros de resumen que describen las condiciones de oleaje durante el periodo observado, deben realizarse nuevos chequeos para descartar que se haya generado información poco coherente o errónea. Dentro de las características que es conveniente chequear, están las siguientes (Ref. 7, sección 3.3.3):

- Media y Desviación Estándar: La mayoría de los parámetros de resumen pueden ser chequeados para ver si alguno de los valores de la serie se aleja demasiado de la media. El rango dentro del cual se consideran correctos los valores es definido como un múltiplo de la desviación estándar de los mismos datos medidos.
- Rango Aceptable: Similar al anterior, pero el rango es definido por el usuario en base a criterios relativos a las condiciones razonables a esperar en un lugar en particular.

- Línea Plana: Se identifica si se presentan registros muy similares durante cierto número de registros consecutivos.
- Peaks: Valores extremos locales que no muestren relación con los registros cercanos en el tiempo pueden ser indicador de problemas en las mediciones.
- Equipo de Respaldo: Pueden realizarse registros de respaldo con un equipo que ocupe otra tecnología en un lugar cercano, para luego comparar ambas series de tiempo y poder eliminar y reemplazar valores que no coincidan.

3.4.2.3 Equipos ADCP

Los equipos ADCP miden acústicamente; (a) las velocidades orbitales en varias capas dentro de la columna de agua, y (b) las variaciones de la superficie del mar, a la vez que toman registro de (c) los cambios en la presión dinámica inducida por el paso del oleaje mediante un sensor instalado en el cuerpo del instrumento (Figura 8).

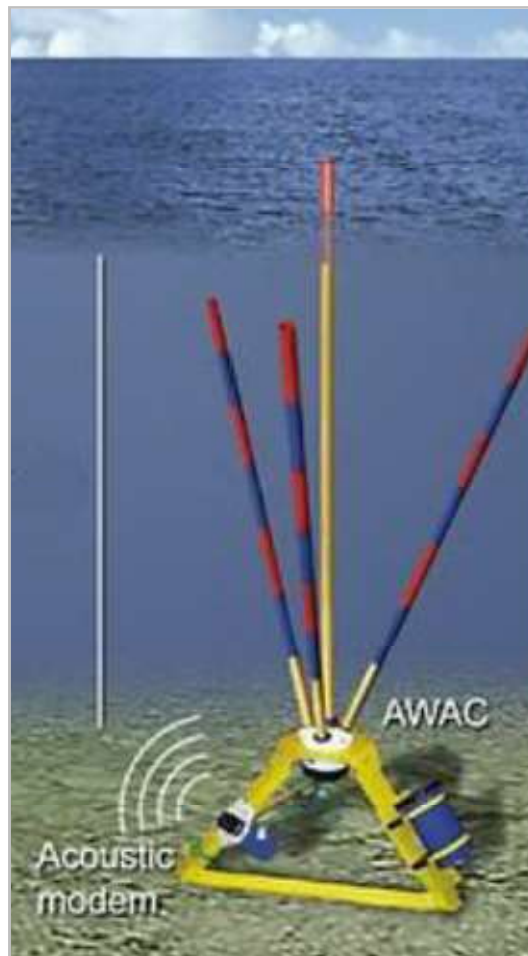


Figura 8: Geometría de la toma de datos de los equipos ADCP.

Fuente: Ref. 13.

Cada uno de los tres tipos de mediciones descritos puede proveer una estimación del espectro de frecuencias, y en consecuencia de los parámetros de H_s y T_p del oleaje, siendo

el uso de las velocidades orbitales a profundidades cercanas a la superficie el que generalmente entrega mejores resultados, ya que la presión dinámica puede presentar problemas debido a la atenuación del efecto con la profundidad, y el registro de desnivelación puede no ser confiable bajo condiciones de turbulencia en la superficie.

Al usar las mediciones de las velocidades horizontales, los ADCP trabajan tomando datos como un arreglo de instrumentos, es decir, realizan mediciones de manera simultánea en varios puntos (3 o 4) espacialmente cercanos, con una configuración determinada por las características geométricas de cada equipo. Además de lo anterior, como cada haz mide en capas, la situación es equivalente a tener un arreglo de sensores registrando datos en cada uno de los distintos estratos en que se parcela la columna de agua.

Cabe notar que de todas formas los datos de velocidades medidos en aproximadamente el 10% superior de la columna de agua se ven influidos por el efecto de los haces secundarios laterales ("*sidelobes*"), por lo que no resultan útiles para análisis de corriente ni tampoco de oleaje.

El proceso por el cual un equipo realiza la estimación de las condiciones de oleaje es el siguiente (Ref. 13, pág. 17):

- Para cada capa, se acumulan los datos de la serie de tiempo de corto plazo de las velocidades orbitales (horizontales) recogidas por cada transductor.
- Se calcula un espectro de energía para cada serie de velocidad medida correspondiente a un bin.
- El espectro de velocidades es traducido a desnivelación de la superficie usando la Teoría Lineal del Oleaje, en base a la profundidad a la que corresponden los datos.
- Para calcular el espectro direccional, se calculan espectros de correlación cruzada entre la serie de datos de cada bin con las del resto. Se obtiene una matriz que contiene información de las fases en las líneas entre cada bin y cada uno de los otros, para cada frecuencia.
- El espectro de correlación cruzada en una frecuencia en particular es linealmente asociado a un espectro direccional. Al invertir esta relación, se resuelve el espectro direccional.

3.5 ESTIMACIÓN DE OLEAJE SEGÚN ROM 04-95

3.5.1 LONGITUD DEL FETCH

En zonas interiores irregulares, la longitud del fetch (L_f) puede estimarse mediante el promediado de la longitud de 9 rectas, trazadas con base en el punto donde nos interesa obtener las condiciones de oleaje hasta la línea de costa tras el cuerpo de agua en cuestión. Se indica utilizar una separación de 3° entre cada recta, situando la línea central en la dirección media de actuación del viento generador (Figura 9).

$$L_F = \frac{\sum_{i=1}^9 r_i}{9}$$

Ecuación 32

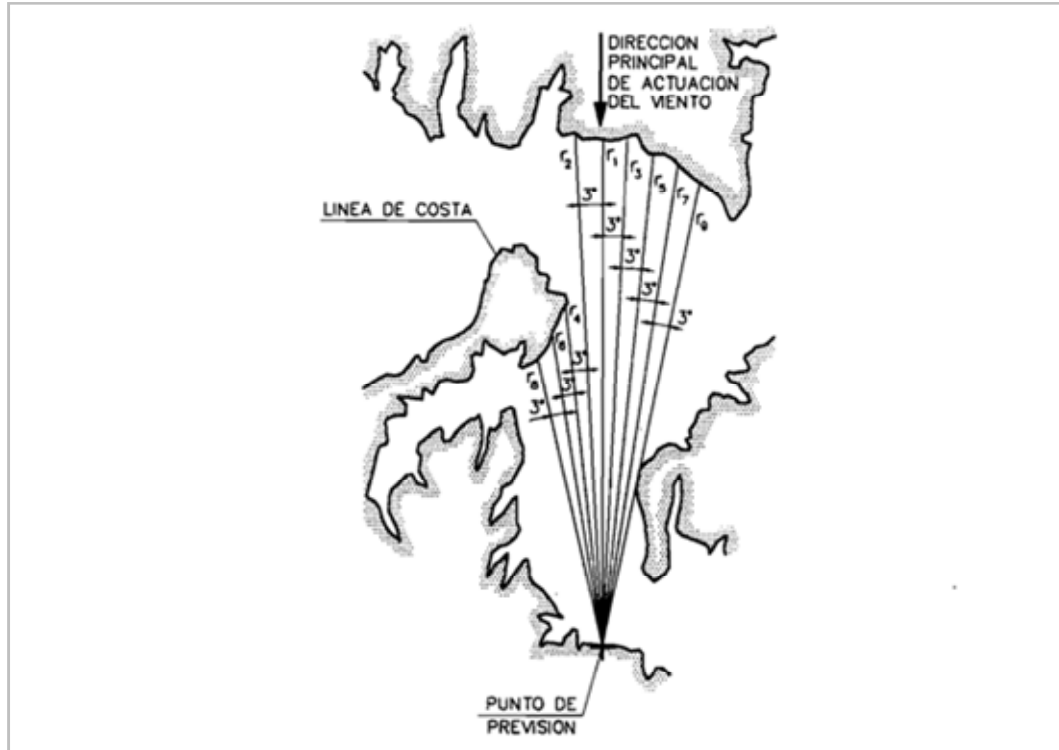


Figura 9: Procedimiento para el cálculo de la longitud del fetch en zonas interiores irregulares.
 Fuente: Ref. 10.

3.5.2 PREVISIÓN DEL OLAJE DE VIENTO EN AGUAS PROFUNDAS

El método de previsión de oleaje utilizado corresponde al método SPM (*Shore Protection Manual*, 1984). Este permite obtener los parámetros de altura significativa y periodo peak en función de las características del viento y del área de generación por medio de una serie de fórmulas.

En el caso de oleajes limitados por la longitud del fetch ($t > t_{\min}$), las características del oleaje de viento generado se obtienen mediante:

$$H_s = 5.112 \cdot 10^{-4} \cdot U_A \cdot (L_F)^{1/2} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$T_p = 6.238 \cdot 10^{-2} \cdot (U_A \cdot L_F)^{1/3} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$t_{\min} = 3.215 \cdot 10 \cdot \left[\frac{L_F^2}{U_A} \right]^{1/3} \quad \text{Ecuación 35}$$

Siendo $U_A = 0.71 \cdot [V_{v,10\min}(10)]^{1.23}$, (U_A y V_v en [m/s]) la velocidad del viento corregida con objeto de tener en cuenta la relación no lineal entre la velocidad del viento y su capacidad de arrastre. A esta velocidad se le llama *Velocidad Eficaz del Viento*.

Las fórmulas anteriores (Ecuaciones 33, 34 y 35) son válidas hasta el límite del oleaje totalmente desarrollado, definido por:

$$H_s = 2.482 \cdot 10^{-2} \cdot (U_A)^2 \quad \text{Ecuación 36}$$

$$T_p = 8.3 \cdot 10^{-1} \cdot U_A \quad \text{Ecuación 37}$$

$$t_{\min} = 7.296 \cdot 10^3 \cdot U_A \quad \text{Ecuación 38}$$

En el caso de oleajes limitados por la duración ($t < t_{\min}$) las características del oleaje de viento generado se obtienen mediante la formulación siguiente:

$$H_s = 4.433 \cdot 10^{-5} \cdot (U_A)^2 \cdot (t/U_A)^{5/7} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$T_p = 1.830 \cdot 10^{-2} \cdot U_A \cdot (t/U_A)^{0.411} \quad \text{Ecuación 40}$$

En general, los oleajes de viento presentan dispersiones direccionales importantes. No obstante, simplificadaamente se considera que la dirección principal de propagación del oleaje de viento coincide con la dirección de actuación del viento generador.

3.6 ESTIMACIÓN DE OLEAJE SEGÚN ACES

El software ACES reúne en una aplicación computacional la implementación de varias metodologías de cálculo y análisis en distintos temas relativos a la ingeniería costera. El módulo dedicado a la estimación de oleaje contempla estudios en aguas abiertas y restringidas, con registros de viento tomados en diferentes condiciones (Ref. 9, Cap. 1).

En este estudio se contempla realizar un proceso previo a los datos de viento, de manera que se ajusten a los requerimientos de las ecuaciones de crecimiento de oleaje descritas más adelante, en cuanto a la velocidad del viento equivalente (U_e) a los 10 metros de altura, y a condiciones de estabilidad neutral ($\Delta T = 0$).

En los casos de vientos registrados cerca de la superficie, cuando soplan sobre la costa y son medidos en la línea de costa se consideran idénticos al caso de viento medido sobre agua. De la misma manera, vientos observados en la costa pero soplando desde la tierra se consideran equivalentes a vientos sobre tierra. Vientos de patrones complejos por características locales de fricción o topografía no se consideran en estas simplificaciones.

Se contempla un ajuste adicional de la intensidad de los vientos para situaciones en que se tiene un fetch relativamente corto. Para longitudes del fetch menores a 16 km, se aplica la siguiente reducción:

$$U_e = 0.9U_e$$

Ecuación 41

Las siguientes expresiones se usan para ajustar la velocidad del viento a una duración de interés.

$$\frac{U_i}{U_{3600}} = 1.277 + 0.296 \tanh\left(0.9 \log \frac{45}{t_i}\right) \quad \left| \quad (1 < t_i < 3600 \text{seg}) \quad \text{Ecuación 42}$$

$$\frac{U_i}{U_{3600}} = 0.15 \log t_i + 1.5334 \quad \left| \quad (3600 < t_i < 36000 \text{seg}) \quad \text{Ecuación 43}$$

Se presentan fórmulas simples de crecimiento de oleaje por viento en aguas profundas y fetch restringido. Los supuestos más importantes con respecto al uso de estas expresiones simplificadas de crecimiento de oleaje incluyen:

- Se desprecia la energía de otros trenes de oleaje presentes.
- Geometrías de fetch cortas ($F \leq 75 \text{ mi}$).
- Velocidad y dirección del viento relativamente constantes ($\Delta U \leq 5 \text{ kts}$, $\Delta \alpha \leq 15^\circ$).
- Valor fijo del coeficiente de arrastre ($C_D = 0.001$).

Finalmente se contempla un último ajuste a los vientos en orden a linealizar las observaciones al coeficiente de arrastre constante. Esto se realiza con la siguiente fórmula:

$$U_a = U_e \sqrt{\frac{C_d}{0.001}} \quad , \text{ con } C_d = 0.001 \cdot (0.75 + 0.067 \cdot U_e) \quad \text{Ecuación 44}$$

3.6.1 CONSIDERACIONES DEL FETCH

Esta metodología considera la forma del fetch para calcular generación de oleaje desde direcciones distintas (pero cercanas) a la del viento. La geometría del fetch se describe mediante una serie de rayos trazados desde el punto de interés, que atraviesan el cuerpo de agua terminando en la línea de costa contraria. La cantidad de rayos depende del ángulo de separación definido por el usuario, pudiendo incluirse de una vez tantos rayos como sean necesarios para definir el fetch completo (Figura 10).

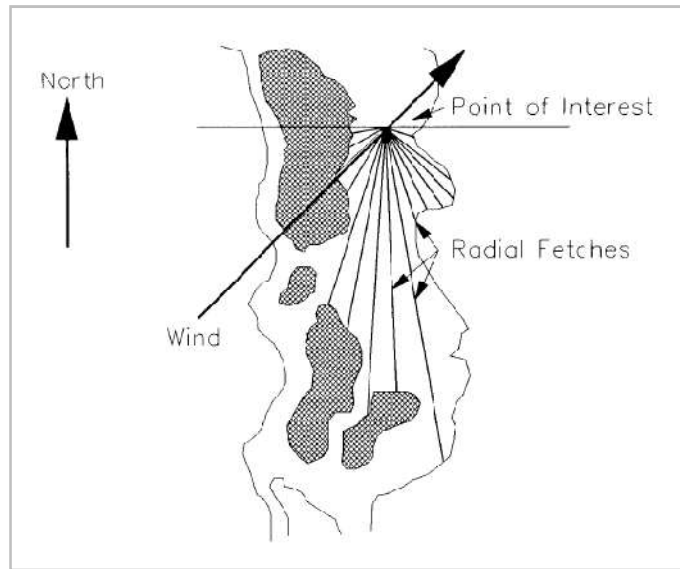


Figura 10: Esquema de caracterización del fetch y viento generador.

Fuente: Ref. 9.

La dirección desde la que incide el viento (α), y la del primer rayo usado para definir el fetch (β_1), deben ser especificados en el sentido de la agujas del reloj desde el Norte hasta el punto de interés (Figura 11). También se debe indicar el intervalo angular utilizado ($\Delta\beta$), y el número de rayos.

La dirección en que se desarrolla el oleaje (θ) es resuelta maximizando el producto:

$$F_{\phi}^{0.28} \cdot (\cos \phi)^{0.44}$$

Ecuación 45

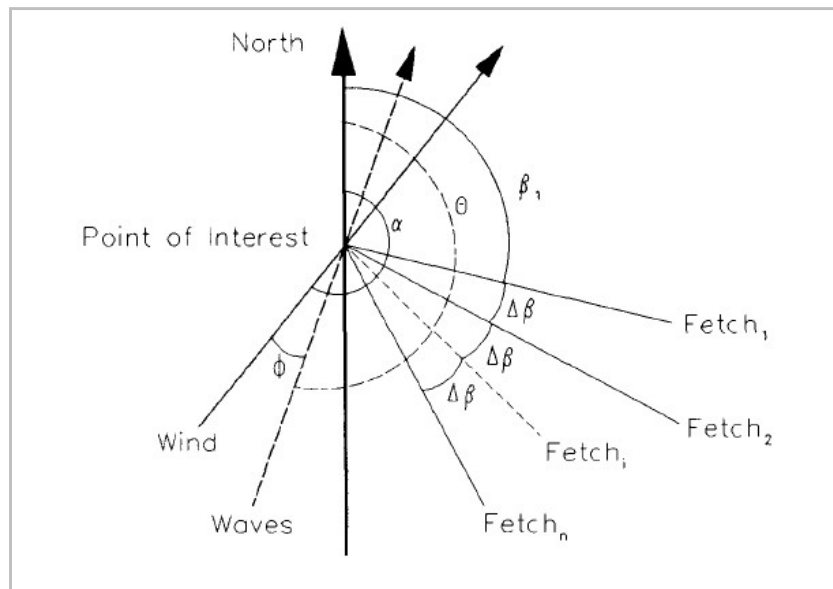


Figura 11: Definición de forma de ingresar parámetros del fetch.

Fuente: Ref. 9.

3.6.2 CRECIMIENTO EN AGUAS PROFUNDAS

En las fórmulas de crecimiento de oleaje en aguas profundas se contemplan los efectos del fetch y de la duración del viento. El desarrollo de las condiciones de oleaje tiene un límite en el nivel de completo desarrollo. El procedimiento seguido para obtener los valores finales estimados se indica a continuación:

Determinar la duración mínima t_{fetch} , requerida por un campo de viento para convertirse en limitado por fetch:

$$t_{fetch} = 51.09 \frac{F^{0.72}}{g^{0.28} \bar{U}_a^{0.44}} \quad \text{Ecuación 46}$$

Determinar el carácter del crecimiento de oleaje (limitado por fetch o por duración):

$$\left| H = 0.000103 \left(\frac{\bar{U}_a^2}{g} \right) \left(\frac{gt_i}{\bar{U}_a} \right)^{0.69} \right| \quad \text{Ecuación 47}$$

Limitado por duración

$$\left| T = 0.0702 \left(\frac{\bar{U}_a}{g} \right) \left(\frac{gt_i}{\bar{U}_a} \right)^{0.39} \right| \quad \text{Ecuación 48}$$

$(t_i < t_{fetch})$

$$\left| H = 0.0015 \left(\frac{\bar{U}_a^2}{g} \right) \left(\frac{gF}{\bar{U}_a^2} \right)^{1/2} \right| \quad \text{Ecuación 49}$$

Limitado por fetch

$$\left| T = 0.3704 \left(\frac{\bar{U}_a}{g} \right) \left(\frac{gF}{\bar{U}_a^2} \right)^{0.28} \right| \quad \text{Ecuación 50}$$

$(t_i \geq t_{fetch})$

Determinar la condición “total desarrollo”:

$$\left| H_{fd} = 0.2433 \left(\frac{\bar{U}_e^2}{g} \right) \right| \quad \text{Ecuación 51}$$

$$\left| T_{fd} = 8.134 \left(\frac{\bar{U}_e}{g} \right) \right| \quad \text{Ecuación 52}$$

Asegurar que la condición de completo desarrollo no es excedida:

$$H_{mo} = \min(H, H_{fd})$$

$$T_p = \min(T, T_{fd})$$

- g : Aceleración de gravedad
- t_i : Duración del viento usada en las expresiones limitadas por duración.
- F : Largo del fetch usado en las expresiones limitadas por fetch.
- $\hat{U}_a = U_a \cos(\phi)$: Componente paralela al fetch de U_a para el enfoque de fetch restringido.
- $\hat{U}_e = U_e \cos(\phi)$: Componente paralela al fetch de U_e para el enfoque de fetch restringido.
- H : Altura del oleaje determinada por las expresiones limitadas por fetch o por duración.
- T : Periodo del oleaje determinado por las expresiones limitadas por fetch o por duración.
- H_{fd} : Altura del oleaje limitada por un criterio de espectro totalmente desarrollado.
- T_{fd} : Periodo del oleaje limitada por un criterio de espectro totalmente desarrollado.
- H_{mo} : Altura final del oleaje determinada por métodos espectrales.
- T_p : Periodo final del oleaje determinado por métodos espectrales.

3.7 MODELO SWAN

3.7.1 ECUACIÓN DE BALANCE ESPECTRAL DE ACCIÓN

La distribución de la energía del oleaje dentro de un estado de mar es completamente descrita con el espectro de energía $E(\sigma, \theta)$, pero las modificaciones que experimenta el mismo en su evolución espacial y temporal se ven afectadas por la circulación de masas de agua en el área de generación. Es por esto que los modelos de oleaje determinan las variaciones en la *Densidad de Acción* $N(\bar{x}, t; \sigma, \theta)$ en el espacio \bar{x} y tiempo t , la que es definida como $N = E/\sigma$, debido a que esta se conserva durante la propagación en presencia de corrientes (Ref. 18, pág. 11).

De acuerdo a lo anterior, la generación y propagación del oleaje se calculan mediante la *Ecuación de Balance de Acción*:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\bar{x}} \cdot [(\bar{c}_g + \bar{U})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 53}$$

En la ecuación anterior, el lado izquierdo define la parte cinemática. El segundo término denota la propagación espacial de la energía del oleaje en $2D$. El tercer y el cuarto término representan los cambios de frecuencia y la refracción inducidas por la profundidad y por corriente. Los parámetros c_σ y c_θ son las velocidades de propagación en el espacio espectral (σ, θ) .

Al lado derecho de la ecuación se encuentran resumidos todos los procesos físicos que generan, disipan, o redistribuyen la energía del oleaje. Se contempla entrada de energía debido al crecimiento de oleaje por viento, y distribución de la misma por las transferencias

no-lineales (por tripletas y cuádrupletas), mientras la disipación se presenta por descrestamiento, fricción de fondo, y rotura inducida por profundidad. De manera que:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad \text{Ecuación 54}$$

3.7.2 FUENTES Y SUMIDEROS

3.7.2.1 Entrada por viento

El crecimiento asociado al viento se describe como la suma dos términos producto de los mecanismos de resonancia y retroalimentación descritos en la sección 3.2.1.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 55}$$

Donde A y B dependen de la velocidad y dirección del viento, y de la frecuencia y dirección del oleaje.

El crecimiento lineal se calcula en SWAN con la expresión de Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981):

$$A = \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{2\pi g^2} (U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H \quad \text{Ecuación 56}$$

$$H = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*} \right)^4 \right\} \quad \text{Ecuación 57}$$

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad \text{Ecuación 58}$$

En donde θ_w es la dirección, H es un filtro que elimina el crecimiento a frecuencias menores a la de Pierson-Moskowitz, y σ_{PM}^* es la frecuencia peak del estado de máximo desarrollo del oleaje (según P-M, 1964) reformulada en términos de la velocidad de fricción.

Para el crecimiento exponencial se ocupa por defecto la descripción de Komen et al. (1984), que es función del cociente entre la velocidad de fricción y la velocidad de fase (U_*/c_{ph}):

$$B = \max \left[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \sigma \quad \text{Ecuación 59}$$

En donde ρ_a y ρ_w son la densidad del aire y del agua, respectivamente.

3.7.2.2 Disipación

a) Descrestamiento

Las formulaciones de descrestamiento utilizadas por defecto son las descritas por Hasselmann (1974), según la adaptación del grupo WAMDI (1988):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 60}$$

Donde Γ es un coeficiente dependiente de la esbeltez, k es el número de ola y $\tilde{\sigma}$ y \tilde{k} denotan una frecuencia media y un número de ola medio, respectivamente. El valor de Γ depende de la condición de total desarrollo.

b) fricción de fondo

Cuando el oleaje en su propagación hacia la costa alcanza aguas poco profundas, las partículas de agua más cercanas al fondo comienzan a presentar desplazamientos, e interactúan con el mismo de varias formas, entre ellas están la dispersión en las irregularidades del fondo marino, arrastre de partículas de suelo, percolación en terreno poroso, y fricción en la capa turbulenta que se crea inmediatamente sobre el fondo.

La disipación en fondos arenosos por la fricción de fondo es usualmente expresada como:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 61}$$

Donde C_b es el *coeficiente de fricción de fondo*. En SWAN se han ocupado las formulaciones del modelo empírico JONSWAP de Hasselmann et al (1973), el modelo de ley de arrastre de Collins (1972), y el modelo de la Viscosidad de Eddy de Madsen et al. (1988). No se toman los efectos de la corriente sobre la disipación.

c) rotura por fondo

A medida que el oleaje se propaga hacia profundidades muy bajas, el asomeramiento provoca un aumento sostenido de la altura, mientras la longitud se mantiene constante. Esto genera que la ola se haga cada vez más esbelta, hasta un límite en que comienza a ser inestable, y donde se produce el rompimiento, disipando una gran cantidad de su energía.

Se ha encontrado que la disipación que provoca este tipo de rotura es coincidente con la obtenida mediante la aplicación de un modelo de propagación de un *bore*. En SWAN se ocupa una formulación espectral que incluye las direcciones:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 62}$$

Donde E_{tot} es la energía total del oleaje y $D_{tot} < 0$ es la tasa de disipación de la energía total debido al oleaje rompiente de acuerdo a Battjes y Janssen (1978). El valor de D_{tot} depende de manera importante del parámetro de rotura $\gamma = H_{max}/d$. En SWAN pueden usarse varios parámetros de rotura constantes o variables, con un valor por defecto de 0.73.

3.7.2.3 Interacciones no lineales ola-ola

En SWAN existen dos formas de realizar los cálculos de redistribución de energía por interacción de cuádrupletas, los métodos *FD-RIAM* y *XNL*. Ambos son capaces de capturar los cambios de frecuencia y la modificación de la forma espectral a medida que disminuye la profundidad.

En aguas muy someras, las interacciones por tripletas pueden transferir rápidamente la energía del oleaje y cambiar de manera importante la forma del espectro en distancias relativamente cortas. En SWAN se ocupa una aproximación del comportamiento de las tripletas llamada *LTA*, creada por Eldeberky (1996).

3.7.3 LIMITADORES PARA LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN EN SWAN

En general el uso de grillas irregulares cuyas dimensiones dependan de la profundidad permite entregar un equilibrio tiempo-calidad en las estimaciones realizadas, pero en ocasiones pueden generarse errores de exactitud de los cálculos en regiones donde los parámetros de entrada no presentan una densidad suficiente.

Un ejemplo de este problema puede encontrarse es el caso de una región donde una batimetría sub-representada genera que la refracción se enfoque excesivamente en un solo vértice de la grilla, causando que el cálculo lleve a una solución físicamente incorrecta.

En la Ref. 4 se presenta un estudio de la aplicación de limitadores de las velocidades de propagación para la refracción y el cambio de frecuencia, basados en el criterio de Courant-Friedrich-Lewy (*CFL*).

En la Ecuación de Balance de Acción del Oleaje (Ec. 53), c_θ y c_σ son las velocidades de propagación en los espacios de dirección y frecuencia, respectivamente. La velocidad c_θ representa la refracción inducida por el fondo y por corriente, y adicionalmente puede incluir difracción. La velocidad c_σ representa el cambio de frecuencia por efecto tipo Doppler debido a corrientes y por profundidad variable en el tiempo.

El enfoque utilizado limita el giro direccional total C_θ o el cambio total de frecuencia C_σ en un bin espectral mientras las olas se propagan sobre un elemento geográfico, no por razones de estabilidad numérica sino por razones de exactitud. Los parámetros *CFL* basados en ΔT , $\Delta\theta$ (bin direccional), y $\Delta\sigma$ (bin de frecuencia) son los siguientes:

$$C\theta \equiv \frac{|c_\theta| \Delta T}{\Delta \theta} \leq \alpha_\theta \quad \text{Ecuación 63}$$

$$C\sigma \equiv \frac{|c_\sigma| \Delta T}{\Delta \sigma} \leq \alpha_\sigma \quad \text{Ecuación 64}$$

En el estudio citado se prueban valores de α_θ y α_σ , para una variedad de grillas y aplicaciones, recomendando una selección en el rango de 0.25 a 0.5, en función de los resultados obtenidos para los casos analizados. De todas maneras se insta a hacer pruebas específicas para cada aplicación en particular, siguiendo algunos consejos generales.

3.8 FENÓMENOS EXCLUÍDOS DE LOS ANÁLISIS

Los estudios fueron realizados en zonas donde se dan corrientes de intensidades importantes, por lo que la influencia de las mismas sobre las condiciones de oleaje puede jugar un papel relevante. Si bien la información inicial obtenida para cada lugar incluyó registros de corriente levantados en el marco de distintos proyectos de conectividad, las mediciones representan condiciones puntuales dentro del sistema de circulación de los distintos cuerpos de agua que forman cada una de las zonas de generación de oleaje. Estas mediciones no pueden ser directamente extrapoladas para ser utilizadas en todo el dominio de modelación, sino que se debe contar con un estudio más extenso que muestre las condiciones generales de los flujos, lo cual puede obtenerse por ejemplo de registros con ADCP invertido a bordo de una embarcación, o de modelos numéricos configurados y calibrados según las características de cada área en particular. Estas opciones no estuvieron dentro de la información recopilada, por lo que el análisis de la influencia que las corrientes pudieron tener sobre las condiciones de oleaje estimadas quedó fuera de los alcances de este estudio.

Existen fuentes de información que entregan datos de campos de viento sobre toda la superficie del planeta. Equipos a bordo de satélites calculan y registran datos en grillas de 25 kilómetros, cada 24 horas (Ref. 16, pág. 45). Por otra parte, el modelo numérico del ECMWF entrega resultados con separación espacial de 1°, y en intervalos de 6 horas. Sin embargo lo anterior, la resolución de dicha información es baja para estudios en zonas restringidas de las dimensiones tratadas en este trabajo, y su utilización no representa una mejora sobre el procedimiento de extrapolar a toda la zona de generación las condiciones puntualmente medidas en terreno. En consecuencia, no se contempló el uso de datos de campos de viento para el desarrollo de las estimaciones de oleaje incluidas en este estudio.

3.9 VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES

Las obras de ingeniería marítima generalmente representan inversiones importantes de recursos, y su funcionamiento suele involucrar la presencia de personal y/o usuarios de las mismas. Dado que es necesario proteger las instalaciones de manera que funcionen de manera adecuada, a la vez que se asegura la integridad de las personas que hacen uso de estas, un estudio de estimación de oleaje que sea utilizado como base para el diseño debe

presentar una apropiada verificación de la validez de los resultados entregados, la que se lleva a cabo contrastando dichos resultados con datos de registros reales.

Un requisito indispensable para la validación de un método de estimación es el contar con registros de viento y oleaje confiables. Por esto, los estudios encargados para proyectos de ingeniería marítima incluyen siempre mediciones simultáneas de ambos fenómenos en el sector específico de interés.

El grado más detallado de análisis de la exactitud de los resultados obtenidos producto de una estimación de oleaje, exige hacer comparaciones espectrales entre las estimaciones y las condiciones medidas, y es comúnmente aplicado en validaciones por parte de los desarrolladores de los modelos, para corroborar y demostrar las capacidades y desempeño de estos.

Debido a que en los estudios de ingeniería los objetivos son más pragmáticos, suelen aplicarse métodos más eficientes que en anterior, recurriendo principalmente a criterios estadísticos de comparación entre las distribuciones de los parámetros de oleaje. Los valores de datos medidos y estimados de H_s , T_p , y $Dirp$ se ordenan en tablas idénticas para comparar las frecuencias contenidas por rango y los valores acumulados de estas, y así verificar la existencia de congruencia. Las distribuciones se presentan en forma de histogramas y gráficos de no excedencia para permitir una mejor visualización de las similitudes o diferencias.

En los casos en que es adecuado comparar series de tiempo, se recurre a algunos parámetros estadísticos que dan información sobre la existencia de una correlación entre distintos fenómenos, o sobre el desempeño de un método de estimación aplicado (Ref. 14. Cap 4.). Entre dichos parámetros están:

- El *Coefficiente de Pearson* (r) da una medida de la concordancia en que se presentan los cambios de valor para dos series de tiempo simultáneas. Se calcula como el cociente entre la covarianza y el producto de las desviaciones típicas de ambas series. El valor obtenido se acerca más a 1 mientras ambas series experimenten variaciones sincronizadas y con magnitudes relativas similares (si las variaciones son en sentidos opuestos tiende a -1), y será más cercano a 0 si las variables no presentan cambios concordantes.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}$$

Ecuación 65

- La *Raíz del Error Cuadrático Medio* (RMSE) da una medida general de las diferencias entre variables calculadas y medidas. Valores pequeños son indicativos de estimaciones más precisas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_n - Y_n)^2}$$

Ecuación 66

- El *Índice de Dispersión (SI)* es un parámetro estadístico creado para estimar el nivel de desempeño que presenta un modelo de oleaje, y corresponde a una normalización de la Raíz del Error Cuadrático Medio en función del promedio de los valores medidos (Ref. 14, pág. 10). Este parámetro suele ser de mayor utilidad en condiciones de oleaje relativamente severas. Valores más cercanos a 0 indicarían mayor capacidad de hacer estimaciones precisas.

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{X}}$$

Ecuación 67

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS LUGARES DE ESTUDIO

Los estudios comparativos entre los distintos métodos de estimación de oleaje, se llevaron a cabo mediante la aplicación a casos reales correspondientes a cinco lugares de la Zona Sur de Chile, ubicados entre las regiones X, XI y XII (Figura 12 y Tabla 4). Estos lugares se escogieron tomando en cuenta que la información oceanográfica disponible fuera suficiente para el desarrollo de los estudios contemplados. De cada sector se contó con registros simultáneos de viento y oleaje, y con batimetría de los cuerpos de agua considerados relevantes para la generación de oleaje.

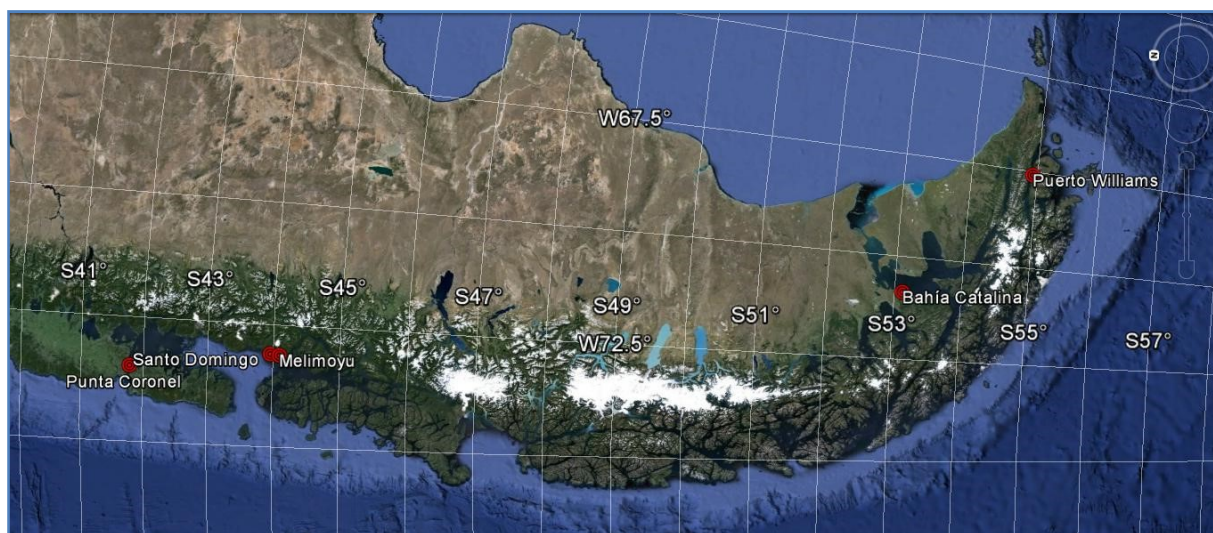


Figura 12: Imagen satelital de la ubicación de los lugares de estudio.

Fuente: Google Earth.

Tabla 4: Coordenadas de ubicación de los lugares de estudio.

Localidad	Región	Coord. Geográficas		Coord. UTM		
		S	W	E	N	zona
Punta Coronel	X	41°47'59.69"	73°28'06.40"	627238	5371305	18
Santo Domingo	XI	43°57'57.56"	73°06'00.96"	622197	5130155	18
Melimoyu	XI	44°05'55.62"	73°07'12.78"	650460	5115437	18
Bahía Catalina	XII	53°07'12.87"	70°51'52.24"	375226	4112729	19
Puerto Williams	XII	54°55'52.96"	67°35'41.67"	590031	3911941	19

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de los datos utilizados fueron levantados en estudios relativos a proyectos de mejoramiento de la infraestructura de conectividad marítima de los lugares en cuestión. En los casos en que fue necesario aplicar al viento alguna corrección para traslado al lugar y altura necesarios, se utilizaron los procedimientos expuestos en la Sección 3.3.

Cabe destacar que para la mayoría de los lugares en estudio la información recabada correspondió a las series de tiempo de parámetros estadísticos de viento (intensidad media y máxima, dirección media) y de oleaje (H_s , T_p , Dir_p , $H_{máx}$, etc.), como fue entregada en los estudios originales elaborados por las empresas encargadas de cada proyecto, es decir, se accedió a los resultados del procesamiento de los datos crudos. Solo se contó con los

archivos de salida del ADCP en el caso del sector de Bahía Catalina en la campaña de Invierno.

Como consecuencia directa de lo anterior, el control de calidad de la información se realizó en la medida que los datos disponibles para cada lugar permitieron; ya sea aplicando las pruebas relativas a los parámetros de resumen (de acuerdo a lo indicado en la Sección 3.4), o haciendo una revisión de los datos primarios levantados por el ADCP.

En la descripción de cada lugar, se comienza indicando las particularidades encontradas en los chequeos realizados y los datos que se filtraron, para luego describir las condiciones existentes durante el periodo de observación, las que se infieren de los gráficos de series de tiempo y rosas representativas de los distintos parámetros registrados del viento como del oleaje.

4.1 PUNTA CORONEL

El sector de Punta Coronel se ubica en la ribera norte de la boca este del Canal Chacao, en la X Región de Los Lagos (Figura 13 y Figura 14), a cerca de un kilómetro de la localidad de Parga. El sector se enfrenta directamente al Golfo de Ancud, cuyas aguas están conectadas al Océano Pacífico por el Canal Chacao al oeste, y por el Golfo del Corcovado y la Boca del Guafo al sur.

El punto de registro de oleaje queda frente a una línea de costa con alineación suroeste-noreste, lo que lo deja expuesto a acotadas zonas de generación desde direcciones suroeste por la cercanía de la Isla Grande de Chiloé, y del este por la presencia de la península y de la Isla Abtao. Hacia direcciones sur y sureste la zona de generación es extensa y comprende al Golfo de Ancud hasta las Islas Chauques e inmediaciones de la Península de Huequi.



Figura 13: Imagen satelital zona general. Punta Coronel.

Fuente: Google Earth.

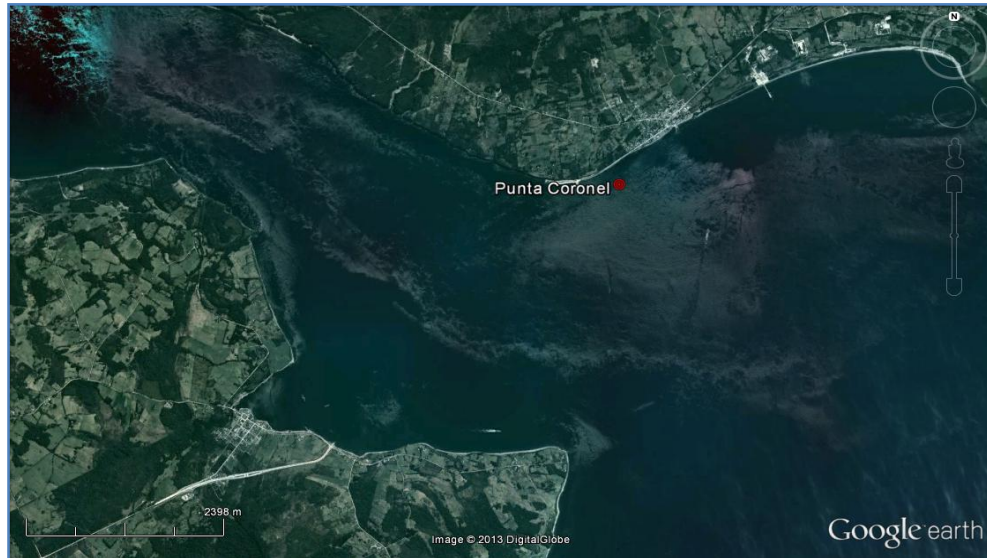


Figura 14: Imagen satelital zona particular. Punta Coronel.

Fuente: Google Earth.

4.1.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS

El periodo de medición de oleaje tuvo una extensión de 33 días, desde el 14 de Junio hasta el 17 de Julio del año 2009. Se analizó el mismo periodo dentro de los registros de viento. La información relativa a los equipos utilizados se entrega en la Tabla 5.

Tabla 5: Información equipos de registro de viento y oleaje. Punta Coronel.

Registro Vientos		Registro Oleaje	
tipo equipo	Estación Meteorológica	tipo equipo	ADCP
marca	Young	marca	RDI
modelo	05013-5	modelo	WorkHorse
		frecuencia	600 kHz
latitud	41°47'55.46" S	latitud	41°47'59.69" S
longitud	73°28'51.27" W	longitud	73°28'06.40" W
altura	30 msnm.	profundidad	13.5 m
declinación mag.	9.5°	declinación mag.	9.5°
intervalo registro	10 min	intervalo registro	3 hrs
n datos	4699	n datos	262

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 DATOS

4.1.2.1 Batimetría

Se contó con información de batimetría y línea de costa de las fuentes expuestas en la Tabla 6. La representación gráfica de la misma se entrega en la Figura 15. Durante el periodo en estudio el nivel del mar alcanzó un máximo de aproximadamente 5.8 [m] sobre el NRS.

Tabla 6: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Punta Coronel.

Fuente	Descripción
Carta SHOA N° 7000	Bahía Corral a Isla Guafo
Carta SHOA N° 7210	Canal Chacao
Carta SHOA N° 7300	Golfo de Ancud Isla Puluqui a Isla Quinchao
Carta SHOA N° 7310	Paso Guar a Golfo de Ancud
Batimetría particular	No

Fuente: Elaboración propia.

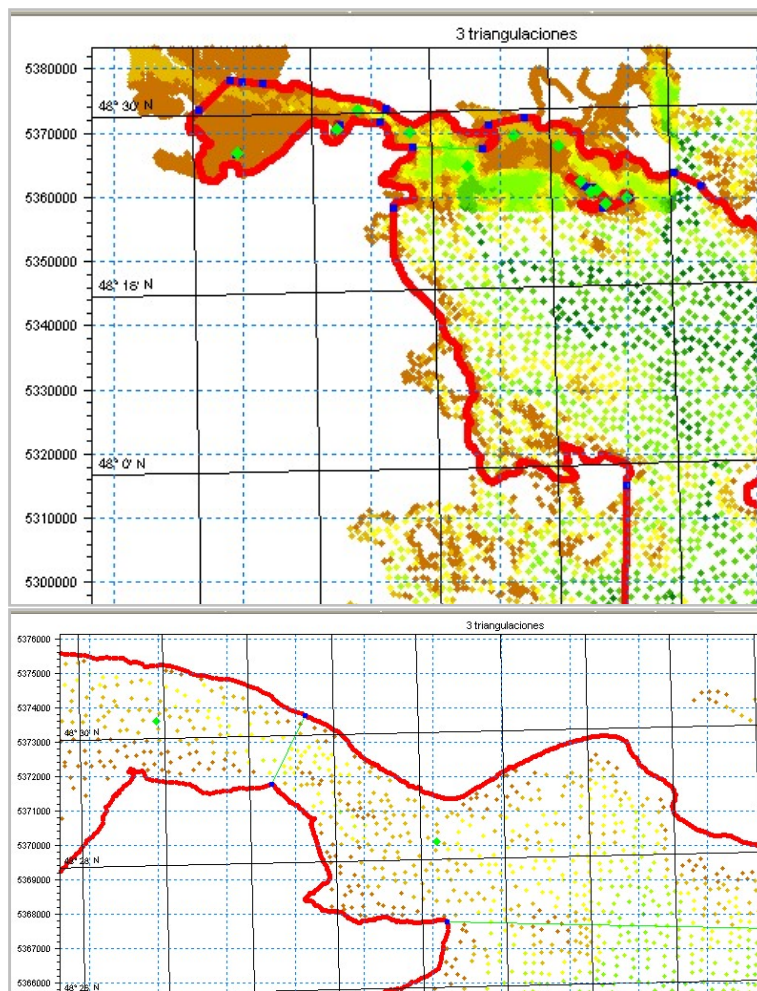


Figura 15: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Punta Coronel.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2 Viento

Los registros de viento no presentaron datos anormales identificables por ninguno de los chequeos aplicables (descritos en la sección 3.4.1.1).

En Punta Coronel los registros de viento fueron levantados sobre una meseta que se encuentra inmediatamente tras la línea de costa, a aproximadamente 1 [km] al oeste del

punto de medición de oleaje. Dicho sector se encuentra a una altitud de 20 [msnm], y el anemómetro se montó en una estructura que lo hace quedar 10 metros más arriba. La presencia del desnivel entre el terreno y el mar, constituye una particularidad que afecta el perfil de viento, provocando que el registro a 30 msnm en la meseta no sea igual que si se tomara 30 [msnm] sobre el agua frente a esta. Si se aplica la corrección por factor topográfico, según se indica en la Tabla 2.b, debe dividirse la intensidad registrada por el factor calculado ($F_T = 1.36$). Lo anterior, deriva en intensidades de viento más bajas que las originalmente medidas. Ahora bien, este coeficiente es adecuado para vientos que en planta inciden perpendicularmente sobre el acantilado (muy minoritarios), y su aplicación a todos los rangos direccionales generaría una subestimación de las intensidades, por lo que se planteó realizar una primera estimación en base a la corrección por altura y rugosidad superficial que disminuye menos la magnitud del viento siendo más adecuada para direcciones oblicuas a la línea del obstáculo, para luego revisar con mayor detalle los casos puntuales que se acerquen a dicha dirección de incidencia. La descripción de los datos así corregidos es la siguiente:

Los vientos se presentaron un 48.7% del tiempo con intensidades inferiores a 2 [m/s]. Además, el porcentaje de tiempo en que el viento provino desde direcciones que no debieran generar oleaje en el sector (NW, N y NE) fue del 38.5% (Gráfico 1 y Gráfico 2). Un 59.6% de las observaciones presentaron magnitudes entre 2 y 7 [m/s], encontrándose solo un 1.7% del tiempo las magnitudes superaron este último valor. La máxima intensidad media medida fue de 14.9 [m/s] y provino desde dirección W.

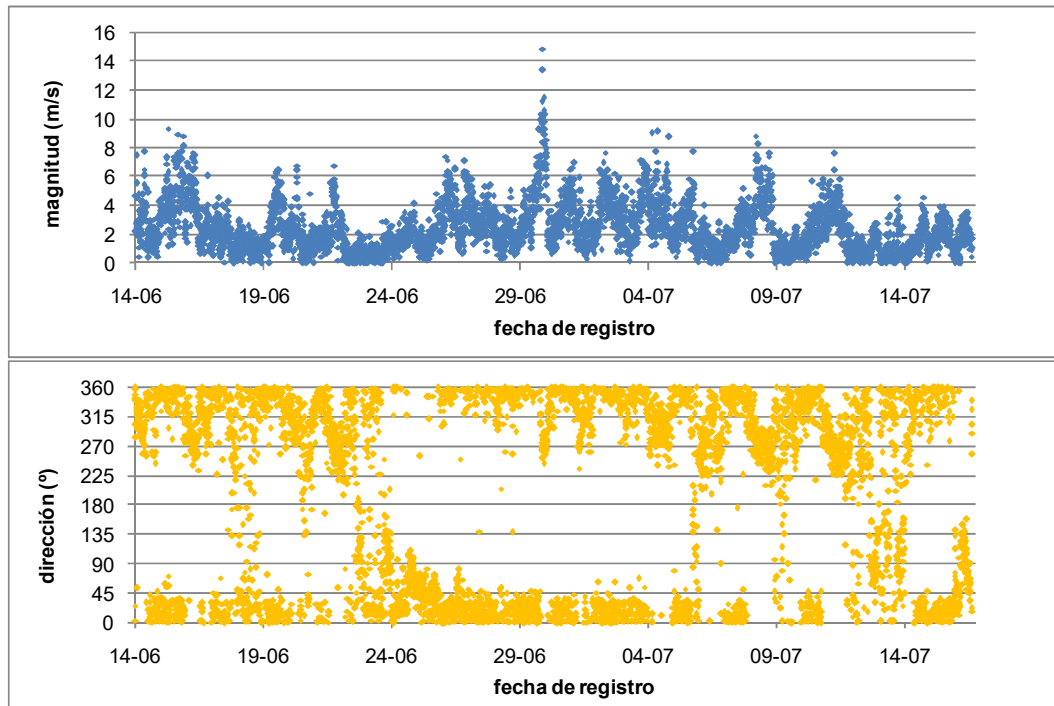


Gráfico 1: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Punta Coronel.
Fuente: Elaboración propia.

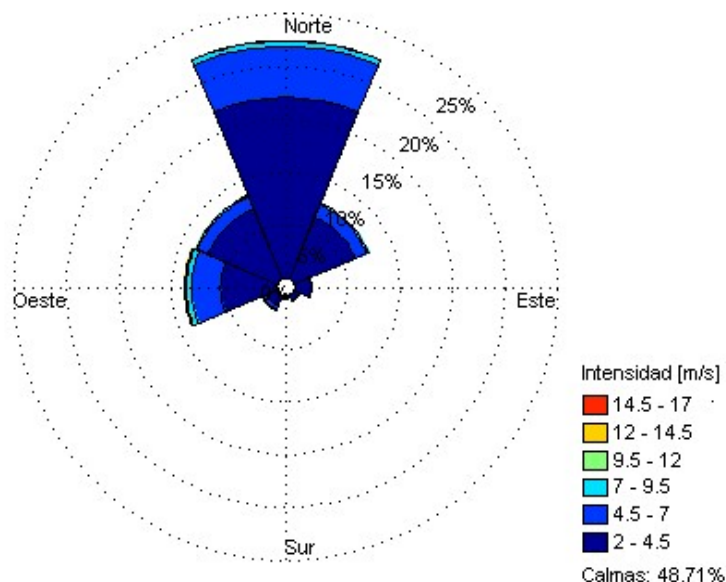


Gráfico 2: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Punta Coronel.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.3 Oleaje

La revisión de los datos de oleaje disponibles para el sector generó varias alertas. En la serie de tiempo de T_p estas se observan en los siguientes factores:

- Línea Plana: Un 54.6% del total de los datos de la serie corresponde al valor de 9.5 [s]. Esto se da a intervalos irregulares, y se presenta tanto con varios datos consecutivos como de manera localmente aislada, a través de todo el periodo de registro.
- Peaks: Fuertes variaciones locales de T_p se dan también a lo largo de todo el intervalo de medición. Si bien algunos corresponden a valores escapados muy por sobre la media (6 casos), la mayoría se dan como una disminución hasta niveles cercanos a 5.0 [s].

Por otro lado, las series de H_s y $Dirp$ presentan alertas por los cambios súbitos de valor entre registros consecutivos.

Procedimientos para reemplazar los datos sospechosos se aplicaron en la serie de T_p , donde solo resultó práctico eliminar los 6 datos aislados con valores escapados, sustituyéndolos por medio de una interpolación lineal entre los valores contiguos. En el caso de las H_s los datos con valores elevados se dan cíclicamente, y el proceso de reemplazo cambiaría por completo la forma de la serie. Finalmente, la irregularidad general en el comportamiento de las direcciones no permite encontrar ninguna tendencia con la cual generar valores sustitutos.

Luego de los procedimientos de filtrado y reemplazo de datos, la inspección de las series de tiempo obtenidas permitió observar las siguientes características:

La mayor frecuencia de incidencia de oleaje se presentó desde el S con 24.8%, seguida del SW con 15.7%, y del E con 14.5% (Gráfico 3 y Gráfico 4). Un 76.3% de las H_s fueron menores a 0.20 [m], mientras un 21.3% del tiempo estuvieron entre 0.20 y 0.60 [m], en tanto solo un 2.3% de las observaciones superaron dicho intervalo. La máxima altura medida fue de 1.01 [m]. Hay una concentración de registros de T_p entre los 9.0 y 9.5 [s], siendo esta condición la reinante a lo largo del periodo en estudio.

