



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE CLIMA MARÍTIMO EN ZONAS
COSTERAS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

BRAYAN OMAR BETANCOURT QUIROGA

TUTOR:

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



México D.F.

NOVIEMBRE 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente: Dr. Alejandro Rodríguez Valdés

Secretario: M.I. Víctor Franco

Vocal: Dr. Rodolfo Silva Casarín

1er Suplente: Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin

2do Suplente: Dr. Adrián Pedrozo Acuña

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE LA TESIS

Dr. Rodolfo Silva Casarín

A mis Padres:

Omar y Nubia, por todo su amor y sus grandes enseñanzas.

A mis hermanos:

Omar, Fabian, Carolina y Nubia, por su amor y apoyo incondicional.

¡Gracias!

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrir sus puertas y darme la oportunidad de desarrollar mis estudios de Maestría.

Al Instituto de Ingeniería por permitir mi vinculación al Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos y por el apoyo económico que me brindó durante todo el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, director del presente trabajo y tutor durante toda mi formación de Maestría, para él un gran agradecimiento por su apoyo y sobre todo un gran respeto por todo su conocimiento.

Al Dr. Edgar Mendoza Baldwin, le agradezco todas sus sugerencias y comentarios realizados al presente trabajo.

Al M. en I. Víctor Franco, por su gran apoyo, su confianza y sus enseñanzas, por su siempre buena disposición y por brindarme la mano en momentos importantes.

Al Dr. Adrián Pedrozo y al Dr. Alejandro Rodríguez, por su atención y buena disposición para atender cualquier clase de inquietud y por sus comentarios en la culminación del presente trabajo.

A mi Padre Omar Betancourt, siempre recibí tus abrazos como si estuvieras aquí a mi lado, gracias por tus enseñanzas, por demostrarme que eres un "berraco", eres muy sabio y le doy muchísimas gracias a Dios por tenerte conmigo, por ser mi padre, por enseñarme todas las cosas importantes de la vida y enseñarme a enfrentar cualquier tipo de adversidad con la mayor calma y sabiduría, te amo, gracias por la vida que me has brindado, se que lo has hecho con todo tu amor.

A mi Madre Nubia Quiroga, mamita hermosa gracias por darme la vida, por enseñarme a ser un hombre de bien, por corregirme cuando me he equivocado, por preocuparte por mí en todo momento, por brindarme tu amor sin ninguna clase de limitantes, por ser quien eres, nunca dejaré de agradecerle a Dios por tan hermosa mamá que tengo, te amo.

A mis hermanos, pecoso, gracias por confiar en mí y por estar siempre ahí, sin importar la distancia, golo, gracias por ayudarme a llegar hasta acá, lela, mi pequeña hermana mayor, mi compañera de aventuras, gracias por estar siempre conmigo y por tu gran confianza, por tu apoyo incondicional y por creer en mí, nene, mi hermanita linda, gracias por llevarme siempre presente en tu corazón y

recordarme cada vez que puedes cuanto me quieres, eres totalmente correspondida.

A Maribel, gracias por estar siempre a mi lado, por confiar en mí, por apoyarme siempre y por brindarme todo tu cariño, definitivamente eres un angelito que Dios puso en mi camino.

A Gabriel, Gabo mi hermano, gracias por sus enseñanzas, por su paciencia, por sus consejos y sobre todo por su gran amistad.

A mis compañeros del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, especialmente a Daliley, Yerman, Borre, Pepis, Pagce, por su apoyo y por los momentos buenos y malos que compartimos dentro y fuera del instituto, por haber complicado la vaina y sobre todo por los lazos de amistad tan bacanos que armamos.

A mis amigos del pregrado y del colegio por estar siempre haciéndome barra desde la tierrita.

A todos ustedes ¡muchísimas gracias!

RESUMEN:

Debido a la poca información oceanográfica medida en los mares y océanos de Latinoamérica, los ingenieros enfrentan incertidumbres referentes al clima marítimo, en el momento de abordar cualquier tipo de proyecto de obras marítimas. Para cubrir estas necesidades se realiza la implementación y adaptación de modelos de generación y propagación de oleaje. En este trabajo se presentan los resultados y la metodología utilizada para el análisis de oleaje (1949-2009) del litoral mexicano en la Península de Yucatán, haciendo énfasis en la caracterización de las condiciones marítimas en aguas profundas, intermedias y someras. Los datos se obtuvieron partiendo de un modelo híbrido (WAM-HURAC) compuesto por un modelo de tercera generación (WAM) y un modelo de segunda generación (HURAC) en aguas profundas y un modelo de tercera generación (SWAN) en aguas intermedias y someras. Los resultados presentan los valores de la magnitud, dirección y periodo del oleaje y la dirección y velocidad del viento en toda la longitud de la malla, dentro de un registro histórico reportado cada hora.

ABSTRACT:

Due to the lack of oceanographic measurements in the seas and oceans of Latin America, the engineers face uncertainties concerning to the maritime climate, at the time to approach any type of marine projects. To overcome these needs we implement and adapt models of swell generation and propagation. This paper presents the results and the methodology used for the analysis of wave generation (1948-2009) at the Mexican coast in the Yucatan Peninsula, with special emphasis in the characterization of marine conditions in deep water, intermediate and shallow. Data used for this work were obtained based on a hybrid model (WAM-HURAC) comprises a third generation model (WAM) and a second generation model (hurricane) in deep waters and a third-generation model (SWAN) in intermediate and shallow waters. The results represent the values of the magnitude, direction and wave period and wind speed and direction over the entire length of the mesh within a historical record reported every hour.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Objetivos	15
1.2 Antecedentes	16
1.3 Motivación	17
1.4 Metodología	17
1.5 Estructura de la tesis.....	18
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 Descripción de la Zona de Estudio.....	20
2.2 Oleaje y viento	21
2.2.1 Acción del viento sobre el océano	22
2.2.2 Oleaje local o <i>sea</i>	22
2.2.3 Oleaje distante o <i>swell</i>	23
2.2.4 Estado de mar	23
2.2.5 Altura de ola	23
2.2.6 Tormenta	23
2.3 Conceptos Probabilidad	24
2.3.1 Distribución de probabilidad	24
2.3.2 Probabilidad de excedencia.....	24
2.3.3 Periodo de retorno	25
2.3.4 Estadísticos de orden	25
2.3.5 Distribuciones asintóticas del máximo y el mínimo.....	25
2.3.6 Dominios de atracción	26
2.4 Papeles probabilísticos	28
3. MODELOS DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE OLEAJE	29
3.1 Modelo de Generación de Oleaje (WAM).....	29
3.2 Validación de los resultados del modelo WAM	35
3.3 Modelo paramétrico de ciclones HURAC	37
3.3.1 Modelo de presión atmosférica.....	38
3.3.2 Modelo de viento	38
3.3.3 Modelo de oleaje	40
3.3.4 Relaciones complementarias.....	41

3.3.5	Validación del modelo HURAC	42
3.4	Modelo híbrido WAM-HURAC	43
3.4.1	Implementación modelo híbrido.....	44
3.4.2	Validación modelo híbrido	45
3.5	Modelo de propagación de oleaje (SWAN)	53
3.5.1	Ecuación de balance de acción	53
3.5.2	Generación por viento	55
3.5.3	Disipación	55
3.5.4	Rotura del oleaje.....	56
3.5.5	Fricción en el fondo	56
3.5.6	Rotura por fondo.....	57
3.5.7	Reflexión, transmisión y absorción	57
3.5.8	Interacciones no lineales de oleaje.....	57
3.5.9	Propagación de oleaje	61
3.5.10	Corte en las altas frecuencias	62
3.5.11	Validación y mejoras del modelo	62
4.	ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE	64
4.1	Régimen medio	64
4.1.1	Régimen de oleaje.....	64
4.1.2	Técnicas de estimación de parámetros	64
4.1.3	Representación gráfica.....	67
4.1.4	Análisis de tormentas	67
4.2	Régimen extremal	71
4.2.1	Técnicas de punteo	72
4.2.2	Metodología para la estimación de los parámetros y dibujo en papel probabilístico.....	73
5.	METODOLOGÍA	76
5.1	Implementación del modelo híbrido WAM-HURAC	76
5.1.1	Recopilación de la información.....	76
5.1.2	Modelación WAM.....	77
5.1.3	Modelación HURAC.....	78
5.2	Implementación Modelo SWAN	78
5.2.1	Malla de análisis	78
5.2.2	Funciones de transferencia	80

5.2.3	Modelación SWAN.....	82
5.3	Filtrado de resultados.....	85
6.	RESULTADOS	87
6.1	Resultados Celda N° 1	89
6.1.1	Análisis de oleaje.....	89
6.1.2	Análisis de viento.....	96
6.1.3	Análisis de tormentas	101
7.	CONCLUSIONES	112
8.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	114
	ANEXO 1	114
	ANEXO 2	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Zona de Estudio	14
Figura 2.1 Canal de Yucatán	21
Figura 3.1 Comparación con mediciones de boyas oceanográficas para el huracán <i>Gilberto</i>	36
Figura 3.2 Comparación con mediciones de boyas oceanográficas para el huracán <i>Isidore</i>	37
Figura 1.1 Posición geográfica de las boyas de la NOAA y trayectoria de 13 ciclones tropicales que afectaron el Golfo de México y la porción del Caribe mexicano durante 2005. Con línea continua se presenta la trayectoria del huracán <i>Wilma</i>	43
Figura 1.2 Esquemmatización de la metodología empleada para el punto ubicado en la coordenada (89.5° W, 26° N). Valores de la altura de ola obtenida con: A) con el modelo WAM, B) resultados del modelo HURAC y, C) resultados con el modelo híbrido WAM-HURAC.....	45
Figura 1.3 Comparación entre las presiones atmosféricas calculadas con el modelo HURAC versus registros de la boya 42056 del NDBC y del SMN en la Isla de Cozumel durante el paso del huracán <i>Wilma</i> (octubre de 2005)	46
Figura 1.4 Comparación de los vientos calculados con el modelo HURAC y los datos estimados por el proyecto HRD durante el paso del huracán <i>Wilma</i> (octubre de 2005).....	47
Figura 1.5 Comparación de las presiones atmosféricas calculadas con el modelo HURAC versus registros de la boya 42056 del NDBC y los valores medidos en Puerto Morelos, Quintana Roo (reportados por Silva <i>et al.</i> (2007)) durante el paso del huracán <i>Wilma</i> (octubre de 2005).....	48
Figura 1.6 Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42001, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42001, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados	50
Figura 1.7 Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42002, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42002, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados	51
Figura 1.8 Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42019, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42019, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados	52
Figura 1.9 Interacciones cuádruples onda-onda	59
Figura 1.10 Interacciones triadas onda-onda	61
Figura 1.11 Portal (NCEP/NCAR)	76

Figura 1.12	Visualización programa de interpolación de vientos	77
Figura 1.13	Malla de análisis sin incluir batimetría	78
Figura 1.14	Malla de análisis con las características batimétricas	79
Figura 1.15	Malla de análisis interpolada definitiva	80
Figura 1.16	Archivo de entrada SWAN (*.swn)	82
Figura 1.17	Archivo de entrada SWAN (swaninit).....	83
Figura 1.18	Archivo de salida SWAN (*.tbl)	84
Figura 1.19	Localización puntos de estudio	85
Figura 1.20	Base de datos final por cada punto	86
Figura 1.21	Ubicación celdas de estudio	88
RESULTADOS CELDA N° 1		
Figura 6.3	Probabilidad de excedencia Hs Anual	89
Figura 6.3	Probabilidad de excedencia Hs Invierno.....	90
Figura 6.4	Probabilidad de excedencia Hs Otoño	90
Figura 6.5	Probabilidad de excedencia Hs Primavera	90
Figura 6.6	Probabilidad de excedencia Hs Verano.....	90
Figura 6.7	Probabilidad de excedencia Tm Anual	91
Figura 6.8	Probabilidad de excedencia Tm Invierno.....	91
Figura 6.9	Probabilidad de excedencia Tm Otoño.....	91
Figura 6.10	Probabilidad de excedencia Tm Primavera.....	92
Figura 6.11	Probabilidad de excedencia Tm Verano	92
Figura 6.12	Rosa de Oleaje Anual	92
Figura 6.13	Rosa de Oleaje Invierno.....	93
Figura 6.14	Rosa de Oleaje Otoño	93
Figura 6.15	Rosa de Oleaje Primavera.....	93
Figura 6.16	Rosa de Oleaje Verano.....	93
Figura 6.17	Régimen Extremal Hs Anual	94
Figura 6.18	Régimen Extremal Hs Invierno.....	95
Figura 6.19	Régimen Extremal Hs Otoño	95
Figura 6.20	Régimen Extremal Hs Primavera.....	95
Figura 6.21	Régimen Extremal Hs Verano.....	95
Figura 6.22	Probabilidad de excedencia Vv Anual	96
Figura 6.23	Probabilidad de excedencia Vv Invierno.....	97
Figura 6.24	Probabilidad de excedencia Vv Otoño.....	97
Figura 6.25	Probabilidad de excedencia Vv Primavera.....	97
Figura 6.26	Probabilidad de excedencia Vv Verano	97
Figura 6.27	Rosa de Viento Anual.....	98
Figura 6.28	Rosa de Viento Invierno.....	98
Figura 6.29	Rosa de Viento Otoño	98
Figura 6.30	Rosa de Viento Primavera.....	99
Figura 6.31	Rosa de Viento Verano.....	99
Figura 6.32	Régimen Extremal Vv Anual	99
Figura 6.33	Régimen Extremal Vv Invierno.....	100
Figura 6.34	Régimen Extremal Vv Otoño	100
Figura 6.35	Régimen Extremal Vv Primavera.....	100
Figura 6.36	Régimen Extremal Vv Verano.....	100

Figura 6.37 Duración Media de Tormentas	101
Figura 6.38 Duración Máxima de Tormentas	101
Figura 6.39 Desviación Estándar	102
Figura 6.40 Promedio de Tormentas Anual	102
Figura 6.41 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por meses	103
Figura 6.42 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por meses	103
Figura 6.43 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por meses	104
Figura 6.44 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por meses	104
Figura 6.45 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por meses	105
Figura 6.46 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por meses	105
Figura 6.48 Presentación de tormentas normalizadas ($E>0$) meses	106
Figura 6.49 Presentación de tormentas normalizadas ($E>10$) meses	106
Figura 6.50 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por año	107
Figura 6.51 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por año	107
Figura 6.52 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por año	108
Figura 6.53 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por año	108
Figura 6.54 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por año	109
Figura 6.55 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por año	109
Figura 6.56 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 8 m por año	110
Figura 6.57 Presentación de tormentas normalizadas ($E>0$) año	110
Figura 6.58 Presentación de tormentas normalizadas ($E>10$) año	111
Figura A 1 Estados de mar año 2000-2002.....	115
Figura A 2 Estados de mar año 2003-2005.....	116
Figura A 3 Estados de mar año 2006-2008.....	117
Figura A 4 Estados de mar año 2009.....	118
RESULTADOS CELDA N° 2	
Figura A 5 Probabilidad de excedencia Hs Anual	119
Figura A 6 Probabilidad de excedencia Hs Invierno.....	119
Figura A 7 Probabilidad de excedencia Hs Otoño	119
Figura A 8 Probabilidad de excedencia Hs Primavera	120
Figura A 9 Probabilidad de excedencia Hs Verano.....	120
Figura A 10 Probabilidad de excedencia Tm Anual	120
Figura A 11 Probabilidad de excedencia Tm Invierno.....	121

Figura A 12 Probabilidad de excedencia Tm Otoño.....	121
Figura A 13 Probabilidad de excedencia Tm Primavera.....	121
Figura A 14 Probabilidad de excedencia Tm Verano	121
Figura A 15 Régimen Extremal Hs Anual	122
Figura A 16 Régimen Extremal Hs Invierno.....	122
Figura A 17 Régimen Extremal Hs Otoño	122
Figura A 18 Régimen Extremal Hs Primavera.....	123
Figura A 19 Régimen Extremal Hs Verano.....	123
Figura A 20 Probabilidad de excedencia Vv Anual	123
Figura A 21 Probabilidad de excedencia Vv Invierno.....	124
Figura A 22 Probabilidad de excedencia Vv Otoño.....	124
Figura A 23 Probabilidad de excedencia Vv Primavera.....	124
Figura A 24 Probabilidad de excedencia Vv Verano	124
Figura A 25 Régimen Extremal Vv Anual	125
Figura A 26 Régimen Extremal Vv Invierno.....	125
Figura A 27 Régimen Extremal Vv Otoño	125
Figura A 28 Régimen Extremal Vv Primavera.....	126
Figura A 29 Régimen Extremal Vv Verano.....	126
Figura A 30 Duración Media de Tormentas	126
Figura A 31 Duración Máxima de Tormentas	127
Figura A 32 Desviación Estándar	127
Figura A 33 Promedio de Tormentas Anual	128
Figura A 34 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por meses	128
Figura A 35 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por meses	129
Figura A 36 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por meses	129
Figura A 37 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por meses	130
Figura A 38 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por meses	130
Figura A 39 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por meses	131
Figura A 40 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 8 m por meses	131
Figura A 41 Presentación de tormentas normalizadas (E>0) meses	131
Figura A 42 Presentación de tormentas normalizadas (E>10) meses	132
Figura A 43 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por año	133
Figura A 44 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por año	133
Figura A 45 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por año	134
Figura A 46 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por año	134

Figura A 47 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por año	135
Figura A 48 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por año	135
Figura A 49 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 8 m por año	136
Figura A 50 Presentación de tormentas normalizadas ($E>0$) año	136
Figura A 51 Presentación de tormentas normalizadas ($E>10$) año	137
Figura A 52 Estados de mar año 2000.....	137
Figura A 53 Estados de mar año 2001-2003.....	138
Figura A 54 Estados de mar año 2004-2006.....	139
Figura A 55 Estados de mar año 2007-2009.....	140
RESULTADOS CELDA N° 3	
Figura A 56 Probabilidad de excedencia Hs Anual	141
Figura A 57 Probabilidad de excedencia Hs Invierno.....	141
Figura A 58 Probabilidad de excedencia Hs Otoño	141
Figura A 59 Probabilidad de excedencia Hs Primavera	142
Figura A 60 Probabilidad de excedencia Hs Verano.....	142
Figura A 61 Probabilidad de excedencia Tm Anual	142
Figura A 62 Probabilidad de excedencia Tm Invierno.....	143
Figura A 63 Probabilidad de excedencia Tm Otoño.....	143
Figura A 64 Probabilidad de excedencia Tm Primavera.....	143
Figura A 65 Probabilidad de excedencia Tm Verano	143
Figura A 66 Régimen Extremal Hs Anual	144
Figura A 67 Régimen Extremal Hs Invierno.....	144
Figura A 68 Régimen Extremal Hs Otoño	144
Figura A 69 Régimen Extremal Hs Primavera.....	145
Figura A 70 Régimen Extremal Hs Verano.....	145
Figura A 71 Probabilidad de excedencia Vv Anual	145
Figura A 72 Probabilidad de excedencia Vv Invierno.....	146
Figura A 73 Probabilidad de excedencia Vv Otoño.....	146
Figura A 74 Probabilidad de excedencia Vv Primavera.....	146
Figura A 75 Probabilidad de excedencia Vv Verano	146
Figura A 76 Régimen Extremal Vv Anual	147
Figura A 77 Régimen Extremal Vv Invierno.....	147
Figura A 78 Régimen Extremal Vv Otoño	147
Figura A 79 Régimen Extremal Vv Primavera.....	148
Figura A 80 Régimen Extremal Vv Verano.....	148
Figura A 81 Duración Media de Tormentas	148
Figura A 82 Duración Máxima de Tormentas	149
Figura A 83 Desviación Estándar	149
Figura A 84 Promedio de Tormentas Anual	150
Figura A 85 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por meses	150
Figura A 86 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por meses	151

Figura A 87 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por meses	151
Figura A 88 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por meses	152
Figura A 89 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por meses	152
Figura A 90 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por meses	153
Figura A 91 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 8 m por meses	153
Figura A 92 Presentación de tormentas normalizadas ($E>0$) meses	154
Figura A 93 Presentación de tormentas normalizadas ($E>10$) meses	154
Figura A 94 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por año	155
Figura A 95 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por año	155
Figura A 96 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por año	156
Figura A 97 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por año	156
Figura A 98 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por año	157
Figura A 99 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por año	157
Figura A 100 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 8 m por año	158
Figura A 101 Presentación de tormentas normalizadas ($E>0$) año	158
Figura A 102 Presentación de tormentas normalizadas ($E>10$) año	159
Figura A 103 Estados de mar año 2000.....	159
Figura A 104 Estados de mar año 2001-2003.....	160
Figura A 105 Estados de mar año 2004-2006.....	161
Figura A 106 Estados de mar año 2007-2009.....	162
RESULTADOS CELDA N° 4	
Figura A 107 Probabilidad de excedencia Hs Anual	163
Figura A 108 Probabilidad de excedencia Hs Invierno.....	163
Figura A 109 Probabilidad de excedencia Hs Otoño	163
Figura A 110 Probabilidad de excedencia Hs Primavera	164
Figura A 111 Probabilidad de excedencia Hs Verano.....	164
Figura A 112 Probabilidad de excedencia Tm Anual	164
Figura A 113 Probabilidad de excedencia Tm Invierno.....	165
Figura A 114 Probabilidad de excedencia Tm Otoño.....	165
Figura A 115 Probabilidad de excedencia Tm Primavera.....	165
Figura A 116 Probabilidad de excedencia Tm Verano	165
Figura A 117 Régimen Extremal Hs Anual	166
Figura A 118 Régimen Extremal Hs Invierno.....	166
Figura A 119 Régimen Extremal Hs Otoño	166

Figura A 120 Régimen Extremal Hs Primavera.....	167
Figura A 121 Régimen Extremal Hs Verano.....	167
Figura A 122 Probabilidad de excedencia Vv Anual	167
Figura A 123 Probabilidad de excedencia Vv Invierno.....	168
Figura A 124 Probabilidad de excedencia Vv Otoño.....	168
Figura A 125 Probabilidad de excedencia Vv Primavera.....	168
Figura A 126 Probabilidad de excedencia Vv Verano	168
Figura A 127 Régimen Extremal Vv Anual	169
Figura A 128 Régimen Extremal Vv Invierno.....	169
Figura A 129 Régimen Extremal Vv Otoño	169
Figura A 130 Régimen Extremal Vv Primavera.....	170
Figura A 131 Régimen Extremal Vv Verano.....	170
Figura A 132 Duración Media de Tormentas	170
Figura A 133 Duración Máxima de Tormentas	171
Figura A 134 Desviación Estándar	171
Figura A 135 Promedio de Tormentas Anual	172
Figura A 136 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por meses	172
Figura A 137 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por meses	173
Figura A 138 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por meses	173
Figura A 139 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por meses	174
Figura A 140 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por meses	174
Figura A 141 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por meses	175
Figura A 142 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 8 m por meses	175
Figura A 143 Presentación de tormentas normalizadas ($E>0$) meses	176
Figura A 144 Presentación de tormentas normalizadas ($E>10$) meses	176
Figura A 145 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 2 m por año	177
Figura A 146 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 3 m por año	177
Figura A 147 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 4 m por año	178
Figura A 148 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 5 m por año	178
Figura A 149 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 6 m por año	179
Figura A 150 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 7 m por año	179
Figura A 151 Presentación de alturas de ola significantes mayores a 8 m por año	180

Figura A 152	Presentación de tormentas normalizadas ($E>0$) año	180
Figura A 153	Presentación de tormentas normalizadas ($E>10$) año	181
Figura A 154	Estados de mar año 2000.....	181
Figura A 155	Estados de mar año 2001-2003.....	182
Figura A 156	Estados de mar año 2004-2006.....	183
Figura A 157	Estados de mar año 2007-2009.....	184

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Dominios de atracción de las distribuciones más comunes.....	27
Tabla 6.1 Información geográfica de las celdas de estudio.....	87

1 INTRODUCCIÓN

El diseño de cualquier obra marítima, así como su proceso constructivo, requiere la correcta caracterización de las acciones hidrodinámicas actuantes a menudo expresadas en términos de altura de ola, periodo y dirección. Por ello, el resultado final del diseño y ejecución depende en gran medida de lo precisas que sean estas estimaciones. Además del aspecto ingenieril, el conocimiento del clima marítimo es de gran importancia para las embarcaciones durante la navegación, el aprovechamiento de recursos hídricos y la explotación turística, entre otras. Sumado a los aspectos antes mencionados, es muy importante identificar las zonas que presentan mayor vulnerabilidad a la presencia de eventos extremos, con el fin de determinar el comportamiento y variación de los estados de mar asociados a ellos.

Una de las alternativas con que se cuenta para caracterizar el clima de oleaje, en ausencia de datos medidos, es el uso de modelos numéricos capaces de estimar el oleaje a partir de datos de viento (velocidad y dirección). Tal es el caso de México, en donde aun cuando buena parte de las actividades industriales y comerciales dependen de los litorales, se tiene una muy limitada cultura marítima y, por tanto, poca información y prácticamente nulo monitoreo de las condiciones de los mares. De manera que la herramienta básica para generar información de oleaje en las costas mexicanas es el modelado numérico y el trabajo probabilístico-estadístico.

La costa atlántica mexicana es una zona sometida a cambios de presión debidos a la presencia recurrente de huracanes y depresiones tropicales en las estaciones de verano y otoño. Esto hace que las actividades socio-económicas en esta zona costera se vean frecuentemente afectadas por los fenómenos de inundación y erosión.

Los litorales sujetos a la ocurrencia de huracanes enfrentan otras dificultades, como la alta variabilidad de las componentes del viento, tanto en velocidad como en dirección y la irregularidad morfológica (de los contornos y el relieve).

Dadas las características y necesidades mencionadas respecto de las costa mexicana, en este trabajo se presenta una metodología enfocada en el estudio del clima de oleaje, vía la implementación de dos modelos, el primero es un híbrido (WAM-HURAC) para la generación de oleaje por viento. Está compuesto, a su vez, por un modelo de tercera generación (WAM) y un modelo de segunda generación (HURAC) en aguas profundas. El segundo modelo, de tercera generación (SWAN), estima el oleaje propagado de aguas intermedias a someras. Posteriormente, se muestra un análisis estadístico enfocado en la caracterización de los regímenes medio y extremal, con lo que podrá lograrse una caracterización del oleaje (altura, dirección y periodo) y del viento (velocidad y dirección) para toda la costa de México. Vistas las dificultades que representa la costa mexicana, en términos de variabilidad de vientos, morfología y extensión, la zona de estudio se

delimitó a la península de Yucatán (ver Figura 1). Esto es, entre las latitudes 19.75° N y 21.75° N y longitudes 86.25° W y 87.25° W.

Dentro de las características de la zona se encuentra la presencia de varias islas, que alteran directamente la interacción entre la costa y el océano, por la generación de fenómenos refracción, difracción y reflexión. Esta característica fortalece la necesidad de emplear más de un modelo numérico, ya que aquellos desarrollados para aguas profundas no son capaces de representar las perturbaciones del oleaje debidas al fondo ni a obstáculos y aquellos que sí lo hacen son altamente costosos computacionalmente hablando como para aplicarlos en zonas de estudio demasiado amplias.



Figura 1.1 Zona de estudio

Los resultados de este trabajo son la metodología empleada para el análisis de oleaje comprendido entre 1949 y 2009 en la Península de Yucatán, haciendo énfasis en la caracterización de las condiciones marítimas en aguas intermedias y someras. Se presentan, además, los valores de magnitud, dirección y periodo del oleaje y la dirección y velocidad del viento obtenidos en toda la zona de estudio.

1.1 Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo principal la determinación del clima marítimo en zonas costeras (particularmente en la vertiente atlántica mexicana), mediante la implementación de una metodología basada en la generación y propagación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras, por medio de la aplicación de modelos de segunda y tercera generación.

Los objetivos específicos propuestos para lograr este objetivo general son:

- Selección de los modelos.

Realizar la selección de los modelos que mejor se acoplan a las necesidades del proyecto, con base en las propiedades de cada uno de ellos y teniendo en cuenta las características físicas de la zona y el comportamiento marítimo en ella.

- Implementación y validación de modelos.

Realizar la implementación de los modelos de generación y propagación de oleaje, tomando el viento como el elemento generador del oleaje y posteriormente validar los resultados de las modelaciones con mediciones registradas en campo.

- Análisis a largo plazo.

Reproducir el oleaje en todas las condiciones presentadas durante el tiempo del análisis.

- Caracterización extremal.

Caracterizar los eventos extremos que se presentan en la zona de estudio.

1.2 Antecedentes

En décadas recientes, se han desarrollado una serie de modelos espectrales avanzados de oleaje generado por viento, conocidos como modelos de tercera generación, como son el WAM (WAMDI Group, 1988), WAVEWATCH III (Tolman, 1991), TOMAWAC (Benoit *et al.*, 1996) y SWAN (Booij *et al.*, 1999). Estos modelos resuelven la ecuación de acción balance espectral sin ningún tipo de restricción sobre el espectro de la evolución del oleaje.

Varios investigadores han trabajado en la caracterización y determinación del clima marítimo, utilizando modelos de generación y propagación de oleaje. A continuación se presentan brevemente las principales aportaciones que se han realizado en esta rama de la ingeniería costera.

Lizano (2000), evalúa modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico de oleaje en Centroamérica y México, aplicando los modelos WAM y SWAN.

Bolaños (2007), realiza el estudio de la climatología local de la zona del Mediterráneo occidental, con base en simulaciones de vientos y oleajes extremos, mediante la aplicación y comparación de los modelos WAM y SWAN. Encontró un alto número de espectros bimodales en el delta del Ebro y una diferencia en el comportamiento de los modelos para condiciones de calma y tormentas.

Pérez-Romero, Bolaños y Silva-Casarín (2007), realizan la predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México, mediante la implementación y validación del WAM. Encontraron que el modelo WAM tiende a subestimar los picos de las tormentas.

Rivillas (2008), realiza la caracterización energética de tormentas en el Golfo de México, haciendo la implementación del modelo híbrido WAM-HURAC y posterior análisis de tormentas, localizando las zonas que presentan gran riesgo para todas y cada una de las actividades marítimas.

Ruiz (2008), presenta los resultados de una caracterización de oleaje y viento a lo largo del litoral mexicano, luego de realizar la implementación del modelo híbrido WAM-HURAC y un análisis estadístico.

Ruiz et al (2008), presentan un atlas de clima marítimo para las vertientes del litoral mexicano basándose en la aplicación del modelo híbrido WAM.HURAC.

Ruiz-Martínez y Silva Casarín (2008), realizan un modelo híbrido para la caracterización del oleaje, el cual consta de un modelo de tercera generación (WAM) y uno de segunda generación (HURAC). Mediante la validación del modelo, encontraron que los resultados arrojados por éste muestran una excelente semejanza con valores registrados por boyas oceanográficas.

Rivillas (2008), realiza el reanálisis de oleaje para las vertientes mexicanas, con base en la aplicación del modelo WAM-HURAC y un análisis de régimen medio y extremal.

Ruiz et al (2009), determinan las características del clima marítimo en México para condiciones medias y extremas, empleando el modelo de tercera generación WAM y el modelo de segunda generación HURAC, realizando la hibridación entre estos dos modelos.

M. Zilema (2009), calcula los espectros de oleaje generado por el viento en aguas someras, mediante la implementación del SWAN, en mallas no estructuradas, encontrando un mejor funcionamiento del modelo, con la aplicación de este tipo de mallas, en lugar de mallas estructuradas.

1.3 Motivación

Tomando como punto de partida los estudios realizados por diferentes autores en cuanto a la aplicación de modelos de generación y propagación de oleaje para caracterizar las condiciones de oleaje y viento en zonas costeras y teniendo en cuenta las características batimétricas de la zona de estudio, se realizó la elección de un modelo que se acoplara a estas exigencias, es decir, capaz de estimar la interacción entre el oleaje, el fondo del mar y la costa, y que involucrara, además, la interacción directa entre el oleaje y las islas. La herramienta computacional que, a juicio del autor, cumple con todas estas características es el modelo SWAN.

1.4 Metodología

La metodología empleada para llegar a la consecución de los objetivos planteados en este trabajo, esta descrita a continuación:

- Obtención de los archivos de viento para generar el oleaje por medio de la aplicación del modelo WAM.
- Ubicar las zonas en donde han ocurrido eventos extremos y aplicar el modelo paramétrico HURAC para estimar el campo de oleaje debido a los meteoros. Ejecutar el modelo WAM para determinar el oleaje generado por viento en régimen medio. Cruzar la información de ambos modelos para construir la base de datos de oleaje en todo el periodo de análisis.
- Delimitar la zona de frontera entre aguas profundas e intermedias y desde allí realizar la propagación del oleaje con el modelo SWAN, caracterizando las condiciones de oleaje en un grupo de puntos seleccionados previamente, para su posterior análisis.

- Realizar el análisis estadístico para determinar los regímenes medios y extremos en los puntos seleccionados, con lo que se habrá logrado caracterizar el clima marítimo en cada uno de ellos.

1.5 Estructura de la tesis

Con la finalidad de exponer el presente trabajo, los temas de estudio se dividieron en los siguientes capítulos.

Capítulo 1 Introducción

Se presentan los objetivos y la motivación del trabajo; posteriormente se muestran los antecedentes de estudios realizados sobre este tema, metodología y estructura del trabajo.

Capítulo 2 Marco teórico

Se realiza un breve resumen sobre la importancia del trabajo, la descripción de la zona de estudio, conceptos básicos de oleaje y viento, conceptos de probabilidad y los papeles probabilísticos aplicados en el desarrollo del trabajo.

Capítulo 3 Modelos de generación y propagación de oleaje

El objetivo de este capítulo, es la descripción de los modelos utilizados en el desarrollo del presente trabajo, la metodología para su implementación y la validación de los mismos. Los modelos empleados son el modelo híbrido (WAM-HURAC) y el modelo SWAN.

Capítulo 4 Análisis y caracterización del oleaje

Se presentan los conceptos básicos que se utilizaron para desarrollar el análisis y caracterización del oleaje.

Capítulo 5 Metodología

Se presenta una descripción detallada de la metodología aplicada, siendo ésta el objetivo principal del presente trabajo.

Capítulo 6 Resultados

Se presentan los resultados obtenidos mediante la implementación de la metodología descrita en el capítulo anterior, para la celda ubicada frente a Cancún, Quintana Roo.

Capítulo 7 Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se presentan las principales conclusiones a las que llega este trabajo y se indican algunas futuras líneas de investigación.

Anexos

Se presenta la evolución temporal de la altura significativa para la celda ubicada frente a Cancún

Se presentan los resultados obtenidos para las celdas 2, 3 y 4

2 MARCO TEÓRICO

Desde el punto de vista ingenieril, dos son los insumos de mayor relevancia en el desarrollo de trabajos y proyectos, la información batimétrica y las condiciones marinas es . De ahí la gran importancia de conocer los estados de mar que gobiernan, por ejemplo, los diseños de estructuras de protección y aprovechamiento costero.

En este capítulo, se realiza una descripción de la zona de estudio y se analizan los conceptos básicos empleados para el desarrollo del presente trabajo, partiendo desde las bases para la ejecución de los modelos y realizando una descripción conceptual del análisis a largo plazo y los regímenes de oleaje y viento.

2.1 Descripción de la Zona de Estudio.

El golfo de México es una región marítima del océano Atlántico que se encuentra casi completamente rodeada por el continente americano y por islas. Está ubicado en el mar Caribe, el cual tiene como característica la presencia de fenómenos sísmicos y erupciones volcánicas de forma aislada; sin embargo la cuenca del golfo de México es geológicamente más estable. Ambas regiones marítimas están unidas al océano Atlántico a través de numerosos estrechos y pasos. No obstante, el intercambio de masas de agua entre las distintas cuencas marinas es limitado, dado que las zonas de comunicación suelen ser de aguas poco profundas.

En la Figura 2.1 se puede observar la configuración morfológica de la península de Yucatán, la cual, al contar con una buena cantidad de islas, bahías, y puntales, representa un reto en términos de caracterización. Por su parte, la batimetría tiene la característica de ser muy plana y de poca profundidad en la parte norte (Yucatán) y la ocurrencia de un acantilado muy pronunciado en la parte Este (Quintana Roo). Todo esto definitivamente tiene un importante impacto en el oleaje que arriba a la costa, de tal suerte que los regímenes de oleaje estimados dependerán, en gran medida, de la calidad de los datos batimétricos y morfológicos que se utilicen,



Figura 2.1 Canal de Yucatán

2.2 Oleaje y viento

El oleaje es un fenómeno que resulta por la interacción de diversas fuerzas, que pueden catalogarse en dos grupos, las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras.

Las fuerzas generadoras son las que, por su acción, provocan un desequilibrio en la superficie libre del agua y se traducen en oscilaciones. Las fuerzas meteorológicas como lo son el viento y la presión del aire son las principales fuerzas generadoras, estas generan oleaje local y distante. Sin embargo, existen otros tipos de fuerzas generadoras, como lo son los terremotos y las fuerzas astronómicas, las cuales generan grandes ondas conocidas como tsunamis y las mareas que se propagan de acuerdo con su longitud de onda en aguas poco profundas, respectivamente.

Por otro lado, las fuerzas restauradoras son las que intentan regresar la superficie libre del agua a su posición original, de éstas, la principal es la fuerza de gravedad terrestre.

Esta combinación de fuerzas da lugar al movimiento oscilatorio y a la propagación del oleaje en el tiempo y espacio.

A continuación se describen las fuerzas generadoras, siendo éstas la herramienta fundamental para la aplicación de los modelos que se presentan en este trabajo.

2.2.1 Acción del viento sobre el océano

Existen cinco tipos de ondas que se generan en el océano, que son las ondas de sonido, capilares, de gravedad, internas y planetarias. Debido a la gran cantidad de energía que contienen y sus efectos sobre las estructuras y la forma de las costas, las ondas de gravedad son las más estudiadas desde el punto de vista ingenieril.

El sistema océano-atmósfera actúa como un sistema termodinámico acoplado, en el que la respuesta del agua a la fuerza del viento provoca un cambio en la interface o superficie marina. El flujo entre el agua y el aire en la frontera marina es un parámetro clave para los modelos atmosféricos, oceánicos y de oleaje. Está relacionado con la rugosidad de las olas, velocidad del viento, estabilidad atmosférica, oleaje local (*sea*) y oleaje distante (*swell*).

La forma en que el viento ejerce fuerza sobre la superficie del océano ha originado un notable interés entre científicos por lo que se ha producido una gran cantidad de formulaciones y mediciones intentando describir dicho fenómeno. La fuerza del viento sobre el océano suele calcularse en función de la densidad (del aire o agua), el coeficiente de arrastre y la velocidad del viento.

Diferentes investigaciones han reportado mayor fuerza del viento sobre olas jóvenes que viejas. Esto se puede explicar porque las olas jóvenes viajan más lento y proporcionan mayor fricción entre el océano y la atmósfera. También influye el hecho de que las olas jóvenes son más peraltadas y pueden producir una separación del flujo de viento y con ello aumentar las presiones de arrastre.

2.2.2 Oleaje local o sea

Este tipo de oleaje se produce en la zona de generación en alta mar, donde raramente se aprecian crestas de corta longitud y es difícil observar un periodo bien definido. Las características de este tipo de oleaje son: gran irregularidad, asimetría y gran peralte de las olas. (Silva, 2005). Normalmente los periodos de oleaje que se presentan en esta zona están entre 3 y 7 s.

2.2.3 Oleaje distante o *swell*

Es el resultado del oleaje propagado lejos del área de generación y se producen, por pérdida de energía, una dispersión angular y otra radial. Este oleaje, que presenta periodos muy regulares y frentes de onda muy largos, es resultado del fenómeno conocido como soldadura, según el cual, las ondas de periodos cercanos se fusionan, originando una simplificación de la superficie caótica de la superficie.

2.2.4 Estado de mar

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario (Silva, 2005)

2.2.5 Altura de ola

La altura de ola se define como la distancia vertical entre el valor más alto y el valor más bajo de la elevación de la superficie de una ola. En algunas ocasiones se utiliza el valor medio de la altura de ola ponderada para definir la altura de ola media cuadrática, H_{rms} , la cual se define como es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las alturas de ola de un registro. Este valor de altura de ola, representa la parte energéticamente más importante de un estado de mar, es de gran importancia para proyectos de diseño y aprovechamiento en los que la altura de ola es un parámetro reinante. Un parámetro similar que es el que se utilizará en este trabajo es la altura de ola significativa, que se define como el valor medio del tercio de olas más altas de un registro de oleaje.

2.2.6 Tormenta

Una tormenta se genera por la acción de un sistema atmosférico cuyo viento circula en dirección ciclónica, esto es, en el sentido contrario a las manecillas del reloj, tomando como referencia el hemisferio norte, y en el sentido de las manecillas del reloj visto desde el hemisferio sur. Es originada por el intercambio de presiones y temperaturas en aguas cálidas, excepto en el Atlántico sur. Es de hacer notar que en ambos océanos que colindan con México existe la presencia de tormentas, principalmente durante los meses de verano. La temporada de ciclones, estadísticamente hablando, es del 15 de mayo al 30 de noviembre en el océano Pacífico y del 1 de junio al 30 de noviembre en el Atlántico, aunque esto no quiere decir que no se presenten tormentas fuera de temporada. A raíz de

estos eventos y teniendo en cuenta que el viento es el generador principal del oleaje, los estados de mar se ven claramente alterados durante estos sucesos.

Para efectos del presente trabajo se define como tormenta el grupo de estados de mar para los que la altura de ola significativa H_s excede un umbral, de 2 m por un periodo de tiempo continuo e igual a o superior a 12 horas.

2.3 Conceptos Probabilidad

A continuación se describen algunos conceptos básicos de probabilidad, los cuales son fundamento para el análisis de los resultados del presente trabajo.

2.3.1 Distribución de probabilidad

La distribución de probabilidad de una variable aleatoria es una función que asigna, a cada suceso definido sobre la variable aleatoria, la probabilidad de que dicho suceso ocurra. La distribución de probabilidad está definida sobre el conjunto de todos los rangos de valores de la variable aleatoria.

Cuando la variable aleatoria toma valores en el conjunto de los números reales, la distribución de probabilidad está completamente especificada por la función de distribución, cuyo valor en cada real es la probabilidad de que la variable aleatoria sea menor o igual que x .

2.3.2 Probabilidad de excedencia

Es la probabilidad de que una magnitud dada de un evento sea igual o excedida por otro. En forma discreta, se representa mediante:

$$P(H_s > h) = \frac{1}{T} \sum_i \Delta t_i(h)$$

(2.1)

donde $\Delta t_i(h)$ es el intervalo de tiempo en el cual H_s excede el valor fijo establecido, y t es el tiempo total.

2.3.3 Periodo de retorno

El periodo de retorno se define como el tiempo que transcurre, en promedio, para que un evento de magnitud dada sea igualado o excedido por lo menos una vez.

$$Tr = \frac{1}{P(Hs > h)} = \frac{1}{[1 - P(hs \leq h)]} \quad (2.2)$$

Tr: Periodo de retorno (años)

2.3.4 Estadísticos de orden

Para entender el concepto de estadístico de orden, considérese una muestra procedente de una población (X_1, X_2, \dots, X_n) . Si los valores de dicha población se ordenan de forma creciente en magnitud $(X_{1:n} \leq X_{2:n} \leq \dots \leq X_{r:n})$ entonces el miembro "errésimo" de esta nueva secuencia se denomina estadístico de orden r de la muestra dada. Nótese que el tamaño de la muestra, n , se incluye en la notación $X_{r:n}$, y cualquier estadístico de orden debe tener asociado el tamaño de la muestra. El estadístico de orden proporciona, como su nombre lo indica, información respecto del orden y de la longitud de la muestra. Para casos de valores extremos la clasificación de elementos debe ser ascendente, esto es, el último valor es el máximo y el primero es el mínimo. Estos valores pueden expresarse como: $X_{n:n} = \text{Máx}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ y $X_{1:n} = \text{Mín}(X_1, X_2, \dots, X_n)$, respectivamente. Estos dos valores son los de mayor interés para el análisis extremal. (Rivillas, 2008)

2.3.5 Distribuciones asintóticas del máximo y el mínimo

Los valores máximo y mínimo, que están asociados a la variable de estudio, son los puntos límite de una función de probabilidad acumulada. Si la variable no está delimitada en alguno o ambos de sus extremos estos se transforman en $-\infty$ y $+\infty$.

La función de distribución del máximo, $n Z$, y del mínimo, $n W$, de una muestra de tamaño n procedente de una población con función de distribución $F(X)$ son:

$$H_n(x) = P[Z_n \leq x] = F^n(x) \quad (2.3)$$

$$L_n(x) = P[W_n \leq x] = 1 - [1 - F(x)]^n \quad (2.4)$$

La estructura de estas dos funciones muestra que los percentiles de máximos y mínimos se mueven hacia la derecha y hacia la izquierda, respectivamente, si se incrementa n . Aproximando los límites superior e inferior a infinito, se tiene:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } F(x) = 1 \\ 0 & \text{si } F(x) < 1 \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 - [1 - F_n(x)]^n = \begin{cases} 0 & \text{si } F(x) = 0 \\ 1 & \text{si } F(x) \leq 1 \end{cases} \quad (2.6)$$

Esto significa que las distribuciones límites toman exclusivamente valores de 0 y 1, es decir, son degeneradas. Con el objetivo de evitar la degeneración se buscan transformaciones lineales del tipo $Y = a_n + b_n x$, donde a_n y b_n son constantes que dependen de n , tal que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H_n(a_n + b_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(a_n + b_n x) = H(x) \quad ; \quad \forall x \quad (2.7)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(c_n + d_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 - [1 - F_n(c_n + d_n x)]^n = L(x) \quad ; \quad \forall x \quad (2.8)$$

A estas nuevas distribuciones, ecuaciones (2.7) y (2.8), se les conoce como asintóticas del máximo y mínimo, respectivamente.

2.3.6 Dominios de atracción

Se dice que una distribución $F(x)$, pertenece al dominio de atracción para máximos de una distribución dada $H(x)$, cuando satisface la ecuación (2.7) para algunas sucesiones a_n y $b_n \geq 0$. De la misma forma, cuando $F(x)$ satisface la ecuación (1.8) se dice que pertenece al dominio de atracción para mínimos de $L(x)$. (Silva, 2005)

De acuerdo con (Silva, 2005) los únicos tres tipos de distribuciones para máximos y mínimos no degeneradas, $H(x)$ y $L(x)$, que satisfacen las ecuaciones (2.7) y (2.8), respectivamente son Frechet, Weibull y Gumbel.

Castillo (1987) presenta de manera resumida los dominios de atracción para máximos y mínimos de las distribuciones más comunes, lo cual se resume en la Tabla 2-1.

Distribución	Dominio de atracción	
	Máximos (M)	Mínimos (m)
Normal	Gumbel	Gumbel
Exponencial	Gumbel	Weibull
Lognormal	Gumbel	Gumbel
Gamma	Gumbel	Weibull
Gumbel _M	Gumbel	Gumbel
Gumbel _m	Gumbel	Gumbel
Rayleigh	Gumbel	Weibull
Uniforme	Weibull	Weibull
Weibull _M	Weibull	Gumbel
Weibull _m	Gumbel	Weibull
Cauchy	Frechet	Frechet
Pareto	Frechet	Weibull

Tabla 2-1 Dominios de atracción de las distribuciones más comunes

2.4 Papeles probabilísticos

La idea principal del papel probabilístico, asociado a una familia paramétrica de funciones de distribución, es modificar las escalas de la variable aleatoria X , y la probabilidad P , para que al representar gráficamente dicha variable contra cualquier función de distribución acumulativa $F(x)$, perteneciente a esa familia, tenga la apariencia de una línea recta. Esto implica que el dibujo de cualquier función de distribución acumulativa en este papel permite decidir si pertenece o no a esa familia, y si la respuesta es afirmativa, estimar sus parámetros.

De tal manera que si $F(x;\theta)$ es una familia paramétrica de funciones de distribución acumuladas donde θ es el vector parámetro, se observa en la siguiente transformación que

$$\left. \begin{array}{l} \xi = g(x) \\ \eta = h(y) \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

Con la familia de curvas $F(x;\theta)$ transformada en la ecuación 2-9, se convierte en una familia de líneas rectas, entonces:

$$y = F(x, \theta) = h^{-1}(ag(x) + b) \leftrightarrow h(y) = ag(x) + b \quad (2.10)$$

donde $g(x)$ y $h(y)$ son funciones y $h(y)$ es invertible; entonces la transformación dada por la ecuación 1-9 convierte $y=F(x;\theta)$ en una familia de rectas,

$$\eta = a\xi + b \quad (2.11)$$

donde la variable η es la llamada variable reducida.

3 MODELOS DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE OLAJE

Los estados de mar están compuestos por las características del oleaje (altura, dirección y periodo de ola), junto con las de sus vientos asociados (velocidad y dirección). Para conocer estos estados existen varios métodos, entre ellos, la implementación de modelos numéricos de oleaje generado por viento y los de propagación de oleaje. Es necesario, que para la evaluación y posterior determinación de los estados de mar, los modelos implementados tengan en cuenta todos los factores que afectan directa e indirectamente el comportamiento del mar, durante su evolución hacia la costa, como son la acción del viento, la difracción, refracción, fricción de fondo, entre otros.

Con base en el trabajo realizado por (Bolaños, 2007), el modelo de tercera generación conocido como WAM (WAve Model), es el que mejor estima los estados de oleaje inducidos por la acción del viento, sin embargo y de acuerdo con (Pérez, 2008) una gran limitante de éste modelo es su deficiencia en cuanto a la estimación del oleaje generado por vientos asociados a ciclones tropicales. Con base en estas restricciones y teniendo en cuenta que las costas mexicanas son afectadas por huracanes, se hizo necesario el uso de un segundo modelo de generación de oleaje para corregir los valores de los estados de mar extraordinarios. Por esta razón se utilizó el modelo HURAC, desarrollado por Silva, *et al.* (2005), el cual es de tipo paramétrico, con el que se obtuvo una buena aproximación del oleaje generado por ciclones.

3.1 Modelo de Generación de Oleaje (WAM)

El WAM (acrónimo en inglés de las palabras *Wave Model*), fue desarrollado por el grupo Wave Model Development and Implementation (WAMDI), siendo éste un modelo espectral de tercera generación que se utiliza para estimar las condiciones de oleaje originadas por la acción del viento en aguas profundas.

El modelo WAM resuelve de manera implícita la ecuación bidimensional de transporte de energía, sin ningún limitante de la forma del espectro del oleaje, dicha ecuación se define como:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\cos \theta)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi} (\phi \cos \phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\theta F) = S$$

(3.1)

donde

$F(f, \theta, \varphi, \lambda, t)$ representa la densidad espectral

f es la frecuencia

θ la dirección

φ y λ latitud y longitud

t el tiempo

El término S representa todos los efectos de generación y disipación del oleaje.

En esta ecuación se consideran las acciones del viento y la resonancia entre componentes, así como la disipación de energía (Ruiz, 2009). El WAM está formulado para coordenadas esféricas y utiliza un método implícito de integración, es por esto que los términos (φ, λ, t) representan la propagación, el cambio de la posición y la dirección de las olas viajando en un gran círculo alrededor de la tierra.

El WAM incluye la teoría del aporte del viento de Janssen, la cual indica que la ecuación de conservación de momentum en estado estacionario, está dada por:

$$\tau = \tau_w(z) + \tau_t(z)$$

(3.2)

donde

τ_w es fuerza debido a la ola (*wave induced stress*)

τ_t es la fuerza turbulenta (*stress turbulent*)

ambos evaluados a una altura z

Janssen asume que el perfil de viento puede ser representado logarítmicamente como:

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z + z_{ow}}{z_{ob} + z_{ow}}\right)$$

(3.3)

donde

u_* es la velocidad de fricción

k es la constante de von Karman

z_{ob} Rugosidad por ondas capilares

z_{ow} es la rugosidad por pequeñas ondas de gravedad

Para una velocidad de viento dada puede ser calculada la tensión total como:

$$\tau = \left[\frac{kU(z)}{\ln \left(\frac{z}{z_{ob} + z_{ow}} \right)} \right]^2$$

(3.4)

donde z es igual a 10 m. En el WAM (*Johnson, et al., 1998*). *Johnson y Hansen (2000)* muestran que las parametrizaciones de Janssen para la escala de rugosidad no son adecuadas para casos de aguas someras.

Debido a la inestabilidad de la interface viento – agua, la componente de generación de olas por la energía que el viento ejerce a la superficie del agua, se refleja en un crecimiento de las componentes de oleaje. Este aporte de viento fue propuesto por Janssen (1989) y esta dado por:

$$S_{in} = \beta_s F$$

(3.5)

Donde: F es la función de densidad espectral, β_s es un parámetro que escala la velocidad del viento mediante la variable asociada a dicha velocidad por efecto de la fricción, además relaciona la energía del viento con el crecimiento exponencial del oleaje en las altas frecuencias del espectro. Este parámetro fue propuesto por Snyder *et al.* (1981) y está definido por:

$$\beta_s = \max \left\{ 0.025 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{u_*}{c} \cos \theta - 1 \right) \right\} \omega$$

(3.6)

$$\omega = 2\pi f$$

(3.7)

donde

u_* Velocidad de fricción

ω Frecuencia angular

ρ_a Densidad del aire

ρ_w Densidad del agua

El segundo mecanismo que afecta el crecimiento del oleaje en aguas profundas, es la transferencia de energía de un componente del oleaje a otro gracias al efecto de resonancia; es decir, por el choque entre olas de diferente dirección y frecuencia. Este efecto es calculado mediante la teoría desarrollada por Hasselman (1960) en la cual los cambios de energía ocurren en diferentes direcciones y componentes, por lo que evalúa su relación simultáneamente. La teoría sugiere que 4 componentes de oleaje interactúan cuando sus números de onda y frecuencia se igualan, cumpliendo con las condiciones de resonancia y habrá entonces una transferencia de energía entre las 4 componentes. El cálculo de las interacciones requiere considerables recursos de cómputo por lo que involucra un gran número de combinaciones, para ello el WAM adopta una aproximación de interacción discreta (DIA) desarrollada por Hasselman (1985). Formalmente, la aproximación de interacción discreta puede ser escrita de la siguiente manera:

$$S_{nl}^{di}(k_4) = \sum_{\gamma=1,2} A_\gamma w_4 [n_1^\gamma n_2^\gamma (n_3^\gamma + n_4^\gamma) - n_3^\gamma n_4^\gamma (n_1^\gamma + n_2^\gamma)]$$

(3.8)

Donde

$$n_i^\gamma = \frac{F(k_i^\gamma)}{\omega_i^\gamma}, i=1,2,3, \gamma=1,2$$

(3.9)

A_γ Coeficiente de acoplamiento

La energía del oleaje no se incrementa infinitamente y por esta causa cuando las olas alcanzan un grado de saturación específico, disipan su energía por rotura, aún en aguas profundas. El efecto disipativo de la rotura en la evolución del oleaje es local, altamente no lineal y medido sobre un gran número de olas es mucho menor. A pesar de la incertidumbre acerca de la relevancia de este fenómeno en la rotura del oleaje, en muchas hipótesis se considera en el término fuente. Dada la complejidad del fenómeno y el poco conocimiento que acerca de este se tiene, el WAM incorpora un mecanismo de ajuste que representa el fenómeno, por medio de la siguiente expresión:

$$S_{ds} = -2.33 \times 10^{-5} \hat{\omega} \left(\frac{\hat{\omega}_w}{\hat{\omega}} \right) \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{pm}} \right)^2 F \quad (3.10)$$

$$\hat{\omega} = E^{-1} \iint F(f, \theta) \omega df d\theta \quad (3.11)$$

$$E = \iint F(f, \theta) df d\theta \quad (3.12)$$

$$\hat{\alpha} = E \hat{\omega}^4 g^{-2} \quad (3.13)$$

$$\hat{\alpha}_{pm} = 4.57 \times 10^{-3} \quad (3.14)$$

donde:

$\hat{\omega}$: Frecuencia total

E : Energía total

$\hat{\alpha}$: Parámetro de peraltamiento de la ola

$\hat{\alpha}_{pm}$: Parámetro para el espectro Pierson-Moskowitz

Si se desea generalizar la ecuación de transporte para aguas someras, a la función fuente se le debe adicionar una función que represente la energía que se

pierde debido a la fricción de fondo y a la percolación, y los otros términos deben ser modificados de forma conveniente para permitir la dependencia de la profundidad en la relación de dispersión, de donde:

$$\hat{\omega} = (gk \tanh KD)^{1/2} \quad (3.15)$$

$$S_{bf} = -\frac{\Gamma}{g^2} \frac{\omega^2}{\sinh^2 KD} F \quad (3.16)$$

$$\Gamma = 0.038 \frac{m^2}{s^{-3}} \quad (3.17)$$

donde

F es la función de densidad espectral

k es el número de onda

D es la profundidad

ω es la frecuencia

En el WAM se asume que las olas son generadas en la misma dirección del viento y se utiliza un coeficiente empírico de crecimiento (limitador), práctico para mar abierto, aunque en zona costera estas consideraciones pueden no ser válidas (Huang, 1999). Monbaliu et al. (2000) realizan pruebas con el WAM adaptándolo para su utilización en altas resoluciones espaciales principalmente en zonas costeras y en las cuales se han realizado modificaciones de la propagación, inclusión del efecto de corrientes, fricción por fondo y ruptura por fondo. Los autores concluyen que utilizando un paso de tiempo pequeño el WAM es numéricamente estable para casos de crecimiento con *fetch* limitado por lo que los problemas se vuelven numéricos más que físicos. A pesar de esto el limitador de crecimiento (Hersbach y Janssen, 1999) fue también implementado.

El WAM ha sido adoptado por centros de todo el mundo para su uso operacional, incluyendo *The National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *United Kingdom Meteorological Office* (UKMO), *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), y el *U.S. Naval Oceanographic Office* (NAVOCEANO). Con la experiencia, algunas tendencias del modelo fueron encontradas; por ejemplo, la subpredicción de los picos de tormentas y de los eventos de *swell*. Algunas comparaciones han mostrado que la influencia de usar vientos superficiales o fuerza superficial, es despreciable.

El WAM, comparado con datos de boya (*Wyatt et al., 2003*), mostró buenos resultados, aunque hay evidencia de que responde lentamente a condiciones variables, posiblemente debido a la baja resolución de los campos de viento. El impacto de la asimilación de datos en la predicción de oleaje ha sido muy limitado, e incluso el efecto de la asimilación desapareció una hora después del tiempo de análisis.