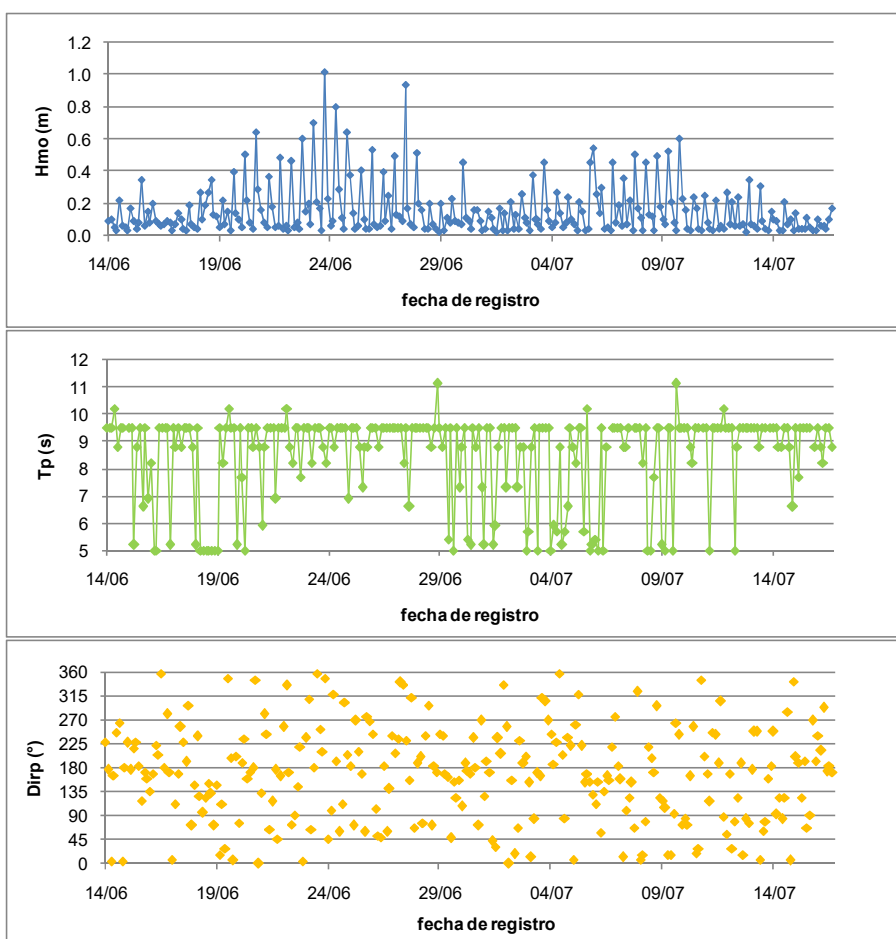


Gráfico 3: Series de tiempo de H_s (arriba), T_p (medio), y $Dirp$ (abajo) del oleaje registrado. Punta Coronel.
Fuente: Elaboración propia.

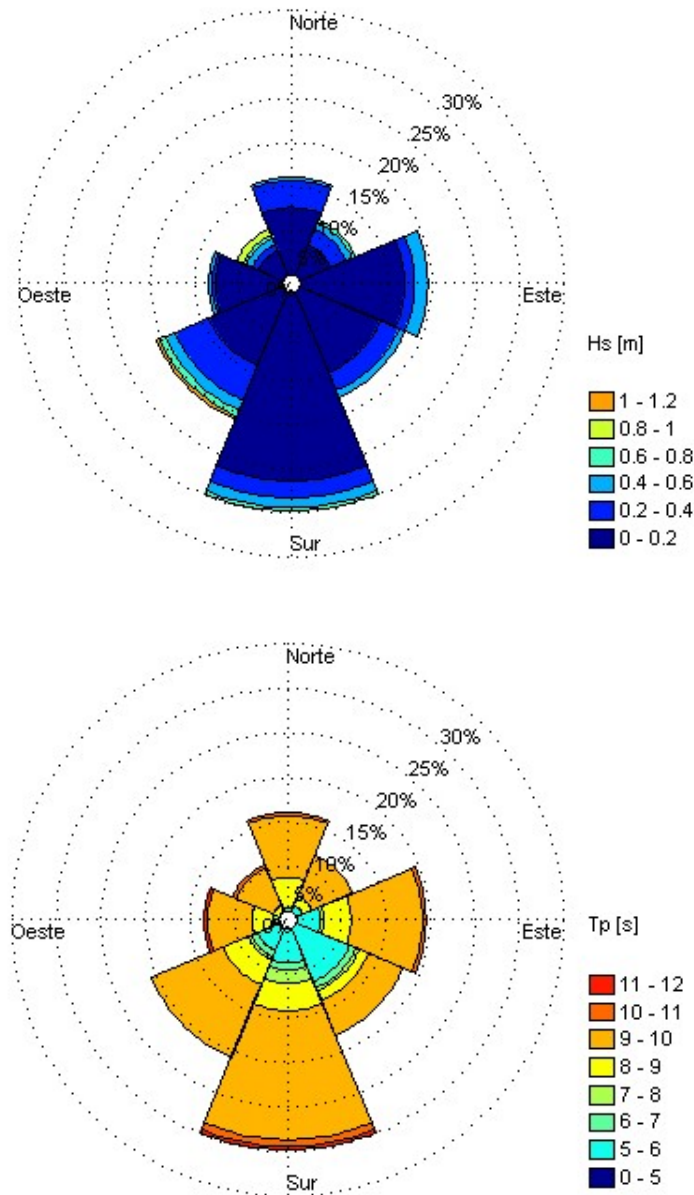


Gráfico 4: Rosas de oleaje registrado con intervalos de H_s (arriba) y T_p (abajo). Punta Coronel.
Fuente: Elaboración propia.

En este caso se ha identificado un comportamiento singular en los registros de H_s , que a priori parece mostrar más relación con la señal de marea que con los vientos. El Coeficiente de Pearson calculado para las series de H_s y nivel del mar (discretizadas cada 3 [hr]) fue de 0.35, lo que indica una correlación directa pero baja. Por otra parte, en el Gráfico 5 se observa como los valores elevados de H_s se dan solo en condiciones de marea alta, llegando a extremos más acentuados en los periodos de sicigias.

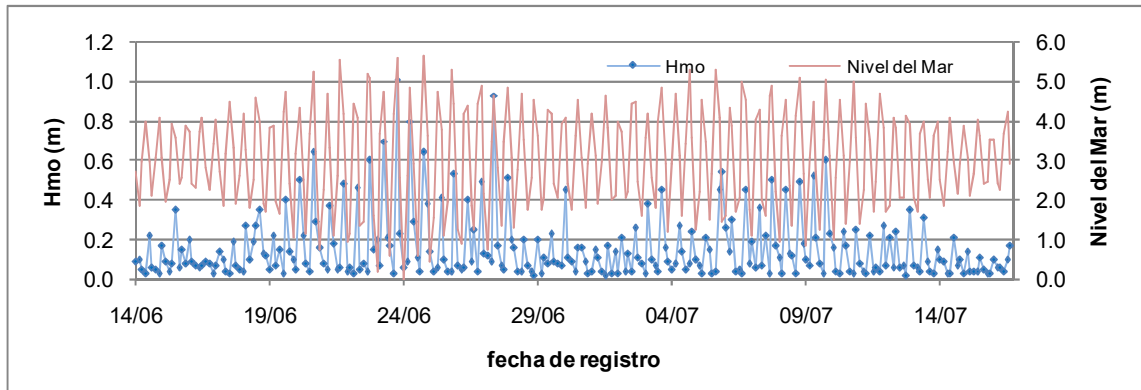


Gráfico 5: Comparación de series de tiempo de H_s y nivel del mar registrados. Punta Coronel.

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior podría indicar una influencia importante sobre las condiciones de oleaje de las variaciones del nivel del mar y/o de las corrientes producidas por estas. Para abordar este tema, se planteó realizar primero las estimaciones del oleaje en base solo a la información de vientos, para ver donde se producían diferencias con los registros, y seguir luego con la evaluación de la acción de otros fenómenos.

4.2 SANTO DOMINGO

La localidad de Puerto Santo Domingo se encuentra en una ensenada de la ribera este del Canal Refugio, el cual está ubicado entre la Isla Refugio y el continente, en la XI Región de Aysén. El canal tiene conexión hacia el Océano Pacífico a través de sus dos bocas, la sur que da al Canal Moraleda, y la norte que da al Golfo del Corcovado (Figura 16 y Figura 17).

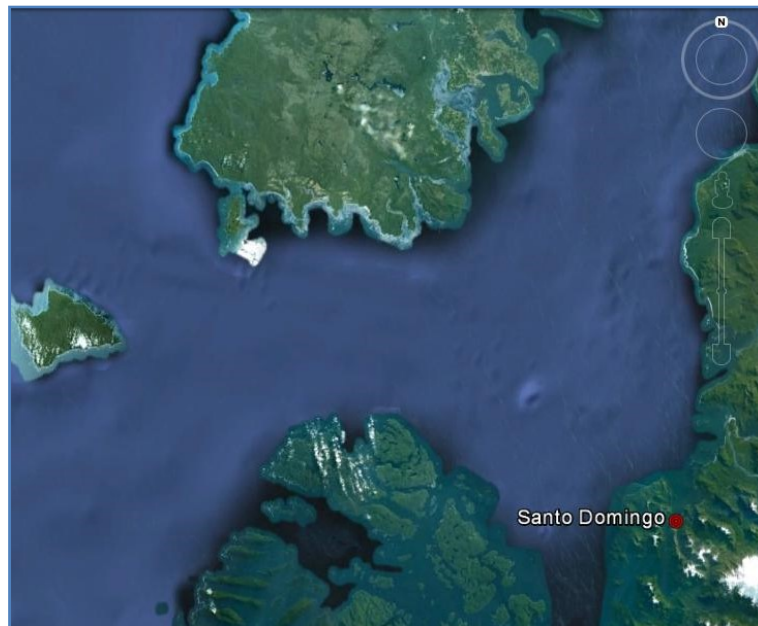


Figura 16: Imagen satelital zona general. Santo Domingo.

Fuente: Google Earth.



Figura 17: Imagen satelital zona particular. Santo Domingo.

Fuente: Google Earth.

4.2.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS

El periodo de medición de oleaje abarcó 39 días, entre el 25 de Febrero y el 3 de Abril del año 2009. En simultáneo a lo anterior, se midieron valores de magnitud y dirección del viento en la costa cercana. La información relativa a los equipos utilizados se expone en la Tabla 7.

En Santo Domingo, el equipo se posicionó sobre una estructura que lo dejó a 10 metros de altura sobre el terreno. Según fotografías realizadas durante la instalación del anemómetro, la costa en el lugar es plana, por lo que el equipo quedaría prácticamente a la misma altura sobre el nivel del mar, y no habría obstáculos cercanos que modifiquen los patrones de viento. En consecuencia, en este caso no hay razón aparente que impida asumir que los datos medidos representan adecuadamente las condiciones de viento existentes sobre el agua en la zona de la ensenada.

Tabla 7: Información equipos de registro de viento y oleaje. Santo Domingo.

Registro Vientos		Registro Oleaje	
tipo equipo	Anemómetro	tipo equipo	ADCP
marca	Young	marca	Nortek
datalogger	Campbell Sc.	modelo	AWAC
		frecuencia	600 kHz
latitud	Sin Información	latitud	43°57'57.56" S
longitud	Sin Información	longitud	73°06'09.96" W
altura	10 msnm.	profundidad	16 m
declinación mag.	10.8°	declinación mag.	10.8°
intervalo registro	10 min	intervalo registro	3 hrs
n datos	5239	n datos	295

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 DATOS

4.2.2.1 Batimetría

Se contó con información de batimetría y línea de costa de las fuentes expuestas en la Tabla 8. La representación gráfica de los datos se muestra en la Figura 18. Durante el periodo de registro de oleaje el nivel del mar alcanzó un máximo de 3.1 [m] sobre el NRS.

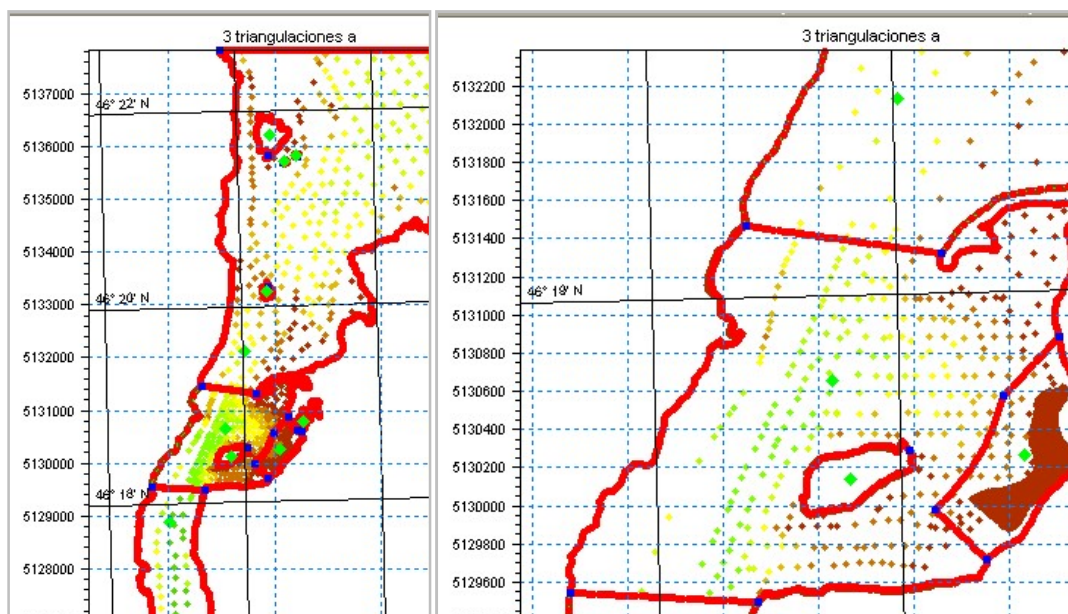


Figura 18: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Santo Domingo.

Fuente	Descripción
Carta SHOA N° 8211a	Canal Refugio y Puerto Santo Domingo
Carta SHOA N° 8211b	Puerto Santo Domingo
Batimetría particular	Si

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2 Viento

En los datos de viento los chequeos realizados no arrojaron evidencia de posibles problemas.

Un 62.1% de las observaciones presenta magnitudes inferiores a 2.0 [m/s], mientras un 34.0% estuvieron entre 2.0 y 6.0 [m/s]. El 3.8% restante se encuentra sobre 6.0 [m/s], midiéndose magnitudes extremas sobre los 8.0 [m/s] en cada rango, con un máximo de 10.7 [m/s] desde dirección SE.

Solo un 17.4% de los registros presentaron direcciones desde rangos capaces de generar oleaje (SW al NE pasando por el cuarto cuadrante). Las frecuencias más notables se dieron del N con 11.8%, y del NW con 5.6% (Gráfico 6 y Gráfico 7).

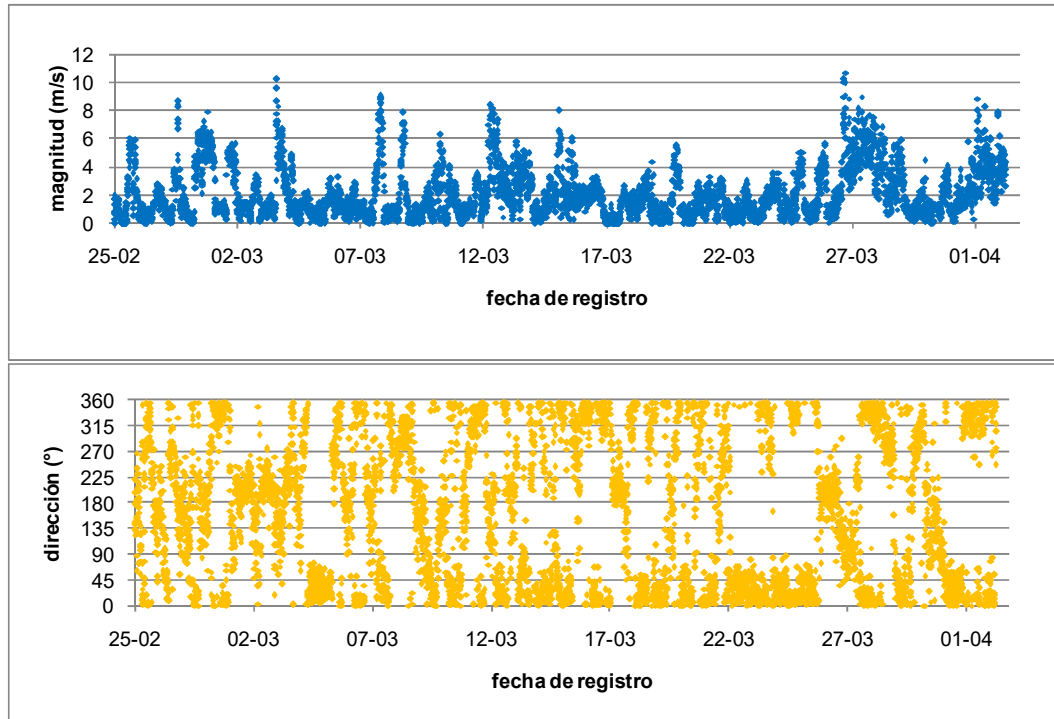


Gráfico 6: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Santo Domingo.
Fuente: Elaboración propia.

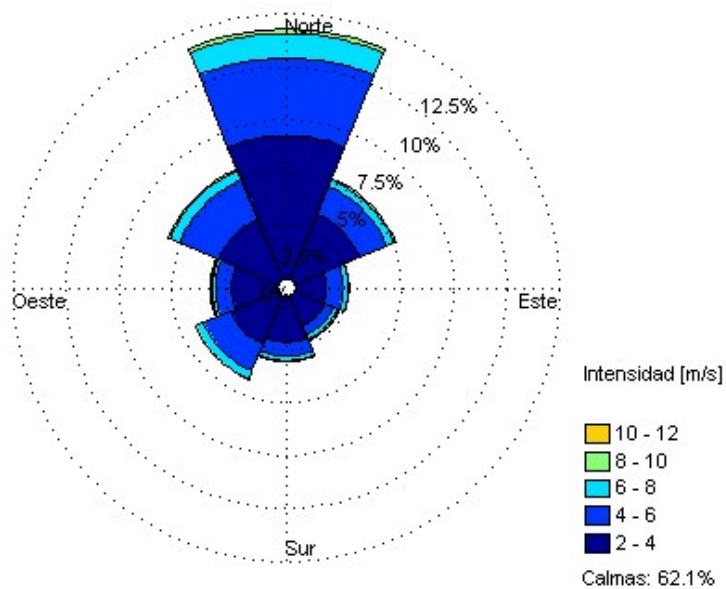


Gráfico 7: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Santo Domingo.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.3 Oleaje

La revisión de la serie de tiempo de H_s solo presentó particularidades en cuanto a los peaks, debido a tres valores escapados que fueron reemplazados con una interpolación lineal. En el registro de T_p la situación resultó más complicada, dado que un 25.4% de los valores se escapa del comportamiento general (T_p entre 1.5 y 2.5 [s]), ubicándose en torno a los 4.0 [s]. Debido a la gran cantidad de datos involucrados, no es factible hacer algún tipo de interpolación para reemplazarlos, por lo que se opta por mantenerlos para luego evaluar las particularidades que se encuentran en la comparación con las estimaciones. En el caso de las direcciones se repiten las alertas relativas a los fuertes cambios de dirección, no permitiendo realizar una intervención satisfactoria a la serie de tiempo.

Con lo anterior, la información disponible de oleaje indica que el 76.9% de las H_s medidas fueron inferiores a 0.20 [m], el 21.4% estuvo entre 0.20 y 0.30 [m], y solo un 1.7% dicho nivel (Gráfico 8 y Gráfico 9). Las observaciones presentaron frecuencias de alrededor del 10% desde la mayoría de los rangos direccionales, destacándose solo el rango W con un 22.0%. Cerca de un 80% de los T_p se encontraron entre 1.5 y 2.5 [s], presentándose intermitentemente valores que escapan a la tendencia y se concentran en torno a los 4.0 [s].

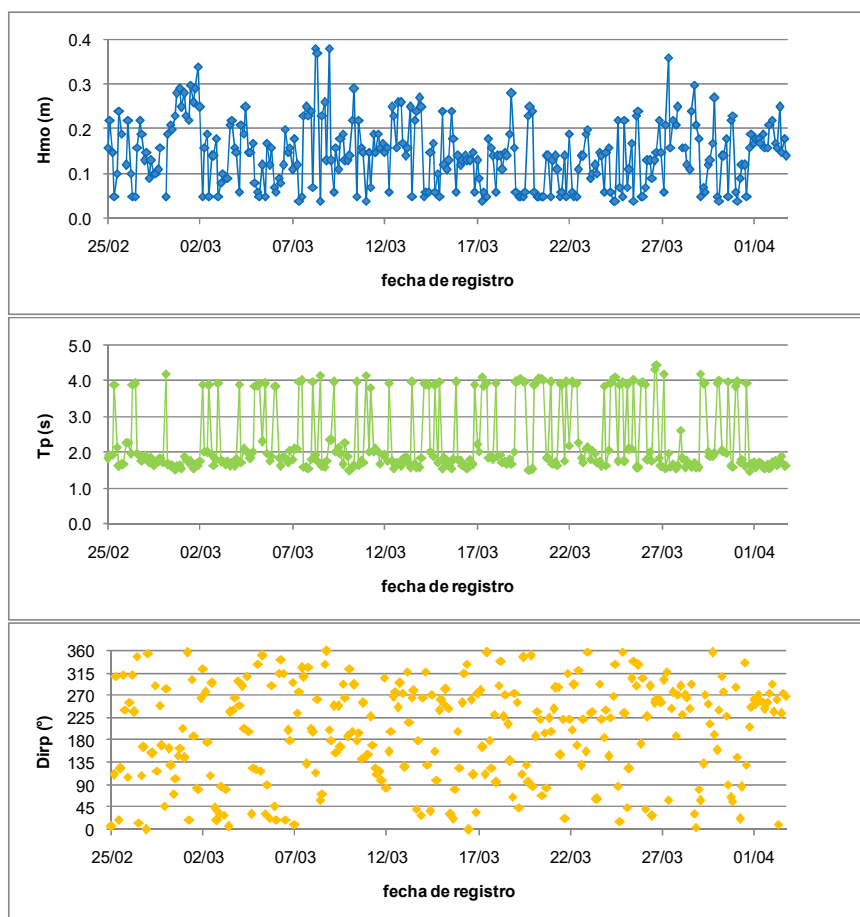


Gráfico 8: Series de tiempo de H_s (arriba), T_p (medio), y $Dirp$ (abajo) del oleaje registrado. Santo Domingo.
 Fuente: Elaboración propia.

Esta mirada general de la información registrada permite notar particularidades como la baja presencia de vientos desde direcciones dentro del fetch (que se concentran en torno al N), la medición de condiciones de oleaje de baja severidad (que a priori podría ser coherente con la reducida extensión del fetch), y el registro de *Dirp* desde todos los rangos direccionales (lo que no podría ser explicado mediante estimaciones paramétricas).

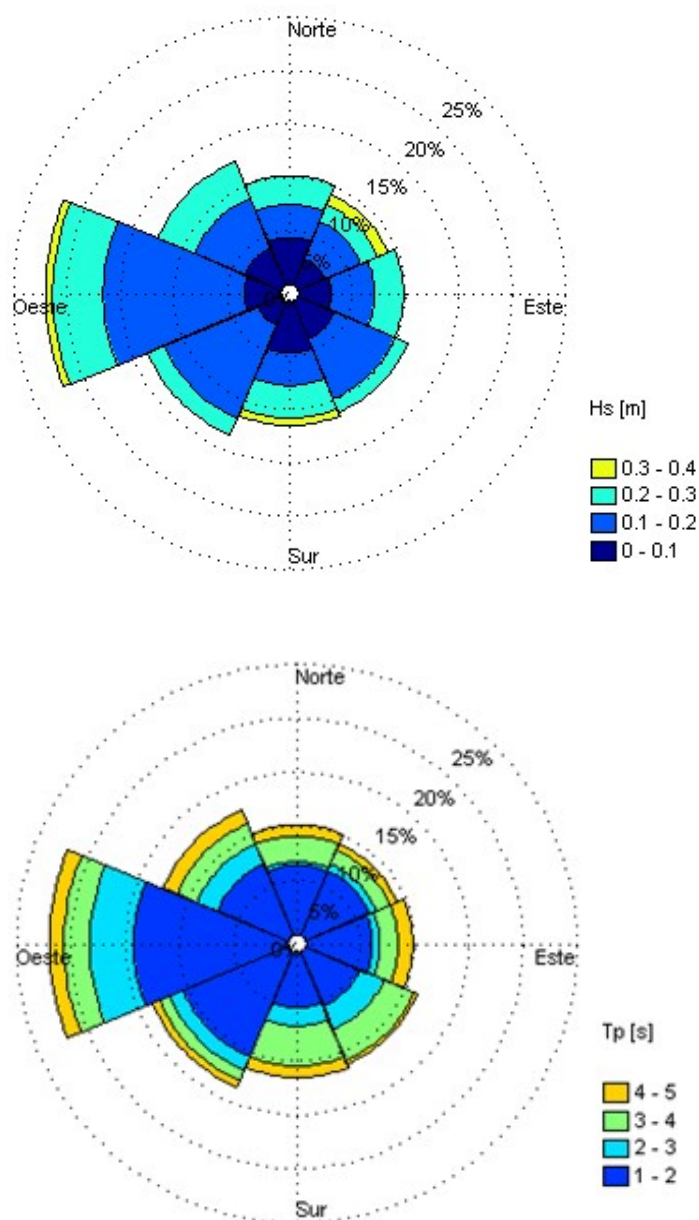


Gráfico 9: Rosas de oleaje registrado con intervalos de H_s (arriba) y T_p (abajo). Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 MELIMOYU

El Seno Melimoyu se encuentra en la boca norte del Canal Moraleda, hacia el margen continental. Sus dimensiones son de aproximadamente 10 [km] de largo por 4 [km] de ancho. Sus aguas están comunicadas con el mencionado canal y luego con el Océano Pacífico por la multitud de fiordos del sector, siendo la abertura más importante la Boca del Guafo (Figura 19 y Figura 20).

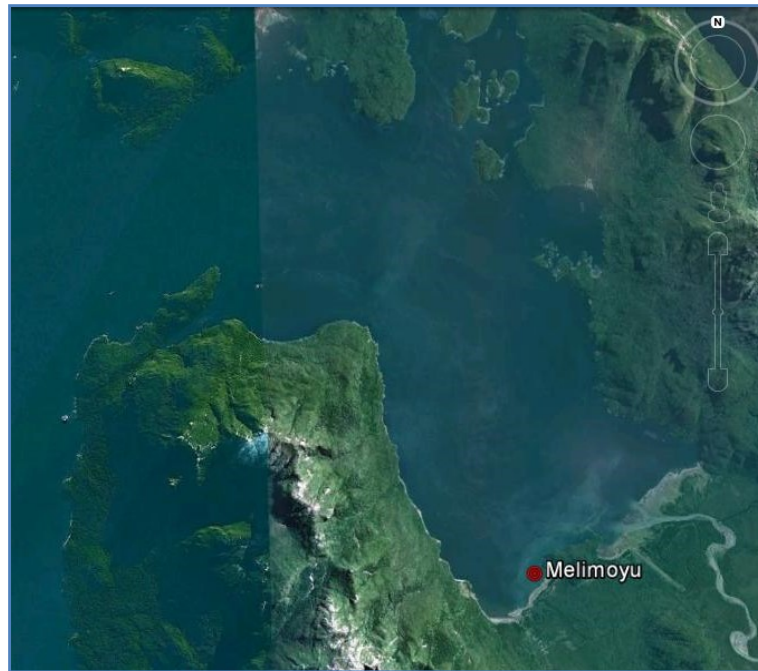


Figura 19: Imagen satelital zona general. Melimoyu.
Fuente: Google Earth.

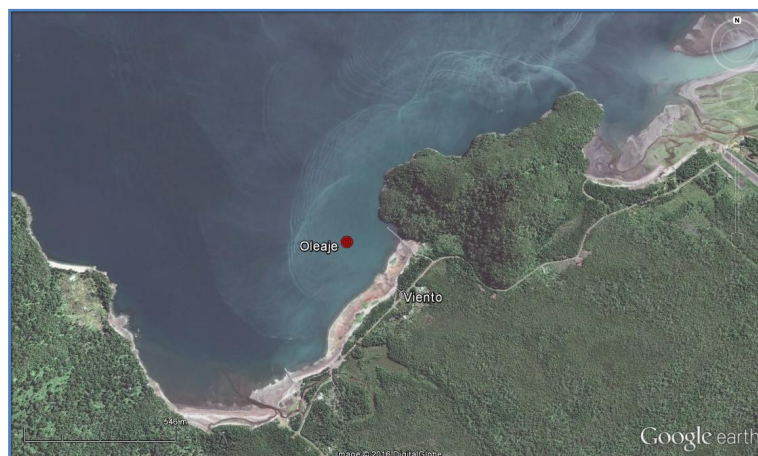


Figura 20: Imagen satelital zona particular. Melimoyu.
Fuente: Google Earth.

4.3.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS

Se registraron datos de oleaje durante 33 días, desde el 28 de Julio al 29 de Agosto del año 2009. Se realizaron mediciones simultáneas de viento, pero hubo un desperfecto que afectó los registros entre el 8 y el 26 de Agosto, lo que derivó en que no se pudo obtener información de ese intervalo. En consecuencia, se contó solo con 1626 sets de datos de viento, los que coinciden en el tiempo con 108 registros de oleaje. Más información de los equipos utilizados se entrega en la Tabla 9.

En este sector, la instalación del anemómetro se hizo sobre la estructura de una torre de agua presente en el sector cercano al punto de registro de oleaje, quedando a una altura de aproximadamente 20 [msnm], en una zona donde el terreno es bastante plano.

El Seno Melimoyu está rodeado de una topografía irregular con pronunciados relieves. Se destacan los cerros ubicados inmediatamente al W que alcanzan incluso alturas de 1 [km] y que bloquean los vientos desde dicha dirección, como también es importante la presencia de una la zona montañosa hacia el E. Si bien estas particularidades afectan al Seno y su zona costera de forma general, una característica singular se presenta inmediatamente al E del punto donde se registraron los vientos, debido a la presencia de un cerro que alcanza hasta unos 160 metros de altura, y cuya influencia puede generar patrones diferentes a los existentes en la generalidad del cuerpo de agua en estudio. No existe entre los antecedentes información respecto a este asunto.

Tabla 9: Información equipos de registro de viento y oleaje. Melimoyu.

Registro Vientos		Registro Oleaje	
tipo equipo	Anemómetro	tipo equipo	ADCP
marca	Young	marca	Nortek
		modelo	AWAC
datalogger	Campbell Sc.	frecuencia	600 kHz
latitud	Sin Información	latitud	44°05'55.62" S
longitud	Sin Información	longitud	73°07'12.78" W
altura	20 msnm.	profundidad	17 m
declinación mag.	10.8°	declinación mag.	10.8°
intervalo registro	10 min	intervalo registro	3 hrs
n datos	1626	n datos	108

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 DATOS

4.3.2.1 Batimetría

Debido a que la información de línea de costa obtenida de las cartas SHOA no cubrió toda la zona de generación, fue necesario digitalizar una imagen satelital georreferenciada para completar los sectores faltantes. También se usó batimetría particular de la zona de interés, la que fue levantada en el marco de un proyecto de conectividad. Detalle de las fuentes utilizadas se presenta en la Tabla 10. En la Figura 21 se presenta la visualización del conjunto de la información de batimetría y línea de costa contemplada para este lugar. En este sector la marea llegó un nivel máximo de 2.2 [m] sobre el NRS durante el intervalo de tiempo en estudio.

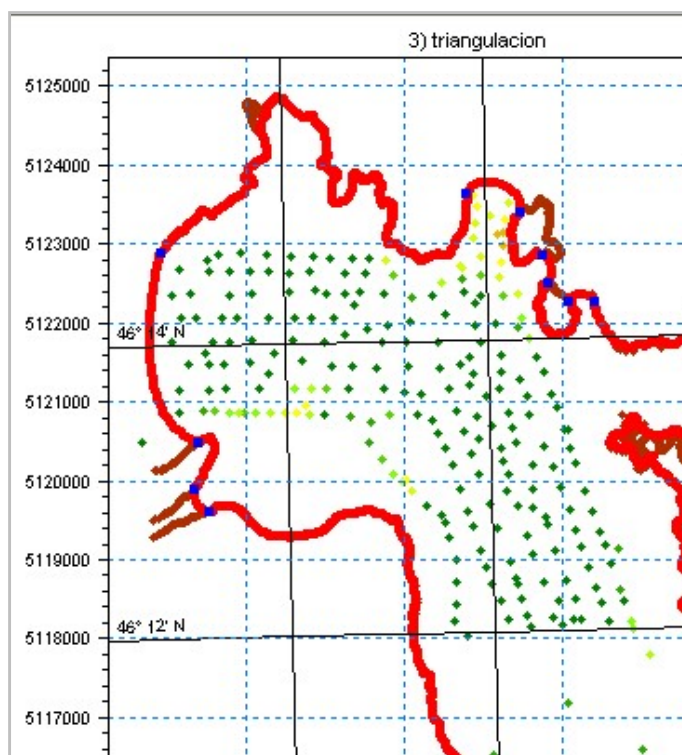


Figura 21: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Melimoyu.

Fuente	Descripción
Carta SHOA N° 8211a	Canal Refugio y Puerto Santo Domingo
Carta SHOA N° 8400	Islas Guaitecas a Isla Guap
Google Earth	Costa Digitalizada de la parte sur del Seno.
Batimetría particular	Si

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2 Viento

Las series de tiempo de viento no evidenciaron problemas durante su revisión, más allá de la ya mencionada brecha de 16 días generada por el mal funcionamiento del anemómetro.

El 68.2% de las observaciones presentaron intensidades menores a 2.0 [m/s], y un 27.0% entre 2.0 y 4.0 [m/s], quedando el restante 5.0% entre 4.0 y 8.0 [m/s]. Todas las observaciones comprendidas en este último intervalo provinieron de direcciones del cuarto cuadrante.

Los vientos provinieron en un 27.4% del tiempo desde direcciones en las que el punto de interés queda completamente abierto (SW al N, pasando por el cuarto cuadrante). Se observaron frecuencias de 12.6% desde el NW, 8.5% del N, y 5.7% del W (Gráfico 10 y Gráfico 11).

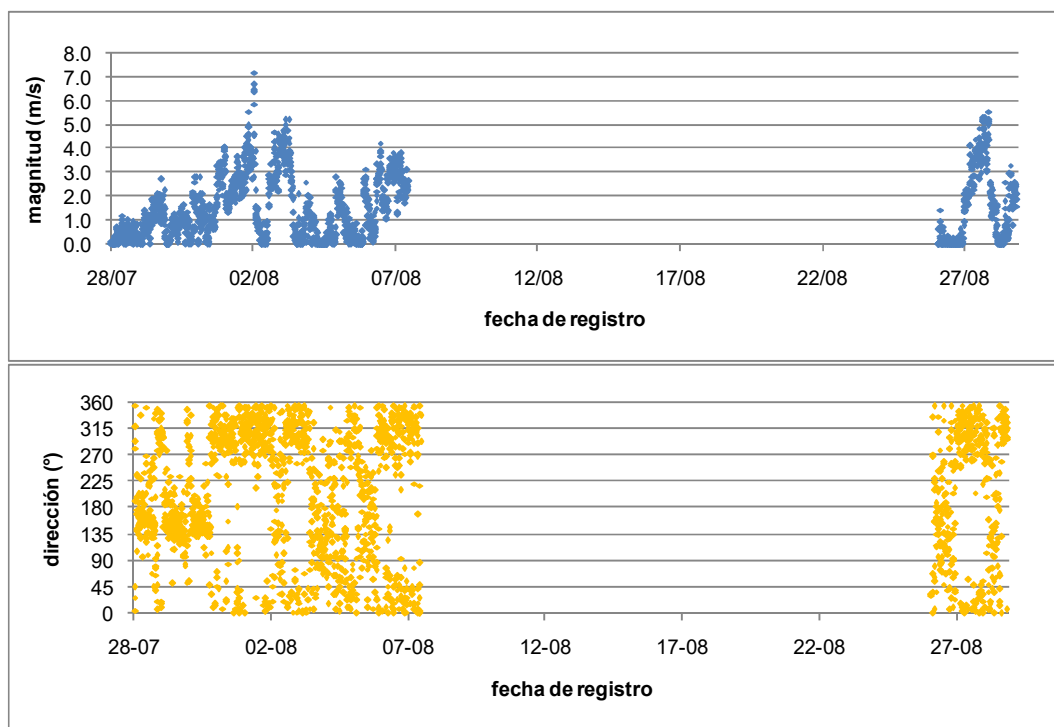


Gráfico 10: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

Un punto notable es que las intensidades de viento medidas resultan a primera vista muy reducidas para la zona geográfica en cuestión, donde son comunes los temporales de viento en la época del año en que se realizaron los registros

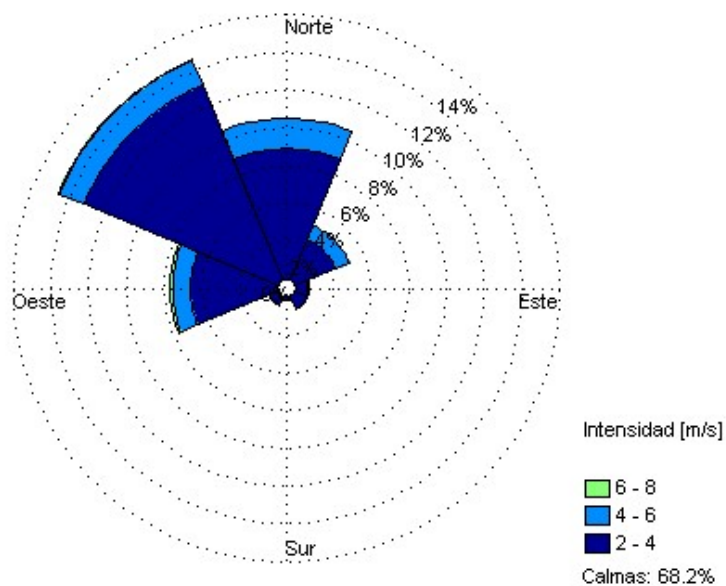


Gráfico 11: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.3 Oleaje

La revisión de los registros de oleaje sugiere una posible irregularidad en aquellas oportunidades donde los datos de *Hs* se elevan sobre el comportamiento general, aunque los valores que se presentan no son demasiado altos para las características del sector y tienen cierta consistencia entre datos contiguos, por lo que no se consideró a priori eliminar dichos valores, sino revisarlos primero en la comparación con los resultados de las estimaciones. Un caso distinto es el de las *Dirp*, que presentan una alta variabilidad entre registros consecutivos, lo que a la vez no permite aplicar algún procedimiento de corrección por la falta de tendencia que tomar como base.

Los registros indican que el oleaje incidió la mayoría del tiempo desde direcciones del cuarto cuadrante, con 27.7% desde el NW, mientras desde el W y el N suman un 29.7% (Gráfico 12 y Gráfico 13). El 71.9% de las observaciones presentaron *Hs* bajo 0.20 [m], y 18.8% entre 0.20 y 0.40 [m], quedando un 9.0% de las observaciones sobre dicho límite, todas desde direcciones NW y N. Los *Tp* registrados estuvieron contenidos prácticamente en su totalidad en el intervalo de 2.0 a 4.0 [s].

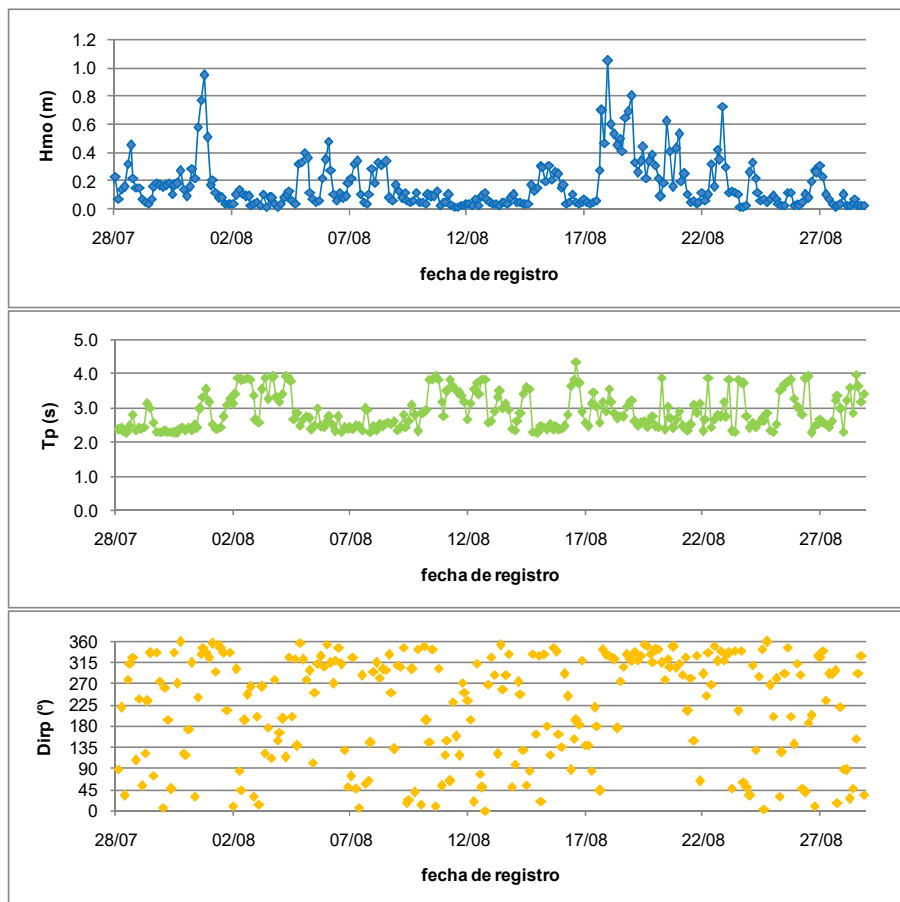


Gráfico 12: Series de tiempo de *Hs* (arriba), *Tp* (medio), y *Dirp* (abajo) del oleaje registrado. Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

También resulta destacable que la distribución direccional de las condiciones de oleaje más severas dentro de la estadística parece ser muy coherente con la geometría del fetch.

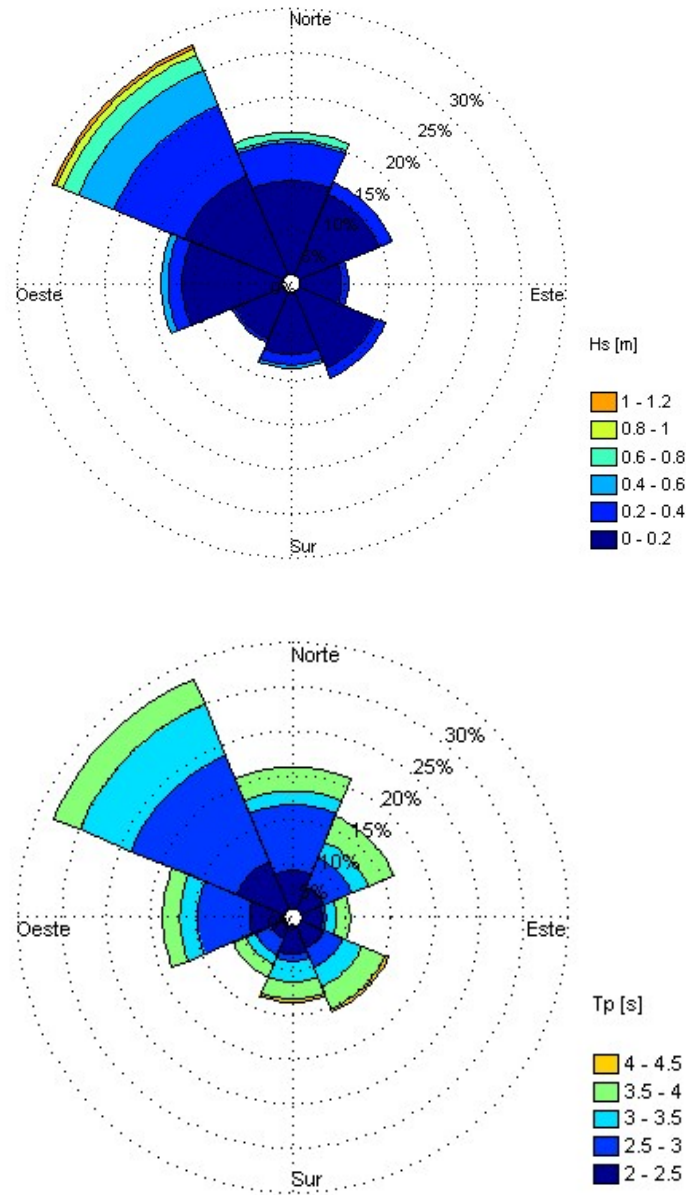


Gráfico 13: Rosas de oleaje registrado con intervalos de H_s (arriba) y T_p (abajo). Melimoyu.
Fuente: Elaboración propia.

4.4 BAHÍA CATALINA

El sector de Bahía Catalina se ubica hacia el norte de la ciudad de Punta Arenas, en la ribera oeste del Estrecho de Magallanes, en la XII Región (Figura 22). El lugar preciso de interés se encuentra frente a una línea de costa con orientación noroeste-sureste, en un sector del estrecho que tiene un ancho de aproximadamente 30 [km] (Figura 23).



Figura 22: Imagen satelital zona general. Bahía Catalina.
Fuente: Google Earth.

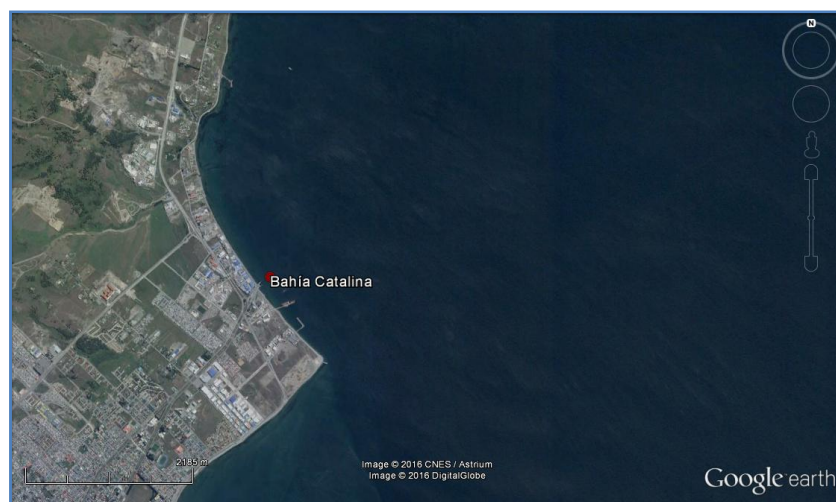


Figura 23: Imagen satelital zona particular. Bahía Catalina.
Fuente: Google Earth.

El área de generación del oleaje que incide sobre este punto, abarca el Estrecho de Magallanes desde las inmediaciones de la Segunda Angostura por el norte, hasta la entrada de la Bahía Inútil y costa norte de la Isla Dawson por el sureste, siendo limitada al este por la Isla Grande de Tierra del Fuego.

4.4.1 INFORMACIÓN REGISTROS

El primer registro de oleaje (*invierno*) comprendió un intervalo de 42 días, entre el 20 de Agosto y el 30 de Septiembre del año 2011, mientras el segundo (*verano*) abarcó 49 días entre el 14 de Diciembre del 2011 y el 31 de Enero del 2012. Se contó con un año de estadística de viento en el lugar, de la cual se aislaron los periodos simultáneos a los registros de oleaje. Más información de equipos y registros se entrega en la Tabla 11.

Tabla 11: Información equipos de registro de viento y oleaje. Bahía Catalina.

Registro Vientos		Registro Oleaje	
tipo equipo	Anemómetro	tipo equipo	ADCP
marca	Young	marca	RDI
modelo	05013-L	modelo	WorkHorse
datalogger	Campbell Sc.	frecuencia	1200 kHz
latitud	53°07'17.24"S	latitud	53°07'12.71"S,
longitud	70°52'00.65"W	longitud	70°51'52.34"W.
altura	10 msnm.	profundidad	18 m
declinación mag.	13.7°	declinación mag.	13.7°
intevalo registro	10 min	intevalo registro	3 hrs
n datos invierno	6013	n datos invierno	332
n datos verano	6877	n datos verano	398

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 DATOS

4.4.2.1 Batimetría

La batimetría correspondiente al área involucrada en la generación de oleaje se obtuvo de las fuentes expuestas en la Tabla 12. En la Figura 24 se presentan las visualizaciones de las sondas y puntos de línea de costa disponibles. La marea se presenta en el lugar con régimen mixto, alcanzándose un nivel máximo de 2.4 [m] sobre el NRS, durante los intervalos de tiempo incluidos en este estudio.

Tabla 12: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Bahía Catalina.

Fuente	Descripción
Carta SHOA N° 11400	Estrecho de Magallanes Punta Arenas a Cabo Froward
Carta SHOA N° 11411a	Rada de Punta Arenas
Carta SHOA N° 11411b	Bahía Catalina
Carta SHOA N° 15500	Estrecho de Magallanes
Batimetría particular	Si

Fuente: Elaboración propia.

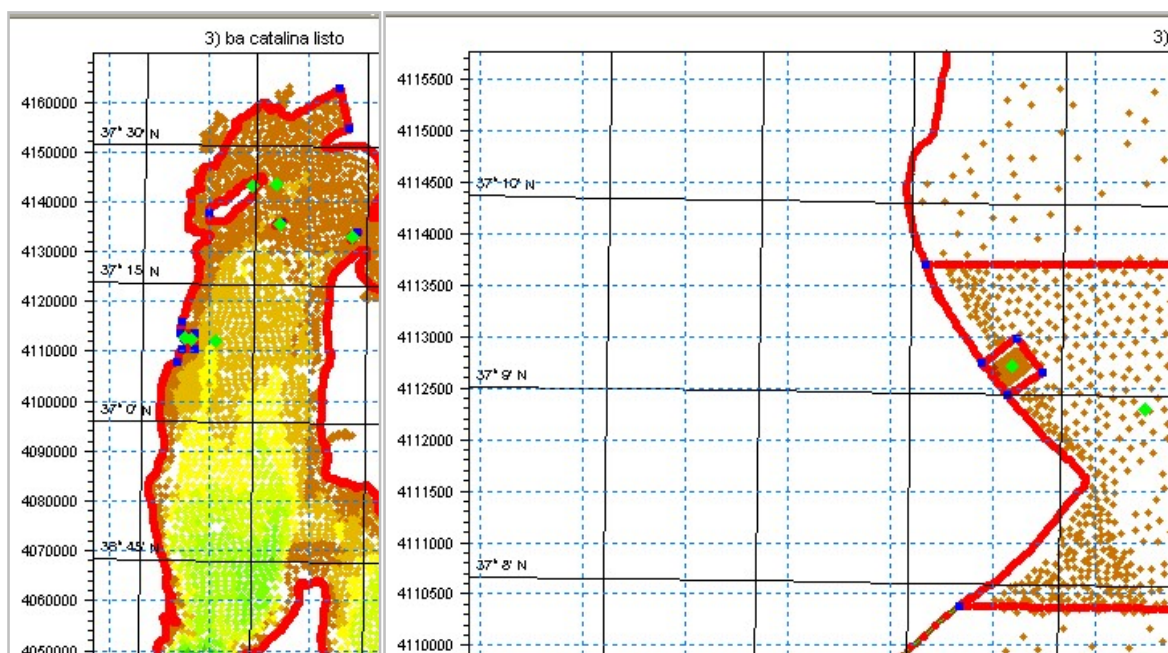


Figura 24: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Bahía Catalina.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2 Invierno

a) Viento

Las pruebas realizadas a los registros de viento no dieron señales de anomalías en su comportamiento general, y solo se presentó como problema puntual la falta de 55 registros en que no se tuvo información al corresponder a intervalos de no funcionamiento del equipo por retiro de datos, o donde se midieron valores erróneos.

Un 24.48% del tiempo el viento presentó intensidades inferiores a 2 [m/s] (Gráfico 15), mientras la mayoría de las observaciones se concentraron en el rango de 2 a 6 [m/s] con un 56.48%, disminuyendo gradualmente en rangos de intensidad mayores, alcanzando un 0.05% de registros mayores a 22 [m/s]. Por otro lado, un 36.1% del tiempo el viento provino desde direcciones que se considera pueden generar oleaje relevante sobre el sector en estudio.

Las intensidades máximas se dieron desde rangos NW y W (alrededor de 23 [m/s]), mientras desde direcciones dentro del fetch la magnitud más elevada fue de 14.2 [m/s] desde el NE.

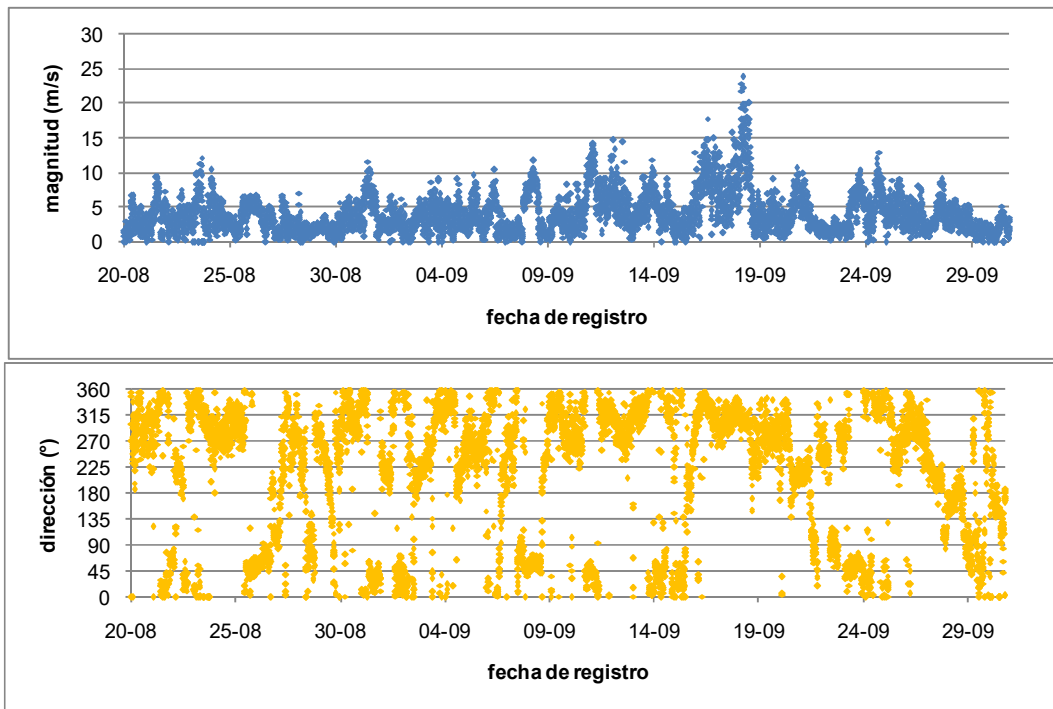


Gráfico 14: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Bahía Catalina, Invierno.
Fuente: Elaboración propia.

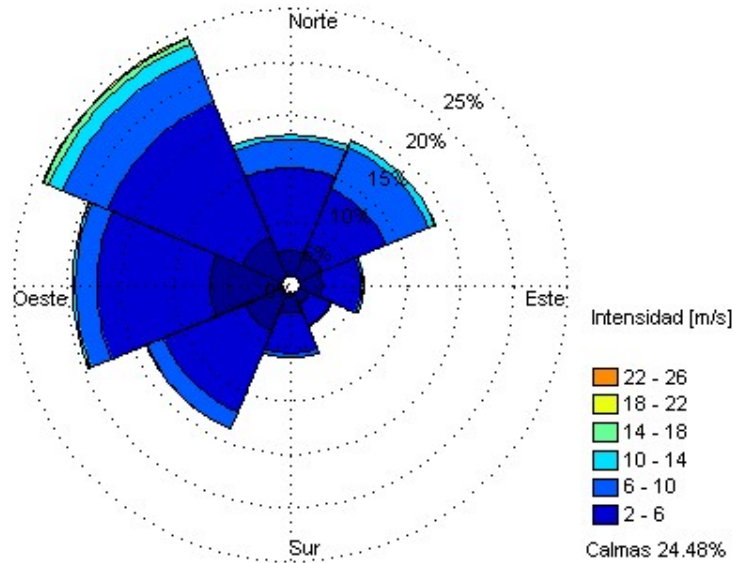


Gráfico 15: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Bahía Catalina, Invierno.
Fuente: Elaboración propia.

b) Oleaje

Siendo este el caso en que se contó con el archivo de datos crudos medidos por el ADCP, se extrajeron los valores de los distintos parámetros del oleaje estimados mediante los tres conjuntos de datos tomados por el equipo, es decir, desnivelación, presión y velocidades orbitales (Gráfico 16). Dichas series de tiempo fueron examinadas para determinar cuál es la que mejor representa las condiciones de oleaje que se dieron en el sector durante la campaña de invierno.

Como primera característica notable se observa que la serie de H_s estimada en base a los datos de presión entrega valores extremadamente bajos (menores a 0.12 m), lo que no es concordante con los vientos presentes y extensión del área de generación, por lo que se descarta el uso de los datos obtenidos en base a dichas mediciones.

En el caso de los datos obtenidos en base a las mediciones de desnivelación, la serie de T_p muestra una gran cantidad de valores irrealmente (bajo cero o excesivamente altos), y la serie de H_s presenta algunos marcados peaks en momentos en que las condiciones de viento no sugieren que sea posible.

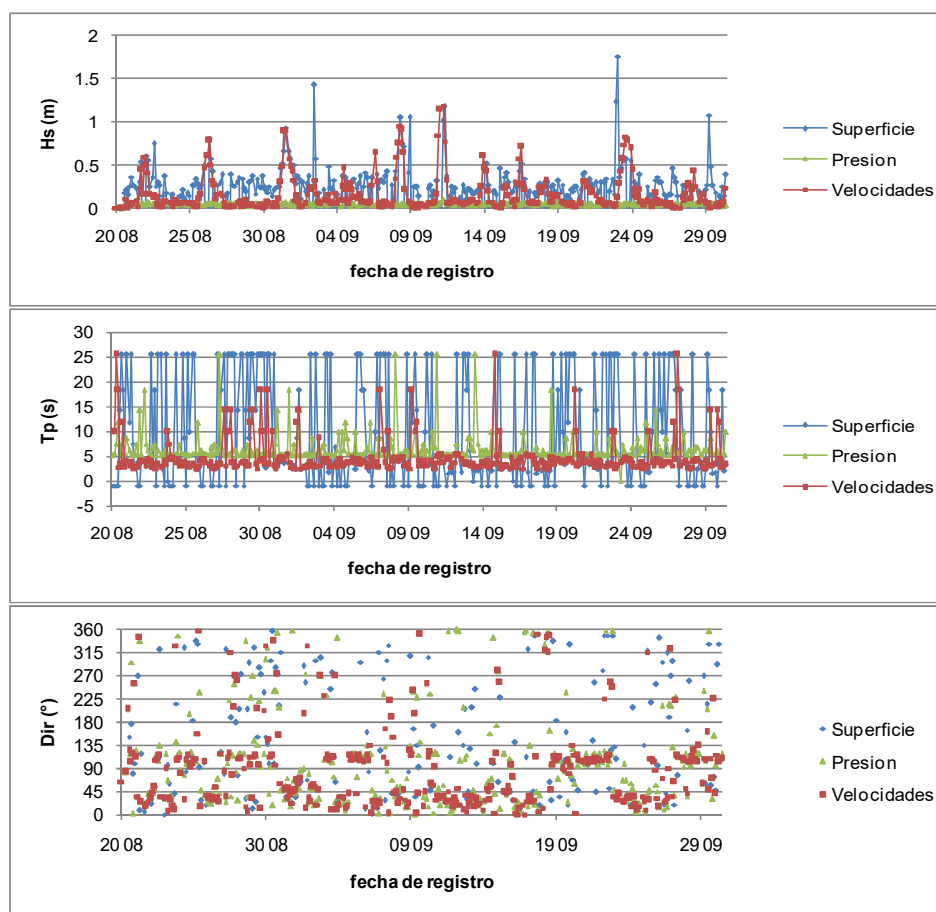


Gráfico 16: Series de tiempo de H_s (arriba), T_p (medio), y Dir (abajo) del oleaje estimado de las distintas mediciones realizadas por el ADCP. Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los parámetros correspondientes a los registros de las velocidades orbitales se presentan con H_s razonables y *a priori* coincidentes con los registros de viento, al igual que la serie de T_p si no se toma en cuenta la aparición de varios valores escapados que se dan en momentos de H_s bajas. En cuanto a las direcciones, mediante las tres técnicas de estimación se presentan notables coincidencias en muchos intervalos a lo largo del periodo en análisis.

En razón a lo anterior, se escogen los parámetros estimados en base a las mediciones de las velocidades orbitales para continuar con los análisis a desarrollar. Dichos datos se sometieron a revisión para poder limpiarlos de los valores erróneos encontrados principalmente en los T_p . Se encontró que al aislar exclusivamente las condiciones con H_s superiores a 0.20 [m] (24.5% del total) se eliminaban todos los registros con problemas, y que los datos que se mantenían presentaban un comportamiento coherente con los registros de viento, a la vez se dejaban de lado solo condiciones de oleaje poco relevantes para los análisis a realizar. Con ello se obtuvieron los tres conjuntos de datos que se muestran en el Gráfico 17, donde la serie de tiempo se transforma en un conjunto de eventos aislados de condiciones de oleaje con variadas características de H_s , T_p y $Dirp$.

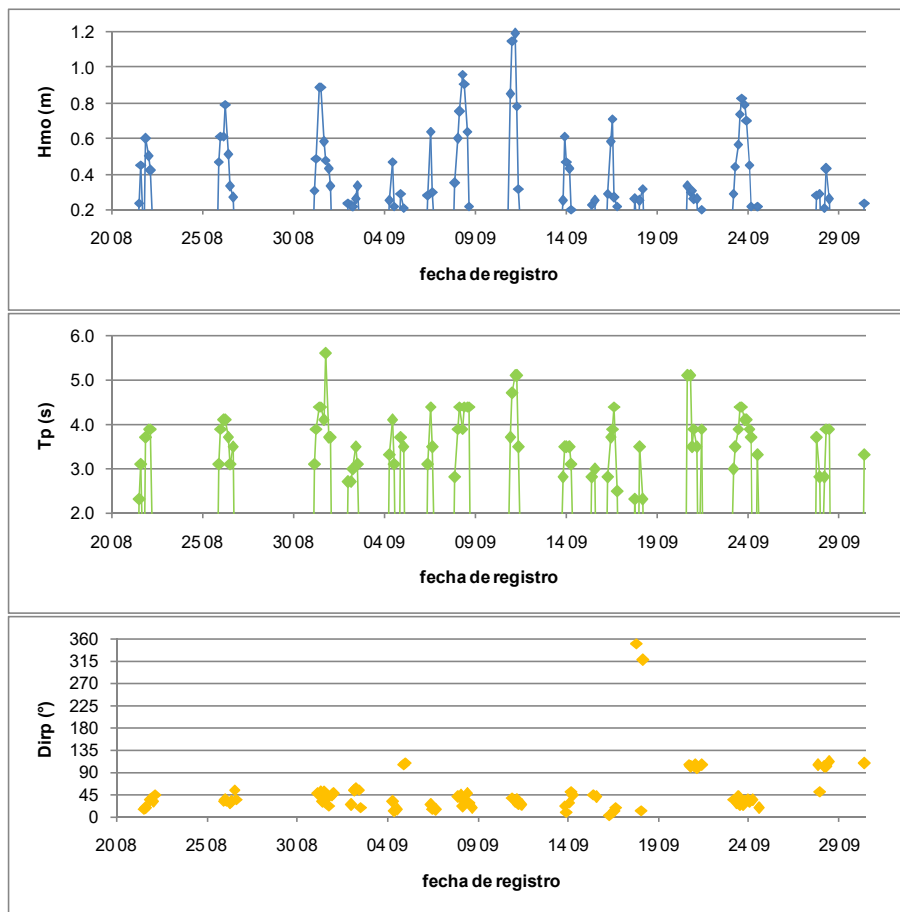


Gráfico 17: Series de tiempo de H_s (arriba), T_p (medio), y $Dirp$ (abajo) del oleaje registrado. Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el Gráfico 18, todos los registros que quedan después de la limpieza de datos representan oleaje desde direcciones dentro de las que definen el fetch (N, NE y E), presentándose las condiciones más severas desde el rango NE, con un extremo de H_s de 1.19 [m], y un T_p máximo de 5.6 [s].

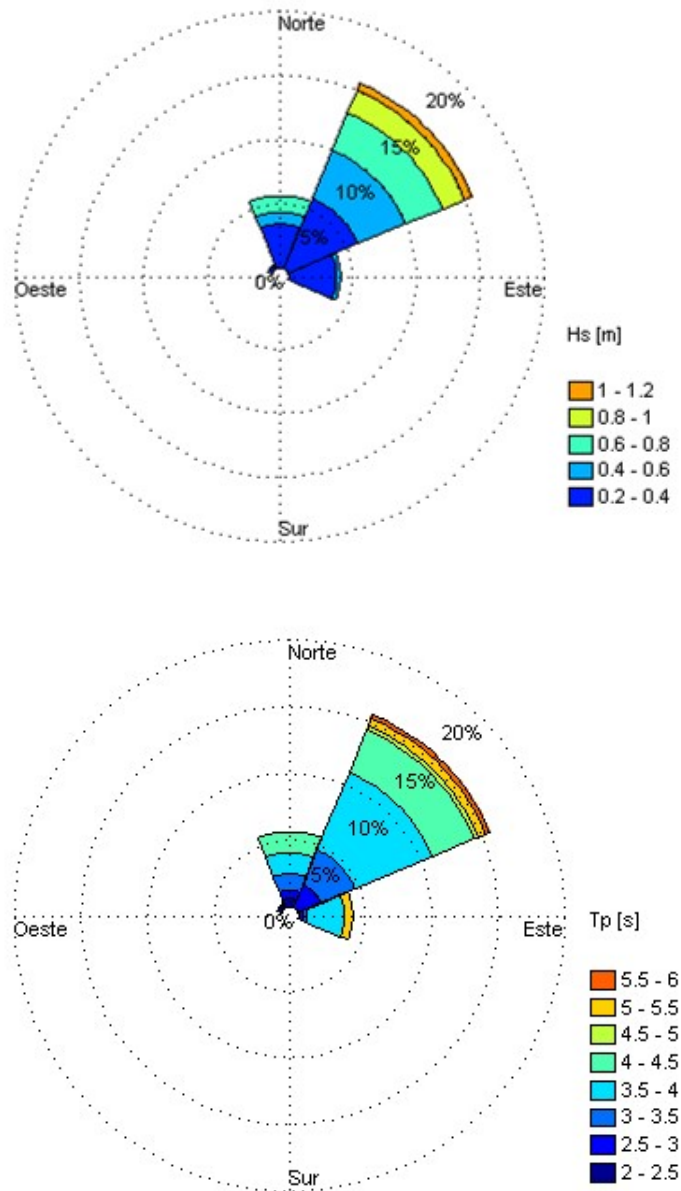


Gráfico 18: Rosas de oleaje registrado con intervalos de H_s (arriba) y T_p (abajo). Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.3 Verano

a) Viento

Las pruebas aplicadas a las intensidades y direcciones del viento no arrojaron signos de alguna anomalía.

Dentro de la campaña de verano las magnitudes de viento fueron relativamente altas, con solo un 13.4% bajo los 2 [m/s]. Un 82.1% del tiempo los datos estuvieron entre 2.0 y 10.0 [m/s], mientras un 4.5% de las intensidades se ubicaron sobre este último valor. El máximo registrado fue de 23.6 [m/s], medido desde dirección W.

La mayoría de las observaciones se concentraron en el NW y W, con 29.7% y 27.8% de las frecuencias, respectivamente. De las direcciones dentro del fetch, el mayor porcentaje de incidencia se encuentra en el N con 8.5% (Gráfico 19 y Gráfico 20).

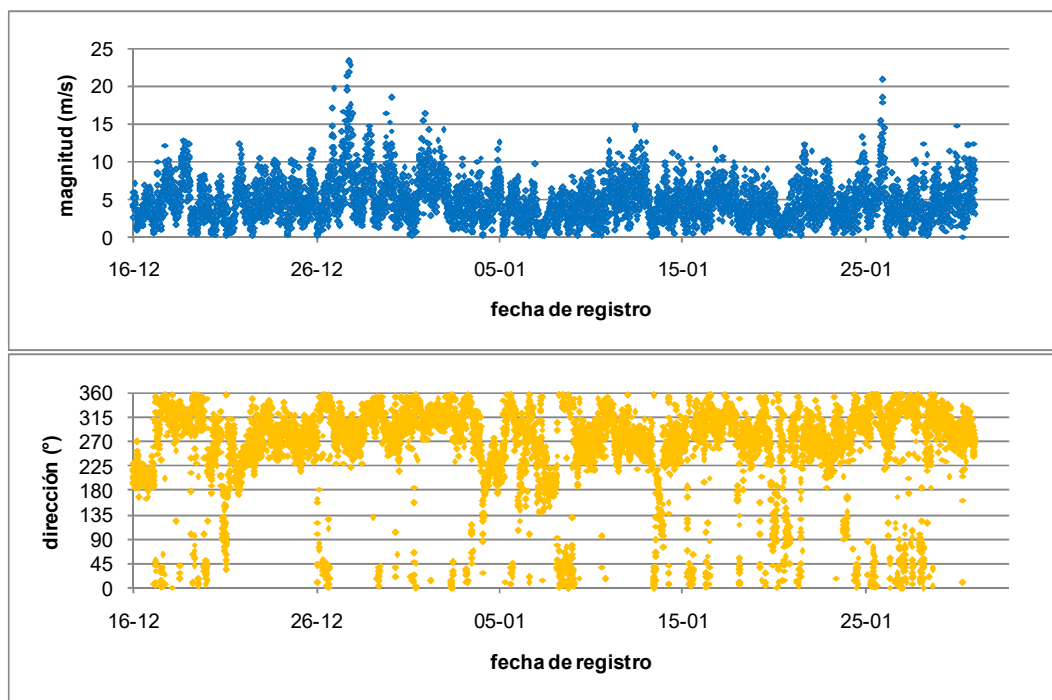


Gráfico 19: Series de tiempo de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

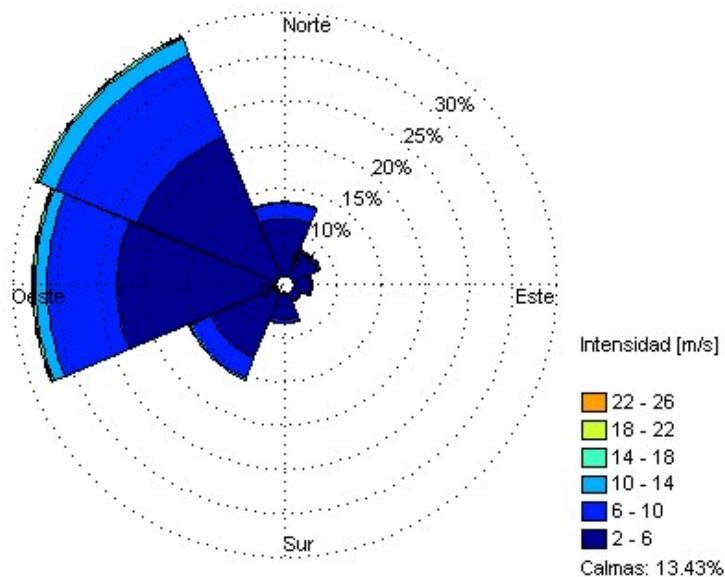


Gráfico 20: Rosa de viento registrada con intervalos de intensidad. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que a pesar de que las condiciones generales de viento fueron severas durante esta campaña, las correspondientes a direcciones dentro del fetch resultaron menos significativas que en la campaña anterior, disminuyendo tanto en intensidad como en frecuencia.

b) Oleaje

En este caso, las revisiones realizadas generaron alerta de varios puntos escapados, tanto en la serie de H_s como de T_p . Dado que los valores que presentan las H_s en cuestión no son demasiado elevados, dichos datos se mantienen para evaluar con las estimaciones si se deben o no a la influencia de los vientos. Distinto es el caso de la serie de T_p donde tres datos deben ser reemplazados puesto que se elevan hasta valores irreales para las características del sector. Además, la serie de T_p presenta como particularidad la presencia de un marcado límite inferior (2 [s]) definido por la frecuencia de corte utilizada en el procesamiento de la información cruda del ADCP para la estimación de los espectros y parámetros de resumen.

El oleaje medido se presentó mayormente desde direcciones NE con 39.9%, y SE con 29.2%, rangos a los que los siguen el E con 11.2%, y el N con 7.3% (Gráfico 21, Gráfico 22 y Gráfico 23). Las H_s estuvieron un 92.6% del tiempo por debajo de 0.20 [m]. El 7.3% restante los valores se repartieron hasta los 0.60 [m], intervalo que presenta solo observaciones con direcciones de los rangos que forman parte del fetch. Los T_p presentan un corte inferior en los 2.0 [s], concentrándose un 79.1% de los registros entre dicho valor y los 3.0 [s], mientras T_p hasta el intervalo de 5.0 a 6.0 [s] se dan en los rangos N, E y SE.

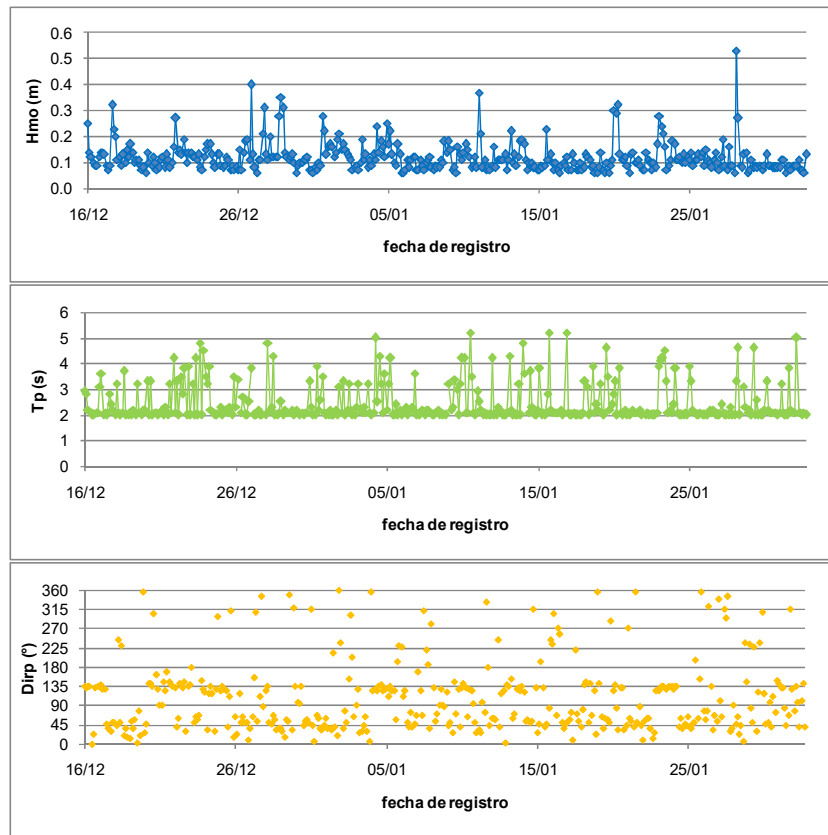


Gráfico 21: Series de tiempo de *Hs* (arriba), *Tp* (medio), y *Dirp* (abajo) del oleaje registrado. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

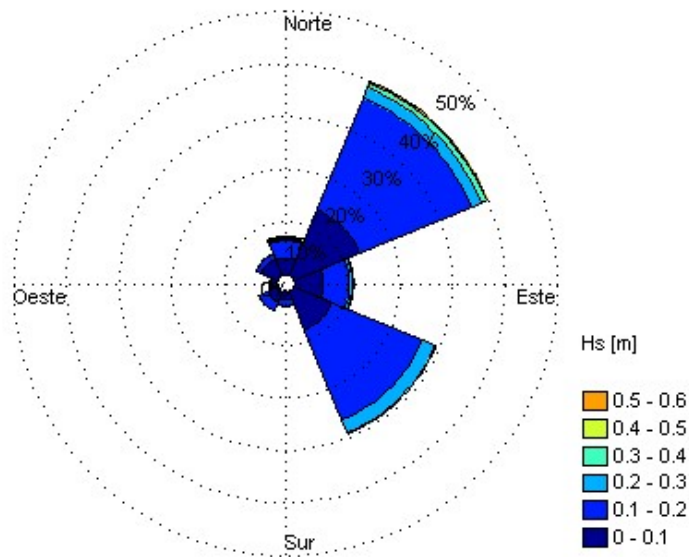


Gráfico 22: Rosas de oleaje registrado con intervalos de *Hs*. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

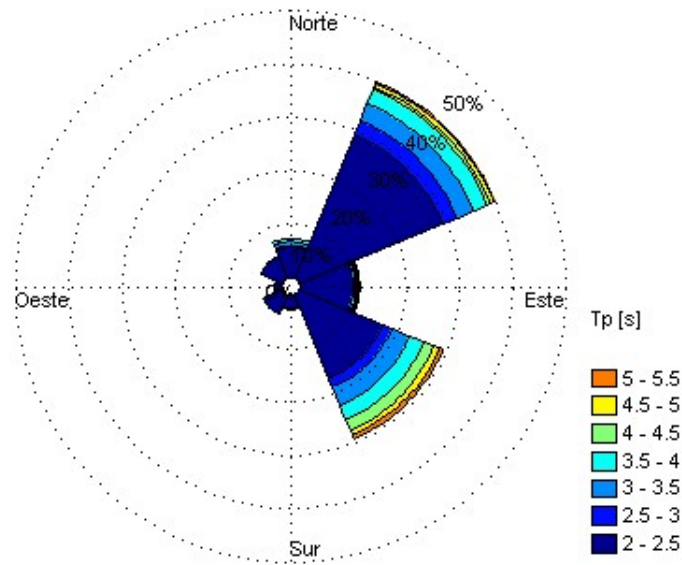


Gráfico 23: Rosas de oleaje registrado con intervalos de T_p . Bahía Catalina, Verano.
Fuente: Elaboración propia.

4.5 PUERTO WILLIAMS

La ciudad de Puerto Williams está ubicada en la parte central y costa norte de la Isla Navarino, en la ribera sur del Canal Beagle, en la XII Región. En el lugar se forma una ensenada cerrada al oeste y noroeste por la Punta Gusano (Figura 25 y Figura 26), mientras unos 3 [km] al este se encuentra la Isla Gable, en un sector donde el canal se hace más angosto formándose el Paso Mackinlay.



Figura 25: Imagen satelital zona general. Puerto Williams.
Fuente: Google Earth.

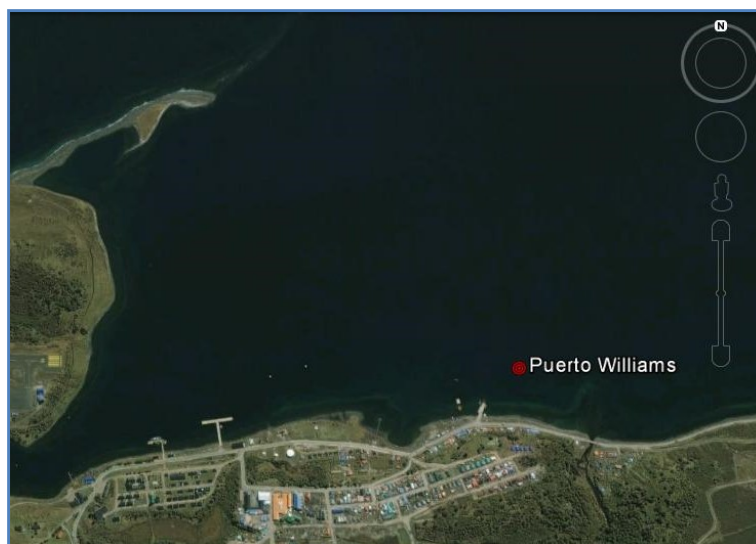


Figura 26: imagen satelital zona particular. Puerto Williams.

Fuente: Google Earth.

4.5.1 INFORMACIÓN DE REGISTROS

El registro de oleaje comprendió 33 días, desde el 12 de Agosto al 13 de Septiembre del año 2011, y constó de datos representativos de periodos de 3 [hr] (256 datos). En función de lo anterior, se seleccionaron las observaciones de magnitud y dirección del viento del mismo periodo. La información de los equipos utilizados y otras características de los registros se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Información equipos de registro de viento y oleaje. Puerto Williams.

Registro Vientos		Registro Oleaje	
tipo equipo	Estación Meteorológica	tipo equipo	ADCP
marca	Young	marca	RDI
modelo	05013-5	modelo	WorkHorse
datalogger	Campbell Sc.	frecuencia	600 kHz
latitud	54°55'58.87" S	latitud	54°55'52.96" S
longitud	67°35'49.05" W	longitud	67°35'41.67" W
altura	22 msnm.	profundidad	10 m
declinación mag.	12.2°	declinación mag.	12.2°
intervalo registro	10 min	intervalo registro	3 hrs
n datos	4615	n datos	256

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 DATOS

4.5.2.1 Batimetría

La información correspondiente a las fuentes de los datos batimétricos utilizados para las modelaciones en este lugar, se presenta en la Tabla 14. Una representación de la densidad de sondas y puntos de línea de costa se puede ver en la Figura 27. El nivel de mar en el sector alcanzó máximos de aproximadamente 2.5 [m] sobre el NRS durante el periodo de tiempo correspondiente a los registros.

Tabla 14: Fuentes de Información batimétrica utilizada. Puerto Williams.

Fuente	Descripción
Carta SHOA N° 13100	Canal Beagle
Carta SHOA N° 13100	Paso Mackinlay
Carta SHOA N° 13141	Bahías Virginia Silva y Róbaló
Carta SHOA N° 13143	Puerto Williams Muelles Guardián Brito y Arturo Prat
Google Earth	Digitalización línea de costa general Canal Beagle
Batimetría particular	Si

Fuente: Elaboración propia.

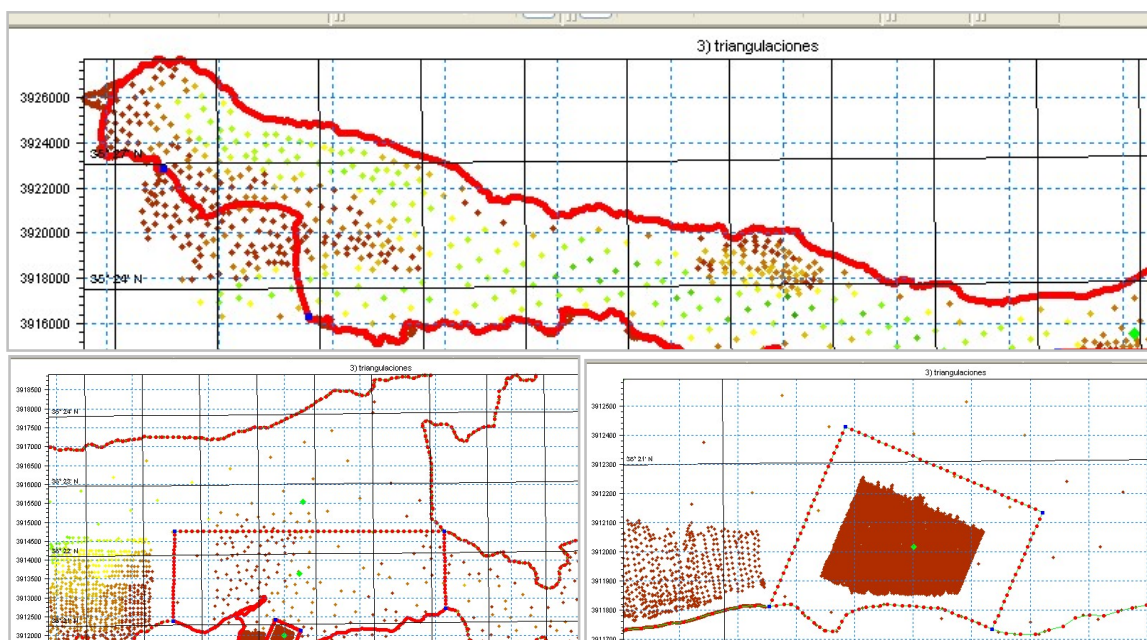


Figura 27: Visualización de batimetría y línea de costa disponible. Puerto Williams.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2.2 Viento

Al igual que en el resto de los lugares, las pruebas hechas a los datos de viento no dan indicación de alguna característica anormal.

Un 59.1% de las observaciones presentaron magnitudes inferiores a 2.0 [m/s], y un 40.2% entre 2 y 6 [m/s], con lo que solo un 0.7% sobrepasó el último valor. Los vientos con mayores intensidades se concentraron desde dirección W. El porcentaje de tiempo en que el viento provino desde direcciones que pueden generar oleaje (del W a E pasando por el cuarto y primer cuadrantes) fue del 22.5%, donde el rango W mostró la frecuencia más notable, con 15.9%, mientras el resto presentó incidencias de entre 1.0% y 3.0% (Gráfico 24 y Gráfico 25).

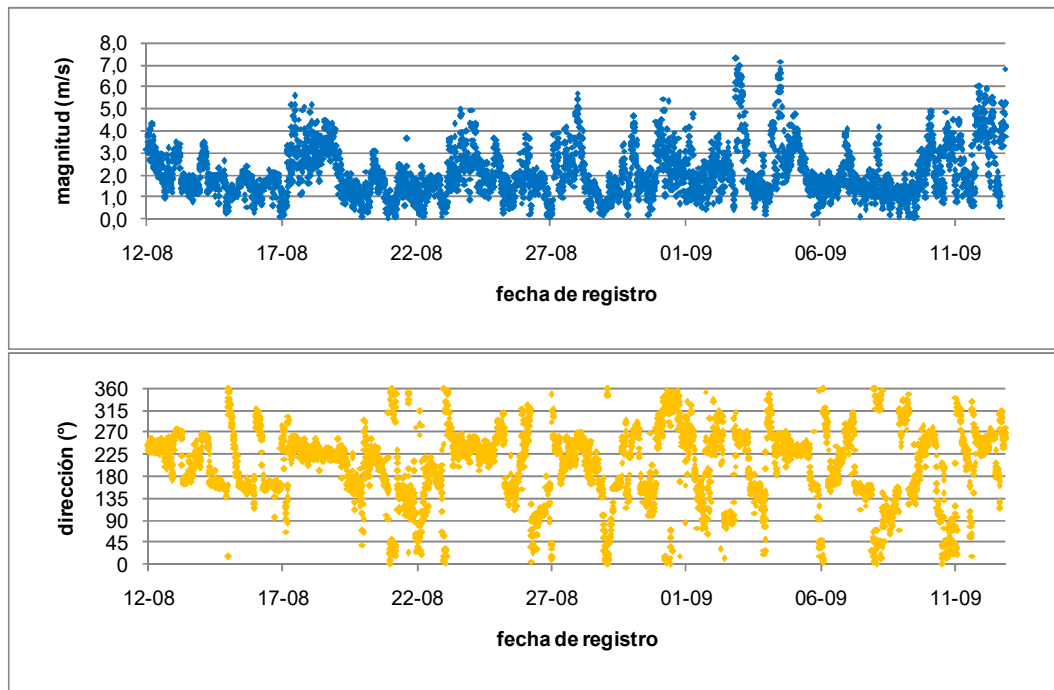


Gráfico 24: Series de magnitud (arriba) y dirección (abajo) del viento registrado. Puerto Williams.
Fuente: Elaboración propia.

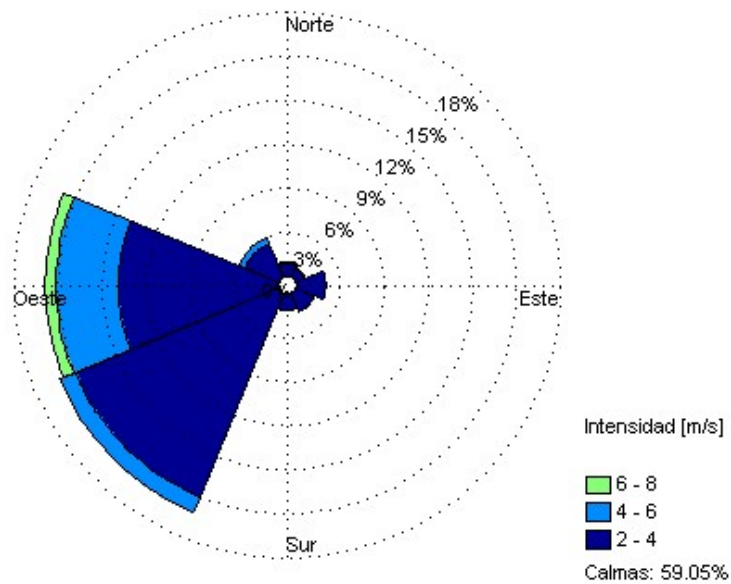


Gráfico 25: Rosa de viento registrado con intervalos de intensidad. Puerto Williams.
Fuente: Elaboración propia.

Se encuentra notable en este caso la baja intensidad de los vientos medidos, así como la marcada concentración desde direcciones W y SW.

4.5.2.3 Oleaje

La serie de tiempo de H_s solo presenta como particularidad la existencia de algunos datos localmente escapados, que debido a su baja magnitud no fueron corregidos, ya que luego se evaluará si pueden corresponder a algún cambio súbito en las condiciones de viento.

En la revisión de los registros de T_p , se encuentran características que llaman la atención en los factores de:

- Línea Plana: No se da una repetición exacta de valores, pero se encuentra una parte importante de los datos en torno a los 1.8 [s].
- Rango Aceptable: A través de todo el periodo de registro se encuentran valores muy escapados. Los más elevados (sobre 13 [s]) fueron eliminados y reemplazados, mientras al resto no puede aplicarse el mismo procedimiento de manera práctica.
- No se interviene la serie de tiempo de $Dirp$ debido a que las marcadas variaciones entre datos consecutivos se mantienen a lo largo de todo el intervalo de registro.

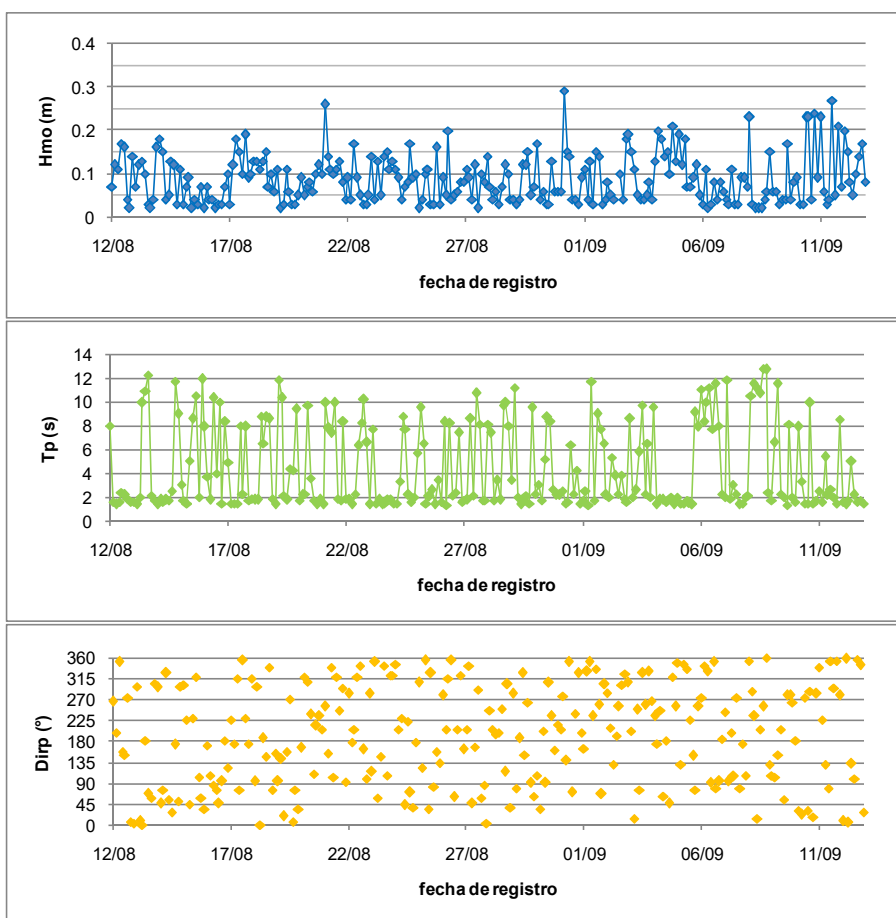


Gráfico 26: Series de tiempo de H_s (arriba), T_p (medio), y $Dirp$ (abajo) del oleaje registrado. Puerto Williams.

Fuente: Elaboración propia.

Las direcciones medidas resultaron estar distribuidas de manera homogénea por los ocho rangos definidos, con frecuencias destacables de 8.2% desde el SE, y 15.2% desde el N (Gráfico 26 y Gráfico 27). El 96.1% de las observaciones presentaron H_s inferiores a 0.20 [m], mientras los valores más elevados fueron inferiores a 0.30 [m]. En cuanto a los T_p , se encontró una acumulación de observaciones con valores ligeramente menores a 2.0 [s], a la vez que se dan muchos casos en que los registros presentan datos elevados, mostrando valores de hasta 12.8 [s].

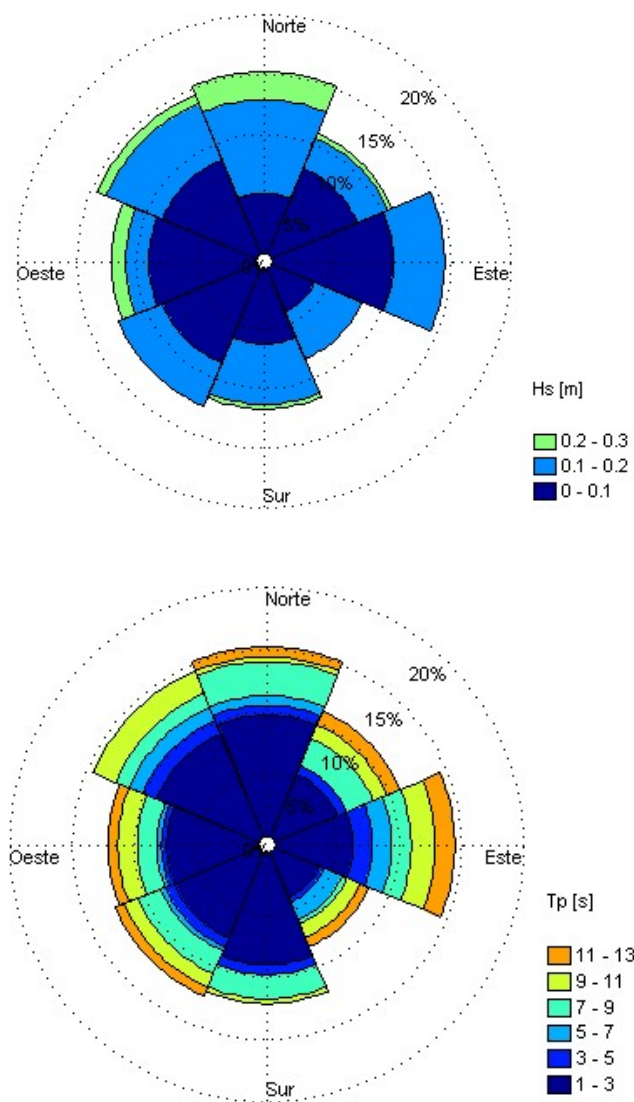


Gráfico 27: Rosas de oleaje registrado con intervalos de H_s (arriba) y T_p (abajo). Puerto Williams.
 Fuente: Elaboración propia.

Las particularidades que más saltan a la vista en las mediciones de oleaje realizadas para este lugar, son el registro de T_p demasiado elevados para corresponder a oleaje de generación local, y la distribución homogénea de las observaciones por la mayoría de los rangos direccionales.

5. METODOLOGÍA

5.1 ESTIMACIÓN ESTACIONARIA

La aplicación estacionaria de los métodos seleccionados consistió en la estimación de los parámetros de oleaje (H_s , T_p y $Dirp$) en base a las intensidades de viento registradas desde cada una de las direcciones que formaron parte del fetch en cada uno de los lugares. Estos cálculos fueron realizados considerando que cada condición de intensidad y dirección de viento se mantiene durante el tiempo necesario para desarrollar su máximo potencial de generación, llevando al oleaje al total desarrollo.

Al estimar con la metodología ROM, se calcularon valores individuales para cada una de los registros de magnitud y dirección de viento de la serie de tiempo seleccionada para cada lugar, serie constituida por un remuestreo cada 3 [hr] de los datos originalmente tomados cada 10 [min], de manera que cada estimación pueda ser contrastada con el set de datos correspondiente dentro del registro de oleaje. En el caso de ACES y SWAN, no es posible estimar directamente un valor para cada dato, por lo que se calculó usando valores discretos en intervalos de 1 [m/s], hasta sobrepasar la máxima intensidad encontrada entre los datos medidos en cada sitio, con lo que luego se interpoló para obtener el resultado aproximado correspondiente a cada estado de viento.

La forma de definir cada área de generación es distinta en cada herramienta de estimación utilizada, por lo que se entrega un detalle de las consideraciones tomadas en cuenta en cada lugar, mediante cada método.

5.1.1 ROM

El procedimiento de estimación de condiciones de oleaje recomendado en la ROM se implementó en planillas Excel, de la siguiente manera. La geometría de la zona de generación se definió según lo indicado en la metodología de la ROM, tomando como base el punto de fondeo del equipo medidor de oleaje. Se usaron los ocho rangos principales de dirección, identificando en cada lugar aquellos rangos hacia los que el punto base estaba abierto a la incidencia del oleaje. Los pasos desarrollados en cada planilla incluyen:

- El cálculo el parámetro de Velocidad Eficaz del Viento (U_a) para cada valor de magnitud del viento.
- Las estimaciones de los parámetros de H_s , T_p y t_{min} , según las formulaciones para completo desarrollo del oleaje y fetch restringido, usando los valores de L_f y U_a . No se toma en cuenta la duración del viento.
- La comparación de ambos valores de t_{min} . El menor de estos indica la condición limitante del oleaje, y los valores de H_s y T_p a seleccionar como resultado.
- En cuanto a la dirección de incidencia del oleaje, este método la considera igual a la del viento en base al cual se realiza la estimación.

5.1.1.1 Punta Coronel

En la Figura 28 se muestran los rayos usados para calcular la L_f de cada dirección. Hacia direcciones E, SW y W la zona de generación es reducida, mientras, en el rango SE el fetch se extiende por todo en Golfo de Ancud. En el caso de la dirección W la definición de fetch indicada en la ROM crea una zona de generación parcial. Las longitudes del fetch para todas las direcciones se entregan en la Tabla 15, y van desde 2.8 [km] en dirección W, hasta 83.6 [km] al SE.

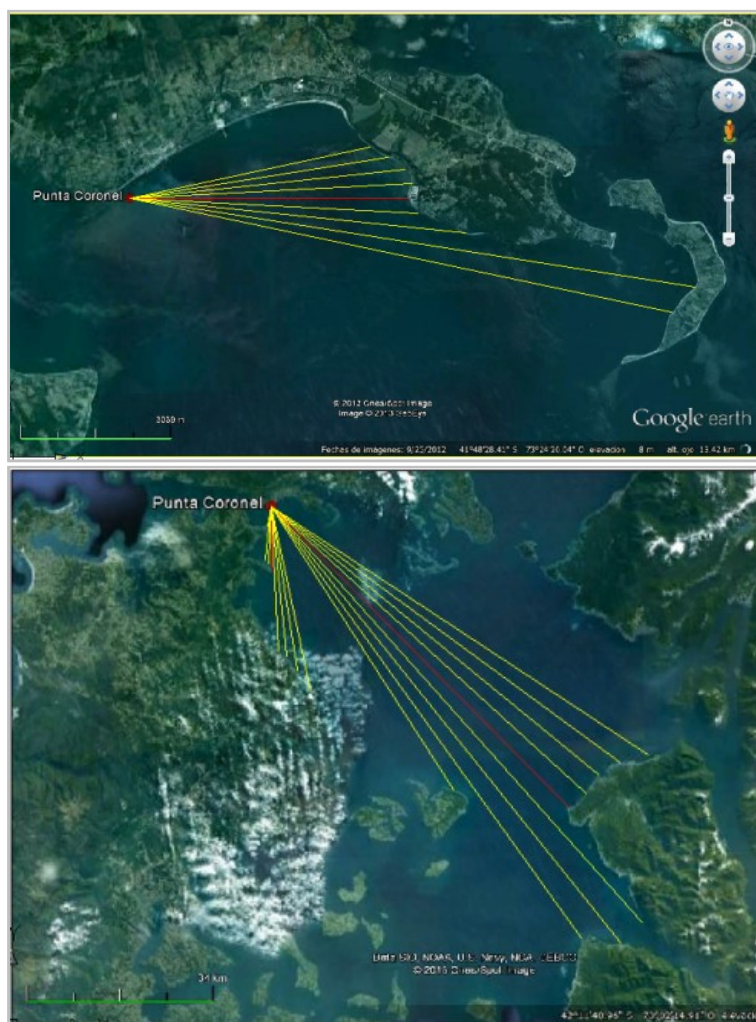


Figura 28: Definición del fetch según ROM. Punta Coronel.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 15: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Punta Coronel.

	Direcciones				
	E	SE	S	SW	W
Lf (km)	6.9	83.6	17.3	4.9	2.8

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2 Santo Domingo

El lugar de interés queda abierto a generación de oleaje desde direcciones del tercer y cuarto cuadrantes, cubriendo una zona acotada dentro de la ensenada donde se ubica Puerto Santo Domingo, y las inmediaciones de esta. La longitud más extensa es la correspondiente al NW que abarca una parte de la ensenada y del canal, lo que se repite parcialmente al W donde hay un bloqueo por parte de la Isla Larga. En tanto al NE, las longitudes de todos los rayos resultaron iguales o inferiores a 0.5 [km] (Figura 29 y Tabla 16).

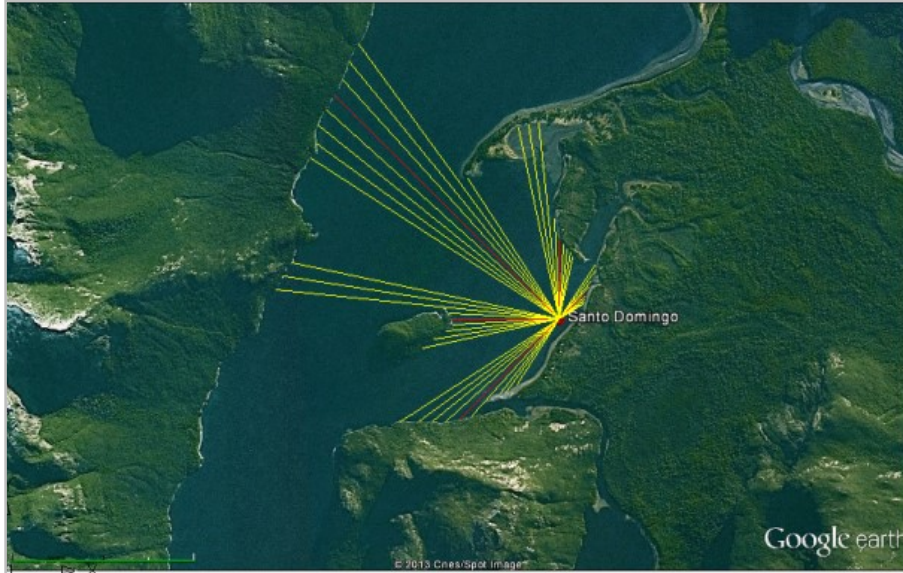


Figura 29: Definición del fetch según ROM. Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 16: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Santo Domingo.

	Direcciones				
	SW	W	NW	N	NE
Lf (km)	0.9	1.2	2.0	0.7	0.3

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.3 Melimoyu

El área de generación cubre la mayoría del Seno Melimoyu (Figura 30), incluyendo las direcciones SW, W, NW y N. El rango de dirección NE hacia el cual existe una porción de cuerpo de agua, queda bloqueado por una saliente en la costa cercana al punto de interés. Las longitudes del fetch van desde 1.0 [km] al SW, a 5.7 [km] al N (Tabla 17).

La boca del Seno está conectada a la parte norte del Canal Moraleda. La extensión y forma de la costa de la entrada al Seno, y el cambio de orientación, sugieren que las condiciones de oleaje externas llegan difractadas al punto en estudio por lo que no deberían influir de manera significativa, de forma que no se analizan casos con condiciones de oleaje ingresando por el límite abierto.