El modelo WAM aunque es utilizado en diferentes partes del mundo por investigadores y centros de predicciones climáticas, no ha sido suficientemente analizado en términos de su validez para mares limitados como el Mediterráneo. Uno de los pocos trabajos realizados es la implementación por *Cavaleri et al. (1991)*, *Dell'Osso et al. (1992)*, donde la verificación del modelo con mediciones mostró que para obtener predicciones confiables es necesario tener resoluciones horizontales altas, con tamaño de celda de, al menos, 40 km.

3.2 Validación de los resultados del modelo WAM

Con base en el trabajo realizado por (Pérez Romero, Bolaños, & Silva Casarín, 2008), la validación del modelo WAM, se realizó mediante la comparación tanto de los campos de vientos como los de oleaje con los registros de las boyas oceanográficas que el Data Bouy Center de la NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) tienen en el norte del Golfo de México. Las variables que se utilizaron fueron la velocidad de viento a 10 m sobre la superficie, reportada cada hora y calculada como el promedio de las mediciones del anemómetro en un periodo de 8 minutos, la altura de ola significativa (H_s) y el periodo medio (T_z), reportados también a cada hora, pero obtenidos a partir del análisis espectral de 20 minutos de registro de los desplazamientos de la superficie libre.

Los campos de viento del NCEP/NCAR se modificaron en el procedimiento del reanálisis por datos medidos entre los que se encuentran los de las boyas oceanográficas, por lo que puede parecer redundante compararlos con las mediciones de las boyas propuestas. Sin embargo, no existe otra fuente de medidas continuas de viento sobre el mar por lo que se utilizan estas para tener una validación preliminar de los vientos.

La validación se realizó para el huracán *Gilberto* (1988) y el huracán *Isidore* (2002).

Para el huracán *Gilberto*, los datos de las boyas 42002 y 42003 (la boya 42001 no reportó datos de viento para ese periodo) se muestran en la Figura 3-1 (a). En ambos casos la tendencia es de sobreestimación, en la boya 42002 los vientos del NCEP/NCAR simulan bien el paso de la tormenta pero existen dos puntos que están por debajo de los valores alcanzados durante el pico.

La comparación entre los resultados del WAM y los registros de las boyas se muestran en la figura 3-1 (b) y (c), para la altura de ola significativa y el periodo medio respectivamente. El modelo acierta satisfactoriamente en la tendencia de evolución de la altura de ola, aunque en algunos casos subestima magnitudes. En la boya 42001, la tendencia es bien representada, no así las magnitudes del 7 al 11 de septiembre. En cuanto a la comparación con la boya de 42002 el pico de la tormenta se subestima en un 40% aproximadamente, lo cual se atribuye a la subestimación de los vientos durante el pico de la tormenta. Con la boya 42003 el resultado es similar, la posición de los picos es exitosamente reproducida, sin embargo la magnitud de estos es subestimada. En lo que respecta el periodo medio, las tendencias se reproducen satisfactoriamente pero existe una diferencia en los picos de las tormentas hasta de 3 segundos.

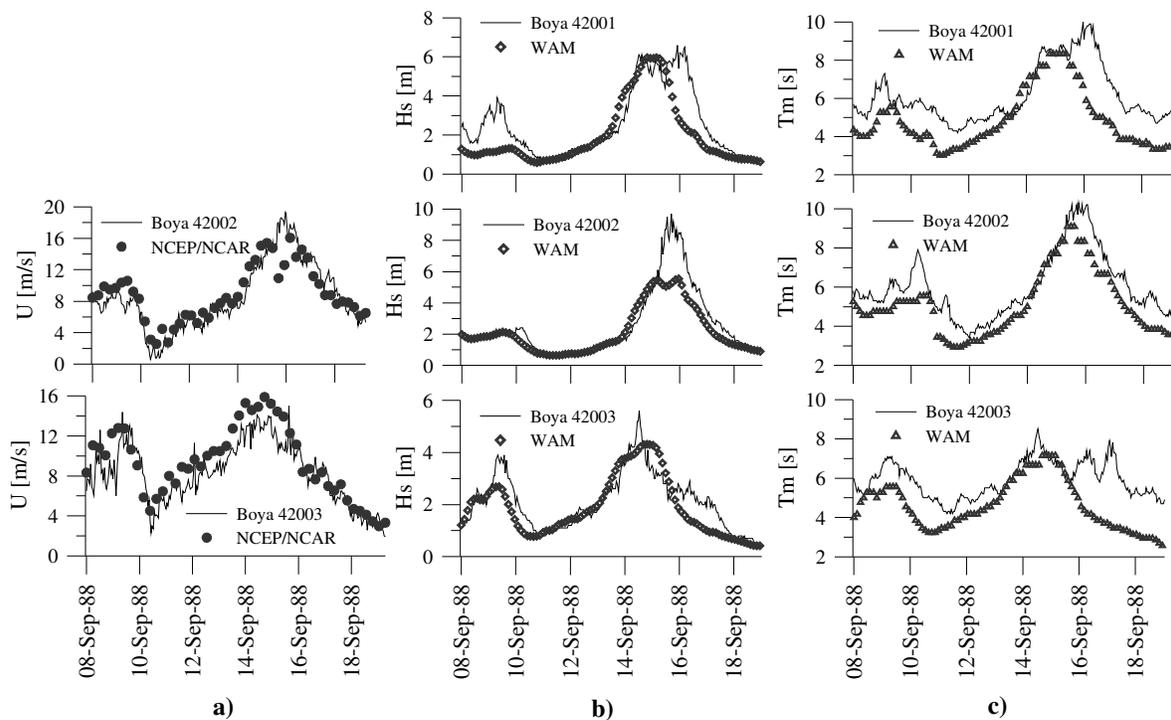


Figura 3.1 Comparación con mediciones de boyas oceanográficas para el huracán *Gilberto*

En la figura 3-2 (a) se muestra la comparación de las boyas 42001, 42002 y 42003 con los datos de viento del *NCEP/NCAR*. Se observa que las velocidades del viento son ligeramente sobreestimadas, aunque también hay valores por debajo de los registrados. La tendencia de la tormenta, incluidos los picos, se reproduce satisfactoriamente. En lo que se refiere a altura de ola significativa (figura 3-2 (b)), el ajuste del modelo con las mediciones de las tres boyas es muy bueno, y aunque el modelo predice un valor ligeramente menor al pico máximo, la evolución es

descrita adecuadamente. Los resultados del periodo medio (figura 3-2 (c)) muestran una subestimación, el error medio absoluto es de aproximadamente 20%.

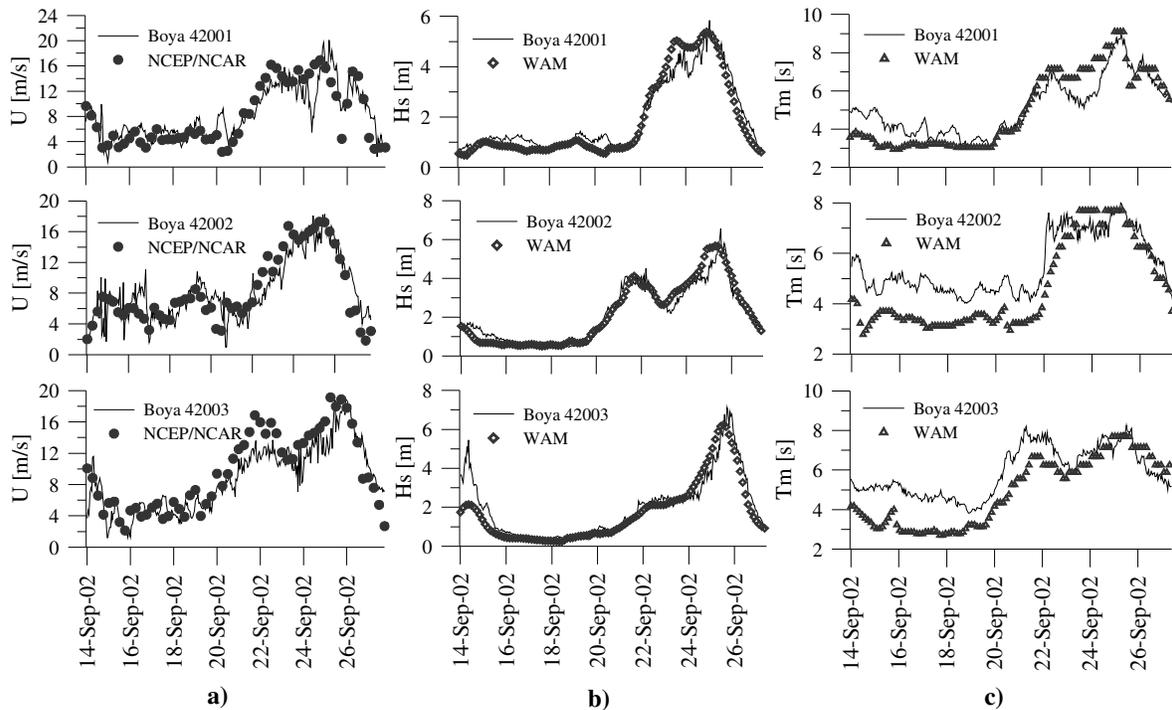


Figura 3.2 Comparación con mediciones de boyas oceanográficas para el huracán *Isidore*

3.3 Modelo paramétrico de ciclones HURAC

El modelo paramétrico de ciclones que a continuación se describe fue desarrollado por Silva *et al.* (2002) y simplificado por Ruíz et al (2009). Está basado en los modelos desarrollados por Hydromet-Rankin Vortex de Holland (1980) y Bretschneider (1990). El HURAC evalúa las magnitudes del oleaje y viento para condiciones asociadas a huracanes; estas estimaciones las realiza mediante el cálculo de los campos de vientos y las presiones atmosféricas en función del radio ciclostrofico. Con base en estos datos, se definen los valores de la altura y periodo del oleaje para condiciones de tormenta. El modelo está compuesto por los submodelos de presión, viento y oleaje

3.3.1 Modelo de presión atmosférica

El modelado numérico de la presión atmosférica empleado por el HURAC, se basa en la ecuación:

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0)e^{-R/r} \quad (3.18)$$

donde

P_0 es la presión en el centro del huracán

P_r es la presión a una distancia radial r

P_N es la presión normal

R es el radio de vientos ciclostróficos máximo

3.3.2 Modelo de viento

En lo que se refiere al modelado de viento, se determinan los valores del gradiente máximo del campo de viento y la velocidad que alcanza el viento a diez metros sobre el nivel del mar. El máximo gradiente de vientos U_r (en km por hora), para un ciclón estacionario se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$U_r = 21.8\sqrt{P_N - P_0} - 0.5fR \quad (3.19)$$

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (3.20)$$

$$\omega \approx 0.2618 \frac{rad}{h} \quad (3.21)$$

donde

f es el parámetro de Coriolis,

ω es la velocidad angular de la Tierra

ϕ es la latitud ($^{\circ}$)

(Ruiz *et al.*, 2009).

La velocidad del viento a diez metros sobre el nivel del mar, en km/h, para un ciclón en movimiento y para una distancia r medida desde el centro del ciclón, se determina por la siguiente ecuación:

$$W = 0.886[F_V U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)] \quad (3.22)$$

$(\theta + \beta)$: Ángulo total entre la velocidad de traslación F_V y la velocidad del viento R a una distancia r desde el centro del huracán y es positiva en el lado derecho y negativa en el lado izquierdo.

V_F (km/h): Velocidad de traslación

U_R : Velocidad del viento medida en (km/h) a una distancia radial r , desde el centro del huracán y es positiva en el lado izquierdo.

F_V : Es un factor de amortiguamiento que se evalúa como la relación de la velocidad del viento en r .

El factor de F_V es aproximado a través de las siguientes relaciones

$$F_V = 1 - 0.971 \text{EXP} \left(-6.826 \left(\frac{r}{R} \right)^{4.798} \right); \frac{r}{R} < 1 \quad (3.23)$$

$$F_V = \text{EXP} \left[A \ln^3 \left(\frac{r}{R} \right) \text{EXP} \left(B \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right) \right]; \frac{r}{R} \geq 1 \quad (3.24)$$

donde,

$$A = -0.99(1.066 - \text{EXP}(-1.936N_c)) \quad (3.25)$$

$$B = -0.357(1.4456 - EXP(-5.2388N_c)) \quad (3.26)$$

3.3.3 Modelo de oleaje

Para evaluar la altura de ola significativa H_s , para un ciclón no estacionario, el módulo de oleaje aplica la siguiente ecuación:

$$H_s = 0.2887F_h \left(1 - \frac{6.69N_c}{1 + 10.3N_c - 3.25N_c^2} \right) \sqrt{R(P_N - P_0)} \left(1 + \frac{V_F \cos(\theta + \beta)}{2U_R F_\gamma} \right)^2 \quad (3.27)$$

donde

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + 0.742 \left(\frac{r}{R} - 1 \right) + 0.07382 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)^2}; \frac{r}{R} < 1 \quad (3.28)$$

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + 0.742 \left(\frac{r}{R} - 1 \right) + 0.07382 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)^2} - \frac{N_c \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + C \left(\frac{r}{R} - 1 \right) + \frac{N_c}{10} \left(\frac{r}{R} - 1 \right)^2}; \frac{r}{R} \geq 1 \quad (3.29)$$

donde

$$C = \frac{0.37N_c^{2.56}}{0.13 + N_c^{2.56}} \quad (3.30)$$

N_c representa el número de Coriolis cilostrofico $N_c = \left(\frac{fR}{U_r} \right)$. Una estimación muy aproximada del periodo de ola asociado a la altura de ola significativa se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$T_s = 12.1 \left(\frac{H_s}{g} \right)^{1/2}$$

(3.31)

En la anterior expresión, T_s se encuentra dado en segundos, la altura de ola significativa, H_s , en metros y la aceleración de la gravedad en metros sobre segundos cuadrados.

3.3.4 Relaciones complementarias

Los modelos paramétricos de presión, viento y oleaje que se reportan en la literatura, generalmente dependen de la siguiente información: posición del centro del huracán, presión central, valor de presión de la última isobara cerrada y del radio ciclostrofico, conocido también como radio de máximo gradiente. Debido a que no todos los reportes meteorológicos dan a conocer el valor de la presión central, el modelo HURAC fue diseñado para eliminar dicha deficiencia de información utilizando el criterio de Silva *et al.* (2002), el cual propone dos curvas para estimar la presión central en función de la velocidad superficial máxima del viento, una para el Atlántico y otra para el Pacífico, que son respectivamente:

$$P_0 = 1019.08 - 0.182V_v - 0.0007175V_v^2$$

(3.32)

$$P_0 = 1017.45 - 0.143V_v - 0.00088V_v^2$$

(3.33)

P_0 : Presión central del huracán en milibares (mb)

V_v : Velocidad máxima del viento promedio en un minuto, en km/ h ; siendo esta última magnitud, la que normalmente se reporta en los boletines meteorológicos.

Actualmente, todos los parámetros que se requieren para la modelación de la interacción oleaje con viento ciclostrofico pueden encontrarse en muchos boletines climatológicos, con excepción del radio ciclostrofico que propiamente nunca se reporta. Después de analizar el comportamiento de 26 huracanes, Silva *et al* (2002) proponen la siguiente relación:

$$R = 0.4786P_0 - 413.01$$

(3.34)

R : Radio ciclostrófico dado en kilómetros y puede tomar valores máximo y mínimo de 38 y 15 respectivamente para presiones centrales superiores a 880 milibares. Los avisos meteorológicos y la ubicación de los puntos de interés para estimar los campos de presiones, viento y oleaje se reportan, generalmente, en coordenadas geográficas. Las ecuaciones (2.16) a la (2.32) utilizan unidades métricas (kilómetros) para definir distancias. Para evitar la transformación de coordenadas, el modelo utiliza la siguiente aproximación para calcular el radio r

$$r = \{E_x a \cos[\text{sen}(\phi_i)\text{sen}(\phi_c) + \cos(\phi_i)\cos(\phi_c)\cos(\lambda_c - \lambda_i)]\} \quad (3.35)$$

λ : Longitud

ϕ : Latitud

i,j: Subíndices que indican las posiciones del punto de análisis y el centro del ciclón.

E_x : Radio de la Tierra

El radio de la tierra para cualquier latitud está dado por la siguiente expresión:

$$E_x = \frac{E_{ra}^2 E_{re}}{(E_{ra} \cos \phi)^2 + (E_{re} \text{sen} \phi)^2} \quad (3.36)$$

E_{ra} : Radio de la tierra en el ecuador (6378.135 km.)

E_{re} : Radio polar de la tierra (6356.75 km.)

3.3.5 Validación del modelo HURAC

Con base en el trabajo realizado por (Ruiz Martínez, 2009), la validación del modelo HURAC, se realizó con los datos registrados del huracán Wilma, el cual se presentó en el 2005, ésta se hizo mediante la comparación entre los datos arrojados por el modelo HURAC y los datos registrados en una boya del NDBC (National Data Buoy Center, www.ndbc.noaa.gov), los datos recopilados por la estación meteorológica de Cozumel del SMN (Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, <http://smn.cna.gob.mx/>), perfiladores de corriente y oleaje del Instituto de Ingeniería, UNAM (Silva *et al.* (2007)) y del sistema de reanálisis de vientos superficiales del HRD de la NOAA (Hurricane Research Division de la National Oceanic and Atmospheric Administration, www.nhc.noaa.gov/). En la

figura 3-3 se observa la trayectoria del huracán Wilma, indicada con una X la posición del centro que se registró a intervalos de seis horas. En las figuras 3-5, 3-6 y 3-7, se observa la comparación realizada entre los resultados obtenidos por el modelo y los datos medidos de presión, velocidad de viento y altura de ola. Se identifica que en los tres casos existe una buena correlación y que el modelo HURAC es capaz de reproducir los efectos del huracán Wilma

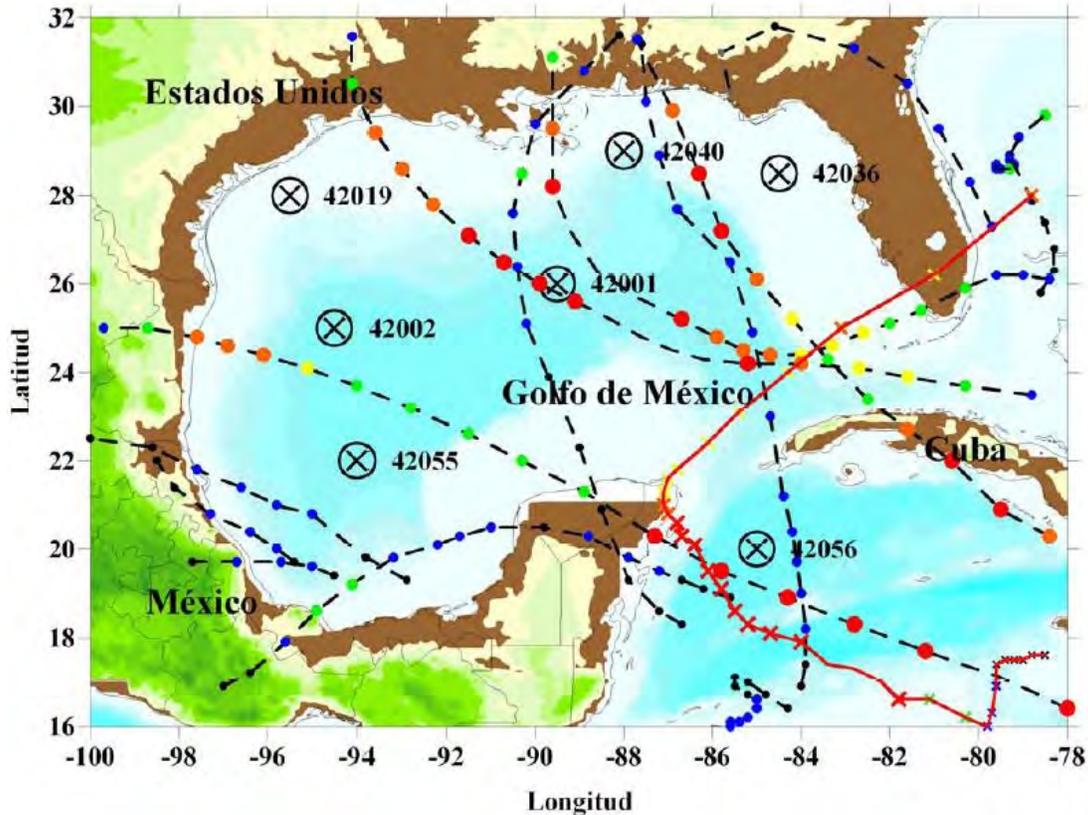


Figura 3.3 Posición geográfica de las boyas de la NOAA y trayectoria de 13 ciclones tropicales que afectaron el Golfo de México y la porción del Caribe mexicano durante 2005. Con línea continua se presenta la trayectoria del huracán Wilma

3.4 Modelo híbrido WAM-HURAC

El modelo híbrido WAM-HURAC se utilizó para modelar el clima de oleaje correspondiente al año 2005 y en la cual se tuvo la afectación de 13 huracanes (Arlene, Bret, Cindy, Dennis, Emily, Gert, José, Katrina, Rita, Stan, Tammy, Wilma y Gamma) en la vertiente atlántica mexicana (Figura 3).

3.4.1 Implementación modelo híbrido

La metodología utilizada para la implementación del modelo híbrido se describe a continuación.

- El modelo WAM se implementó en una zona que cubre en su totalidad la extensión del Golfo de México y Mar Caribe. La batimetría se obtuvo del BODC (British Oceanographic Data Center, www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/) y los campos de viento de la base de datos del NCEP/NCAR. De acuerdo con la metodología utilizada por Pérez *et al.* (2008), con estos datos de entrada el modelo se ejecutó y se obtuvieron los campos de oleaje correspondientes a todo el 2005.
- Mediante el uso de los boletines meteorológicos del NHC (*Nacional Hurricane Center* de la NOAA, <http://www.nhc.noaa.gov/>), se identificaron los ciclones tropicales que afectaron la zona de interés (malla numérica). Una vez realizado este proceso, se interpolaron los informes para tener la ubicación geográfica y presión central a cada hora y con esta información se ejecutó el modelo HURAC, limitando su aplicación a un radio de 500 km medidos desde el centro del meteoro. De tal forma que se obtuvo para todos los nodos de la malla numérica un registro discontinuo en el tiempo de los datos de viento y oleaje.
- Finalmente, los resultados obtenidos con el WAM, en las fechas correspondientes a la afectación de cada uno de los ciclones, fueron sustituidos por los datos generados por el modelo HURAC, siempre y cuando estos últimos fueran diferentes de cero. Los resultados de la metodología quedan esquematizados en la figura 7. Para el punto ubicado en la coordenada (89.5° W, 26° N) durante 2005 se presenta: en el panel A) los resultados obtenidos con el modelo WAM; en el panel B) los resultados del modelo HURAC y en el panel C) resultados obtenidos de la combinación de ambos modelos (modelo híbrido). Cabe señalar que la ubicación de este punto coincide con la localización de la boya 42001 del NDBC.

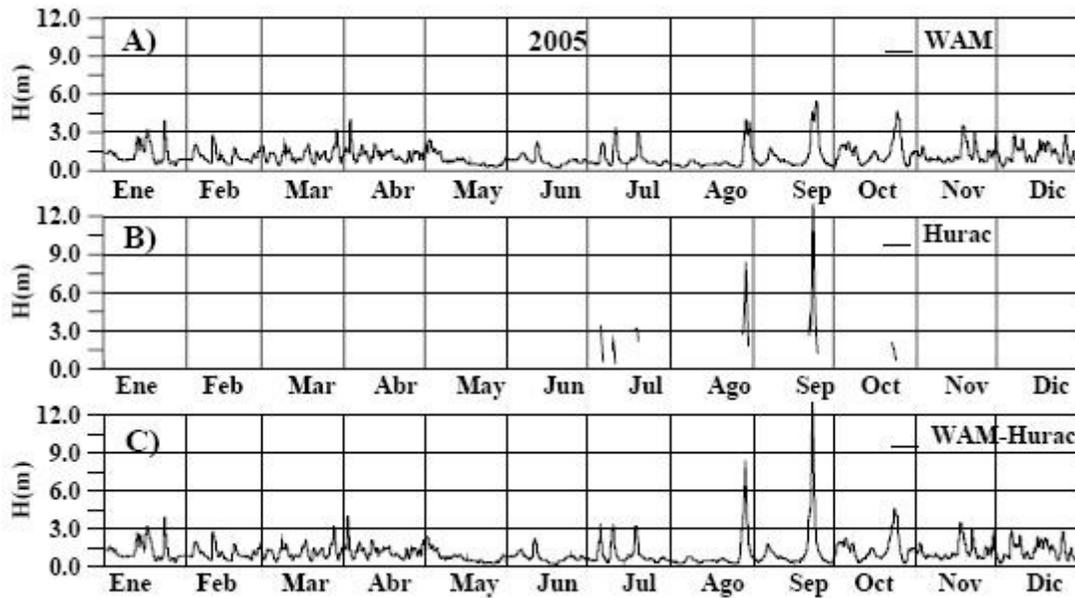


Figura 3.4 Esquematzación de la metodología empleada para el punto ubicado en la coordenada (89.5° W, 26° N). Valores de la altura de ola obtenida con: A) con el modelo WAM, B) resultados del modelo HURAC y, C) resultados con el modelo híbrido WAM-HURAC.

3.4.2 Validación modelo híbrido

Para realizar la validación de los resultados obtenidos por el modelo híbrido WAM-HURAC, se realizó la elección de 7 boyas oceanográficas del NDBC con base en la trayectoria de los huracanes elegidos y la localización de las mismas. En la figura 2-1, se observa la posición de las boyas, así como la trayectoria de los eventos.

En primer lugar se muestra la comparación entre los datos de distintas fuentes y los resultados del modelo híbrido durante el paso del huracán Wilma. De esta manera, en la Figura 2.3 se presenta la validación para los valores de presión atmosférica estimados, al compararlos con los registrados por la boya 42056 de la NOAA y la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional en Cozumel. La precisión en la aproximación es evidente, aunque es de notar que el modelo se aleja un poco de los datos medidos una vez que se ha superado el pico de la tormenta y durante el proceso de decaimiento (Rivillas, 2008).

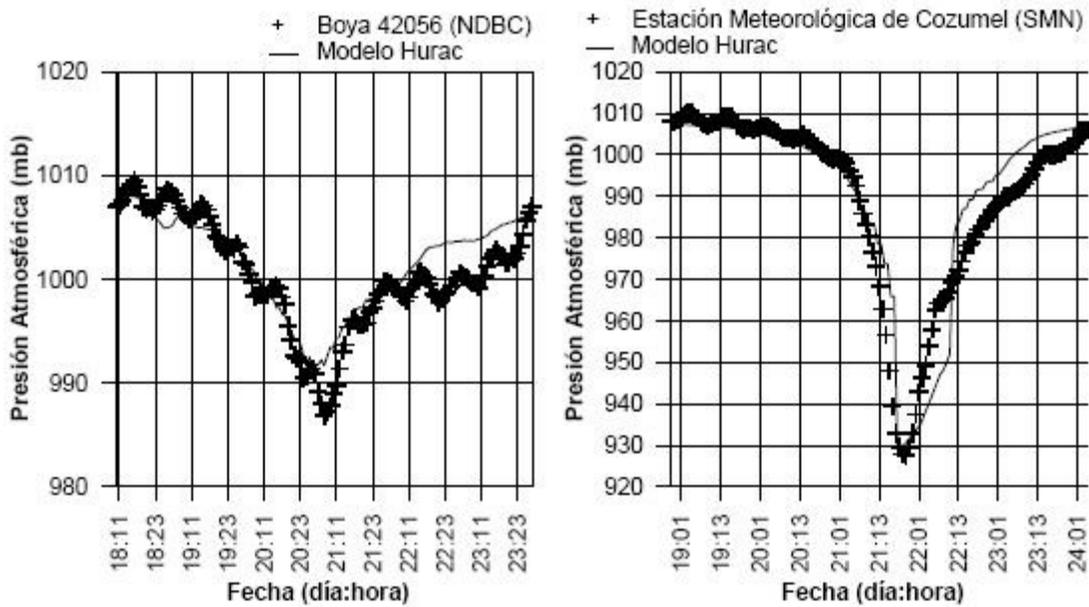


Figura 3.5 Comparación entre las presiones atmosféricas calculadas con el modelo HURAC versus registros de la boya 42056 del NDBC y del SMN en la Isla de Cozumel durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).

Para el campo de viento, en la Figura 2.4 se presenta la comparación entre los datos obtenidos frente a Puerto Morelos, Quintana Roo y las estimaciones del modelo híbrido.

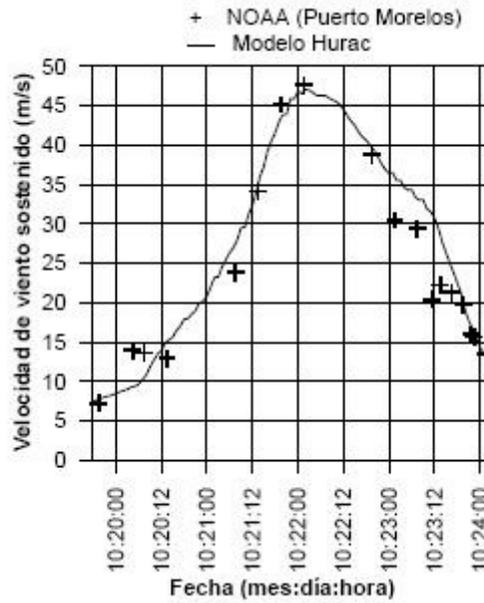


Figura 3.6 Comparación de los vientos calculados con el modelo HURAC y los datos estimados por el proyecto HRD durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005)

Para las alturas de ola también se realizó la validación con un equipo que reportó datos *in situ* durante el paso del huracán Wilma. Así, la Figura 2.6 presenta los valores que se obtuvieron con el modelo híbrido y los datos registrados, por la boya 42056 de la NOAA y por el equipo acústico AWACS, propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ambas aproximaciones son buenas excepto para el lapso de tiempo en que el equipo AWACS tuvo un asentamiento en el momento del paso de dicho huracán.

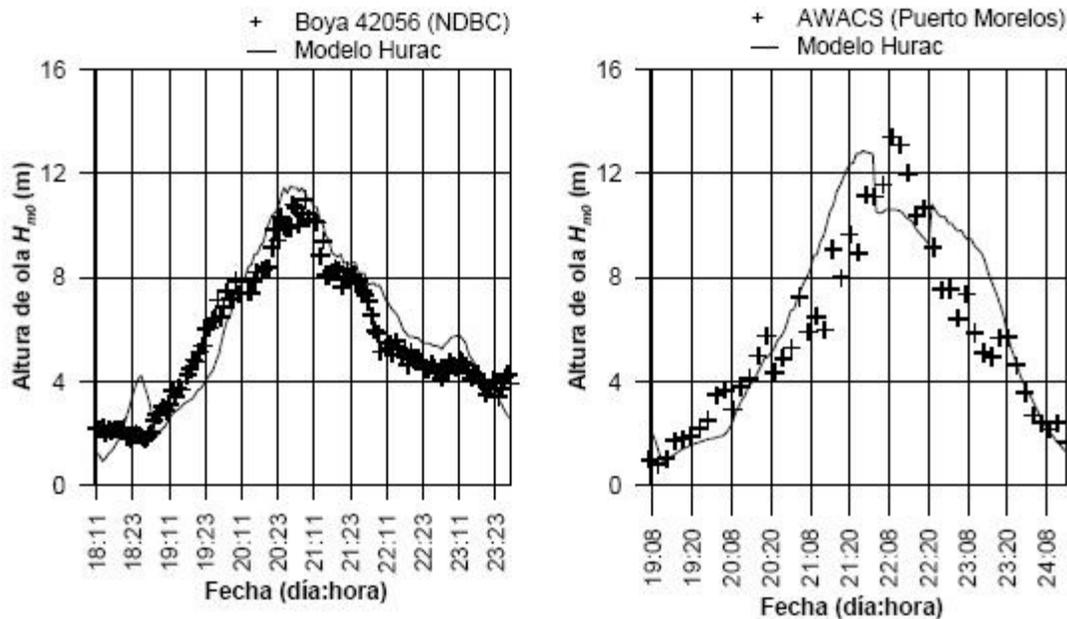


Figura 3.7 Comparación de las presiones atmosféricas calculadas con el modelo HURAC versus registros de la boya 42056 del NDBC y los valores medidos en Puerto Morelos, Quintana Roo (reportados por Silva *et al.* (2007)) durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).

Para fortalecer la validación del modelo, en las figuras 3-8, 3-9 y 3-10, se muestran, en los incisos A), B), C) y D), las rosas de oleaje y viento de los datos medidos por las boyas 42001, 42002 y 42019 respectivamente, marcadas en la figura 3-3, en contraste con los datos calculados del modelo híbrido. Las gráficas correspondientes a los incisos E) y F) representan la evolución de las alturas significantes del oleaje y el comportamiento del viento, de los datos estimados por el modelo híbrido y los valores registrados por las boyas, durante los distintos meses del año 2005. Los incisos G) y H) presentan la comparación de las distribuciones de probabilidad de la altura del oleaje y la velocidad de viento calculadas versus las magnitudes medidas por las boyas.

Partiendo de estas comparaciones, el ajuste entre los datos medidos y los valores calculados, para las direcciones del oleaje y viento ocurridas en el año 2005, es muy bueno, teniendo en cuenta que los datos fuente son una combinación de un re-análisis de vientos medios y los obtenidos a través de un modelo paramétrico muy simple de implementarse. En la verificación de la información de la boya y del modelo híbrido, se detectan algunas interrupciones en los datos que proporcionan las boyas. Es posible que esta pérdida de información se deba a fallas técnicas propias de los instrumentos de medición; aunque en determinados casos, las fechas en que se presentó la suspensión de información, coinciden con los días en los cuales alguna tormenta o huracán pasó cerca de la boya.

En resumen, parte de las diferencias entre los datos obtenidos a través del modelo numérico y los registrados por las boyas se deben principalmente a la calidad de los vientos utilizados para forzar el modelo WAM, la precisión de los modelos WAM y HURAC, así como a la falta de información en los registros de las boyas.

Cabe señalar que como ha sido verificado por otros autores, entre ellos Pérez *et al.* (2008), los resultados obtenidos a través del modelo WAM son muy sensibles a la calidad y resolución, tanto espacial como temporal, de los vientos que se utilizan para forzar el modelo. A pesar de ello y en virtud que para realizar un re-análisis de oleaje de más de 25 años en este caso específico de 62 años, son muy pocas las fuentes disponibles, y más aún las de libre acceso, el modelo híbrido resulta ser práctico y muy confiable.

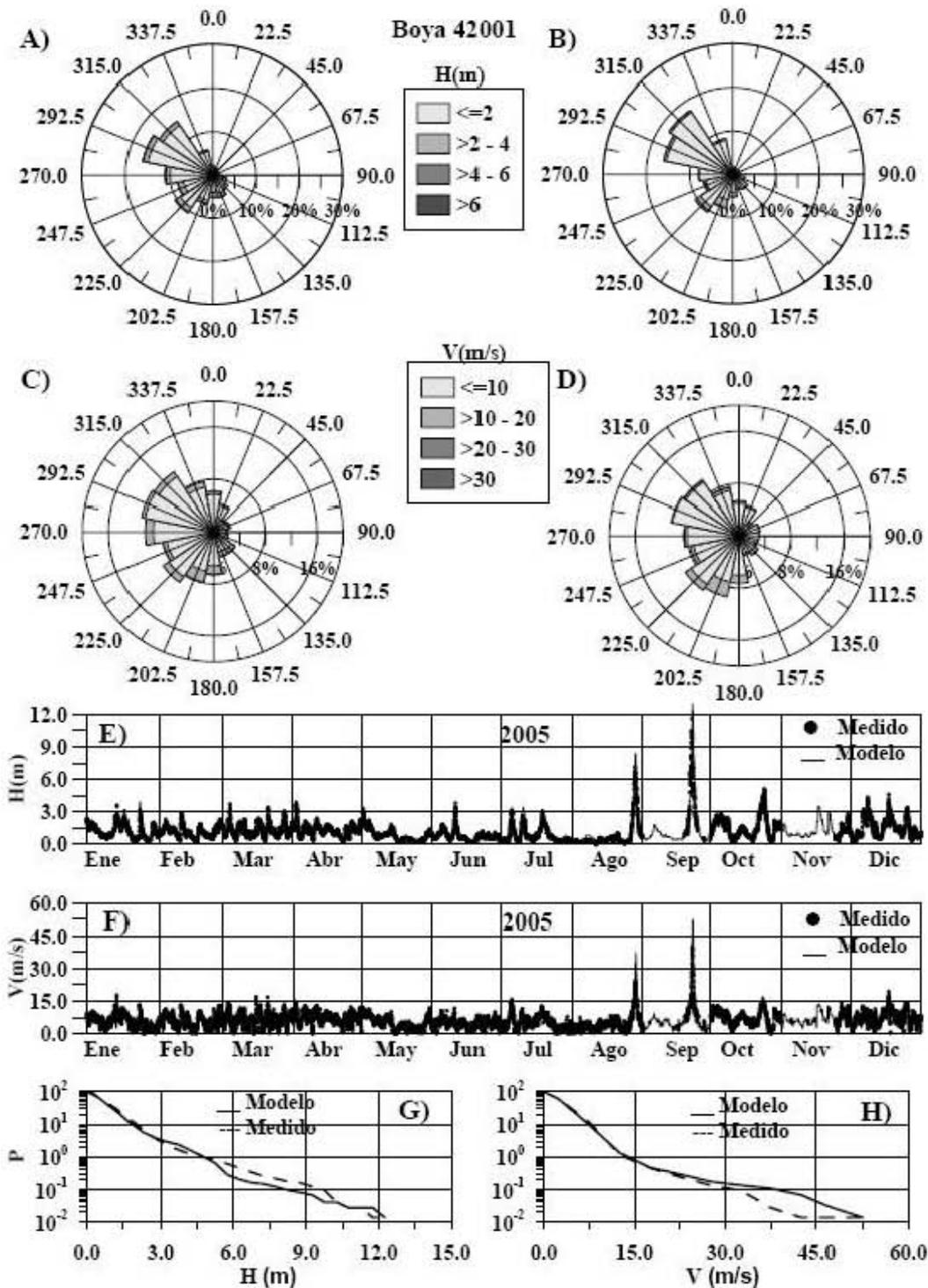


Figura 3.8 Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42001, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42001, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.

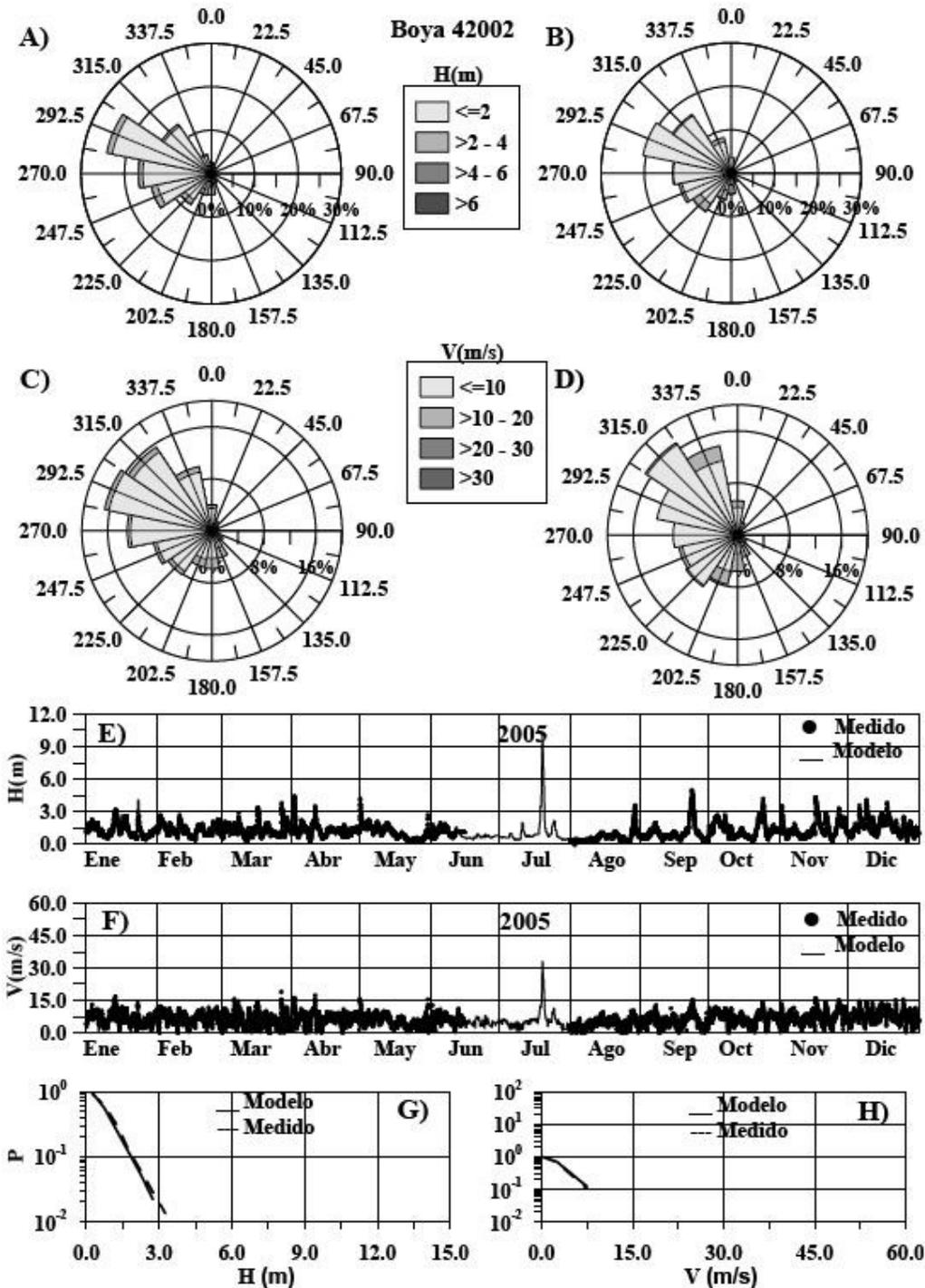


Figura 3.9 Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42002, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42002, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.

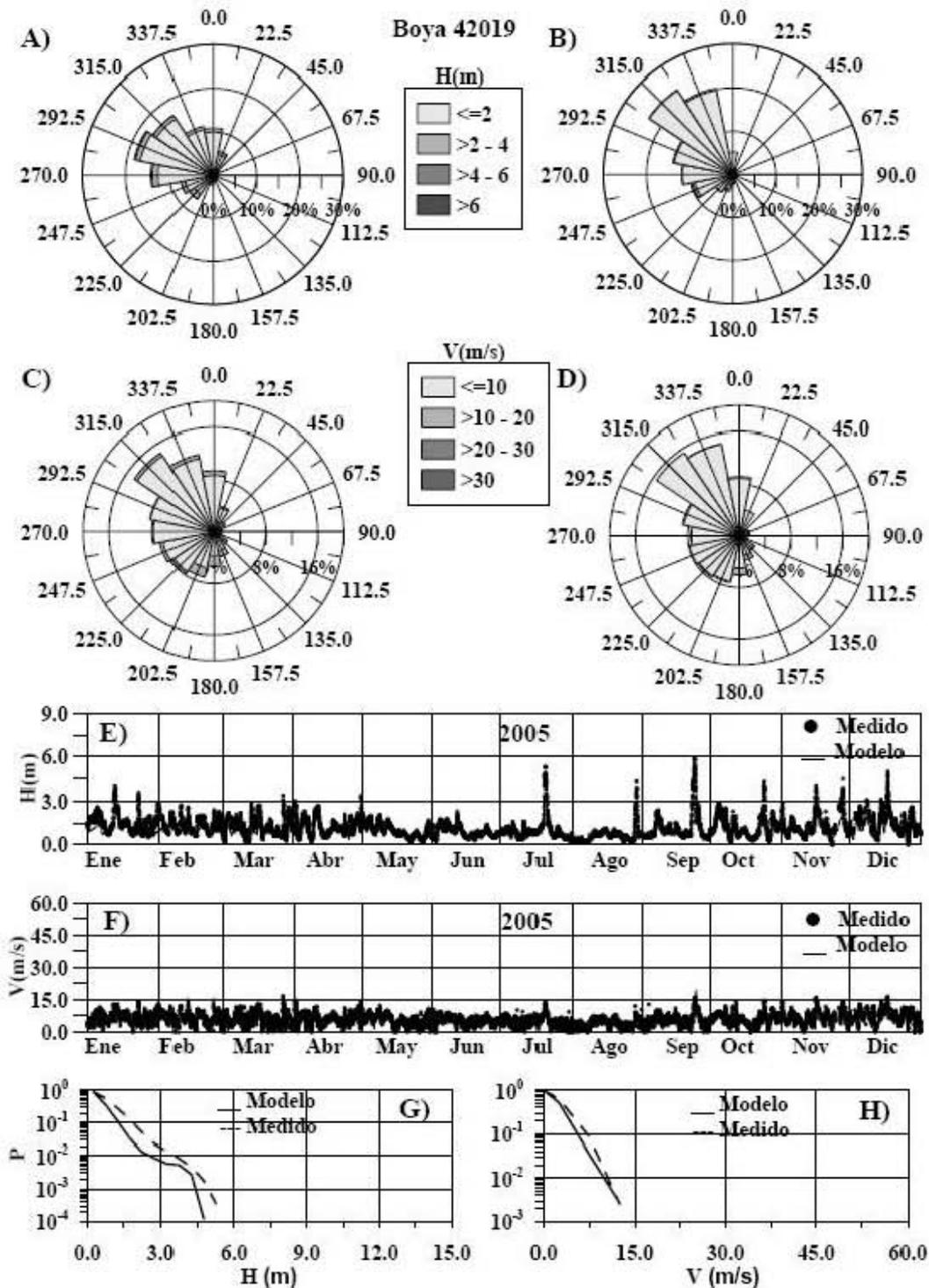


Figura 3.10 Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42019, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42019, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal de los valores de la velocidad de viento medido y el obtenido con el modelo híbrido; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.

3.5 Modelo de propagación de oleaje (SWAN)

El SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), es un modelo espectral de tercera generación que realiza la propagación de los estados del oleaje desde aguas profundas, hasta zonas costeras, es decir propaga las olas en aguas intermedias y someras; describe de una manera muy satisfactoria el comportamiento en configuraciones litorales complejas; fue creado por el grupo de Mecánica de Fluidos y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Civil y Ciencias de la Tierra de la Universidad Tecnológica de Delft en Holanda.

El SWAN realiza las estimaciones de los parámetros de oleaje, teniendo en cuenta el viento, la profundidad y las condiciones de las corrientes marinas. Este modelo se basa en la ecuación de balance de acción (Ecuación 3-1) y fue diseñado especialmente para calcular los espectros de oleaje, generados por viento en mallas rectangulares o curvilíneas. Debido a la presencia de corrientes, el SWAN utiliza la función de densidad espectral de acción, en lugar de la función de densidad espectral de energía. La ecuación de balance espectral de acción, reúne todos los procesos físicos que representan la acción del viento, la fricción con el fondo, la rompiente inducida por el fondo y la interacción entre el oleaje y la costa, además de la interacción entre el oleaje y aguas continentales.

3.5.1 Ecuación de balance de acción

La ecuación empleada por el SWAN, es la de balance de acción, que, en su forma general se describe como:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma} \quad (3.37)$$

En su forma simplificada, la ecuación de balance de energía se representa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} y_x N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (3.38)$$

donde

	$\frac{\partial}{\partial t} N$	Cambio en el tiempo
	$\frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} y_x N$	Cambio en el espacio
corrientes	$\frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N$	Cambio de frecuencia relativa por y variaciones de la profundidad
	$\frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N$	Refracción por fondo y/o corrientes
	$\frac{S}{\sigma}$	Términos fuentes en densidad de energía

Donde N es la densidad de acción equivalente a la densidad de energía sobre la frecuencia relativa, t es el tiempo, x y y son coordenadas geográficas, σ es frecuencia relativa y θ es dirección. El término S, como en la formulación del WAM, representa la generación y disipación de energía. (Booij *et al.*, 1999)

Los procesos de propagación que representa el SWAN son:

- Propagación lineal en el espacio
- Transformaciones de olas por cambios en profundidad o corrientes (someramiento y refracción)
- Bloqueo o reflexión de olas por corrientes
- Transmisión, bloqueo o reflexión por obstáculos

Los procesos de generación y disipación de oleaje que considera el SWAN son:

- Generación por viento
- Disipación por rotura por celeridad (*Whitecapping*)
- Disipación por rotura por fondo
- Disipación por fricción en el fondo

- Interacción entre olas (Triadas / Cuadruquetas)
- Set-up

(Bolaños, 2007)

3.5.2 Generación por viento

La velocidad del viento que toma el SWAN, es la velocidad tomada a 10 m de elevación U_{10} , sin embargo, en el cálculo realizado por el modelo, éste término se convierte en la velocidad de fricción con U_* como:

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (3.39)$$

en donde C_D es el coeficiente de arrastre del viento, el cual, según Wu (1982), es determinado por la expresión por la siguiente expresión:

$$C_D = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{para } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3} & \text{para } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3.40)$$

La generación de oleaje por viento se realiza a través de un mecanismo de resonancia y retroalimentación, es la suma de crecimiento lineal y exponencial:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = \alpha + \beta E(\sigma, \theta) \quad (3.41)$$

donde α es el crecimiento lineal y β es el crecimiento exponencial; y dependen de la frecuencia y dirección.

El término α es de *Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981)*. El término β puede ser el de *Komen et al. (1984)* cuya expresión es función de U^*/C_{ph} , donde U^* es la velocidad de fricción del viento y C_{ph} es la celeridad de fase.

3.5.3 Disipación

En el SWAN la disipación está representada por la interacción entre la rotura del oleaje $S_{wc}(\sigma, \theta)$, la fricción de fondo $S_{bfr}(\sigma, \theta)$, la rotura por fondo $S_{surf}(\sigma, \theta)$, la reflexión, además de la transmisión y absorción de energía debido a la línea de

estructuras, cuando se presentan.

3.5.4 Rotura del oleaje

La rotura del oleaje está representada por la siguiente ecuación:

$$S_{wc}(\sigma, \theta) = -\mu k E(\sigma, \theta) \tag{3.42}$$

donde

$$\mu = C_{wc} \left((1-n) + n \frac{k}{\tilde{k}} \right) \left(\frac{\tilde{S}}{\tilde{S}_{PM}} \right)^p \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{k}} \tag{3.43}$$

donde el peralte de la ola (*steepness*) \tilde{s} , se define como $\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{m_0}$ y \tilde{S}_{PM} , es el valor de \tilde{s} , para el espectro de Pierson-Moskowitz (1964), $\tilde{S}_{PM} = \sqrt{3.02} \times 10^{-3}$.

Los valores de C_{wc} , n y p , son como los del WAM, pero la manera en que se hace la frecuencia de corte del análisis espectral es distinta. Este es el factor primordial para que el crecimiento del espectro entre el SWAN y el WAM sean diferentes.

3.5.5 Fricción en el fondo

La fricción en el fondo, es el mecanismo dominante, para la disipación del oleaje, está dada por:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \left(\sigma^2 / g^2 \sinh^2(kd) \right) E(\sigma, \theta) \tag{3.44}$$

donde

C_{bottom} es el Coeficiente de fricción en el fondo, para el cual se tienen tres opciones, que son el JONSWAP, Collins o Madsen.

3.5.6 Rotura por fondo

La rotura por fondo, emplea el modelo de *Battjes y Janssen (1978)*, y está representado por:

$$D_{tot} = (1/4) \alpha_{BJ} Q_b (\sigma / 2\pi) | H_m^2 \quad (3.45)$$

donde $\alpha_{BJ} = 1$ en el SWAN y Q_b son la fracción de olas rompiendo, la cual determinada por:

$$(1 - Q_b) / (\ln Q_b) = -8(E_{tot} / H_m^2) \quad (3.46)$$

donde H_m es la altura máxima de ola que puede presentarse a determinada profundidad y σ es la media frecuencia

3.5.7 Reflexión, transmisión y absorción

Para dar cabida a las interacciones con una determinada línea de estructuras, tales como rompeolas, estructuras de protección costera, etc., el SWAN puede reflejar la energía del oleaje y transmitir la energía del mismo por o sobre estas estructuras. La diferencia entre la energía incidente, por una parte y la suma de la energía reflejada y transmitida por otra, es absorbida por la estructura. Esta opción también puede ser utilizada para simular el efecto de la absorción de las islas, trabajando como mallas independientes. La reflexión es modelada como reflexión especular y se asume que las frecuencias de onda mantendrán sin variación durante la transmisión.

3.5.8 Interacciones no lineales de oleaje

El SWAN, a diferencia del WAM, toma en cuenta las interacciones no lineales *Cuádruples y Triadas*

3.5.8.1 Cuádruples

En aguas profundas, las condiciones de resonancia (velocidad de onda, longitud y dirección) no se ven afectadas individualmente por los componentes del oleaje

libremente propagado, esto genera la interacción directa entre los componentes de la una ola con otra (ver figura 3-11), la razón es que, en aguas profundas, las componentes del mismo oleaje, pueden cumplir las condiciones de resonancia y por lo tanto pueden resonar. Esta equiparación de las frecuencias y números de onda se expresa con las siguientes condiciones de resonancia:

$$\begin{aligned} f_1 + f_2 &= f_3 + f_4 \\ \vec{k}_1 + \vec{k}_2 &= \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Estas condiciones de resonancia afirman que, si la frecuencia, número de onda y la dirección de un modelo de diamantes coinciden con los de otro modelo de diamantes, entonces, se transfiere energía entre los cuatro componentes libres que participan. Esta serie de cuatro componentes del oleaje es llamada *cuádruples* y las interacciones entre ellos son denominados interacciones cuádruples onda-onda o en inglés *quadruplet wave-wave interactions*. Las expresiones completas para estas interacciones han sido dadas por Hasselman (1962), como:

$$\begin{aligned} S_{nl4}(\vec{k}_4) &= \iiint T_1(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4) E(\vec{k}_1) E(\vec{k}_2) E(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2 \\ &\quad - E(\vec{k}_4) \iiint T_2(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_4) E(\vec{k}_1) E(\vec{k}_2) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2 \end{aligned} \tag{3.48}$$

donde \vec{k}_4 es el vector número de onda de la componente considerada término fuente, \vec{k}_1, \vec{k}_2 y $\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_4$ son los otros tres componentes de onda que participan, sujetos a las condiciones de resonancia, T_1 y T_2 , son los coeficientes de transferencia, que son funciones de los vectores del número de onda. La primera integral representa la parte pasiva de las interacciones, es decir, es independiente de la densidad de energía $E(\vec{k}_4)$. La segunda integral corresponde a la parte activa de la interacción, es decir que depende directamente de la densidad de energía.

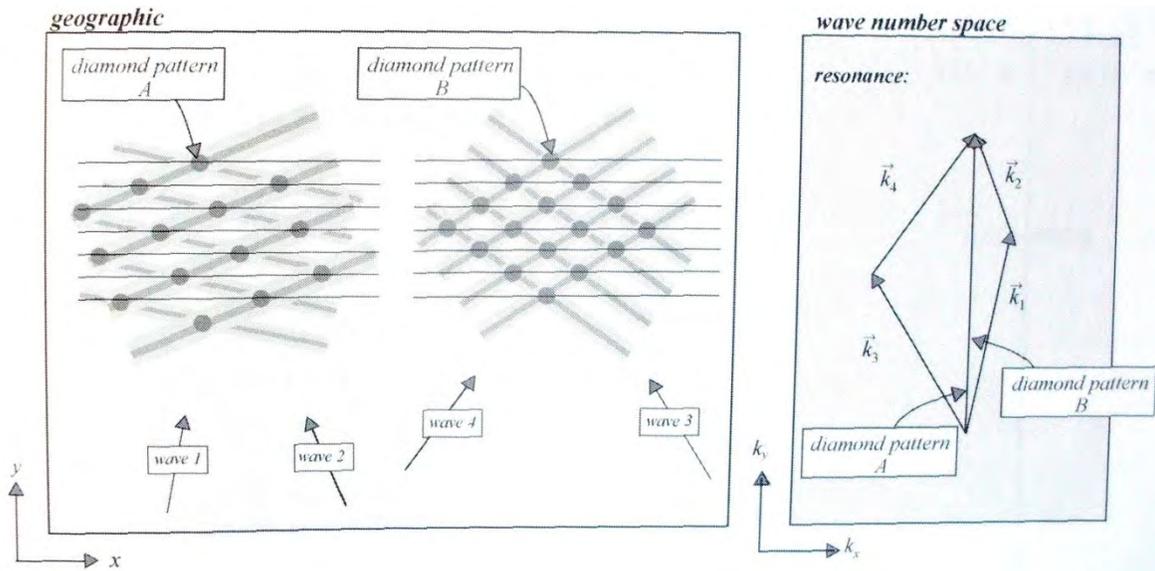


Figura 3.11 Interacciones cuádruples onda-onda

3.5.8.2 Triadas

Uno de los mecanismos que afecta el crecimiento de las olas en aguas intermedias y someras, es la transferencia de energía entre ellas, debido a un mecanismo de resonancia. Para visualizar estas interacciones no lineales, considere un tanque con profundidad de agua constante. Una máquina genera ondas armónicas en una esquina del tanque. Otra máquina genera ondas en otra esquina, con una frecuencia diferente y en una dirección diferente. Las ondas resultantes tienen una longitud de onda, velocidad y dirección propias. La interacción entre las dos ondas generadas y la onda resultante generan un modelo tipo diamante, entre crestas y valles, este fenómeno se conoce como interacción en triadas, (ver figura 3-12). El concepto fundamental de este fenómeno, radica en que la suma de todos los componentes de energía en cualquier punto del tanque debe permanecer constante.