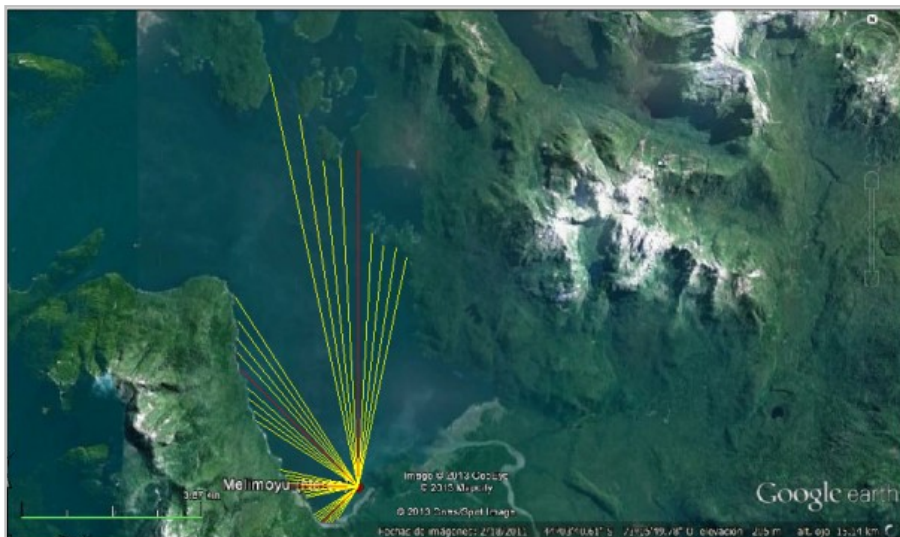


Figura 30: Definición del fetch según ROM. Melimoyu.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 17: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Melimoyu.

	Direcciones			
	SW	W	NW	N
Lf (km)	1.0	1.3	3.4	5.7

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.4 Bahía Catalina

Este sector se encuentra directamente abierto a oleaje desde direcciones del primer y segundo cuadrantes, abarcando gran parte del Estrecho de Magallanes (Figura 31). Hacia el N se encuentra la menor longitud del fetch, al NE los rayos terminan en la boca de la Segunda Angostura, al E el fetch comprende el ancho del estrecho, al SE algunos rayos llegan hasta el margen del estrecho en la Isla de Tierra del Fuego mientras otros se internan hasta la Bahía Inútil. Las longitudes del fetch van desde 5.3 [km] en el N a 57.5 [km] al SE (Tabla 18).

Tabla 18: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Bahía Catalina.

	Direcciones			
	N	NE	E	SE
Lf (km)	5.3	52.8	28.3	57.5

Fuente: Elaboración propia.

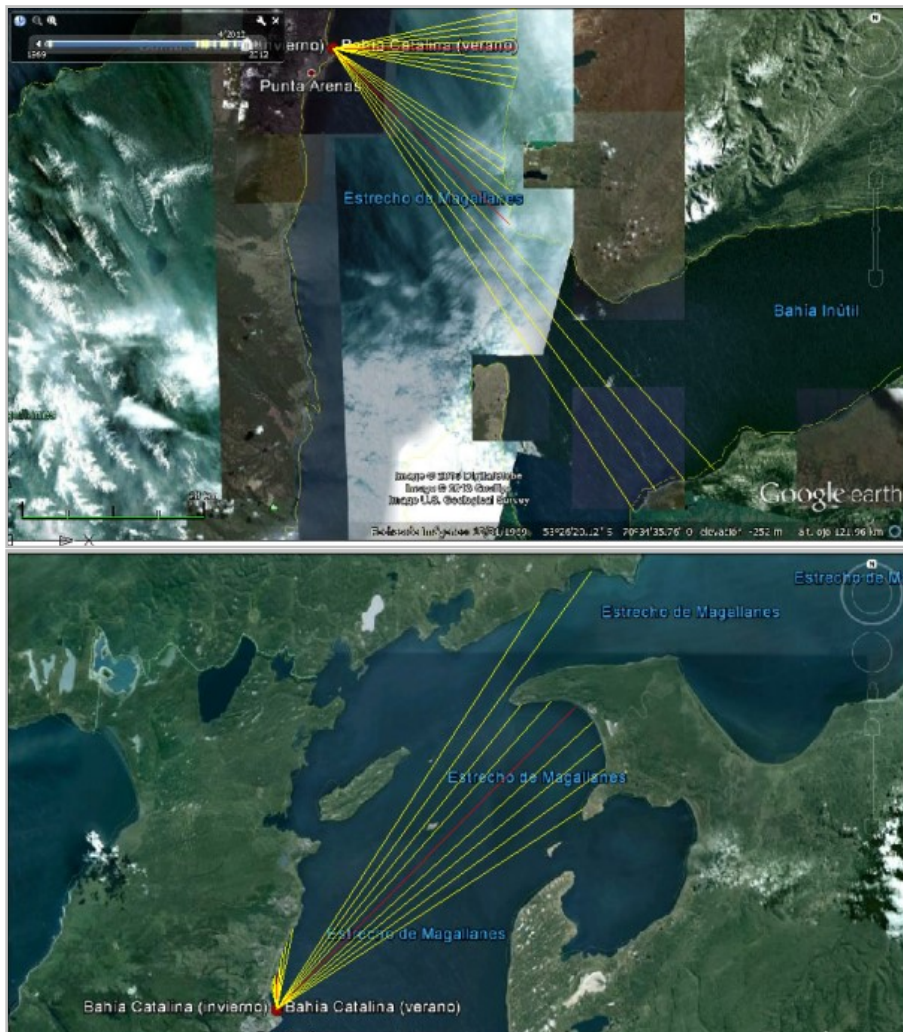


Figura 31: Definición del fetch según ROM. Bahía Catalina.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

5.1.1.5 Puerto Williams

El lugar de interés se encuentra abierto a zonas de generación de oleaje del cuarto y primer cuadrantes (Figura 32). Las longitudes más extensas están al N, donde el fetch comprende todo el ancho del Canal Beagle, y al NE donde es acotado por la Isla Gable. Según la definición del fetch en este método, en casos de viento proveniente desde el W y el NW, solo oleaje generado al este de la Punta Gusano afectaría al punto en análisis. La longitud de fetch mas corta está al W con 1.2 [km], mientras las mayores están al N y NE con 5.9 [km] y 5.8 [km], respectivamente (Tabla 19).

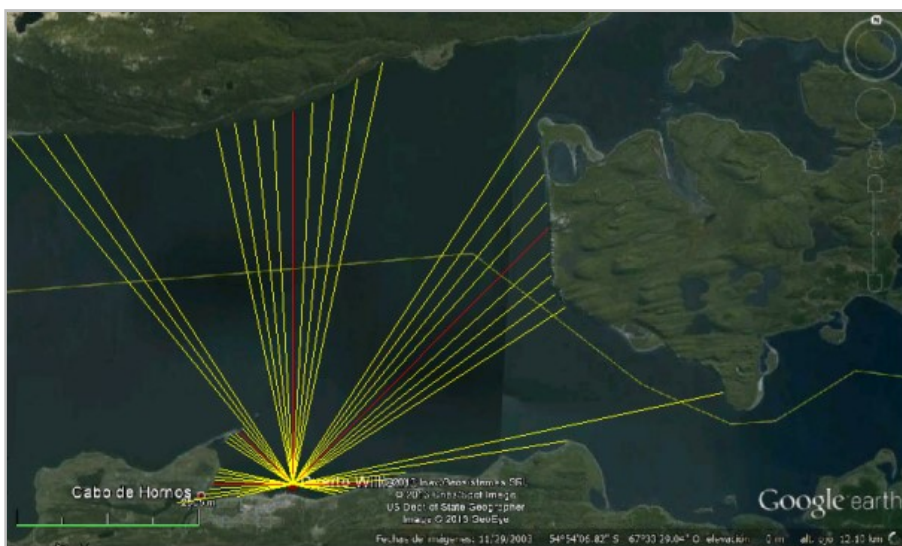


Figura 32: Definición del fetch según ROM. Puerto Williams.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 19: Longitudes de fetch por dirección (ROM). Puerto Williams.

	Direcciones				
	W	NW	N	NE	E
Lf (km)	1.2	3.0	5.9	5.8	2.0

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 ACES

En la aplicación de la metodología indicada en ACES, la definición de la geometría del fetch indica trazar rayos desde el punto de interés hacia todas las direcciones abiertas al cuerpo de agua. Se usaron separaciones de 5° entre los rayos, terminando cada uno al alcanzar la costa tras la zona de generación.

ACES es utilizado a través de la interfaz gráfica provista en el software *CEDAS*. En dicha aplicación se debe crear un caso para cada combinación de rango direccional y magnitud de viento para la que se desea realizar la estimación, eligiendo la utilización del módulo *Ajuste de Viento y Crecimiento de Oleaje*.

Las longitudes y ángulos de la totalidad los rayos se ingresaron como datos de entrada en el software, el cual realiza internamente los cálculos de longitudes efectivas y dirección de incidencia del oleaje.

Ocupando unidades métricas, se ingresaron los primeros datos de entrada:

- Altura a la que se registró el viento (10 [m]).
- Magnitud del viento (cada 1 [m/s]).
- Diferencia de temperatura aire-agua (se asume estabilidad neutra, es decir $\Delta T=0^\circ \text{C}$).
- Duración de la observación de viento (se usa 10 [min], que es el intervalo de registro).
- Latitud del lugar de aplicación.

Por las características de los lugares y datos, corresponden las opciones de:

- Viento medido en la costa a sotavento: Como solo los registros donde el viento proviene desde el lado del agua serán tomados en cuenta en la estimación, se usa esta opción para todos los datos de viento (aunque como corrección no es adecuado para los registros donde los vientos provienen desde tierra, no afectará a los resultados de la estimación de oleaje. Si debe tomarse en cuenta para un estudio puro de vientos).
- Fetch restringido en aguas profundas: Debido a que las condiciones de oleaje no se ven afectadas por efectos de fondo durante casi todo el proceso de crecimiento, y en general, en la mayor parte de la zona de generación.

Como se buscaba encontrar los máximos valores de H_s y T_p que pudiera generar cada condición de viento, se procedió a calcular iterativamente hasta alcanzar el dicho límite.

A continuación se detalla la definición hecha de los fetch para cada uno de los cinco sitios en estudio:

5.1.2.1 Punta Coronel

Se dibujaron rayos con direcciones desde 70° a 270° , pasando por el segundo y tercer cuadrantes (Figura 34). El fetch de menor magnitud resultó ser de dirección W con 4.5 [km], mientras el de mayor extensión fue el SE con 90.7 [km] (Tabla 20).

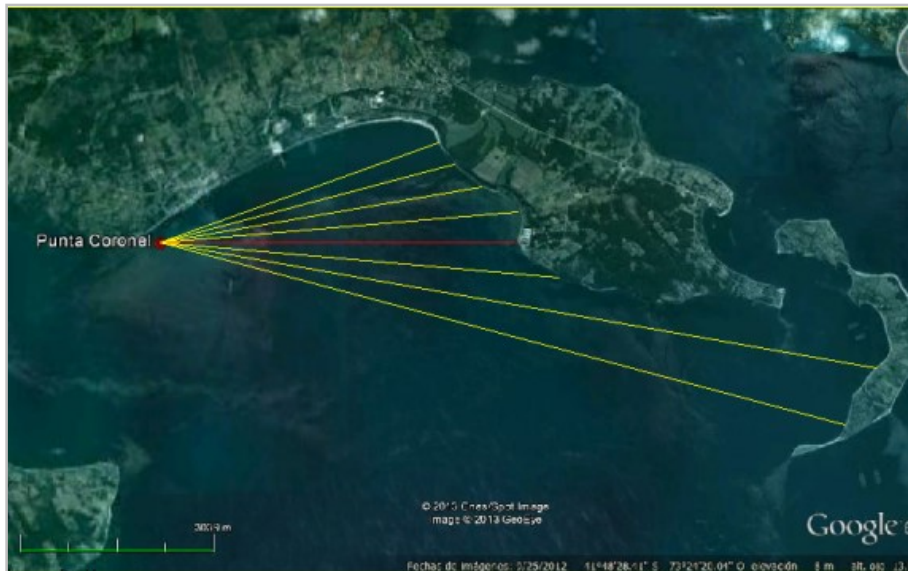


Figura 33: Definición del fetch según ACES. Punta Coronel (1/2).

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

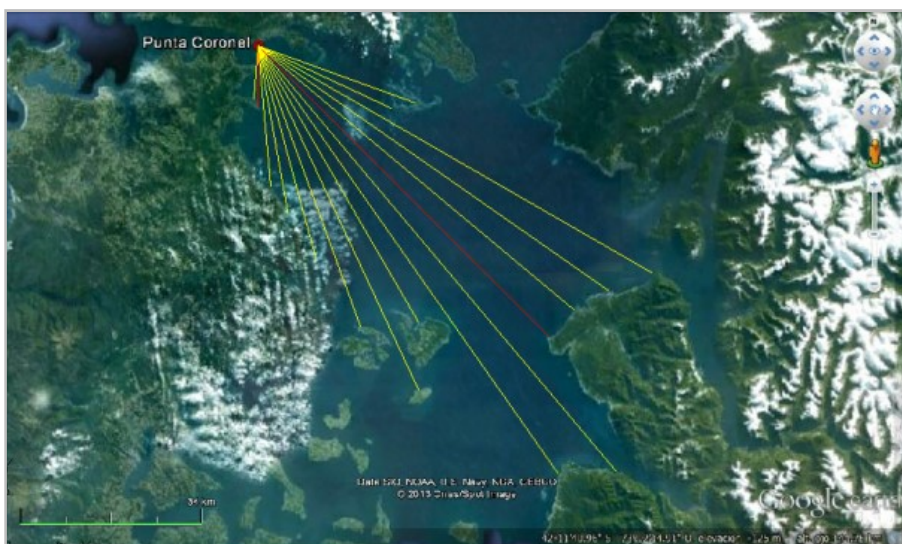


Figura 34: Definición del fetch según ACES. Punta Coronel (2/2).
 Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 20: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Punta Coronel.

	Direcciones				
	E	SE	S	SW	W
Lf (km)	77.7	90.7	85.7	50.1	4.5

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2 Santo Domingo

El área de generación quedó definida por rayos hacia direcciones desde 205° a 55° (Figura 35), pasando por el cuarto cuadrante. Las longitudes de fetch en el sector son cortas y se encontraron entre 1.0 [km] al SW y NE, y 2.0 [km] al W (Tabla 21).

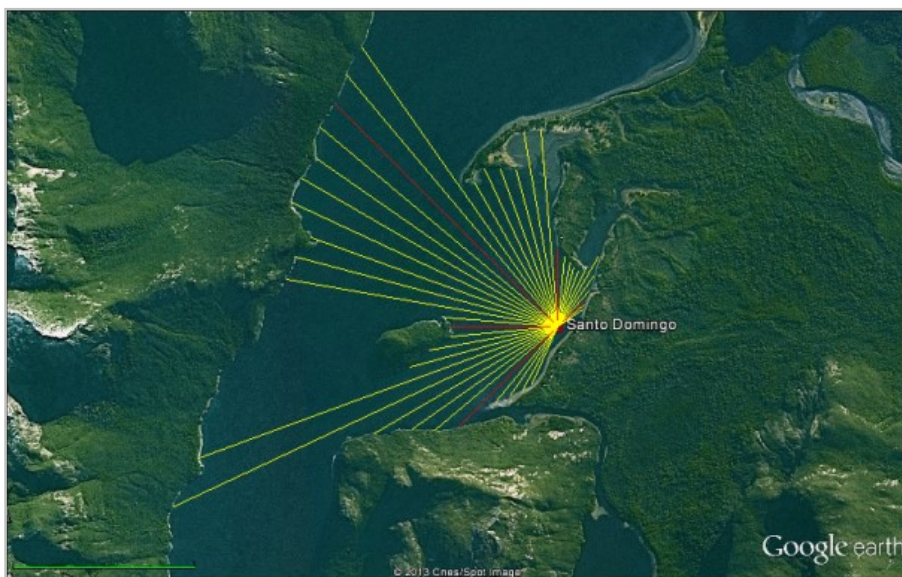


Figura 35: Definición del fetch según ACES. Santo Domingo.
 Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 21: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Santo Domingo.

	Direcciones				
	SW	W	NW	N	NE
Lf (km)	1.0	2.0	1.9	1.9	1.0

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.3 Melimoyu

La zona de generación (Figura 36) se extiende por todo el Seno Melimoyu excepto un sector en el borde E, zona en la cual vientos de direcciones NE generan oleaje que se ve bloqueado en su avance al punto de interés por una saliente de la costa. Según el cálculo de ACES, las longitudes de fetch fueron similares para las cuatro direcciones a propagar encontrándose entre 6.7 [km] y 8.8 [km] (Tabla 22).



Figura 36: Definición del fetch según ACES. Melimoyu.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 22: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Melimoyu.

	Direcciones			
	SW	W	NW	N
Lf (km)	6.7	7.2	8.8	8.6

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.4 Bahía Catalina

La zona de generación (Figura 37) queda limitada al N y NE por las islas existentes en esa dirección, mientras al E y SE abarca todo el ancho del estrecho, alcanzando algunos rayos el sector de Bahía Inútil. La máxima longitud de fetch estuvo al SE con 63.1 [km], mientras en las otras tres direcciones seleccionadas las longitudes bordearon los 50 [km] (Tabla 23).

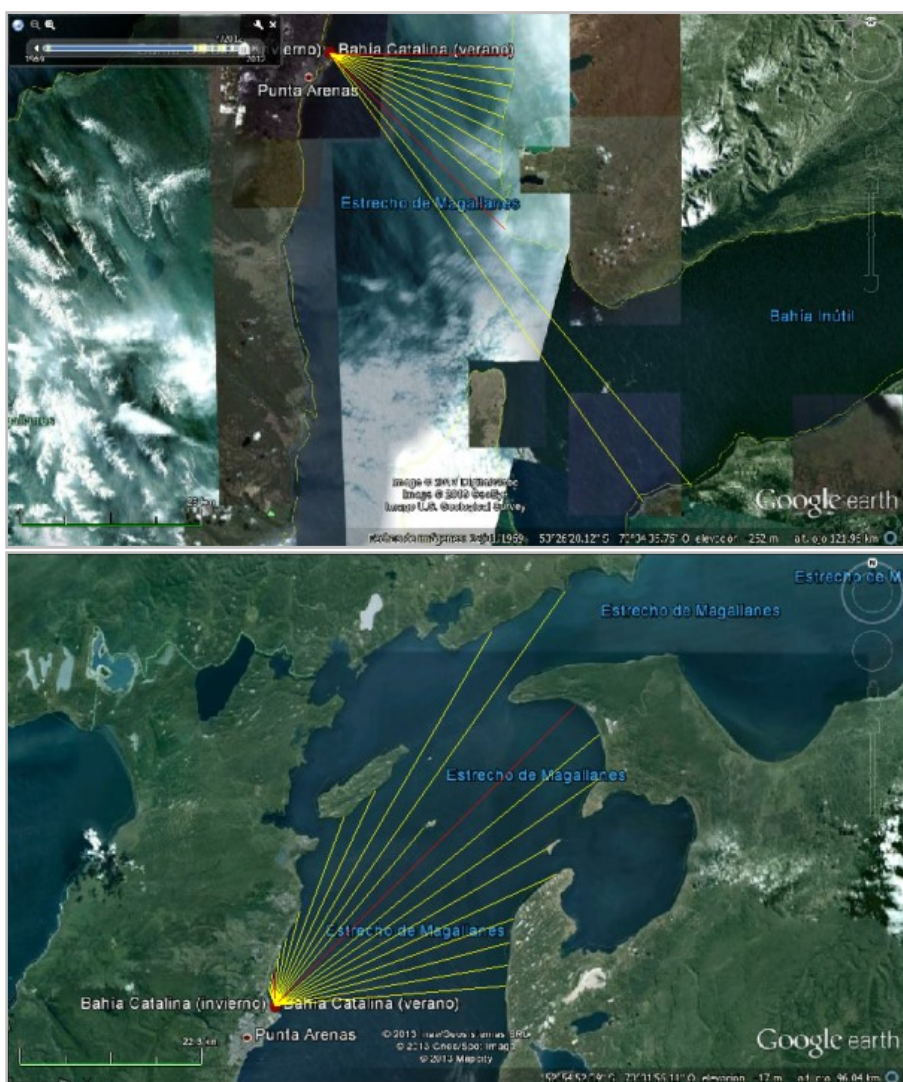


Figura 37: Definición del fetch según ACES. Bahía Catalina.
 Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 23: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Bahía Catalina.

	Direcciones			
	N	NE	E	SE
Lf (km)	47.4	49.3	46.9	63.1

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.5 Puerto Williams

Según la definición del fetch de ACES, se abarcó desde la entrada del paso Mackinlay al E, tomando todo en ancho del canal hasta direcciones cercanas al NW, donde se reduce a la ensenada limitada por la Punta Gusano (Figura 38). El algoritmo de cálculo entregó valores similares para las longitudes de fetch de los cinco rangos direccionales relevantes, encontrándose entre 5.5 [km] al W y 6.5 [km] al NE (Tabla 24).

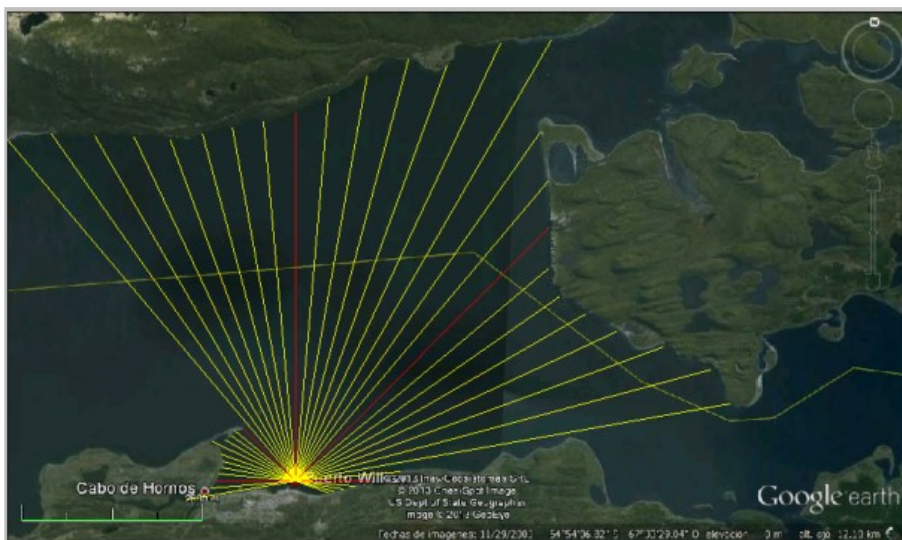


Figura 38: Definición del fetch según ACES. Puerto Williams.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Tabla 24: Longitudes de fetch por dirección (ACES). Puerto Williams.

Lf (km)	Direcciones				
	W	NW	N	NE	E
	5.5	5.8	5.9	6.5	5.8

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 SWAN MODO ESTACIONARIO

En esta modalidad de aplicación se realizan modelaciones con condiciones de viento fijas, donde se calcula para valores discretos cada 1 [m/s], para luego realizar una interpolación en base a las series de tiempo seleccionadas de los registros de viento.

SWAN permite trabajar con grillas estructuradas (rectangulares o curvilíneas) o no estructuradas (triangulaciones). En este caso se utilizaron grillas no estructuradas, generadas mediante el uso del módulo *Mesh Generator* de *Mike 21* (DHI). Cada grilla procesada permite definir el dominio de la modelación, el conjunto de posiciones dentro de este donde se realizarán los cálculos, y la profundidad del agua en cada uno de dichos puntos. Además, la misma grilla se puede utilizar para introducir otros datos de entrada que abarquen todo el dominio de modelación (formatos de archivos de grilla SWAN en Anexo I.A).

Para poder realizar los cálculos en SWAN en modo estacionario, se creó un archivo de configuración para cada caso a modelar, es decir, para intensidades de viento cada 1 [m/s] hasta el máximo encontrado en los registros de cada sitio, y para cada rango de dirección que forma parte del fetch (ejemplo de archivo ".swn" utilizado se muestra en el Anexo I.B).

Tanto los fenómenos base a tomar en cuenta en la modelación, como los valores de los distintos parámetros modificables, son indicados en la configuración por defecto con el solo uso del comando **GEN3**. Con este comando se activan los procesos de; modo de tercera generación por entrada de viento, disipación por descrestamiento, interacciones no lineales por cuádrupletas, y rotura por fondo

En el caso estacionario no se realiza cálculo de crecimiento lineal a menos que se agregue un comando extra (**AGROW** [a]). En lugar de esto SWAN parte calculando con una primera aproximación. Para el crecimiento exponencial se utiliza la formulación de Komen et al. (1984).

Por otro lado, en SWAN deben configurarse algunos parámetros relativos a las propiedades numéricas del modelo. El comando **NUMERIC** reúne definiciones de; cuando terminar el cálculo iterativo, máximo número de iteraciones a realizar, valores límite para las velocidades de propagación espectral de frecuencia y angular, entre otras.

A continuación se dan algunos detalles de las grillas generadas para cada lugar.

5.1.3.1 Punta Coronel

Se define un límite en la entrada W del Canal Chacao, y aunque evidentemente entra oleaje por ese sector, se asume que la energía se disipa en la propagación al adentrarse por el canal. Al NE se cierra el dominio en cada uno de los pasos que conectan el Golfo de Ancud con el Seno de Reloncaví. Al SE, se considera que el oleaje generado más al S de las Islas Chauques no puede propagarse hasta el sitio de interés. La representación visual de la grilla se puede apreciar en la Figura 40.

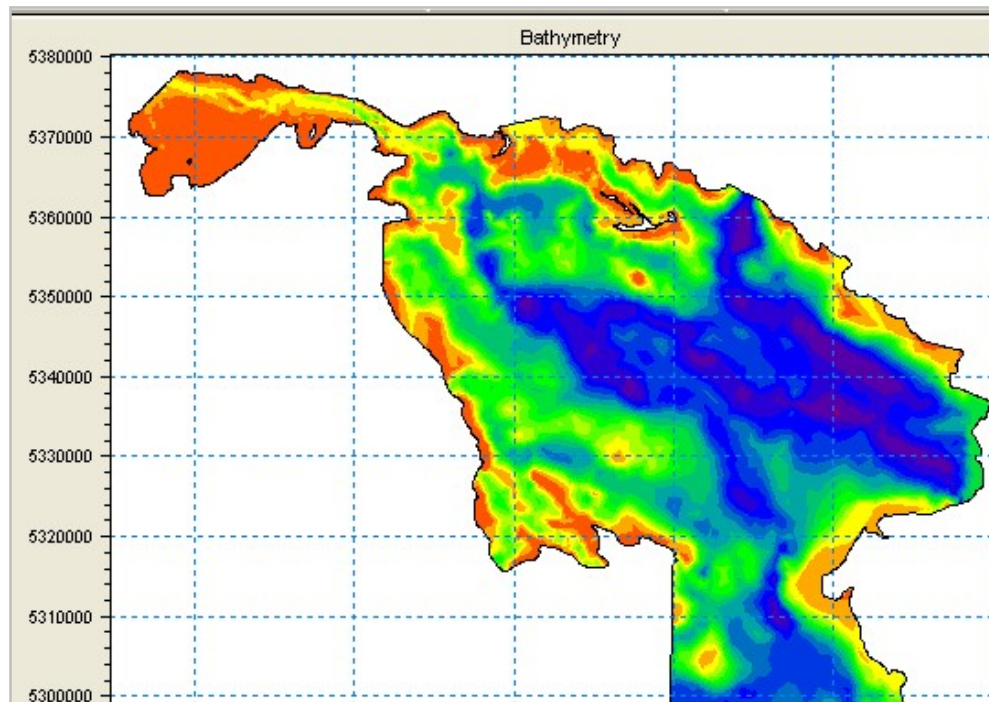


Figura 39: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Punta Coronel (1/2).
Fuente: Elaboración propia.

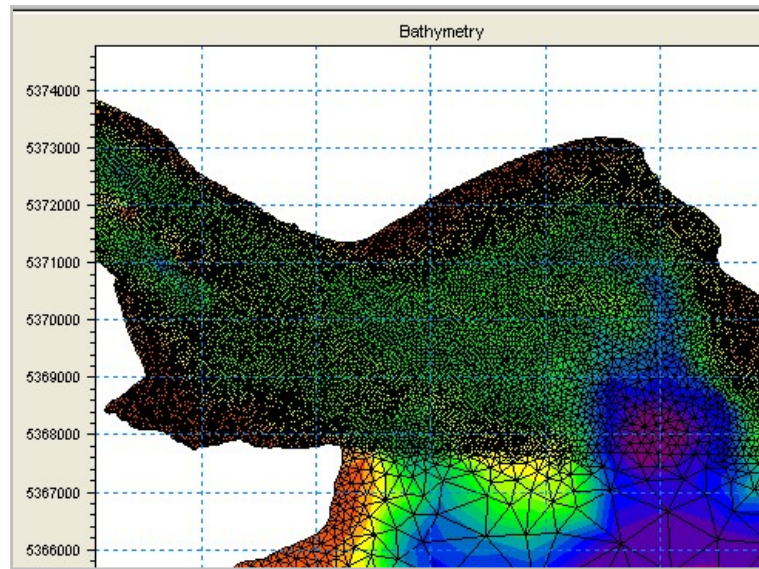


Figura 40: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Punta Coronel (2/2).
Fuente: Elaboración propia.

Las coordenadas del punto donde se indicaron las distintas salidas de parámetros de oleaje fueron 627238 E, 5371305 N (UTM -18).

5.1.3.2 Santo Domingo

El dominio se fijó completamente dentro del Canal Refugio, siendo el principal área de generación la ensenada donde se ubica Puerto Santo Domingo, incluyéndose además zonas de unos 6 [km] al N, y 5 [km] al S. El polígono de detalle fue creado en todo el ancho del canal en la zona de la ensenada. Se agregaron algunas sondas para rellenar lugares en donde no hay datos de batimetría, principalmente en las entradas de mar ubicadas en la costa E.

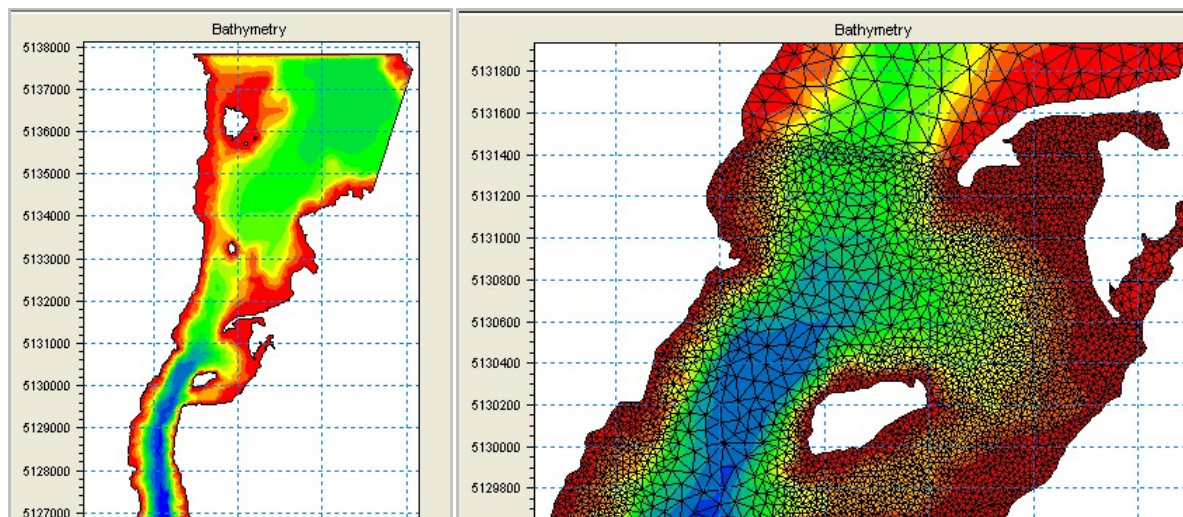


Figura 41: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Santo Domingo.
Fuente: Elaboración propia

Las coordenadas del punto donde se indicaron las distintas salidas de oleaje fueron; 652197 E, 5130155 N (UTM -18).

5.1.3.3 Melimoyu

Se definieron como límites abiertos del dominio la boca del Seno Melimoyu al NW y sus conexiones con el Canal Refugio al N. La grilla obtenida en el proceso anterior se muestra en la Figura 42.

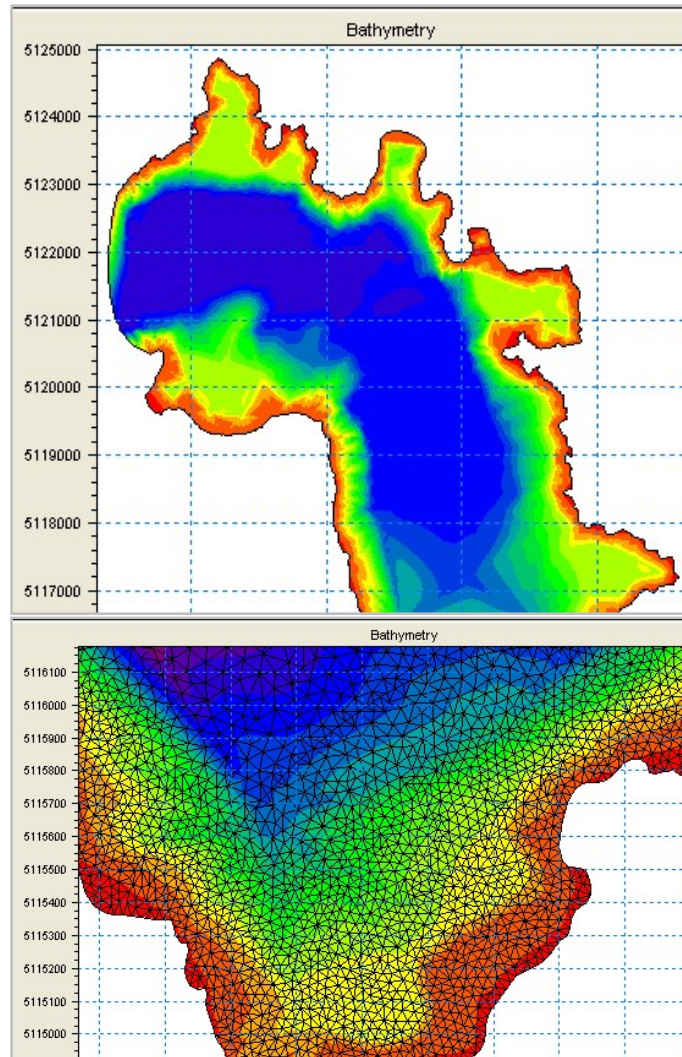


Figura 42: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Melimoyu.
Fuente: Elaboración propia

Las coordenadas del punto donde se indicaron las distintas salidas fueron 650460 E, 5115437 N (UTM -18).

5.1.3.4 Bahía Catalina

La zona de generación de oleaje abarcó el Estrecho de Magallanes desde las inmediaciones de la Segunda Angostura al N, hasta los alrededores del Cabo Froward al S, y de Bahía Inútil al SE. No se contempló entrada de energía por las fronteras. El punto de extracción de datos se situó en coordenadas; 375226 E, 4112729 N (UTM -19).

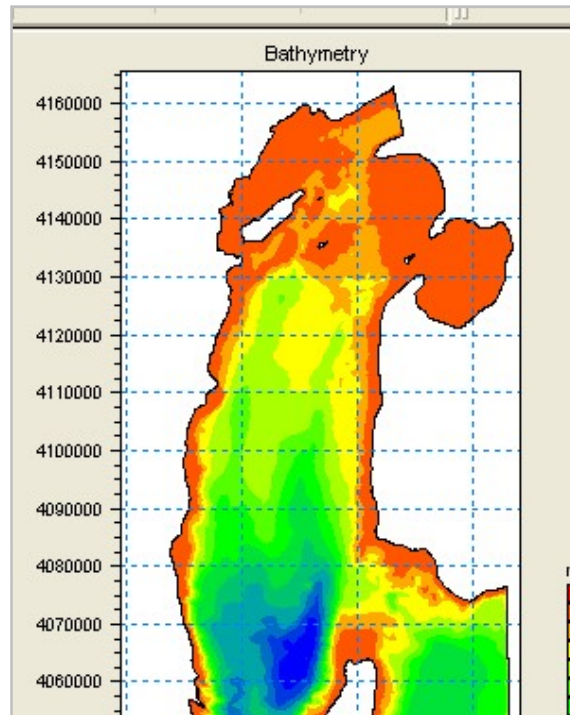


Figura 43. Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Bahía Catalina (1/2).
Fuente: Elaboración propia

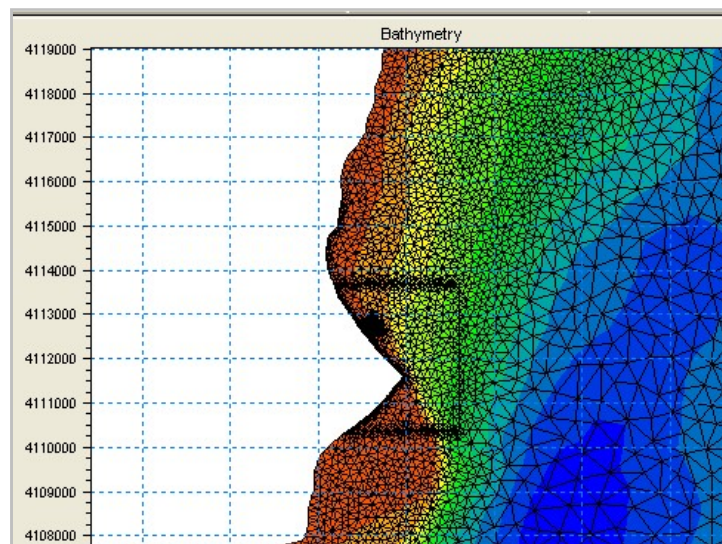


Figura 44: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Bahía Catalina (2/2).
Fuente: Elaboración propia

5.1.3.5 Puerto Williams

El dominio de modelación definido abarcó el Canal Beagle desde la boca E del paso Mackinlay hasta las inmediaciones de la localidad de Ushuaia (Argentina) al W. Ambos límites quedaron definidos por contornos abiertos, aunque no se toma en cuenta a priori el efecto del oleaje que puede ingresar a través de estos.

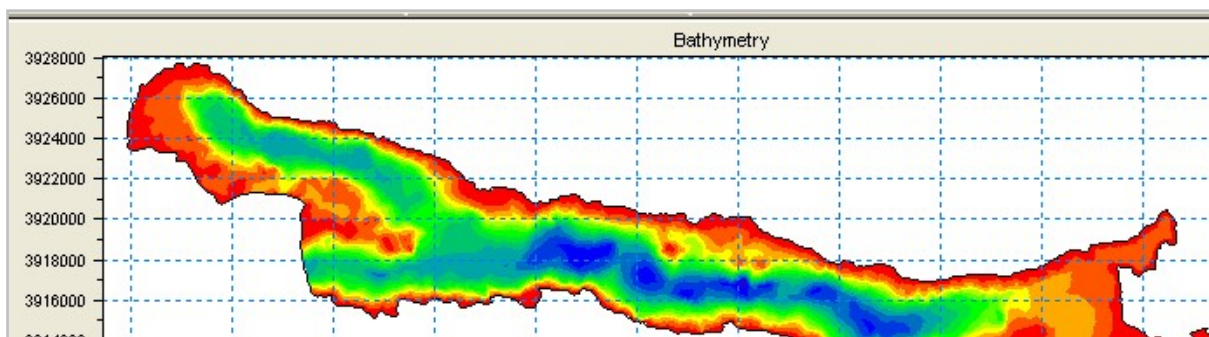


Figura 45: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Puerto Williams (1/2).

Fuente: Elaboración propia

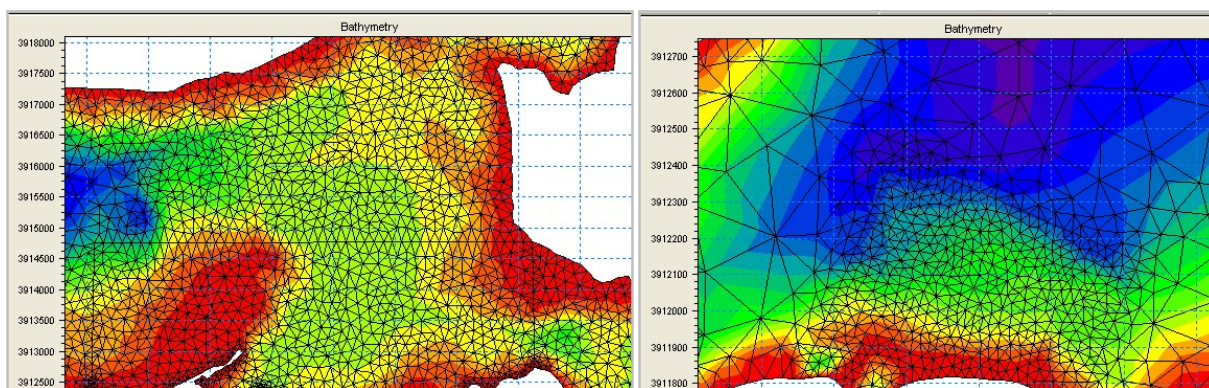


Figura 46: Resultado de generación de la grilla a ocupar en SWAN. Puerto Williams (2/2).

Fuente: Elaboración propia

El punto donde se indicó se obtuvieron los datos de salida fue; 590031 E, 3911941 N (UTM - 19).

5.1.4 CONDICIONES DE VIENTO

Dentro de la estadística de viento de cada lugar (re-muestreada cada 3 [hr]) se identifica las magnitudes máximas en cada rango que forma parte del fetch, para así definir el conjunto de condiciones a modelar en SWAN (Tabla 25 a Tabla 29), las que generaran los resultados base para interpolar los valores correspondientes a cada punto de la serie de tiempo. Se destacan varios casos entre las magnitudes de viento encontradas, pensando en las condiciones de oleaje que podrían llegar a generar. En Punta Coronel las intensidades más importantes se dan desde direcciones con L_f reducidas, en Melimoyu y Puerto Williams los viento identificados resultan especialmente poco intensos, mientras en Bahía Catalina intensidades importantes se encuentran desde el rango NE, el que tiene una de las L_f más extensas.

Tabla 25: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Punta Coronel.

	Rango direccional				
	Este	Sureste	Sur	Surweste	Weste
Dirección Geográfica °	90	135	180	225	270
Dirección SWAN °	180	135	90	45	0
Intensidad máxima [m/s]	5	6	8	11	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Santo Domingo.

	Rango direccional				
	Noreste	Surweste	Weste	Norweste	Norte
Dirección viento ° (geográfica, desde)	45	225	270	315	0
Dirección viento en SWAN ° (matemática, hacia)	225	45	0	315	270
Intensidad máxima [m/s]	9	10	8	10	9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Melimoyu.

	Rango direccional				
	Noreste	Surweste	Weste	Norweste	Norte
Dirección viento ° (geográfica, desde)	45	225	270	315	0
Dirección viento en SWAN ° (matemática, hacia)	225	45	0	315	270
Intensidad máxima [m/s]	5	4	8	7	6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Bahía Catalina.

	Rango direccional				
	Noreste	Este	Sureste	Sur	Norte
Dirección viento ° (geográfica, desde)	45	90	135	180	0
Dirección viento en SWAN ° (matemática, hacia)	225	180	135	90	270
Intensidad máxima [m/s]	15	12	9	10	14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29: Parámetros de configuración casos de viento SWAN modo estacionario, Puerto Williams.

	Rango direccional				
	Noreste	Este	Weste	Norweste	Norte
Dirección viento ° (geográfica, desde)	45	90	270	315	0
Dirección viento en SWAN ° (matemática, hacia)	225	180	0	315	270
Intensidad máxima [m/s]	5	4	8	6	5

Fuente: Elaboración propia.

5.2 SWAN MODO NO ESTACIONARIO

Esta modalidad de estimación contempla la modelación con SWAN configurando las corridas de manera que vayan cambiando las condiciones de viento forzantes en intervalos iguales a los presentes en el registro (10 [min]). Para ello se seleccionaron distintos eventos notables dentro de la estadística de viento de cada lugar, en base a los cuales se configuraron modelaciones individuales que arrojaron como resultado series de tiempo de los parámetros estimados de *Hs*, *Tp* y *Dirp* del oleaje en intervalos de 3 [hr], según se definió para poder realizar una comparación dato a dato con los registros.

La elección de los eventos se hizo tomando intervalos de tiempo en que se presentaran alguna o varias de las siguientes particularidades; intensidades extremas y/o constantes, aumento o disminución paulatina de las intensidades, direcciones relativamente constantes, cambios bruscos de intensidad y/o dirección, etc. Todo ello con direcciones desde rangos que permitan la generación de oleaje sobre cada sector.

La configuración de casos no estacionarios en SWAN es básicamente la misma que la de la forma estacionaria, debiendo modificarse solo la manera en que se ingresan los registros de viento, y las indicaciones para que el modelo vaya cambiando los datos forzantes cada cierto tiempo y entregando resultados a intervalos definidos por el usuario.

5.2.1 ARCHIVOS ENTRADA SWAN MODO NO ESTACIONARIO

Se deben crear nuevos archivos de entrada de las condiciones de viento, que no existen en la forma estacionaria ya que allí se definen valores fijos de intensidad y dirección en el mismo archivo de configuración de la corrida. Cada uno de estos nuevos archivos de entrada de viento debe contener los valores de las componentes *X* e *Y* del viento (según ejes de referencia usados en SWAN, es decir, en ángulos matemáticos y hacia dónde va el viento) para cada uno de los puntos de la grilla. Esta grilla no debe ser necesariamente igual a la generada para los datos de batimetría o a la de cálculo, por lo que de disponer de una base de datos de campos de viento puede usarse directamente, ya que la interpolación entre cada uno de los puntos de cálculo la realizará SWAN automáticamente. Si se cuenta solo con registros de viento puntuales (con el supuesto que se puedan extrapolar a toda la zona de generación), cada archivo de entrada generado tendrá los mismos valores de las componentes para cada punto de la grilla.

Al tener que ingresar individualmente las condiciones de viento correspondientes a cada "instante" (representativo, p.e de un intervalo de 10 [min]), se deben generar tantos archivos de entrada como registros de viento existen en el periodo de tiempo a modelar.

El archivo de entrada de viento para una corrida no estacionaria (de extensión ".wnd") debe cumplir el formato indicado en el Anexo II.B.

Para indicar a SWAN el orden en que debe ir incorporando cada archivo de entrada de viento, se debe crear un archivo listado (de extensión ".list"), que contenga los nombres de todos los archivos de entrada de viento, ordenados según el momento en que se presentaron las condiciones de viento que contienen (Anexo II.A).

Las modificaciones tendientes a manejar el ingreso y salida de datos a intervalos regulares, además de la adición de un término para definir el crecimiento lineal del oleaje, deben llevarse a cabo en el archivo de configuración según lo expuesto en el Anexo III.C.

5.2.2 DIFERENCIAS CON EL CÁLCULO ESTACIONARIO

Se considera que al realizar una estimación no estacionaria por medio de SWAN es posible subsanar algunas desventajas de los métodos de estimación estacionarios, en referencia a la forma en que se ocupan los registros de viento, en los factores siguientes:

- Selección:

El cálculo estacionario se hace en base a un remuestreo de los registros de viento tomando datos cada 3 horas. Dado que cada valor tomado se obtiene solo por su posición dentro de la serie de tiempo de viento, puede que el valor tomado no represente bien a las condiciones de viento que se presentaron durante el intervalo de tiempo en que se generó y propagó el oleaje medido coincidente.

Si bien esta es la forma correcta de proceder en un nuevo muestreo, pues la elección es aleatoria y no se aporta sesgo, pueden presentarse problemas por la presencia de datos erróneos que no hayan sido identificados en el control de calidad. Si bien la existencia de dichos datos no se soluciona al realizar un cálculo no estacionario, la influencia de un dato escapado en particular tiene menos relevancia pues se ocupa cada uno de los registros de viento, cambiando cada 10 [min] las condiciones forzantes.

- Duración:

El cálculo estacionario se hace tomando en cuenta que las condiciones representadas por cada dato duran el tiempo necesario para que se alcance el máximo potencial de oleaje, para cada combinación de magnitud de viento y dimensiones del fetch desde la dirección pertinente. El largo de este intervalo de tiempo puede ser menor a 1 [hr], para vientos leves y/o fetches muy cortos, y alcanzar duración de más de 9 [hr] (según cálculos de tiempo mínimo que forman parte de métodos ROM y ACES), para vientos fuertes actuando sobre los mayores fetch encontrados en los lugares de estudio. Al tomar un dato aislado cada 3 horas correspondiente a un valor promedio de 10 [min], es probable que este represente las condiciones de viento durante el tiempo en que se genera el oleaje, si el fetch correspondiente es corto o el viento de baja magnitud, pero si se da una combinación de viento fuerte y fetch extenso dicha probabilidad disminuye, ya que la generación y propagación del oleaje ocurre durante en un intervalo largo de tiempo.

Al realizar una estimación no estacionaria, no se extrapola la duración de cada condición de viento, utilizando cada valor solo durante el largo del intervalo en que se promediaron las mediciones.

- Variabilidad:

El cálculo estacionario se hace tomando en cuenta que las condiciones de viento correspondientes a cada dato seleccionad, se mantienen relativamente constantes en

magnitud y dirección (± 2.5 [m/s] y $\pm 15^\circ$, según Ref. 21, pág. 36) durante el intervalo de tiempo que representan. Según el tiempo que tarde en generarse y propagarse el oleaje, no se toma ninguna consideración en cuanto a si las condiciones de los registros cercanos al seleccionado son o no similares a las del mismo, más allá de que se asume que las condiciones promedio tienden a cambiar paulatinamente en magnitud y dirección por lo que no deberían producirse cambios abruptos. De acuerdo a lo anterior, si la estimación corresponde a un periodo de tiempo de gran variabilidad de las condiciones, no podrá ser bien estimado el oleaje en base a un dato aislado.

La aplicación de una metodología no estacionaria que ocupe cada uno de los registros de viento permite eliminar el problema anterior al tomar en cuenta directamente los cambios que presentan las condiciones promedio de viento cada 10 [min].

5.3 VALIDACIÓN

Se ha planteado estudiar los procedimientos que se utilizan para validar un estudio de oleaje de generación local, por lo cual distintas formas de abordar esta materia se aplican en cada uno de los lugares en análisis, según las distintas características que se encuentren.

Luego de la estimación estacionaria del oleaje realizada para cada lugar, se ordenan tanto los resultados como los registros en tablas idénticas según rangos de H_s , T_p y $Dirp$, cuyos porcentajes pueden ser comparados. Idealmente debe comprobarse la coherencia de los porcentajes en cada cuadro ya sea de $Dirp$ v/s H_s o de $Dirp$ v/s T_p , pudiendo la información de estas tablas puede presentarse en histogramas y gráficos de no excedencia de cada parámetro aislado para identificar otros comportamientos relevantes.

Dado que hay varias idealizaciones que se han hecho en el proceso de estimación, es esperable cierto grado de discordancia al realizar las comparaciones, esta es la parte donde predomina un análisis cualitativo, el cual debe ser abordado objetivamente haciendo notar tanto las similitudes como las diferencias que se presentan, y debe ser complementado por la búsqueda y la determinación de la existencia o no de factores causen las incoherencias.

Por otra parte, donde sea necesario pueden aislarse intervalos de tiempo con condiciones especialmente relevantes dentro de cada periodo de registro, donde evaluar la coherencia de evolución de las condiciones medidas y estimadas (en H_s , T_p y $Dirp$). Este procedimiento es más recomendable para analizar estimaciones no estacionarias en sectores de fetches extensos donde las condiciones de viento tienen mayor probabilidad de cambiar antes de generar oleaje totalmente desarrollado.

Para evaluar la exactitud de los resultados obtenidos puede recurrirse igualmente a las comparaciones de las distribuciones recién descritas, pero en este caso aplicada solo a los conjuntos de datos correspondientes a los intervalos seleccionados, y puede también implementarse el cálculo de los parámetros estadísticos indicadores de la correlación entre pares de series de tiempo expuestos en la Sección 3.9, que entregan nuevos elementos cuantitativos en base a cuyos análisis se puede entregar una apreciación más sólida de la precisión de las estimaciones realizadas.

6. RESULTADOS

A continuación se describen los resultados obtenidos para cada lugar, al tomar en cuenta las consideraciones que se estimó adecuadas para cada uno de ellos.

6.1 PUNTA CORONEL

6.1.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO

Las estimaciones indican que las condiciones de oleaje durante el periodo de estudio fueron poco severas en este lugar, dado que sobre un 80% del tiempo el oleaje presentaría H_s inferiores a 0.10 [m], mientras frecuencias bajas se observaron hasta el rango de 0.30 a 0.40 [m] (Gráfico 28). En cuanto a los T_p estimados, no se observan valores superiores al rango de 2.0 a 3.0 [s], teniendo cerca del 80% del tiempo valores inferiores a 1.0 [s]. Lo anterior responde principalmente al hecho de que un 73.7% del tiempo el viento provino desde tierra, mientras que dentro de los rangos en que sí se podía generar oleaje, la frecuencia más importante se dio desde el W, dirección en la que el fetch es de los más reducidos.

Ahora bien, al realizar la comparación de las distribuciones estimadas y registradas se observan diferencias importantes. Las H_s medidas fueron inferiores a 0.10 [m] solo en cerca de un 50% del tiempo, lo que indica condiciones más relevantes que las estimadas, como se confirma con la presencia de observaciones en rangos superiores a los vistos en las estimaciones, presentan valores hasta un máximo de 1.01 [m].

Solo con ROM se estimó un valor de T_p por sobre los 3.0 [s], siendo que los registros muestran valores superiores a 7.0 [s] en cerca del 80% del tiempo, con un máximo de 11.1 [s].

Un caso particular se observa en las direcciones estimadas mediante ACES, donde no se encuentra oleaje con dirección E, mientras desde el SE la frecuencia es notablemente mayor a las correspondientes a los otros dos métodos utilizados. La causa de lo anterior es la forma en que se define y calcula el fetch en ACES, donde al introducir todos los rayos juntos el algoritmo utilizado para calcular la dirección de incidencia del oleaje pondera con demasiada importancia los rayos más largos encontrados hacia direcciones cercanas al SE. En caso de SWAN, donde se obtiene una dirección de incidencia en base a cálculos de propagación del oleaje, no se observa el mismo comportamiento anteriormente descrito.

En cuanto a las direcciones, ya se ha hecho notar que los registros presentan *Dirp* desde tierra, lo que solo sería posible si se diera una importante reflexión del oleaje incidente. También se observa que las frecuencias para los rangos que forman parte del fetch presentan diferencias entre lo registrado y lo estimado, siendo la más notable la correspondiente a la dirección S donde el registro indica un 24.9%, mientras las estimaciones no pasan del 3.0%.

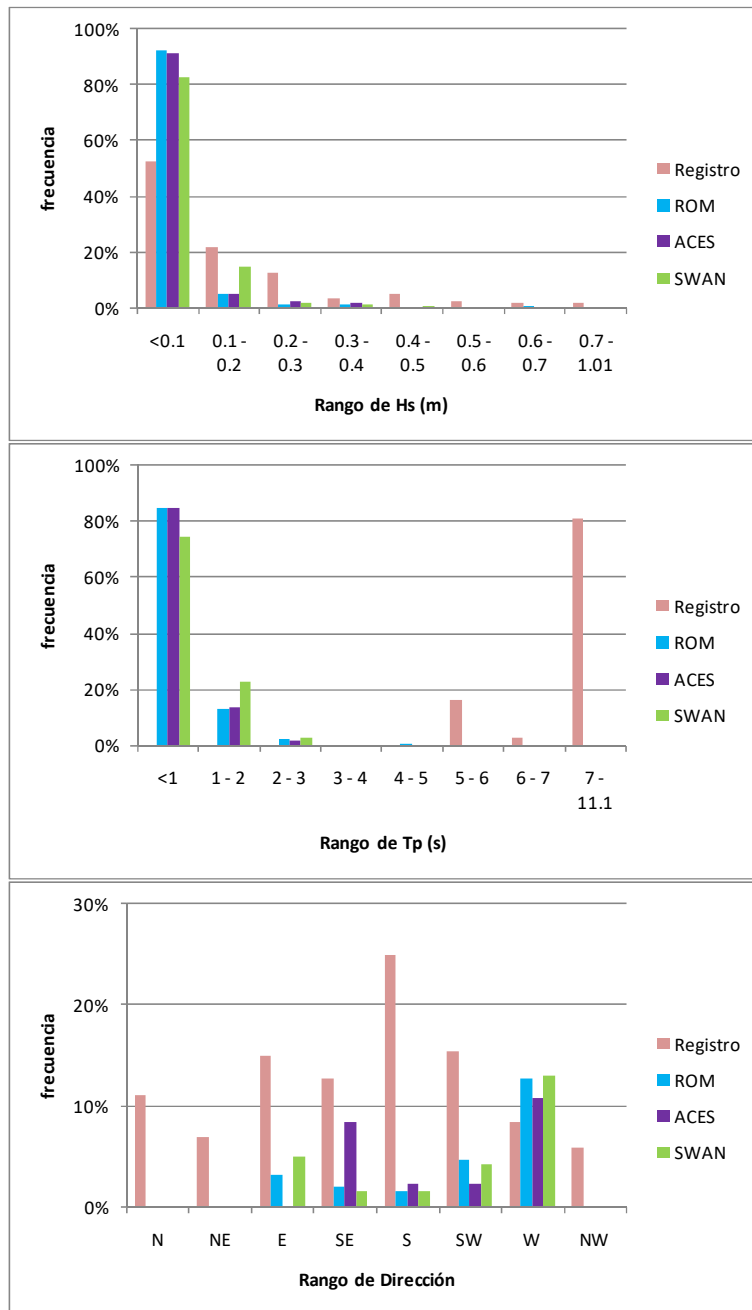


Gráfico 28: Distribuciones de H_s , T_p y Dir_p de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Punta Coronel.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los valores presentados en los gráficos anteriores, se elaboraron las curvas de no excedencia de H_s y T_p entregadas en el Gráfico 29. Allí se vuelven a hacer evidentes las diferencias en las distribuciones de ambos parámetros (especialmente T_p), indicando una incoherencia entre datos medidos y estimados.

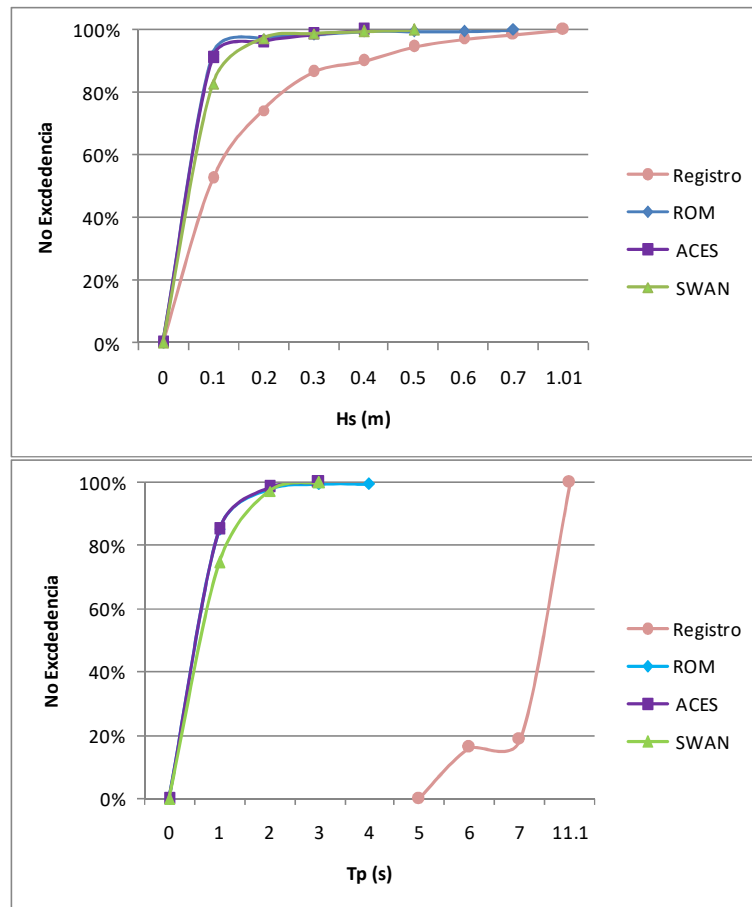


Gráfico 29: No excedencia de H_s y T_p de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Punta Coronel.

Fuente: Elaboración propia.

La presentación conjunta de las series de tiempo de oleaje medido y estimado (Gráfico 30) permite otra visualización de las diferencias ya apreciadas en el punto anterior.

Según los cálculos serían aisladas las ocasiones donde el oleaje superaría los 0.20 [m] de H_s (límite inferior de registro del equipo según especificaciones del ADCP) y nula la presencia de T_p sobre los 5.0 [s] (frecuencia de corte espectral utilizada para el procesamiento), obteniéndose condiciones globales de oleaje mucho menos severas que las indicadas por los registros.

Se encuentra que la máxima condición es estimada mediante el método ROM, con H_s de 0.62 [m] y T_p de 4.2 [s], siendo producida por viento de magnitud 4.8 [m/s] desde dirección 149° (SSE), que corresponde al día 6 de Julio a las 15:00 hrs.

Se hace notar que los registros presentan condiciones importantes de H_s en periodos en que el viento provino desde tierra o donde hubo condiciones de calma (estimaciones de $H_s = 0$). Durante buena parte del registro se da un ciclo anómalo con valores elevados cada 4 estados de mar, lo que se acentúa cerca de las sicigias. Los T_p registrados son mucho más altos que los estimados, concentrándose la mayoría en el valor de 9.5 [s].

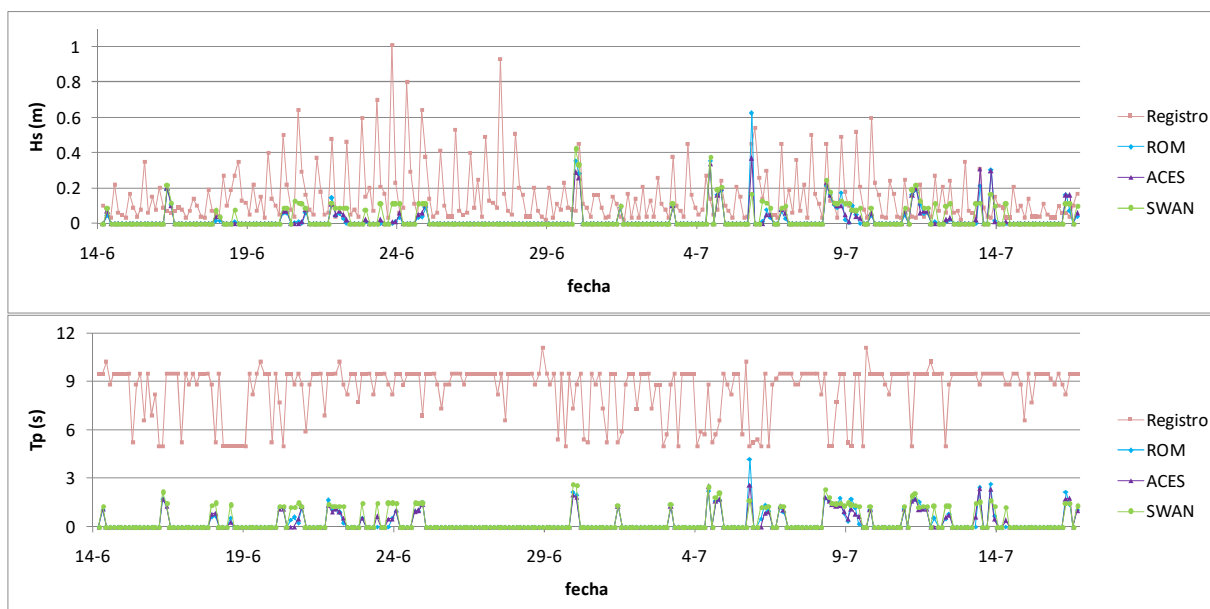


Gráfico 30: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, H_s (arriba) y T_p (abajo), en comparación con los registros. Punta Coronel.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 VALIDACIÓN

Más allá de que la baja severidad de las condiciones de viento medidas haya generado estimaciones de oleaje también leves, las anomalías encontradas en los registros de H_s y T_p son señal manifiesta de deficiencias en el registro y/o procesamiento de los datos del ADCP, lo que deriva en la invalidez de la información haciendo imposible realizar una calibración y validación adecuada de los procedimientos de estimación implementados para este lugar.

6.2 SANTO DOMINGO

6.2.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO

El resumen estadístico de los registros y de los resultados obtenidos para el sector de Santo Domingo se presenta en el Gráfico 31. Como ya se había mencionado, los registros revelan un oleaje con poca severidad, con H_s menores a 0.40 [m] y T_p bajo los 5.0 [s]. Dicha característica se encuentra también en las estimaciones pero con magnitudes aún más bajas, ya que se obtienen H_s inferiores a 0.20 [m], mientras los T_p no superan los 2.0 [s].

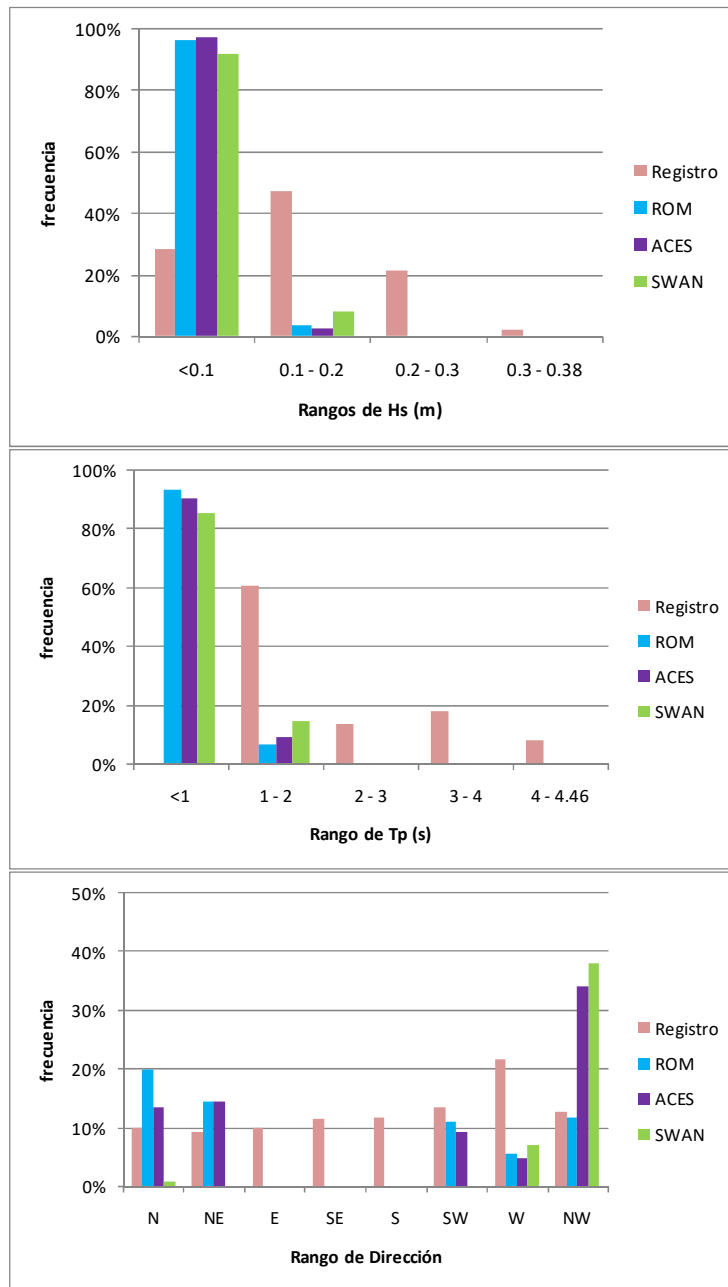


Gráfico 31: Distribuciones de Hs, Tp y Dirp de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia.

En los registros se encuentran observaciones desde rangos desde los que no puede generarse oleaje, presentándose frecuencias similares en la mayoría de las direcciones sin importar si forman parte del fetch o no. En cuanto a las estimaciones, frecuencias similares por medio de los tres métodos se obtienen solo en el rango W, mientras se encuentra concordancia entre ROM y ACES en el NE y SW, y entre ACES y SWAN en el NW.

Las curvas correspondientes a la no excedencia (Gráfico 32) muestran una separación importante entre los registros y las estimaciones, aunque se observan similitudes en el orden de los valores.

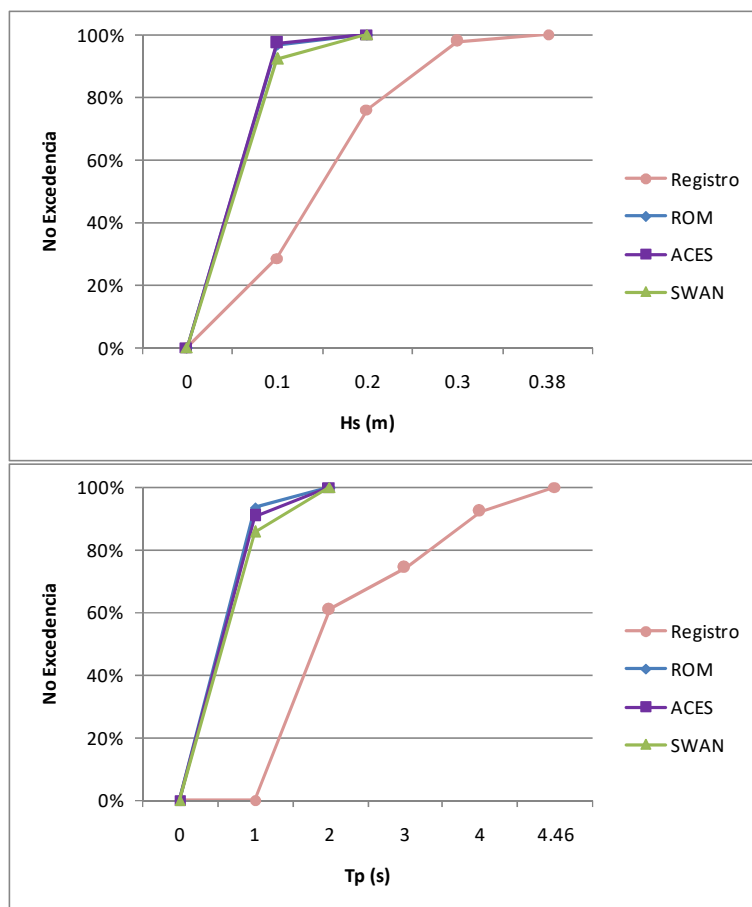


Gráfico 32: No excedencia de H_s y T_p de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia.

Si bien las condiciones calculadas fueron siempre inferiores a las medidas, es posible notar en las series de tiempo de H_s un comportamiento intermitentemente similar al de los registros, principalmente en intervalos en que se midieron las condiciones más relevantes (Gráfico 33). El cálculo del Coeficiente de correlación de Pearson para datos medidos y estimados mediante ROM entregó un valor de 0.41, indicando una relación directa y moderada entre ambas series.

En cuanto a los T_p , las estimaciones tuvieron magnitudes mayoritariamente inferiores a 1.0 [s], resultando también notoriamente menores a la generalidad de los valores medidos, que bordearon los 2.0 [s]. El comportamiento singular presente en los registros, donde existen T_p que se disparan a valores en torno a los 4.0 [s], no correspondería a un fenómeno generado por las condiciones de viento medidas, ya que las estimaciones no presentan la misma particularidad.

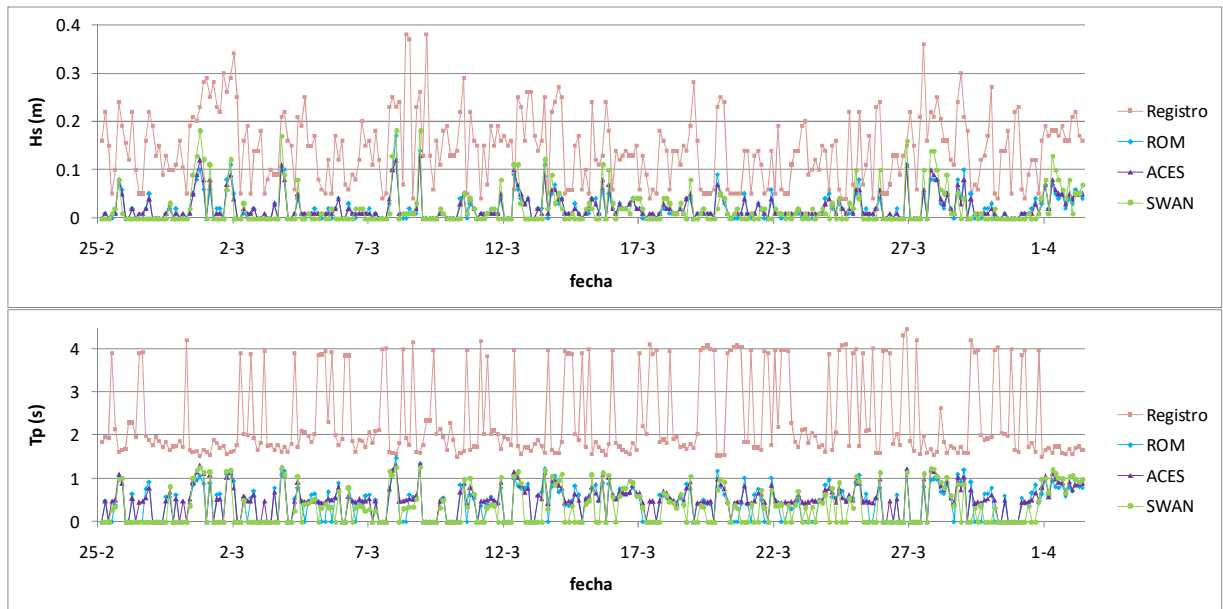


Gráfico 33: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, H_s (arriba) y T_p (abajo), en comparación con los registros. Santo Domingo.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 VALIDACIÓN

Dado que las diferencias encontradas entre los registros y los cálculos se dan de igual manera para los tres métodos en la estimación estacionaria, es probable que las diferencias se deban a una incoherencia entre los valores registrados de viento y de oleaje en lugar de un tema de calibración de cada uno de los métodos.

En orden a tratar de dilucidar la causa de lo anterior, se realizó la prueba de aumentar artificialmente las intensidades del registro de vientos (multiplicándolas por un factor de 3), para observar el comportamiento de las nuevas series de H_s y T_p calculadas en base a dichos valores (Gráfico 34). Debido a la similitud de los resultados obtenidos en primera instancia, esta vez solo se calculó con el método ROM.

Lo anterior permite la constatación de que ambas series de H_s muestran un comportamiento coherente durante muchos intervalos dentro del periodo de registro, presentado coincidencias en los momentos en que aumentan o disminuyen de valor, y ahora con magnitudes muy similares. No se observa lo mismo en las series de T_p , donde la mayoría del tiempo las estimaciones continúan siendo inferiores a los valores más bajos registrados.

Con estos nuevos cálculos, las distribuciones de H_s de valores medidos y estimados se hacen más cercanas para rangos por sobre los 0.25 [m], pero se mantienen las diferencias bajo dicho umbral (Gráfico 35).

Finalmente, no se encuentra evidencia de que pueda estimarse condiciones de oleaje adecuadas en la base a la información de viento y oleaje disponible.

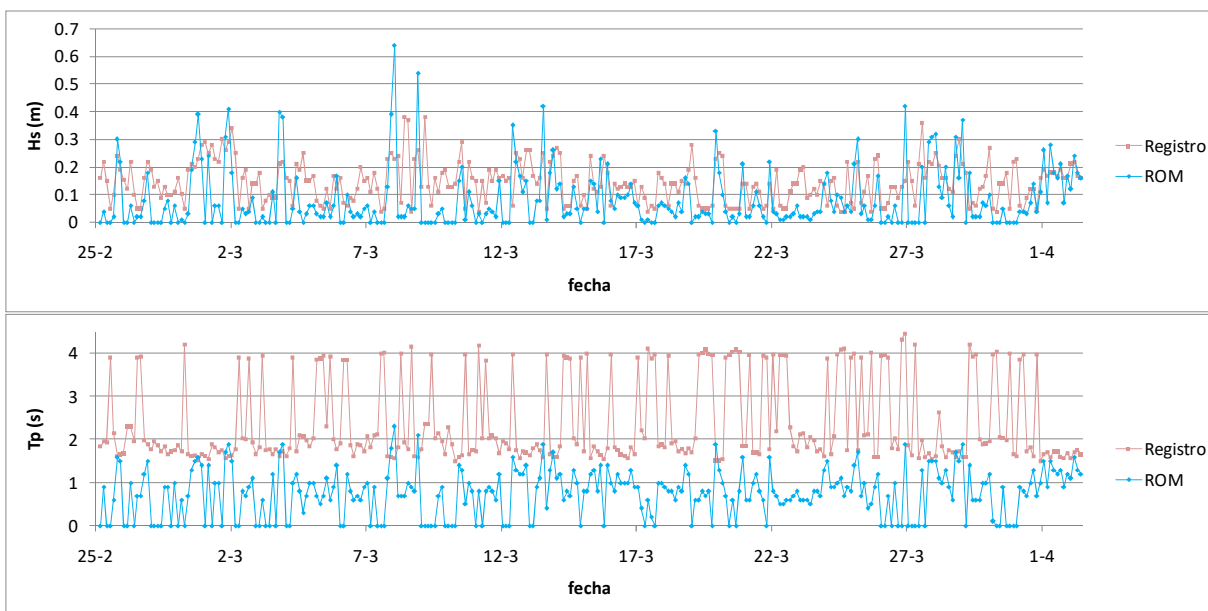


Gráfico 34: Estimaciones método ROM para intensidades de viento amplificadas. Santo Domingo.
 Fuente: Elaboración propia.

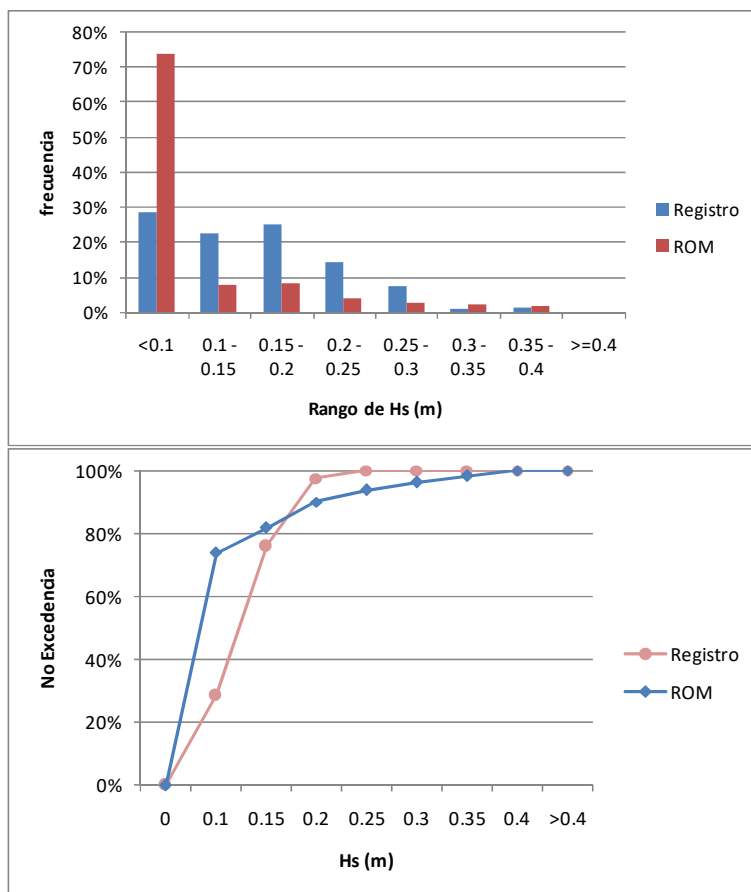


Gráfico 35: Distribuciones de H_s para intensidades de viento amplificadas. Santo Domingo.
 Fuente: Elaboración propia.

6.3 MELIMOYU

6.3.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO

En el caso de Melimoyu, solo se analizaron los registros correspondientes al intervalo de tiempo en que hay disponibles datos de viento. Se encuentran las frecuencias más importantes en rangos bajos de H_s , disminuyendo paulatinamente hacia H_s mayores, encontrándose un valor máximo de 0.95 [m], mientras los T_p , los valores medidos oscilan entre 2.2 y 4.0 [s]. Las estimaciones de H_s y T_p resultan notoriamente inferiores a las de los registros, con valores de H_s que no superan los 0.20 [m] y T_p bajo los 2.0 [s] durante todo el intervalo de tiempo analizado (Gráfico 36).

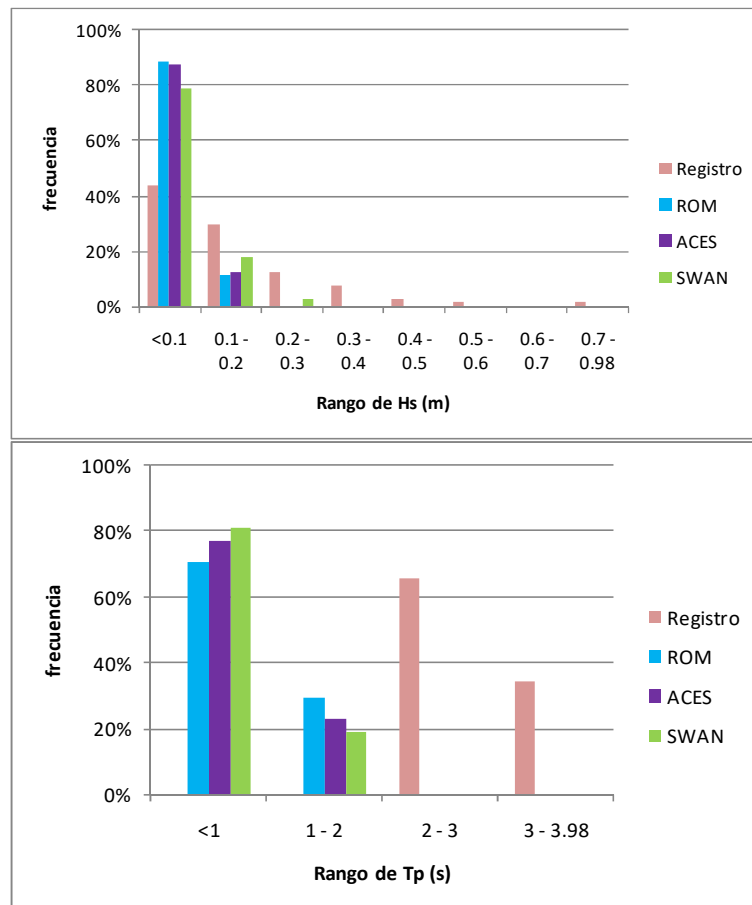


Gráfico 36: Distribuciones de H_s y T_p de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Melimoyu.

Fuente: Elaboración propia.

Para las direcciones se encuentra nuevamente un comportamiento con presencia de observaciones en rangos correspondientes a viento proveniente desde tierra, y frecuencias altas en direcciones desde donde hubo pocos registros de viento (Gráfico 37). La única concordancia importante en la distribución direccional de registros y estimaciones se obtiene en el W, con ROM y ACES a la vez, mientras los cálculos mediante SWAN concentran la gran mayoría de las condiciones en ese rango.

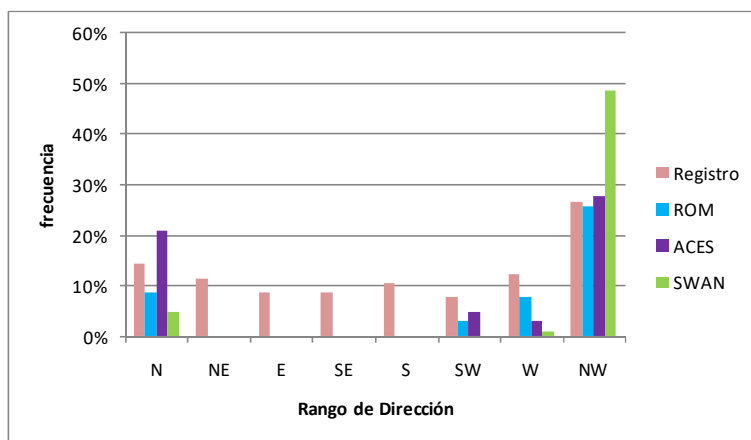


Gráfico 37: Distribuciones de *Dirp* de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Melimoyu.

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento observado en los gráficos de no excedencia para el caso de Melimoyu (Gráfico 38), no muestra coherencia entre los valores medidos y los estimados.

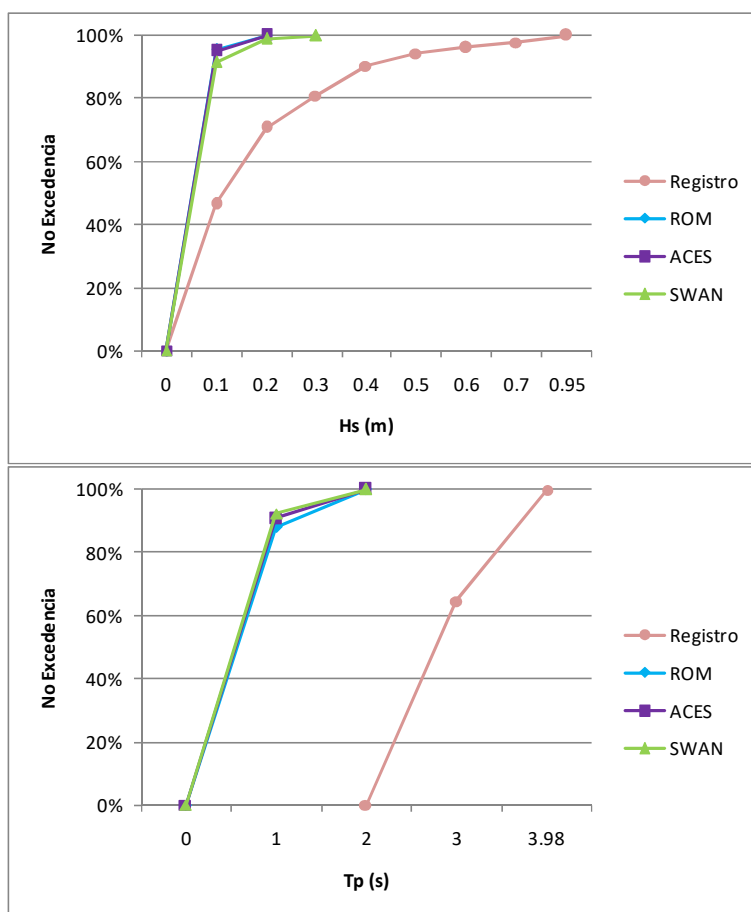


Gráfico 38: No excedencia de *Hs* y *Tp* de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Melimoyu.

Fuente: Elaboración propia.

El examen de la series de tiempo comparadas (Gráfico 39) muestra otras particularidades de los registros y resultados para este lugar. Las estimaciones de H_s no alcanzan nunca los 0.20 [m], muy por debajo de varios eventos registrados con valores por sobre los 0.40 [m] y de los máximos cercanos a 1.00 [m]. Lo mismo sucede con los T_p estimados que se mantienen bajo los 2.0 [s] a través de todo el periodo analizado, mientras que los registros se distribuyen entre 2.0 y 4.0 [s]. Por otra parte, para ambos parámetros las series de tiempo no muestran ninguna semejanza en sus comportamientos, no observándose coincidencias entre momentos de alza o disminución de las magnitudes respectivas.

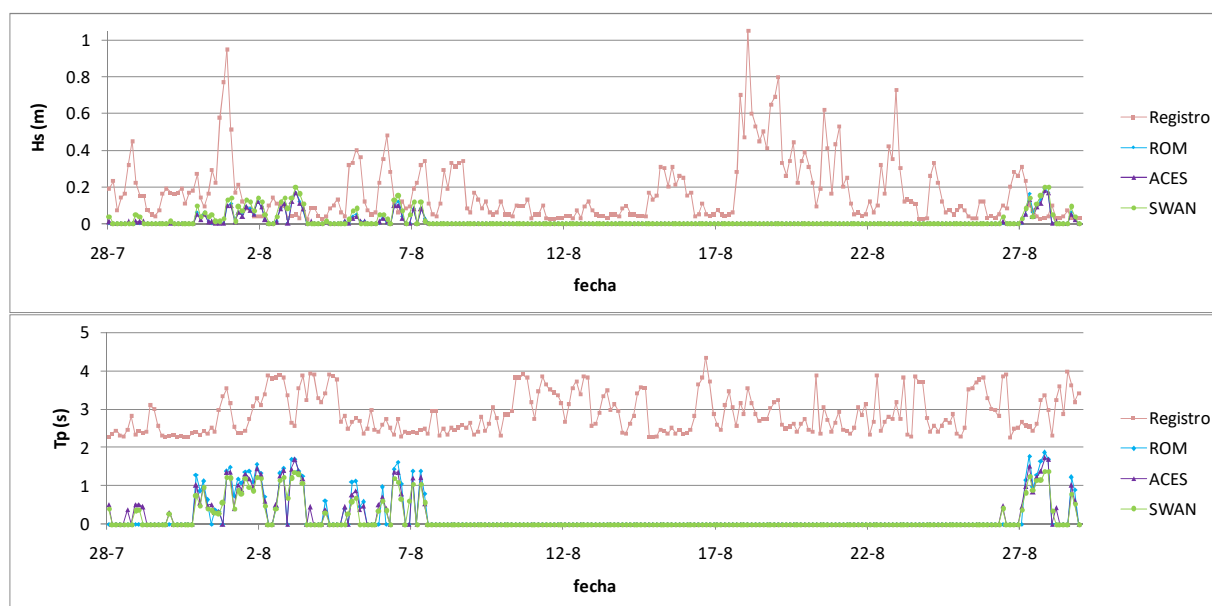


Gráfico 39: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, H_s (arriba) y T_p (abajo), en comparación con los registros. Melimoyu.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 ANÁLISIS NO ESTACIONARIO

Dada la nula concordancia obtenida hasta este punto entre estimaciones y registros, se procedió a realizar modelaciones no estacionarias para algunos eventos seleccionados (Tabla 30), con el objetivo de encontrar resultados más ajustados a las observaciones, o en su defecto, nuevas explicaciones a las diferencias descritas.

Tabla 30: Resumen eventos de viento seleccionados, Melimoyu.

Evento	Id	Periodo Registro		Duración (hr)	N° datos	Dirección Viento Inicial	
		inicio	fin			GEO (desde)	SWAN (hacia)
A	m8dia1	01/08/2009 10:00	02/08/2009 19:00	33	199	NW	315
B	m8dia3	03/08/2009 01:00	04/08/2009 04:00	27	163	SE	135
C	m8dia6	06/08/2009 22:00	08/08/2009 01:00	27	163	NW	315
D	m8dia27	27/08/2009 16:00	28/08/2009 19:00	27	163	W	0

Fuente: Elaboración Propia.

Los cuatro eventos seleccionados para este lugar tienen duraciones superiores a 24 [hr], y muestran características similares. Las direcciones que se mantienen entre los rangos W al N la mayoría del tiempo, mientras las intensidades presentan distintos intervalos de alzas y bajas, alcanzando máximos entre 4 y 7 [m/s] (Gráfico 40 a Gráfico 43).

En el evento **A** (Gráfico 40) las H_s registradas muestran valores elevados las primeras 9 [hr] de la serie, lo que no es coherente con las condiciones de viento correspondientes, y luego disminuyen hasta el mismo orden de magnitud de las estimaciones. La evolución de los valores de T_p medidos y estimados resulta similar, pero las estimaciones alcanzan niveles cercanos a la mitad de los encontrados en los registros. En tanto, las direcciones presentan tanto intervalos de semejanza como de fuertes diferencias entre ambas series.

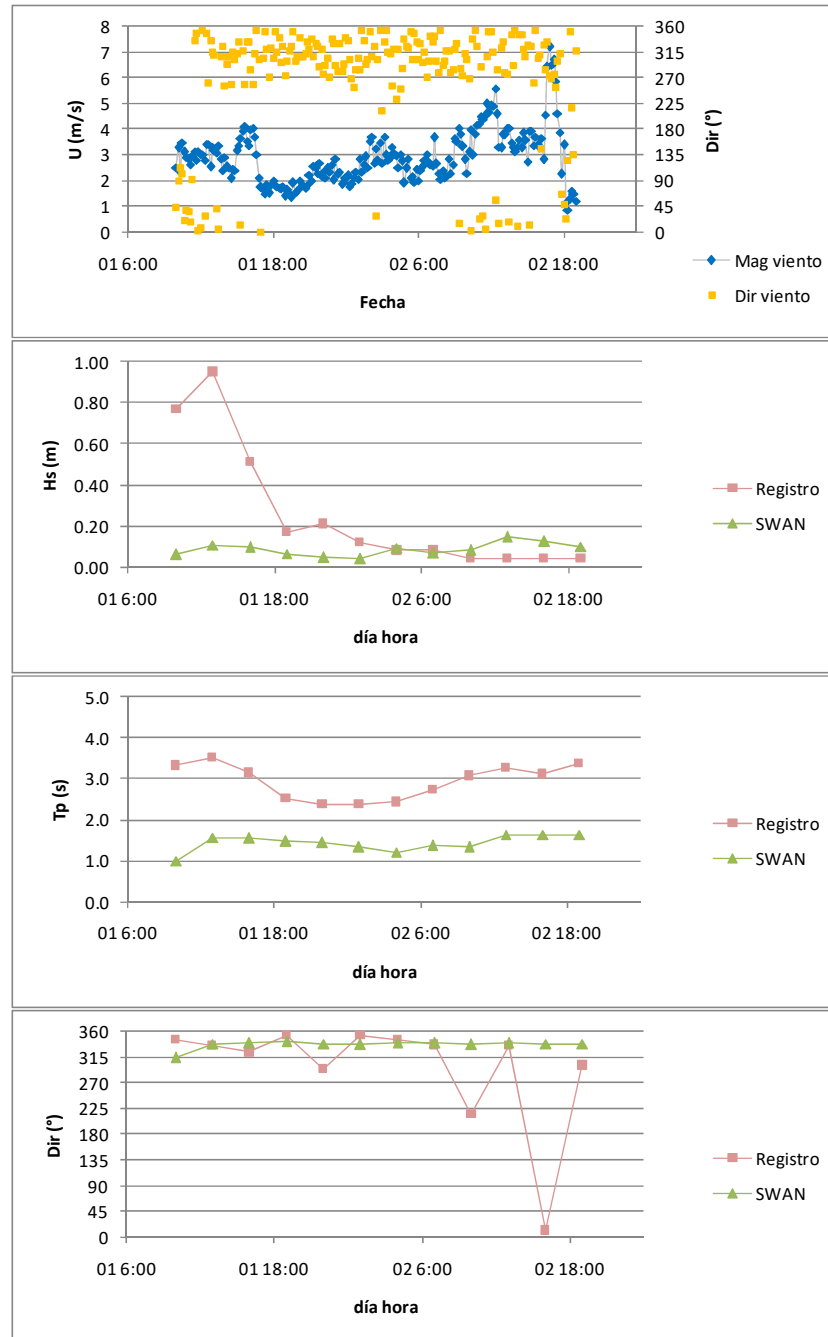


Gráfico 40: Condiciones y resultados evento de viento (A). Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

En el evento **B** (Gráfico 41) las condiciones estimadas y registradas son de muy baja intensidad, y no muestran variaciones concordantes entre sí.

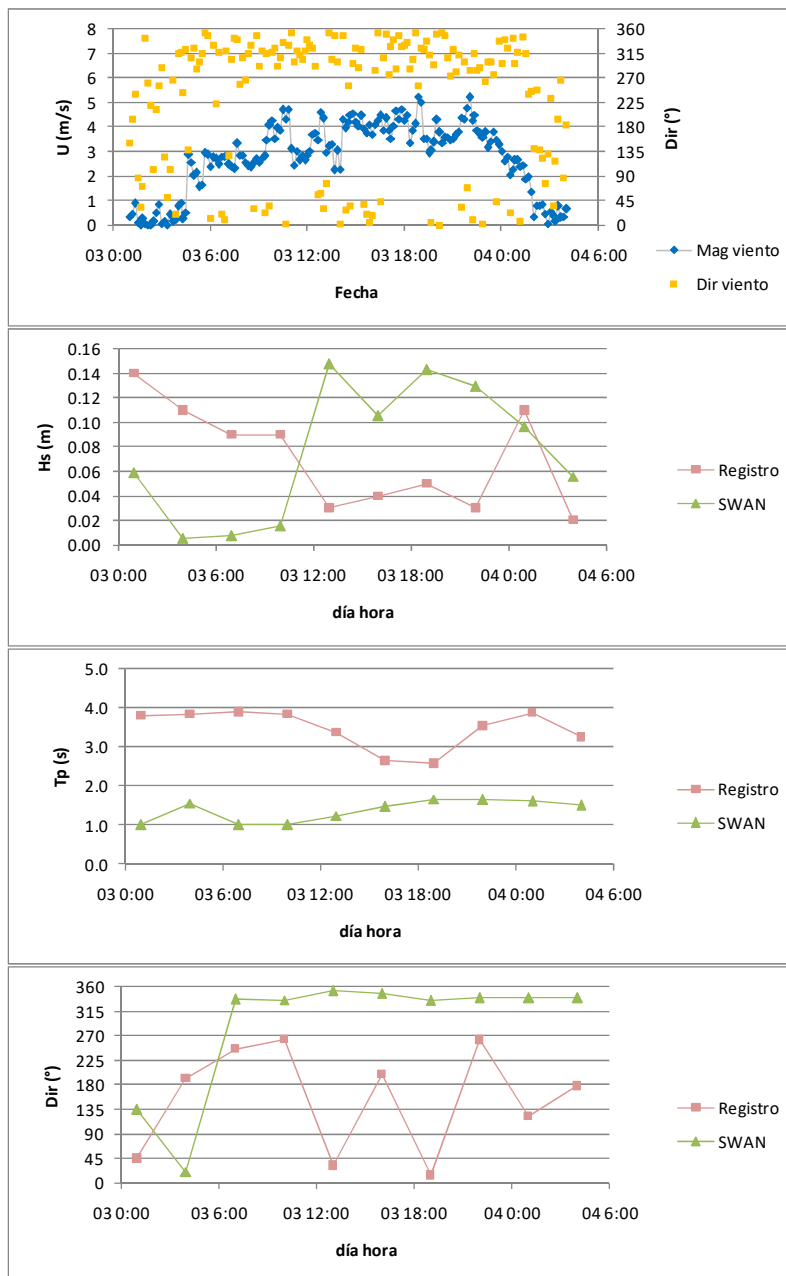


Gráfico 41: Condiciones y resultados evento de viento (B). Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

En el evento **C** (Gráfico 42) las H_s estimadas y medidas solo muestran similitudes entre el segundo y el sexto dato, presentando las mediciones un alza hacia la parte final del evento que no tiene relación con el viento medido. Los T_p de ambas series se muestran estables y con las mismas diferencias en magnitud observadas en los eventos anteriores. Las direcciones estimadas se mantienen en los rangos NW y N, coincidiendo con solo la mitad de las condiciones registradas.

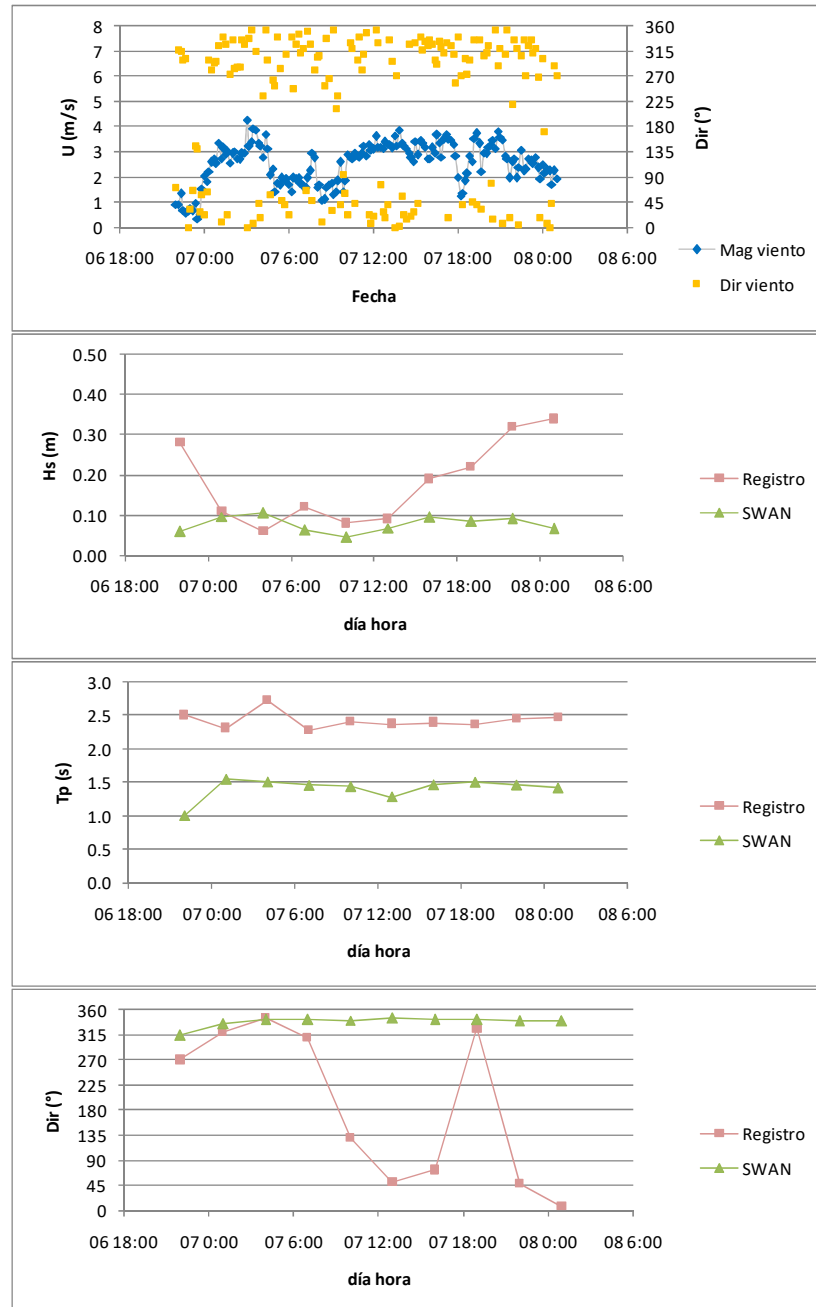


Gráfico 42: Condiciones y resultados evento de viento (C). Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

En el evento **D** (Gráfico 43) la serie de Hs estimada muestra un aumento sostenido de los valores (excepto al final), lo que no coincide con los registros donde la Hs disminuye desde el comienzo, llegando a valores cercanos a cero en momentos en que se estiman las condiciones de oleaje más relevantes. Los resultados de Tp aumentan paulatinamente, mientras los registros presentan valores notoriamente más altos. Las direcciones estimadas muestran oleaje con orientación W y NW que se mantiene durante todo el evento, similares a las medidas solo en la primera mitad del evento.

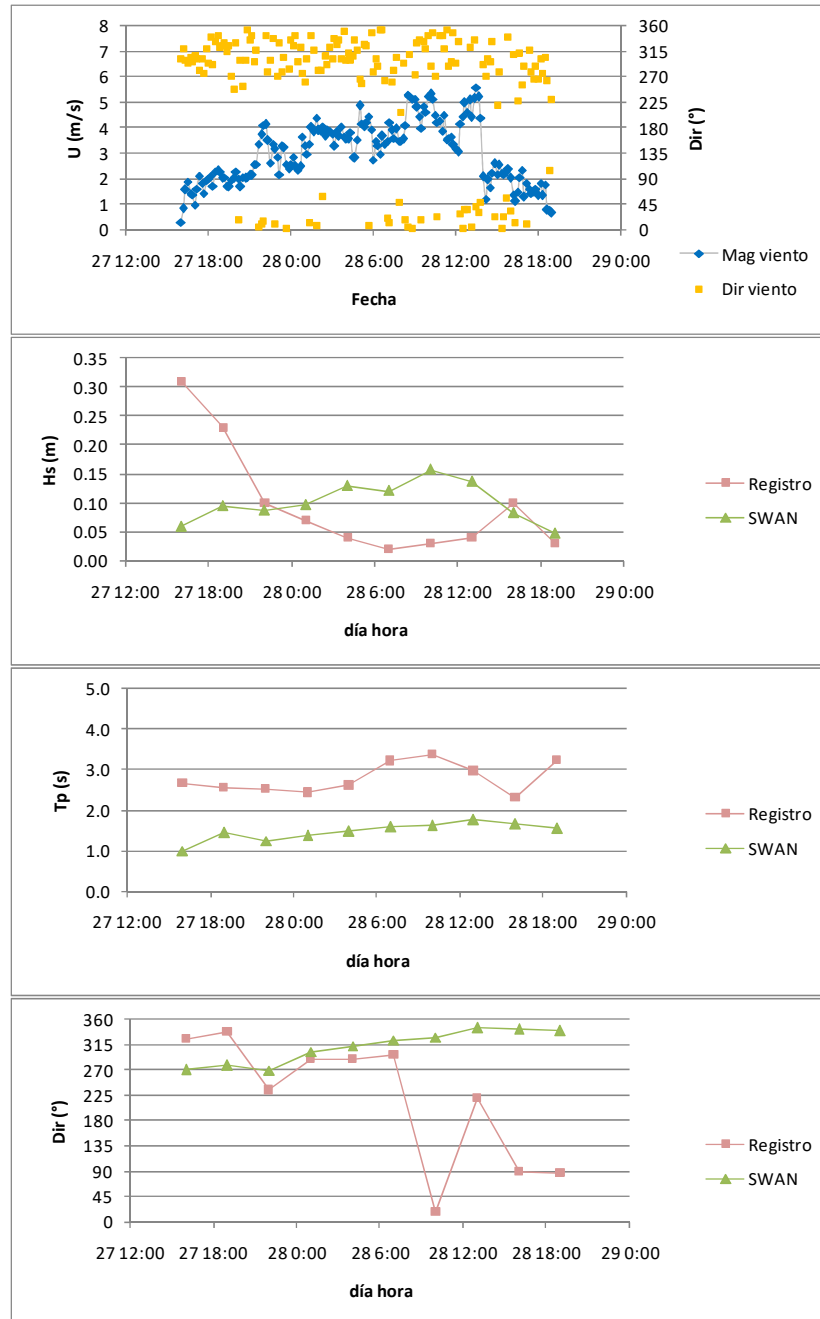


Gráfico 43: Condiciones y resultados evento de viento (D). Melimoyu.
 Fuente: Elaboración propia.