Las aproximaciones de las triadas, según Eldeberky (1996), se aplica a todas las componentes de la ola en cada una de las direcciones de onda espectrales por separado, empleando las expresiones mostradas en la ecuación 3-11, en términos de σ , y la siguiente

$$C_{nl3} = \alpha_{EB} 2\pi J^2 \tag{3.49}$$

en donde α_{EB} es un coeficiente ajustable, por defecto el SWAN lo toma como $\alpha_{EB} = 0.1$ y β , es aproximado mediante la expresión

$$\bar{\beta}_{f_{peak}} = -90^\circ + 90^\circ \tanh(\delta / N_{Ursell}) \quad (3.50)$$

donde

$$N_{Ursell}^{***} = gH_{m_0} \bar{T}^2 / 8\sqrt{2}\pi^2 d^2$$

$\bar{T} = m_0 / m_1$: m_0 y m_1 son los momentos cero y uno de la densidad de varianza del espectro $E(f)$

$$\delta = 0.2$$

La interacción de las triadas es calculada para $N_{Ursell}^{***} > 0.1$. El coeficiente de interacción J se toma de Madsen y Sorensen (1993):

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 (gd + 2c_{\sigma/2}^2)}{k_{\sigma} d \left(gd + \frac{2}{15} gd^3 k_{\sigma}^2 - \frac{2}{5} \sigma^2 d^2 \right)} \quad (3.51)$$

donde los subíndices σ y $\sigma/2$ del número de onda k y la velocidad de fase c , se refieren al número de onda y la velocidad de fase en las frecuencias $\sigma/2$ y σ respectivamente.

La integración de la ecuación de balance de acción es implementada por diferencias finitas en 5 dimensiones (tiempo, espacio y espacio espectral). A diferencia del WAM, un paso de tiempo constante es utilizado para la propagación y los términos fuentes.

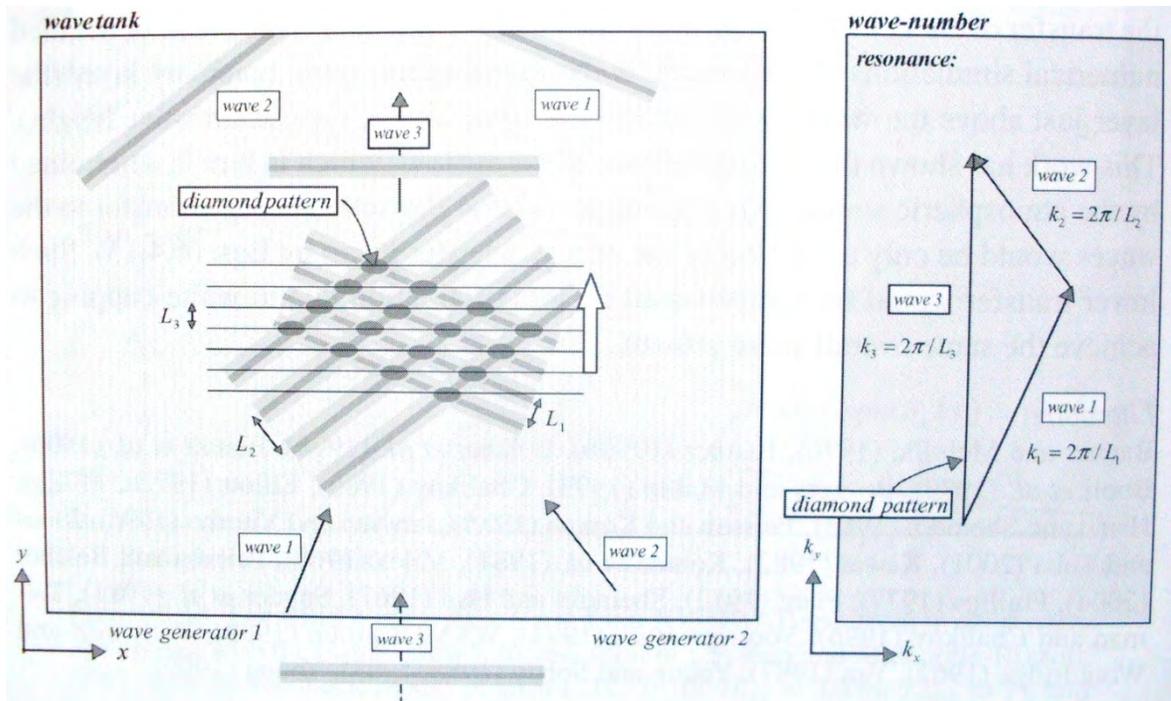


Figura 3.12 Interacciones triadas onda-onda

3.5.9 Propagación de oleaje

La energía del oleaje, por definición, siempre es propagada por la parte inferior de la onda, incluso en la presencia de un ambiente poco agitado, de modo que el estado de un punto dentro de la malla de cálculo en el SWAN, es determinado por el estado y la posición geográfica de la parte superior de la ola, dentro de la malla, lo mismo ocurre en el espacio espectral. El esquema de propagación numérica del modelo, incluye de manera implícita la acción del viento. El término implícito es utilizado para indicar que en cada esquema numérico, todas las derivadas de la acción de la densidad, (tiempo, coordenadas horizontales y verticales) son formuladas en un mismo nivel computacional i_t, i_x, i_y , exceptuando la integración de dimensión. Los esquemas implícitos son muy estables y los valores de la discretización en el espacio y tiempo pueden ser seleccionados independientemente, permitiendo relativamente grandes pasos de tiempo en los cálculos.

3.5.10 Corte en las altas frecuencias

El corte en las altas frecuencias para condiciones de campo es de 1 Hz. en el SWAN, arriba de esta frecuencia es agregada una cola f^m (m entre 4 y 5); 4 si la formulación del aporte del viento de *Komen et al. (1984)* es usada ó 5 si el aporte por el viento es formulado por *Janssen (1991)* para calcular interacciones no lineales a altas frecuencias y parámetros de oleaje. La razón por la que se usa este corte fijo en vez de uno dinámico dependiente del viento como en WAM, es que en regiones costeras existe una mezcla de diferentes condiciones (*swell* con viento local) en las cuales un corte dinámico sería poco apropiado (*Ris, 1997*). (Bolaños, 2007)

3.5.11 Validación y mejoras del modelo

El SWAN fue validado en modo estacionario por *Ris et al. (1999)* en zonas con características batimétricas complejas y en presencia de corrientes mostrando errores (RMS) en los cálculos cuando la altura significativa tomaba un valor de 0.3 m y para un periodo de 0.7 s. Aparte de esto, se observó que la forma del espectro no fue reproducida satisfactoriamente. Se concluyó que parte de los errores son sistemáticos por una parte por subestimación del periodo por 8% y por otra por sobrestimación de H_s por 5% , errores que son atribuidos a las formulaciones de los procesos físicos.

Hashimoto et al. (2002) perfeccionaron el método para resolver las interacciones no lineales en el modelo SWAN, obtuvo mejoras en los cálculos de la altura significativa, la frecuencia pico y la forma del espectro. Una segunda validación del modelo fue realizada por *Kaiser et al. (2000)*; el SWAN fue empleado durante un evento intenso en el área de Norderney Seegat (Alemania), utilizando mallas con tamaño de celdas de 80 x 90 m, los resultados mostraron buena concordancia con mediciones tomadas en campo. Una vez validado, utilizaron el modelo exitosamente para evaluar H_s en el diseño de estructuras de protección costera.

Booij et al. (2001) utilizan el SWAN para modelar oleaje a partir de escalas oceánicas hasta llegar a escalas del orden de metros. Esto demuestra que el SWAN puede ser anidado con saltos de 3 órdenes de magnitud entre mallas y obtener resultados aceptables. Tomando como base lo anterior se realizó la elección de éste modelo, para llevar a cabo la anidación entre el WAM y el SWAN, reproduciendo así las condiciones de oleaje de los últimos 62 años en las costas mexicanas. Los resultados de estas modelaciones, serán expuestas en los capítulos siguientes.

En conclusión, se pueden notar algunas diferencias entre los modelos WAM y SWAN, la principal de ellas es la capacidad que tiene el SWAN en cuanto a la interacción de las triadas, siendo éste un factor determinante para la predicción de

oleaje cercano a la costa, mientras que el WAM, fue concebido para simular la generación y propagación de oleaje en aguas profundas, considerando las interacciones cuadruplet. La segunda son las técnicas numéricas utilizadas y la tercera hace referencia a la cola espectral. Además existen diferentes formulaciones implementadas en uno u otro modelo ya sea para el aporte de viento, la disipación de energía o la transmisión/bloqueo de energía por obstáculos.

4 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

El objetivo fundamental del presente capítulo es presentar en forma detallada los conceptos utilizados para realizar el análisis y caracterización del oleaje en la zona de estudio, sustentado en el análisis estadístico realizado para el registro de oleaje obtenido mediante la aplicación de los modelos descritos en el capítulo anterior.

4.1 Régimen medio

Evalúa diversos umbrales de los estados de oleaje, con la probabilidad de que dichos niveles no sean superados en un año promedio. El grupo de estados de mar que ocurren con mayor frecuencia se denominan como régimen medio de oleaje. El objetivo de este análisis es representar las condiciones más frecuentes, debido a que su resultado es vital para estudios de dinámica litoral, explotación de puertos y planificación de obras. En referencia a la planificación de obras es necesario conocer la vida útil de una estructura. Además, para la construcción de cualquier obra marítima se escogerá la época del año en la que las condiciones de agitación sean más favorables. El estudio estadístico del análisis a mediano plazo se efectúa a través de regímenes de oleaje, rosas de oleaje y las relaciones entre alturas de ola y periodos.

4.1.1 Régimen de oleaje

El objetivo del régimen de oleaje es realizar un estudio de probabilidad en donde un determinado valor de altura de ola no sea superado, en un periodo de tiempo establecido. Para ello se utiliza una función de distribución estadística que, para este caso, determine el tiempo que en un año medio de altura de ola no se exceda un valor dado.

Después de la determinación del conjunto de datos de altura de ola y probabilidad de no excedencia, se deben determinar los parámetros de la función.

4.1.2 Técnicas de estimación de parámetros

Existen diversas formas teóricas para idealizar al oleaje, las cuales se agrupan en modelos deterministas, paramétricos y estocásticos. Un modelo determinista es aquel que se obtiene por medio de relaciones físicas y no requiere datos experimentales para su desarrollo. El modelo paramétrico al arrojar la misma salida a partir de la información suministrada, puede establecerse como un modelo determinista en la estimación de sus parámetros. El modelo estocástico puede brindar resultados en un sentido estadístico. Esto significa que el dato de salida no es el mismo dato de entrada pero conserva las mismas características estadísticas.

El método de los momentos consiste en plantear un sistema de ecuaciones, cuyo tamaño depende del número de parámetros a estimar, es un procedimiento sencillo para encontrar un estimador de uno o más parámetros poblacionales. Los momentos poblacionales pueden obtenerse con respecto a la media o con respecto al origen. A continuación se enlistan las expresiones con las cuales se obtienen los momentos muestrales.

Media

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Varianza sesgada

$$S_{sesg}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.2)$$

Varianza insesgada

$$S_{insesg}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.3)$$

Coefficiente de asimetría sesgado

$$g_{sesg} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(S_{sesg}^2)^{3/2}} \quad (4.4)$$

Coefficiente de asimetría insesgado

$$g_{insesg} = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)} g_{sesg} \quad (4.5)$$

Desviación estándar

$$S = \sqrt{S^2} \quad (4.6)$$

Coefficiente de variación

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} \tag{4.7}$$

Para obtener el estimador por momentos del parámetro β se emplea la función:

$$f(x) = \beta e^{-\beta x} \tag{4.8}$$

Al igualar el primer momento poblacional con el momento de la muestra

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \tag{4.9}$$

El método de los mínimos cuadrados obtiene el conjunto de parámetros al minimizar la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los valores observados y calculados.

$$S = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_0(i) - y_c(i)]^2 \tag{4.10}$$

Donde $y_0(i)$ y $y_c(i)$ son los valores observados y calculados de “y”.

Se plantea un sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} na_0 + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_2 + \dots + a_m \sum x_m &= \sum y_0 \\ na_0 + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_2 + \dots + a_m \sum x_m &= \sum y_0 \\ a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + \dots + a_m \sum x_1 x_m &= \sum x_1 y_0 \\ a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + \dots + a_m \sum x_2 x_m &= \sum x_2 y_0 \\ a_0 \sum x_m + a_1 \sum x_1 x_m + \dots + a_m \sum x_m^2 &= \sum x_m y_0 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Al resolverlo, se tienen los estimadores

4.1.3 Representación gráfica

A continuación son descritas las herramientas visuales que han sido seleccionadas para resumir los resultados del análisis de régimen medio de clima marítimo.

4.1.3.1 Rosas

Una forma convencional de presentar la información de los registros históricos es en gráficos con un eje vertical y una escala concéntrica que permite representar la intensidad y frecuencia de aparición de parámetros como la altura de ola o la velocidad del viento considerando su dirección asociado. En una rosa el ancho de las clases indica la magnitud del fenómeno, mientras que su longitud indica la frecuencia con que aparece. El procedimiento para la construcción de rosas consiste en clasificar los valores de acuerdo con su dirección y evaluar la frecuencia de cada clase. Finalmente se dibujan los “gajos” respectivos indicando en la escala concéntrica la intensidad.

4.1.3.2 Histogramas

Un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos. Para la caracterización energética se determinó la energía asociada a cada suceso y se desarrolló la clasificación de la misma manera que para la altura de ola; los resultados se presentan en un histograma de altura de ola, energía y duración contra número de ocurrencias.

4.1.4 Análisis de tormentas

El análisis de tormentas es análogo al estudio de inundaciones que, en hidrología, es conocido como caracterización de las intensidades-duración-periodo de retorno de las avenidas y resulta muy útil para el análisis de escenarios cuando los modos de fallo son de tipo dúctil o relativos a estados límite de servicio, en otras palabras, cuando el daño es debido a la persistencia del fenómeno. La caracterización de las tormentas se realiza de forma semejante al análisis de cruces por cero (Silva, 2005) y en éste lo que se evalúa es la energía acumulada para cada una de las tormentas que superan un umbral determinado.

Para definir y separar las tormentas se aplicaron los siguientes criterios:

- Un umbral mínimo de alturas de ola significativa de 2 metros de altura, que equivale a 1.5 veces la altura significativa cuadrática media en la celda de Cancún.
- Si las alturas de ola significativa que exceden el umbral permanecen durante un periodo continuo igual 12 horas, de acuerdo a la definición de tormenta presentada, se considera como la misma tormenta.
- Para el análisis se excluyeron los eventos con alturas de ola menores a 2 metros de altura.
- La energía total de cada tormenta se normalizó (ver apartado 1.3.3.1) con una tormenta equivalente a 2 metros de altura de ola sostenida por un intervalo igual a 24 horas.

Los eventos se seleccionan haciendo algún tipo de clasificación. En el caso del presente trabajo se estableció un umbral de altura de ola y se tomaron todos los valores que estuvieran por encima de éste. El valor del umbral está definido para una altura de ola de 2m, el cual fue determinado a partir de la altura de ola media cuadrática H_{rms} .

$$\bar{H}_s = \frac{\sum_{i=1}^N H_i^2}{N} \quad (4.12)$$

$$\bar{H}_s = \sqrt{2} H_{rms} \quad (4.13)$$

$$\bar{H}_U = H_{rms} + 0.5 H_{rms} \quad (4.14)$$

\bar{H}_s (m): Altura significativa media

H_i (m): Altura de ola del registro

H_{rms} (m): Altura de ola media cuadrática

H_U (m): Altura de ola umbral

(Rivillas, 2008)

Estos criterios se toman como hipótesis fundamentales para efectuar los análisis de tormentas que incluye: el análisis 1948 - 2009; el número medio mensual de energía normalizada; la duración media y máxima histórica de tormentas; los valores máximos históricos; el número medio y máximo anual de tormentas; la

duración media y máxima histórica de energía normalizada; el número medio y máximo anual de tormentas con energía normalizada.

4.1.4.1 Análisis energético

Debido a la presencia del oleaje en la superficie, las partículas de agua están en un constante movimiento. Este movimiento requiere que se realice un trabajo representando con esto la energía potencial, donde se deben vencer las fuerzas gravitacionales. Aparte de esto, el movimiento de las partículas de agua representa la energía cinética. El estudio de la energía del oleaje es muy importante debido a los diversos fenómenos que incluyen procesos como la generación de energía por viento o los cambios a los que se ve sometido el oleaje cuando se propaga de aguas profundas hacia aguas someras. Para realizar este análisis se utiliza el mismo criterio empleado para las alturas de ola en cuanto a la selección de los datos, es decir, se debe establecer un umbral. El valor de este umbral fue calculado a partir de la energía normalizada. Esta se determina, deduciendo inicialmente la energía específica para cada valor de altura de ola. Luego se estima el valor de la energía correspondiente al valor de 2m de altura de ola en 24 horas, hallada para el umbral de altura de ola. Finalmente se dividen ambos datos calculados para obtener la energía normalizada.

$$E_{TN} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4.15)$$

$$E_{TH} = \frac{1}{8} \rho g \sum H_i^2 \quad (4.16)$$

dividiendo,

$$E_N = \frac{E_{TH}}{E_{TN}} = \frac{\sum H_i^2}{96} \quad (4.17)$$

E_{TN} : Energía específica para un valor de 2 m de altura de ola en 24 horas

E_{TH} : Energía específica para cada valor de altura de ola en todo el registro

E_N : Energía normalizada

La energía normalizada determina un factor de energía de alturas de ola, lo que permite efectuar una clasificación energética entre rangos de valores de las tormentas con intervalos que dependen del valor más alto y más bajo obtenido de la normalización.

4.1.4.2 Número medio mensual de tormentas en función de la energía normalizada

Del registro de oleaje se define una tormenta como una ola que supera el umbral. Posteriormente se calcula a partir de la sobre elevación del nivel medio la energía asociada a cada fenómeno. Se lleva a cabo la normalización deduciendo el valor de las componentes de la energía definida como valor límite y luego se dividen los datos estimados para obtener la energía normalizada. Los resultados se presentan en rosas para incluir las direcciones asociadas de donde provienen los temporales con mayor contenido energético y en histogramas que muestran el número de ocurrencias del contenido energético de las tormentas a escalas anuales y mensuales.

4.1.4.3 Duración media y máxima histórica de tormentas

Una variable que influye en gran medida en la estabilidad de los elementos que se encuentran en la costa es la duración del temporal, ya que, es el tiempo de persistencia de la tormenta el que va a determinar la magnitud del daño, independientemente de la energía con que se presente el oleaje o el viento. Por ello se realiza el análisis de duración media y máxima histórica de tormentas para diferentes umbrales de altura de ola y energía normalizada, pues este análisis brinda un amplio panorama de los fenómenos registrados durante los 62 años de estudio.

La duración de la tormenta está definida por el tiempo en que el evento excede el valor del umbral establecido hasta el tiempo en que la altura de ola cae bajo dicho límite. La metodología consiste en determinar cuántas veces se supera dicho umbral en toda la muestra y establecer el tiempo de persistencia de cada fenómeno, con el objetivo de cuantificar la permanencia media y máxima de cada suceso. La duración media es el promedio de los valores encontrados en el cálculo anterior.

4.1.4.4 Valores máximos históricos

El análisis histórico de los estados de mar fue asociado no solo a condiciones de oleaje normal sino también a los eventos extremos que se presentan en diferentes épocas del año (invierno, primavera, verano y otoño).

Los resultados de la estimación son considerados como los valores más altos de la tormenta, es decir, se construye un gráfico que incluye las características del oleaje que presentan los valores más elevados por evento; se selecciona el periodo pico asociado y se calcula para cada temporal la energía normalizada. Desde el punto de vista ingenieril, los resultados arrojados por este análisis son muy valiosos, debido a que estos resultados llevan inherente la propiedad de

brindar al un marco general que le permite identificar la distribución de las mayores acciones ocurridas y determinar los puntos que presentan altos niveles de energía a nivel anual.

4.1.4.5 Número medio y máximo anual de tormentas

La cantidad de eventos que se pueden tener para diferentes épocas, a nivel mensual o estacional y/o para una base de datos anual, se obtiene al clasificar para los periodos donde deseo conocer las zonas de mayor concentración de sucesos, las alturas de ola significativa mayores de un umbral predeterminado. El procedimiento consiste en determinar el número de veces que se supera el umbral para los rangos establecidos en las diferentes épocas del año; posteriormente se hace una valoración en categorías para diferentes alturas de ola. Finalmente se mide la duración de cada tormenta.

4.1.4.6 Número medio y máximo anual de tormentas en función de la energía normalizada

Las condiciones energéticas son muy importantes en los diferentes procesos que se presentan en relación al oleaje y a la interacción de este con el litoral. Los valores medios y máximos anuales permiten determinar la peligrosidad de una zona, así como el rango de variación histórico.

4.2 Régimen extremal

El análisis extremal es utilizado para seleccionar y describir fenómenos con baja probabilidad de ocurrencia. En particular, se emplea el llamado “periodo de retorno de un suceso extremo”, el cual se define como el tiempo promedio en años que debe ocurrir entre dos temporales cuya intensidad excede un determinado valor. El análisis extremal, como su nombre lo indica, hace referencia a los eventos extremos. El objetivo principal de este tipo de análisis es determinar las acciones de diseño a soportar por una obra marina determinada en función del riesgo y su vida útil. El clima extremal también es utilizado para determinar las acciones máximas a soportar durante las distintas fases de ejecución de una obra y que son menores que las acciones de servicio de esta.

Dentro de los métodos más empleados en el análisis extremal, se encuentran el método de la muestra total y el método de los valores pico

El régimen extremal requiere de la definición de un suceso extremo o de un estado de oleaje con un cierto contenido energético y por tanto es caracterizado por un cierto valor de altura de ola, por lo general, la altura de ola significativa (Hs). Para la determinación de éste se emplean las siguientes técnicas:

4.2.1 Técnicas de punteo

La importancia del problema de punteo fue señalado por Kimball (1960), quien indicó que radicaba en el hecho de tener en mente el objetivo del papel probabilístico, el cual se encuentra generalmente incluido en alguno de los que se presentan a continuación:

1. Probar si la muestra proviene o no de una familia de distribución dada.
2. Para estimar los parámetros de la familia.
3. Para extrapolar de manera gráfica uno de los extremos.

El último procedimiento es el más utilizado en el caso de problemas de punteo de valores extremos. Se puede decir que la selección de la ecuación óptima para el punteo de datos depende del objetivo de la técnica con que se van a dibujar los mismos y del tipo de papel probabilístico que será utilizado. Por otro lado, es importante resaltar que los papeles probabilísticos fueron considerados para un ajuste visual de los valores dados por la función de distribución acumulada, a una línea recta; por lo que se puede decir que un ajuste visual de la ecuación de punteo a estos datos es un método adecuado para la selección de la fórmula de punteo por emplear. En la Tabla 4-1 se presentan las ecuaciones más comunes para el punteo de valores en papeles probabilísticos.

Fórmula de punteo	Autor
$x_{(i)}, \frac{i}{n+1}$	
$x_{(i)}, \frac{i-3/8}{n+1/4}$	Blom (1962)
$x_{(i)}, \frac{i-1/2}{n}$	Hazen (1930)
$x_{(i)}, \frac{i-0.44}{n+0.12}$	Gringorten (1963)

Tabla 4-1 Funciones de punteo

Luego de definir la forma de punteo para el subconjunto de datos, se trata de ajustar esta muestra a una función de distribución de probabilidad de excedencia. Existe en la literatura un amplio rango de modelos matemáticos y se debe seleccionar aquel que presente el mejor ajuste a la serie. Liu y Burchart (1998) proponen el uso de las funciones Gumbel y Weibull como aquellas que presentan los mejores ajustes. Las distribuciones bi-paramétricas son ampliamente utilizadas en la ingeniería para el análisis a largo plazo. Sin embargo, entre mayor número de parámetros tenga la función mejor es el ajuste, pues con el incremento de estos se tiene por consiguiente, mayor número de grados de libertad en la expresión. Por lo tanto, es más aconsejable utilizar funciones tri-paramétricas.

En este trabajo se emplea la función de probabilidad de excedencia Weibull pues al ser tri-paramétrica presenta mejores resultados que la función Gumbel. El procedimiento de ajuste de la distribución consiste en ordenar los datos de mayor a menor; se establecen las marcas de clase; se determinan los grupos de valores que se encuentran dentro de cada intervalo y, se le asigna a cada valor una probabilidad de excedencia. Una vez establecidos los valores de la probabilidad, se estiman los valores de los parámetros de la función por medio de diferentes técnicas.

Para realizar el ajuste de las funciones de probabilidad, es necesario determinar los parámetros de éstas, que para la ingeniería marítima los métodos más utilizados son:

- Método de los momentos muestrales, donde los valores pueden ser estimados a partir de un determinado número de momentos de la muestra, como la media, varianza o momentos superiores.
- Método de máxima verosimilitud que pretende encontrar los valores de los parámetros de forma que la probabilidad de encontrar el valor muestral sea el máximo.
- Método gráfico en el que se ajustan las funciones mediante el uso de variables reducidas a partir del empleo del método de mínimos cuadrados. Goda (1990) recomienda para datos de oleaje emplear la técnica de mínimos cuadrados.

Para el desarrollo de este trabajo, se empleó el método de mínimos cuadrados; con lo cual se obliga a asignar un valor de probabilidad de excedencia a cada valor de altura de ola.

4.2.2 Metodología para la estimación de los parámetros y dibujo en papel probabilístico

La distribución de probabilidad de Weibull para máximos está dada por:

$$y = F(x, \lambda, \beta, \delta) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - x}{\delta} \right)^\beta \right]; -\infty < x \leq \lambda \quad (4.18)$$

donde

- x : Parámetro de localización
- δ : Parámetro de escala
- β : Parámetro de forma
- λ : Parámetro umbral

Al aplicar logaritmos dos veces se obtiene:

$$-\log[-\log(y)] = -\beta \log \left(\frac{\lambda - x}{\delta} \right) = -\beta \log(\lambda - x) + \beta \log \delta \quad (4.19)$$

Al comparar las ecuaciones 1-9 y 1.10 se tiene

$$\begin{aligned} \xi &= g(x) = -\log(\lambda - x) \\ \eta &= h(y) = -\log[-\log(y)] \end{aligned} \quad (4.20)$$

Además

$$\begin{aligned} a &= \beta \\ b &= \beta \log \delta \end{aligned} \quad (4.21)$$

La familia de líneas rectas queda representada como

$$\eta = a\xi + b = \beta(\xi + \log \delta) \quad (4.22)$$

Para la determinación de los parámetros a y b en este trabajo, se aplica la técnica de mínimos cuadrados

$$a = \frac{N_{\text{Datos}} \sum_{k=1}^N \xi_k \eta_k - \sum_{k=1}^N \xi_k \sum_{k=1}^N \eta_k}{N_{\text{Datos}} \sum_{k=1}^N \xi_k^2 - \left(\sum_{k=1}^N \xi_k \right)^2} \quad (4.23)$$

$$b \frac{-a \sum_{k=1}^N \xi_k + \sum_{k=1}^N \eta_k}{N_{\text{Datos}}} \quad (4.24)$$

Se debe notar que la escala η coincide con la de papel probabilístico de Gumbel; la gradación ξ se encuentra en este caso en escala logarítmica en lugar de aritmética. Se debe observar que la distribución Weibull depende de tres parámetros, uno más que la distribución Gumbel; éste es el parámetro umbral λ , que es desconocido y el cual normalmente no se puede inferir a través de fenómenos físicos. Para la estimación de λ , se recomienda presentar gráficamente los datos con un parámetro umbral propuesto que satisfaga la ecuación 4-18 y observar el ajuste de la recta a los valores de probabilidad dados. Este proceso se repite iterativamente hasta que se esté conforme con el ajuste realizado con la recta descrita por la ecuación 4-22. Dicho punteo debe hacerse para distintos valores del parámetro umbral, hasta que la tendencia lineal que se busca sea obtenida para el intervalo de interés.

Con el valor del parámetro umbral propuesto, se procede a estimar los parámetros restantes β y δ , lo que se puede realizar notando que para $\eta = 0$ y $\eta = 1$, se tiene

$$0 = \beta(\xi + \log \delta) \rightarrow \xi = -\log \delta \quad (4.25)$$

$$1 = \beta(\xi + \log \delta) \rightarrow \xi = \frac{1}{\beta} - \log \delta \quad (4.26)$$

El análisis extremal proporciona la distribución de probabilidades de excedencia de los sucesos extremos y por lo tanto, también se pueden representar sus valores con respecto al periodo de retorno.

La extrapolación de los datos presenta la probabilidad de que un valor dado sea excedido. Debido a que este procedimiento no indica cuándo ocurrirá el suceso, la probabilidad se expresa en términos del periodo de retorno para ver que tan frecuente será su ocurrencia.

Con base en lo anterior, el análisis extremal es el último de los análisis que se presentan en este trabajo, haciendo énfasis en el análisis de alturas de ola significativa y en las velocidades de viento sostenido

5 METODOLOGÍA

En este capítulo se explica la metodología utilizada, en el presente trabajo, para llevar a cabo la determinación del clima marítimo en zonas costeras, con enfoque específico en la zona de estudio. Dicha metodología se basa en el reanálisis de oleaje de los últimos 61 años (desde las cero horas del año 1949, hasta las 23 horas del año 2009) mediante la implementación de los modelos de generación y propagación de oleaje descritos en los capítulos 2 y 3.

5.1 Implementación del modelo híbrido WAM-HURAC

5.1.1 Recopilación de la información

Como se explicó anteriormente, la información que se requiere para la ejecución del WAM es la velocidad y dirección del viento medidas a una elevación de 10m sobre el nivel medio del mar. Esta información se encuentra registrada en el portal del proyecto de reanálisis del National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis). (ver figura 5.1)

The screenshot shows the NCEP/NCAR Reanalysis 1: Surface Flux data page. The page is titled "NCEP/NCAR Reanalysis 1: Surface Flux" and includes a search bar, navigation menu, and detailed information about the dataset. The "One-Line Description" states: "NCEP/NCAR Reanalysis 1: Surface Flux data". The "Temporal Coverage" section lists: "4-times daily, daily and monthly values for 1948/01/01 to present" and "Long term monthly means, derived from data for years 1968 - 1996". The "Spatial Coverage" section lists: "T62 Gaussian grid with 192x94 points" and "88 542N-88 542S, 0E-358 125E". The "Levels" section lists: "Surface or near the surface". The "Update Schedule" section lists: "Daily". The page also includes a table of variables and a table of forecasts.

Variable	Statistic	Level	Download File	Create Plot
Air Temperature 2m	4-times Daily	2m	see list	
Air Temperature 2m	Daily	2m	see list	
Ice concentration	4-times Daily	Surface	see list	

Figura 5.1 Portal (NCEP/NCAR)

Una vez que se tienen los archivos de las componentes del viento, se debe generar un campo de viento que cubra el área de análisis que se va a modelar con

el WAM. Los datos necesarios para obtener estos campos, mediante interpolaciones son:

- Coordenadas de las longitudes y latitudes máximas y mínimas del área de análisis o malla.
- Los archivos de las componentes del viento registradas a 10 m de la superficie y medidas 4 veces al día.
- Los incrementos de los deltas tanto de las coordenadas de la latitud, así como de la longitud.

El Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México desarrolló una rutina para realizar la interpolación de los vientos, ver figura 5.2.

```

H:\WAM Pacifico\RutinasVientosInterpoladosWAM\corta5.exe
A&O      1955
PROGRAMA PARA INTERPOLAR Y DARLE FORMATO A LOS
CAMPOS DE VIENTO DEL NCEP/NCAR REANALISIS
-----
CARACTERISTICAS DEL ARCHIVO DE VIENTO
Anno = 1955
No. puntos Longitud = 192
No. puntos Latitud = 94
Latitud maxima original = 88.542
Latitud minima original = -88.542
Longitud maxima original = 358.125
Longitud minima original = 0.
Factor Offset = 225.45
Factor de escala = 0.01
-----
LAS CARACTERISTICAS DE LA NUEVA MALLA
DATOS QUE SE DEBEN INTRODUCIR AL WAM
      101      153
1955      1      1      0

```

Figura 5.2 Visualización programa de interpolación de vientos

Para el forzamiento del modelo WAM, los vientos se interpolaron con una resolución espacial de 0.25° y una resolución temporal de 10 minutos. La malla de análisis cubre el área delimitada por las coordenadas: latitud 15° N a 31° N y longitud de 80° W a 98° W.

5.1.2 Modelación WAM

Una vez obtenidos los campos de viento, se procedió con la ejecución del modelo WAM. Los datos proporcionados para ejecutar el modelo fueron la batimetría de la malla de análisis y los campos de viento.

Debido al gran tamaño y la gran demanda computacional del modelo, todo el proceso fue realizado en ambiente Linux, utilizando un computador con 8 procesadores y 16 GB de memoria RAM. Se realizaron las ejecuciones y se guardaron los resultados de todas las condiciones de oleaje, con una resolución temporal de una hora a lo largo de toda la malla de análisis.

5.1.3 Modelación HURAC

Se construyó una base de datos con la información de todos los ciclones tropicales que han afectado el litoral mexicano en la vertiente atlántica durante los últimos 61 años, obteniendo un total de 646 eventos. Todos estos eventos se interpolaron con una resolución temporal de una hora.

Para cada una de las celdas de la malla de análisis, se realizó la ejecución del modelo HURAC. La información utilizada para llevar a cabo el análisis fue la base de datos cuando la distancia relativa entre el centro del ciclón y el centro de celda analizada no superaba los 500 km.

Construidas las bases de datos, se procedió con la hibridación del WAM-HURAC.

5.2 Implementación Modelo SWAN

Una vez construidas las bases de datos, producto de la hibridación del WAM-HURAC, se procedió con la implementación del SWAN. Lo cual se describe a continuación.

5.2.1 Malla de análisis

La malla de análisis empleada para la ejecución del SWAN, está comprendida entre la latitud 19.75° N y 21.75° N y longitud 86.25° W y 87.25° W. La resolución espacial empleada para la malla de análisis fue de 0.1° . Para obtener una mejor definición en el área del enmallado y de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones del SWAN, fue necesario realizar una malla triangular irregular, para lo cual se utilizó el generador de mallas triangulares *Triangle*, obteniendo una excelente definición de la línea de costa continental y las masas de tierra (islas), como se muestra en las figuras 5.3, 5.4 y 5.5.

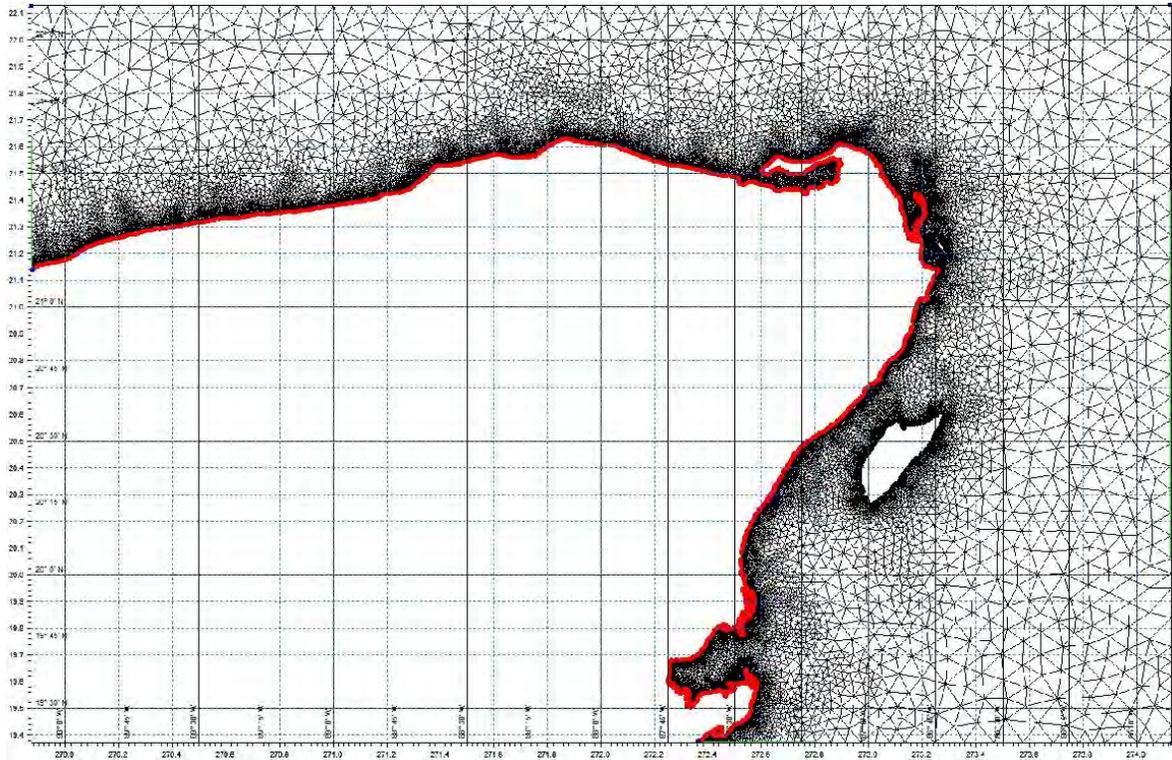


Figura 5.3 Malla de análisis sin incluir batimetría

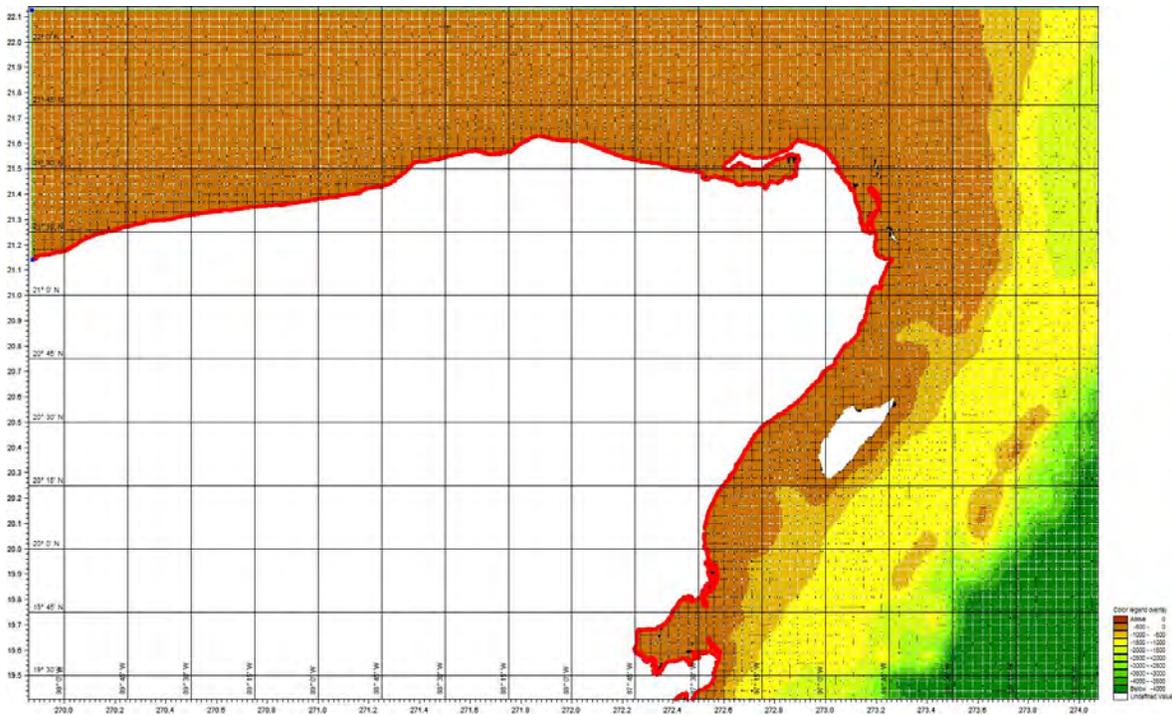


Figura 5.4 Malla de análisis con las características batimétricas

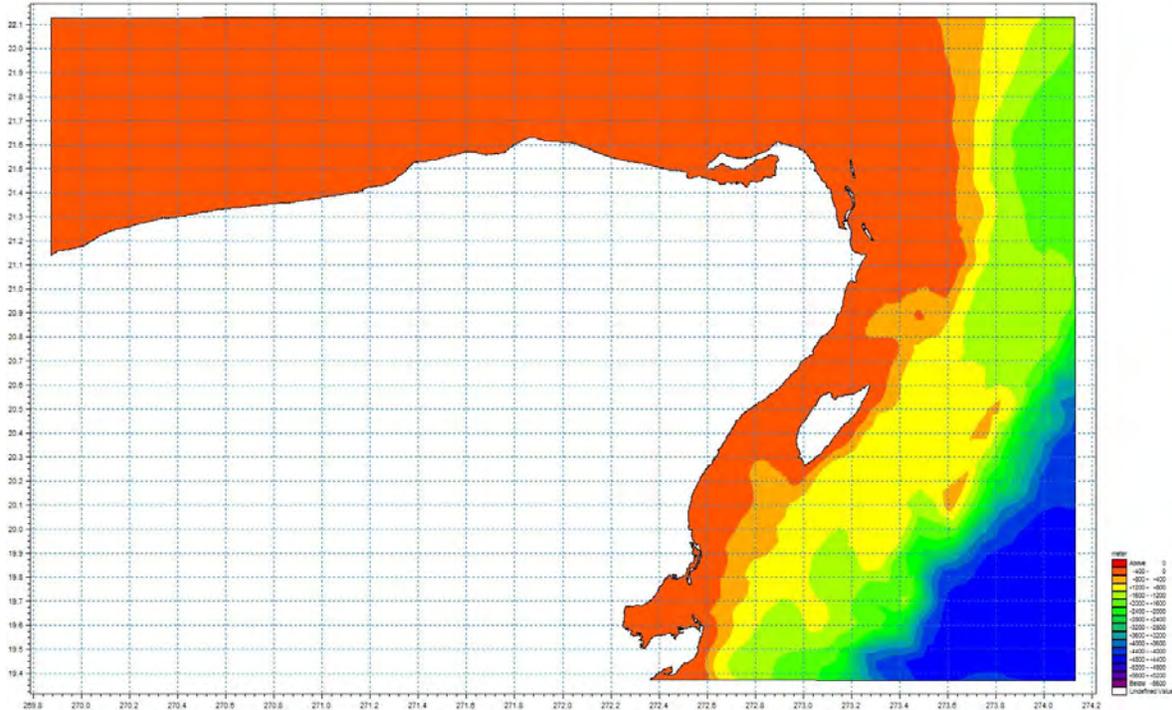


Figura 5.5 Malla de análisis interpolada definitiva

En la figura 5.3, se puede observar claramente cómo aumenta la resolución de la malla cuando está cerca de la línea de costa o cerca de islas, esto permite una mayor definición en el momento de ejecutar el SWAN. El número total de nodos de la malla de análisis fue de 76705 y el número de celdas fue de 141669. La configuración de la malla consta de 4 fronteras de agua y una de tierra. Las fronteras asociadas a las islas, son tomadas de la misma manera que la frontera de tierra con una elevación de 0 m. Por conveniencia del generador de mallas, durante el proceso de generación del enmallado los valores correspondientes a la profundidad del agua son tomados con signo negativo, sin embargo, en el momento de alimentar el SWAN estos valores deben ser tomados con signo positivo.

5.2.2 Funciones de transferencia

Para ejecutar el SWAN, es necesario establecer las condiciones de frontera con las cuales se va a alimentar el modelo, es por esto que surge la necesidad de establecer dichas condiciones. Debido al gran tamaño de la muestra y las distintas condiciones de clima marítimo en las fronteras de la malla de análisis, fue necesario crear unas funciones de transferencia, que representaran satisfactoriamente todas las condiciones presentadas a lo largo del periodo de estudio.

Para definir las condiciones de frontera se realizó una evaluación de los eventos más ocurrentes en los límites de la malla de cálculo, partiendo de un análisis estadístico del clima marítimo resultado de la hibridación del WAM-HURAC, para conocer las condiciones de oleaje en estos puntos y partiendo de estos valores, realizar la anidación entre el modelo híbrido y el SWAN.

Las funciones de transferencia adoptadas se fundamentan en las características de las condiciones tanto del viento (velocidad y dirección) como del oleaje (altura de ola, dirección y periodo), partiendo de una evaluación de las condiciones predominantes en las fronteras, obteniendo como resultado los rangos de altura de ola significativa junto con sus periodos asociados y los rangos de vientos en cuanto a velocidad y dirección se refieren.

Con base en el análisis descrito anteriormente, se obtuvieron 31104 posibles combinaciones. El resultado de este análisis se resume a continuación.

5.2.2.1 Condiciones de oleaje

Teniendo en cuenta que las condiciones que rigen el oleaje se dividen en altura, dirección y periodo, se obtuvieron tres rangos para cada una de estas.

- Los rangos de altura de ola se dividieron cada 0.5 m, partiendo desde 0.5 m hasta llegar a 12 m, que es el máximo valor registrado.
- Los rangos relacionados con la dirección del oleaje se tomaron cada 22.5° partiendo desde 270° hasta 180° en el sentido de las agujas del reloj, teniendo en cuenta que el oleaje predominante viene de estas direcciones; los registros que se encuentran fuera de estas direcciones no superaron el 0.001% del tamaño total de la muestra.
- Para la clasificación del rango del periodo de oleaje se dividieron los valores de la muestra en segundos partiendo desde 6 s hasta 14 s, siendo este último el valor máximo recopilado en la muestra. Los registros encontrados por debajo de este rango no superaron el 0.05% del tamaño total de la muestra, por lo cual, se ajustaron al límite inferior del mismo, es decir, a 6 s.

5.2.2.2 Condiciones de viento

Las condiciones de oleaje, se clasificaron dependiendo de su magnitud y dirección

- La caracterización de la velocidad del viento se dividió en rangos cada 10 km/h, partiendo desde 30 km/h hasta 130 km/h, excepto en los eventos extremos, los cuales superaron este umbral. Para estos eventos los

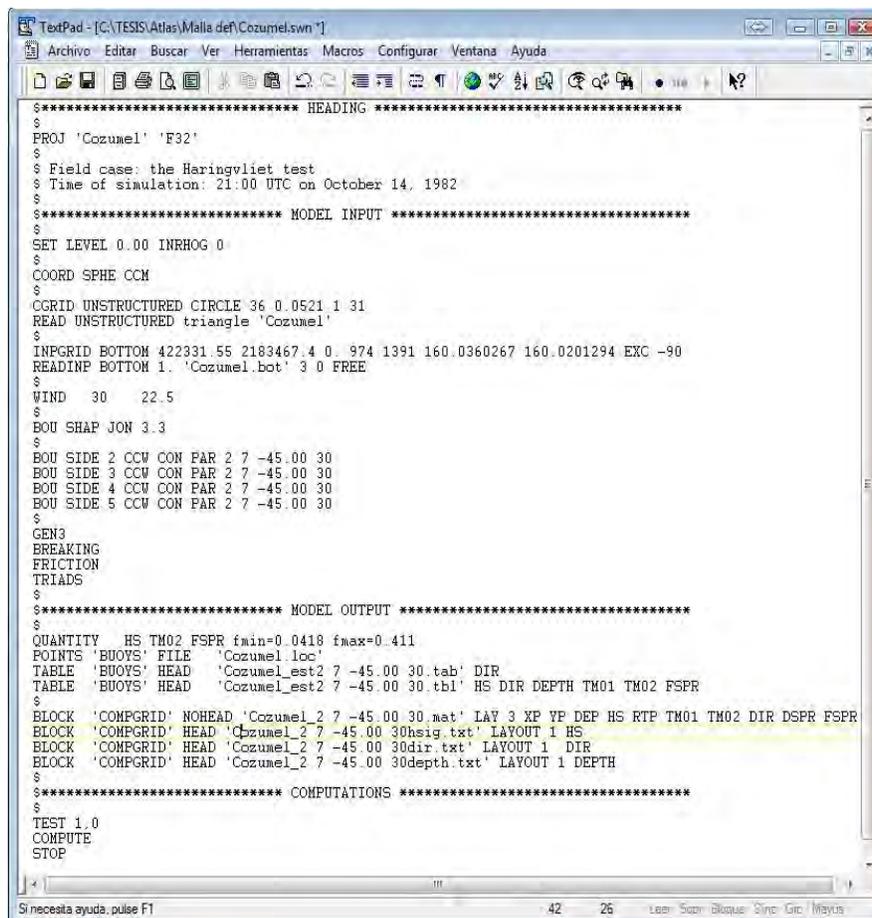
rangos se dividieron cada 20 km/h, desde 130 km/h hasta 250 km/h, teniendo en cuenta que esta última velocidad fue la máxima registrada. El espaciamento en el rango para los eventos extremos se tomo con un intervalo mayor, debido a que la magnitud en los cambios de la velocidad es mayor durante la ocurrencia de estos eventos que en condiciones normales.

- Para la elección de los rangos de la dirección del viento fue empleado el mismo criterio que se empleó para la dirección del oleaje.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia, se llevó a cabo la ejecución del SWAN.

5.2.3 Modelación SWAN

Para una mayor eficiencia en la ejecución del SWAN, se realizó una rutina para automatizar las corridas del modelo, la cual realiza el cambio de los archivos de entrada y los archivos de salida, con base en las funciones de transferencia descritas en el inciso anterior. Los archivos de entrada (ver figura 5.6 y 5.7), deben ser modificados para cada una de las ejecuciones.



```
TextPad - [C:\TESIS\Atlas\Malla def\Cozumel.swn]
Archivo  Editar  Buscar  Ver  Herramientas  Macros  Configurar  Ventanas  Ayuda

$***** HEADING *****
$
PROJ 'Cozumel' 'F32'
$
$ Field case: the Haringvliet test
$ Time of simulation: 21.00 UTC on October 14, 1982
$
$***** MODEL INPUT *****
$
SET LEVEL 0.00 INRHOG 0
$
COORD SPHE CCM
$
CGRID UNSTRUCTURED CIRCLE 36 0.0521 1 31
READ UNSTRUCTURED triangle 'Cozumel'
$
INPGRID BOTTOM 422331 55 2183467.4 0.974 1391 160.0360267 160.0201294 EXC -90
READING BOTTOM 1. 'Cozumel_bot' 3 0 FREE
$
WIND 30 22.5
$
BOU SHAP JON 3.3
$
BOU SIDE 2 CCW CON PAR 2 7 -45.00 30
BOU SIDE 3 CCW CON PAR 2 7 -45.00 30
BOU SIDE 4 CCW CON PAR 2 7 -45.00 30
BOU SIDE 5 CCW CON PAR 2 7 -45.00 30
$
GEN3
BREAKING
FRICTION
TRIADS
$
$***** MODEL OUTPUT *****
$
QUANTITY HS TM02 FSPR fmin=0.0418 fmax=0.411
POINTS 'BUOYS' FILE 'Cozumel_loc'
TABLE 'BUOYS' HEAD 'Cozumel_est2 7 -45.00 30.tbl' DIR
TABLE 'BUOYS' HEAD 'Cozumel_est2 7 -45.00 30.tbl' HS DIR DEPTH TM01 TM02 FSPR
$
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'Cozumel_2 7 -45.00 30.mat' LAY 3 XP YP DEP HS RTP TM01 TM02 DIR DSPR FSPR
BLOCK 'COMPGRID' HEAD 'Cozumel_2 7 -45.00 30hsig.txt' LAYOUT 1 HS
BLOCK 'COMPGRID' HEAD 'Cozumel_2 7 -45.00 30dir.txt' LAYOUT 1 DIR
BLOCK 'COMPGRID' HEAD 'Cozumel_2 7 -45.00 30depth.txt' LAYOUT 1 DEPTH
$
$***** COMPUTATIONS *****
$
TEST 1.0
COMPUTE
STOP

Si necesita ayuda, pulse F1 42 26 Leer Suar Almacenar Opciones Ginc Ginc Mayus
```

Figura 5.6 Archivo de entrada SWAN (*.swn)

```
4
Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos
Instituto de Ingeniería
UNAM
3
Cozumel 2 7 -45.00.swn
4
RESULTADO 2 7 -45.00.txt
4
6
99
$
/
\
1
```

Figura 5.7 Archivo de entrada SWAN (swaninit)

Los archivos de salida del SWAN, presentan muchas opciones en cuanto a su presentación. Adicionalmente, tiene una amplia gama de resultados procesados, dependiendo del uso y solicitud del usuario. En la figura 5.8 se muestran algunos de los archivos de salida obtenidos mediante la ejecución del modelo. En el presente trabajo se analizaron de 144 puntos, anteriormente establecidos (ver figura 5.9), para realizar la caracterización del clima marítimo en éstos.

```

%
%
% Run: F32   Table: BUOYS                               SWAN version: 40.72
%
%   Hsig      Dir      Depth      Tm01      Tm02      FSpr
%   [m]       [degr]   [m]        [sec]     [sec]     [ ]
%
%   0.88275   46.941   870.3022   5.2179    5.5867    0.448082
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%   0.88275   46.941   870.3022   5.2179    5.5867    0.448082
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%   1.04942    40.446  1710.4901   6.3554    6.3828    0.508634
%   1.55109    6.644   1200.1305   5.2202    5.5574    0.324307
%   1.56824    7.280   1200.0541   5.2954    5.6238    0.286745
%   1.44714   267.740   200.2386   5.3414    5.8382    0.312432
%   0.86979    51.119    58.5997    4.9013    5.3818    0.480705
%   1.00642    44.462  1192.9877   6.5386    6.4390    0.556454
%   1.40428    27.011  1045.9247   4.8119    5.2684    0.373675
%   1.36735    40.330   200.8178   4.9115    5.3891    0.373303
%   1.08935   330.943    59.0805   4.5389    5.3228    0.330119
%   0.77491    46.643    80.1416   4.7294    5.3455    0.548833
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%   1.00327    44.800   658.1438   6.6525    6.5001    0.552001
%   2.07454   269.926   441.4770   9.0657    7.9657    0.586389
%   0.97766    49.451   391.4706   3.8883    4.6814    0.446404
%   0.35479    84.333    12.1324    2.6408    3.7275    0.185758
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%   0.83871    43.769    33.9194    5.4673    5.9157    0.558535
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%   0.99932    45.000   10.0399    6.6735    6.5074    0.561396
%   0.48418   123.673    96.7128    2.7997    4.4595    0.505301
%   0.01912    25.023    1.2220    1.2117    2.9179    0.614639
%   0.91096    44.201    42.0802    5.8323    6.1055    0.558220
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%  -9.00000  -999.000 -99.0000   -9.0000   -9.0000   -9.000000
%   0.99932    45.000   10.0399    6.6735    6.5074    0.561396
%   0.48418   123.673    96.7128    2.7997    4.4595    0.505301
%   0.01912    25.023    1.2220    1.2117    2.9179    0.614639
%   0.91096    44.201    42.0802    5.8323    6.1055    0.558220
    
```

Figura 5.8 Archivo de salida SWAN (*.tbl)

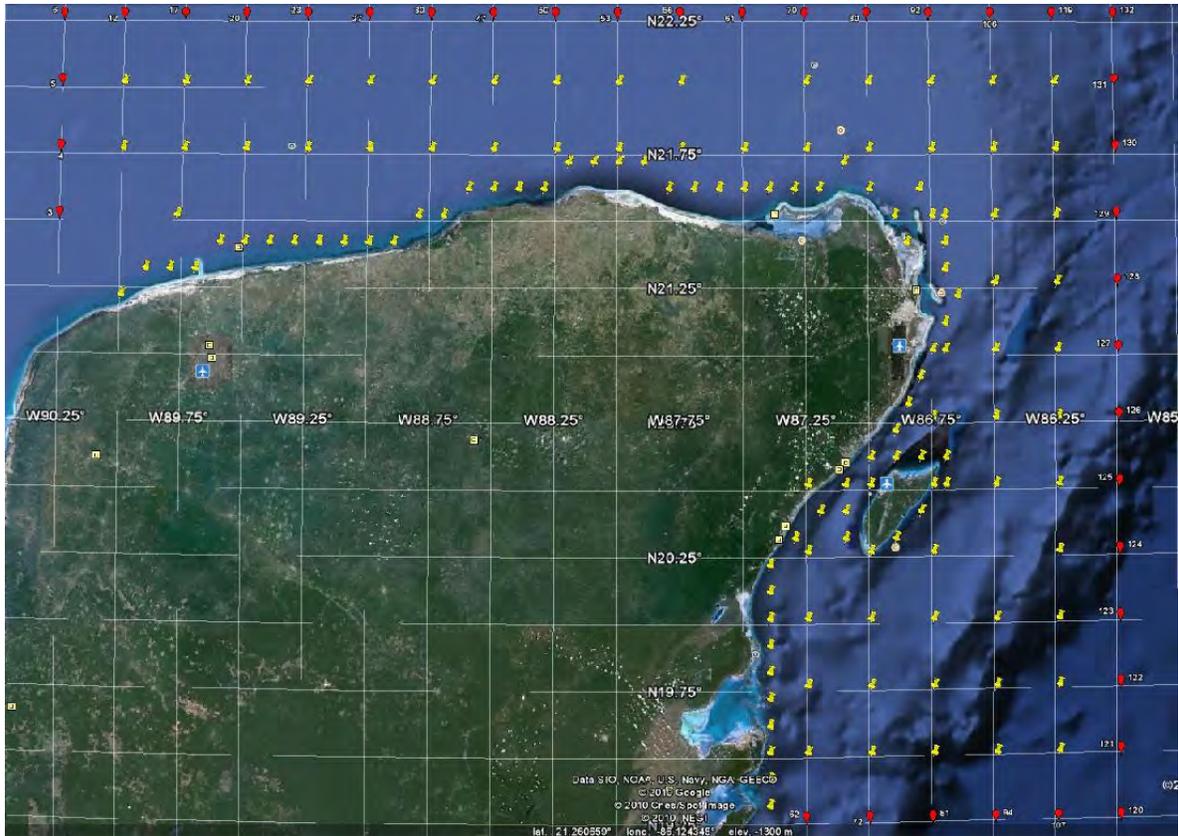


Figura 5.9 Localización puntos de estudio

5.3 Filtrado de resultados

Para el filtrado de los resultados fue necesario seleccionar la función de transferencia que representara las condiciones del clima marítimo para cada una de las ejecuciones realizadas, en donde se caracterizaron las condiciones de las fronteras. Partiendo de esto, se procedió a seleccionar cada uno de los estados de mar de todo el registro y se interpolaron las funciones de transferencia, para ajustarlas con los datos arrojados por el modelo híbrido.

Luego de obtener los datos interpolados se construyeron las nuevas y definitivas bases de datos (ver figura 5.10), con los resultados arrojados por el SWAN y con el espaciamiento temporal arrojado por el WAM-HURAC, para la caracterización del clima marítimo de los puntos marcados en la figura 5.9, tomando como base el análisis descrito en el capítulo anterior.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos para las celdas ubicadas al éste de Cancún, con base en la metodología descrita en el presente capítulo.

Ms	Di	Ho	V(m/s)	TE_V	H(m)	TE_H	T(s)	Consec.	Año
1	1	0	7.10	206.00	1.44	114.70	5.00	1	1949
1	1	1	7.10	206.00	1.44	114.70	5.00	2	1949
1	1	2	7.10	206.00	1.44	114.70	5.00	3	1949
1	1	3	7.10	206.00	1.44	114.70	5.00	4	1949
1	1	4	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	5	1949
1	1	5	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	6	1949
1	1	6	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	7	1949
1	1	7	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	8	1949
1	1	8	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	9	1949
1	1	9	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	10	1949
1	1	10	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	11	1949
1	1	11	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	12	1949
1	1	12	8.60	217.40	1.44	114.70	5.00	13	1949
1	1	13	7.00	245.90	1.51	124.00	5.44	14	1949
1	1	14	7.00	245.90	1.76	153.30	5.98	15	1949
1	1	15	7.00	245.90	1.76	153.30	5.98	16	1949
1	1	16	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	17	1949
1	1	17	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	18	1949
1	1	18	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	19	1949
1	1	19	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	20	1949
1	1	20	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	21	1949
1	1	21	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	22	1949
1	1	22	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	23	1949
1	1	23	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	24	1949
1	2	0	6.80	259.80	1.41	155.90	5.73	25	1949
1	2	1	4.80	277.90	1.41	155.90	5.73	26	1949
1	2	2	4.80	277.90	1.41	155.90	5.73	27	1949
1	2	3	4.80	277.90	1.41	155.90	5.73	28	1949
1	2	4	6.00	272.00	1.41	155.90	5.73	29	1949
1	2	5	6.00	272.00	1.41	155.90	5.73	30	1949
1	2	6	6.00	272.00	1.41	155.90	5.73	31	1949

Figura 5.10 Base de datos final por cada punto

6 RESULTADOS

El procesamiento de los datos fue realizado en toda la malla de análisis que se generó para las modelaciones del SWAN, obteniendo un total de 144 celdas (ver figura 4-9), tomando como fundamento los centros de celda extraídos de la malla de análisis del WAM-HURAC. El procesamiento fue determinado de esta manera, debido a la regularidad de la malla del modelo híbrido. Para la línea de costa se hizo una a malla regular de resolución espacial de 0.1°, realizando el análisis para los centros de celda de ésta.

Teniendo en cuenta la complejidad de las características batimétricas de la zona, las afectaciones que ha tenido ocasionada por la presencia de huracanes durante las últimas décadas y su importancia en cuanto al turismo, en éste trabajo se presentan resultados obtenidos, mediante la metodología expuesta en el capítulo anterior, para las cuatro celdas resultantes en la zona de Cancún (ver figura 6-1). En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la celda N° 1, los resultados de las celdas 2, 3 y 4 se presentan en los apéndices 2, 3 y 4 respectivamente.

Las celdas están ubicadas en las siguientes coordenadas.

N° de Celda	Latitud N	Longitud W
1	21.1	86.70
2	21.0	86.75
3	20.9	86.80
4	21.0	86.70

Tabla 6-1 Información geográfica de las celdas de estudio

Los resultados procesados para cada una de las celdas son presentados en el siguiente orden:

Análisis de oleaje

- Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa
- Probabilidad de excedencia de periodos medios de ola
- Rosas de oleaje
- Régimen extremal de alturas de ola significativa

Análisis de viento

- Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos
- Rosas de vientos
- Régimen extremal de velocidades de vientos sostenidos

Análisis de tormentas

- Duración media de tormentas
- Presentación de alturas de ola significativa por mes
- Presentación de tormentas normalizadas por mes
- Presentación de alturas de ola significativa por año
- Presentación de tormentas normalizadas por año
- Evolución temporal de altura de ola significativa de la última década



Figura 6.1 Ubicación celdas de estudio

Para cada una de las celdas, se generó un archivo de salida con registros tomados cada hora desde las cero horas de 1949 hasta las cero horas del año 2010. El contenido de los archivos de salida, tienen la estructura mostrada en la

figura 5-10, resumiendo las condiciones de oleaje presentadas en los últimos 61 años.

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de realizar la caracterización del oleaje a largo plazo.

6.1 Resultados Celda N° 1

6.1.1 Análisis de oleaje

Se presentan la probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa, la probabilidad de excedencia de periodos medio de ola, las rosas de oleaje y el régimen extremal de alturas de ola significativa, con base en un análisis anual y otro por estaciones, realizado durante los 61 años de análisis

6.1.1.1 Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa

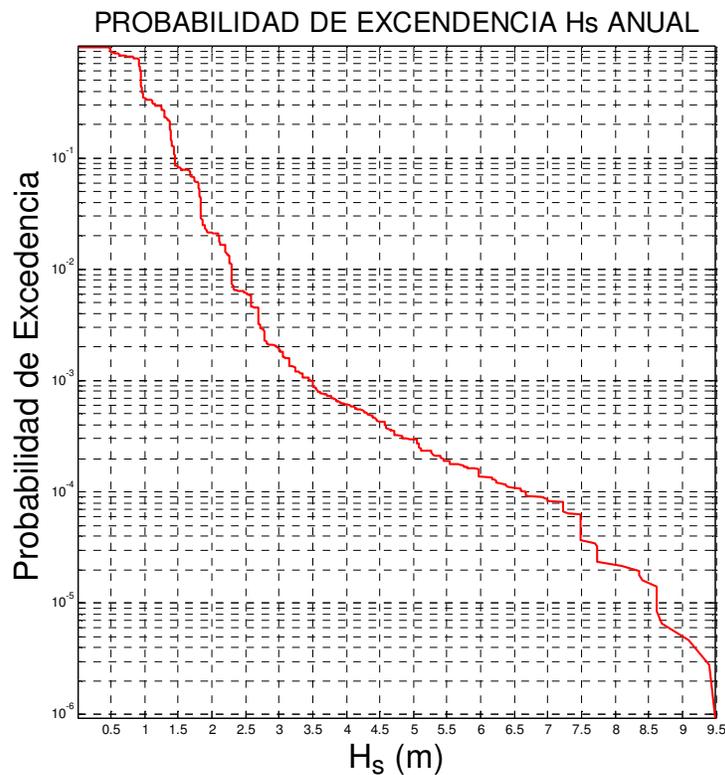


Figura 6.2 Anual

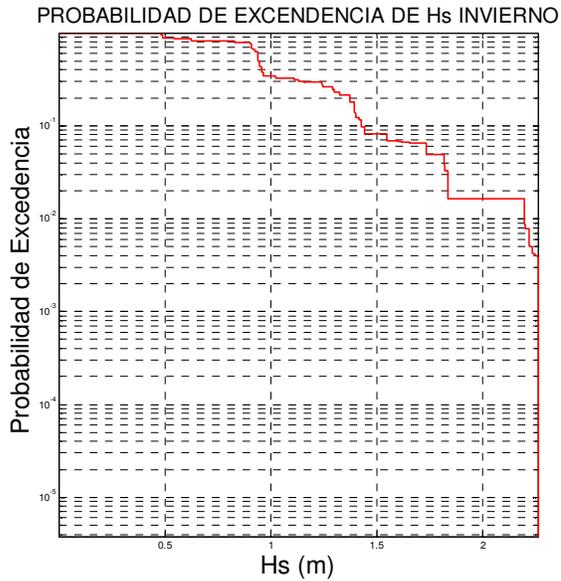


Figura 6.3 Invierno

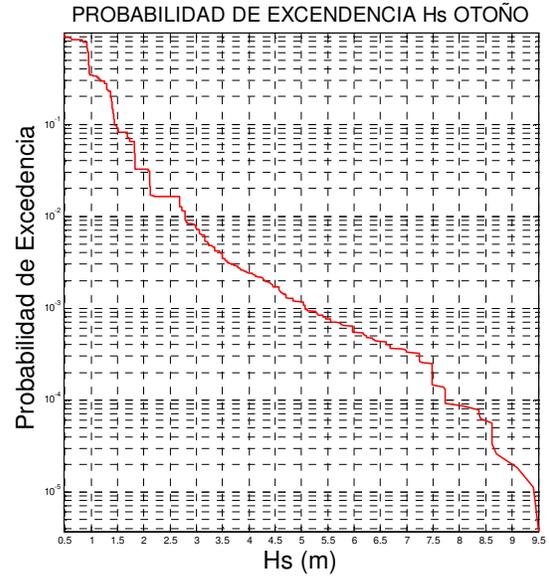


Figura 6.4 Otoño

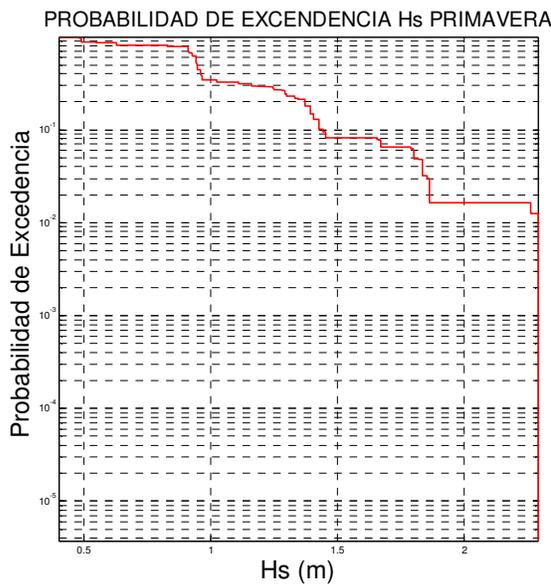


Figura 6.5 Primavera

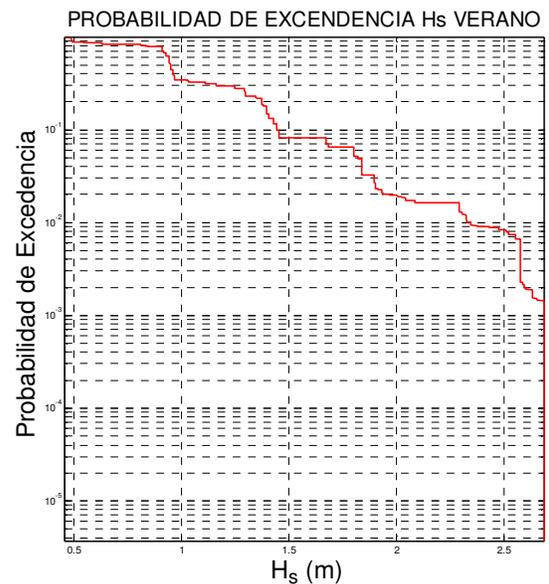


Figura 6.6 Verano

Se determinó la probabilidad de excedencia para las alturas de ola, con el fin de identificar de forma rápida la probabilidad que una tormenta, no supere un valor determinado en un año medio

6.1.1.2 Probabilidad de excedencia de periodos medio de ola

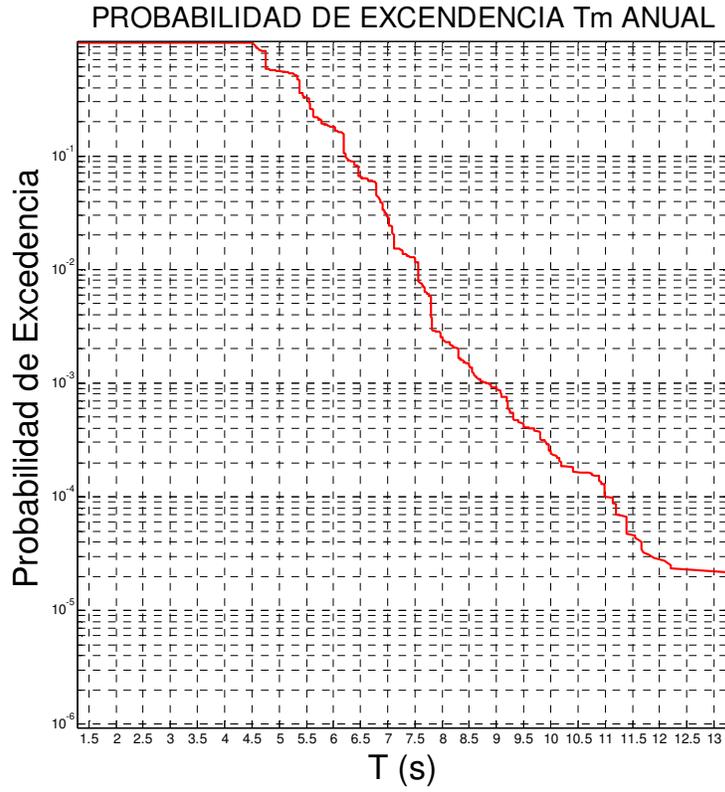


Figura 6.7 Anual

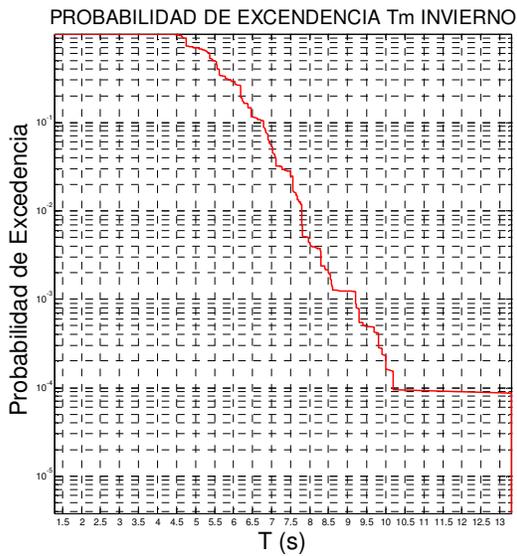


Figura 6.8 Invierno

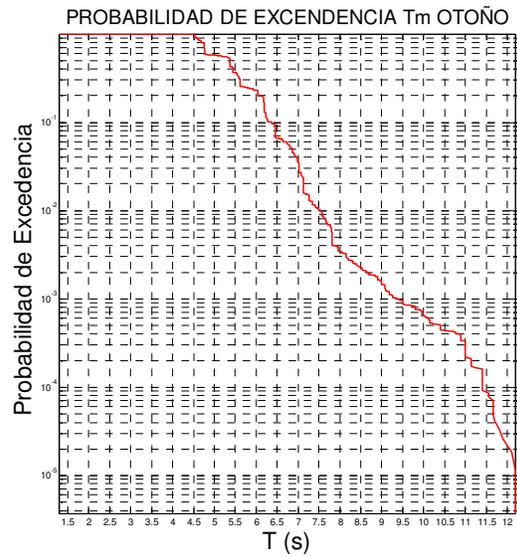


Figura 6.9 Otoño

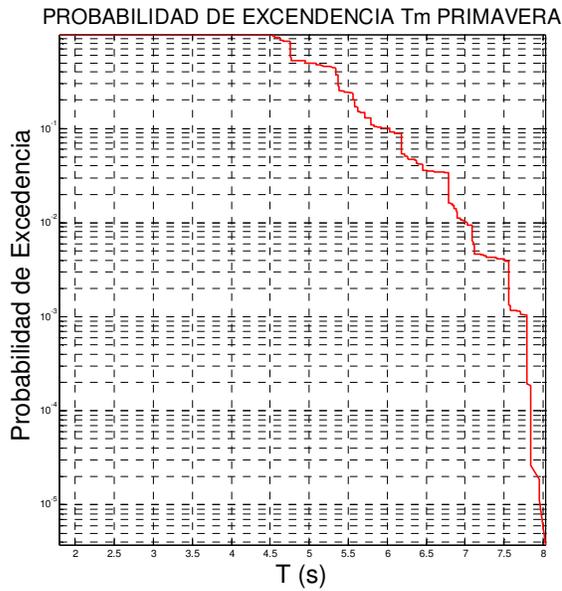


Figura 6.10 Primavera

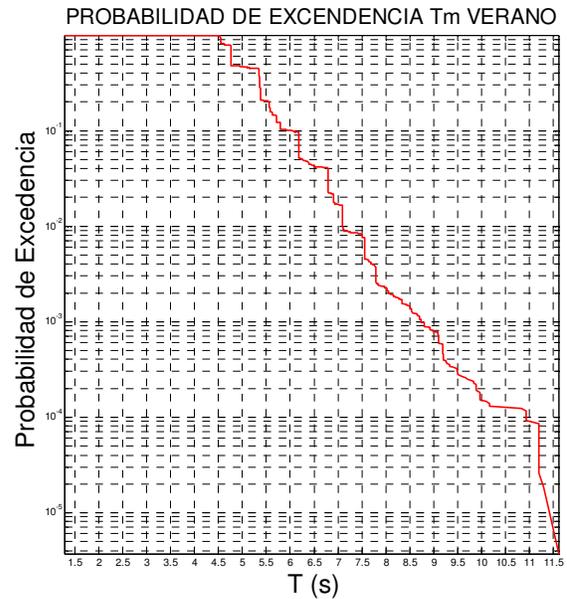


Figura 6.11 Verano

De igual manera, se determinó la probabilidad de excedencia para los periodos medios de oleaje, para identificar la probabilidad de que un periodo no rebase un valor determinado en un año medio

6.1.1.3 Rosas de oleaje

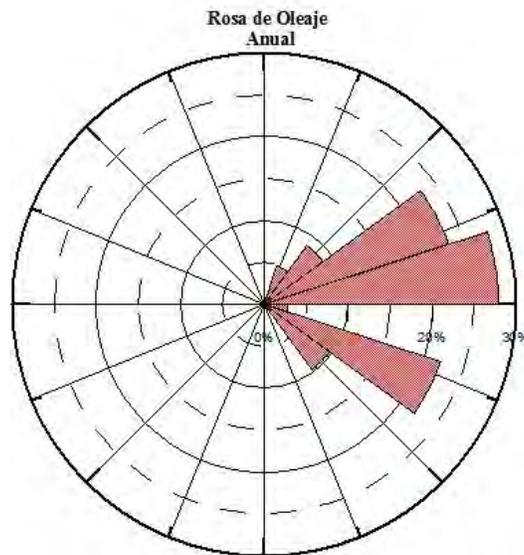


Figura 6.12 Anual

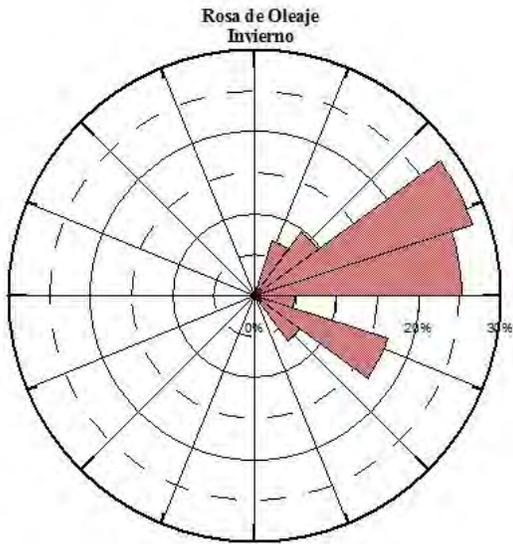


Figura 6.13 Invierno

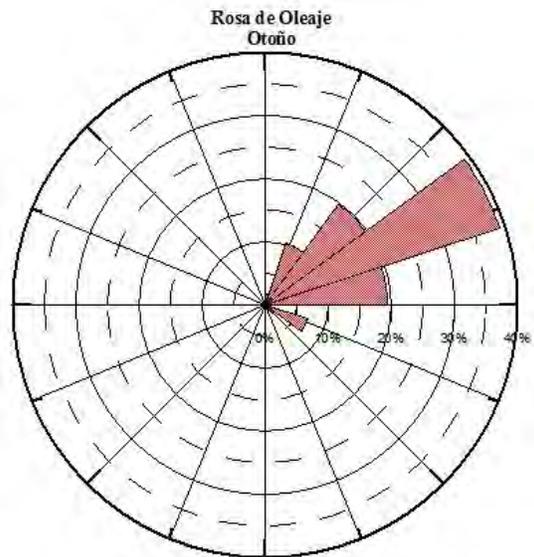


Figura 6.14 Otoño

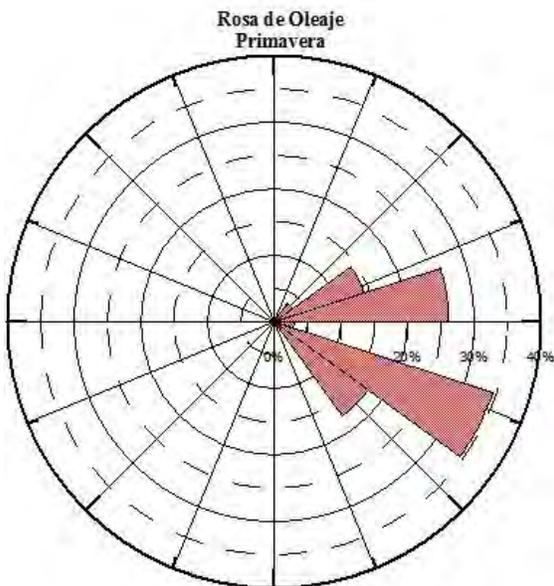


Figura 6.15 Primavera

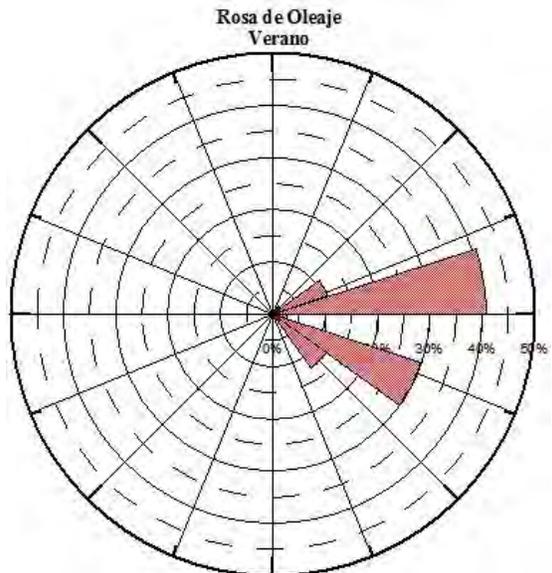


Figura 6.16 Verano

Las rosas de oleaje muestran como es el comportamiento de éste en cuanto a su dirección en la celda de estudio analizada. De esta manera se puede observar claramente que la dirección de incidencia de oleaje predominante, proviene del este y tiene unas pequeñas variaciones dependiendo de la estación del año. Por ejemplo, se tiene que las direcciones en primavera y verano provienen del este-sureste, mientras que para las estaciones de otoño e invierno la dirección que predomina es la proveniente del este-noreste

6.1.1.4 Régimen extremal de altura de ola significativa

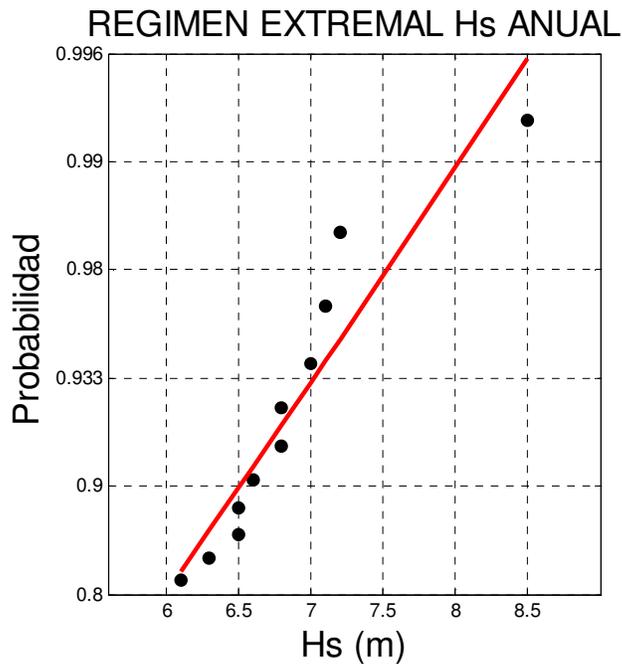


Figura 6.17 Anual

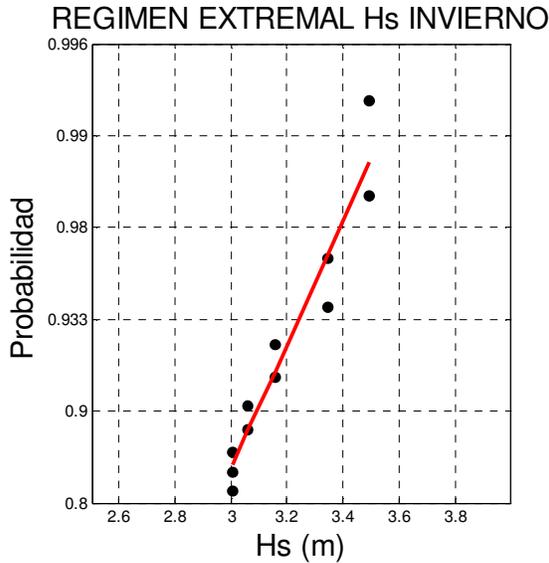


Figura 6.18 Invierno

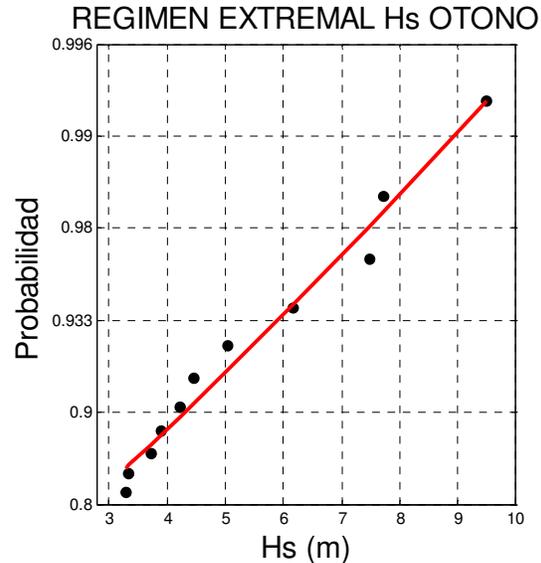


Figura 6.19 Otoño

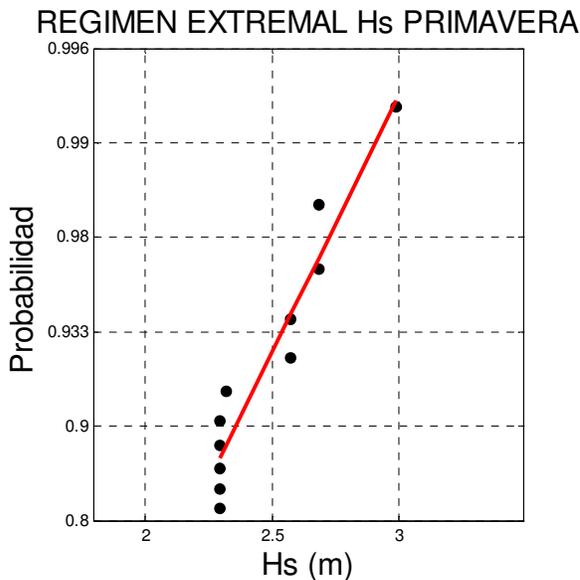


Figura 6.20 Primavera

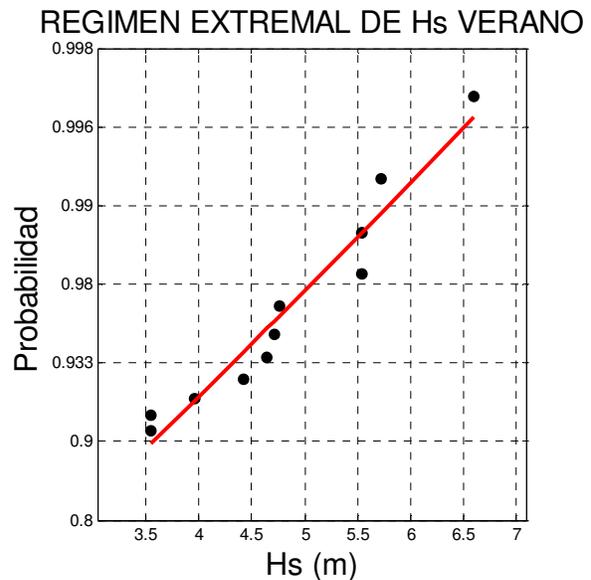


Figura 6.21 Verano

Con base en el estudio del régimen extremal, se obtuvo que, para una probabilidad aproximada de 0.994, que hace referencia a un periodo de retorno de 100 años, la máxima altura de oleaje que se puede presentar es de 8.5 m. La tendencia que se presenta para todas las estaciones no supera el umbral estimado por el análisis anual, exceptuando la estación de otoño, en donde, con unas características muy similares en cuanto a la probabilidad y el periodo de retorno, se presenta una altura de oleaje mayor, alrededor de 9.5 m. Se puede observar claramente que las estaciones de invierno y primavera se encuentran fuera del periodo de huracanes.

6.1.2 Análisis de viento

Se presentan la probabilidad de excedencia, las rosas y el régimen extremal de vientos sostenidos, con base en un análisis anual y otro por estaciones, realizado durante los 61 años de análisis

6.1.2.1 Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos

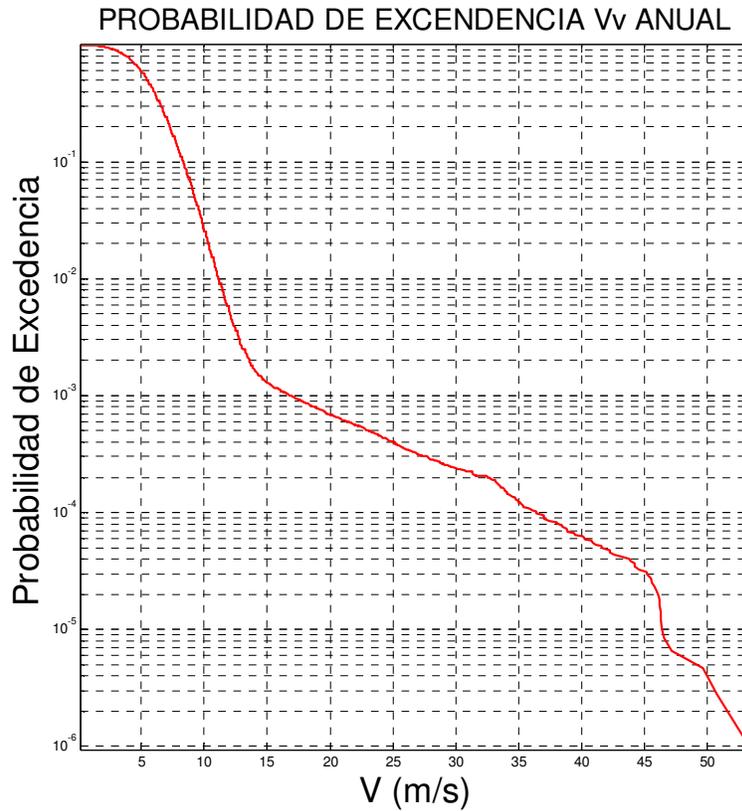


Figura 6.22 Anual

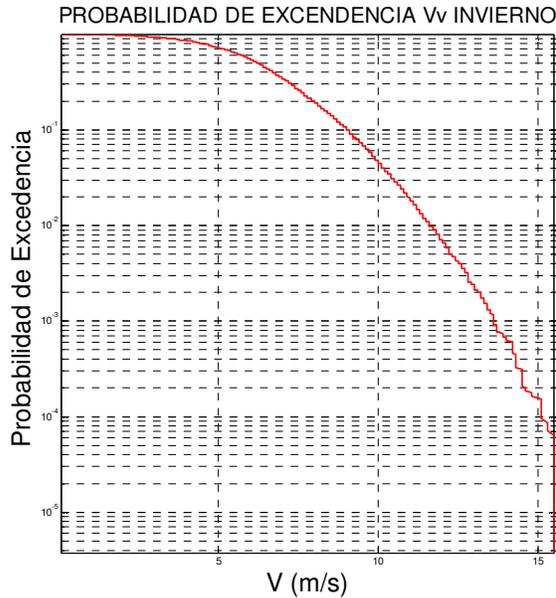


Figura 6.23 Invierno

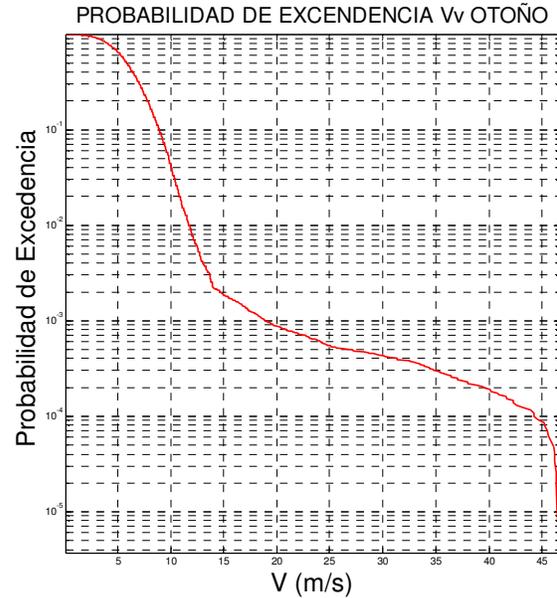


Figura 6.24 Otoño

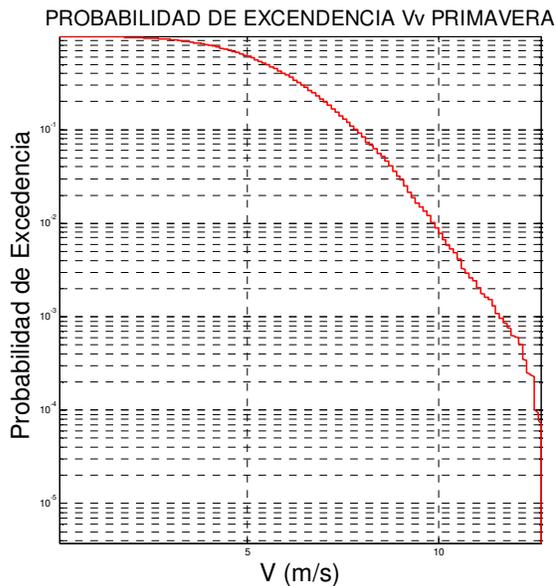


Figura 6.25 Primavera

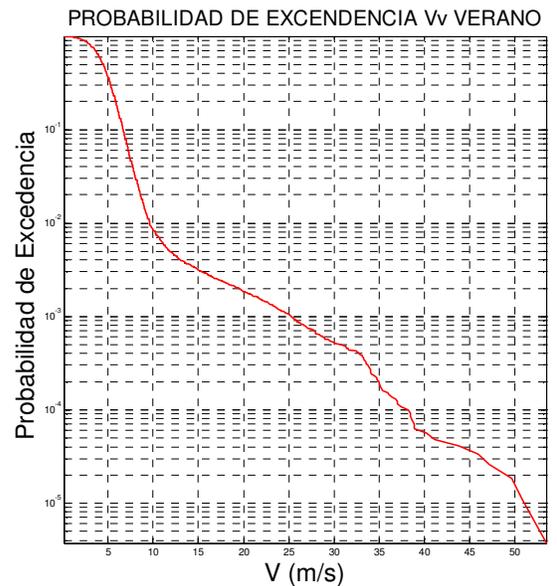


Figura 6.26 Verano

Luego de obtener el resultado de la probabilidad de excedencia para viento sostenido, se observa que el comportamiento de esta, es muy similar a la misma presentada para el oleaje, lo que demuestra una respuesta óptima para las condiciones de de mar analizadas, puesto que las intensidades de estos dos parámetros se comportan de una manera directamente proporcional.

6.1.2.2 Rosas de viento

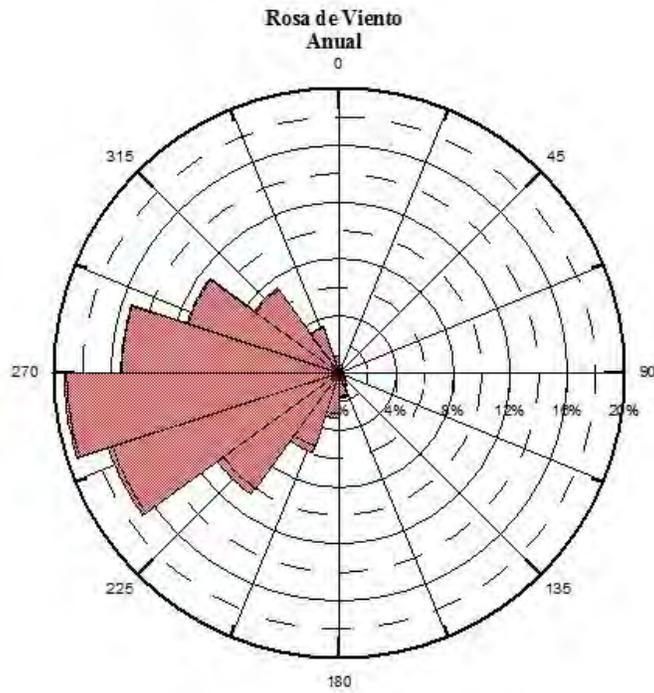


Figura 6.27 Anual

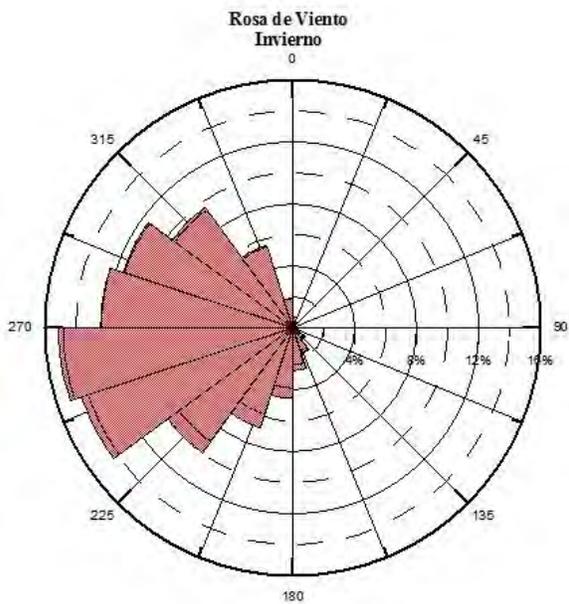


Figura 6.28 Invierno

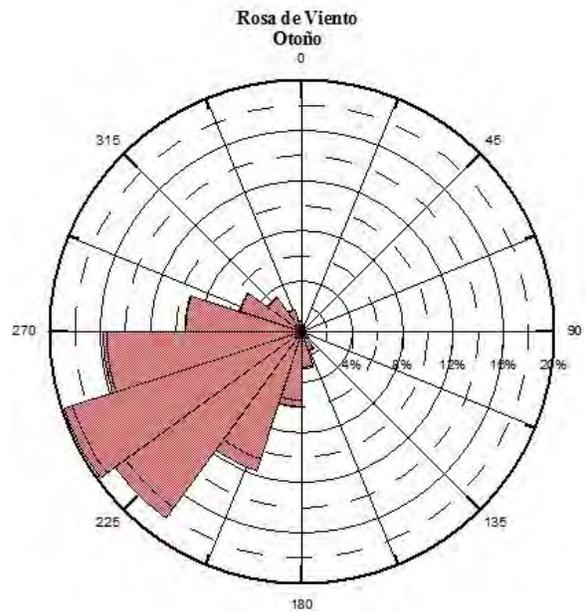


Figura 6.29 Otoño

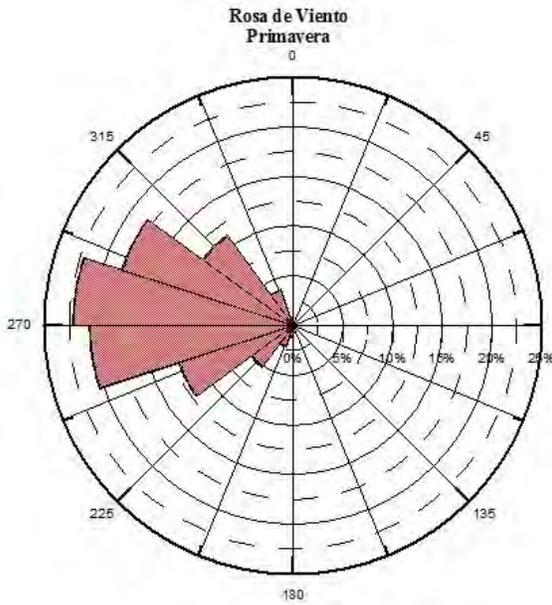


Figura 6.30 Primavera

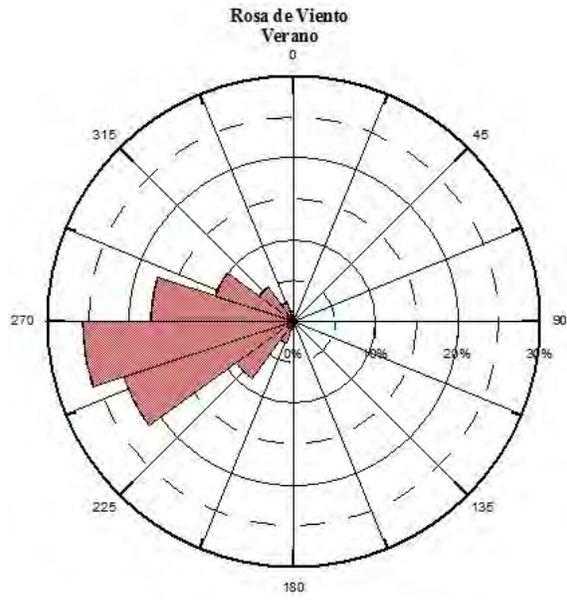


Figura 6.31 Verano

Con referencia al análisis del viento, las direcciones predominantes vienen del oeste-suroeste, comportándose de una manera opuesta a las mismas evaluadas para las condiciones de oleaje. Con excepción del comportamiento en primavera, tanto el análisis anual como el estacional muestran la misma tendencia.

6.1.2.3 Régimen extremal de velocidades de vientos sostenidos

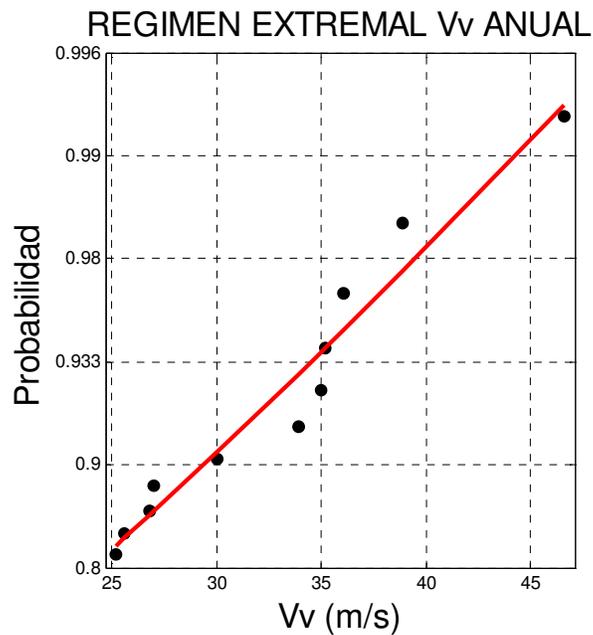


Figura 6.32 Anual

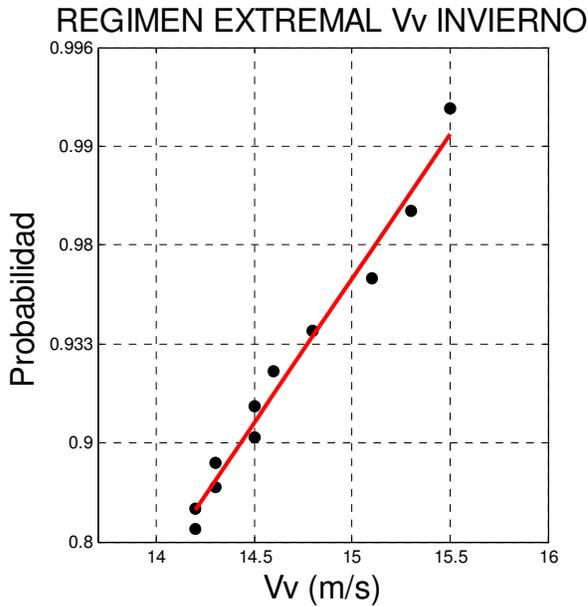


Figura 6.33 Invierno

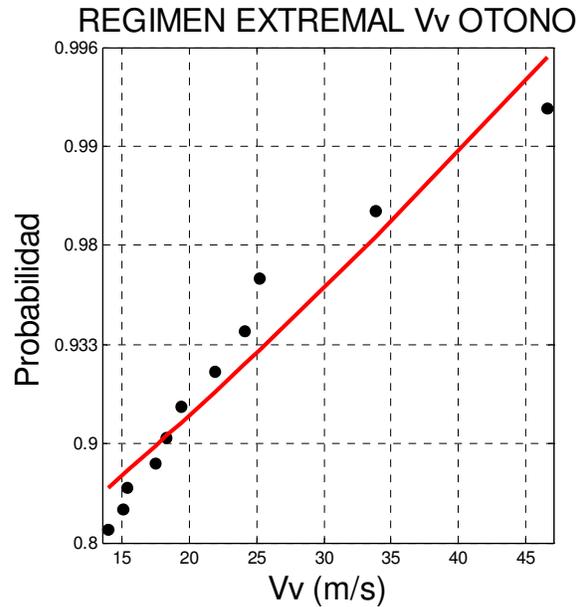


Figura 6.34 Otoño

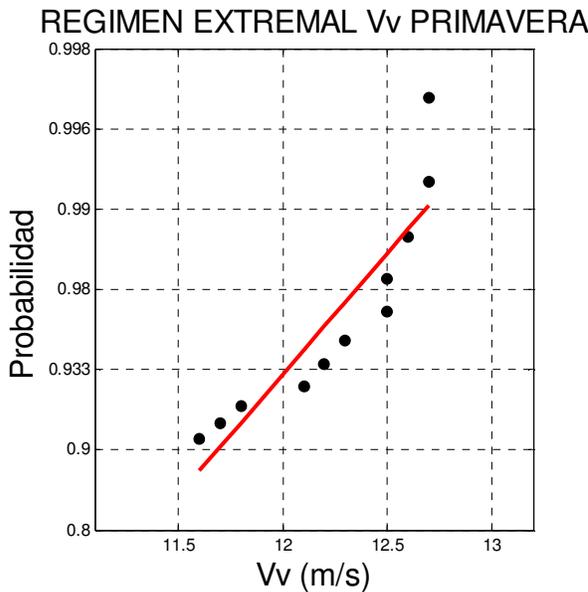


Figura 6.35 Primavera

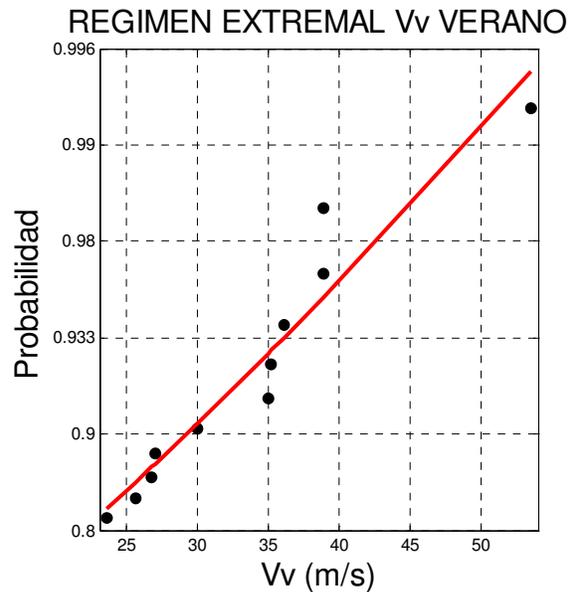


Figura 6.36 Verano

Con el análisis del régimen extremo para vientos sostenidos, se reiteran los periodos de ocurrencia correspondientes a los huracanes, ya que, debido a la presencia de estos, encontramos los valores más altos de velocidad de viento en la estación de verano, la cual alcanza los 55 km/h aproximadamente. Por ende, encontramos que las estaciones más recomendables para realizar cualquier tipo de actividad marítima se encuentran en primavera e invierno

6.1.3 Análisis de tormentas

Se presentan la duración media de tormentas, alturas de ola significativa y tormentas normalizadas por mes y por año, con base en un análisis anual y otro por estaciones, realizado durante los 61 años de análisis. Finalmente se presenta la evolución temporal de altura de ola significativa de la última década, comprendida entre el año 2000 y el año 2009, (ver anexo 1).

6.1.3.1 Duración media de tormentas

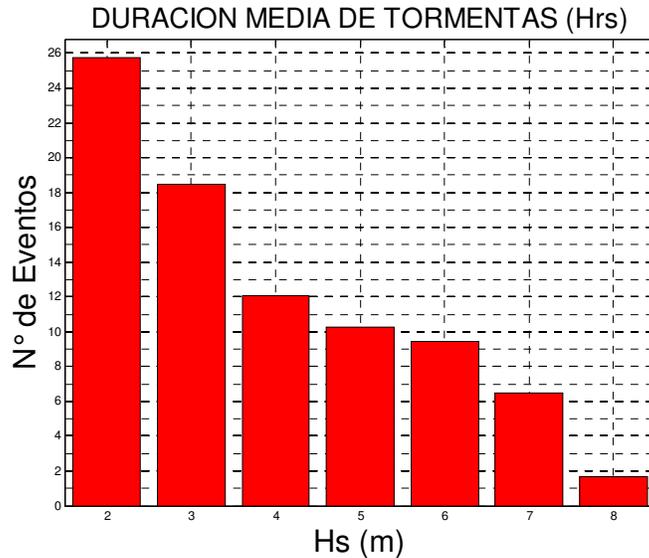


Figura 6.37

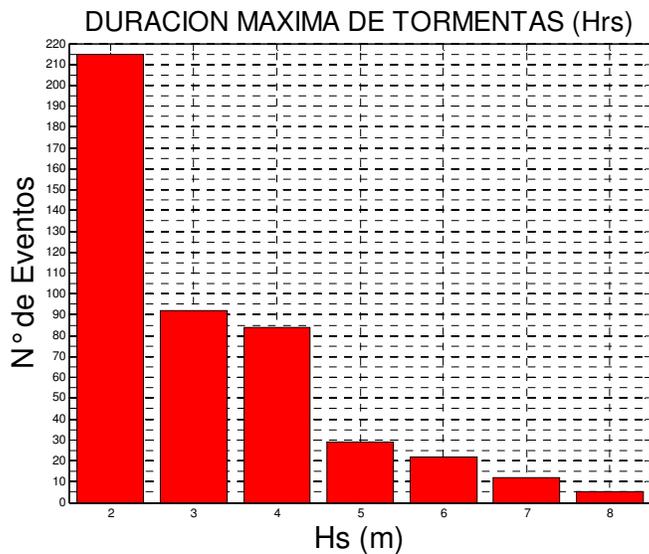


Figura 6.38

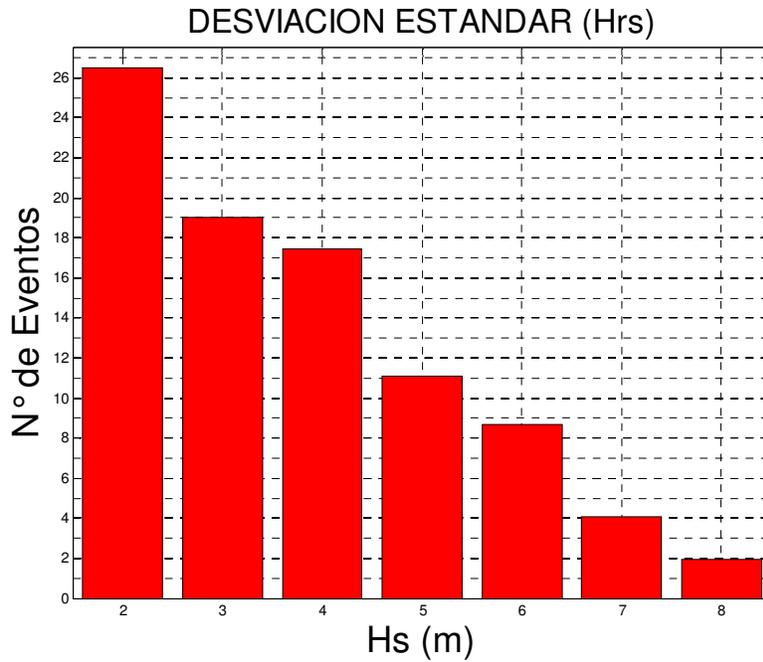


Figura 6.39

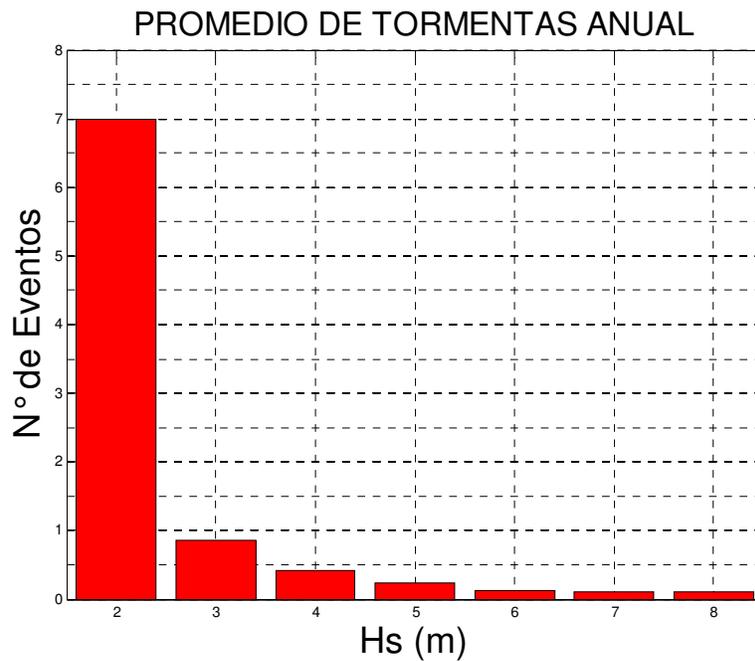


Figura 6.40

Debido a que la magnitud de un temporal está compuesta por su intensidad y el tiempo de incidencia de este, se realiza la evaluación de las tormentas, caracterizando la duración media y máxima de ellas, la desviación estándar y el promedio anual, con base en la altura de ola y clasificadas cada metro

6.1.3.2 Presentación de alturas de ola significativa por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 2 m POR MESES

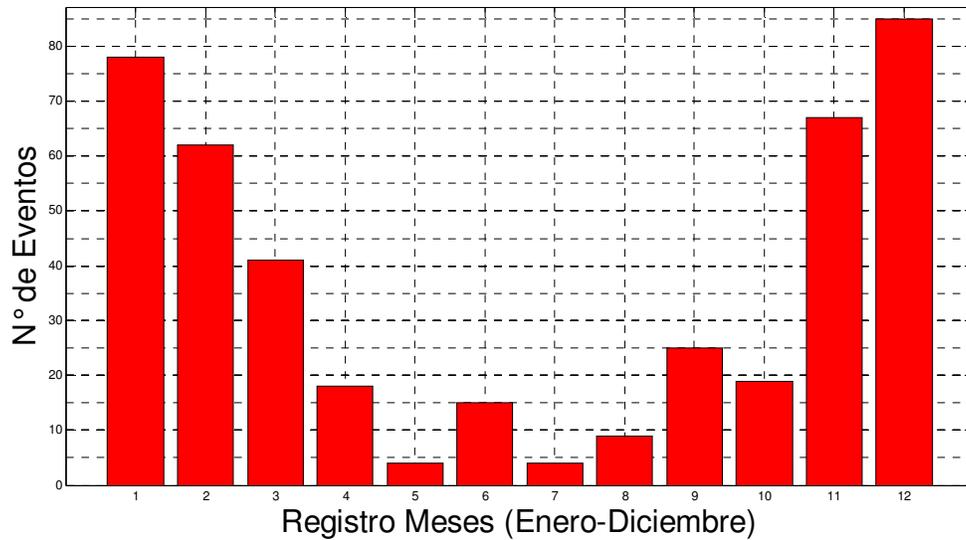


Figura 6.41 Mayores a 2 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR MESES

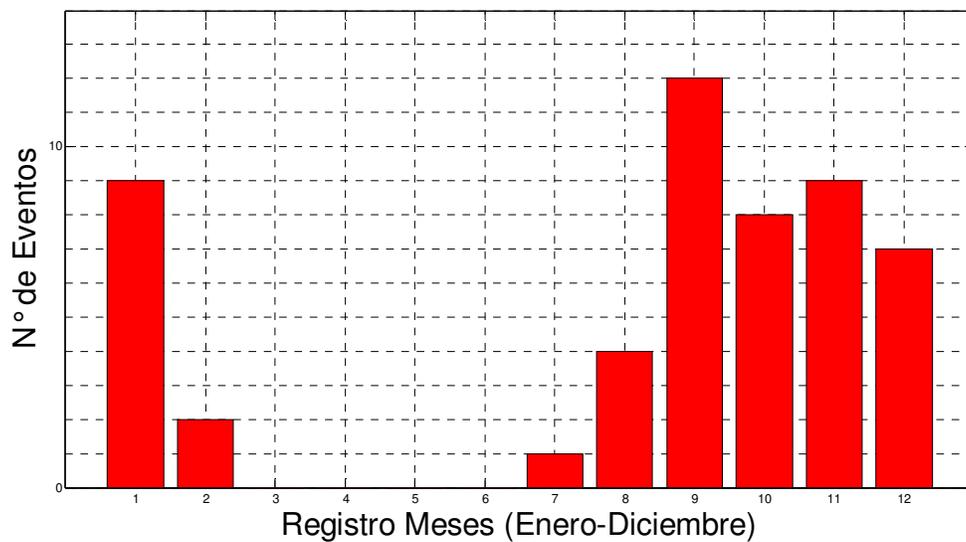


Figura 6.42 Mayores a 3 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR MESES

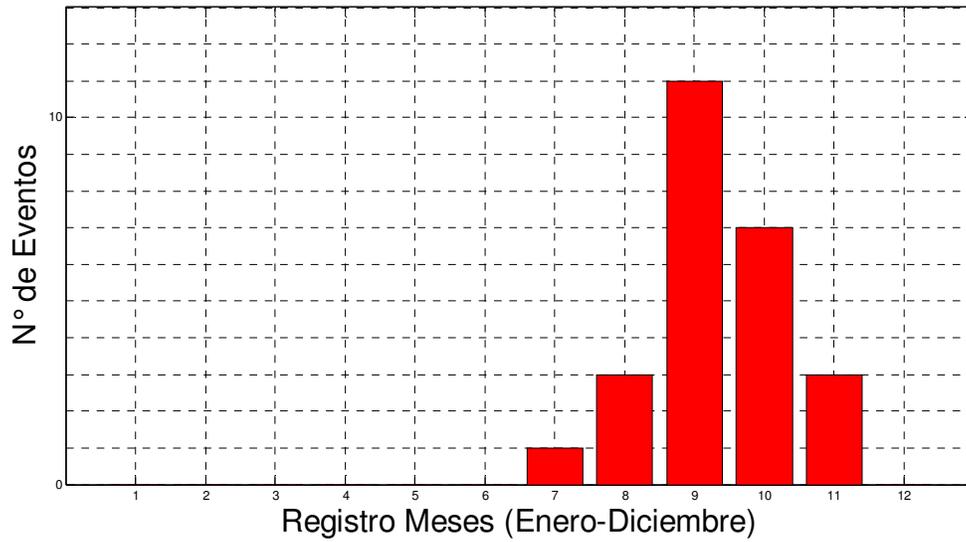


Figura 6.43 Mayores a 4 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR MESES

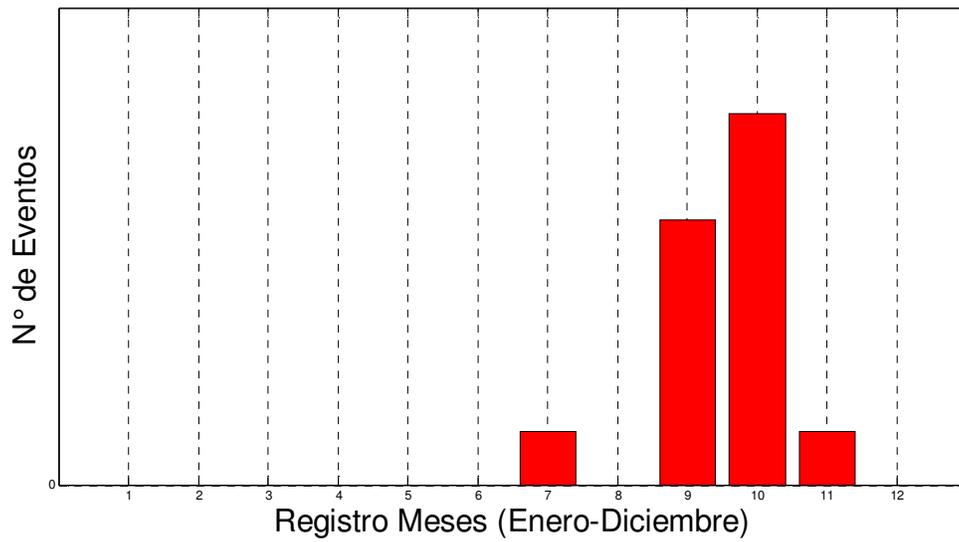


Figura 6.44 Mayores a 5 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR MESES

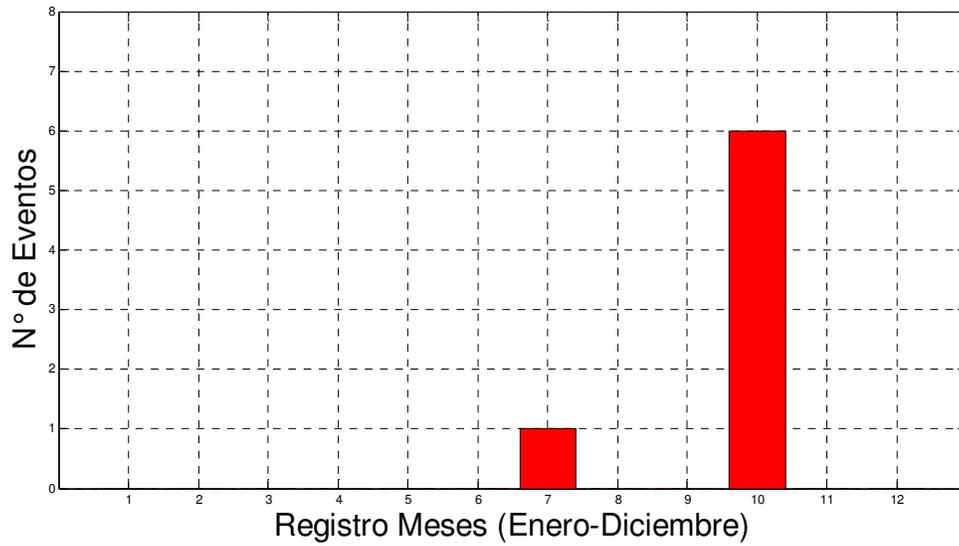


Figura 6.45 Mayores a 6 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR MESES

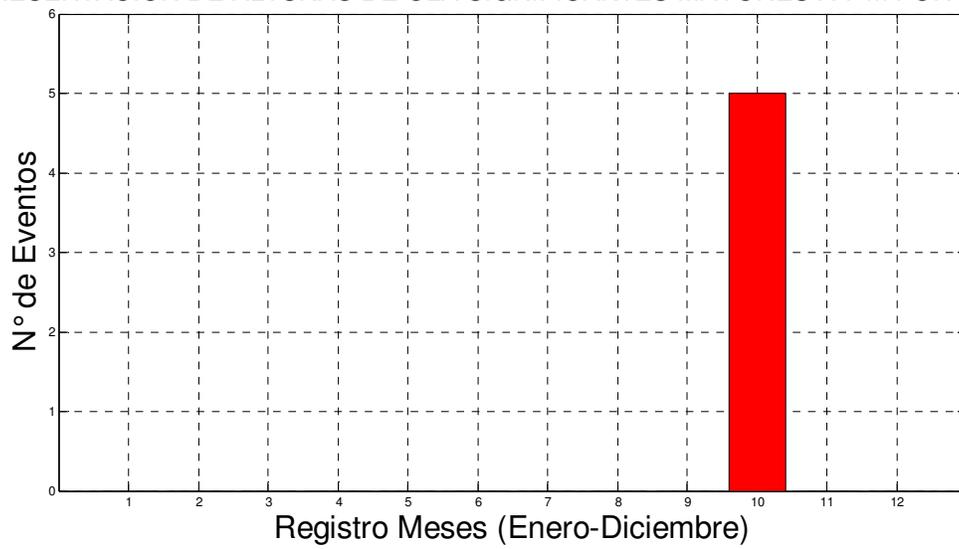
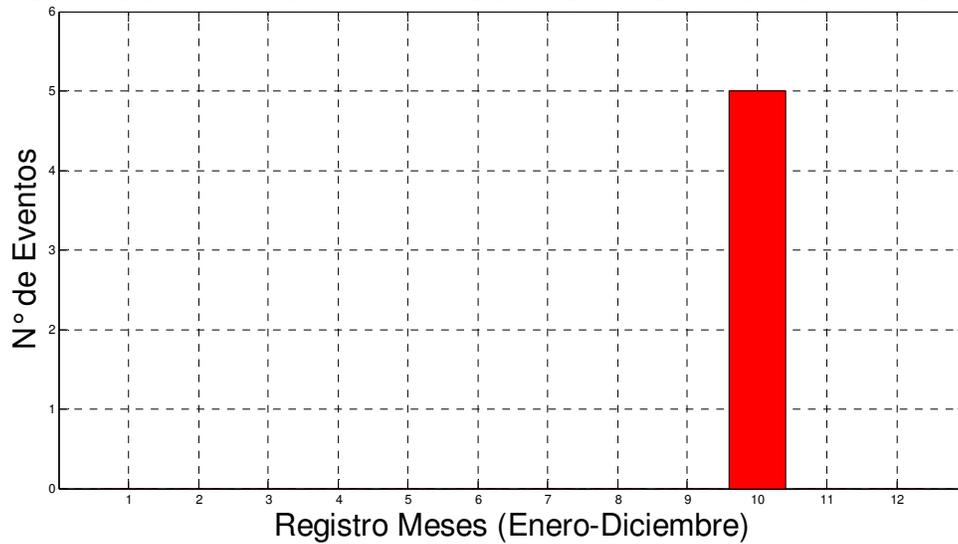


Figura 6.46 Mayores a 7 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR MESES



6.47 Mayores a 7 m

Se realizó un análisis por meses, obteniendo el número total de tormentas de todo el registro, asociadas directamente con su altura de ola. Se obtiene entonces una herramienta para poder predecir cuál es el comportamiento del clima marítimo en todos los meses del año, en lo que refiere a la presentación de tormentas.