La estimación de oleaje por medio del procedimiento no estacionario no permitió llegar a resultados más ajustados a las condiciones registradas, ya que las distintas incoherencias presentadas en los tres parámetros de oleaje fueron la constante en cada uno de los eventos seleccionados.

6.3.3 VALIDACIÓN

Finalmente, el conjunto de análisis comparativos desarrollados para este sector ha permitido identificar comportamientos completamente incompatibles entre ambos fenómenos registrados, por lo que no se considera posible que las condiciones de oleaje medidas hayan sido producidas localmente por los vientos representados en los registros del sector.

6.4 BAHÍA CATALINA

6.4.1 INVIERNO

6.4.1.1 Análisis estacionario

El resumen estadístico de la primera campaña (Gráfico 44 y Gráfico 45) muestra las coincidencias que se dan entre los valores estimados y los registros. Las H_s presentan frecuencias cercanas para todos los rangos inferiores a 1.20 [m], encontrándose sobre dicho límite solo algunos de los valores obtenidos con ROM. Algo similar se observa en los T_p , donde la distribución de los registros es coherente con las de las estimaciones en la mayoría de los rangos definidos. En cuanto a las direcciones, frecuencias concordantes se encuentran solo en direcciones NE y E, ya que el número de estimaciones con dirección N (con ROM y SWAN) es más del doble que las mediciones, y no se registran condiciones de oleaje desde direcciones SE.

La no excedencia expuesta en el Gráfico 46 y el Gráfico 47 muestra las similitudes encontradas en las distribuciones de H_s , las que son más marcadas en los resultados de ROM y ACES. Las distribuciones de T_p también se muestran coherentes, excepto por una desviación importante en la marca de los 3.0 [s].

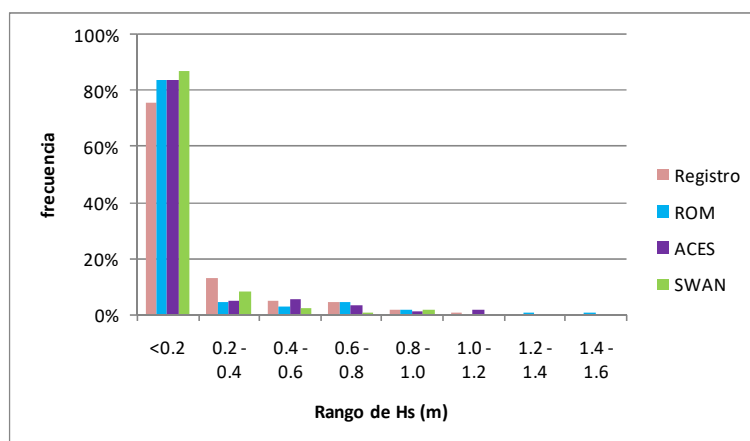


Gráfico 44: Distribuciones de H_s de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

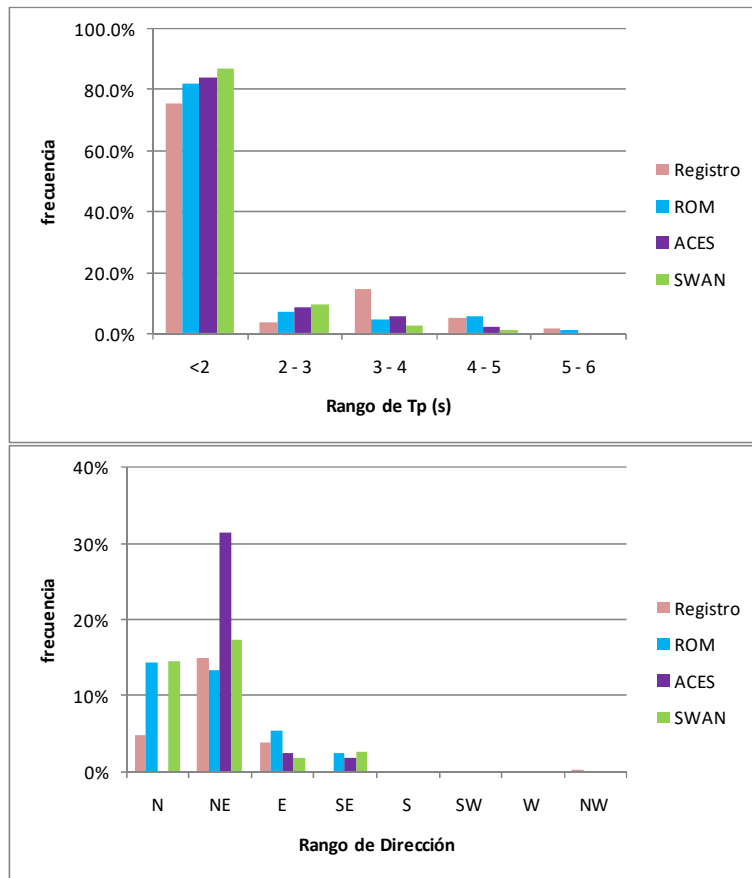


Gráfico 45: Distribuciones de T_p y $Dirp$ de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

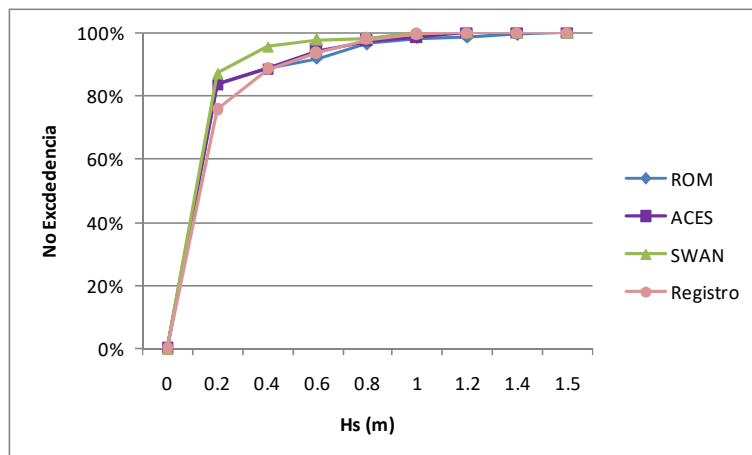


Gráfico 46: No excedencia de H_s de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

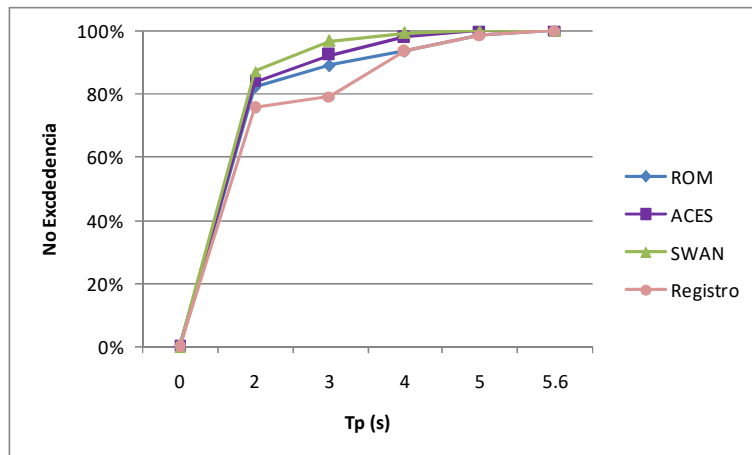


Gráfico 47: No excedencia de T_p de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

En las series correspondientes a la campaña de invierno (Gráfico 48 y Gráfico 49) se observa como para la gran mayoría de los intervalos de tiempo en que los registros mostraron condiciones relevantes de oleaje, las estimaciones entregaron comportamientos concordantes con los mismos, mientras la cercanía de los valores es distinta según cada método utilizado. Si en general mediante la ROM se obtuvieron H_s más precisas, se encontró que durante las condiciones más severas medidas este método presentó una sobreestimación importante. En el caso de los T_p también es el método ROM el que se acerca más al valor registrado la mayoría de las veces, mientras ACES y SWAN muestran algunas subestimaciones notables. en el caso de las direcciones la ROM entrega datos muy alejados de los registros, al contrario de las otras dos técnicas cuyos resultados concuerdan con las mediciones la mayoría del tiempo.

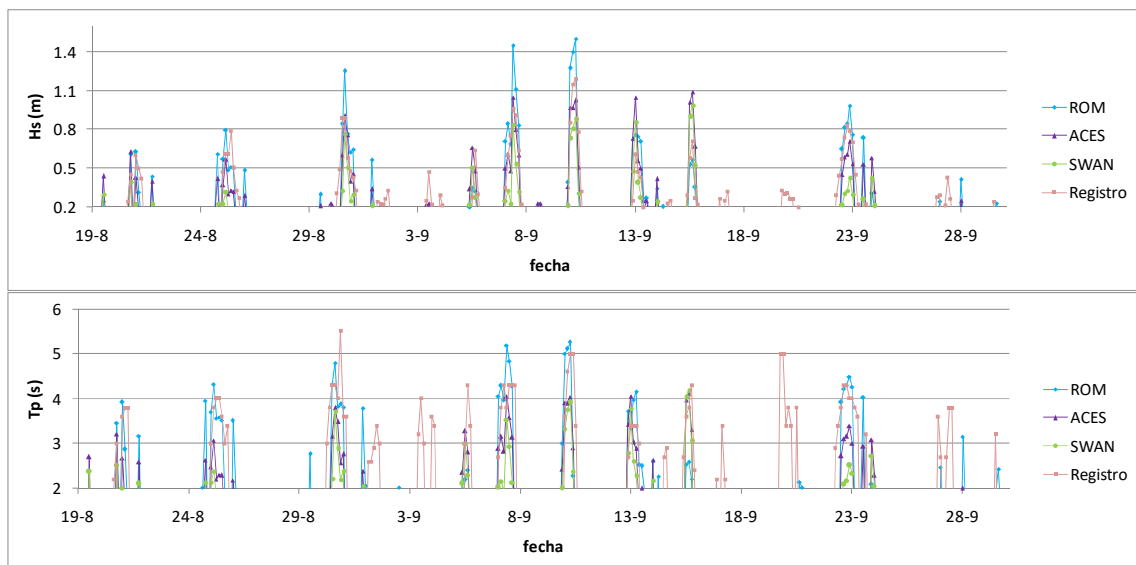


Gráfico 48: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, H_s (arriba) y T_p (abajo), en comparación con los registros. Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

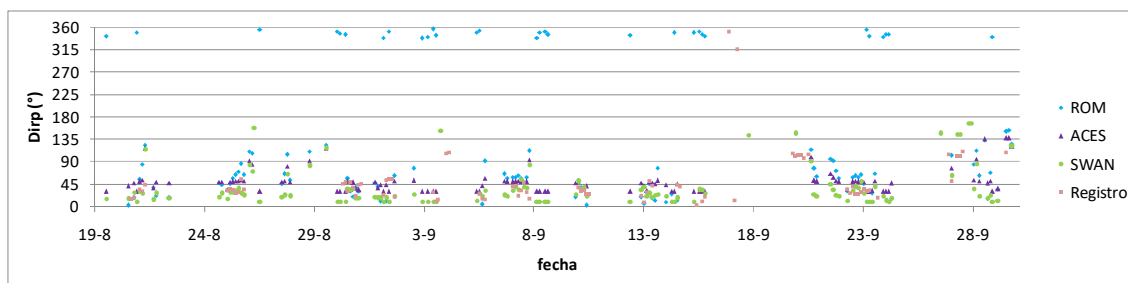


Gráfico 49: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, *Dirp*, en comparación con los registros. Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.1.2 Análisis no estacionario

Dado que las estimaciones realizadas hasta el momento no toman en cuenta la influencia de la duración de los vientos, se procedió a realizar un estudio no estacionario de algunos de los eventos de viento más relevantes, para poder observar si dicho factor permite explicar de mejor manera las condiciones de oleaje medidas.

Dentro de esta campaña se encontraron varios eventos notables, especialmente por la presencia de intensidades de viento importantes. Entre ellos se seleccionaron los ocho indicados en la Tabla 31, para su implementación en modelaciones no estacionarias.

Tabla 31: Resumen eventos de viento seleccionados, Bahía Catalina, Invierno.

Evento	Id	Periodo Registro		Duración (hr)	N° datos	Dirección Viento Inicial	
		inicio	fin			GEO (desde)	SWAN (hacia)
A	m8d21	21/08/2011 09:50	22/08/2011 03:50	18	109	NE	225
B	m8d25	25/08/2011 12:50	27/08/2011 03:50	39	235	N	270
C	m8dia31	31/08/2011 00:50	31/08/2011 21:50	21	127	NE	225
D	m9dia7	07/09/2011 21:50	08/09/2011 15:50	18	109	E	180
E	m9dia10	10/09/2011 18:50	11/09/2011 09:50	15	91	NE	225
F	m9dia13	13/09/2011 18:50	14/09/2011 12:50	18	109	NE	225
G	m9dia16	16/09/2011 03:50	16/09/2011 12:50	9	55	NE	225
H	m9dia23	23/09/2011 09:50	25/09/2011 03:50	42	253	NE	225

Fuente: Elaboración Propia.

El evento **A** muestra una variación paulatina de las direcciones del viento desde el N al E. Las intensidades son variables y alcanzan máximos cercanos a 10 [m/s] (Gráfico 50). Las *H_s* estimadas se elevaron casi hasta 0.50 [m], en un momento con vientos NNE e intensidades ligeramente inferiores a las máximas, a las 6 horas de modelación. Se obtuvieron *H_s* con un orden de magnitud similar al de los registros, pero con un ajuste importante solo en un par de ocasiones. Los *T_p* estimados se mantienen siempre cercanos a 3.0 [s], al igual que los registrados, pero estos últimos presentan mayor variabilidad en torno a dicho valor. Resulta notable la concordancia de los cambios de dirección de registros y estimaciones entre cada estado de mar y el siguiente, observando una desviación constante entre ambos valores en la mayoría de la serie.

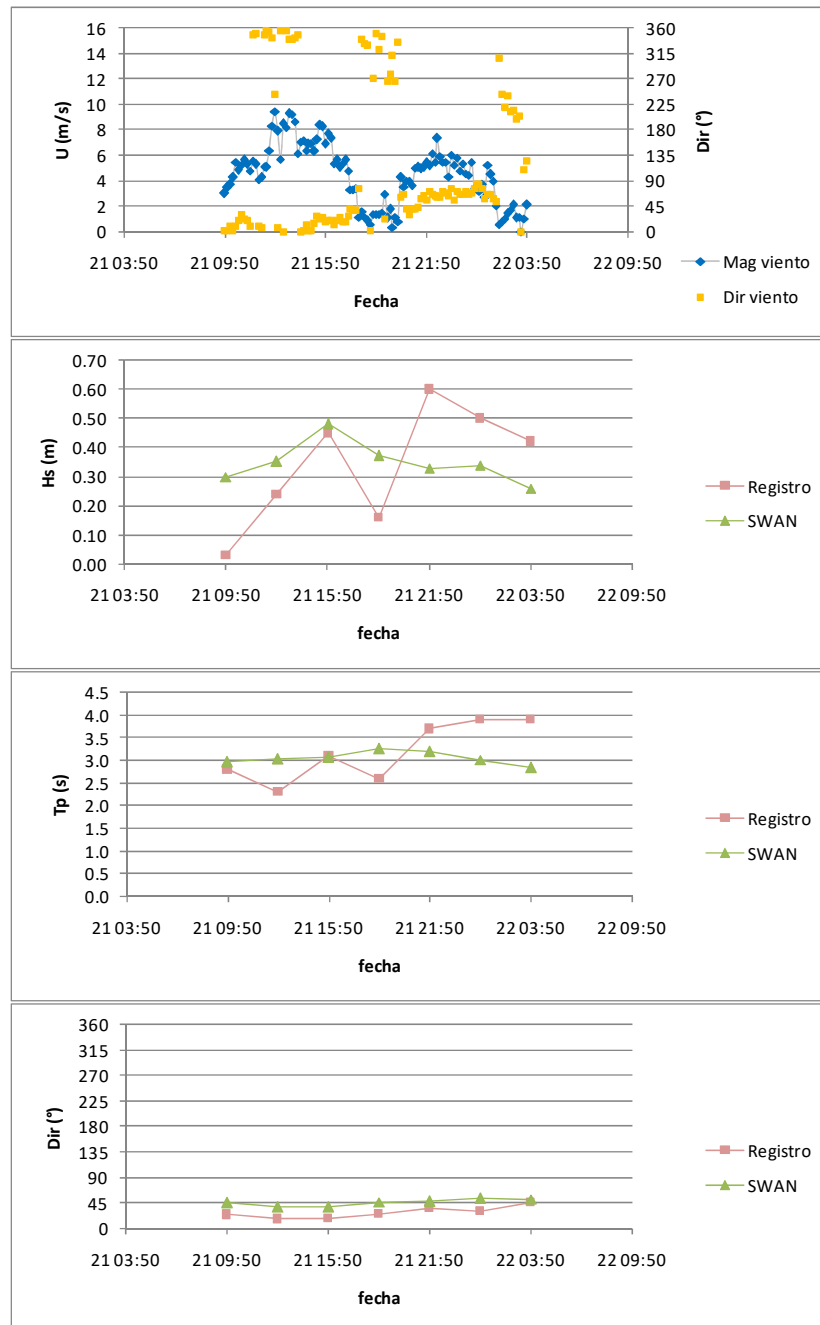


Gráfico 50: Condiciones y resultados evento de viento (A). Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento **B** es similar al anterior pero con direcciones de viento que van de NE a SE, y magnitudes que llegan a 7 [m/s] (Gráfico 51). Las estimaciones de H_s se elevan de 0.30 a 0.40 [m] a las 12 horas de modelación, después de un periodo de disminución, para luego volver a descender paulatinamente, comportamiento que solo es coincidente con los registros de H_s hacia la segunda mitad del evento. En las estimaciones de T_p los valores muestran la mismas tendencias iniciales, pero los valores luego se mantienen muy cerca de los 3.0 [s], experimentando una baja abrupta solo en el antepenúltimo dato de la serie,

mientras en las mediciones a la baja inicial le sigue un crecimiento acentuado con valores que sobrepasan los 4.0 [s] como peak, disminuyendo después de la mitad del evento, en concordancia con lo observado para la *Hs*. Sin tomar en cuenta un par de datos con direcciones que se escapan de la tendencia en las observaciones, ambas series muestran comportamientos similares, con valores que logran acercarse de manera importante en varias ocasiones, pero se alejan al final del intervalo en análisis.

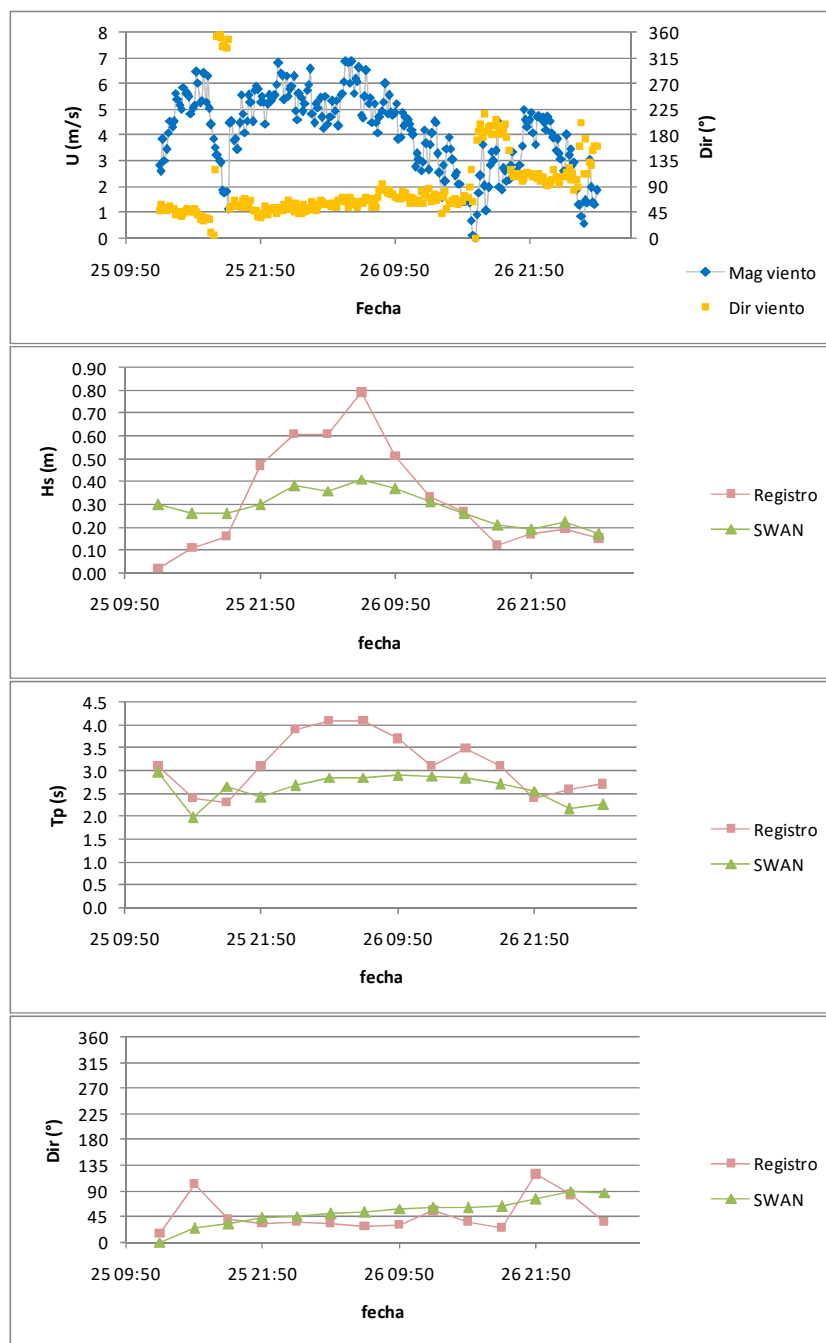


Gráfico 51: Condiciones y resultados evento de viento (B). Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento **C** tiene una primera parte con direcciones de viento alineadas desde el N y magnitudes que bajan de 6 a 2 [m/s], luego de lo cual se produce un cambio abrupto donde el viento toma direcciones del NE, con intensidades en torno a los 7 [m/s], y un peak que se acerca a 12 [m/s] (Gráfico 52).).

El salto de intensidad y dirección genera en la H_s estimada un aumento importante de valor (app. de 0.20 a 0.50 [m]) pero que no ocurre con la misma rapidez según se aprecia el peak que se alcanza luego de 6 [hr]. El comportamiento de la serie de H_s registrada resulta extraño en razón a que muestra un aumento sostenido de valor en momentos en que el viento disminuye cada vez más su intensidad manteniendo direcciones desde rango N, y también debido a que el peak alcanzado es casi un 50% mayor al estimado. Las tendencias y valores de estas series comparadas se hacen similares solo hacia el tercio final del evento.

Por otro lado, la serie estimada de T_p mantiene un comportamiento plano a través de todo el evento, siendo poco pronunciada el alza debido al cambio del viento (aumento de aproximadamente 0.5 [s]), y que no es concordante con los registros donde hay un aumento sostenido de magnitud en la primera mitad del evento y luego un decaimiento, y donde el penúltimo dato se escapa con valor irreal que no tiene relación con el viento correspondiente al instante correspondiente.

El caso de las direcciones es destacable debido a que estimaciones y registros calzan de manera casi exacta de principio a fin.

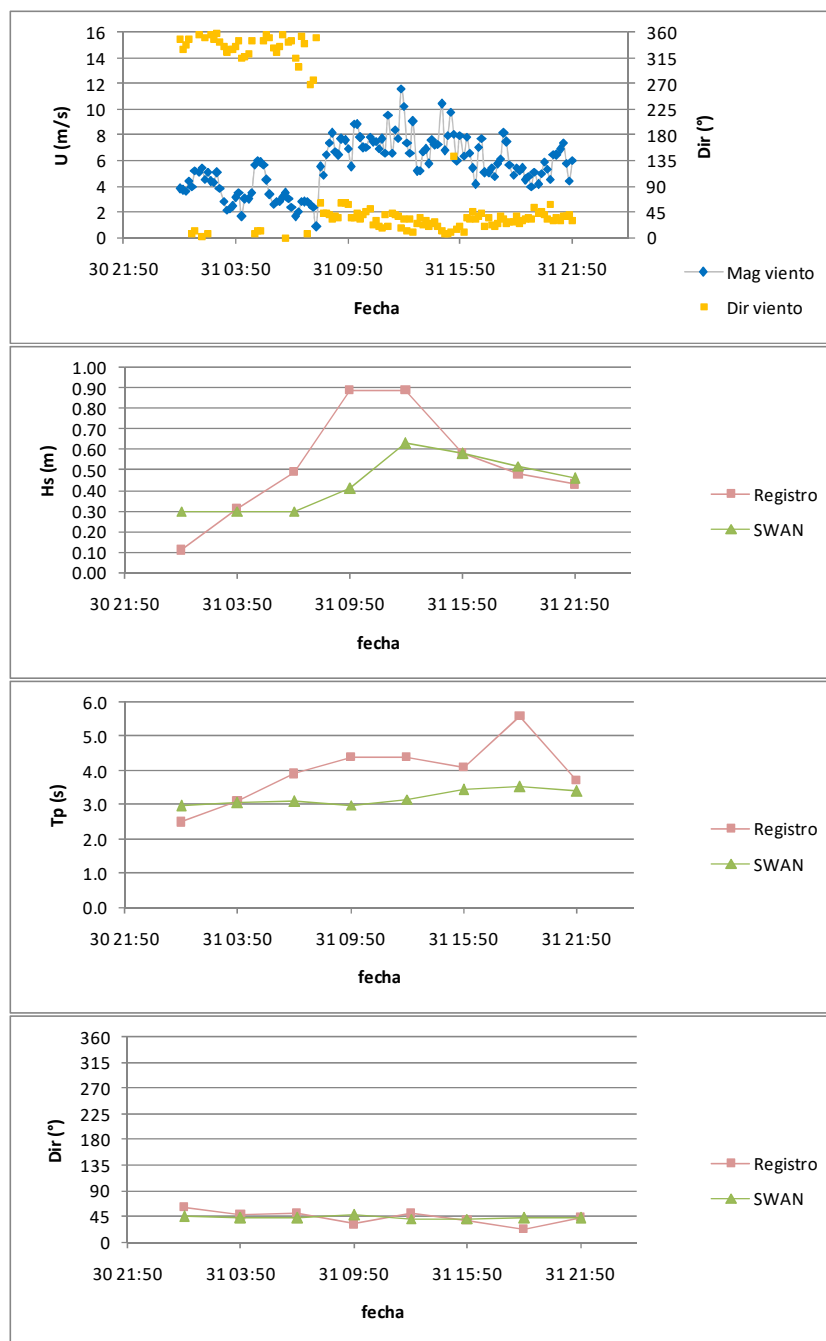


Gráfico 52: Condiciones y resultados evento de viento (C). Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

Los eventos **D** y **E** muestran vientos con direcciones constantes del NE la mayoría del tiempo, e intensidades que aumentan paulatinamente hasta alcanzar máximas de 12 y 14 [m/s], respectivamente (Gráfico 53 y Gráfico 54), disminuyendo hacia el final. Ambos eventos corresponden a las condiciones de viento más severas medidas en el lugar, lo que lleva a los resultados de H_s a elevarse hasta casi 0.90 y 1.30 [m], mientras los valores de T_p se acercan a 4.0 y 5.0 [s]. Es en estos casos extremos donde se aprecian las coincidencias más

notables en el comportamiento de las series medidas y estimadas, tanto en H_s como en T_p y Dir_p , presentándose valores dato a dato muy cercanos, como también variaciones de los distintos parámetros con muy buena sincronización.

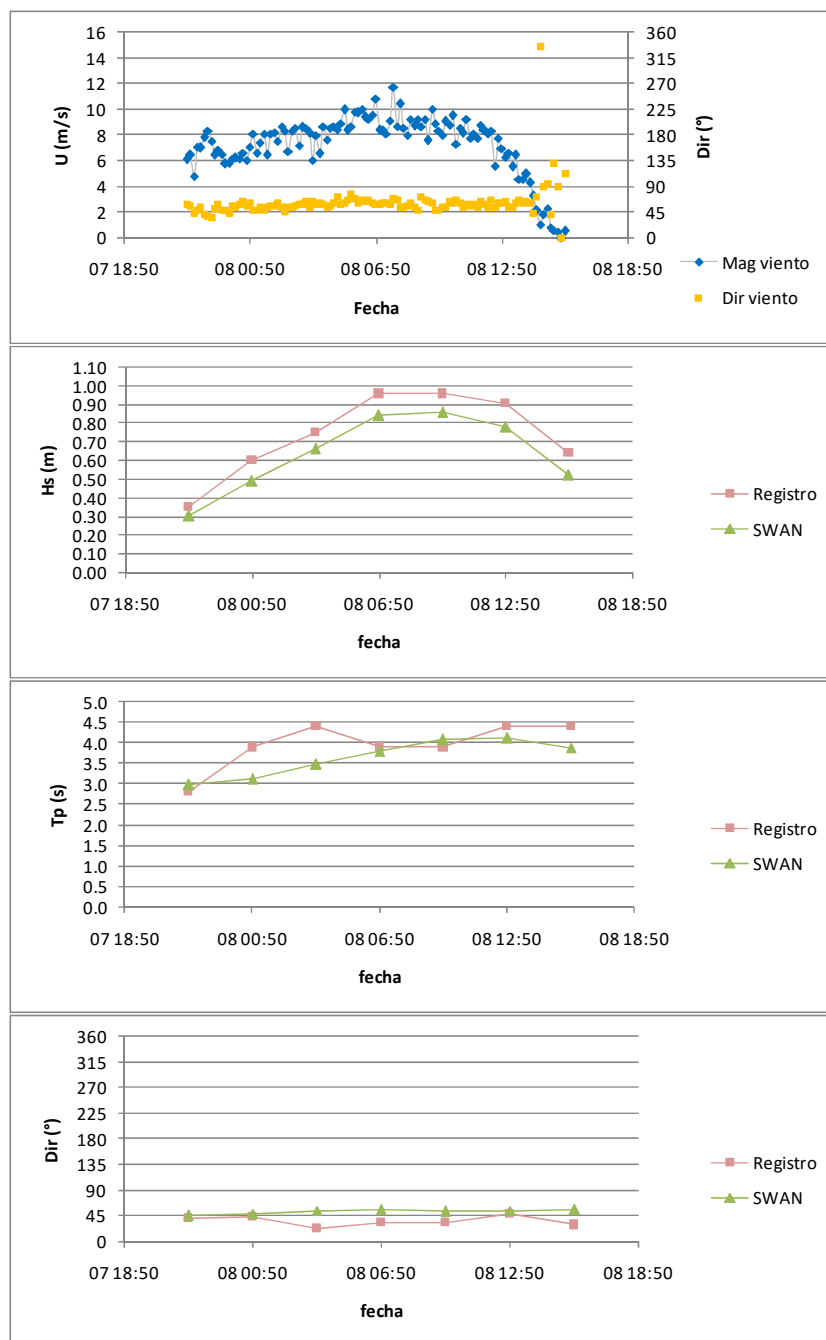


Gráfico 53: Condiciones y resultados evento de viento (D). Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

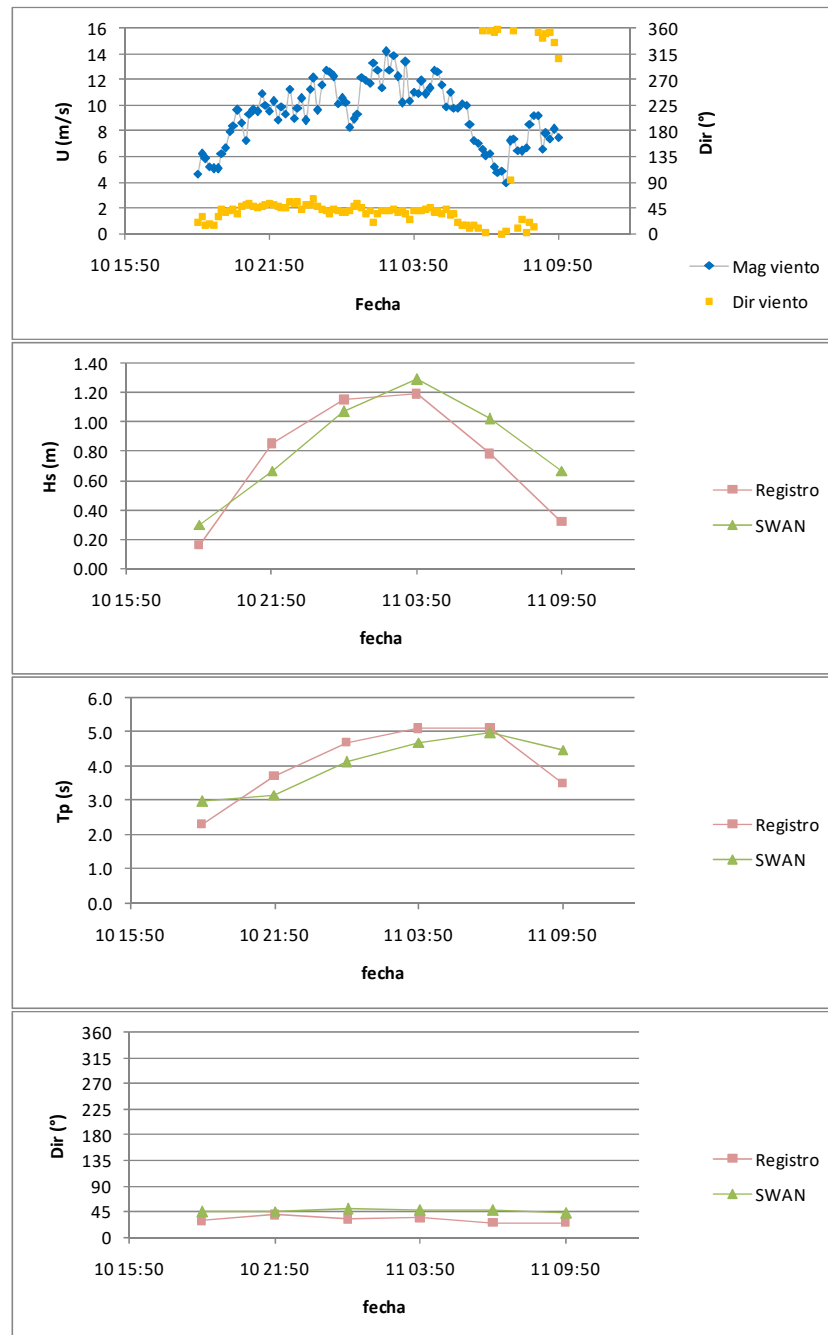


Gráfico 54: Condiciones y resultados evento de viento (E). Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento F presenta vientos desde direcciones del N y luego del NE, con intensidades que parten en torno a 8 [m/s] (con peak de 12 [m/s]), disminuyendo paulatinamente hasta 2 [m/s] (Gráfico 55). Este evento comienza con condiciones estimadas que se elevan continuamente durante las primeras 6 horas hasta alcanzar H_s de 0.60 [m] y T_p sobre 3.5 [s], perdiendo luego severidad en concordancia con el debilitamiento de los vientos, comportamiento que es muy concordante con los registros de T_p , pero donde las H_s muestran una disminución

mucho más marcada causando una diferencia de valores de hasta 0.20 [m] en algunos instantes. Por otra parte, los valores estimados de dirección son casi completamente concordantes con las observaciones.

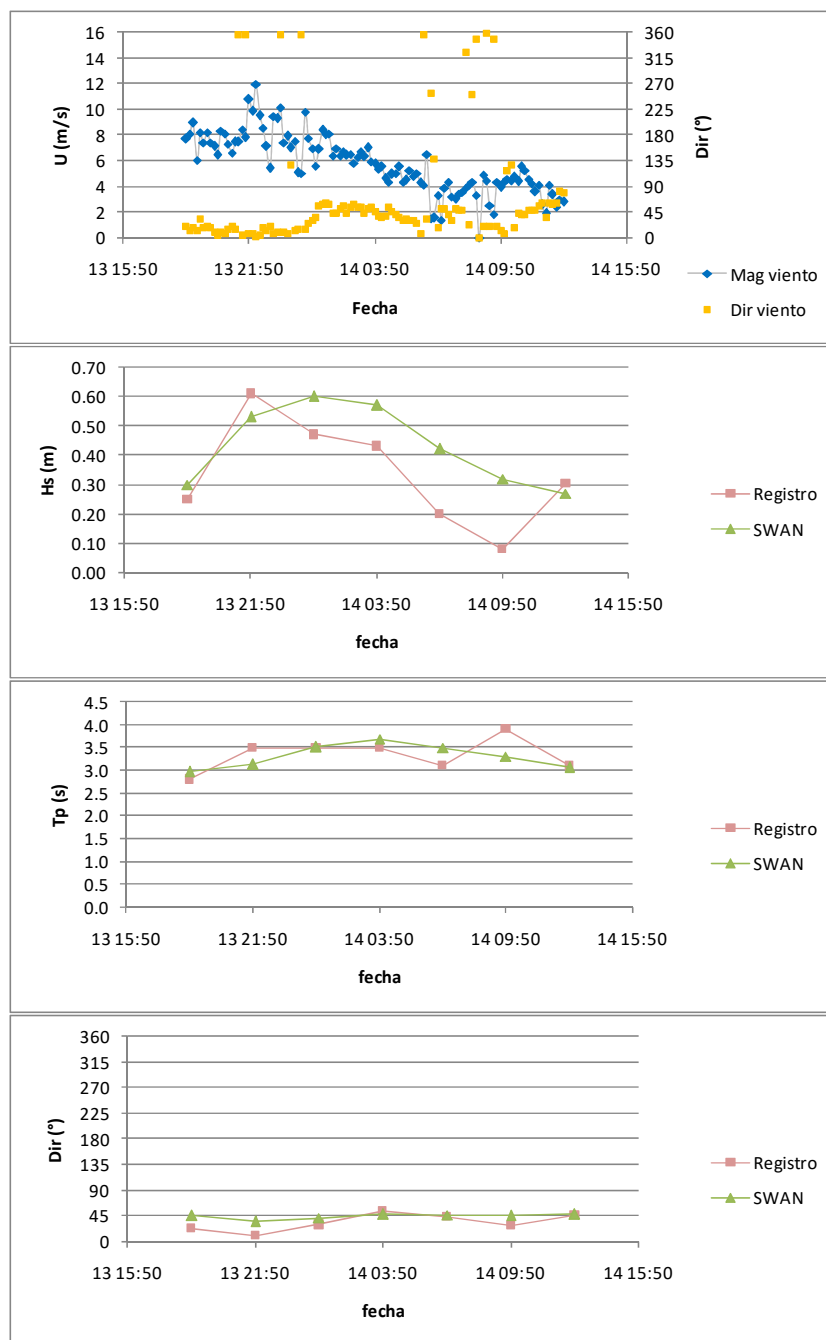


Gráfico 55: Condiciones y resultados evento de viento (F). Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

El evento **G** muestra vientos con una alineación entre direcciones N y NW, con intensidades variables y ascendentes cuyo máximo supera los 15 [m/s]. (Gráfico 56). Lo anterior generó condiciones de oleaje siempre crecientes que llegaron a H_s de 0.73 [m] y T_p de 4.3 [s]. Nuevamente dichas estimaciones muestran un comportamiento notoriamente concordante con los registros, con tendencias en los tres parámetros del oleaje, como también con valores extremos casi idénticos, alcanzados en el último dato de cada serie.

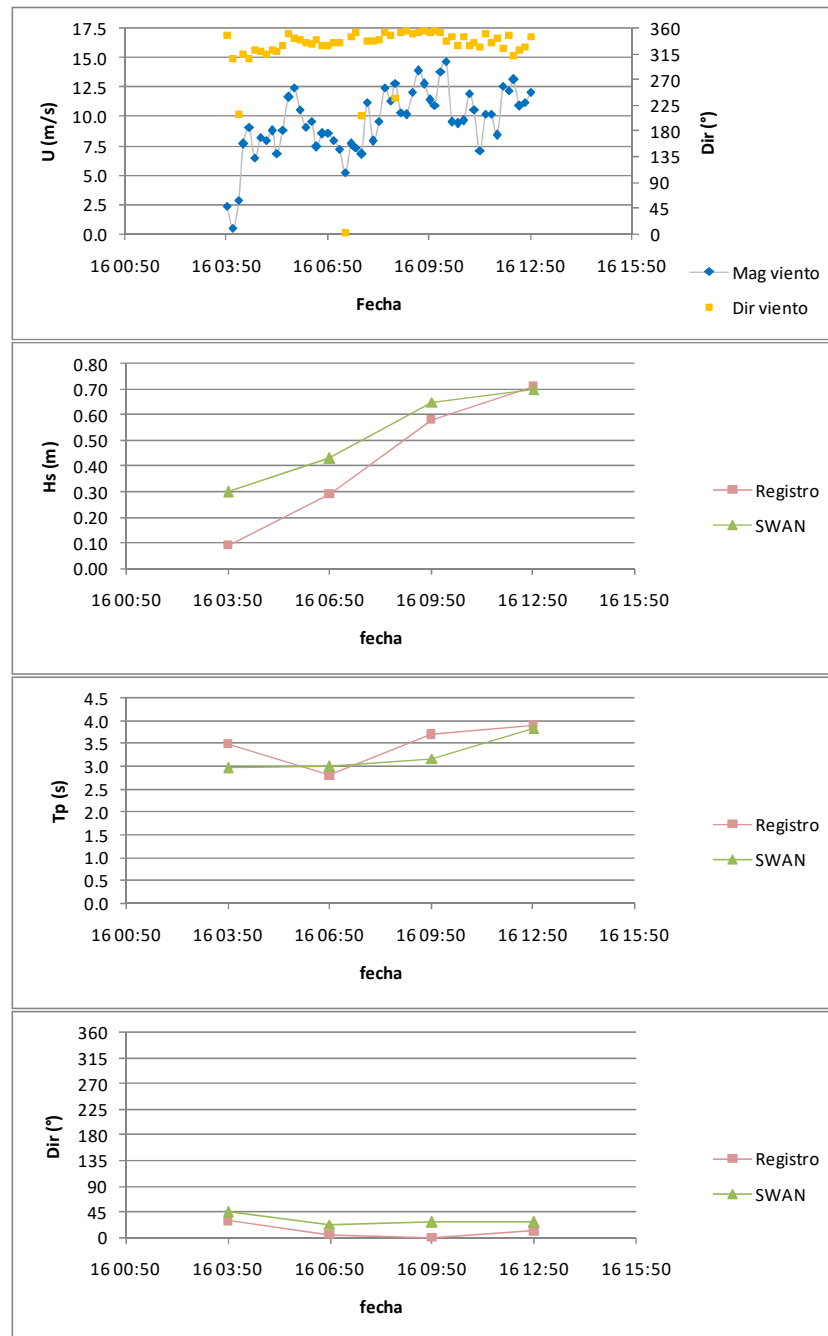


Gráfico 56: Condiciones y resultados evento de viento (G). Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento **H** muestra vientos con una alineación desde direcciones NE, que luego gira al N y NW. La intensidad del viento se presenta con un primer periodo donde alcanza los 10 [m/s] y desciende desde ahí, y con un segundo tramo en que alcanza 12 [m/s] para volver a bajar paulatinamente y con mayor variabilidad (Gráfico 57). Este es otro evento donde las tendencias experimentadas por cada par de parámetros se presentan de forma similar, con aumento de valores de H_s y T_p en momentos con intensidades de viento mayores seguidos de una disminución paulatina, pero donde se presenta un desfase a veces importante entre cada par de datos, principalmente en lo referente a las H_s donde se dan diferencias de más de 0.25 [m]. Esto afecta en menor medida a las direcciones donde las diferencias son más apreciables en la primera mitad del evento, y mínimas en la segunda parte.

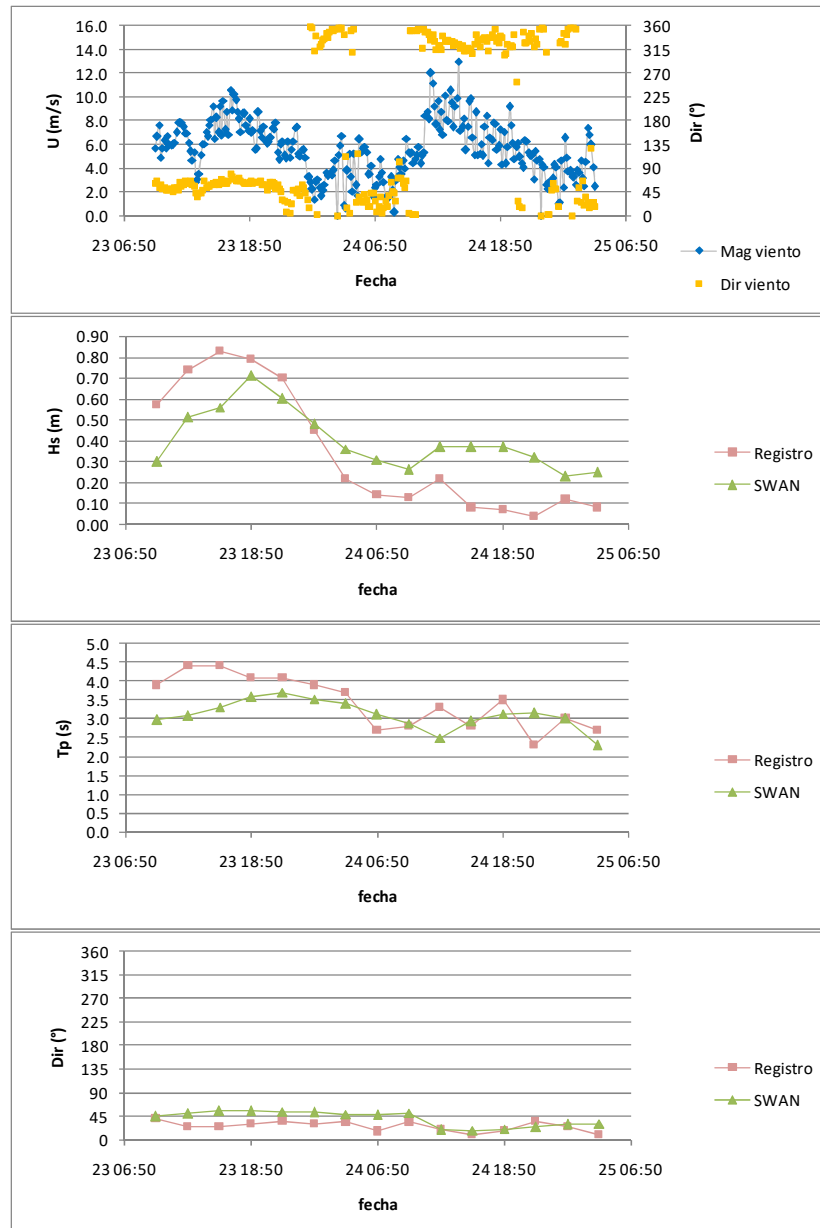


Gráfico 57: Condiciones y resultados evento de viento (**H**). Bahía Catalina, Invierno.
 Fuente: Elaboración propia.

6.4.1.3 Validación

A continuación se procede a analizar el conjunto de los resultados obtenidos en la modelación de eventos notables. En el Gráfico 58 se ordenan en el tiempo las condiciones de oleaje medidas y los resultados estacionarios y no estacionarios de SWAN.

Como se puede observar, los eventos **D**, **E**, **F**, **G** y en menor medida **H**, muestran valores y comportamientos concordantes para los tres parámetros de oleaje. Las diferencias más importantes se dan en los eventos **A**, **B** y **C**, presentando los resultados de las modelaciones no estacionarias valores de H_s y T_p más bajos que los registros. Sin embargo lo anterior, dentro de la evolución de cada uno de estos eventos se encuentran intervalos donde los valores y tendencias sí se presentan similares, lográndose un buen ajuste.

Por otra parte, resulta notorio que la utilización del modo estacionario no permite obtener una descripción precisa de la evolución de las condiciones de oleaje a lo largo de un determinado evento de viento forzante, ya que los resultados generados se separan de manera importante de las tendencias encontradas en los registros de oleaje.

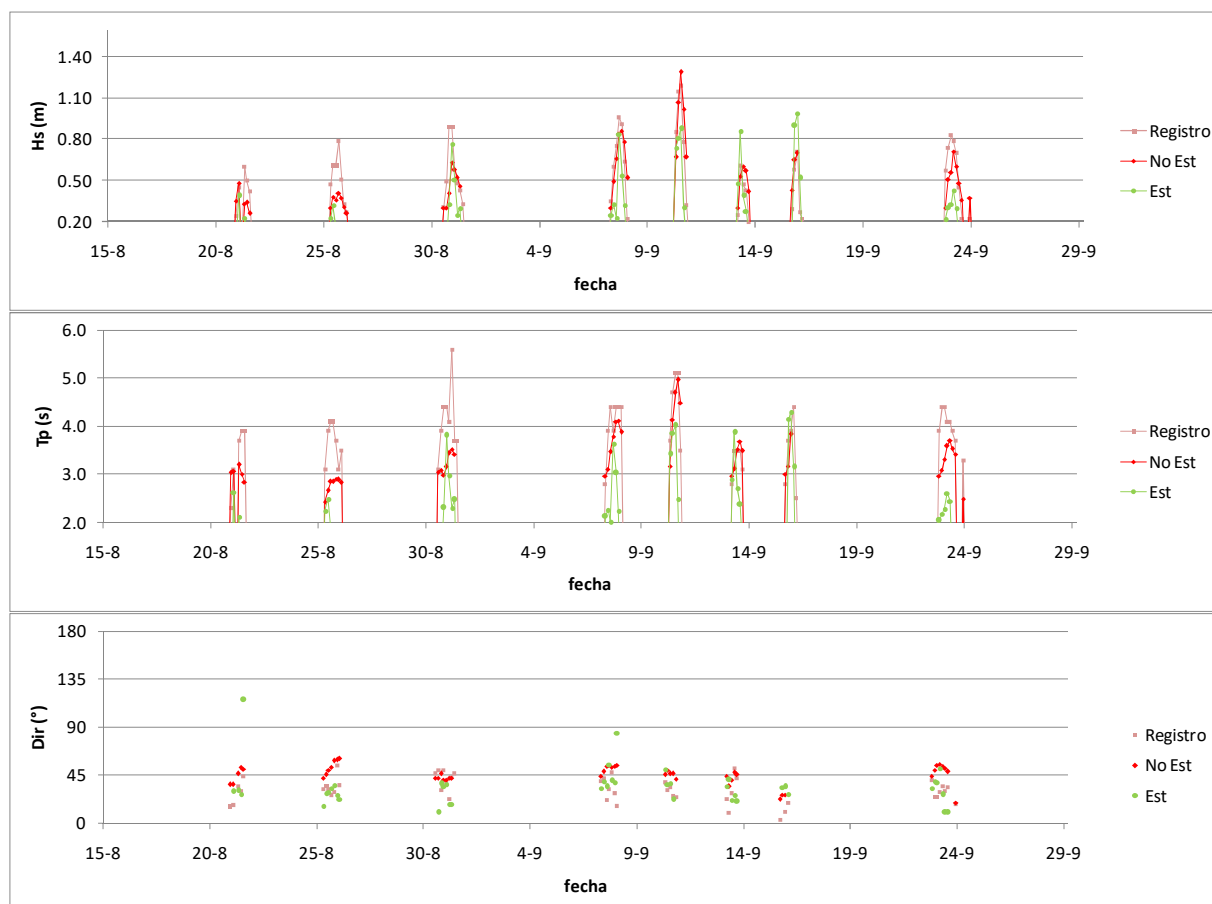


Gráfico 58: Series de tiempo resultados estacionarios y no estacionarios mediante SWAN. Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta una comparación de las distribuciones estadísticas de los registros y resultados obtenidos, correspondiente solo a la información de los ocho eventos modelados (Gráfico 59), aislados del resto de los datos.