6.1.3.3 Presentación de tormentas normalizadas por mes

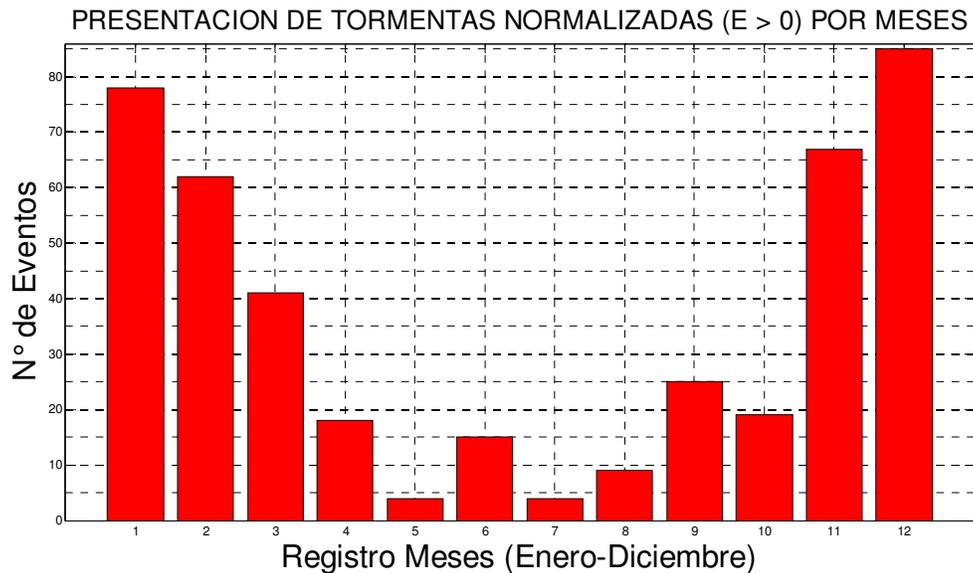


Figura 6.48 Energía mayor a 0

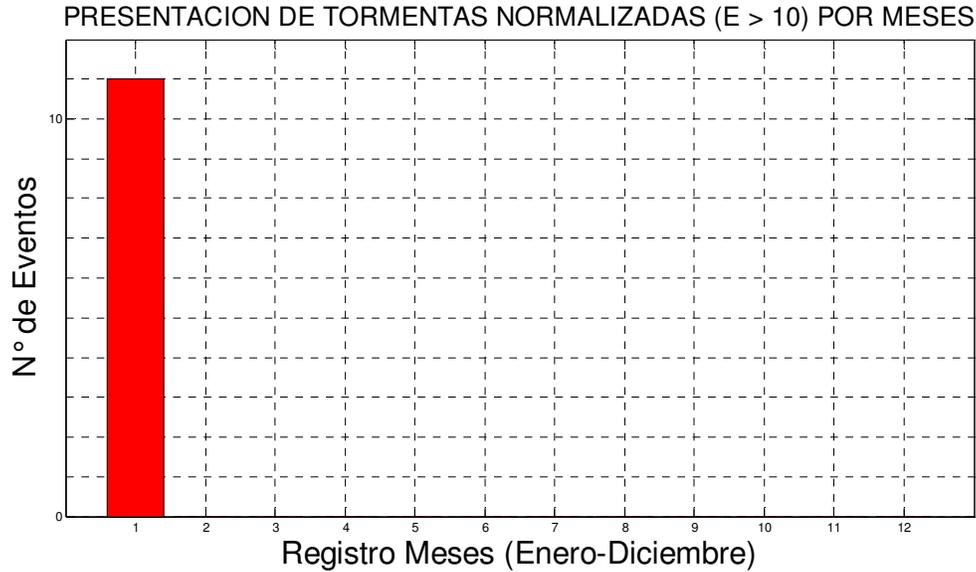


Figura 6.49 Energía mayor a 10

De la misma manera que se caracterizaron las tormentas dependiendo del valor de altura de ola, se realizó el análisis para la energía normalizada de tormenta. Se realiza este análisis para conocer la energía generada por cada temporal, para de esta manera continuar con una investigación de las acciones históricas de mayor contenido energético

6.1.3.4 Presentación de alturas de ola significativa por año

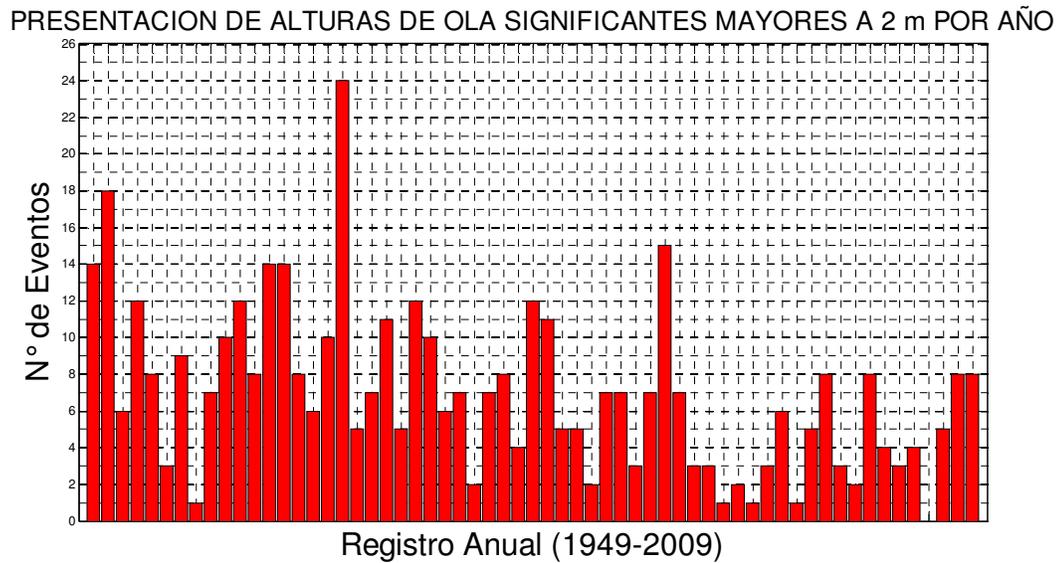


Figura 6.50 Mayores a 2 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR AÑO

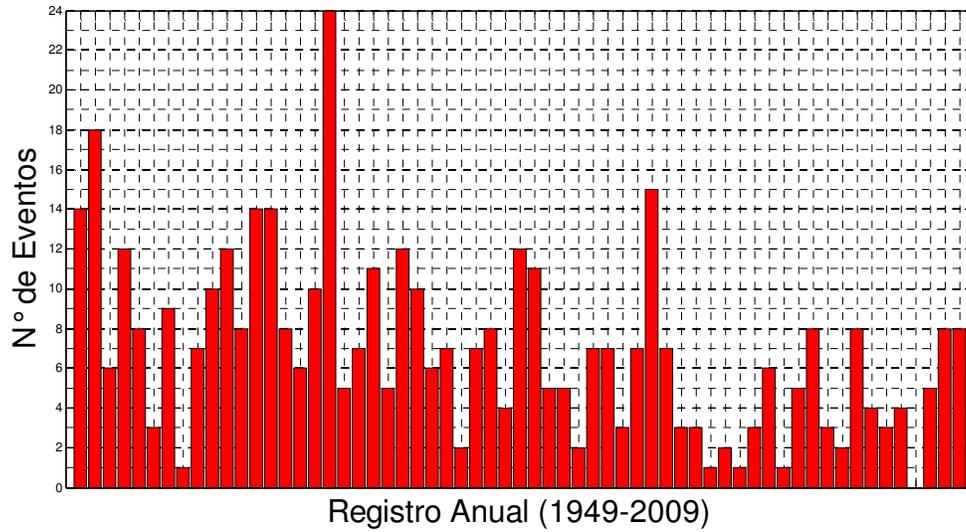


Figura 6.51 Mayores a 3 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR AÑO

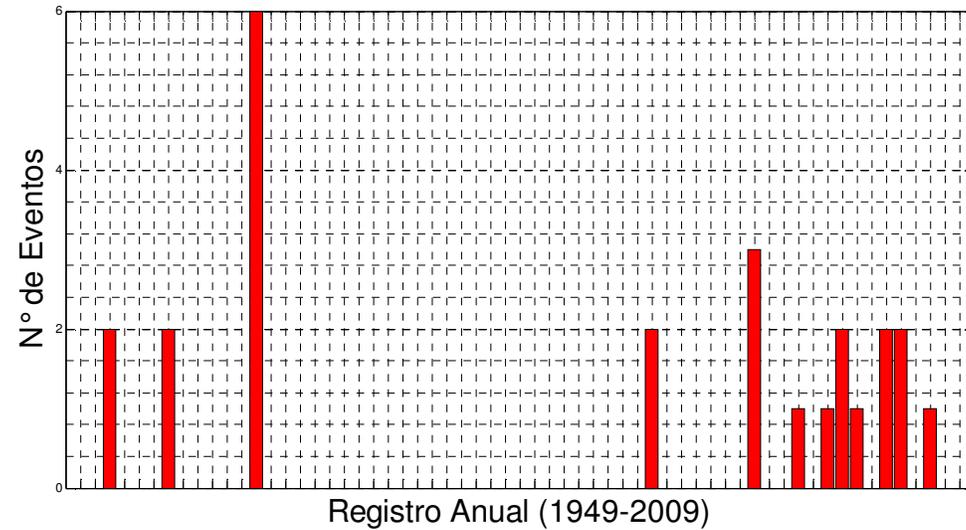


Figura 6.52 Mayores a 4 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR AÑO

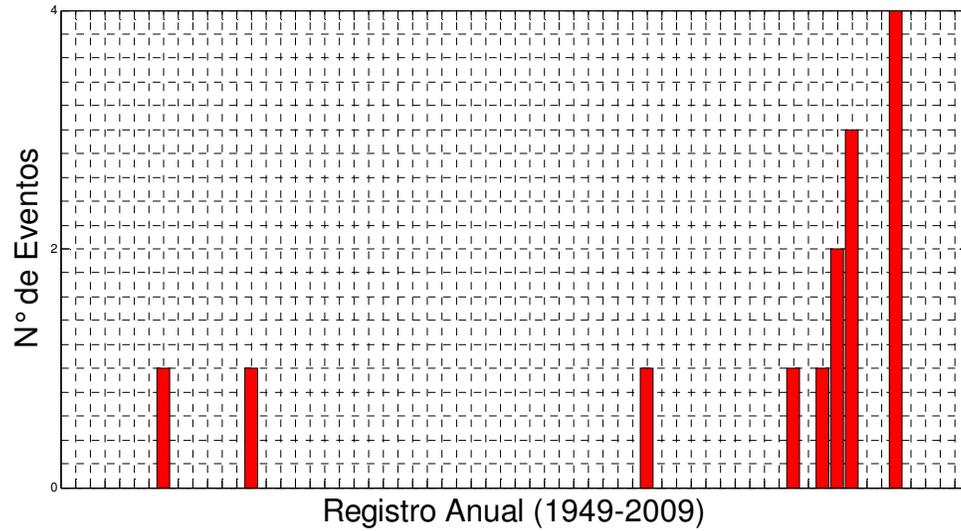


Figura 6.53 Mayores a 5 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR AÑO

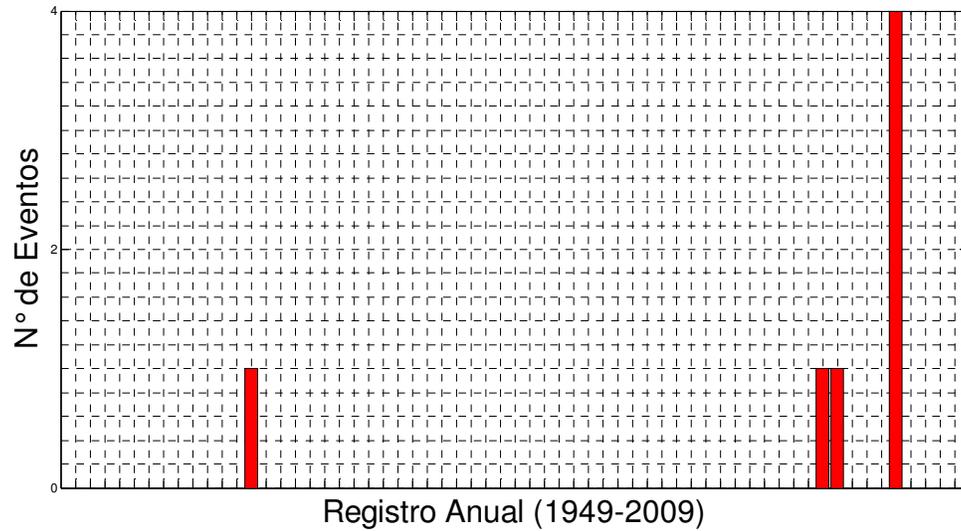


Figura 6.54 Mayores a 6 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR AÑO

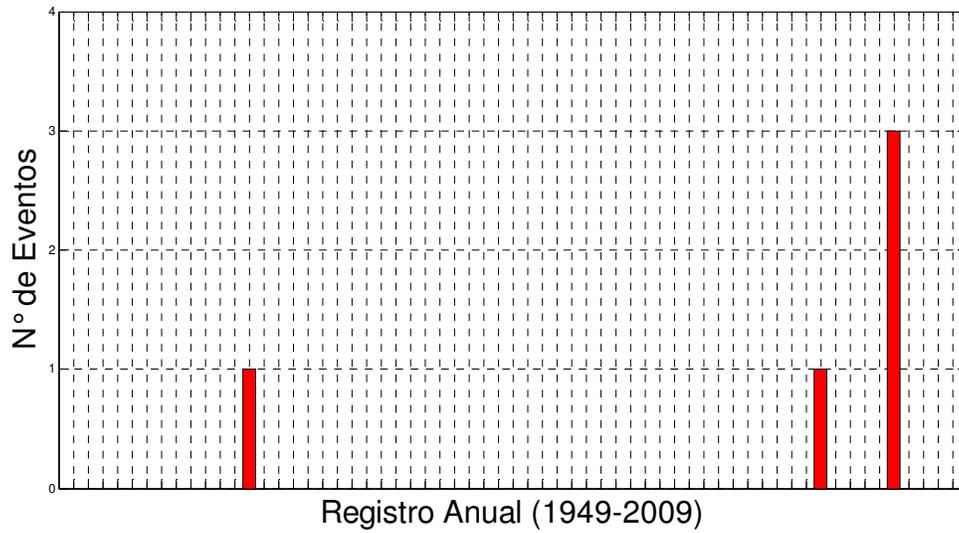
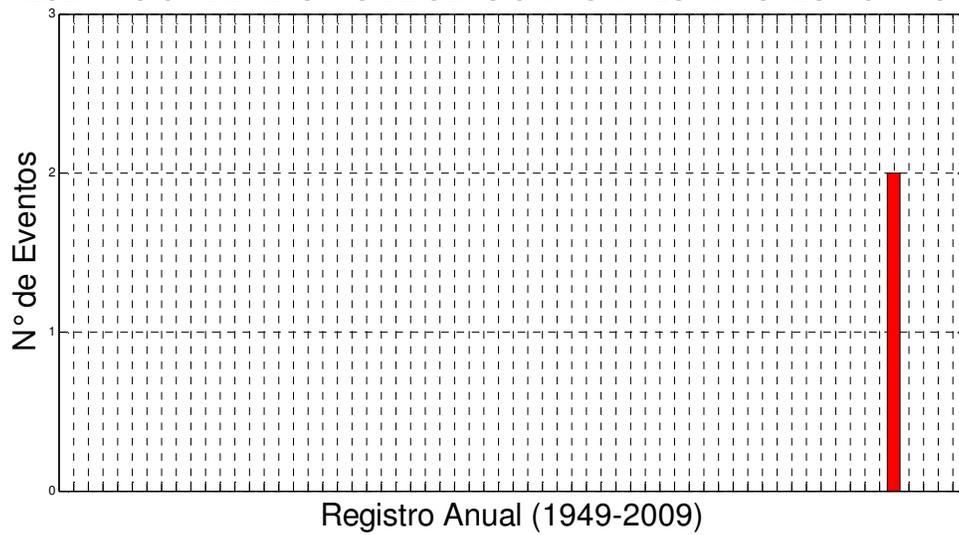


Figura 6.55 Mayores a 7 m

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 8 m POR AÑO



6.56 Mayores a 8 m

6.1.3.5 Presentación de tormentas normalizadas por año

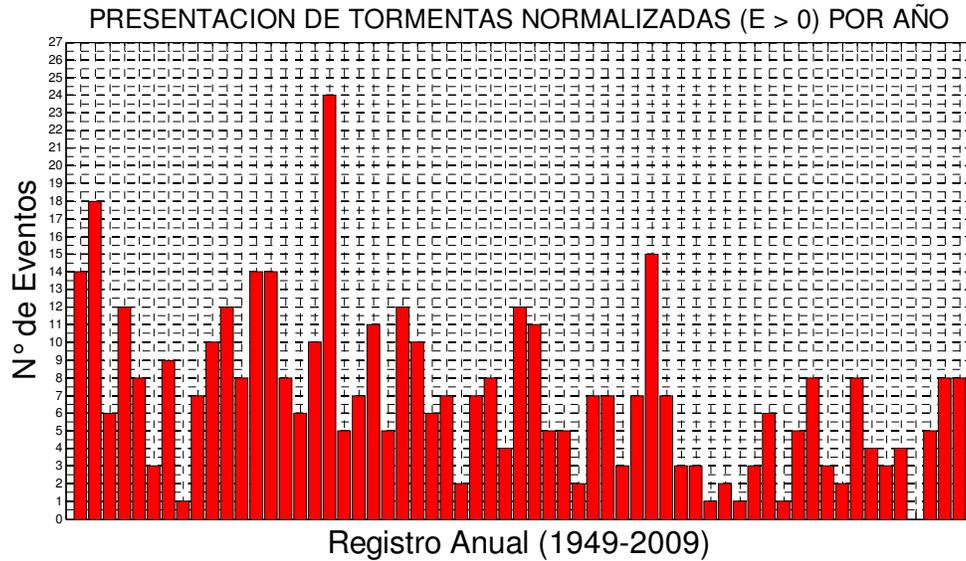


Figura 6.57 Energía mayor a 0

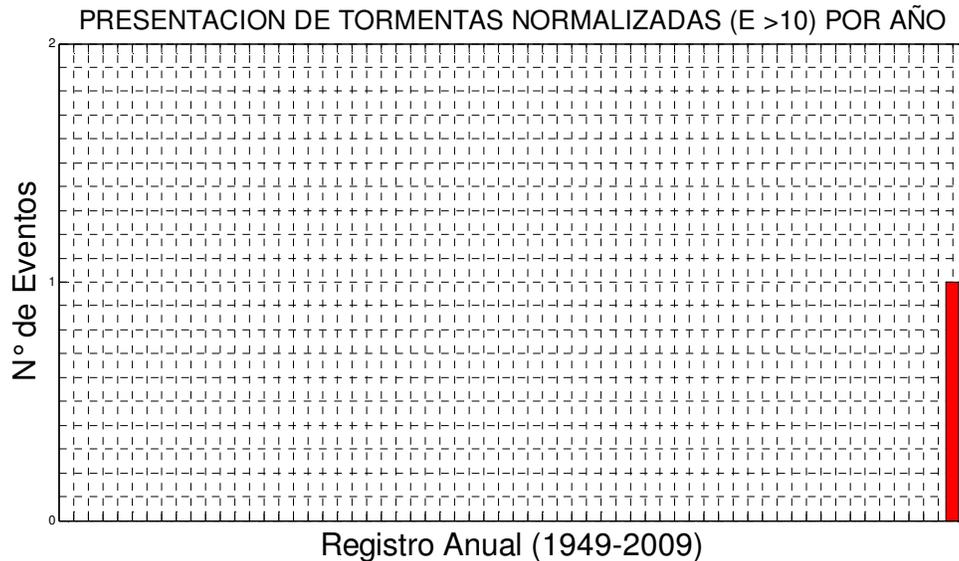


Figura 6.58 Energía mayor a 10

Para los análisis de tormentas por año, el fundamento es el mismo utilizado para los realizados por mes, la única característica que varía es la descripción de los eventos. En este análisis se toman todos los datos del registro y se analizan para cada uno de los 61 años del reanálisis.

7 CONCLUSIONES

Mediante la implementación de modelos numéricos de generación y propagación de oleaje y con base en la metodología explicada se realizó un análisis estadístico, fundamentado en el análisis de eventos extremales, con el fin de caracterizar las condiciones del clima marítimo de los últimos 61 años.

La metodología aplicada para la consecución de este trabajo es totalmente innovadora en lo que concierne al continente americano, haciendo referencia a la implementación de dos modelos de tercera generación WAM y SWAN y al modelo de segunda generación HURAC, dándole un valor agregado con la hibridación del WAM y el HURAC, lo cual se convierte en un método único, para la obtención de los datos del reanálisis de clima marítimo.

La integración de los fenómenos analizados, partiendo de los resultados arrojados por los modelos, se basa en estimar la duración e intensidad de los eventos extremales y el tiempo en el que uno de ellos pueda repetirse. Se hizo un énfasis en estos eventos, teniendo en cuenta que para condiciones normales, las costas presentan un equilibrio aceptable, mientras que para los eventos extremales no sucede de esta manera, máxime la intervención del hombre en el desarrollo de las zonas costeras, en cuanto la infraestructura generada por el turismo principalmente.

En el análisis de las rosas de oleaje, se puede observar claramente que la dirección predominante de incidencia del oleaje para esta zona se encuentra entre la zona este, nor-este y sur-este, con lo cual se fundamenta la elección de las funciones de transferencia para la dirección del oleaje.

Analizando la probabilidad de excedencia de oleaje, se nota claramente que el rango de altura de oleaje, basados en las funciones de transferencia, es un rango acertado, ya que para la zona ninguna de las alturas rebasó el límite establecido, lo que afirma una buena elección en los límites de las funciones.

Primavera es la estación del año con las mejores condiciones para las costas de la Península de Yucatán debido a que las alturas de ola de los temporales no superan los 6 m. A raíz de esto las costas pueden presentar un efecto de recuperación, para albergar a la estación de verano.

Observando el comportamiento de las condiciones del clima marítimo en la estación de verano, en donde se presentan los eventos que ostentan las circunstancias más intensas, se observa una buena correlación entre los datos obtenidos mediante la modelación y los datos recopilados en campo, obteniendo así una validación de la metodología empleada.

En el otoño no se puede comparar la magnitud de los eventos contra los de la estación de verano pero se puede observar que debido a la influencia de los

vientos que afectan la zona en esta época, tiene temporales más fuertes que primavera e invierno.

Se puede concluir que es posible analizar la distribución de la duración asociada a cada tormenta para la zona de estudio, basándonos en la caracterización del oleaje y el viento.

Los límites establecidos para caracterizar las duraciones asociadas a diferentes valores de energía en eventos extremos están dados para 0 y 10 unidades de energía normalizada, lo cual muestra una buena elección de los umbrales, ya que como se puede observar en las gráficas de energía normalizada, solo en una ocasión fue superado el umbral de 10.

Los resultados obtenidos en este trabajo están calificados para determinar el clima marítimo a lo largo de la Península de Yucatán, basándose en la clasificación realizada por los análisis de oleaje, viento y tormentas, brindando una herramienta de trabajo para el desarrollo de cualquier proyecto de tipo costero, con el objetivo de suplir las carencias de información que se encuentran acerca de las condiciones del clima marítimo y con el fin de garantizar un óptimo desempeño en proyectos marítimos, tomando como base la implementación de modelación numérica y el análisis estadístico.

En la culminación del trabajo realizado, se incluyen los resultados de la estadística a largo plazo de la caracterización del oleaje y el viento. La información proporcionada es:

- a) Alturas y periodos significantes del oleaje, con su dirección asociada, así como la velocidad y dirección del viento para cada estado de mar, correspondiente a cada año del intervalo de tiempo que se ha evaluado el cual comprende un total de sesenta y un (61) años, desde 1949 hasta el 2009.
- b) Porcentaje de ocurrencia o frecuencia para datos de oleaje y viento; probabilidades de excedencia de altura y periodo de ola y viento; duraciones y cuantificaciones de las alturas de ola significante mayores.

La información y la base de datos que se proporcionan, pueden ser empleados para proyectos de diseño, planeación y operación de estructuras marinas y portuarias; para la estimación de procesos costeros en playas; cuantificación de energía de oleaje; estudios ambientales y análisis de riesgos.

8 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En la actualidad se cuenta con muy poca información de campo relacionada con las condiciones del clima marítimo en las costas mexicanas, es por esto que se hace necesario la aplicación de los modelos de generación y propagación de oleaje, por lo cual, el presente trabajo es un inicio para suplir estas falencias, tomándolo como base para llevar a cabo la determinación de los estados de mar de todo el litoral mexicano.

Es conveniente continuar con este tipo de estudios, para lograr la caracterización de las condiciones marítimas de los litorales, con el fin de localizar los puntos y zonas en donde se pueda desarrollar cualquier tipo de explotación, en cuanto a recursos marítimos se refiere.

Tomando como base la anidación de los modelos empleada en este trabajo, se puede desarrollar una metodología que integre las características de los modelos que se implementaron para el desarrollo del presente trabajo.

A ANEXO 1

A.1 Evolución temporal de altura de ola significativa de la última década ESTADO DE MAR 2000

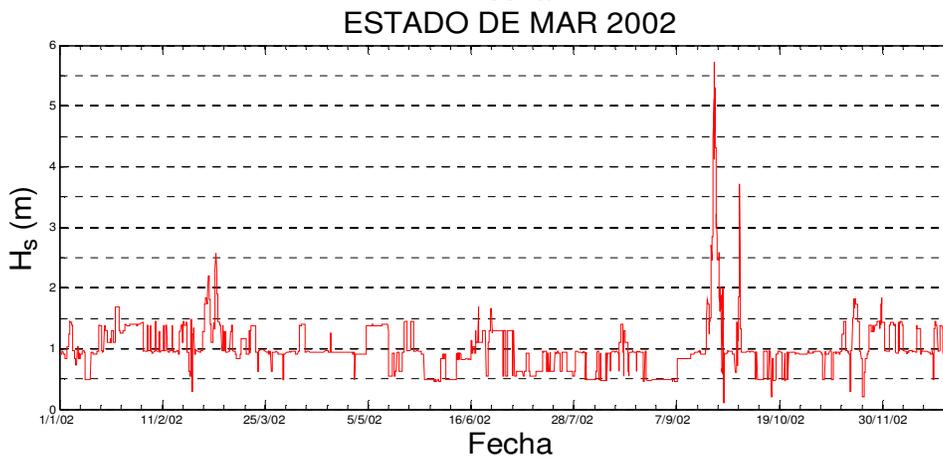
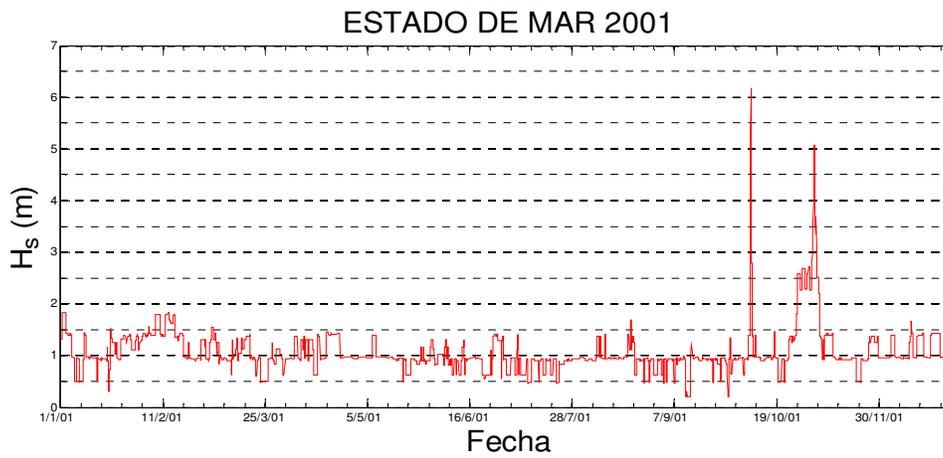
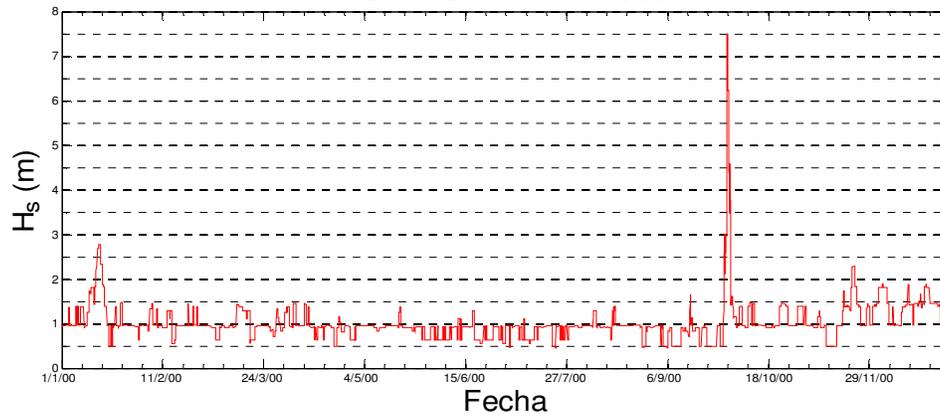


Figura A 1 Estados de mar año 2000-2002

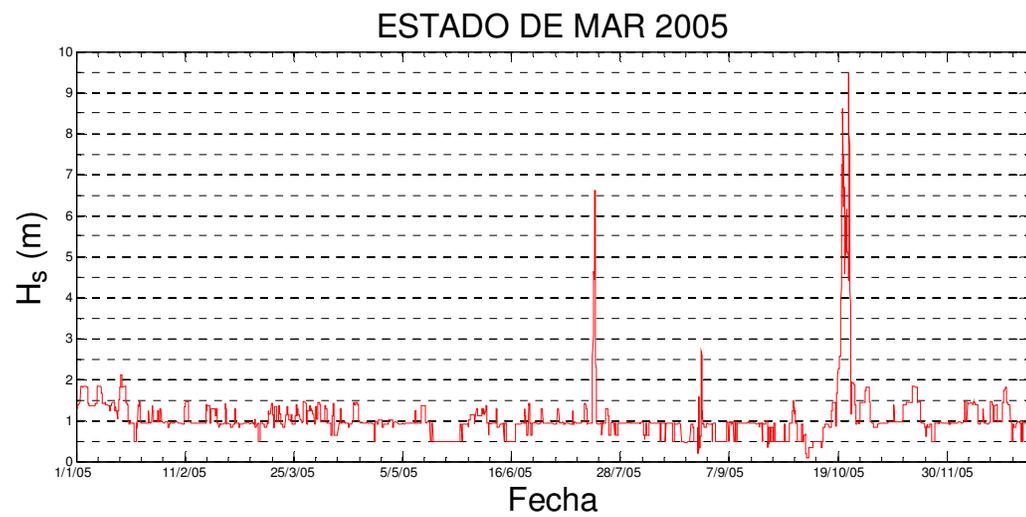
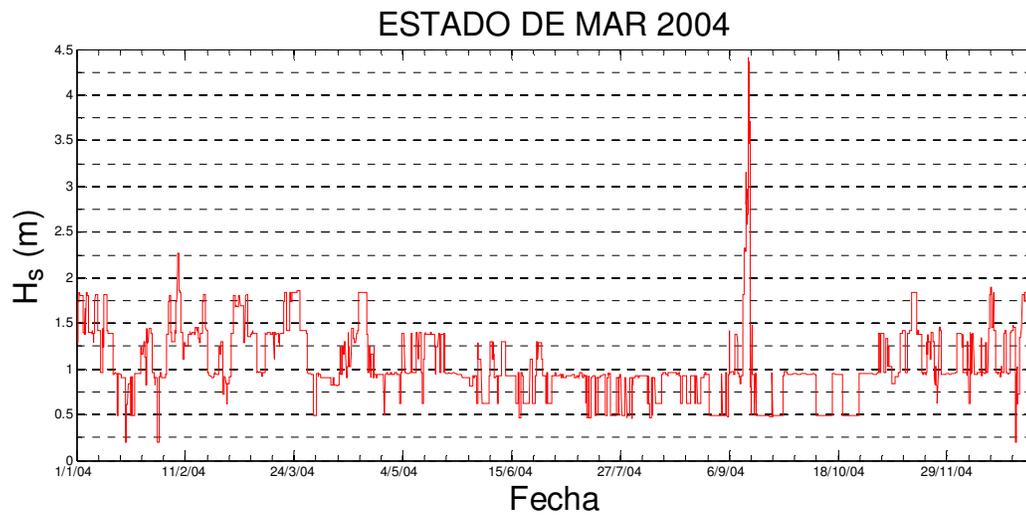
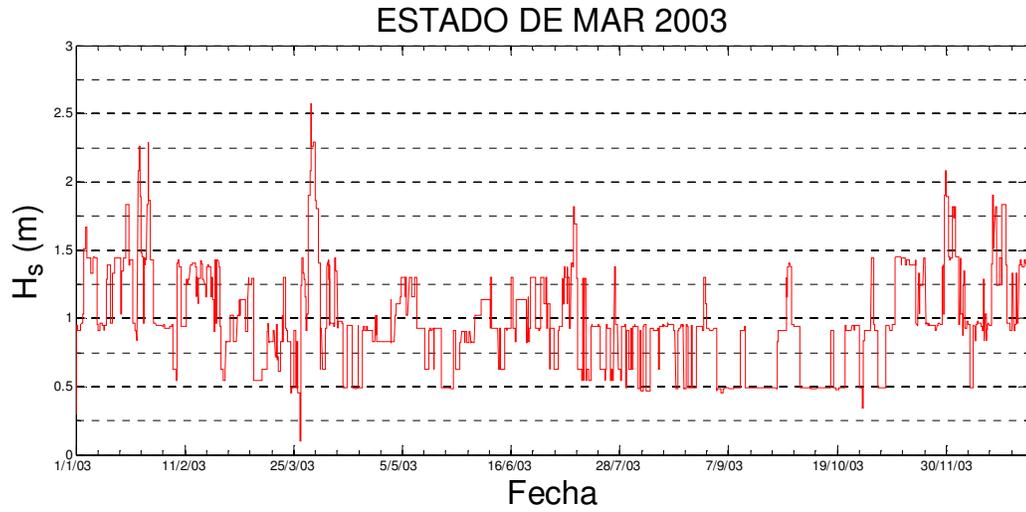


Figura A 2 Estados de mar 2003-2005

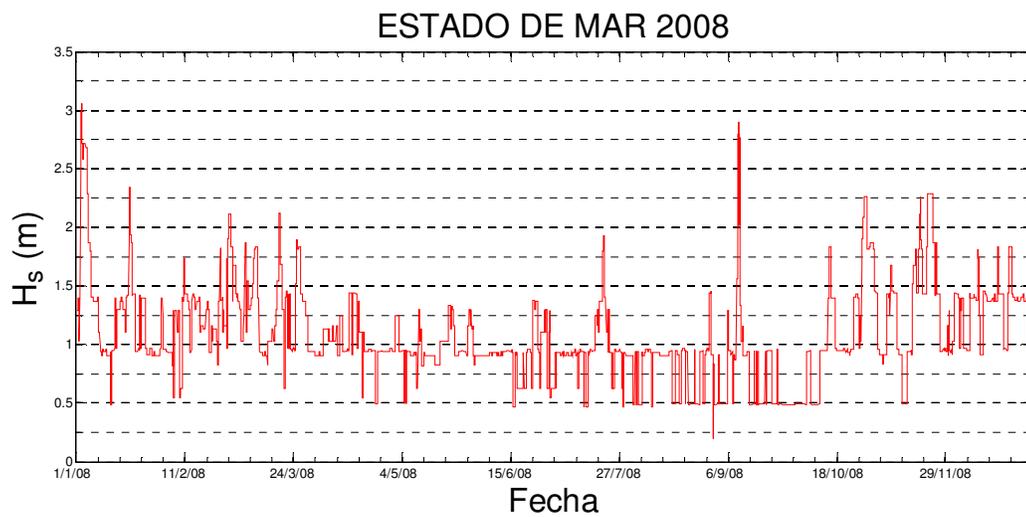
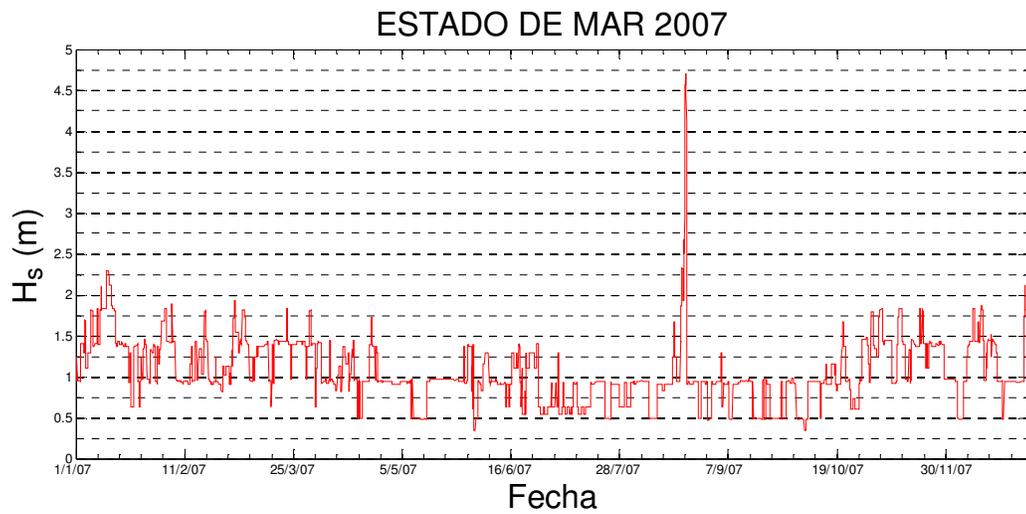
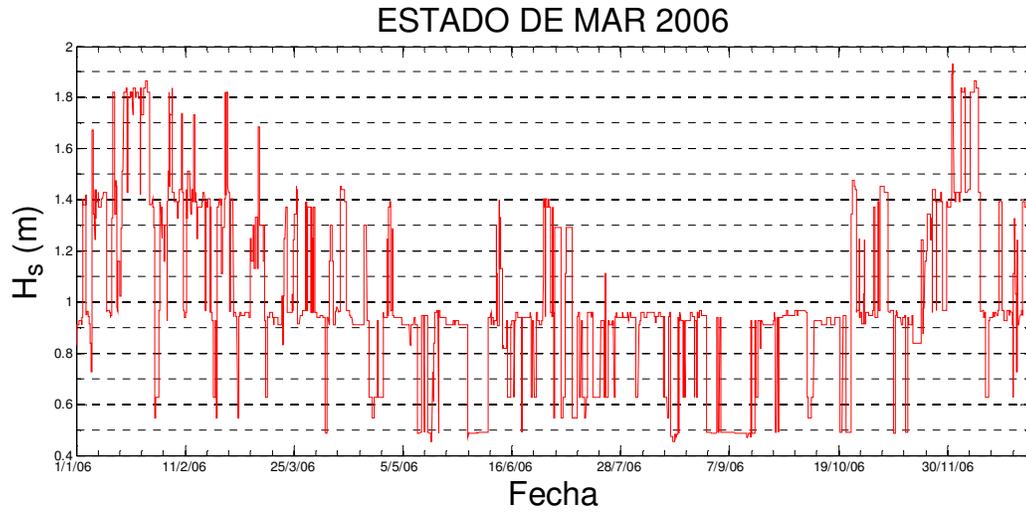


Figura A 3 Estados de mar 2006-2008

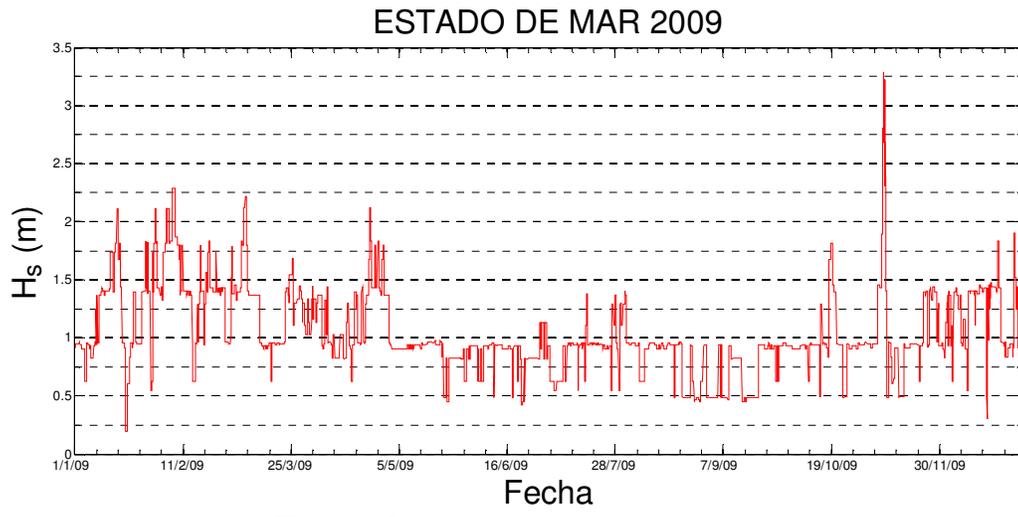


Figura A 4 Estado de mar 2009

ANEXO 2

Resultados Celda N° 2

Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa

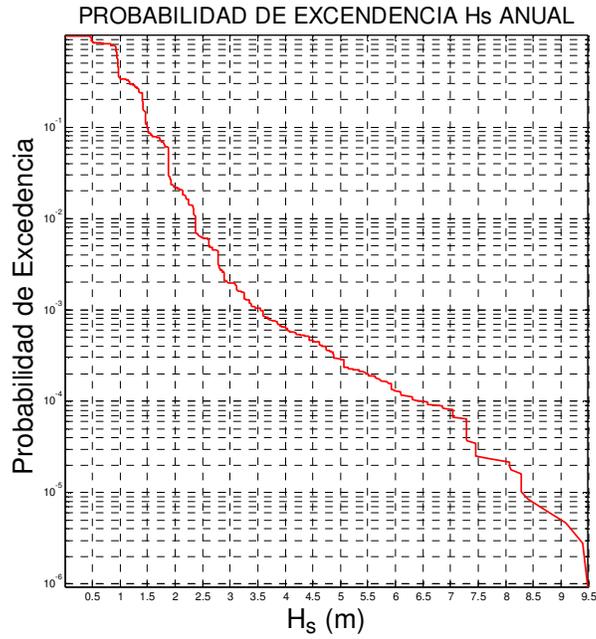


Figura A 5 Probabilidad de Excedencia Anual

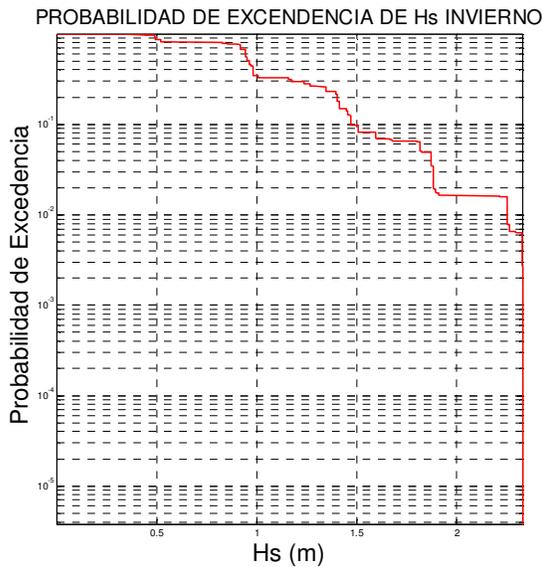


Figura A 6 Probabilidad de Excedencia Invierno

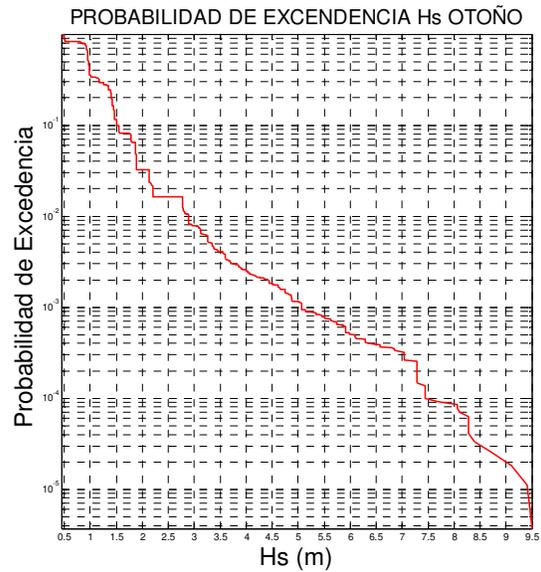


Figura A 7 Probabilidad de Excedencia Otoño

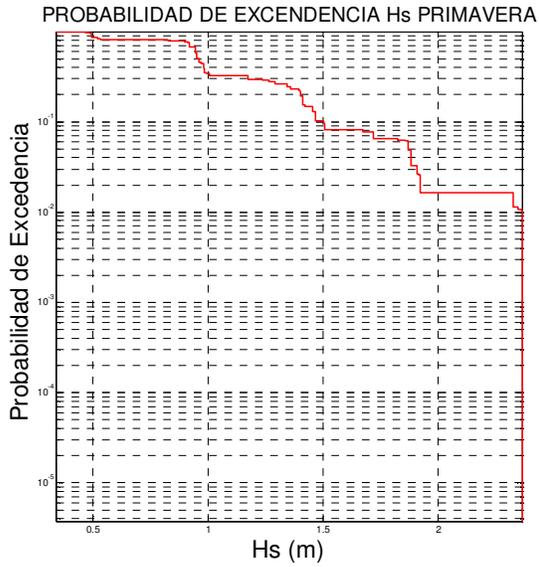


Figura A 8 Probabilidad de Excedencia Primavera

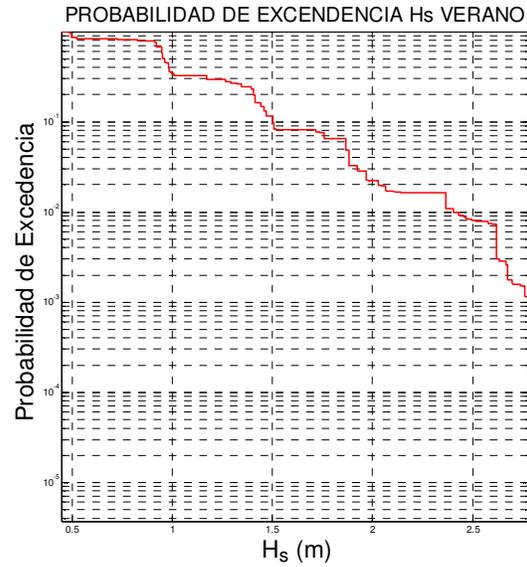


Figura A 9 Probabilidad de Excedencia Verano

Probabilidad de excedencia de periodos medio de ola

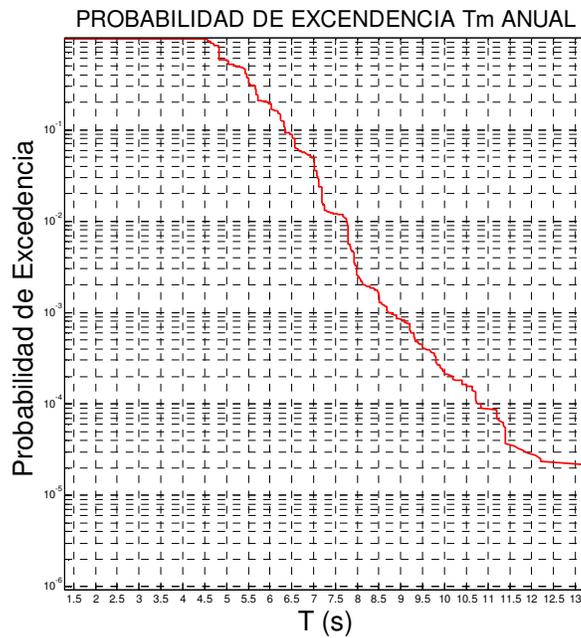


Figura A 10 Probabilidad de Excedencia Anual

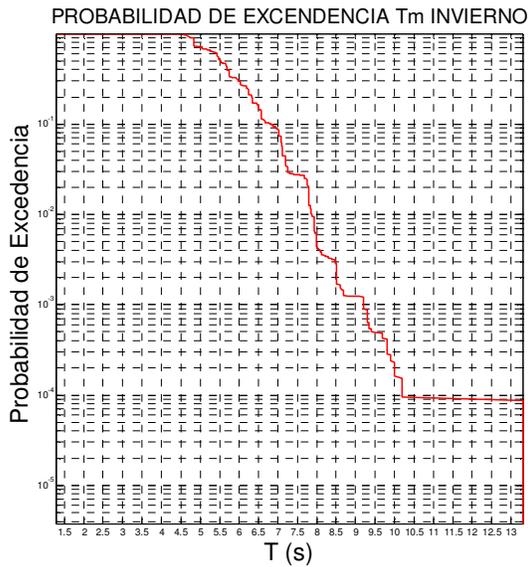


Figura A 11 Probabilidad de Excedencia Invierno

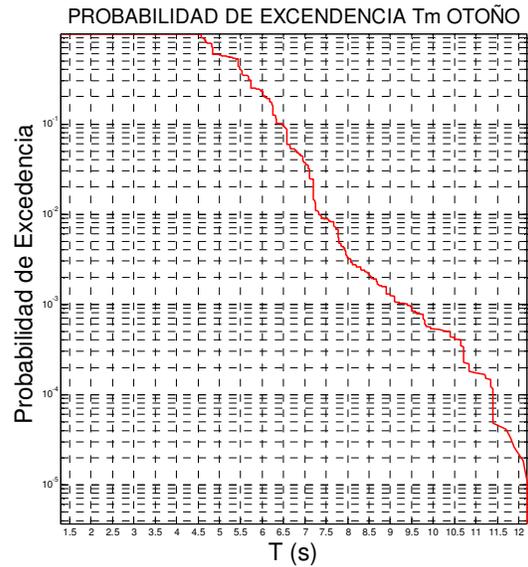


Figura A 12 Probabilidad de Excedencia Otoño

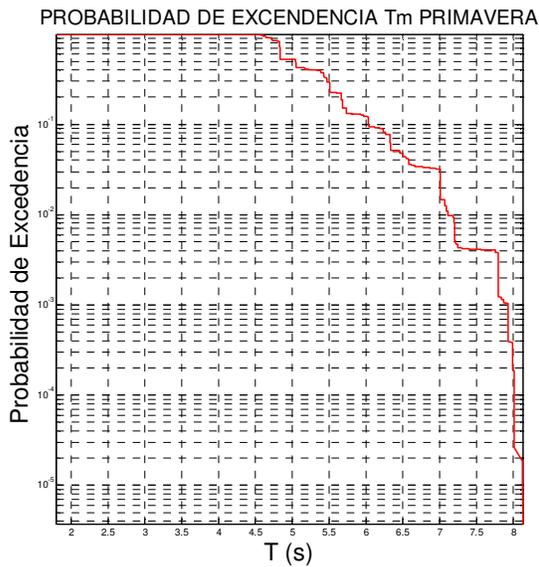


Figura A 13 Probabilidad de Excedencia Primavera

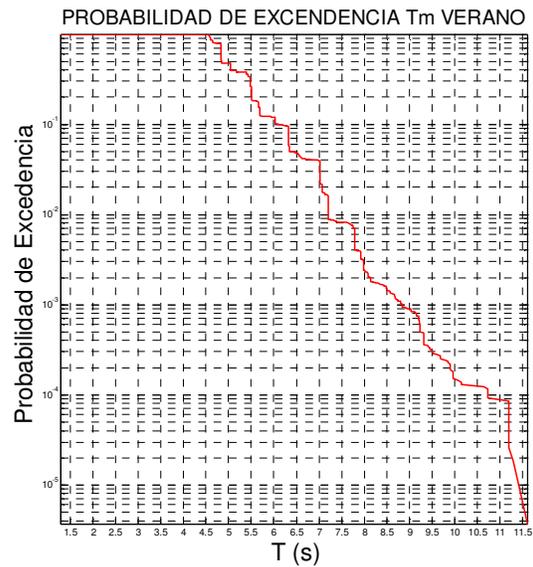


Figura A 14 Probabilidad de Excedencia Verano

Régimen extremal de altura de ola significativa

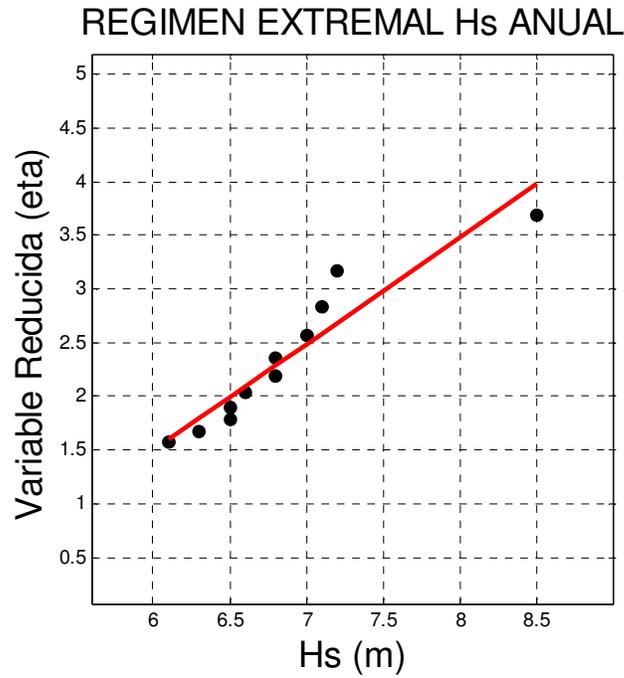


Figura A 15 Régimen Extremal Anual

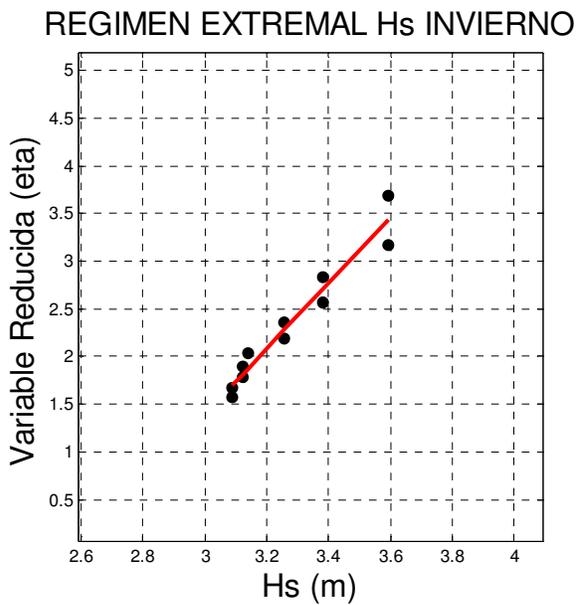


Figura A 16 Régimen Extremal Invierno

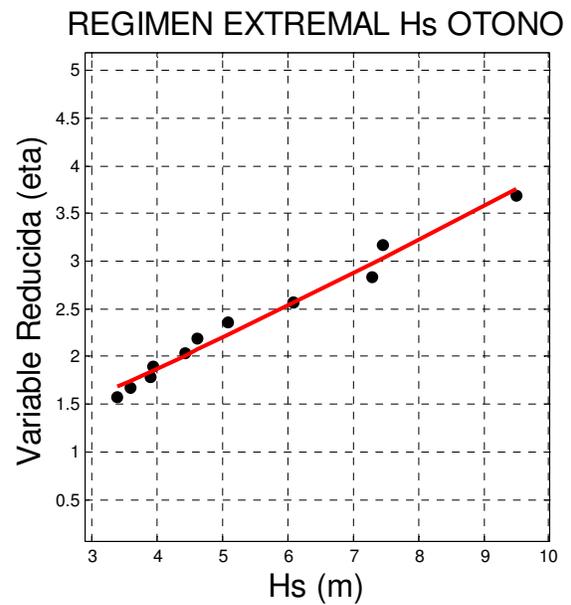


Figura A 17 Régimen Extremal Otoño

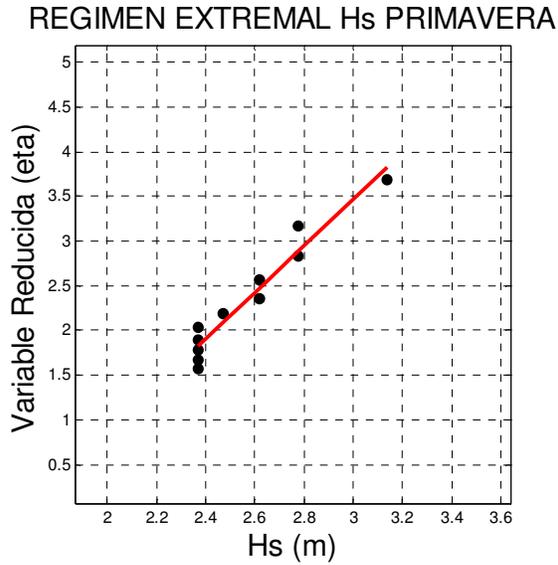


Figura A 18 Régimen Extremal Primavera

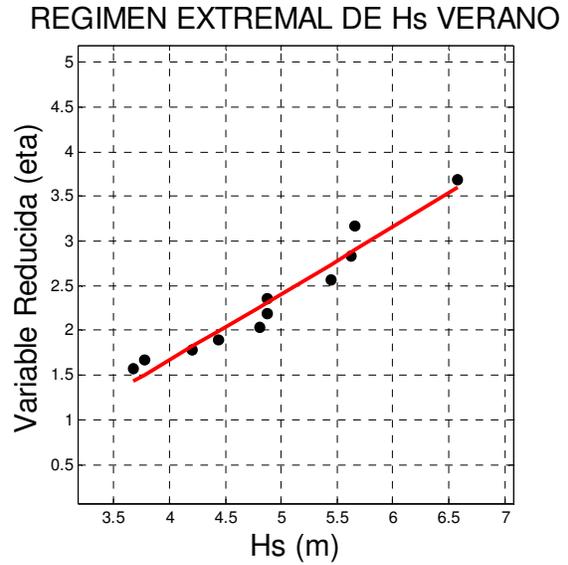


Figura A 19 Régimen Extremal Verano

Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos

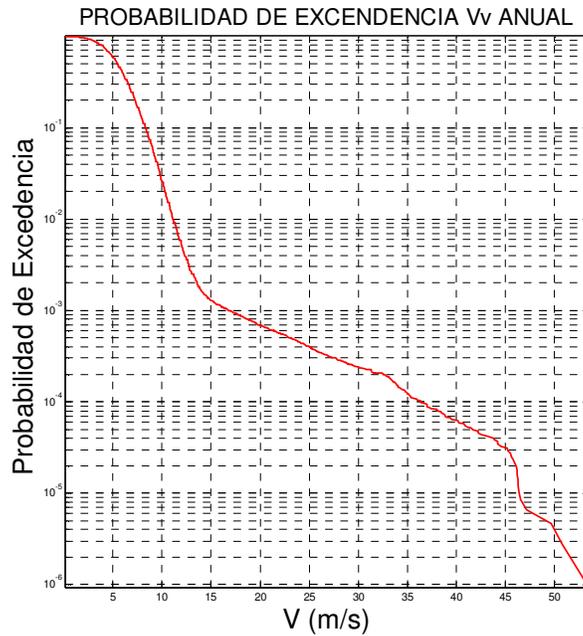


Figura A 20 Probabilidad de Excedencia Anual

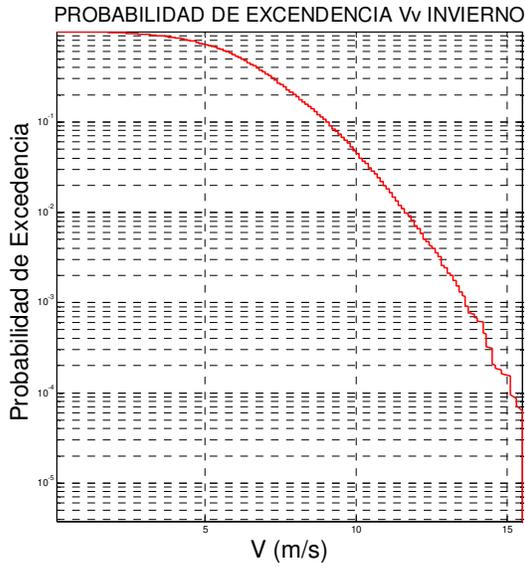


Figura A 21 Probabilidad de Excedencia Invierno

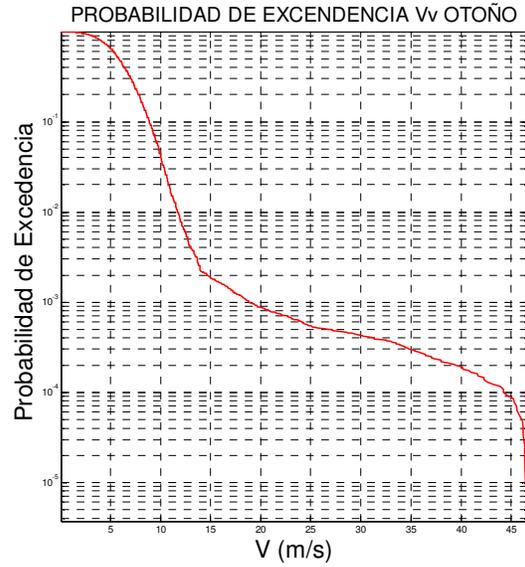


Figura A 22 Probabilidad de Excedencia Otoño

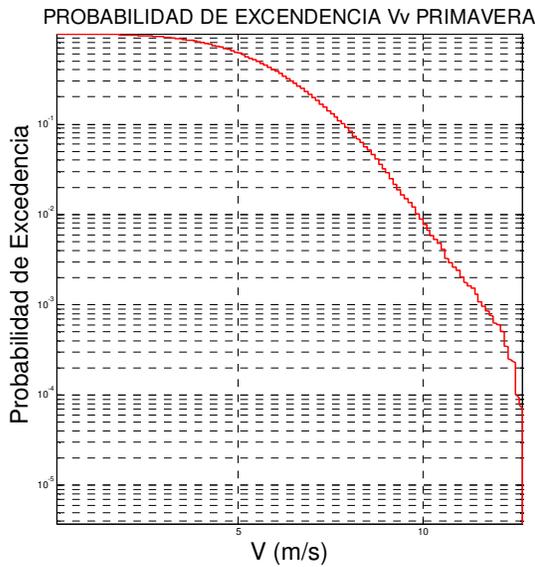


Figura A 23 Probabilidad de Excedencia Primavera

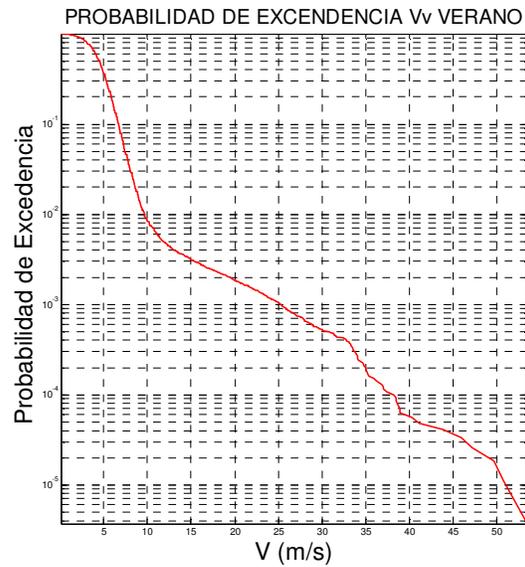


Figura A 24 Probabilidad de Excedencia Verano

Régimen extremal de velocidades de vientos sostenidos

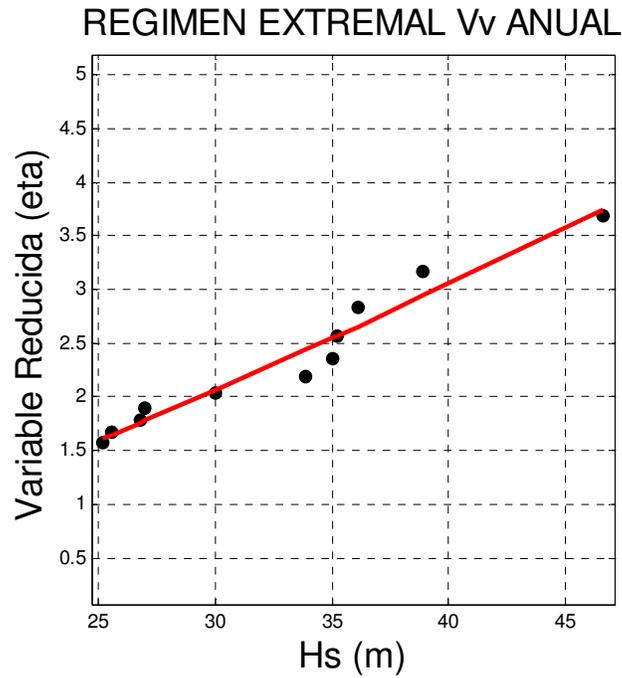


Figura A 25 Régimen Extremal Anual

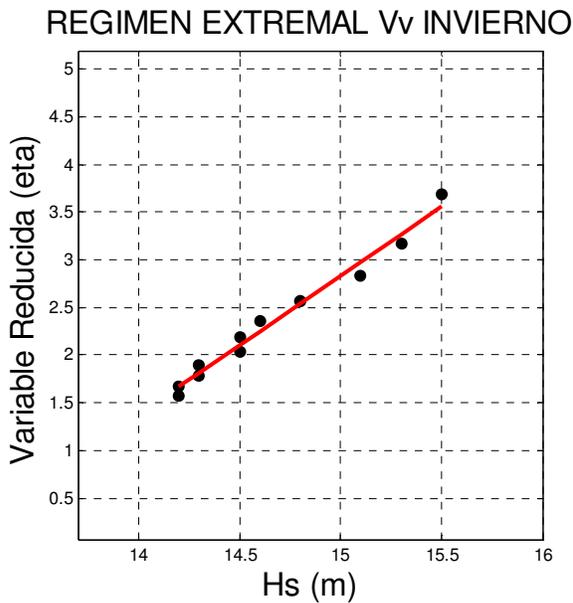


Figura A 26 Régimen Extremal Invierno

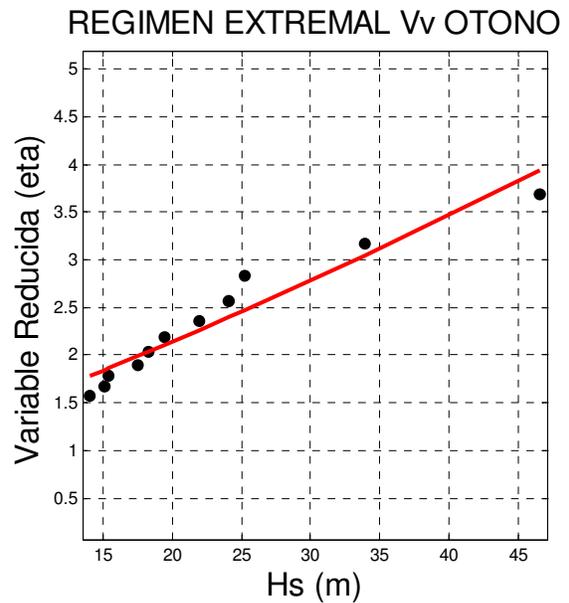


Figura A 27 Régimen Extremal Otoño

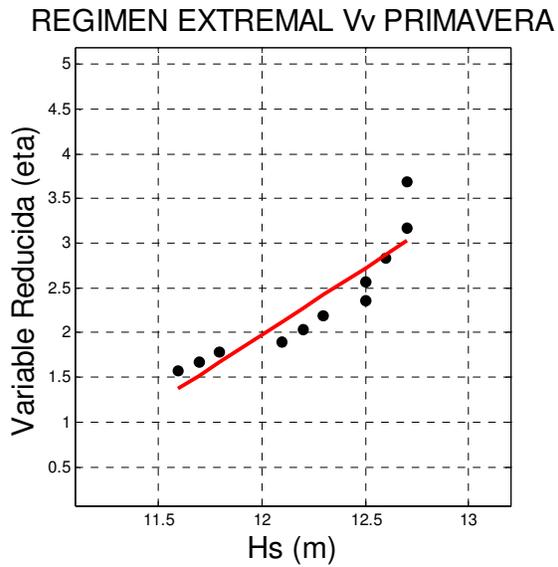


Figura A 28 Régimen Extremal Primavera

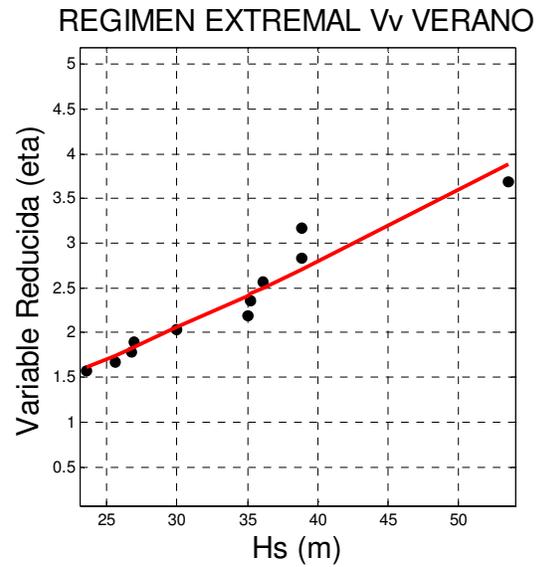


Figura A 29 Régimen Extremal Verano

Análisis de tormentas

Duración media de tormentas

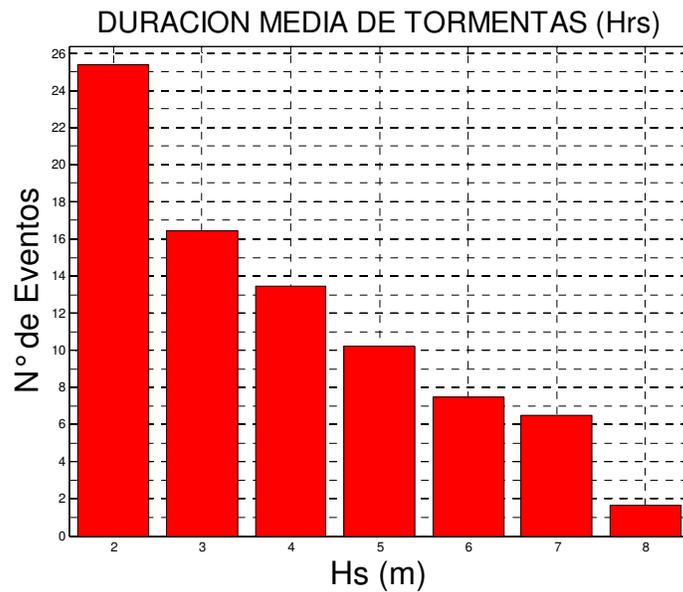


Figura A 30 Duración Media de Tormentas

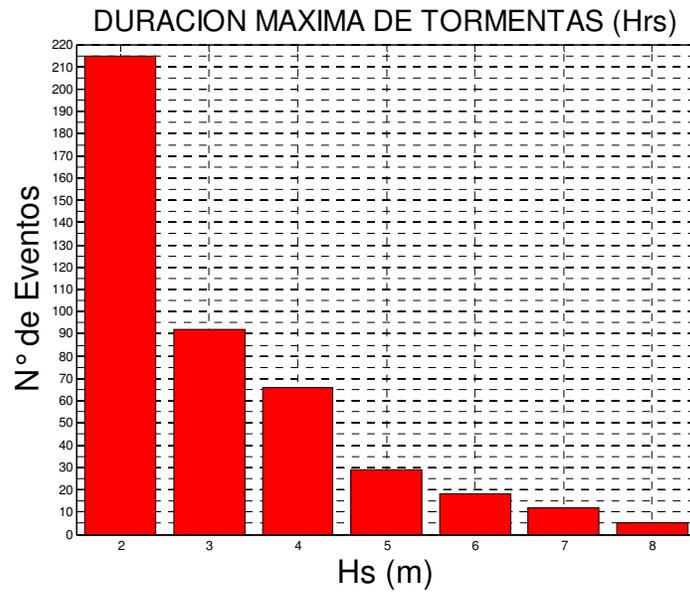


Figura A 31 Duración Máxima de Tormentas

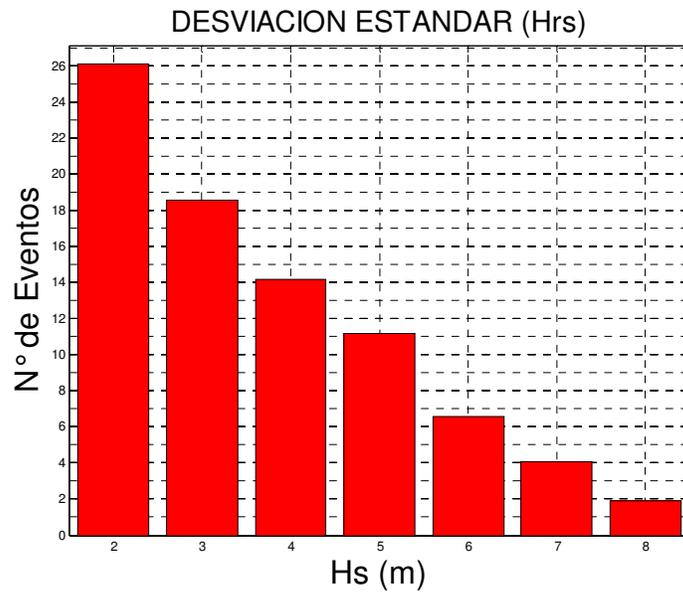


Figura A 32 Desviación Estándar

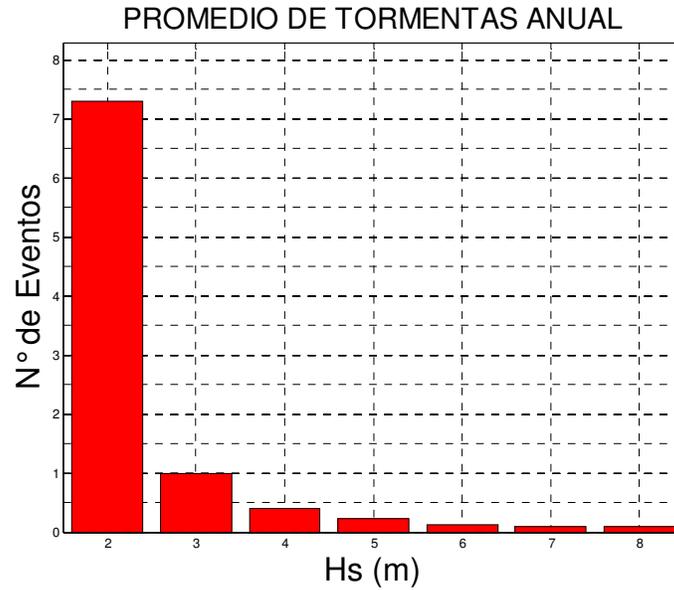


Figura A 33 Promedia de Tormentas Anual

Presentación de alturas de ola significativa por mes

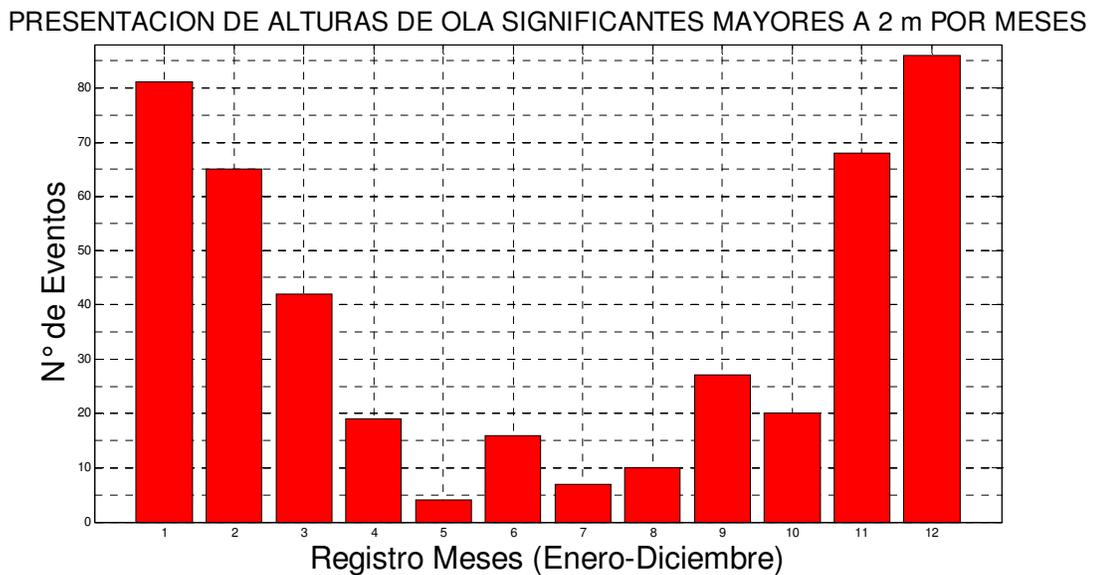


Figura A 34 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR MESES

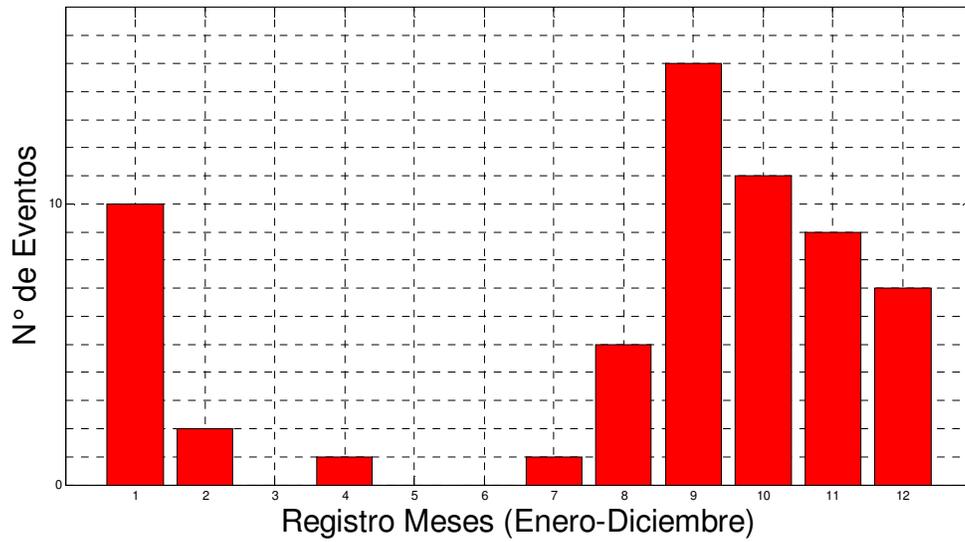


Figura A 35 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR MESES

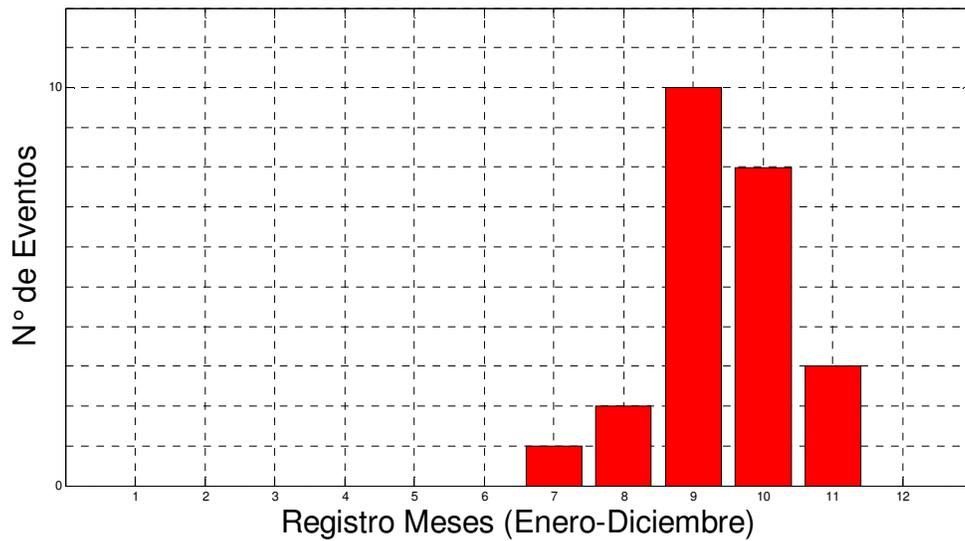


Figura A 36 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR MESES

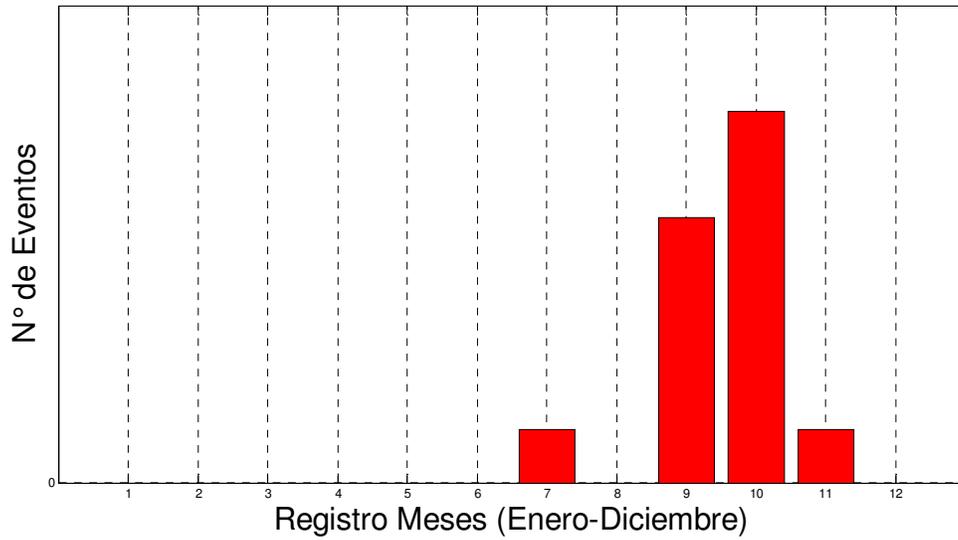


Figura A 37 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR MESES

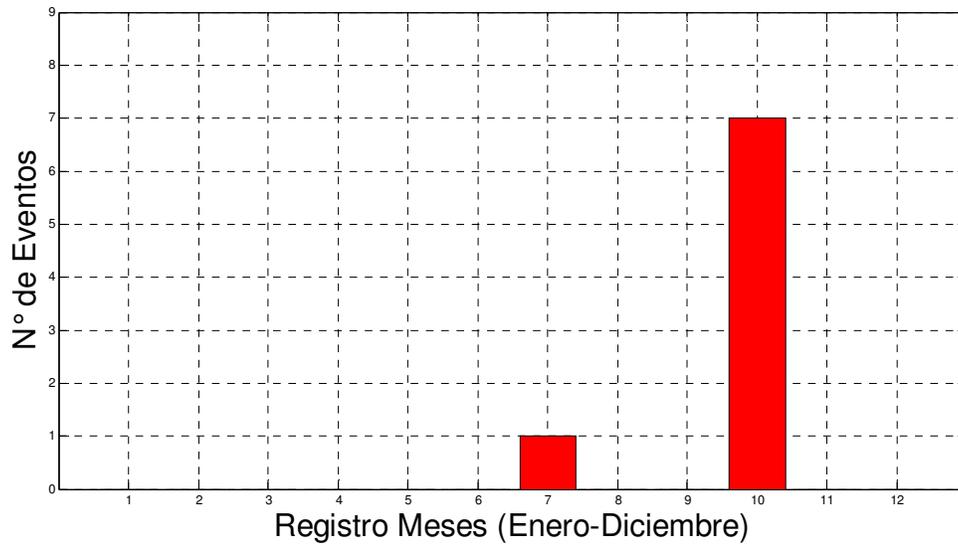


Figura A 38 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR MESES

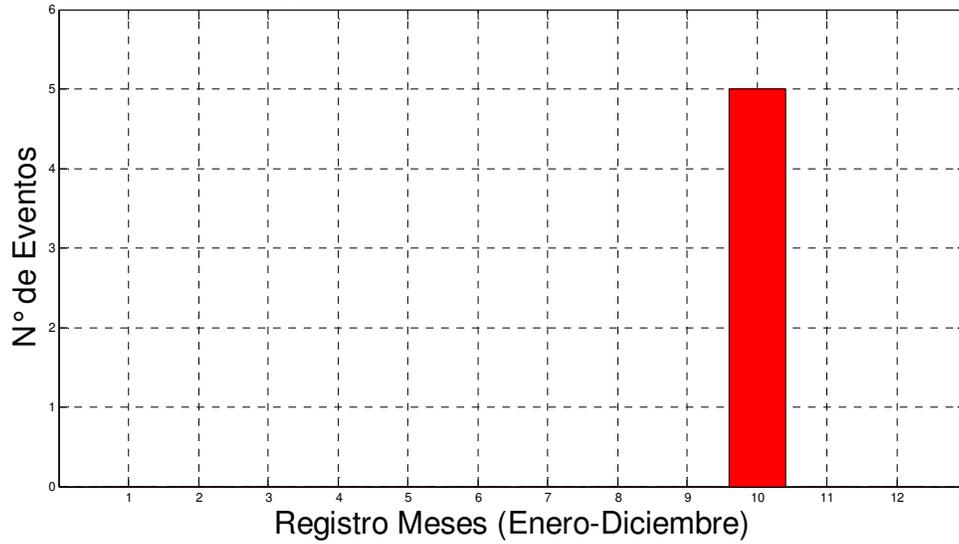


Figura A 39 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 7m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 8 m POR MESES

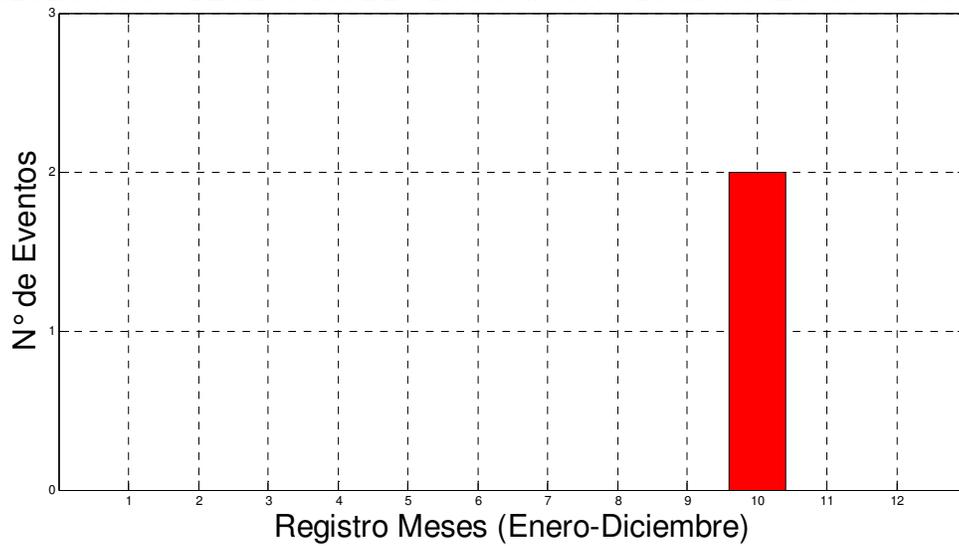


Figura A 40 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 8m por mes

Presentación de tormentas normalizadas por mes

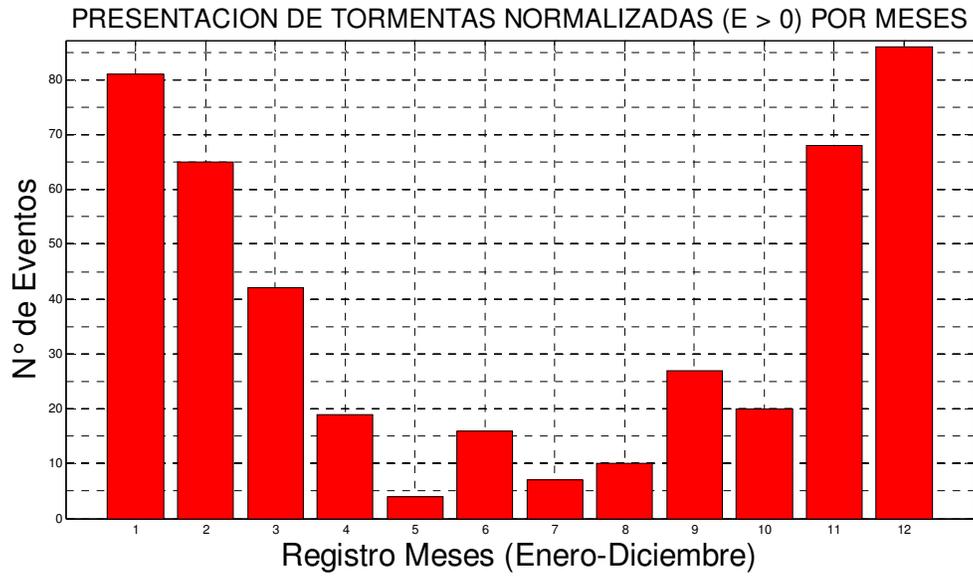


Figura A 41 Presentación de Tormentas Normalizadas ($E > 0$) por mes

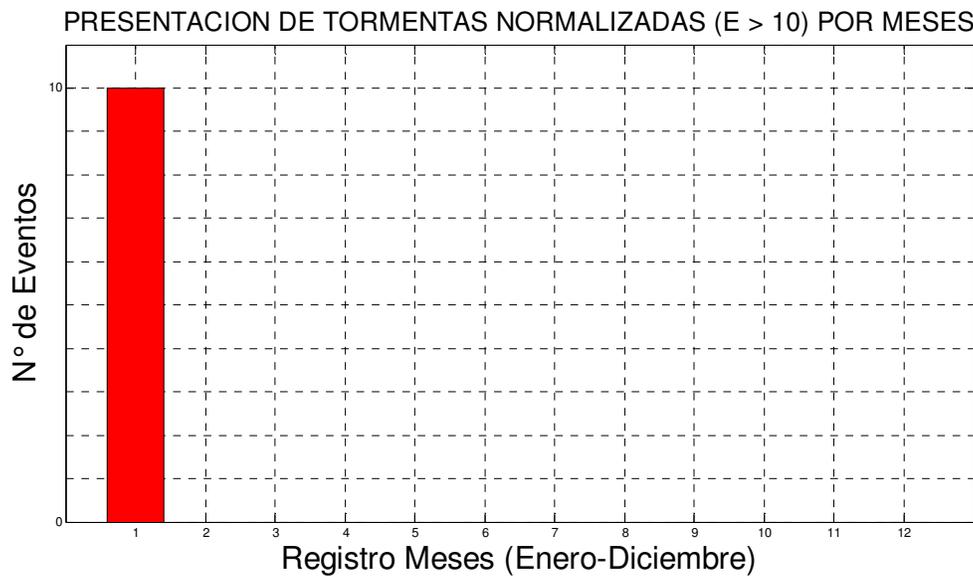


Figura A 42 Presentación de Tormentas Normalizadas ($E > 10$) por mes

Presentación de alturas de ola significativa por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 2 m POR AÑO

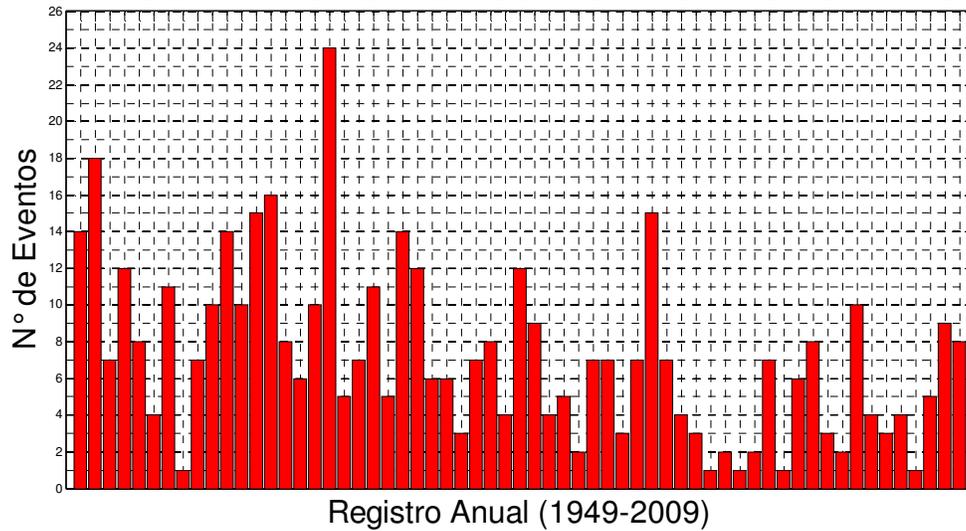


Figura A 43 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR AÑO

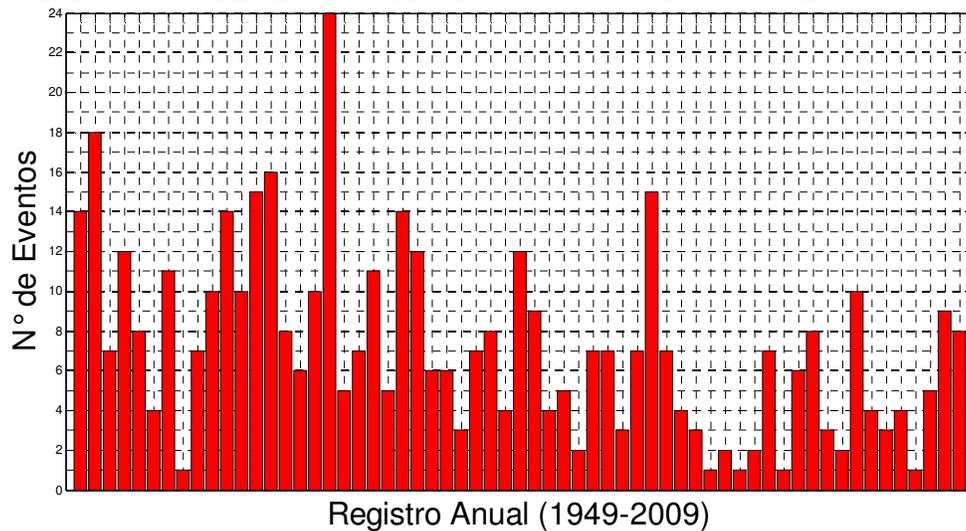


Figura A 44 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 3m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR AÑO

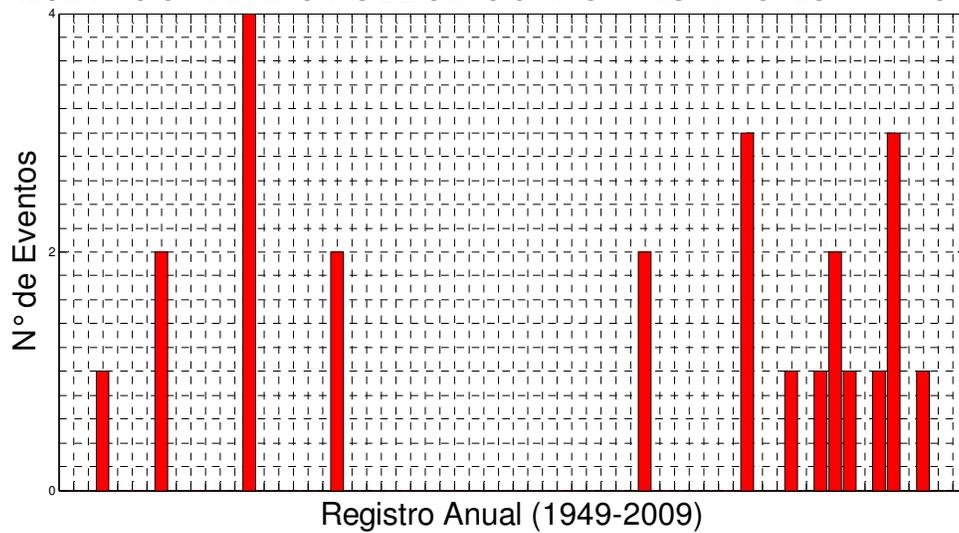


Figura A 45 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 4m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR AÑO

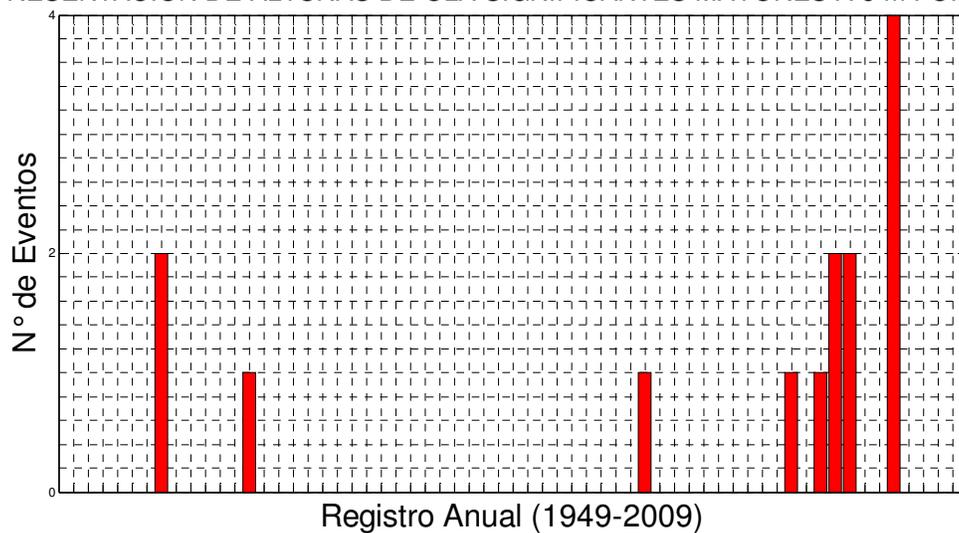


Figura A 46 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 5m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR AÑO

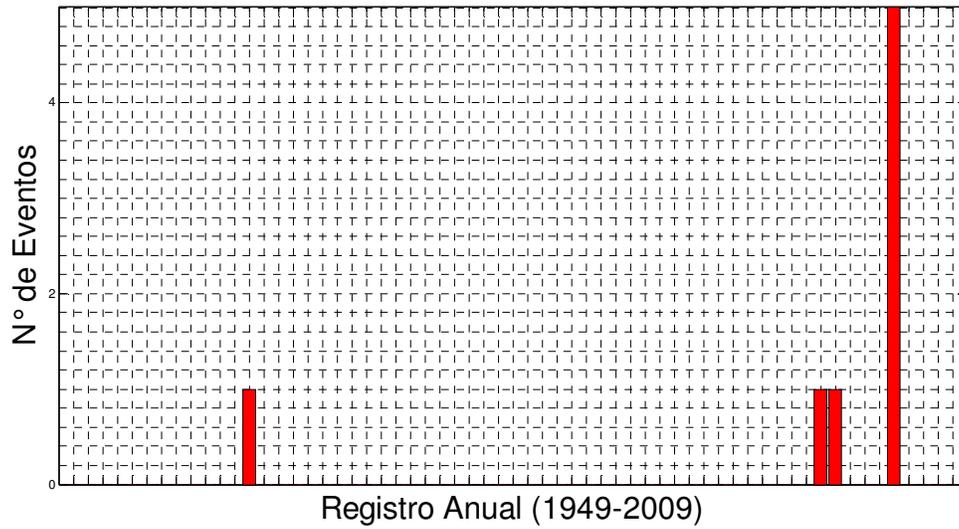


Figura A 47 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 6m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR AÑO

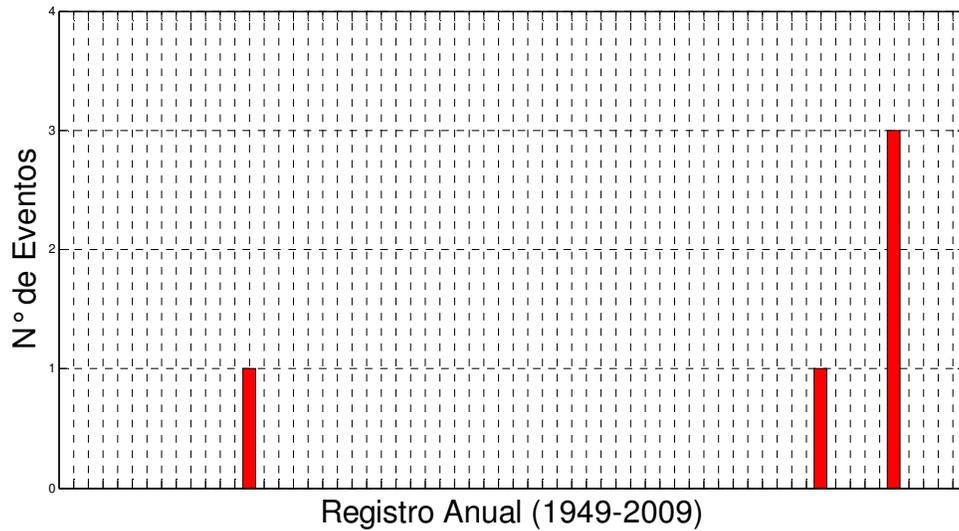


Figura A 48 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 7m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 8 m POR AÑO