Las distribuciones de *Hs* de estimaciones y registros se observan muy cercanas en cada rango de altura, con una pequeña frecuencia por sobre el valor de 1.2 [m] que corresponde a un solo dato puntual obtenido en el evento de viento más severo (E).

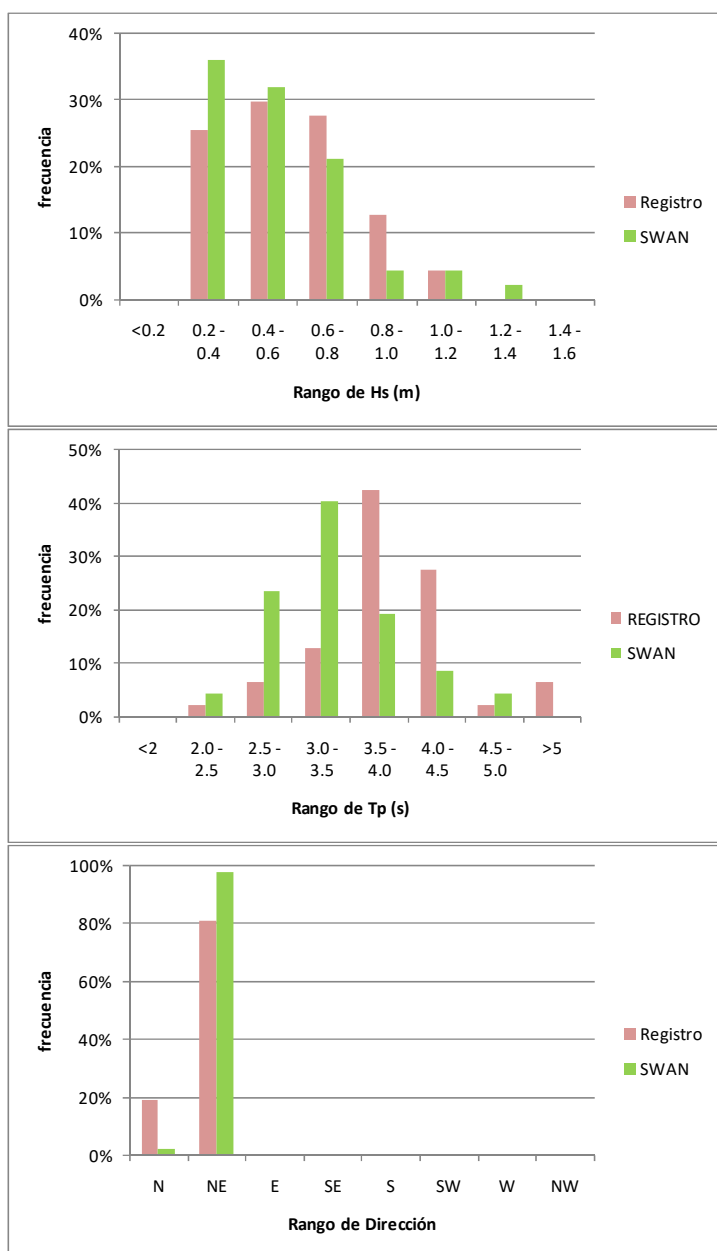


Gráfico 59: Histogramas resultados estacionarios y no estacionarios mediante SWAN. Bahía Catalina, Invierno.

Fuente: Elaboración propia.

El caso de las direcciones es el que resulta más notable dentro de los lugares estudiados, dado que tanto registros como estimaciones se distribuyen exclusivamente en los mismos dos rangos direccionales, presentando en ambos casos una concentración fuerte desde direcciones NE, con menor presencia de datos desde el N (mínima en el caso de los resultados de la modelación).

La diferencia en los T_p se traduce en que las frecuencias correspondientes a las estimaciones parecen estar desfasadas un rango (0.5 [s]) por debajo de la distribución de los registros, los cuales a la vez presentan un máximo escapado por sobre los 5 [s].

Como resultado de los anterior, se obtuvieron valores del parámetro SI de 0.32 para las H_s y de 0.20 para los T_p , lo que corresponde a valores relativamente bajos para condiciones de oleaje poco severas (Ref. 4, sec. 4), a la vez que indica que las diferencias encontradas en las series de T_p son porcentualmente menores a las obtenidas en las H_s .

En resumen, si bien se encontraron varias diferencias en los valores de H_s y T_p medidos y estimados, principalmente en los tres primeros eventos, la cantidad y relevancia de los resultados concordantes constituye evidencia importante en favor de que el método de cálculo utilizado es capaz de realizar estimaciones precisas de condiciones de oleaje generadas por los eventos de viento registrados.

6.4.2 VERANO

6.4.2.1 Análisis estacionario

En la campaña de verano realizada en Bahía Catalina, se dan algunas semejanzas en la comparación de los resúmenes estadísticos de valores medidos y estimados. Como se puede ver en el Gráfico 60, las distribuciones de H_s presentan a simple vista una diferencia importante en los primeros dos rangos (0-0.10 [m] y 0.10-0.20 [m]) entre frecuencias de valores estimados y medidos, mientras que para H_s superiores a 0.20 [m] se muestran similares. Una segunda mirada permite notar en que las frecuencias sumadas de los dos primeros rangos de H_s resultan también similares entre estimaciones y registros.

En el caso de los T_p las diferencias de frecuencia en cada rango son notorias, obteniéndose valores más bajos en las estimaciones que los registrados por el equipo ADCP. Por otro lado la forma en que descienden las frecuencias entre un rango y el siguiente es similar.

En cuanto a las direcciones, las frecuencias correspondientes a los registros muestran una presencia de frecuencias importantes solo desde direcciones dentro del fetch, que no son alcanzadas en magnitud por las correspondientes a las estimaciones.

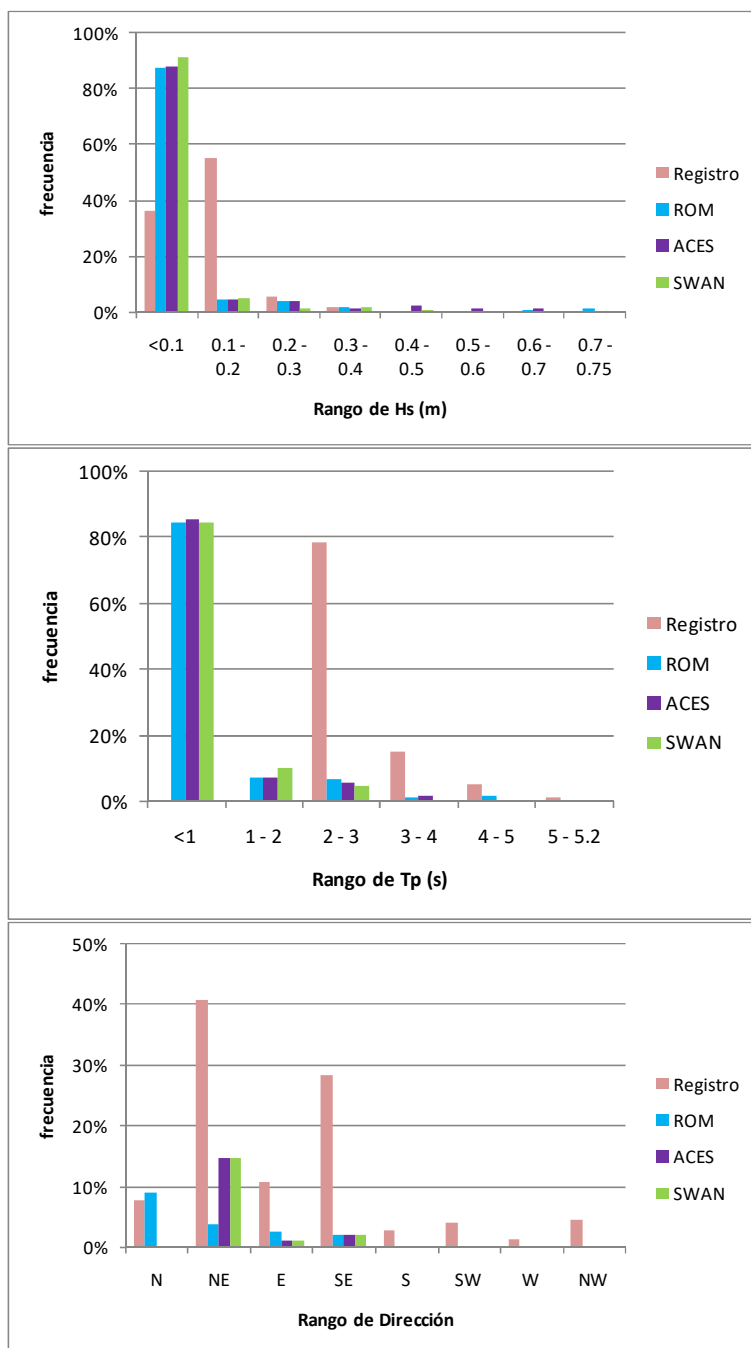


Gráfico 60: Distribuciones de H_s , T_p y $Dirp$ de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

En las visualizaciones de las distribuciones de no excedencia de H_s y T_p presentadas en el Gráfico 61, es posible observar de otra manera las mismas características inferidas de los histogramas anteriores, esto es, la forma similar entre las distribuciones correspondientes a valores medidos y estimados para H_s , mientras hay un desfase importante en el caso de los T_p , donde las estimaciones entregan valores inferiores a lo registrado.

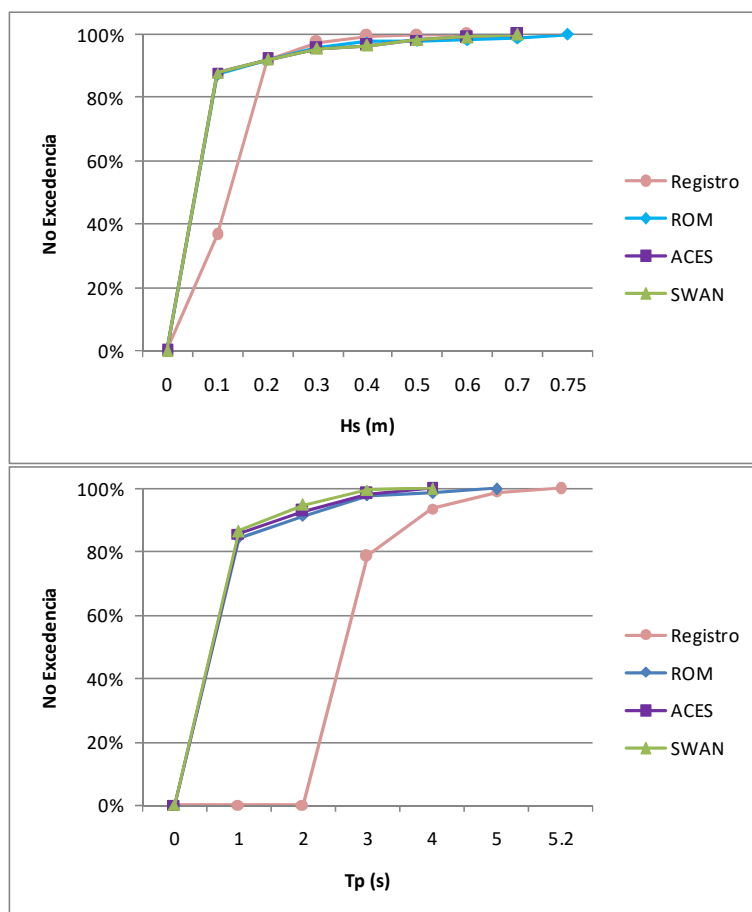


Gráfico 61: No excedencia de H_s y T_p de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

La visualización conjunta de las series de tiempo de los resultados estacionarios y de los registros (Gráfico 62), permite examinar otros detalles particulares de esta campaña. Al igual que en el registro de invierno los valores estimados de H_s son superiores a los medidos, aunque con algunas coincidencias puntuales en este caso, mientras que los T_p muestran en algunas ocasiones órdenes de magnitud concordantes.

Las máximas H_s obtenidas están sobre 0.60 [m] (con ROM y ACES), mientras la máxima registrada se acerca a 0.40 [m]. Se dan varios puntos de discordancia entre ambas series, siendo uno de los más importantes el registro de algunos peaks locales de H_s que no se ven reflejados en las estimaciones. Lo mismo se observa en las serie de T_p . Sin embargo lo anterior, se observa que los resultados más elevados de H_s y T_p son del mismo orden de magnitud que los correspondientes a los registros, observándose además que se obtienen valores similares para un mismo instante en varios puntos dentro del periodo en estudio.

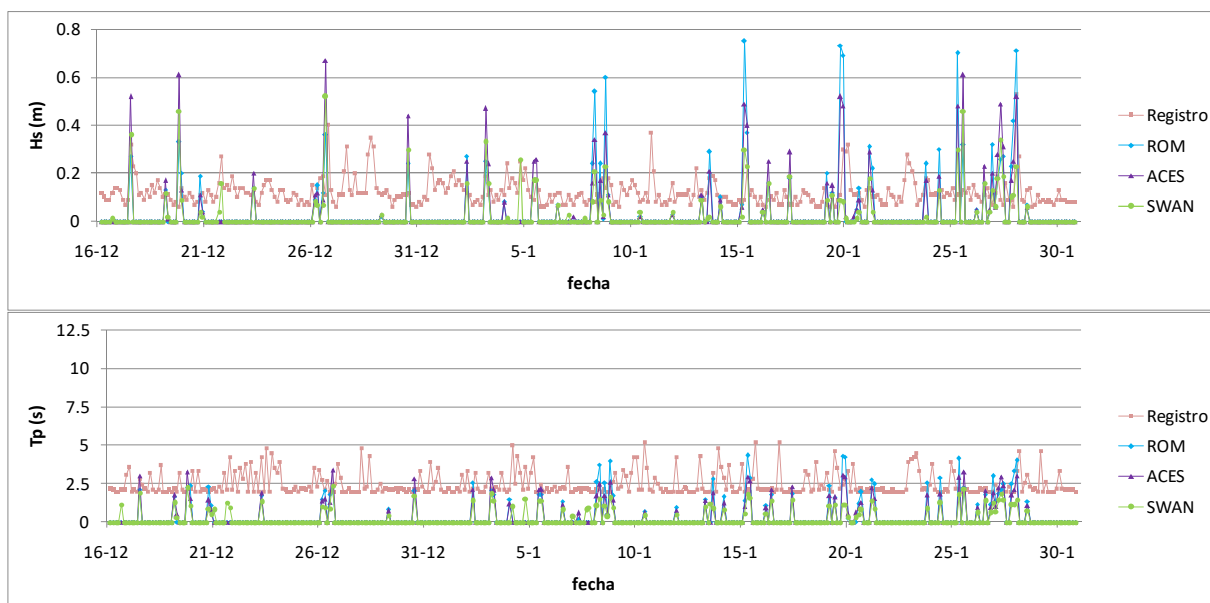


Gráfico 62: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, H_s (arriba) y T_p (abajo), en comparación con los registros. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, y al igual que en la campaña anterior, los resultados llegan a presentar diferencias notorias según el método utilizado, principalmente para las intensidades de viento mayores.

6.4.2.2 Análisis no estacionario

En la campaña de verano, las condiciones de viento se presentaron menos intensas que en invierno, existiendo también menos eventos relevantes para tomar en cuenta en los cálculos no estacionarios, por lo que se seleccionaron solo los cinco indicados en la Tabla 32.

Tabla 32: Resumen eventos de viento seleccionados, Bahía Catalina, Verano.

Evento	Id	Periodo Registro		Duración (hr)	N° datos	Dirección Viento Inicial	
		inicio	fin			GEO (desde)	SWAN (hacia)
I	m12dia26	26/12/2011 21:00	27/12/2011 15:00	18	109	N	270
J	m1dia3	03/01/2012 18:00	04/01/2012 06:00	12	73	N	270
K	m1dia8	08/01/2012 21:00	09/01/2012 21:00	24	145	NE	225
L	m1dia20	20/01/2012 12:00	21/01/2012 00:00	12	73	SE	135
M	m1dia26	26/01/2012 00:00	26/01/2012 15:00	15	91	N	270

Fuente: Elaboración propia.

Los eventos **I** y **J** muestran direcciones alineadas del N y NW, con algunas interrupciones (Gráfico 63 y Gráfico 64). Las intensidades en general van aumentando en el evento **I** hasta alcanzar máximos de 14 [m/s], mientras en el evento **J** se muestran muy variables, moviéndose entre 2 y 9 [m/s].

En el evento **I**, las H_s estimadas se acercan mucho a los valores medidos, sobre todo en el último dato del evento, que presenta las condiciones más severas dentro de todo el periodo

en análisis. Una excepción se ve en el penúltimo dato donde el registro muestra una caída no reflejada en las estimaciones. La serie estimada de T_p muestra un aumento suave y sostenido alcanzando a los valores medidos solo hacia el final del evento. La coherencia entre las series estimada y medida de Dir_p es también notable, especialmente porque los cambios de dirección van coincidiendo en cada dato, a excepción del último.

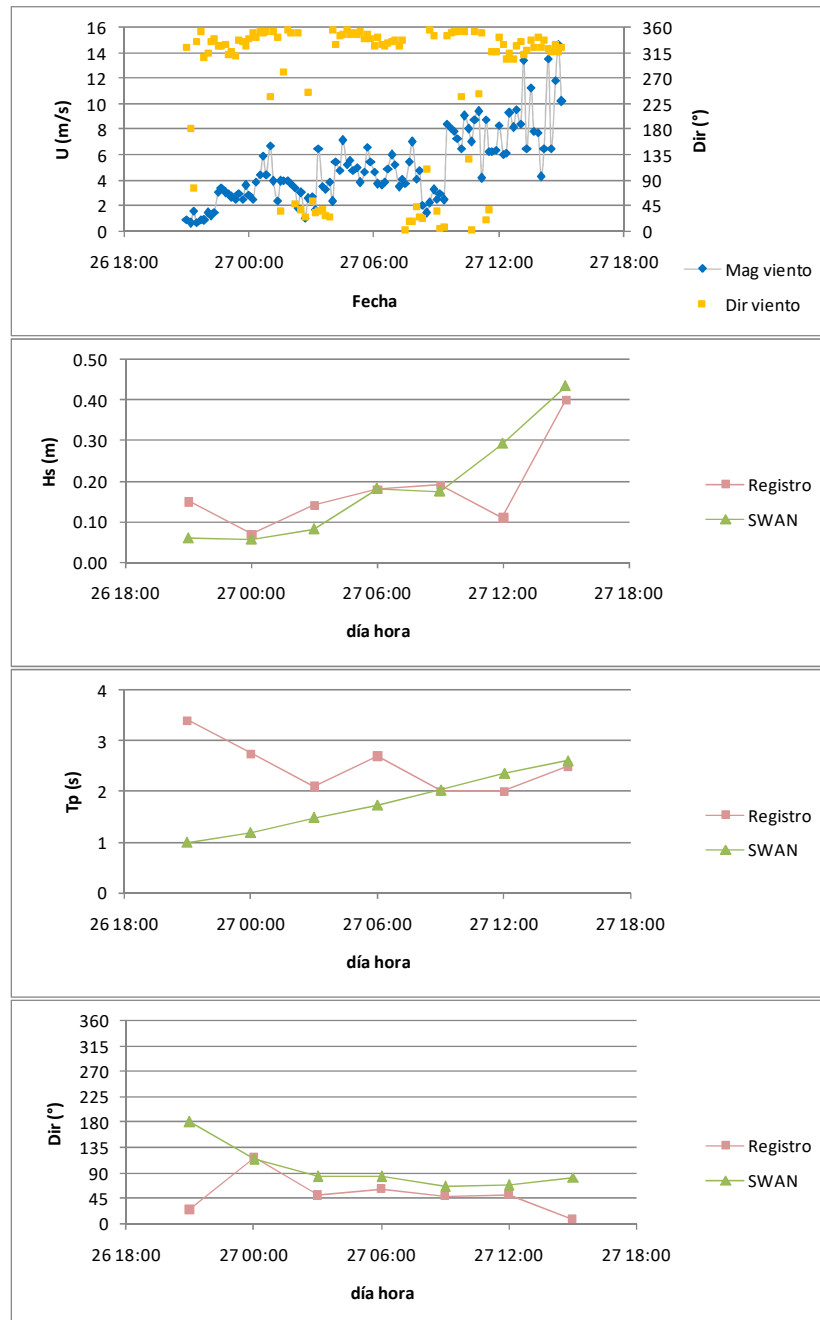


Gráfico 63: Condiciones y resultados evento de viento (I). Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

En el evento **J** se da una coincidencia entre el valor inicial registrado de H_s y el definido para la estimación, lo que genera una coincidencia desde el primer dato y que mantiene con mayor o menor precisión durante todo el evento. Por su parte el valor inicial arbitrario que se asignó para el T_p es bajo en relación al medido, de manera que ambas series se van acercando hacia el final del evento. Las direcciones muestran un comportamiento cercano, aunque las diferencias entre cada par de valores simultáneos alcanza en ocasiones los 45° .

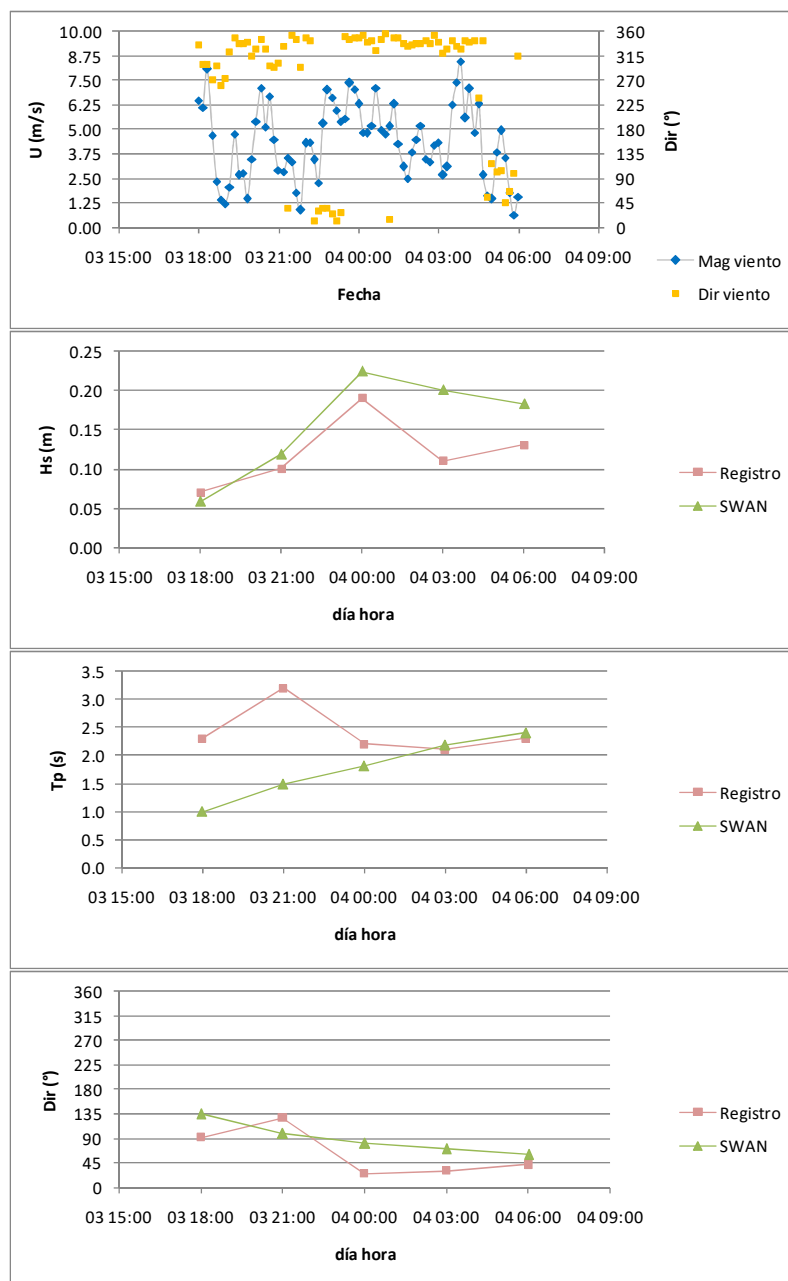


Gráfico 64: Condiciones y resultados evento de viento (J). Bahía Catalina, Verano.
 Fuente: Elaboración propia.

En el evento **K** las intensidades de viento se muestran variables y se ubican entre 1 y 8 [m/s]. En cuanto a las direcciones, estas son cercanas al NE (Gráfico 65). Las series de tiempo de *Hs* comienzan con valores similares, separándose para volver a acercarse en las últimas 12 horas del evento. La serie de tiempo de *Tp* estimados parte de valores más bajos que los registrados que se mantienen cercanos a 2.0 [s], alcanzándolos a partir del cuarto dato. Las direcciones estimadas muestran una dirección relativamente constante del NE, mientras los registros se mueven dentro de rangos NE y E

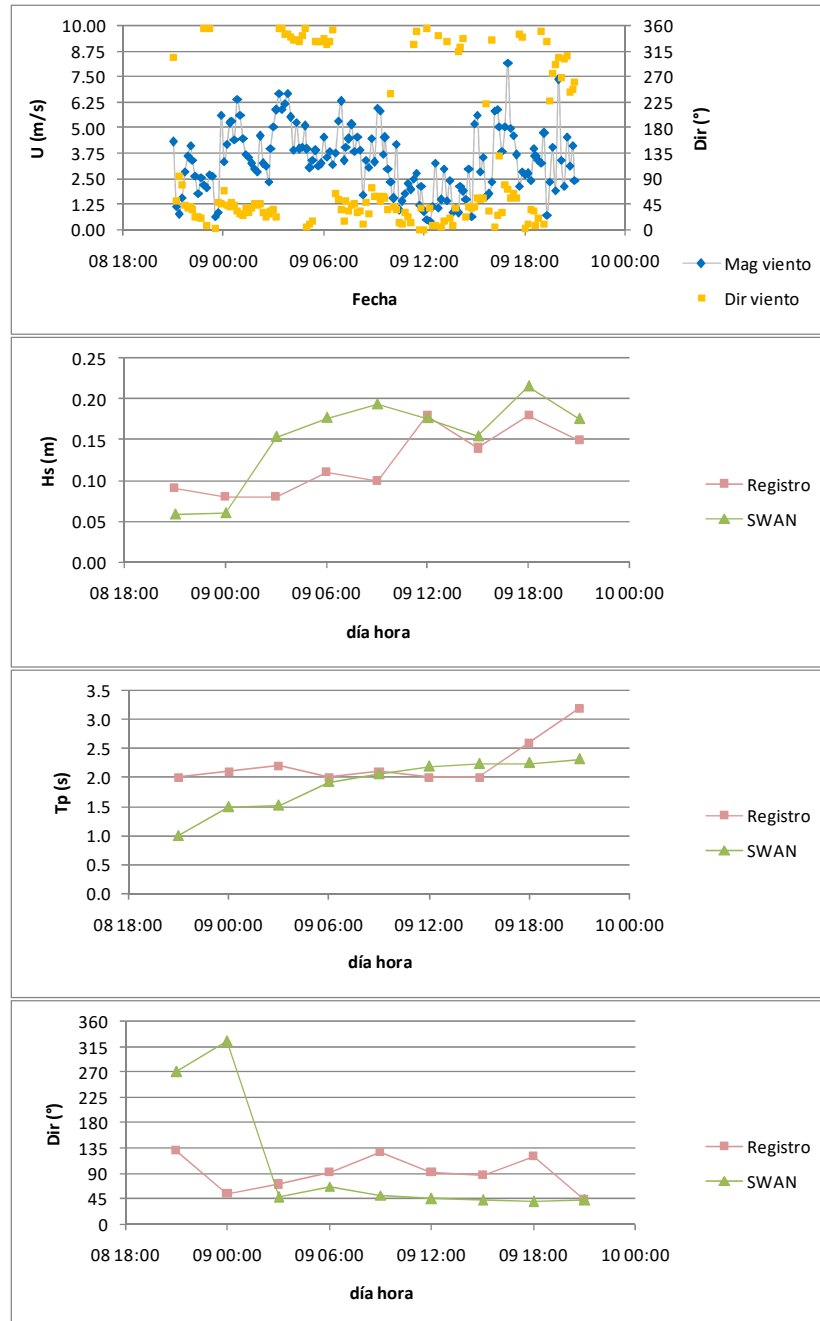


Gráfico 65: Condiciones y resultados evento de viento (K). Bahía Catalina, Verano.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento **L** muestra alta variabilidad en las intensidades, alcanzando un máximo de 6 [m/s] y disminuyendo a cerca de 1 [m/s] al final (Gráfico 66). Las direcciones también se muestran variables, excepto por un intervalo central donde provienen del E. Las series de tiempo de *Hs* comienzan con valores similares, pero se separan cada vez más con el paso del tiempo, aunque coinciden en los cambios de tendencia en todos los puntos. Las series de tiempo de *Tp* estimados parten de valores muestran la misma tendencia pero con valores muy distintos. Las direcciones muestran una gran congruencia a partir del segundo dato de la serie.

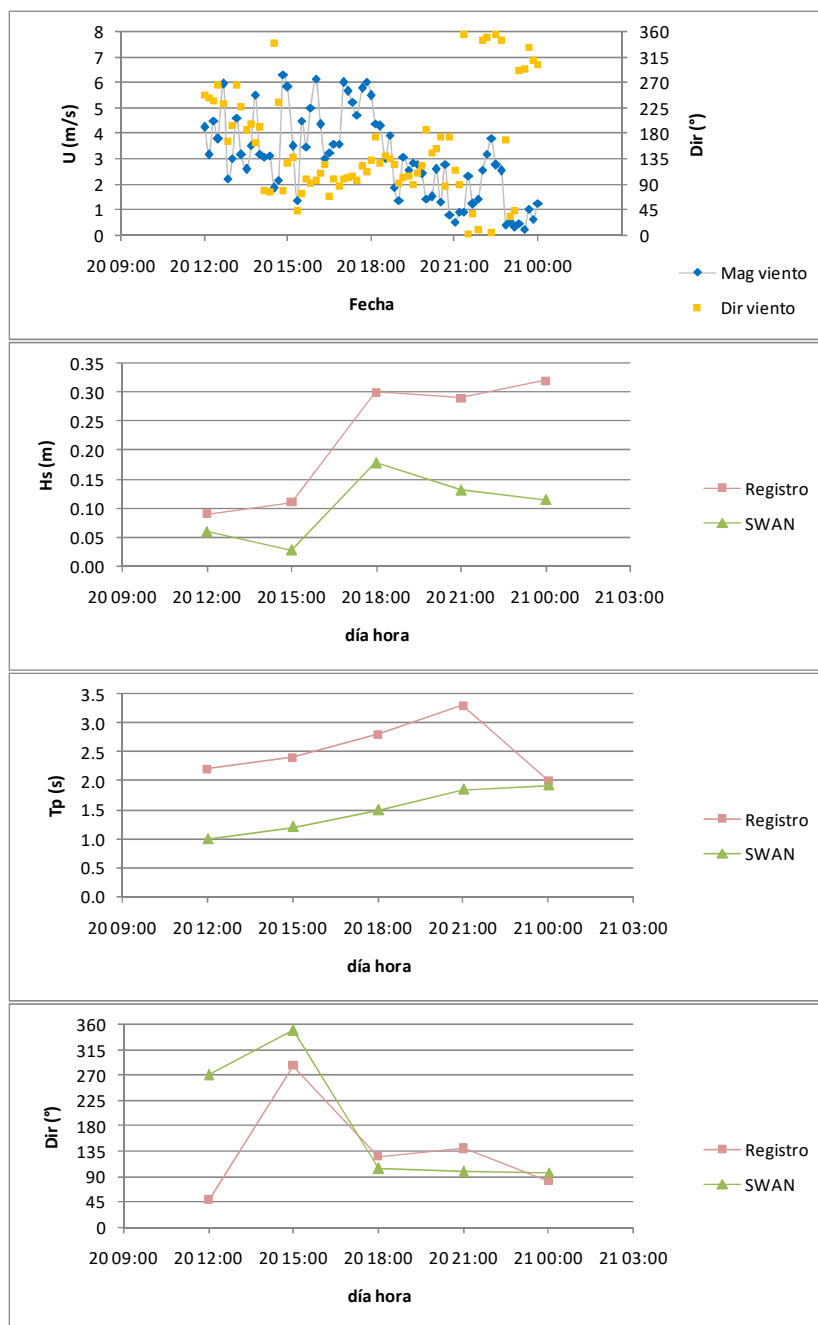


Gráfico 66: Condiciones y resultados evento de viento (L). Bahía Catalina, Verano.
 Fuente: Elaboración propia.

En el evento **M** se da un primer periodo de magnitudes entre 4 y 6 [m/s], con direcciones del primer cuadrante (N, NE y E), luego del cual las direcciones giran del N al NW, a medida que las intensidades aumentan hasta los 14 [m/s] (Gráfico 67). Se observa en las series medidas de H_s y T_p un comportamiento plano que no corresponde con las condiciones de viento observadas, y en consecuencia, no hay coincidencia con los valores estimados para ninguno de los parámetros de oleaje.

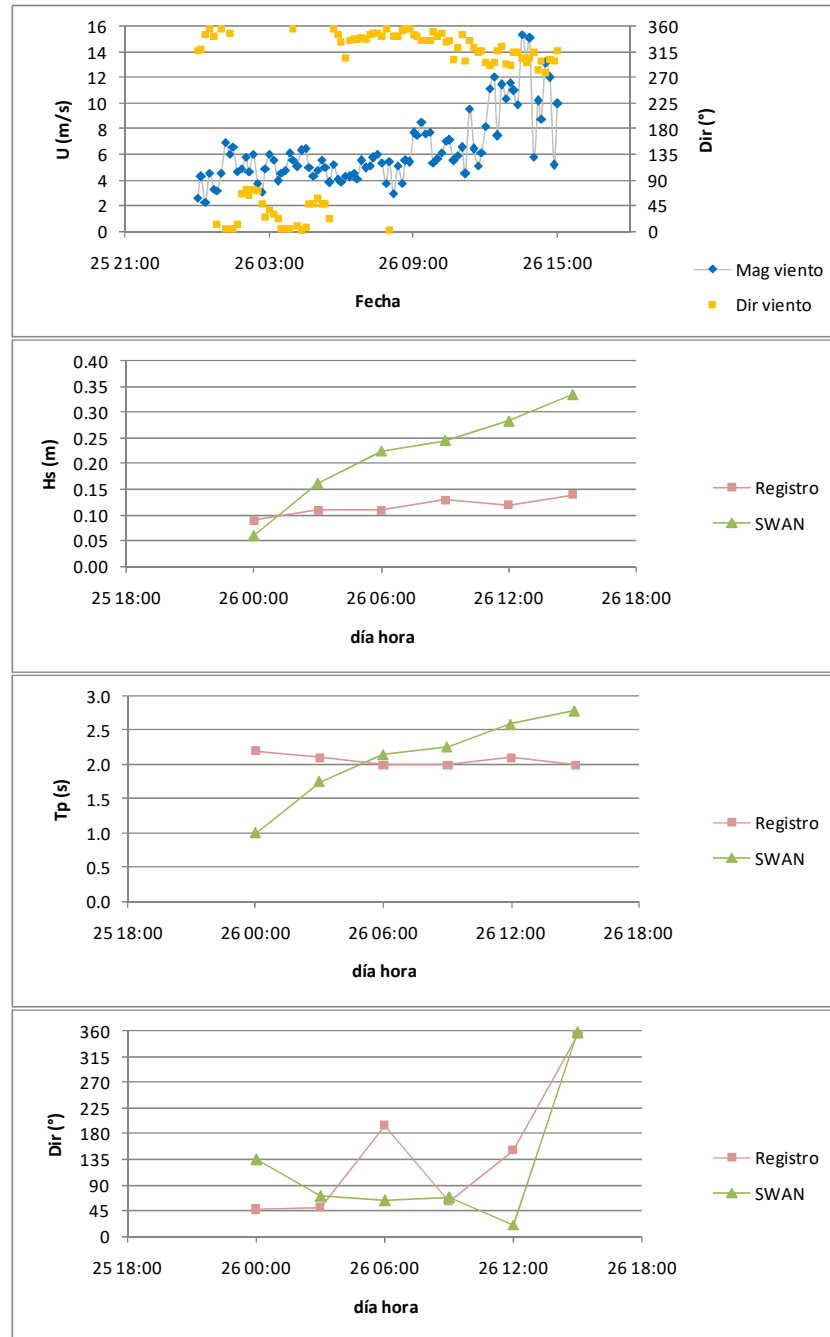


Gráfico 67: Condiciones y resultados evento de viento (M). Bahía Catalina, Verano.
 Fuente: Elaboración propia.

6.4.2.3 Validación

Del conjunto de resultados no estacionarios se elaboraron los histogramas mostrados en el Gráfico 68. Se aprecia que las distribuciones según rangos de H_s de los valores medidos y estimados son mucho más coherentes que las obtenidas para la totalidad de los datos del registro versus los cálculos estacionarios (Gráfico 60). Mientras tanto, las estimaciones de T_p siguen entregando valores menores a los medidos.

El valor del parámetro **SI** para los datos de H_s correspondientes a los eventos seleccionados alcanza a 0.43, lo que corresponde a un valor esperable para el tipo de condiciones de oleaje encontradas en esta campaña.

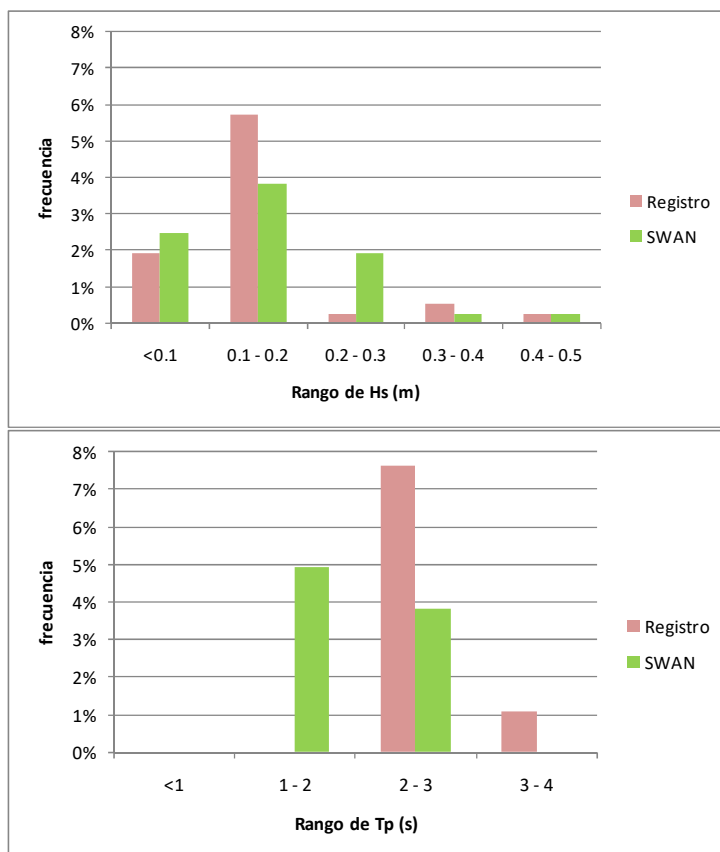


Gráfico 68: Distribuciones de H_s y T_p de datos registrados y estimados no estacionariamente. Bahía Catalina, Verano.

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de la coherencia encontrada en los eventos analizados no estacionariamente, la serie de tiempo de H_s presenta en este sector otra particularidad a tomar en cuenta, la que se refiere a la presencia de algunos valores altos (sobre 0.20 [m]) en momentos en que no se registran condiciones de viento relevantes para la generación de oleaje (Gráfico 69). Si bien algunos de aquellos datos aislados que ya habían sido marcados como posibles valores escapados pueden ser descartados, hay algunos que se presentan en registros consecutivos, y para los cuales no se tiene entre los antecedentes disponibles información que sugiera la causa de su comportamiento.

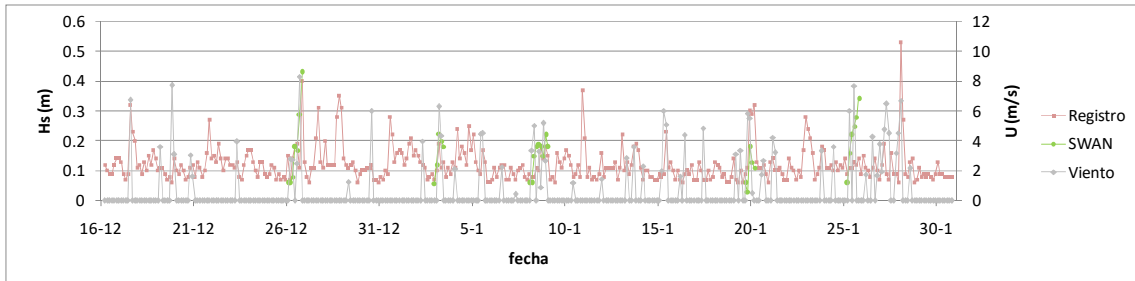


Gráfico 69: Series de tiempo de registros de oleaje y de estimaciones mediante SWAN en modo no estacionario (incluye condiciones de viento dentro del fetch). Bahía Catalina, Verano.
 Fuente: Elaboración propia.

Si bien hay resultados que no se acercan a los valores encontrados en las mediciones (principalmente en eventos **L** y **M**), se dan varios periodos concordantes en la comparación de las distintas series de tiempo. La presencia combinada de valores medidos y estimados similares, junto a la coherencia en las variaciones experimentadas (tanto en H_s , como en T_p y $Dirp$), representan una prueba de que el modelo es capaz de realizar estimaciones adecuadas de las condiciones de oleaje. Sin embargo, para este lugar y fecha en particular, la baja intensidad de los vientos e irregularidad de los datos de oleaje medidos, han generado una reducida cantidad de información para utilizar en la validación de los métodos de estimación, siendo un aporte marginal en comparación con los resultados de la campaña de invierno.

6.5 PUERTO WILLIAMS

6.5.1 ANÁLISIS ESTACIONARIO

Los histogramas de distribución representativos de las condiciones de oleaje (Gráfico 70 y Gráfico 71), muestran las bajas H_s estimadas para el sector, que resultan menores a 0.10 [m] en cerca del 95% del tiempo, llegando a un máximo de 0.18 [m]. Por otra parte, los registros muestran H_s inferiores a 0.10 [m] solo en el 60% del tiempo, con un máximo que alcanza los 0.29 [m].

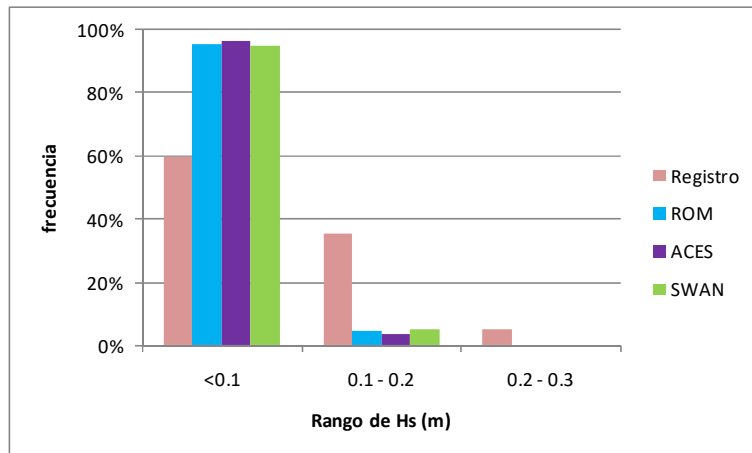


Gráfico 70: Distribuciones de H_s de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Puerto Williams.
 Fuente: Elaboración propia.

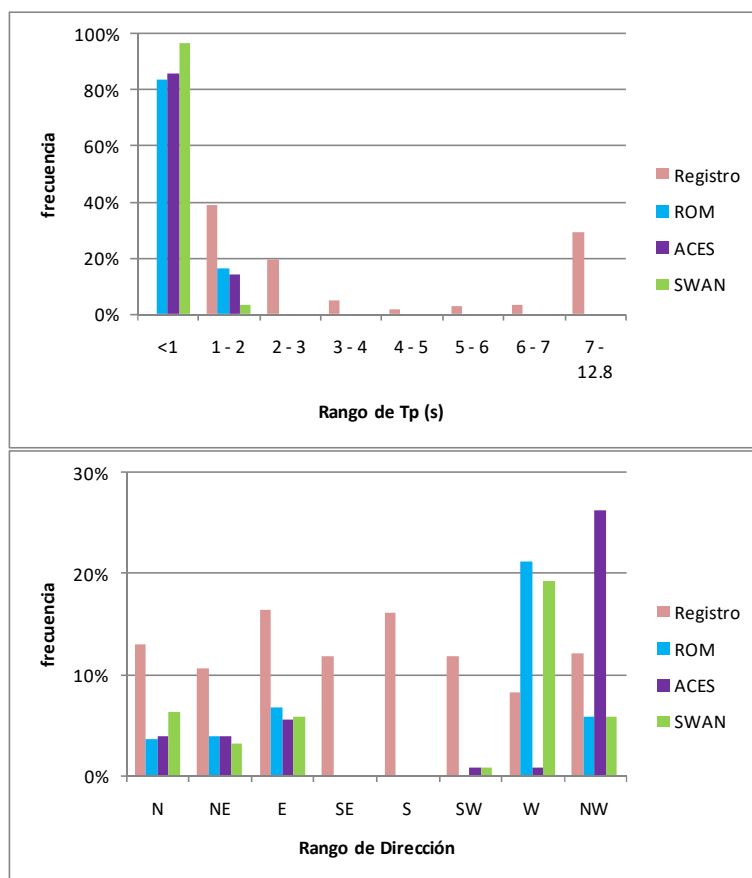


Gráfico 71: Distribuciones de T_p y $Dirp$ de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Puerto Williams.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la distribución de los T_p , la situación es similar. Las estimaciones entregan valores muy bajos, con sobre 80% de T_p bajo 1.0 [s], y un máximo de 1.8 [s]. En este caso los registros muestran una gran cantidad de mediciones donde los T_p superan los 5.0 [s], llegando a encontrarse valores de 12.8 [s].

La distribución direccional de los datos del registro muestra frecuencias del mismo orden desde todos los rangos. En cuanto a las estimaciones, diferencias importantes se encuentran al W y NW según el método que se utilice, a la vez que ninguno entrega frecuencias coherentes con las mediciones.

Los gráficos de no excedencia muestran nuevamente las diferencias entre las distribuciones de valores medidos y estimados (Gráfico 72), las que son notoriamente importantes en el caso de los T_p .

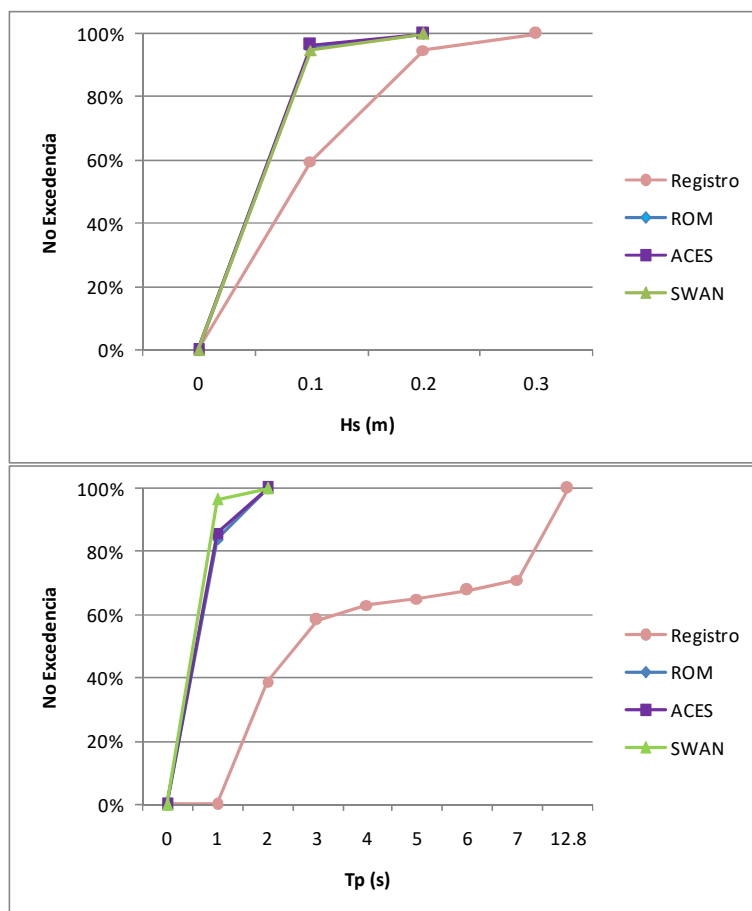


Gráfico 72: No excedencia de H_s y T_p de datos registrados y estimados mediante la aplicación estacionaria de cada uno de los métodos. Puerto Williams.

Fuente: Elaboración propia.

La inspección de las series de tiempo de H_s y T_p (Gráfico 73), muestra de otra manera los bajos valores de H_s obtenidos mediante los tres métodos aplicados; que resultaron menores a 0.20 [m] durante todo el intervalo de tiempo analizado, relativamente lejos de las H_s registradas. Sin embargo, se encuentran algunos episodios en que el comportamiento y los valores de la serie estimada se asimilan a las mediciones, para varios datos consecutivos.

En cuanto a los T_p , los registros presentan una importante cantidad de datos donde las magnitudes se elevan muy por sobre la tendencia base situada en torno a los 2.0 [s]. Dichos valores elevados no se ven representados en absoluto por las estimaciones, las cuales son siempre inferiores a los registros, aunque con un orden de magnitud cercano en comparación a resultados de otros lugares previamente revisados.

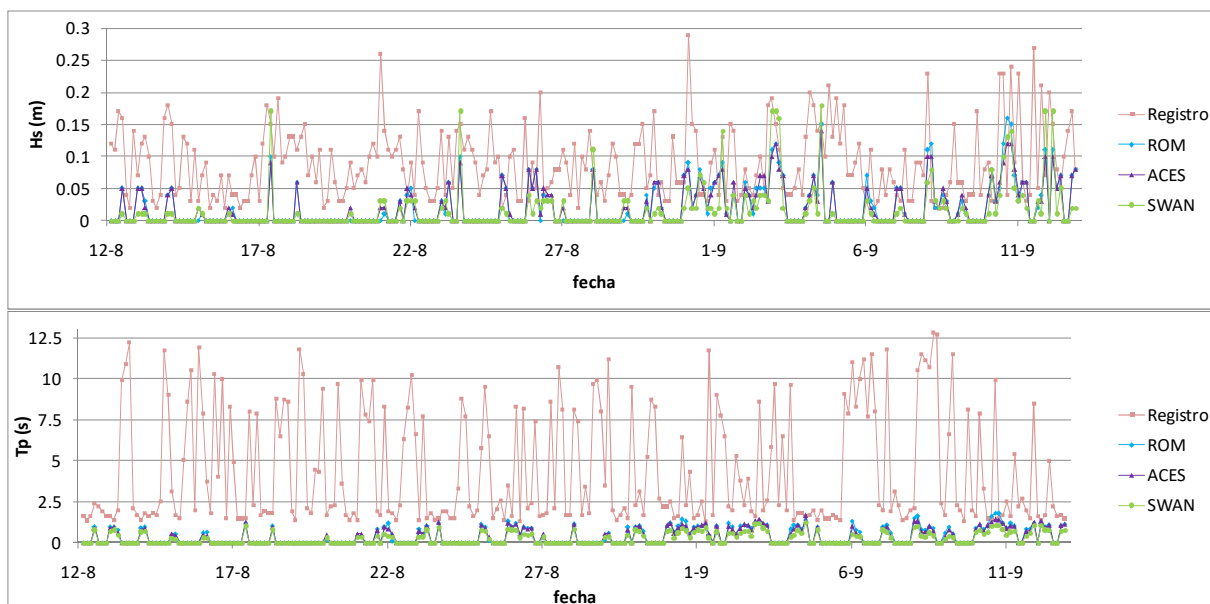


Gráfico 73: Series de tiempo de las estimaciones de oleaje mediante los tres métodos, H_s (arriba) y T_p (abajo), en comparación con los registros. Puerto Williams.

Fuente: Elaboración propia.

6.5.2 ANÁLISIS NO ESTACIONARIO

Para este lugar, la estimación no estacionaria fue aplicada en cuatro eventos de viento (**A** al **D**), los cuales se presentan en la Tabla 33. Una particularidad notable de todos los eventos seleccionados fue la baja intensidad de los vientos medidos dentro de cada uno, la que es la característica general del registro realizado en el sector.

Tabla 33: Resumen eventos de viento seleccionados, Puerto Williams.

Evento	Id	Periodo Registro		Duración (hr)	N° datos	Dirección Viento Inicial	
		inicio	fin			GEO (desde)	SWAN (hacia)
A	m8dia26	26/08/2011 15:00	27/08/2011 09:00	18	109	SW	45
B	m8dia31	31/08/2011 12:00	01/09/2011 15:00	27	163	S	90
C	m9ia3	03/09/2011 00:00	04/09/2011 00:00	24	145	W	0
D	m9dia4	04/09/2011 15:00	05/09/2011 06:00	15	91	W	0

Fuente: Elaboración propia.