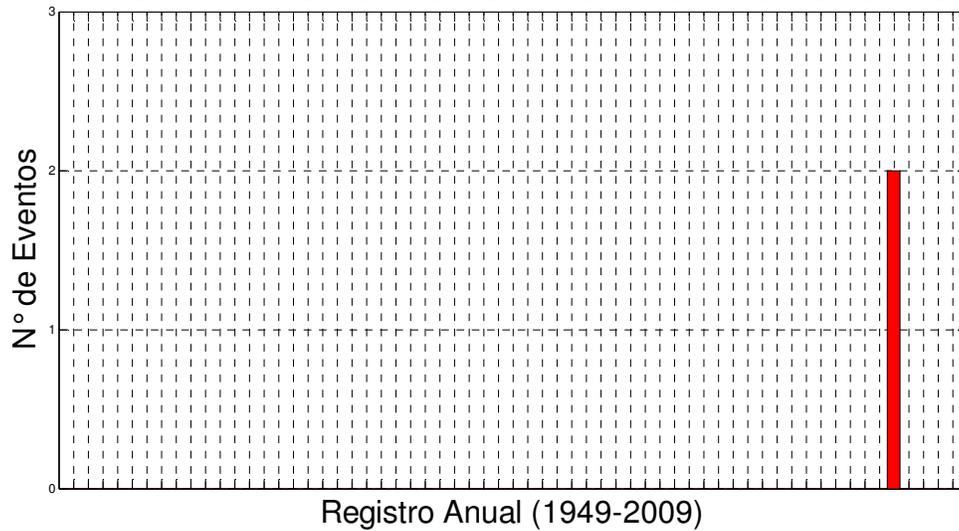


Figura A 49 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 8m por año

Presentación de tormentas normalizadas por año

PRESENTACION DE TORMENTAS NORMALIZADAS (E > 0) POR AÑO

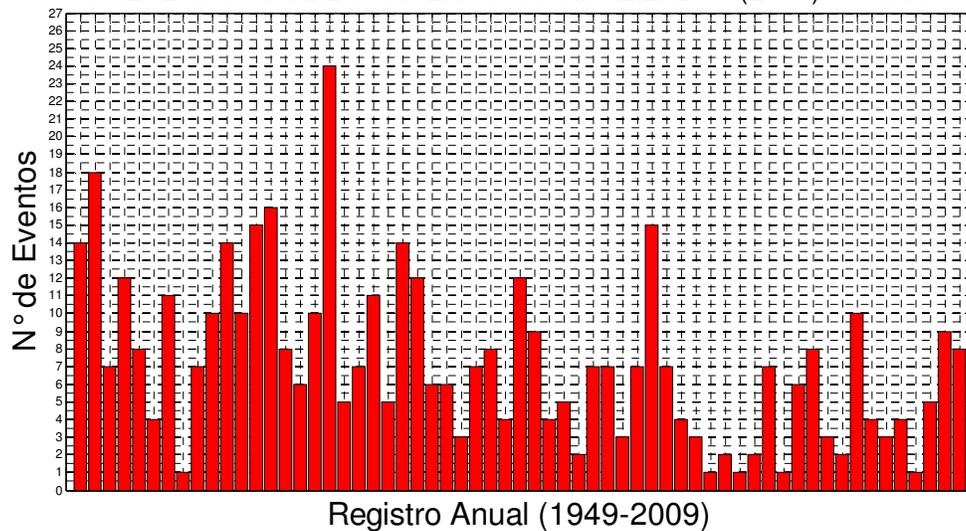


Figura A 50 Presentación de Tormentas Normalizadas (E>0) por año

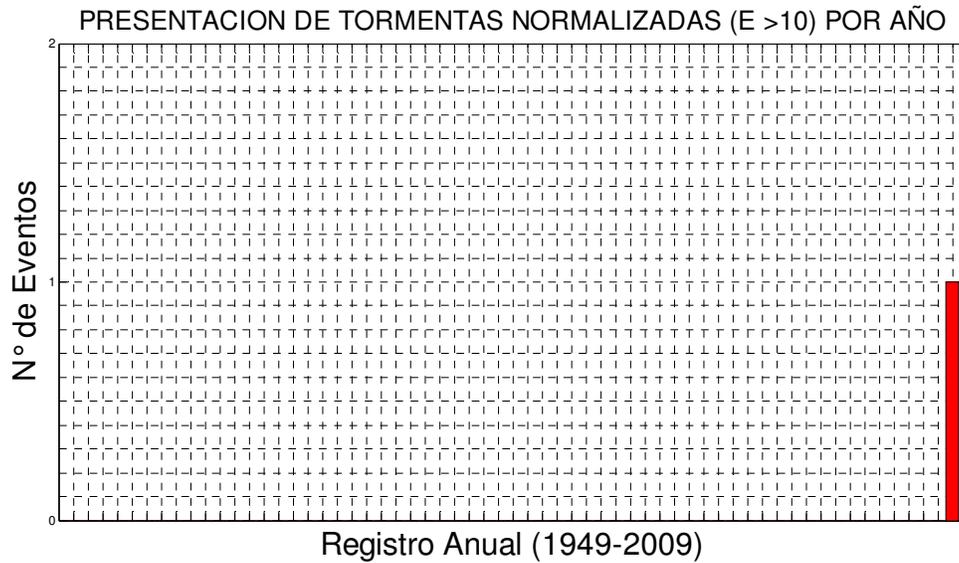


Figura A 51 Presentación de Tormentas Normalizadas (E>10) por año

Evolución temporal de altura de ola significativa de la última década

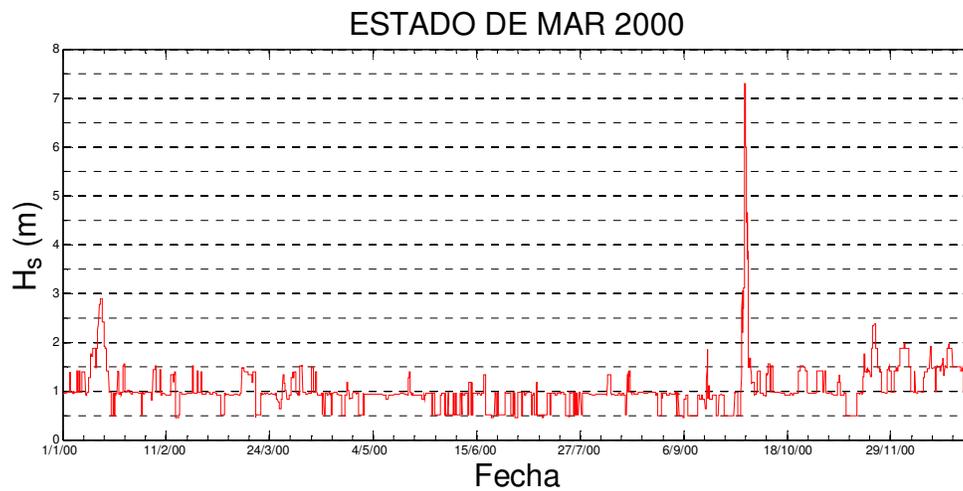


Figura A 52 Estado de mar 2000

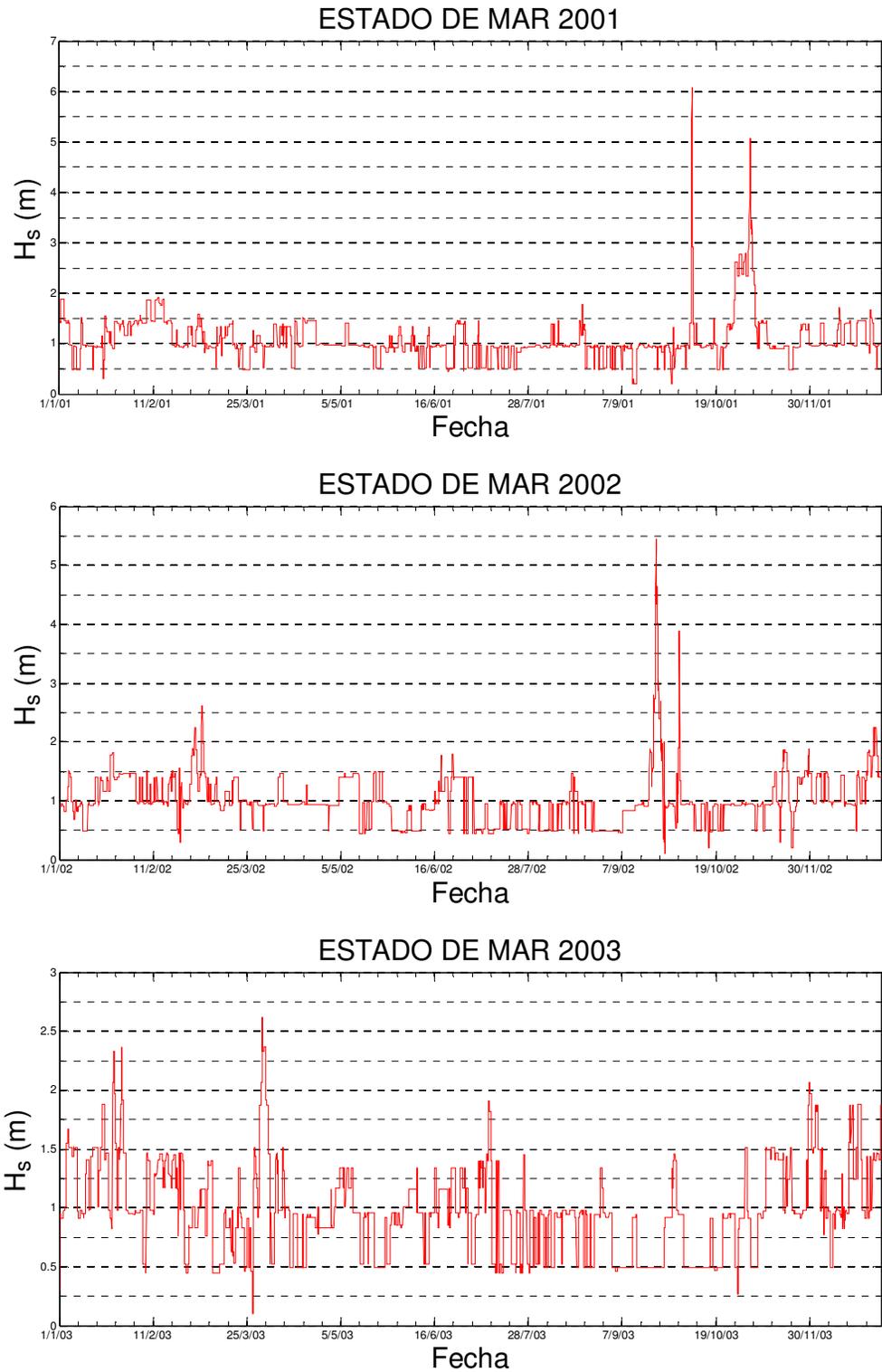


Figura A 53 Estados de mar 2001-2003

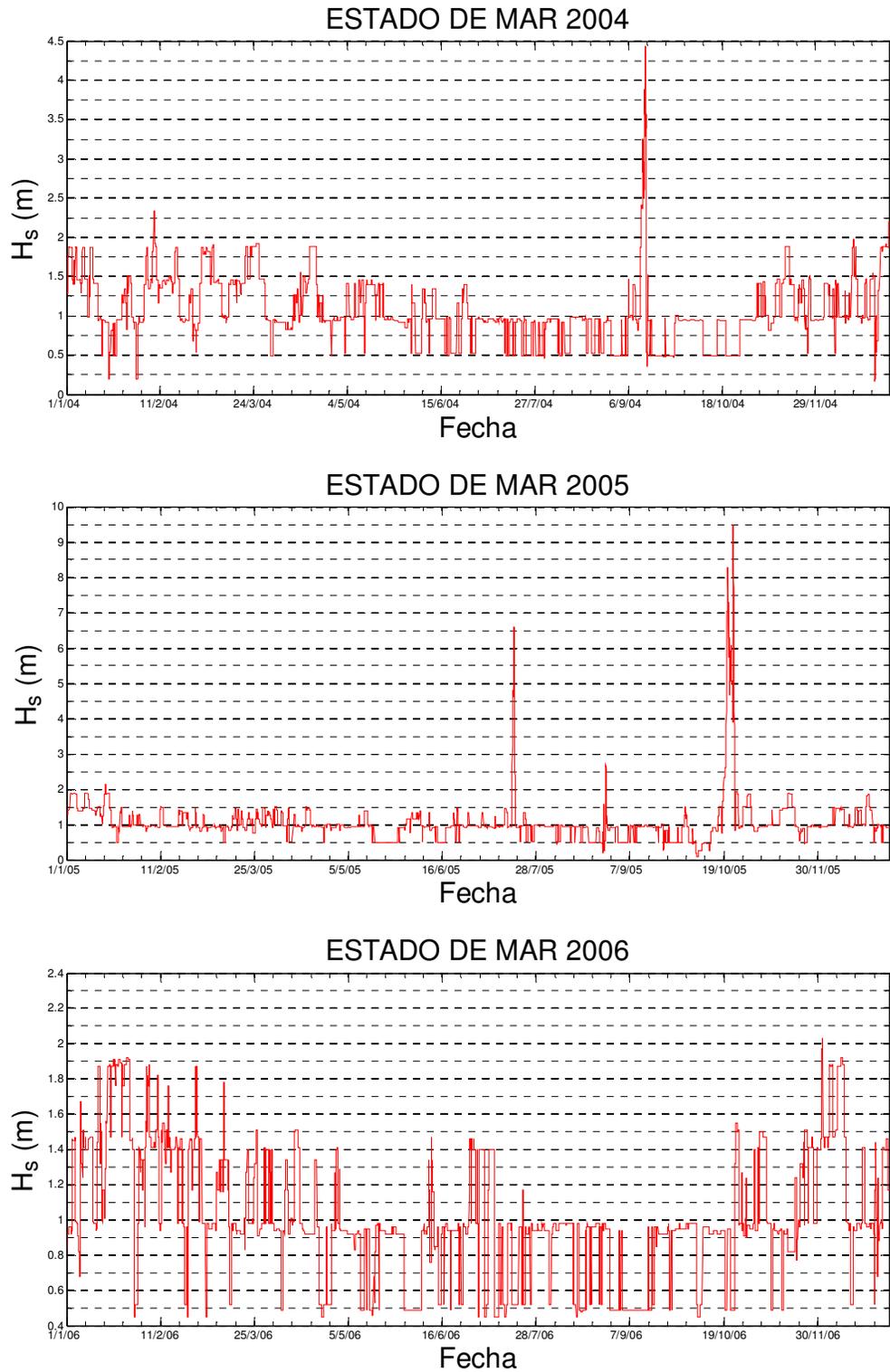


Figura A 54 Estados de mar 2004-2006

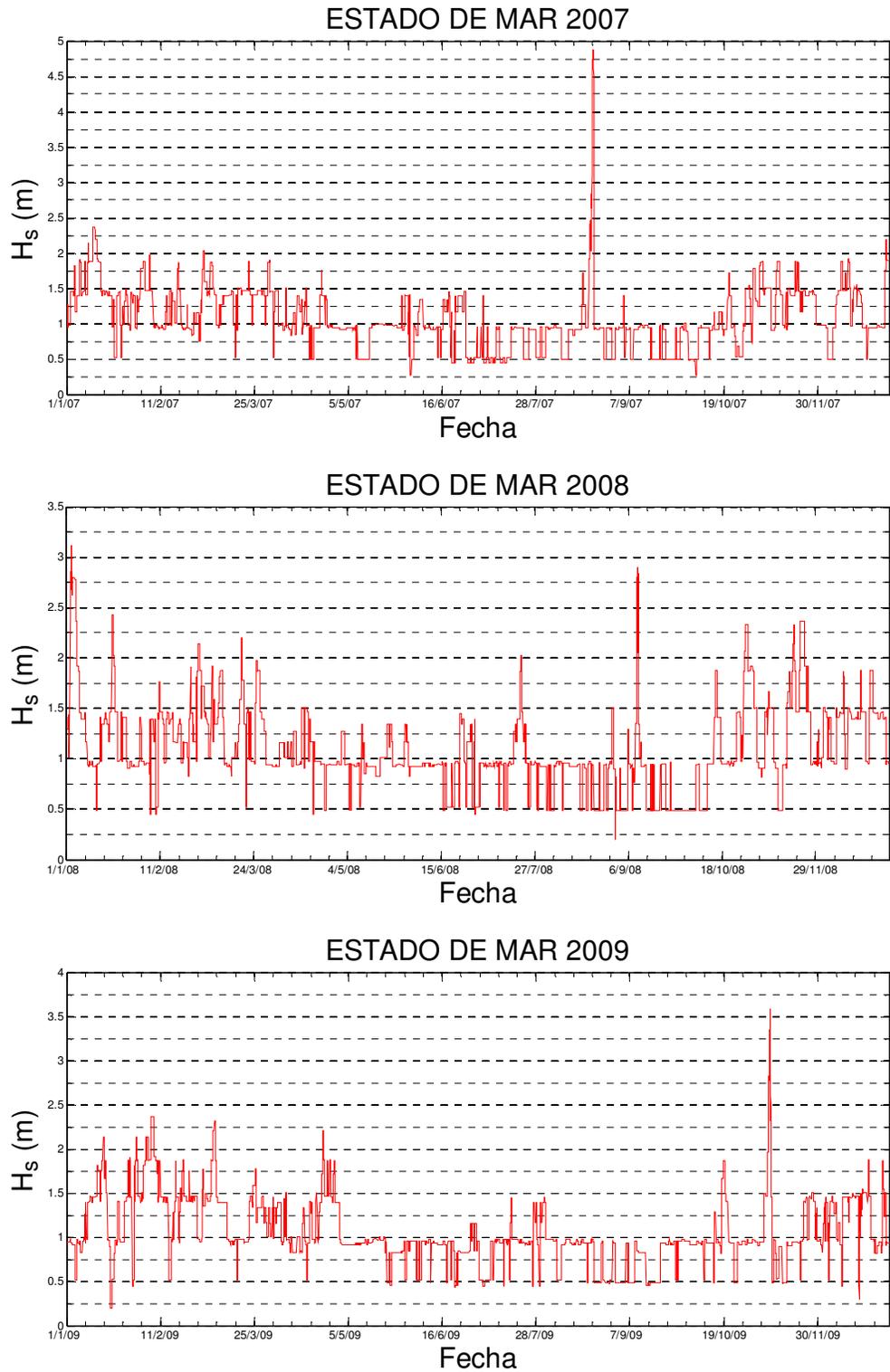


Figura A 55 Estados de mar 2007-2009

Resultados Celda N° 3

Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa

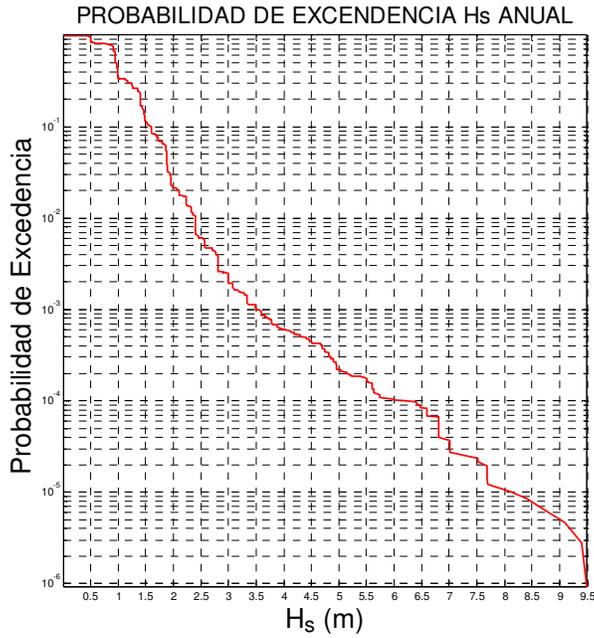


Figura A 56 Probabilidad de Excedencia Anual

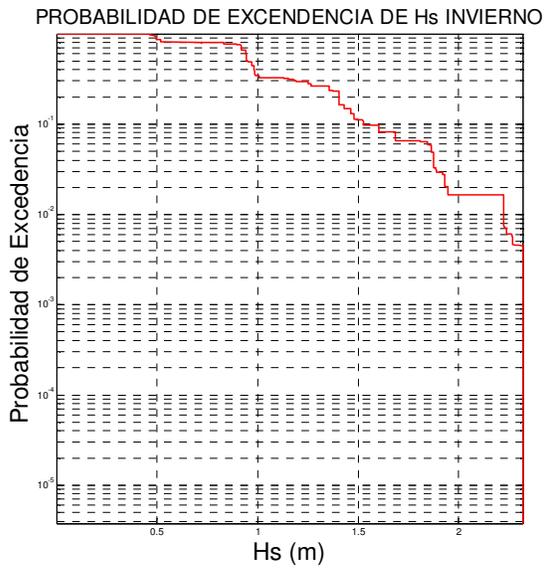


Figura A 57 Probabilidad de Excedencia Invierno

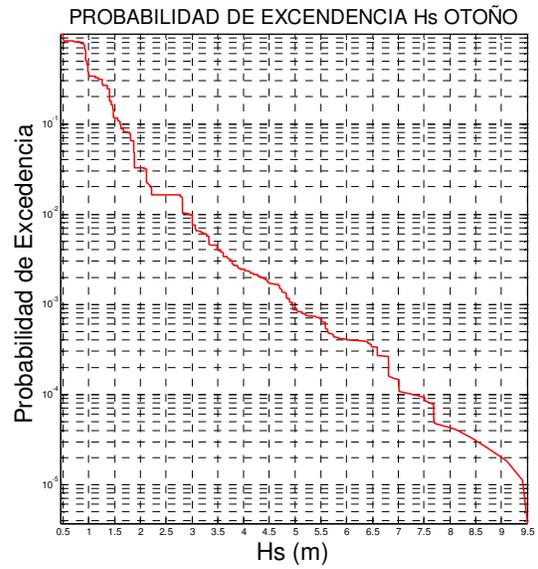


Figura A 58 Probabilidad de Excedencia Otoño

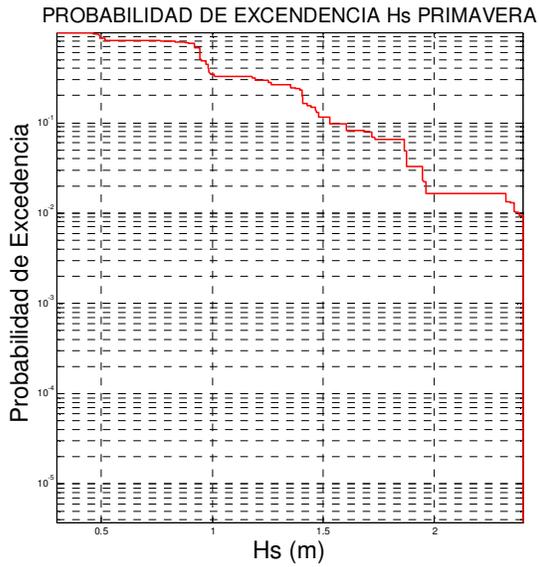


Figura A 59 Probabilidad de Excedencia Primavera

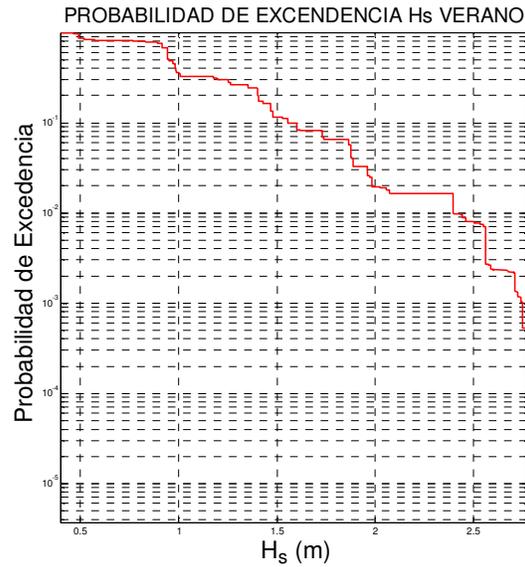


Figura A 60 Probabilidad de Excedencia Verano

Probabilidad de excedencia de periodos medio de ola

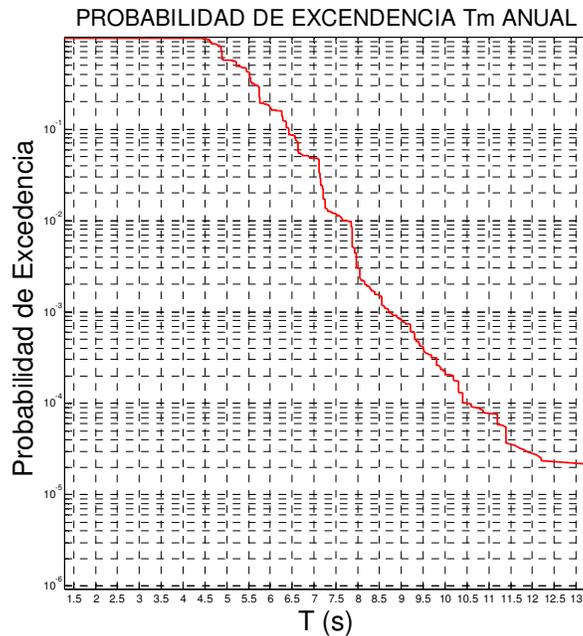


Figura A 61 Probabilidad de Excedencia Anual

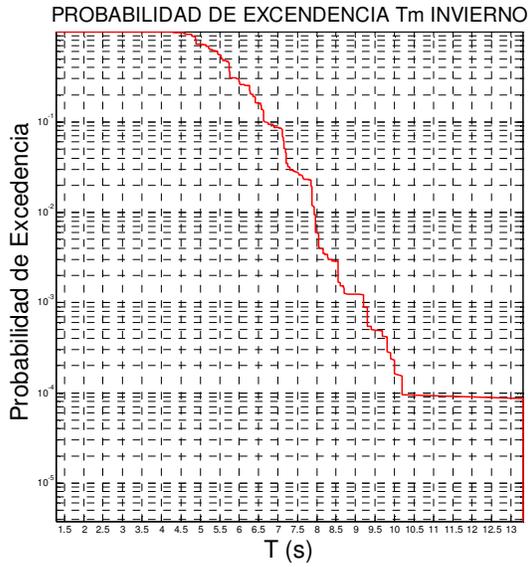


Figura A 62 Probabilidad de Excedencia Invierno

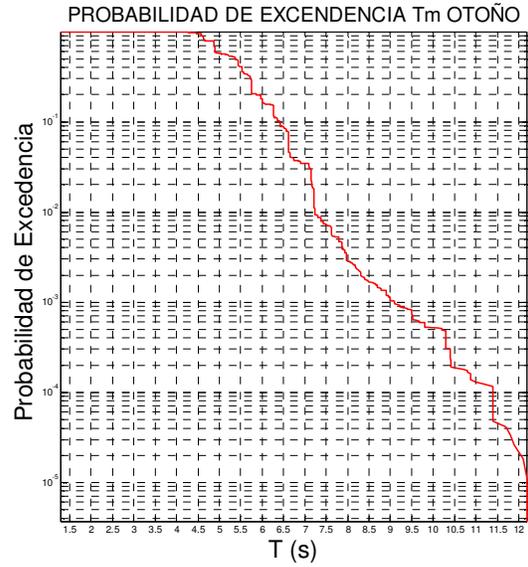


Figura A 63 Probabilidad de Excedencia Otoño

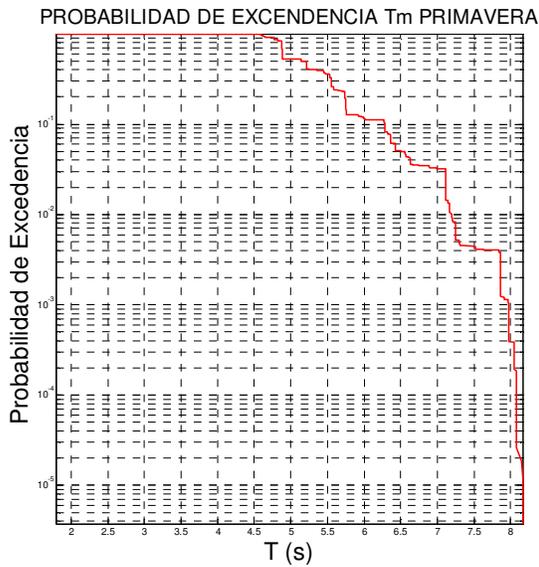


Figura A 64 Probabilidad de Excedencia Primavera

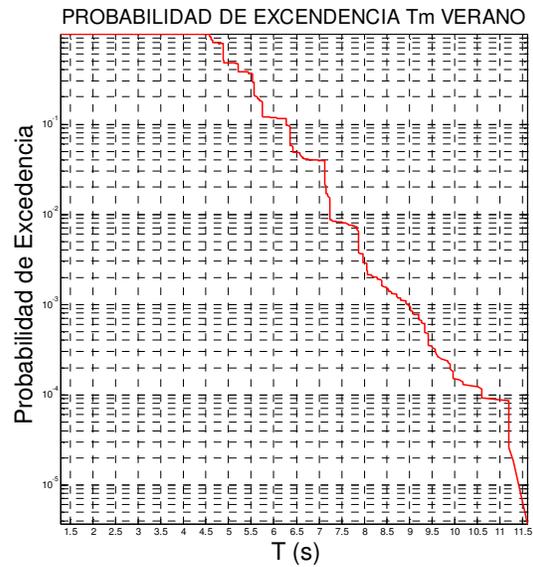


Figura A 65 Probabilidad de Excedencia Verano

Régimen extremal de altura de ola significativa

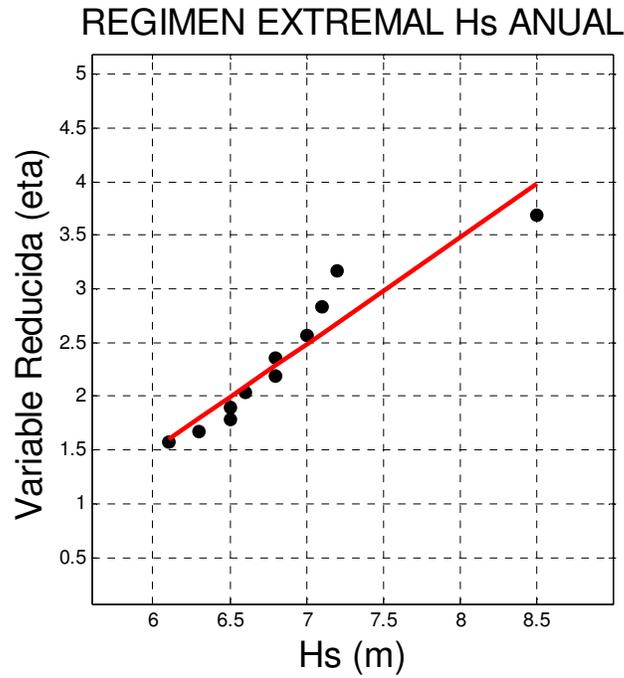


Figura A 66 Régimen Extremal Anual

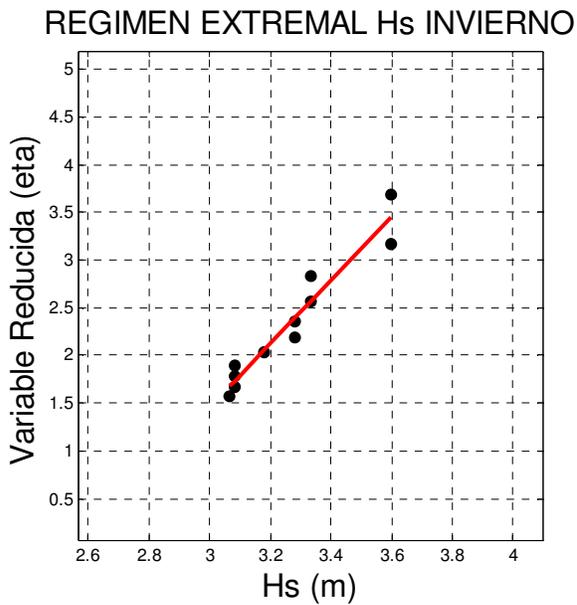


Figura A 67 Régimen Extremal Invierno

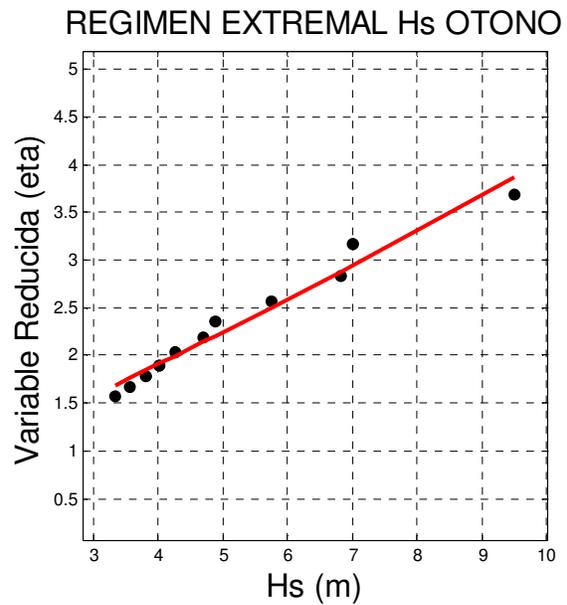


Figura A 68 Régimen Extremal Otoño

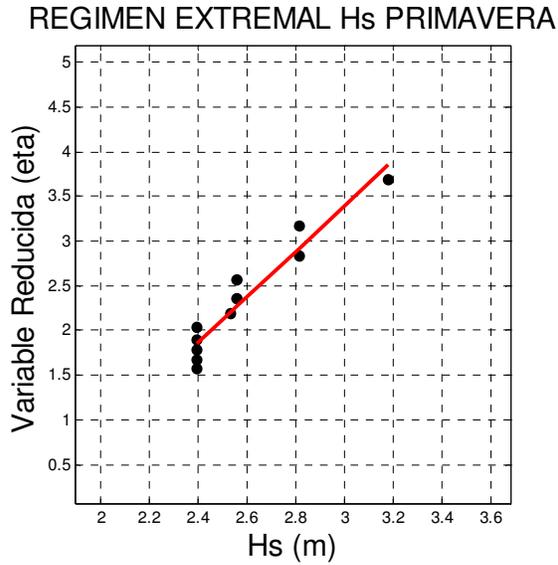


Figura A 69 Régimen Extremal Primavera

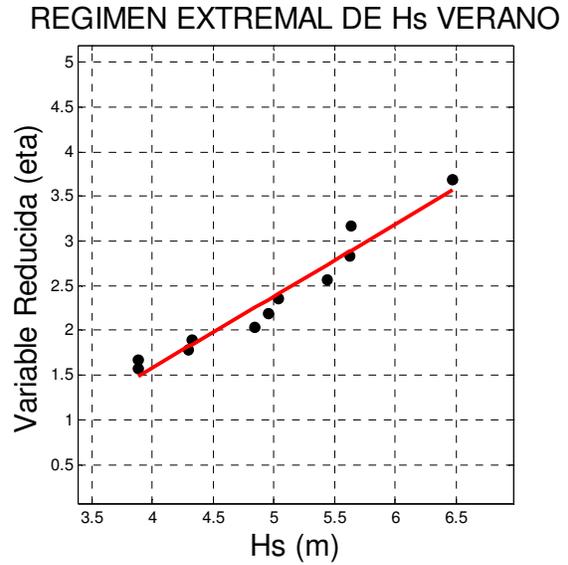


Figura A 70 Régimen Extremal Verano

Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos

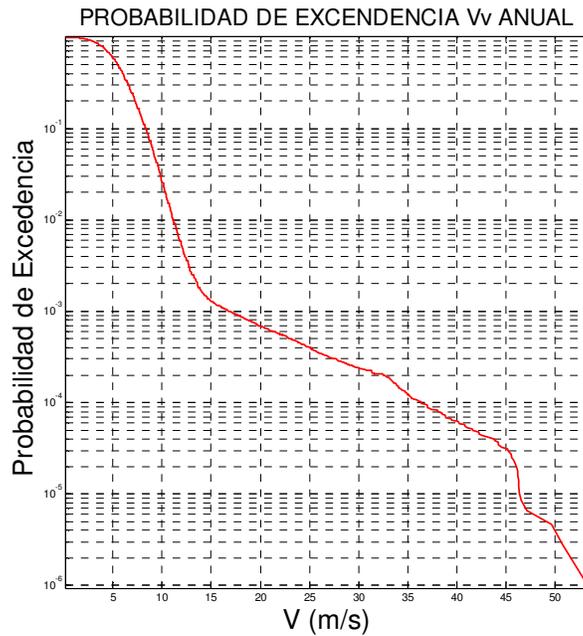


Figura A 71 Probabilidad de Excedencia Anual

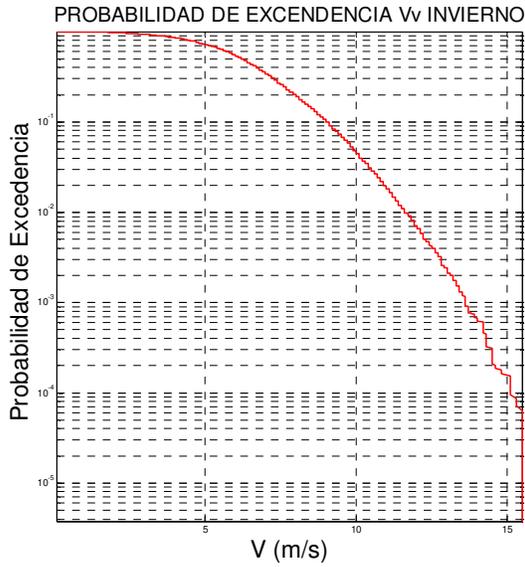


Figura A 72 Probabilidad de Excedencia Invierno

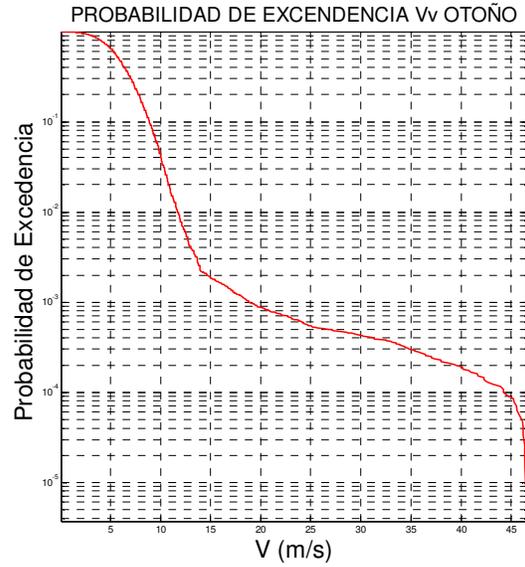


Figura A 73 Probabilidad de Excedencia Otoño

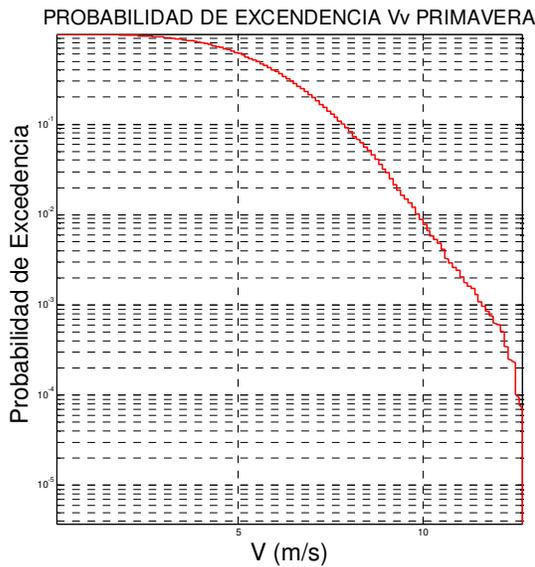


Figura A 74 Probabilidad de Excedencia Primavera

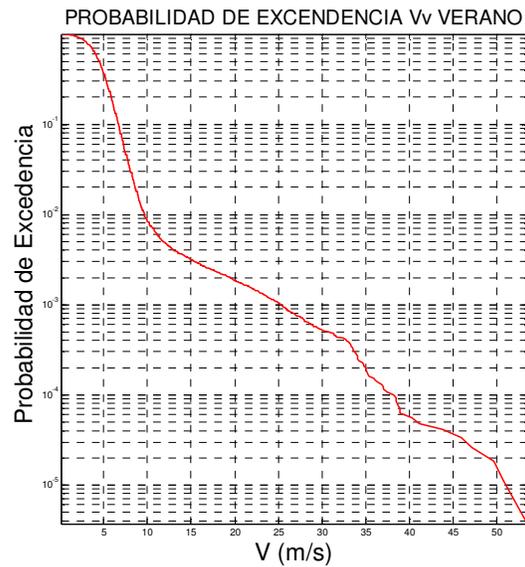


Figura A 75 Probabilidad de Excedencia Verano

Régimen extremal de velocidades de vientos sostenidos

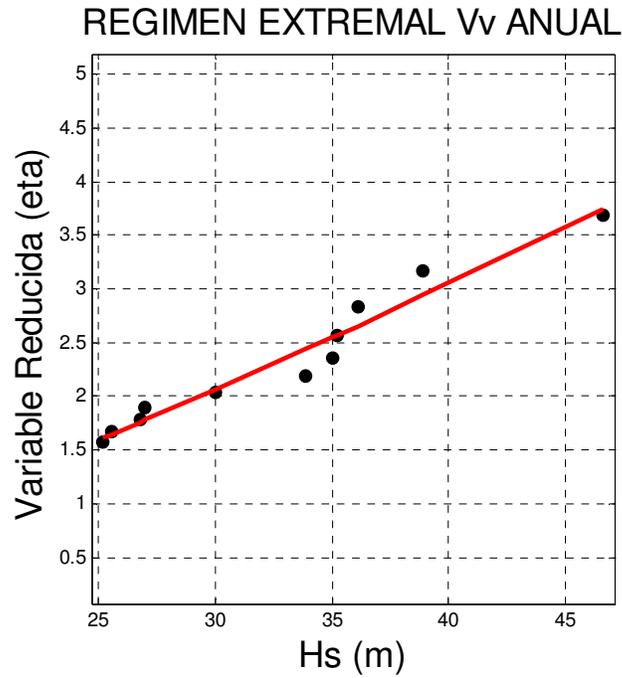


Figura A 76 Régimen Extremal Anual

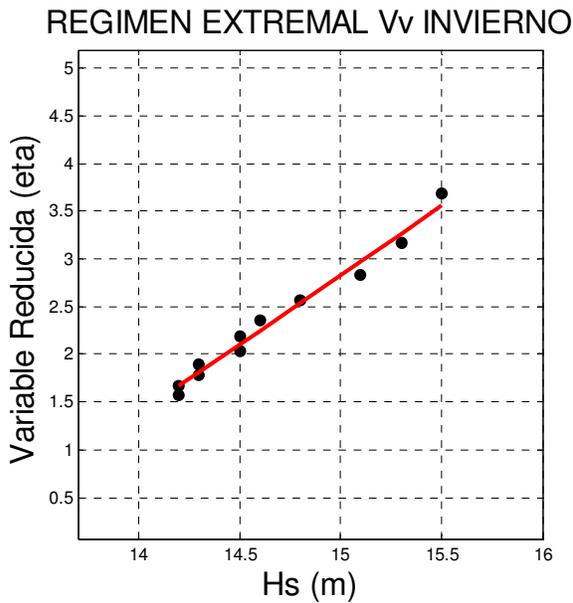


Figura A 77 Régimen Extremal Invierno

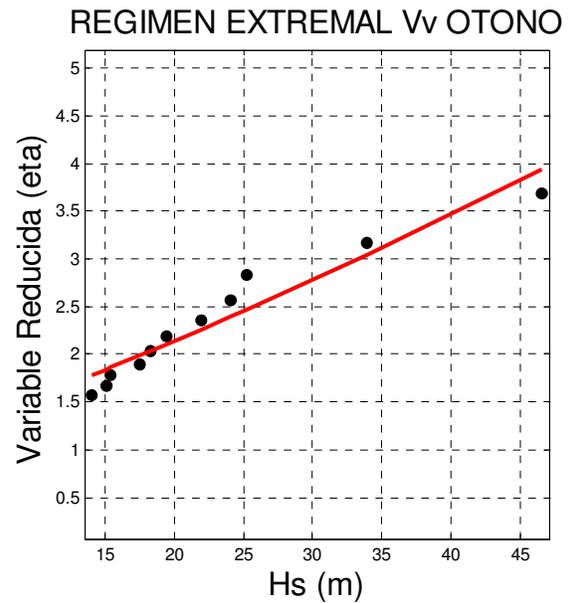


Figura A 78 Régimen Extremal Otoño

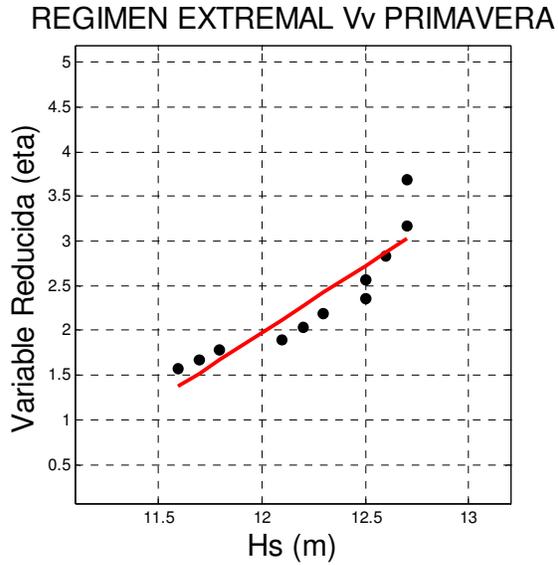


Figura A 79 Régimen Extremal Primavera

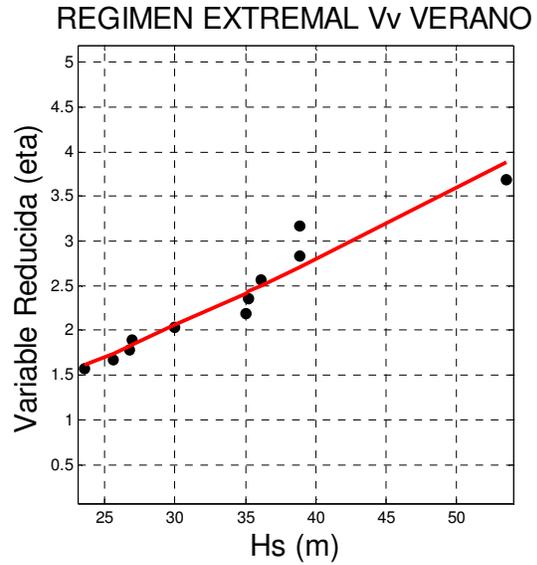


Figura A 80 Régimen Extremal Verano

Análisis de tormentas

Duración media de tormentas

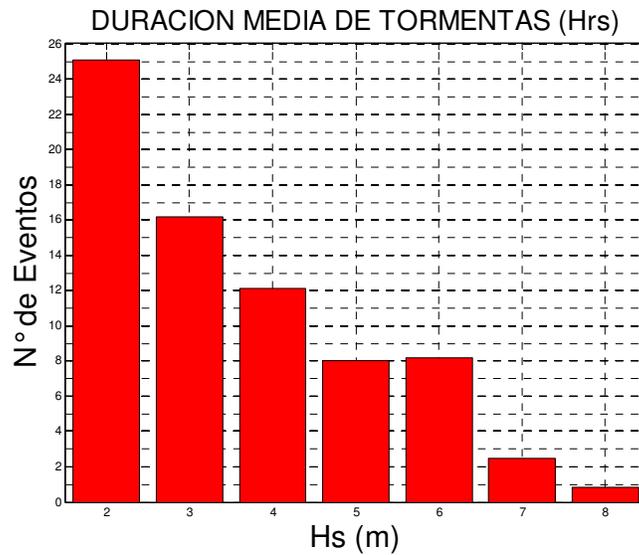


Figura A 81 Duración Media de Tormentas

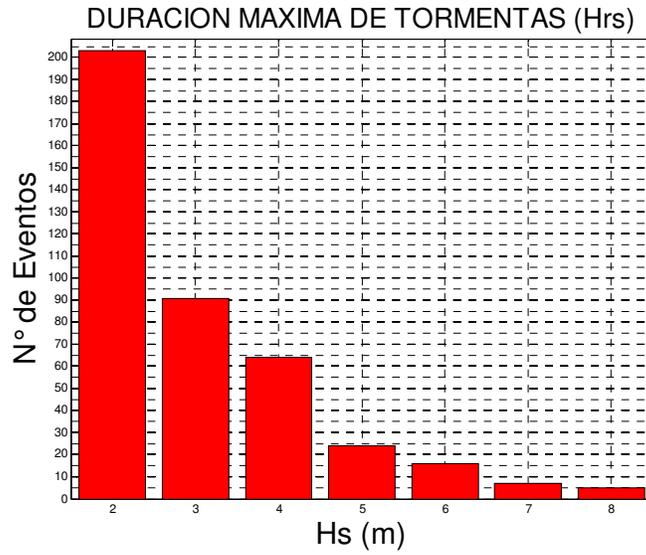


Figura A 82 Duración Máxima de Tormentas

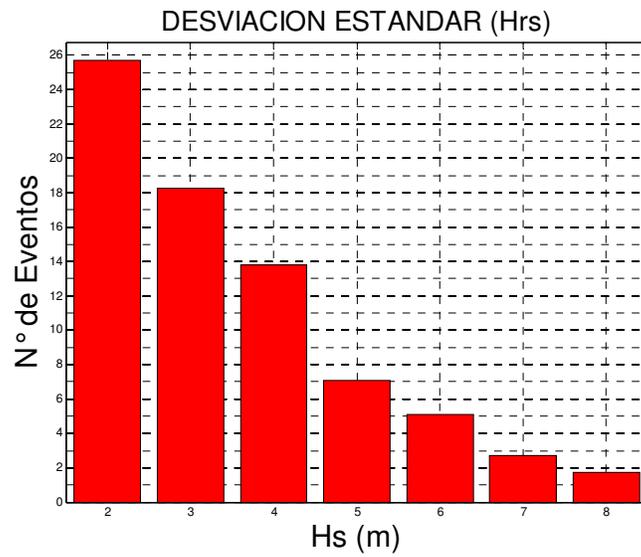


Figura A 83 Desviación Estándar

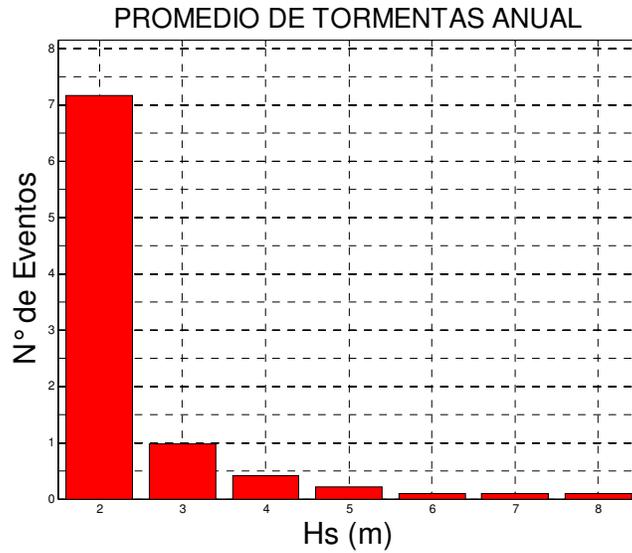


Figura A 84 Promedio de Tormentas Anual

Presentación de alturas de ola significativa por mes

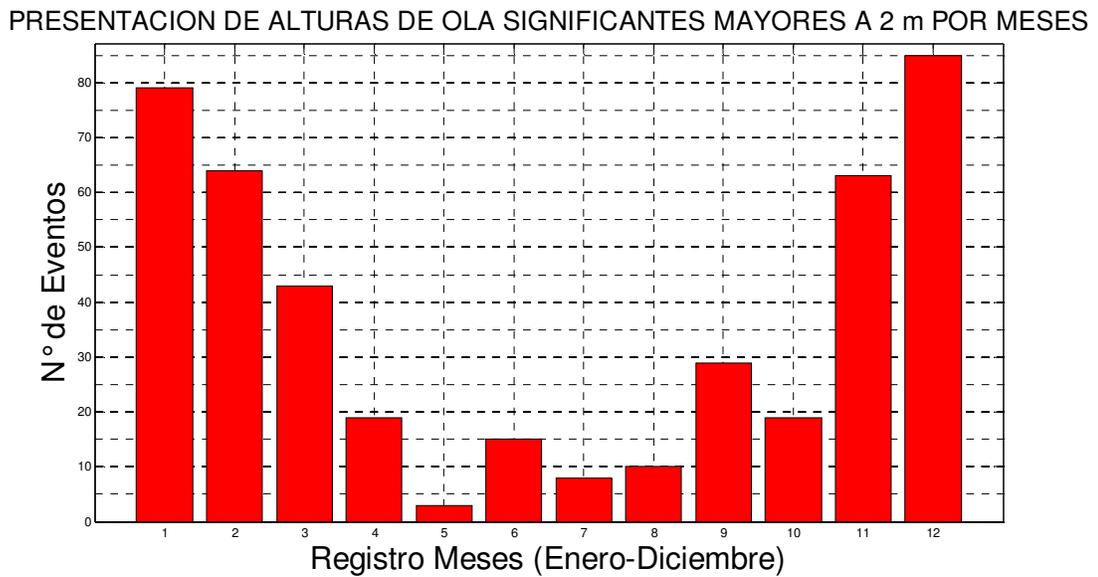


Figura A 85 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR MESES

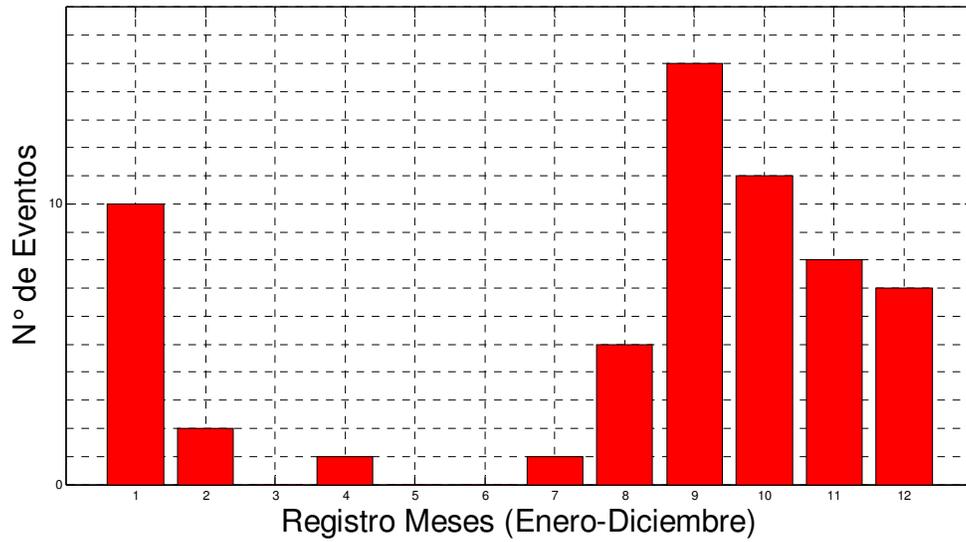


Figura A 86 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 3m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR MESES

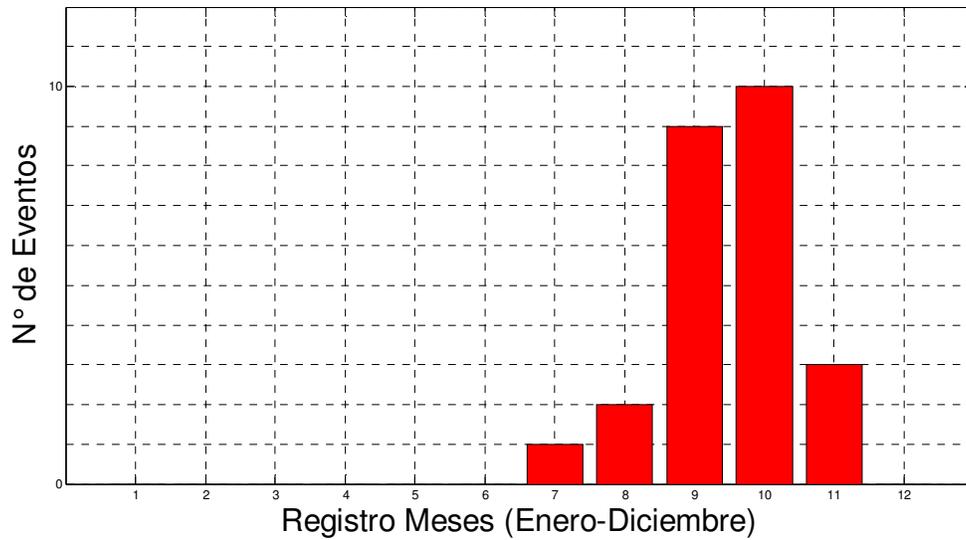


Figura A 87 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 4m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR MESES

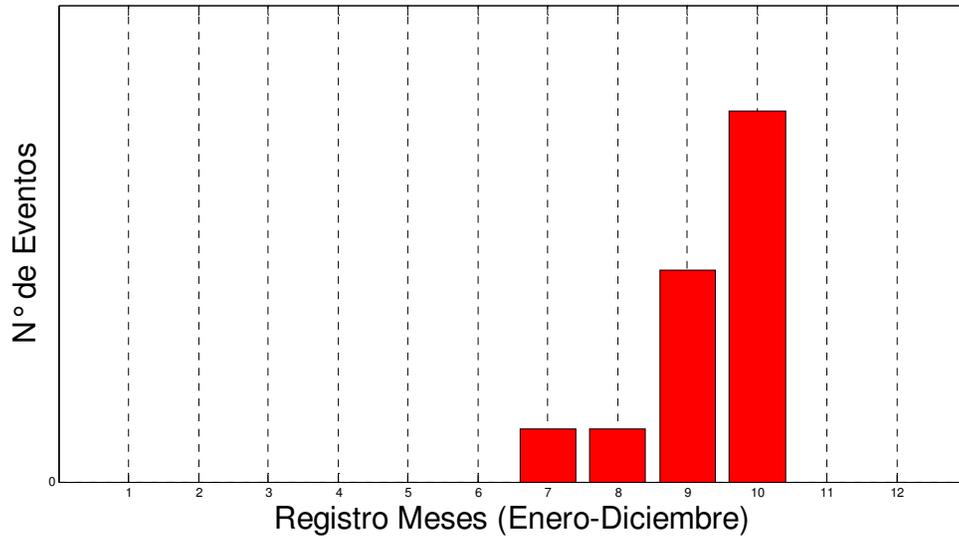


Figura A 88 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 5m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR MESES

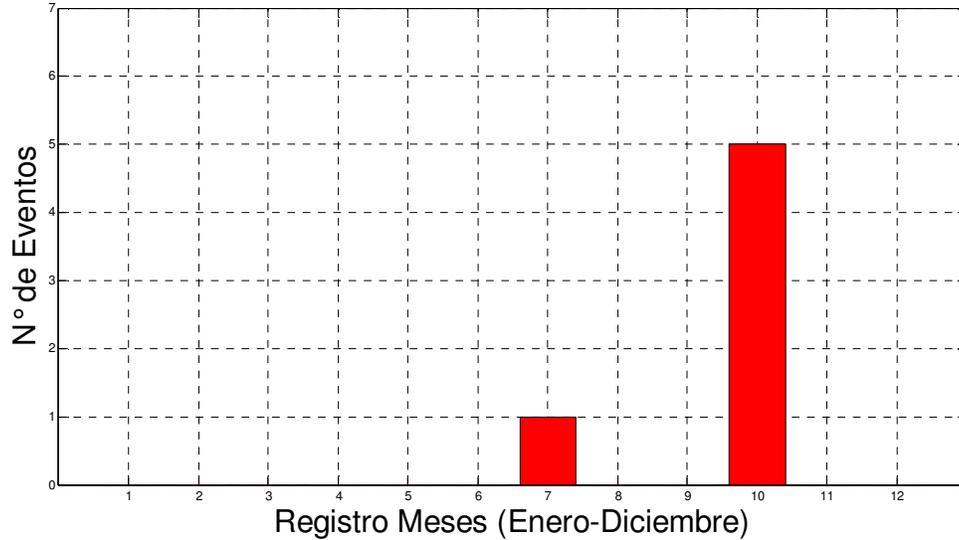


Figura A 89 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 6m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR MESES

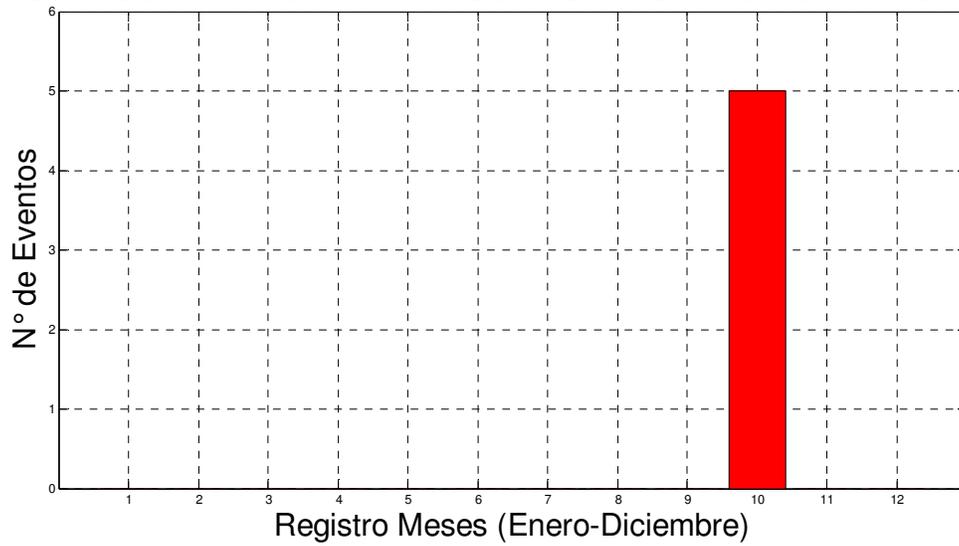


Figura A 90 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 7m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 8 m POR MESES