El evento **A** presenta un primer intervalo con magnitudes variables que llegan a 4.0 [m/s] y direcciones en torno al W, seguido de un periodo con intensidades que se mantienen entre 2.0 y 3.0 [m/s], acompañadas de direcciones que giran al E (Gráfico 74). Resulta notable la baja intensidad de las condiciones estimadas, las cuales no presentan respuesta al moderado peak de H_s ocurrido durante el evento, ni menos a la presencia de registros con elevados valores de T_p , que se intercalan con una base cercana a los 2.0 [s]. Luego del abrupto giro presentado por el viento, acompañado de una disminución de la intensidad del mismo, los resultados comienzan a desplazarse hacia rangos más cercanos al NW, sin llegar a virar completamente como las condiciones de viento.

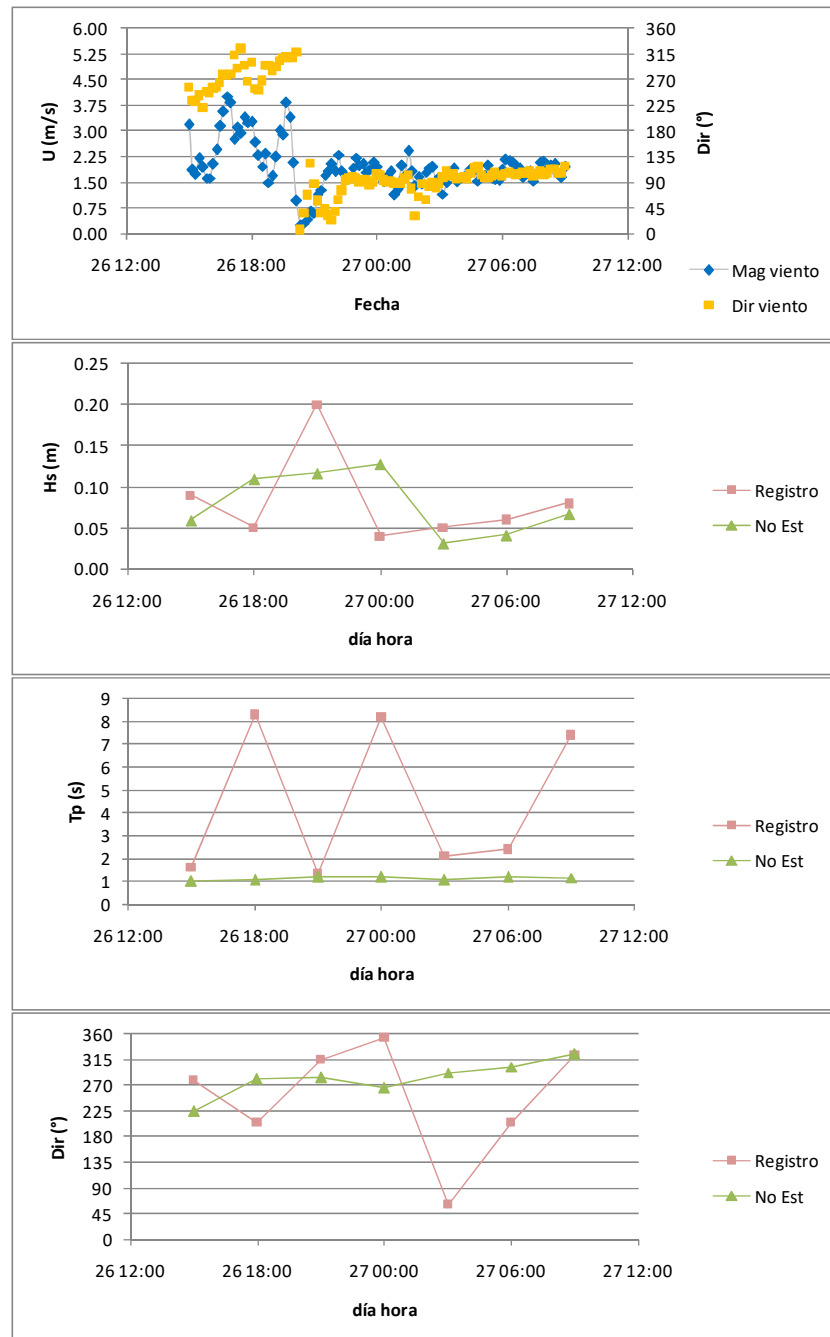


Gráfico 74: Condiciones y resultados evento de viento (A). Puerto Williams.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento **B** presenta intensidades variables con tendencia a la baja y direcciones que se mueven entre los rangos W y N (Gráfico 75), lo que se ve totalmente reflejado en las series de tiempo de resultados de H_s y $Dirp$, mientras los T_p mantienen un comportamiento plano por sobre 1.0 [s]. No se observan coincidencias importantes con los valores registrados.

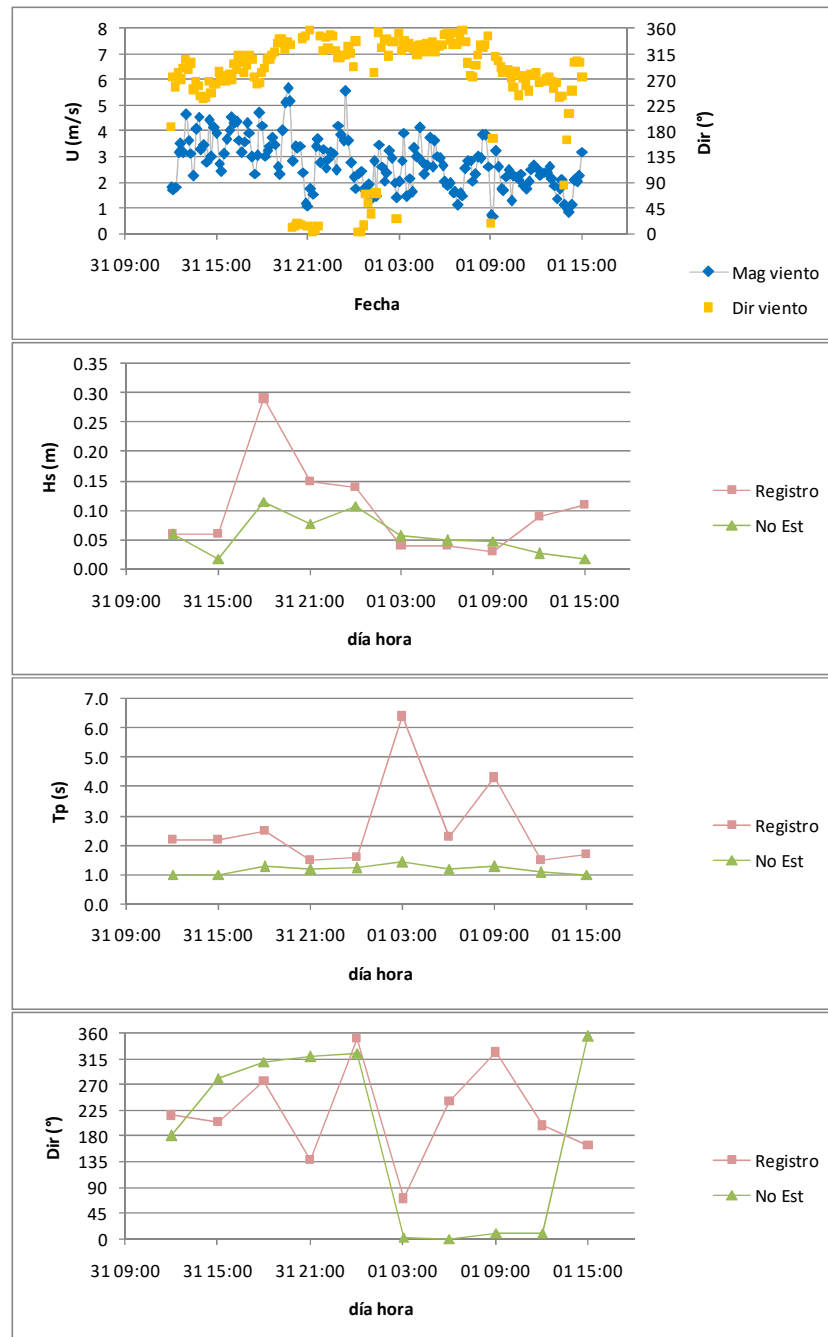


Gráfico 75: Condiciones y resultados evento de viento (B). Puerto Williams.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento **C** muestra un comienzo con magnitudes en torno a los 3 [m/s] y direcciones totalmente alineadas del E, lo que cambia bruscamente cerca de la mitad del evento, donde el viento gira 180° quedando fijo desde el W, con intensidades que aumentan sobre los 6 [m/s] (Gráfico 76).

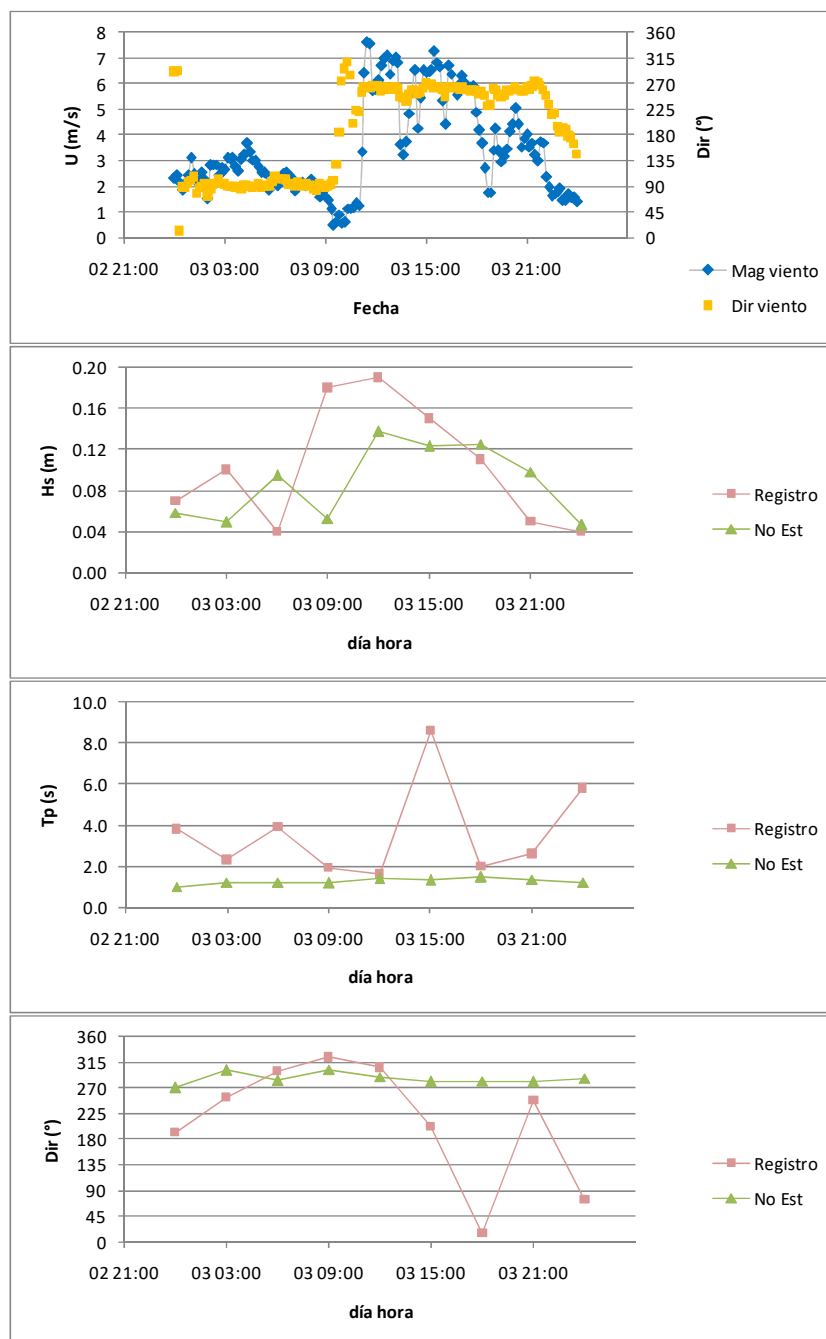


Gráfico 76: Condiciones y resultados evento de viento (C). Puerto Williams.
 Fuente: Elaboración propia.

El evento **D** presenta direcciones que se alinean desde distintos rangos durante el periodo en estudio, con cambios de intensidad que acompañan a los de dirección, presentando los valores más altos cuando el viento viene de direcciones W (Gráfico 77).

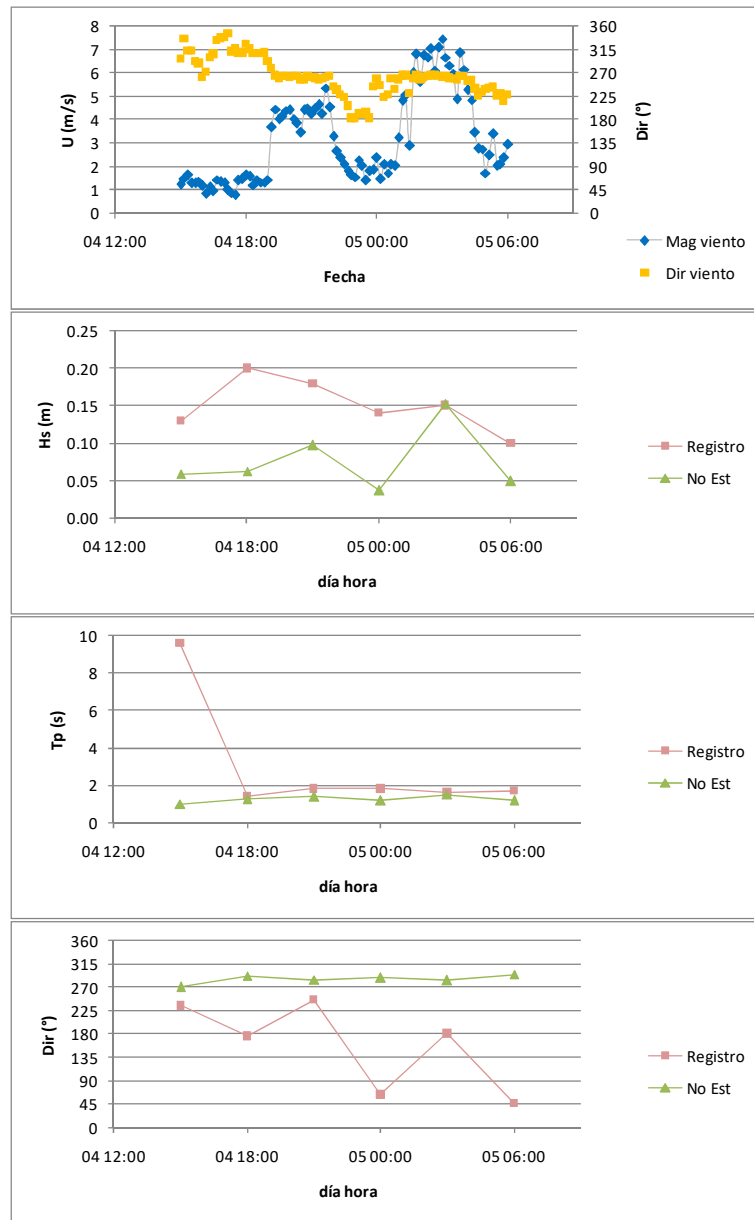


Gráfico 77: Condiciones y resultados evento de viento (D). Puerto Williams.
 Fuente: Elaboración propia.

6.5.3 VALIDACIÓN

No se observaron dentro de los análisis realizados concordancias entre estimaciones y registros que pudieran llevar a una validación de los métodos utilizados. De hecho, la baja intensidad de los vientos medidos generó condiciones de oleaje tan leves que se encontrarían siempre bajo el rango de operación efectivo del equipo ADCP utilizado para medir el oleaje.

7. DISCUSIÓN

Durante la aplicación de los procedimientos aquí descritos para los cinco lugares seleccionados, se han ido abordando una serie de particularidades que pueden afectar en la correcta realización de un estudio de oleaje de generación local, y que deben ser tomadas en cuenta de manera adecuada según corresponda a las características de cada sitio que se necesite estudiar. Estas se refieren a los siguientes temas:

7.1 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA

Uno de los primeros factores que debió solucionarse fue la falta de batimetría para algunas de las zonas de estudio. Si bien para cada proyecto se realizan levantamientos en una área acotada en torno al lugar donde se construirán las obras, no se contemplan sondajes en otros sectores que pudieran afectar la propagación del oleaje hacia el punto de interés.

Esto se observa en Santo Domingo en las puntas que cierran la ensenada al Norte y Sur donde hay una baja densidad de sondas, y más aún en el caso de Melimoyu donde la parte sur del seno tiene muy poca información fuera de la zona donde se realizó batimetría de detalle (Figura 47). También se observó falta de sondas en varias ensenadas y entradas menores de agua, ya que las no las contemplan por ser irrelevantes para la navegación.

La falta de datos de datos fue abordada agregando donde fue necesario sondas con valores coherentes con su entorno, de manera evitar cambios demasiado abruptos en las grillas, o incluso profundidades nulas en sectores rodeados de líneas de costa. Este procedimiento deja de ser útil cuando la falta de información se encuentra en una zona relevante para las condiciones de oleaje que inciden sobre el punto de interés, en cuyo caso lo adecuado sería realizar una levantamiento complementario que provea de la información necesaria.

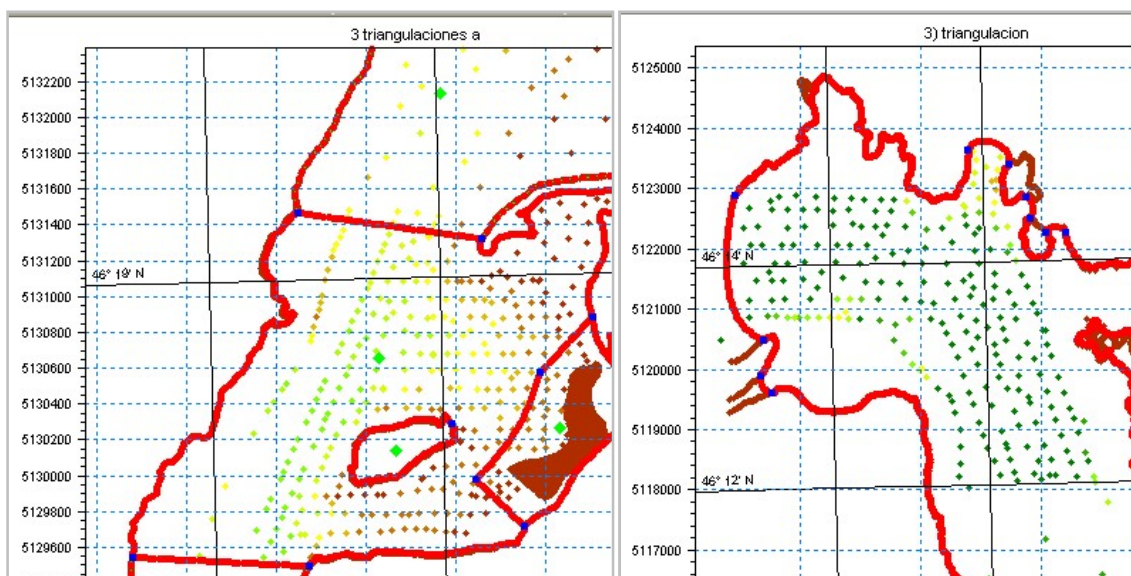


Figura 47: Ejemplos de falta de información batimétrica (Santo Domingo y Melimoyu).

Fuente: Elaboración propia.

También se encontró en el caso de Melimoyu una falta de información de línea de costa, solucionable con la digitalización de una imagen satelital georreferenciada del lugar.

7.2 PROPAGACIÓN EN AGUAS SOMERAS

En los casos de fetches reducidos (Santo Domingo, Melimoyu y Puerto Williams) desde los primeros resultados se vislumbra que las condiciones de oleaje generadas localmente alcanzarían T_p bajos (cercaos a 2.0 [s]), lo que fue corroborado correspondiendo los registros y resultados a condiciones sobre el límite de Aguas Profundas (Tabla 34), por lo que la propagación no se vería afectada directamente.

Tabla 34: Límites de aguas intermedias y someras según periodo de la ola.

T (s)	Lo (m)	do (m)	d1 (m)
1	1.6	0.8	0.08
2	6.2	3.1	0.31
3	14.0	7.0	0.70
4	25.0	12.5	1.25
5	39.0	19.5	1.95
6	56.1	28.1	2.81
7	76.4	38.2	3.82
8	99.8	49.9	4.99
9	126.3	63.2	6.32
10	156.0	78.0	7.80

Fuente: Elaboración propia.

Caso distinto es de Bahía Catalina, que es el único lugar donde se obtienen T_p de mayor importancia (máximos en torno a los 5.0 [s]), y donde una parte del oleaje que incide sobre el punto de interés llegaría influido por la interacción con el fondo marino, factor que teóricamente solo es contemplado en la propagación realizada con SWAN.

Se debe tomar en cuenta que luego de validar cada método de cálculo, se necesita realizar estimaciones sobre las condiciones de viento extremas dentro de un periodo de varios años, y que los estados de mar obtenidos en base a estas pueden tener una mayor parte de su espectro afectado por la acción del fondo marino, incluso en los sectores con fetches de menor extensión.

7.3 CONDICIONES DE VIENTO

Un factor central para la estimación correcta de las condiciones de oleaje, es contar con información de vientos que describa de manera precisa las intensidades y direcciones que actúan sobre el cuerpo de agua. En cada uno de los lugares estudiados, los registros de viento fueron levantados mediante un anemómetro situado en un punto sobre tierra cercano al lugar donde se emplazarían las obras a construir. Tomando las precauciones necesarias en la instalación del equipo de medición, se asume que los datos registrados representan de manera adecuada las condiciones de viento incidente que se dan sobre el cuerpo de agua que afecta al lugar de interés.

A pesar lo anterior, se encontraron varias particularidades en los registros de viento que indican que deben tomarse algunas medidas especiales para corroborar que la información entregada por el instrumento sea la idónea para utilizar en la generación de oleaje.

En el sector de Bahía Catalina las condiciones medidas de viento no presentaron señales de duda en la revisión inicial, lo que sumado a las coherencias posteriormente encontradas entre estimaciones y los registros de oleaje, permite corroborar que las condiciones de viento medidas concuerdan con las existentes sobre el área de generación.

Por otro lado está el caso de Santo Domingo, donde no hay en la ubicación del anemómetro razón aparente que impida asumir que los datos medidos representan adecuadamente las condiciones de viento sobre la zona de la ensenada, sin embargo, la poca severidad de las condiciones de viento observadas resulta poco probable para esta zona geográfica, a la vez que no concuerda con el oleaje registrado. Del ejercicio realizado al amplificar las intensidades de viento, se obtuvieron posteriormente indicios de una posible subestimación de los vientos existentes sobre el cuerpo de agua, ya sea por un mal funcionamiento del anemómetro, o por presentar el perfil de viento características distintas a las supuestas teóricamente.

En el caso Melimoyu se parte de una condición problemática debido a la existencia del cerro ubicado en las cercanías del punto de medición del viento. Además, posteriormente los resultados obtenidos muestran que no hay relación alguna entre el viento y el oleaje registrado.

Se hace entonces imperativo para ambos sectores realizar una serie de tareas que permitan ir abordando cada posible causa de las inconsistencias encontradas, volviendo a revisar hasta el nivel que sea necesario; el reprocesamiento de la información cruda del anemómetro y del ADCP, una nueva campaña de levantamiento y corroboración de las condiciones de viento y oleaje en el sector, y un estudio de propagación de oleaje generado fuera del área local definida.

Debido a la debilidad de los vientos que se registraron en Punta Coronel desde direcciones relevantes para la generación de oleaje, la cantidad de intervalos dentro del periodo de estudio en que se pueden generar condiciones importantes es casi nula. Se ha hecho notar que los registros de oleaje correspondientes a este lugar presentan irregularidades que no permiten realizar una comparación con las estimaciones, pero incluso si dichos datos fueran correctos, el reducido porcentaje de tiempo en que los vientos muestran intensidades significativas genera un bajo porcentaje de información disponible para validar los estudios, por lo que sería adecuado repetir el levantamiento de información durante un periodo de tiempo en que puedan captarse algunos eventos importantes de viento y oleaje.

En el caso de Puerto Williams, los datos de viento fueron tomados sobre tierra en un punto de la costa distante 200 metros del lugar de medición de oleaje, de donde no se tienen antecedentes de obstáculos que pudieran significar bloqueo desde ninguna dirección, a pesar de cual los vientos medidos presentaron intensidades muy bajas en todo el intervalo de tiempo bajo análisis, lo que derivó en la obtención de oleaje tan poco severo que se encuentra siempre dentro de los rangos de ruido con que opera el equipo ADCP.

7.4 REGISTRO ADCP

La teoría indica que los equipos ADCP utilizados presentan siempre algún nivel de incapacidad de registrar condiciones de oleaje con componentes de energía de periodos cortos, dependiendo de qué tan reducida sea la profundidad a la que se instalan (Tabla 35). Esto se debe al área proyectada del haz que mide la desnivelación, y a la distancia entre los haces que miden las velocidades horizontales. Lo anterior indica que para lugares de las características vistas y para las profundidades a las que se fondearon los ADCP, es común que la energía de frecuencias altas sea redistribuida a otras más bajas, pudiendo esta constituir una parte importante del espectro en algunos casos.

Tabla 35: Ejemplo de limitaciones de los periodos medibles con ADCP.

Depth	Cutoff freq.	Cutoff T
5	0.7	1.45
10	0.45	2.2
20	0.32	3.1
30	0.26	3.85
40	0.23	4.35
50	0.20	5.0
60	0.18	5.5

Fuente: Ref. 13, pág. 82.

Para tratar de evitar este problema, se debe instalar el equipo a una profundidad reducida, tomando en cuenta también otros factores como la máxima altura esperable de las olas, y la instalación fuera de la zona de rompiente.

Además de lo anterior, otros factores influyen en la capacidad del ADCP de registrar correctamente la energía correspondiente a frecuencias altas, como es la resolución temporal de la toma de datos, que al utilizar frecuencias de 1 o 2 [Hz] permite obtener información de componentes con periodos mayores a 2 o 1 [s], respectivamente.

Ante lo anterior, resultaría útil la corroboración de las condiciones mediante el registro con un segundo instrumento que ocupe alguna tecnología distinta.

7.5 INFLUENCIA DE OLEAJE EXTERNO

En el planteamiento inicial de los estudios realizados se incluyó el supuesto de que no existía entrada de energía por los límites abiertos de las distintas zonas de generación definidas para cada lugar, y que por lo tanto las condiciones de oleaje incidentes sobre el punto de interés sólo serían calculadas por acción del viento local sobre el cuerpo de agua delimitado para cada caso. Sin embargo lo anterior, las comparaciones de los registros con los resultados de las estimaciones pueden analizarse en busca de evidencias que corroboren o contradigan el supuesto referido.

Un lugar donde podrían haberse observado posibles efectos de incidencia de oleaje de generación externa al dominio definido es Punta Coronel. Desafortunadamente por las anomalías encontradas en los datos de viento y oleaje, no se cuenta con información válida para realizar mayores análisis.

En Santo Domingo se buscó evaluar la importancia que el oleaje generado en los sectores sur y norte del Canal Refugio podía tener en el sector de interés. En este caso, se encontraron diferencias importantes entre valores medidos y estimados que parecen estar generadas por las bajas intensidades medidas de viento. No obstante lo anterior, la concordancia entre los resultados obtenidos con los métodos paramétricos y los calculados con SWAN, mostró que no se obtienen condiciones más severas de oleaje al incluir la generación en las zonas externas a la porción central de canal definida como fetch para los métodos paramétricos. Una probable causa de lo anterior se encuentra en que la mayor parte del oleaje generado fuera de la ensenada se vería bloqueada en su avance al punto de interés por las distintas salientes de la costa, mientras para vientos de direcciones N o S el oleaje no se vería mayormente refractado y la energía que se propagaría hasta el punto de interés por medio de la difracción no resultaría significativa.

En el caso de Melimoyu, la configuración de la costa en la entrada del Seno sugiere que condiciones de oleaje W y SW generadas en el Canal Moraleda pueden tener influencia sobre el sector de interés. Ya que los resultados obtenidos sin tomar en cuenta la entrada de energía no son coherentes con las mediciones, a priori cabe la posibilidad de que las diferencias sean debido a ese factor, aunque hay algunas particularidades que indican que se debieran evaluar otras posibles causas de manera previa. Una es la baja intensidad de los vientos medidos en el sector, y otra es la presencia de condiciones de H_s y T_p incoherentes dentro de los registros de oleaje, factores que podrían indicar anomalías en las mediciones (o procesamiento) de uno u otro fenómeno.

En la localidad de Puerto Williams se planteó revisar si el oleaje generado en el canal por viento de direcciones W influye de manera relevante en el punto de interés, y si el oleaje generado por vientos E más allá del paso Mackinlay logra internarse hasta el sector en estudio. A priori, la observación de los registros indicaría una baja intensidad general de las condiciones de oleaje, ya que no se aprecian H_s por sobre los 0.30 [m]. Por otro lado, la presencia de cerca de un 35% de T_p con valores por sobre los 5 [s], es un antecedente en favor de la llegada de energía desde distancias mayores.

La inspección de las condiciones de oleaje estimadas correspondientes a vientos desde direcciones W no muestra mayores diferencias entre los métodos paramétricos y la aplicación de SWAN, indicando que oleaje generado más allá de la Punta Gusano no influiría de manera relevante sobre el punto de interés, para las magnitudes de viento observadas (que son notoriamente bajas). Por otro lado, las mediciones de T_p altos no coinciden en el tiempo con registros de viento desde direcciones E ni W, sino que aparecen aleatoriamente en todos los rangos direccionales. Tanto la baja intensidad de los vientos medidos, como las anomalías en los registros principalmente de T_p y $Dirp$, hacen imposible un análisis adecuado de los factores planteados, a la vez que impiden la validación de las estimaciones de oleaje realizadas para el lugar.

7.6 INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES.

Si bien no se incluyó en análisis del efecto de las corrientes sobre las estimaciones, si pueden observarse algunas particularidades de este fenómeno que influyen sobre los registros de oleaje.

Los valores de H_s se estiman en base a las mediciones de presión, de distancia a la superficie, o de velocidades horizontales de las partículas presentes en el agua. Esta última, aún siendo mencionada como más exacta en los documentos técnicos de los ADCP utilizados (Ref. 17 y 13), puede presentar problemas en momentos de alta intensidad de corriente, debido a que la señal de la componente de velocidad horizontal causada por el oleaje es poco significativa frente a la generada por las corrientes del sector.

Si bien este factor pudo generar algunos de los problemas encontrados en los registros, los datos analizados para los eventos seleccionados en Bahía Catalina no muestran este inconveniente, pues los registros de H_s y T_p presentan una coherencia frente a las estimaciones obtenidas en base a los vientos. Lo anterior indica que la presencia de corrientes no implica una imposibilidad de registrar condiciones reales de oleaje, pero sí que debe tenerse presente para evitar que se produzcan las distorsiones mencionadas.

7.7 DIFERENCIAS ENTRE ESTIMACIONES PARAMÉTRICAS Y SWAN

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de SWAN en modo estacionario son muy similares a las obtenidas por los dos métodos paramétricos en cuatro de los cinco lugares estudiados. Solo en el caso de Bahía Catalina (invierno y verano) se pueden encontrar diferencias relevantes en la comparación de las estimaciones hechas con las distintas metodologías estacionarias, obteniéndose en general condiciones de oleaje mayores con ROM, luego con ACES, y finalmente con SWAN. Varios factores pueden generar que las estimaciones hechas con SWAN resulten menores, como son la inclusión en dicho modelo de los fenómenos de disipación de energía por fricción de fondo, y rotura por fondo (los métodos paramétricos solo incluyen indirectamente el descrestamiento), y la propagación espacial individual de cada componente por refracción y difracción. Estos factores son calculados por SWAN en cualquier sector del dominio espacial donde corresponda.

7.8 VALIDACIÓN

La mala calidad general de la información contenida en los resúmenes de los registros de oleaje con que se contó, afecta de manera directa el desarrollo de los procedimientos útiles para validar los resultados obtenidos por los distintos métodos de estimación. Si bien hay varios casos aislados donde las H_s medidas son comparables a las calculadas, en el caso de los T_p casi no se observan registros con valores coherentes a las características físicas de cada área de generación, lo que genera una imposibilidad de revisar si los resultados calculados son cercanos a la realidad, siendo que este parámetro es de gran importancia para la determinación de las fuerzas a las que se verán sometidas las posibles obras a diseñar y/o las naves que interactuarán con las anteriores. Esto genera la necesidad de mejorar los procedimientos de registro y procesamiento de datos de oleaje, tanto para los casos aquí expuestos, como para cualquier otro en que se presenten condiciones similares.

El caso de Bahía Catalina (campaña de invierno) es el único donde se encontró que los antecedentes fueron adecuados para que el desarrollo de los análisis comparativos terminara en una validación de las estimaciones. Para este sector, el reprocesamiento de los datos crudos extraídos del ADCP permitió obtener series de tiempo de parámetros de oleaje con características concordantes con la geometría de la zona de generación y con los vientos medidos simultáneamente, y contra las cuales pudo realizarse la contrastación que corroboró que el uso de SWAN en modo no estacionario presentó capacidades de estimar correctamente tanto los valores de los parámetros (H_s , T_p , Dir_p) como la evolución de las condiciones de oleaje generado por el viento local.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

a) Se ha hecho manifiesta la importancia de realizar una adecuada revisión sobre los parámetros entregados como resultado del procesamiento de la información recogida por los instrumentos. Se ha encontrado que las pruebas implementadas en base a las indicaciones de las Ref. 8 y 7, para el viento y oleaje respectivamente, son adecuadas para identificar algunos problemas en los registros, pero pueden pasar por alto otros, por lo que deben ser complementados con las comparaciones entre series de tiempo de algunos de los parámetros medidos, y posteriormente con los resultados de las estimaciones.

b) Para anticiparse a los posibles problemas que se pueden encontrar en los registros, debe realizarse un procedimiento de corroboración de que los datos que se están midiendo sean verosímiles. Una alternativa sería realizar mediciones simultáneas de viento durante un tiempo al comienzo de la campaña, con un equipo extra ubicado en un punto despejado del área de generación o a bordo de una embarcación (idealmente a la altura de 10 [m]), luego ambos sets de datos pueden ser comparados para determinar su coherencia (Ref. 8, Test 11). Un procedimiento equivalente puede aplicarse a los datos de oleaje, idealmente utilizando un equipo de respaldo que realice las mediciones por medio de una tecnología distinta al principal, y teniendo especial cuidado en que la ubicación y distancia entre ambos instrumentos asegure registros equivalentes (Ref. 7, Test 21).

c) La notable coincidencia entre los resultados obtenidos en los lugares con fetches reducidos con los tres métodos utilizados, sugiere que en sectores de estas características los estudios de oleaje local utilizando un modelo numérico no implican una mayor exactitud de los resultados, por lo que es conveniente utilizar los métodos paramétricos más simples y rápidos.

d) Por otra parte, resulta indispensable que los procedimientos de validación de un estudio de oleaje de generación local incluyan además de las comparaciones de las distribuciones de parámetros de oleaje, un análisis de las coherencias y diferencias de las series de tiempo medidas y estimadas, ya sea estacionaria y/o no estacionariamente, según resulte necesario en base a las indicaciones anteriores.

9. ANEXOS

ANEXO I

I.A Formato archivos de batimetría para SWAN

archivo .node

<i>Nº de Nodos</i>	<i>Nº de características(2)</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>*(cabecera)</i>
<i>i</i>	<i>coord x</i>	<i>coord y</i>	<i>característica</i>	
...	

archivo .ele

<i>Nº de triángulos</i>	<i>3</i>	<i>0</i>	<i>*(cabecera)</i>
<i>i</i>	<i>nodo a</i>	<i>nodo b</i>	<i>nodo c</i>
...

archivo .bot

Profundidad nodo 1
Profundidad nodo 2
...
Profundidad nodo N

Nota: El archivo .bot debe contener sólo valores positivos.

I.B Formato y comentarios archivo .swn Modo Estacionario

A continuación se muestra como ejemplo un ejemplo de los archivo “.swn” utilizados para correr SWAN en modo estacionario en este estudio. Luego de cada uno de los comandos incluidos (en negrita), se adjunta una explicación de lo que indica cada término. Las líneas que empiezan con el signo “\$” corresponden sólo a comentarios, de manera que únicamente las líneas que no presentan dicha señal son las que afectan la configuración del caso a correr :

```

$*****CABECERA*****
$
PROJ 'prueba' '01'
$Define identificación de la corrida:
$Título del proyecto, identificación de caso.
$
$ WL = 0
$ Hs = 0
$ Tm01 = 0
$ Tp = 0
$$Pueden utilizarse para fijar condiciones iniciales de algunos parámetros, en todo el
$dominio.
$
$*****ENTRADAS DEL MODELO*****
$
SET 0 90 0.05 200 1 9.81 1025 0.0025 0
$Define los valores de algunos parámetros:
$Nivel de marea, dirección (N), profundidad mínima, máximo n° de mensajes de error,
$indica que permite realizar la corrida sólo con errores tipo advertencia, aceleración de
$gravedad, densidad del agua, máximo valor para el coeficiente de arrastre del viento,
$indica salida de espectro en base a varianza.
$
$Nota : Por defecto SWAN corre en modo: estacionario, bidimensional.
$
CGRID UNSTRUCTURED CIRCLE 36 0.0521 1. 31
$Define la grilla computacional:
$Se usará grilla no estructurada, direcciones espectrales de todo el círculo, resolución
$direccional espectral de 10 grados, menor frecuencia a calcular, mayor frecuencia a
$calcular, n° de frecuencias (resolución de la grilla de frecuencia).
$
READGRID UNSTRUCTURED TRIANGLE 'malla1'
$Lee la grilla no estructurada:
$Formato como el hecho por programa Triangle, nombre de archivos .node y .ele.
$
INPGRID BOTTOM UNSTRUCTURED EXC -99.
$Indica que se ingresarán valores de parámetros asignados a cada nodo de la grilla:
$En este caso son los valores de profundidad (bottom level), la grilla es no estructurada,
$indica que se usará un valor característico para indicar nodos sin profundidad (tierra, etc.),
$valor usado.

```

\$

READINP BOTTOM 1. 'malla1.bot'

\$Lee los valores de los parámetros para cada nodo de la grilla:

*\$En este caso son los valores de profundidad, factor de amplificación para todos los valores
\$leídos, nombre y extensión de archivo con valores de profundidad (z positivos).*

\$

\$

WIND 10. 0

\$Define las condiciones de viento forzante (estacionarias y homogéneas):

\$U (m/s en este caso), dirección (contrarreloj desde el E, hacia donde va el viento).

\$

\$

*\$*****CONFIGURACION DE LA CORRIDA******

\$

\$

GEN3

*\$El programa correrá en modo Tercera Generación para entrada por viento, interacción por
\$cuadrupletas, y descrestamiento (tripletas, fricción de fondo y rotura por fondo se activan
\$aparte).*

\$

DIFFRACTION 1 0. 0. 1

*\$Se incluye la difracción en la estimación de oleaje, indicador de uso o no uso, parámetro de
\$suavizado, número de pasos para el suavizado, indicador de adaptación espacial de las
\$velocidades de propagación debido a la difracción.*

\$

\$

*\$Nota: SWAN calcula rotura por defecto, aunque se puede elegir no hacerlo. Se usan los
\$valores por defecto, es decir: coeficiente constante (γ), coeficiente de
\$proporcionalidad de la tasa de disipación = 1.0, radio de máxima ola individual (coeficiente
\$ γ) = 0.73.*

\$

**NUMERIC STOPC 0.005 0.01 0.005 99.5 STAT 100 0.01 0.1 DIRIMPL 0.5 4.0 CSIGMA 0.25
CTHETA 0.25**

\$Define algunas propiedades numéricas de SWAN:

*\$Se define como criterio de detención el uso de la curvatura de la curva de cálculo iterativo
\$de Hs: diferencia absoluta entre Hs(i) y Hs(i-1) para ordenar la detención del cálculo,
\$diferencia relativa entre Hs(i) y Hs(i-1) para ordenar la detención, se detiene si la
\$pendiente de la curva de Hs normalizada por Hs es menor a este valor.*

*\$Se define el uso de algunos parámetros en corridas estacionarias: máximo número de
\$iteraciones, parámetro de proporcionalidad para técnica de semi-relajación.*

\$Limitador del máximo cambio de energía por bin espectral.

*\$Se configura es esquema numérico para la refracción: indicador de esquema, indicador de
\$limitador de giro del oleaje.*

\$Se limita la velocidad de propagación del oleaje en las frecuencias: indicador de limitador.

\$Se limita la velocidad de propagación del oleaje en las direcciones: indicador del limitador.

\$

\$

*\$*****SALIDAS DEL MODELO******

\$

```
$  
POINTS 'boya01' 690718 5393329  
$Define puntos donde generar las salidas del modelo: nombre de la boya virtual, coordenada  
$X, coordenada Y.  
$  
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'prueba1.mat' LAY 3 XP YP DEP HS RTP TPS TM01 DIR  
PDIR DSPR QB  
$Escribe distribuciones espaciales de parámetros de salida finales:  
$El bloque de salida será la grilla computacional completa,  
$Sin cabecera, nombre y extensión del archivo de salida,  
$Se ingresará un indicador del formato del archivo de salida, el archivo de salida será un  
$archivo binario de MatLab,  
$(parámetros a incluir en el archivo de salida) coord X, coord Y, profundidad, Hs, Tp, Tp  
$suavizado, Tm, Dirm, Dirp, dispersión direccional, porcentaje de olas rotas por fondo.  
$  
TABLE 'boya01' HEADER 'prueba1.tbl' HS RTP TPS TM01 DIR PDIR DSPR QB  
$Define que se hará un archivo de salida con una tabla con varios parámetros calculados,  
$para los puntos indicados:  
$Nombre del punto, se incluyen cabeceras, nombre y extensión del archivo de salida,  
$(parámetros a incluir) Hs, Tp, Tp suavizado, Tm, Dirm, Dirp, dispersión direccional,  
$fracción de olas rotas por fondo.  
$  
SPECOUT 'boya01' SPEC2D 'prueba1.spc'  
$Escribe en un archivo el espectro de densidad final para los puntos definidos:  
$Nombre del punto, escribir espectro bidimensional, nombre y extensión archivo de salida.  
$  
TEST 1 0 POINTS XY 690718.91 5393329.54 PAR 'prueba1.par'  
$Produce resultados intermedios para los parámetros indicados:  
$Nivel del test de salida (interno), SWAN escribirá un mensaje al entrar en cada subrutina,  
$Se producirán resultados en los puntos indicados, los puntos de salida se definen con sus  
$coordenadas X e Y, coord X, coord Y,  
$Se entregarán los parámetros integrales (Hs, Tp, Sviento, Sdescrestamiento, Srotura,  
$Sfricción de fondo, Stripletas y Scuatripaletas), nombre y extensión archivo de salida.  
$  
$*****CIERRE*****  
$  
COMPUTE  
$Indica iniciar la modelación (en modo estacionario).  
$  
STOP  
$Indica el final de los comandos en el archivo.  
$  
$*****FIN*****
```

ANEXO II

II.A Formato archivo .wnd

Valor componente X del viento nodo 1
Valor componente X del viento nodo 2
...
Valor componente X del viento nodo N

Valor componente Y del viento nodo 1
Valor componente Y del viento nodo 2
...
Valor componente Y del viento nodo N

Nota: Los archivos .wnd son muy extensos, por lo que por razones prácticas su elaboración fue implementada en un código MatLab ("vientos.m").

II.B Formato archivo .list

Nombre condición 1.wnd
Nombre condición 2.wnd
...
Nombre condición N.wnd

II.C Formato y comentarios archivo .swn Modo No Estacionario

A continuación se muestra un ejemplo, mostrando en color negro lo que se mantiene igual, y en azul los comandos que se modifican o agregan. Las descripciones de los comandos siguen a cada uno, con cada línea de texto precedida de un signo \$.

```
$*****CABECERA*****
$
PROJ 'prueba' '01'
$Define identificación de la corrida:
$Título del proyecto, identificación de caso.
$
$ WL = 0
$ Hs = 0
$ Tm01 = 0
$ Tp = 0
$
$Pueden utilizarse para fijar condiciones iniciales de algunos parámetros, en todo el
$dominio.
$
$*****ENTRADAS DEL MODELO*****
$
MODE NONSTATIONARY
$Define el cálculo en modo no estacionario, bidimensional.
$
$
SET 0 90 0.05 200 1 9.81 1025 0.0025 0
$Define los valores de algunos parámetros:
$Nivel de marea, dirección (N), profundidad mínima, máximo n° de mensajes de error,
$Indica que permite realizar la corrida sólo con errores tipo advertencia, aceleración de
$gravedad, densidad del agua, máximo valor para el coeficiente de arrastre del viento,
$Indica salida de espectro en base a varianza.
$
$
CGRID UNSTRUCTURED CIRCLE 36 0.0521 1. 31
$Define la grilla computacional:
$Se usará grilla no estructurada, direcciones espectrales de todo el círculo, resolución
$direccional espectral de 10 grados, menor frecuencia a calcular, mayor frecuencia a
$calcular, n° de frecuencias (resolución de la grilla de frecuencia).
$
READGRID UNSTRUCTURED TRIANGLE 'malla1'
$Lee la grilla no estructurada:
$Formato como el hecho por programa Triangle, nombre de archivos .node y .ele.
$
INPGRID BOTTOM UNSTRUCTURED EXC -99.
$Indica que se ingresarán valores de parámetros asignados a cada nodo de la grilla:
```

\$En este caso son los valores de profundidad (bottom level), la grilla es no estructurada, \$indica que se usará un valor característico para indicar nodos sin profundidad (tierra, etc.), \$valor usado.

\$

READINP BOTTOM 1. 'malla1.bot'

\$Lee los valores de los parámetros para cada nodo de la grilla:

\$En este caso son los valores de profundidad, factor de amplificación para todos los valores \$leídos, nombre y extensión de archivo con valores de profundidad (z positivos).

\$

\$

INPGRID WIND UNSTRUCTURED EXC -99. NONSTATION 20120103.180000 10 MIN 20120104.060000

\$Indica que se ingresarán valores de parámetros asignados a cada nodo de la grilla:

\$En este caso son los valores de viento (wind), la grilla es no estructurada, indica que se \$usará un valor característico para indicar nodos sin profundidad (tierra, etc.), valor usado.

\$Indica que la entrada de viento es no estacionaria, fecha y hora del primer campo de viento

\$a ingresar (aaaammdd.hhmmss), valor para el intervalo de tiempo que separa cada campo

\$viento, unidad de tiempo utilizada, fecha y hora para el último campo de viento a ingresar.

\$

\$

READINP WIND 1. SERIES 'prueba1wnd.list'

\$Lee los valores de los parámetros para cada punto de la grilla.

\$En este caso son los valores del viento, factor de amplificación para todos los valores

\$leídos, se indica que los datos están se ingresarán en una serie de archivos, nombre y \$extensión de archivo con listado de los archivos de entrada de viento.

\$

\$

INITIAL PAR 0.05 1.00 315 22.5

\$Indica que se define una condición inicial de oleaje en todo el dominio, La condición se

\$definirá indicando los parámetros del oleaje, valor para Hs, valor para el Tp, valor para la

\$Dirp, spreading direccional.

\$

\$

\$*****CONFIGURACION DE LA CORRIDA*****

\$

\$

GEN3 KOMEN 2.36e-5 3.02e-3 AGROW 0.0015

\$El programa correrá en modo Tercera Generación para entrada por viento, interacción por \$cuadrupletas, y descrestamiento (tripletas, fricción de fondo y rotura por fondo se activan \$aparte).

\$Se usará la formulación de Komen et al. (1984) para el crecimiento exponencial del oleaje,

\$coeficiente para la tasa de disipación por whitecapping, valor de la esbeltez para un \$espectro P-M.

\$Activa el crecimiento lineal según formulación de Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981),

\$coeficiente de proporcionalidad.

\$

\$

DIFFRACTION 1 0. 0. 1

\$Se incluye la difracción en la estimación de oleaje, indicador de uso o no uso, parámetro de suavizado, número de pasos para el suavizado, indicador de adaptación espacial de las velocidades de propagación debido a la difracción.

\$

\$

NUMERIC STOPC 0.005 0.01 0.005 99.5 STAT 100 0.01 0.1 DIRIMPL 0.5 4.0 CSIGMA 0.25 CTHETA 0.25

\$Define algunas propiedades numéricas de SWAN:

\$Se define como criterio de detención el uso de la curvatura de la curva de cálculo iterativo

\$de Hs: diferencia absoluta entre Hs(i) y Hs(i-1) para ordenar la detención del cálculo,

\$diferencia relativa entre Hs(i) y Hs(i-1) para ordenar la detención, se detiene si la

\$pendiente de la curva de Hs normalizada por Hs es menor a este valor.

\$Se define el uso de algunos parámetros en corridas estacionarias: máximo número de

\$iteraciones, parámetro de proporcionalidad para técnica de semi-relajación.

\$Limitador del máximo cambio de energía por bin espectral.

\$Se configura es esquema numérico para la refracción: indicador de esquema, indicador de

\$limitador de giro del oleaje.

\$Se limita la velocidad de propagación del oleaje en las frecuencias: indicador de limitador.

\$Se limita la velocidad de propagación del oleaje en las direcciones: indicador del limitador.

\$

\$

*\$*****SALIDAS DEL MODELO******

\$

\$

POINTS 'boya01' 690718 5393329

\$Define puntos donde generar las salidas del modelo: nombre de la boya virtual, coordenada

\$X, coordenada Y.

\$

BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'prueba1.mat' LAY 3 XP YP DEP HS RTP TPS TM01 DIR PDIR DSPR QB OUTPUT 1 3 HR

\$Escribe distribuciones espaciales de parámetros de salida:

\$el bloque de salida será la grilla computacional completa,

\$sin cabecera, nombre y extensión del archivo de salida,

\$Se ingresará un indicador del formato del archivo de salida, el archivo de salida será un

\$archivo binario de MatLab,

\$(parámetros a incluir en el archivo de salida) coord X, coord Y, profundidad, Hs, Tp, Tp

\$suavizado, Tm, Dirm, Dirp, dispersión direccional, porcentaje de olas rotas por fondo.

\$Se requiere generar salidas en varios instantes, formato de fecha y hora a usar, tiempo

\$entre cada salida, unidad de tiempo.

\$

\$

TABLE 'boya01' HEADER 'prueba1.tbl' HS RTP TPS TM01 DIR PDIR DSPR QB OUTPUT 1 1 HR

\$Define que se hará un archivo de salida con una tabla con varios parámetros calculados,

\$para los puntos indicados:

\$Nombre del punto, se incluyen cabeceras, nombre y extensión del archivo de salida,

\$(parámetros a incluir) Hs, Tp, Tp suavizado, Tm, Dirm, Dirp, dispersión direccional,

\$fracción de olas rotas por fondo.

*\$Se requiere generar salidas en varios instantes, formato de fecha y hora a usar, tiempo
\$entre cada salida, unidad de tiempo.*

\$

\$

SPECOUT 'boya01' SPEC2D 'prueba1.spc' OUTPUT 1 3 HR

\$Escribe en un archivo el espectro de densidad final para los puntos definidos:

\$Nombre del punto, escribir espectro bidimensional, nombre y extensión archivo de salida.

\$Se requiere generar salidas en varios instantes, formato de fecha y hora a usar, tiempo

\$entre cada salida, unidad de tiempo.

\$

\$

TEST 1 0 POINTS XY 690718.91 5393329.54 PAR 'prueba1.par'

\$Produce resultados intermedios para los parámetros indicados:

\$Nivel del test de salida (interno), SWAN escribirá un mensaje al entrar en cada subrutina,

\$Se producirán resultados en los puntos indicados, los puntos de salida se definen con sus

\$coordenadas X e Y, coord X, coord Y,

\$Se entregarán los parámetros integrales (Hs, Tp, Sviento, Sdescrestamiento, Srotura,

\$Sfricción de fondo, Stripletas y Scuatripletas), nombre y extensión archivo de salida.

\$

\$

\$*****CIERRE*****

\$

\$

TEST

\$

\$

COMPUTE NONSTATION 20120103.180000 1 MIN 20120104.060000

\$Indica iniciar los cálculos, en modo estacionario, fecha y hora correspondiente al comienzo

\$del pedido a modelar, valor del intervalo de cálculo, unidad de tiempo, fecha y hora

\$correspondiente al último instante a modelar.

\$

\$

STOP

\$Indica el final de los comandos en el archivo.

\$

\$*****FIN*****