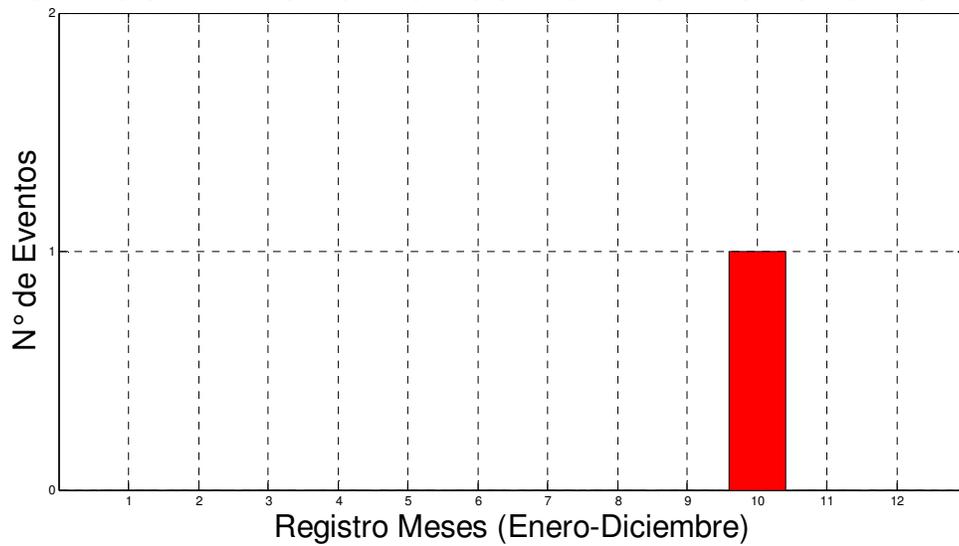


Figura A 91 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 8m por mes

Presentación de Tormentas normalizadas por mes

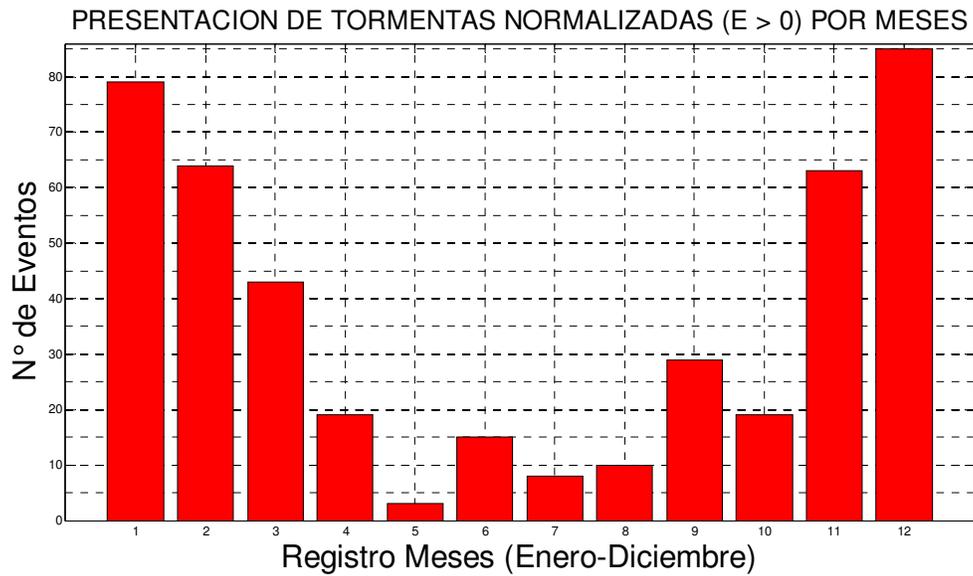


Figura A 92 Presentación de Tormentas Normalizadas ($E > 0$) por mes

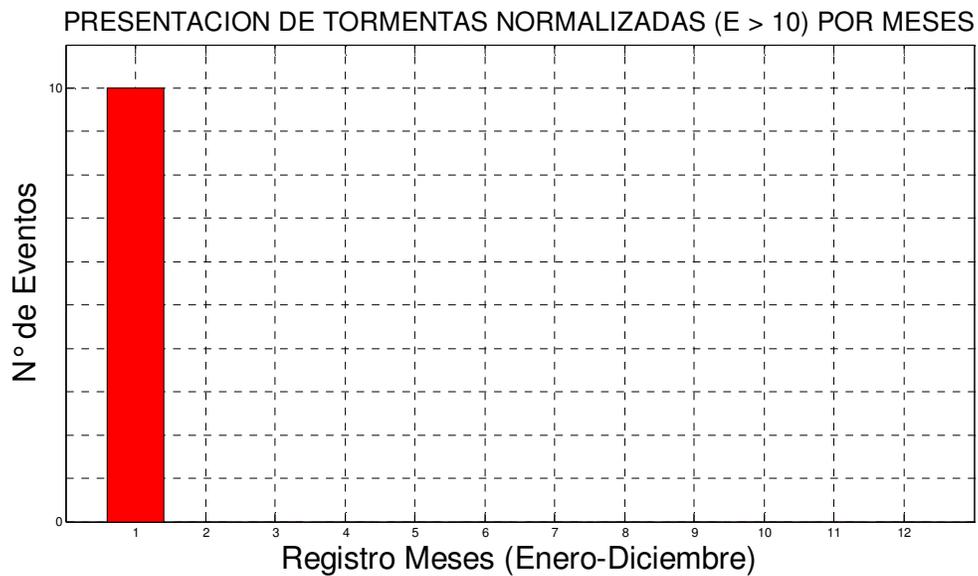


Figura A 93 Presentación de Tormentas Normalizadas ($E > 10$) por mes

Presentación de alturas de ola significante por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 2 m POR AÑO

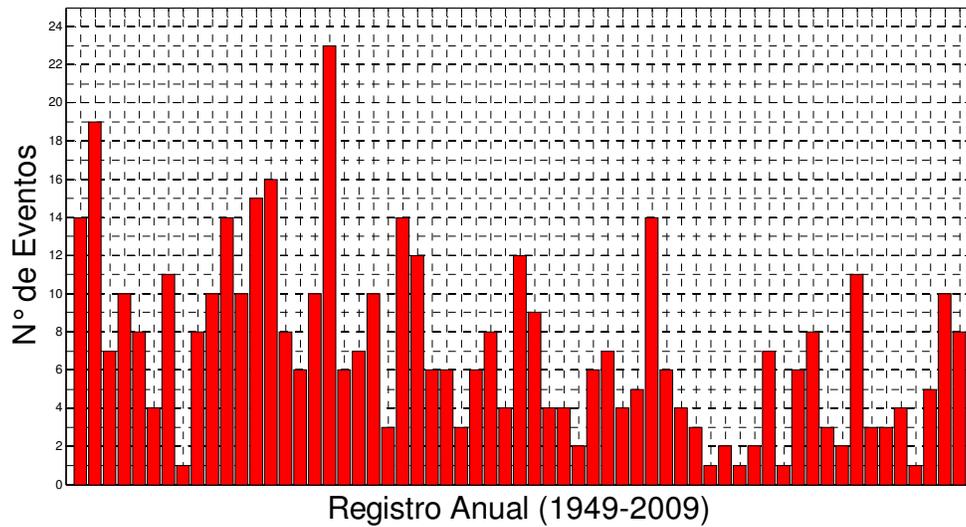


Figura A 94 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR AÑO

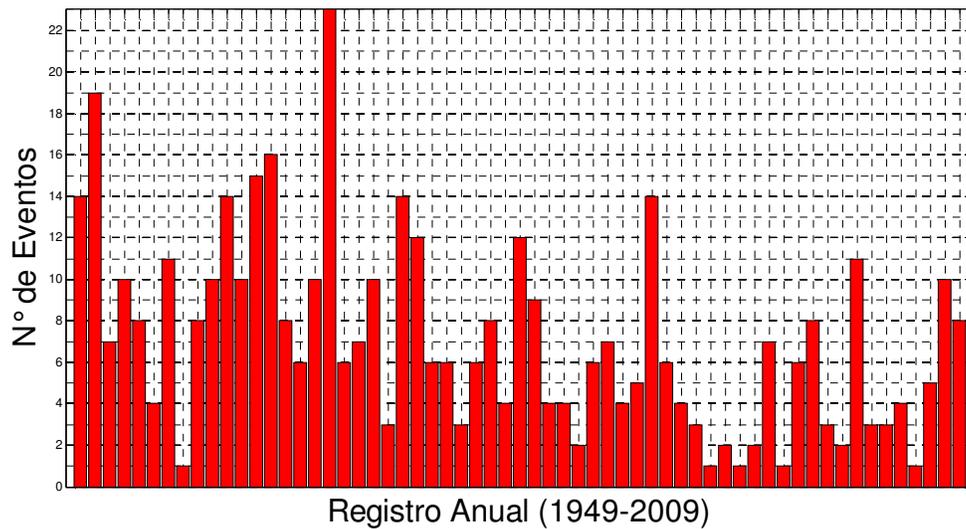


Figura A 95 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 3m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR AÑO

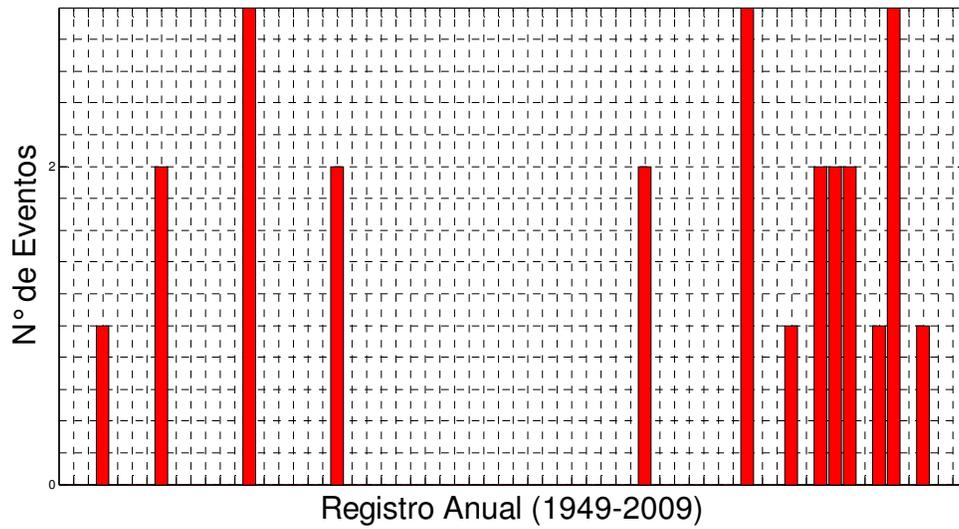


Figura A 96 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 4m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR AÑO

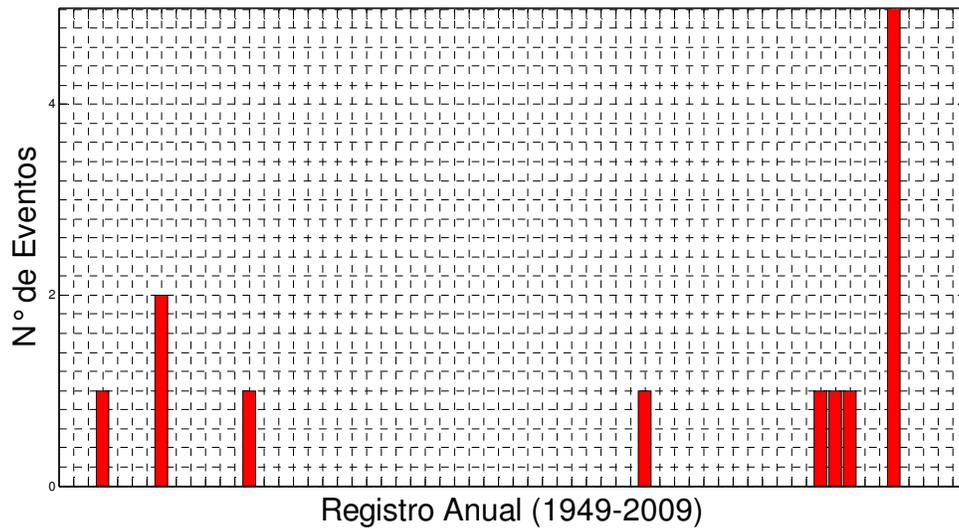


Figura A 97 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 5m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR AÑO

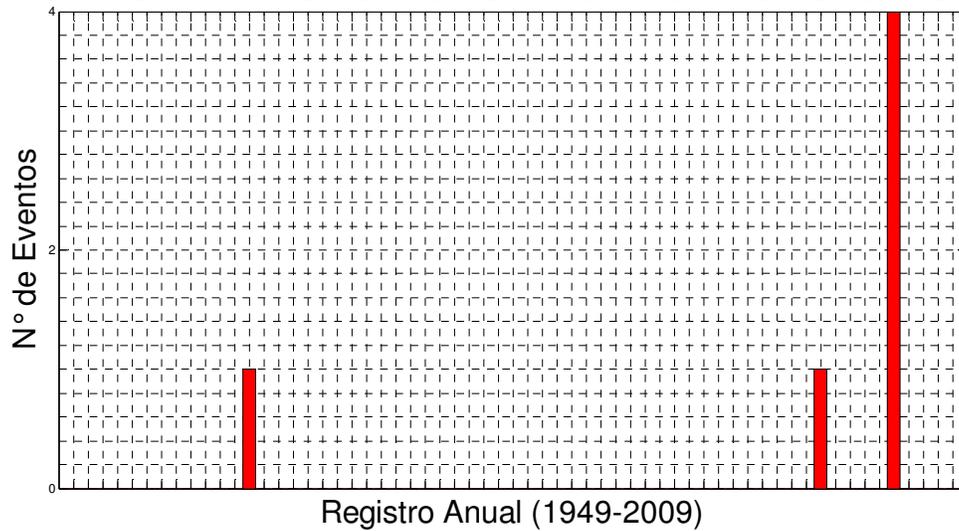


Figura A 98 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 6m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR AÑO

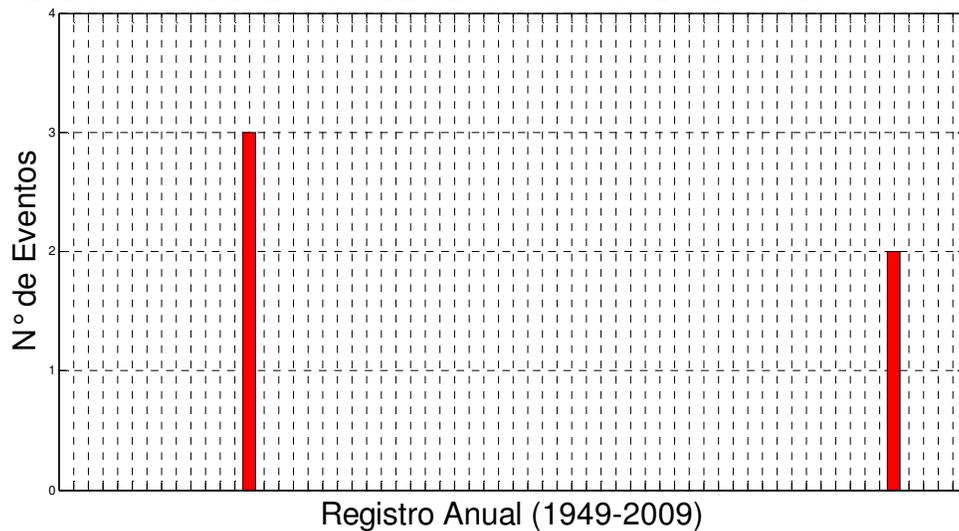


Figura A 99 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 7m por año

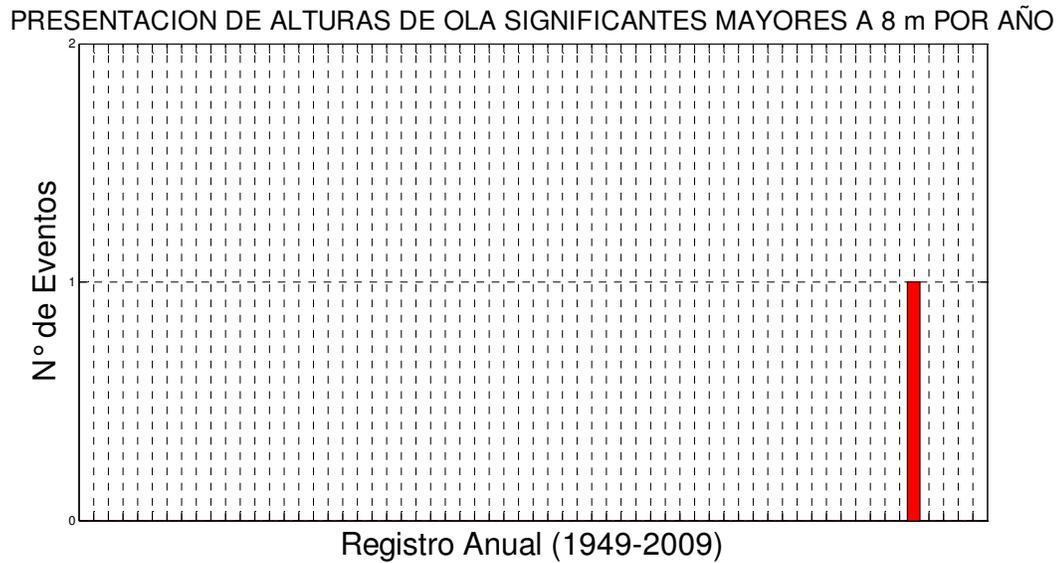


Figura A 100 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 8m por año

Presentación de Tormentas normalizadas por año

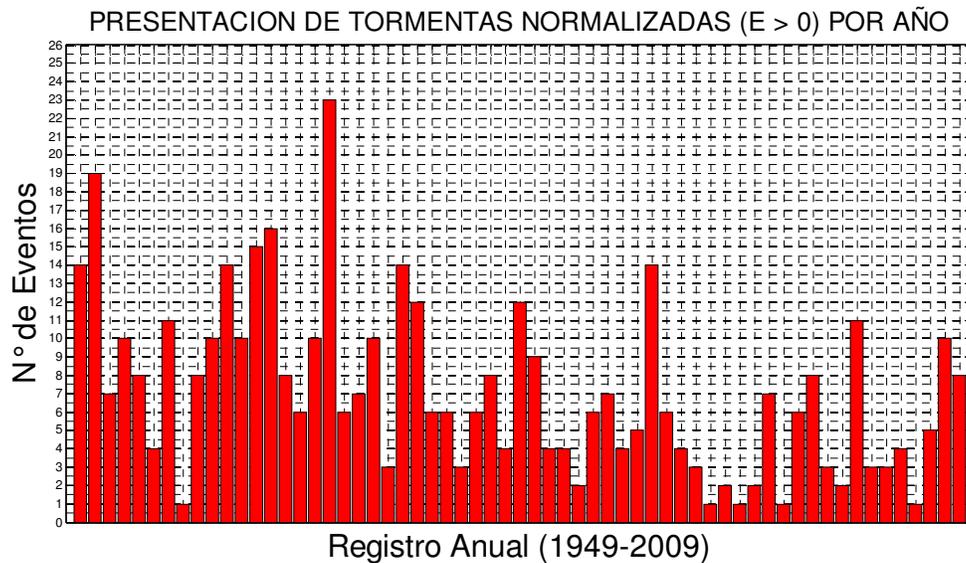


Figura A 101 Presentación de Tormentas Normalizadas ($E > 0$) por año

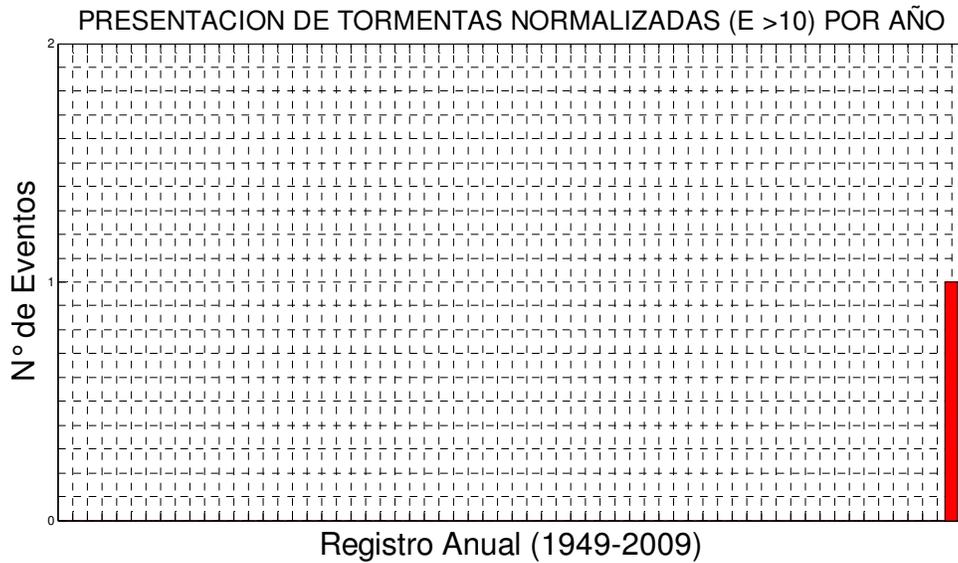


Figura A 102 Presentación de Tormentas Normalizadas (E>10) por año

Evolución temporal de altura de ola significativa de la última década

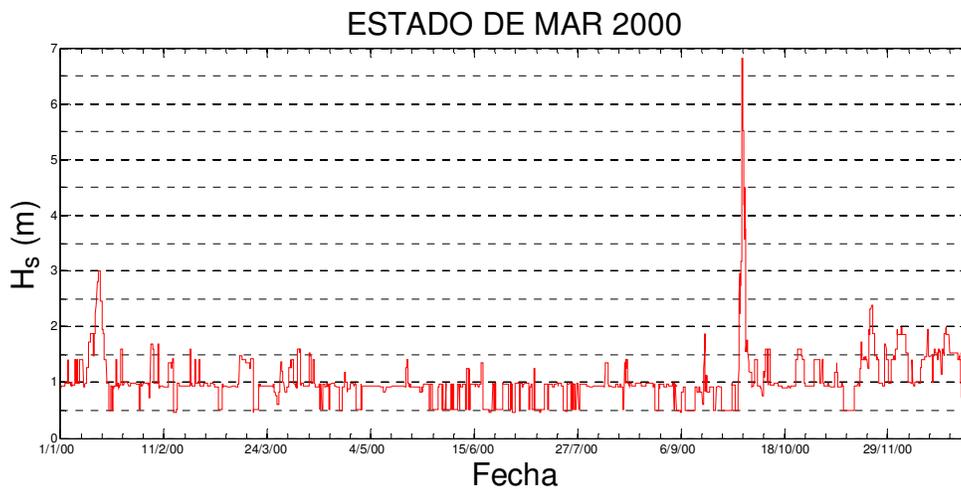


Figura A 103 Estado de Mar 2000

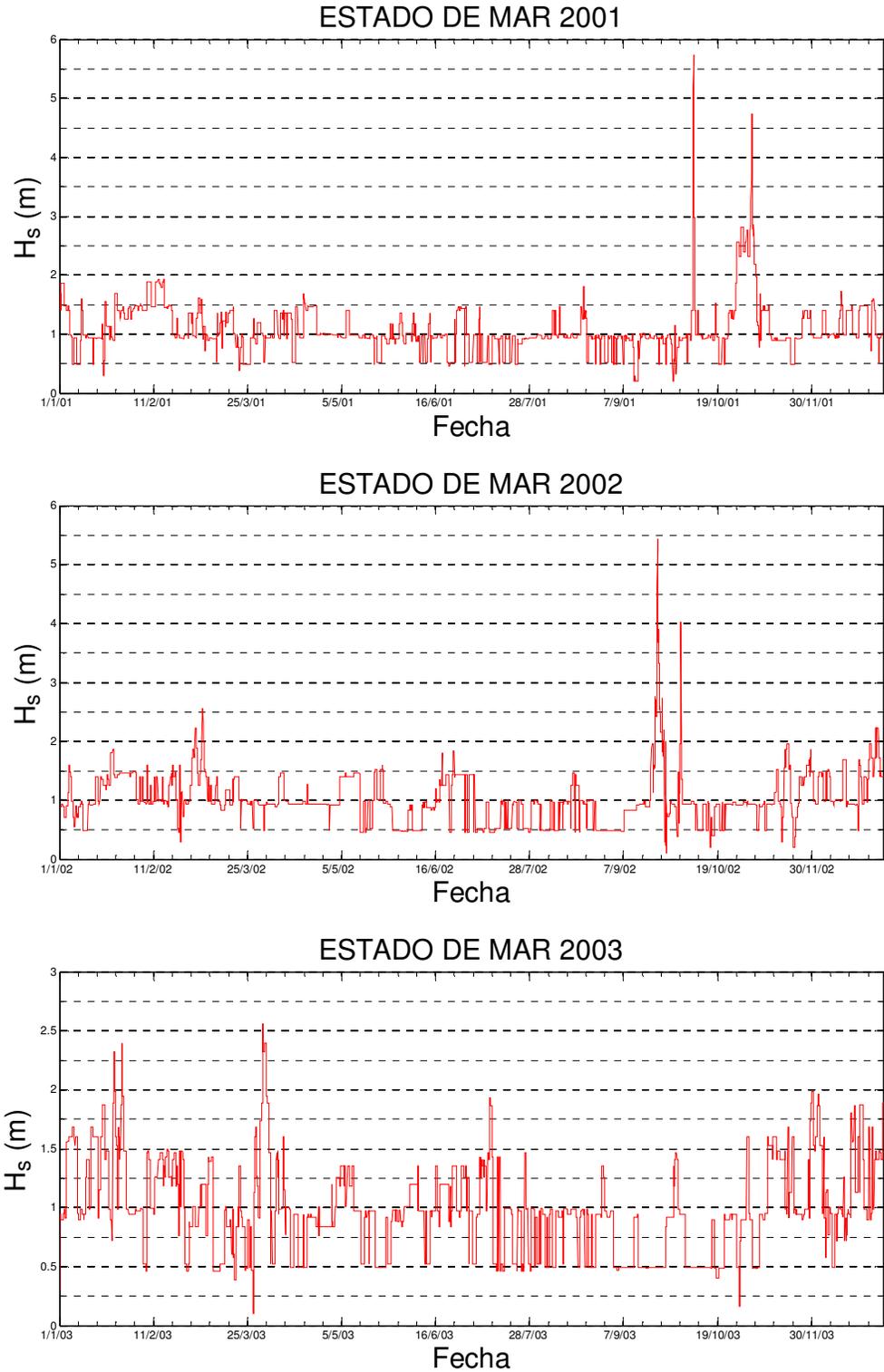


Figura A 104 Estados de Mar 2001-2003

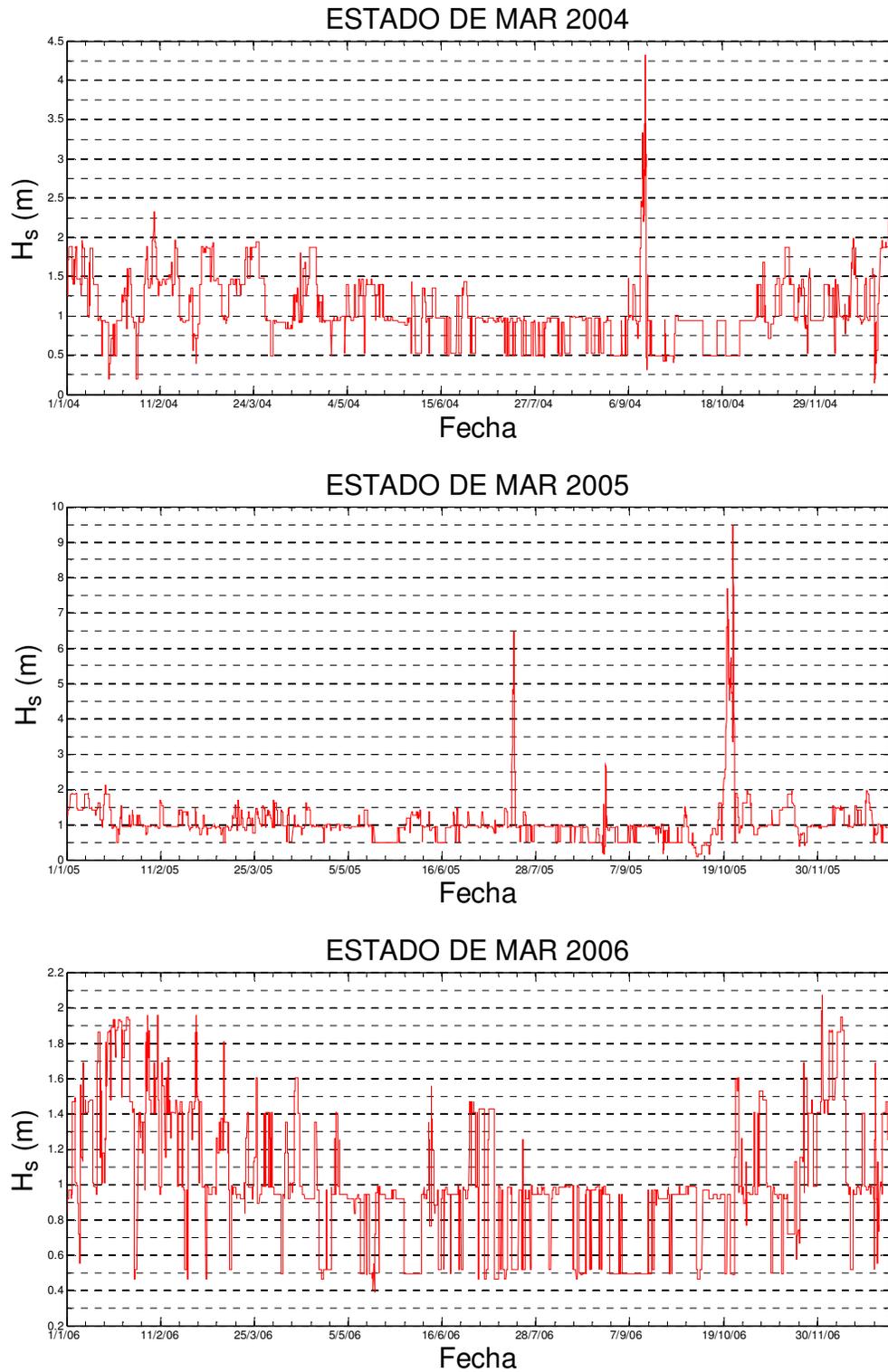


Figura A 105 Estados de Mar 2004-2006

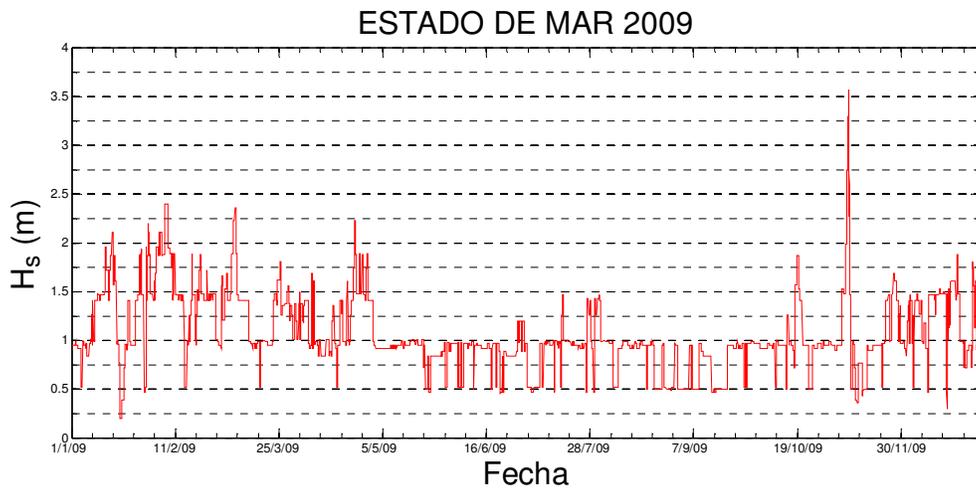
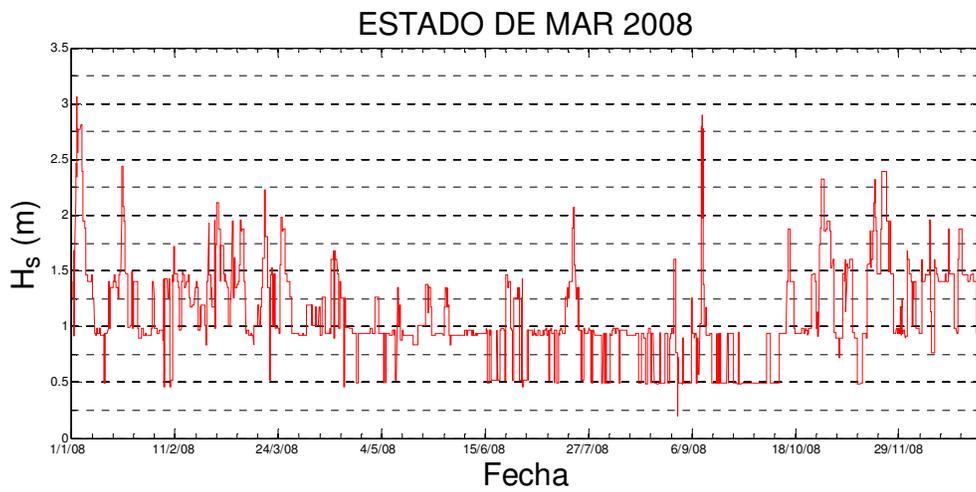
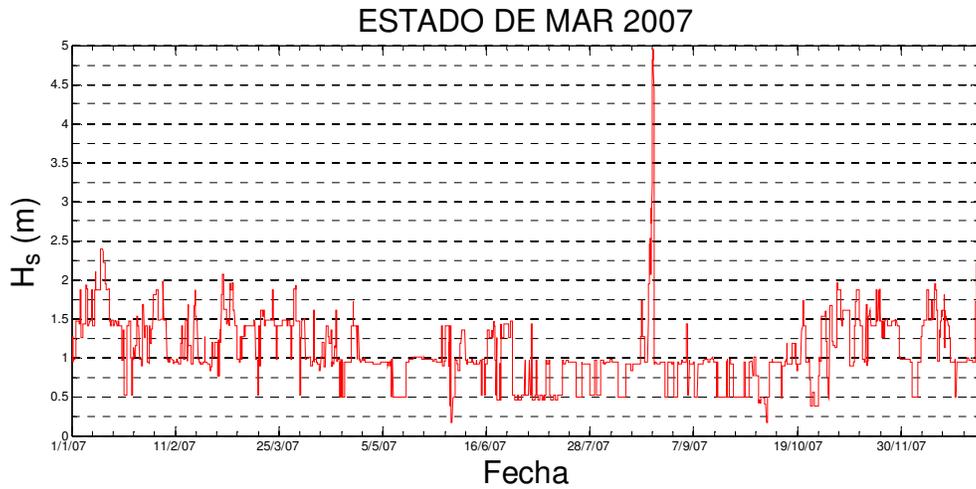


Figura A 106 Estados de Mar 2007-2009

Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa

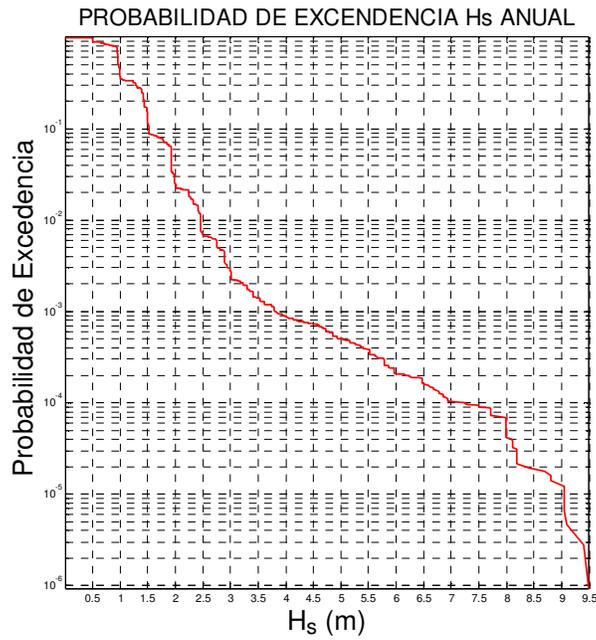


Figura A 107 Probabilidad de Excedencia Anual

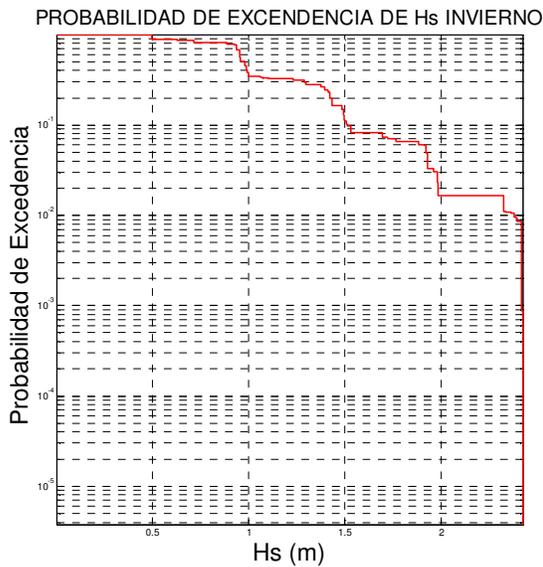


Figura A 108 Probabilidad de Excedencia Invierno

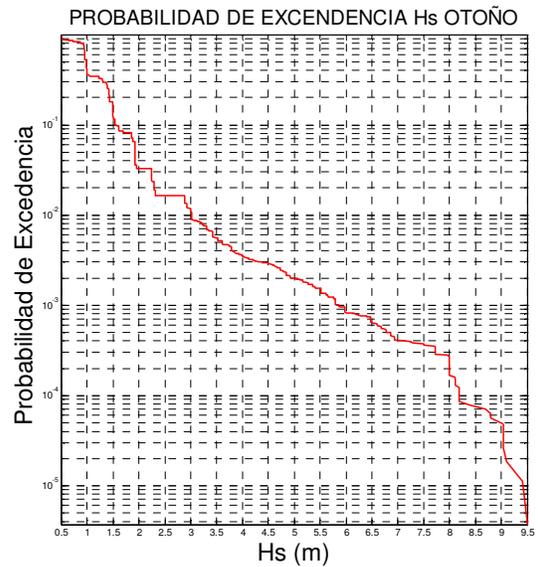


Figura A 109 Probabilidad de Excedencia Otoño

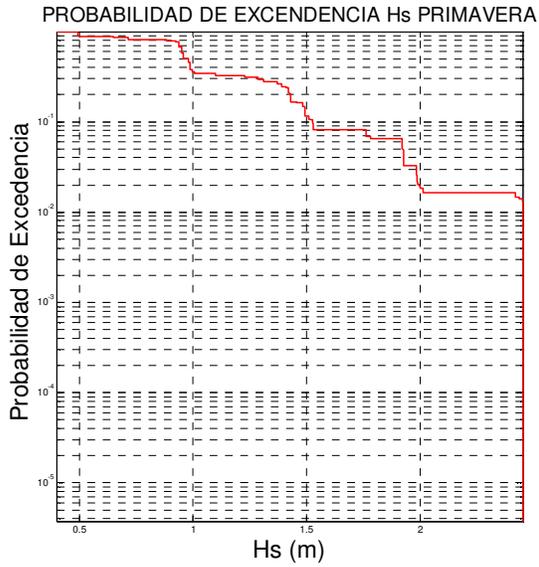


Figura A 110 Probabilidad de Excedencia Primavera

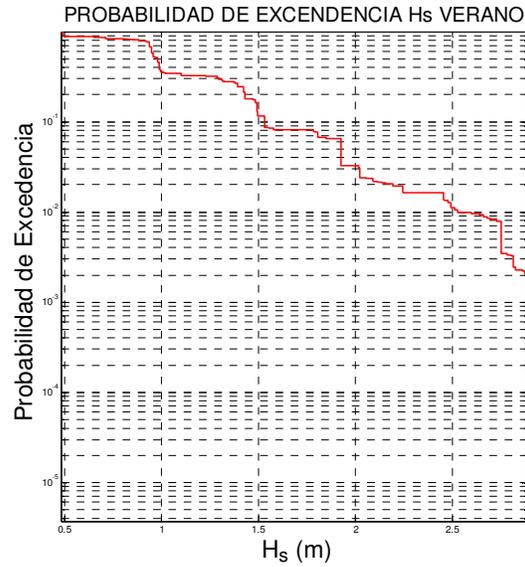


Figura A 111 Probabilidad de Excedencia Verano

Probabilidad de excedencia de periodos medio de ola

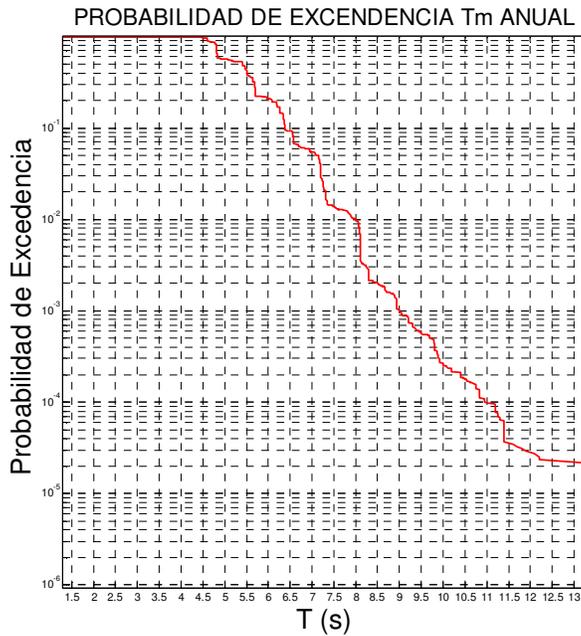


Figura A 112 Probabilidad de Excedencia Anual

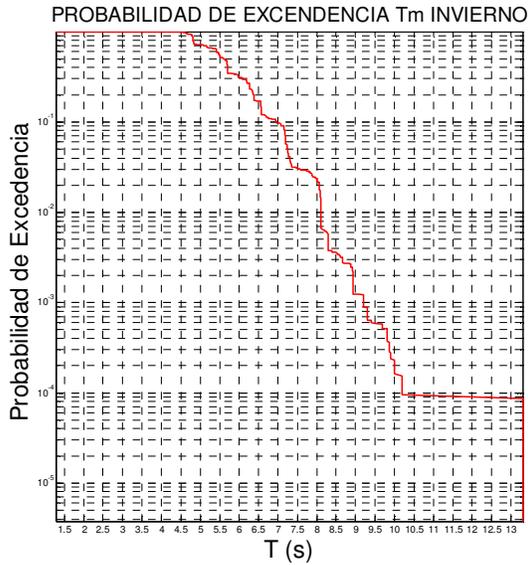


Figura A 113 Probabilidad de Excedencia Invierno

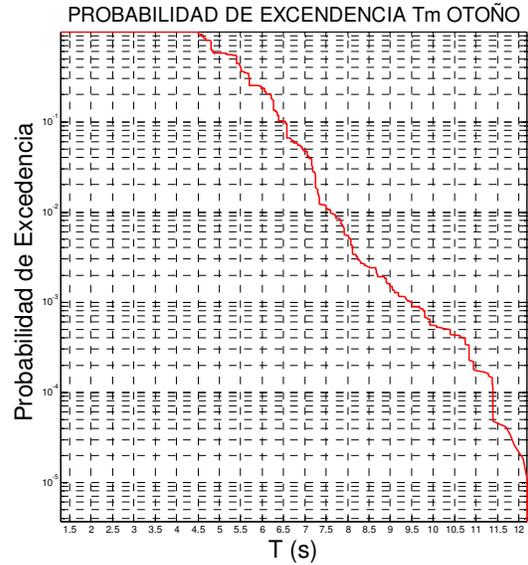


Figura A 114 Probabilidad de Excedencia Otoño

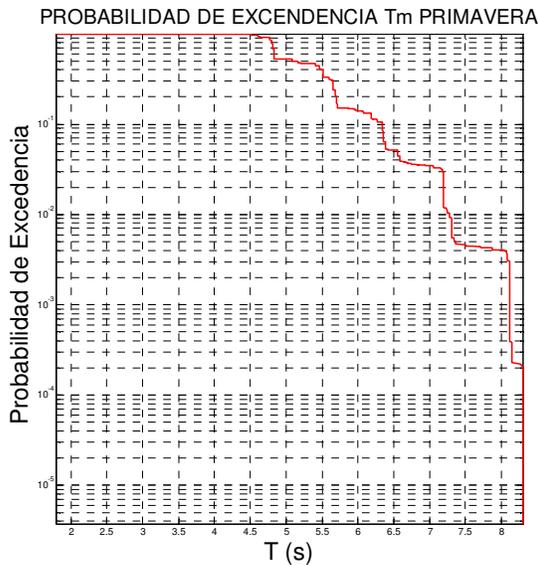


Figura A 115 Probabilidad de Excedencia Primavera

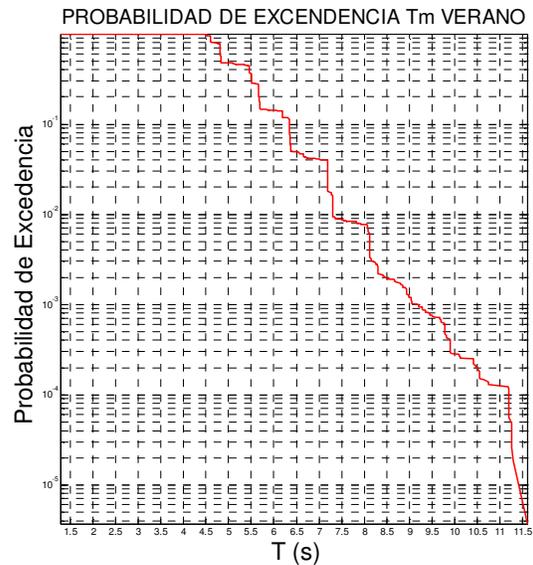


Figura A 116 Probabilidad de Excedencia Verano

Régimen extremal de altura de ola significativa

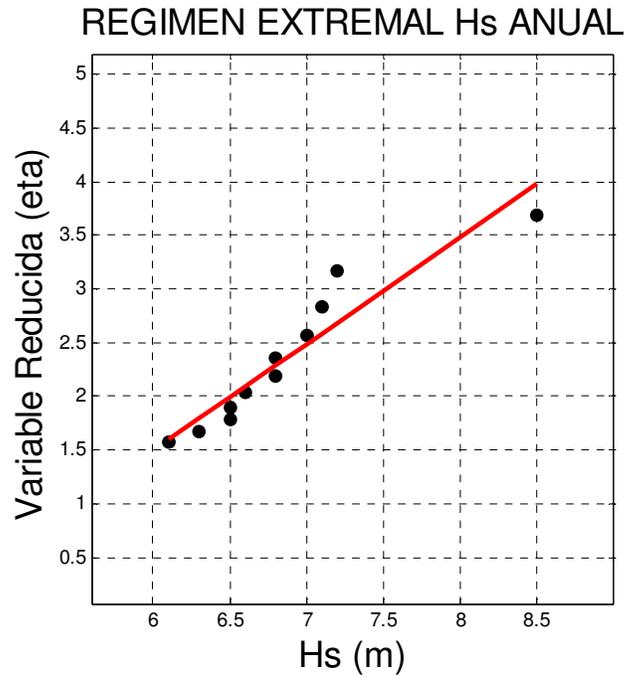


Figura A 117 Régimen Extremal Anual

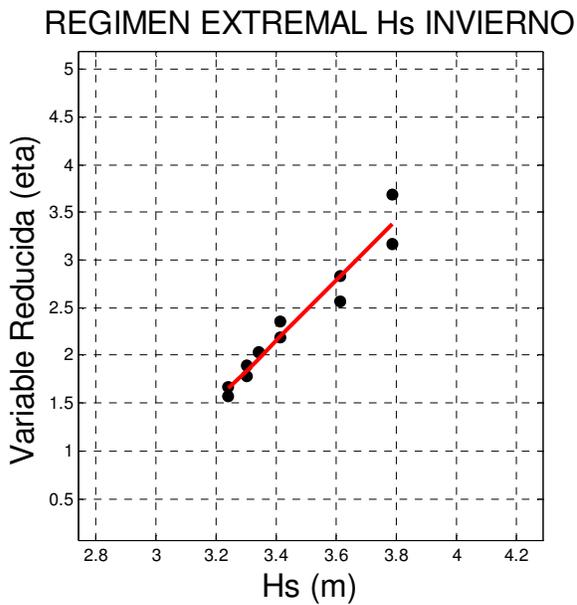


Figura A 118 Régimen Extremal Invierno

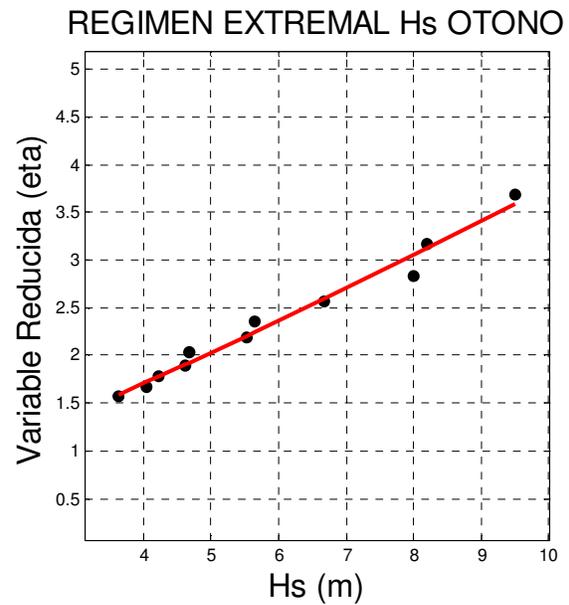


Figura A 119 Régimen Extremal Otoño

REGIMEN EXTREMAL Hs PRIMAVERA

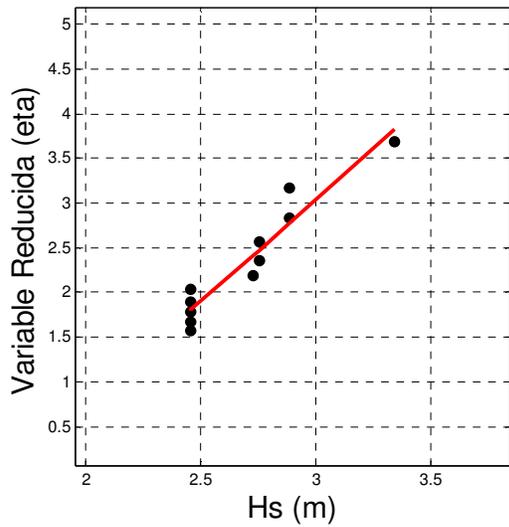


Figura A 120 Régimen Extremal Primavera

REGIMEN EXTREMAL DE Hs VERANO

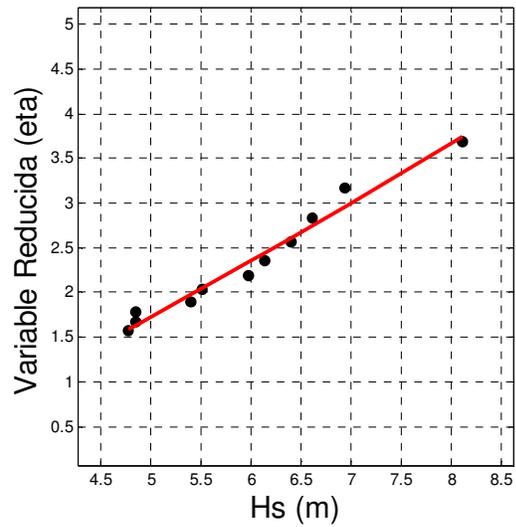


Figura A 121 Régimen Extremal Verano

Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos

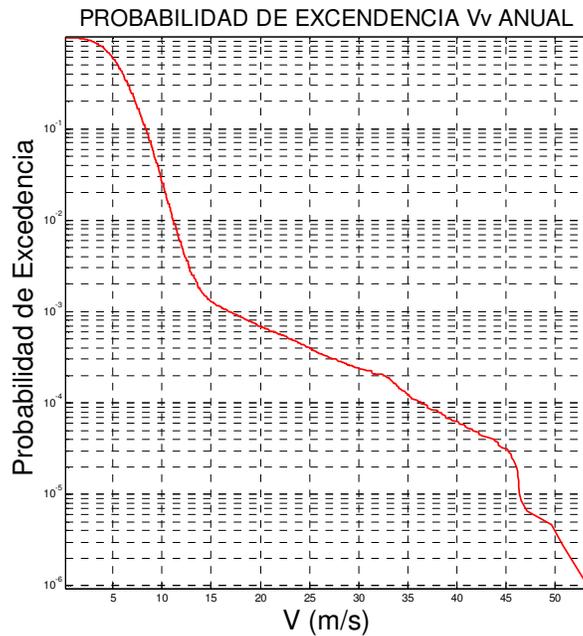


Figura A 122 Probabilidad de Excedencia Anual

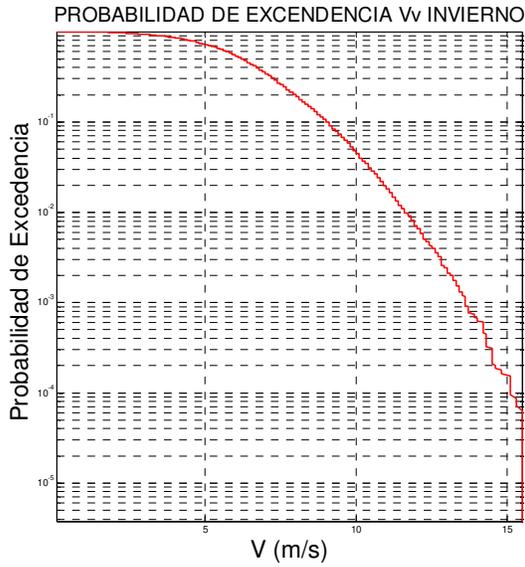


Figura A 123 Probabilidad de Excedencia Invierno

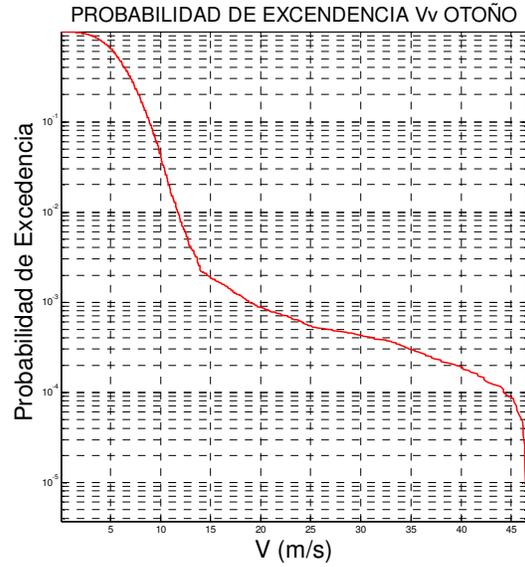


Figura A 124 Probabilidad de Excedencia Otoño

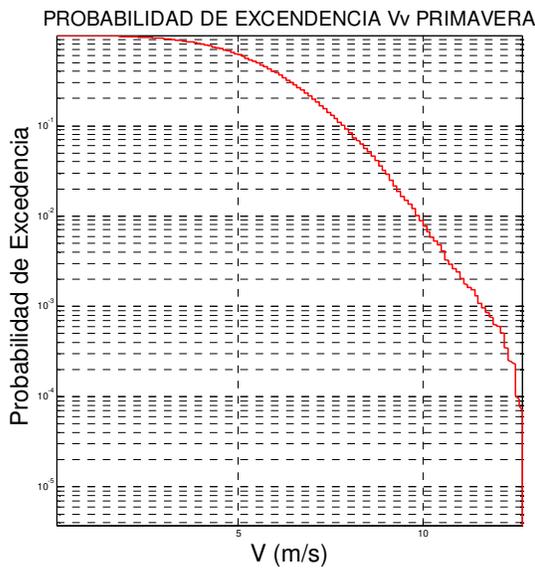


Figura A 125 Probabilidad de Excedencia Primavera

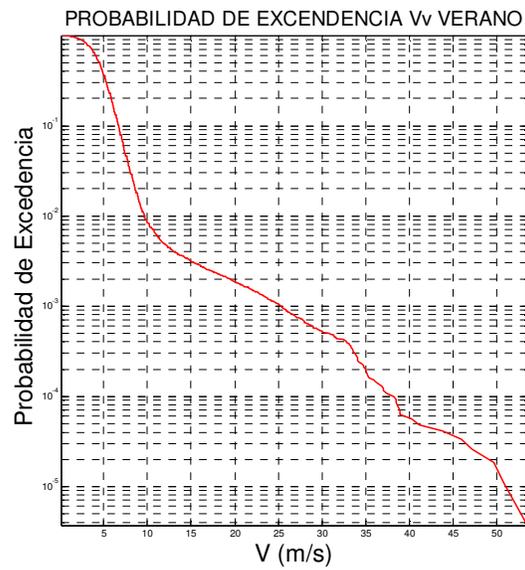


Figura A 126 Probabilidad de Excedencia Verano

Régimen extremal de velocidades de vientos sostenidos

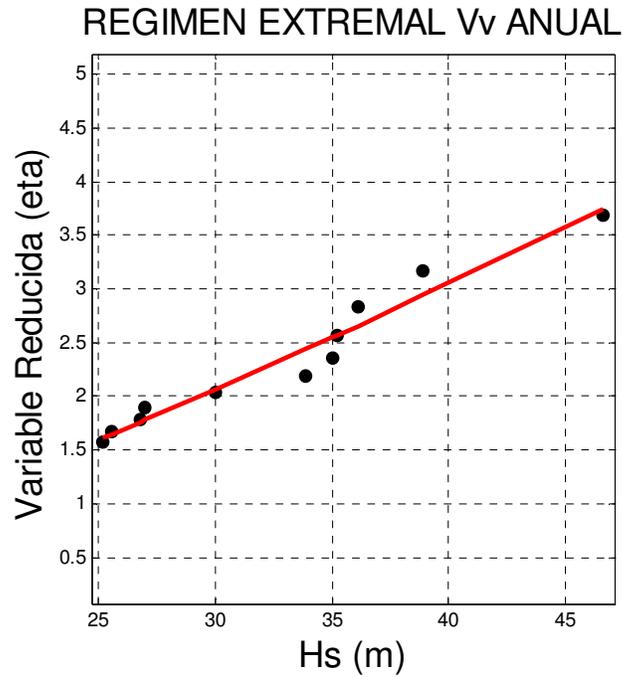


Figura A 127 Régimen Extremal Anual

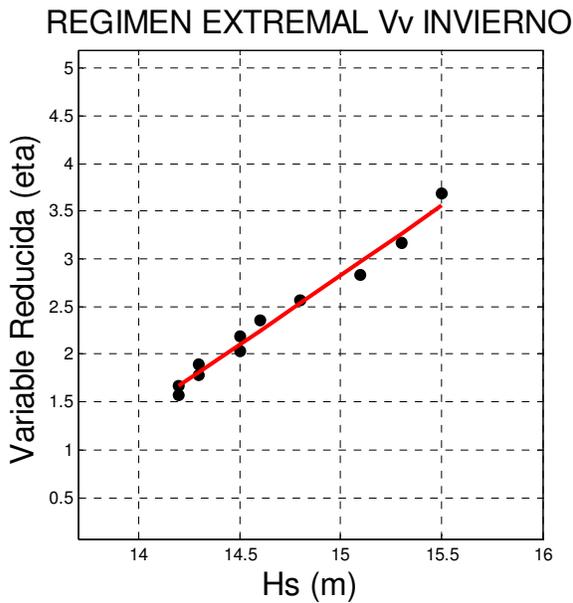


Figura A 128 Régimen Extremal Invierno

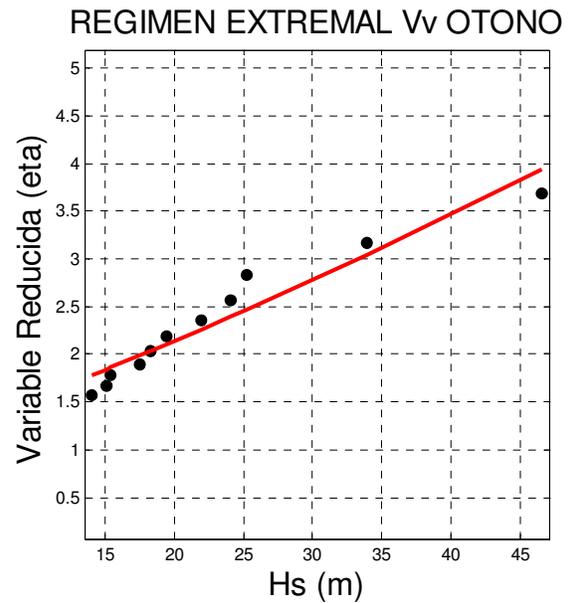


Figura A 129 Régimen Extremal Otoño

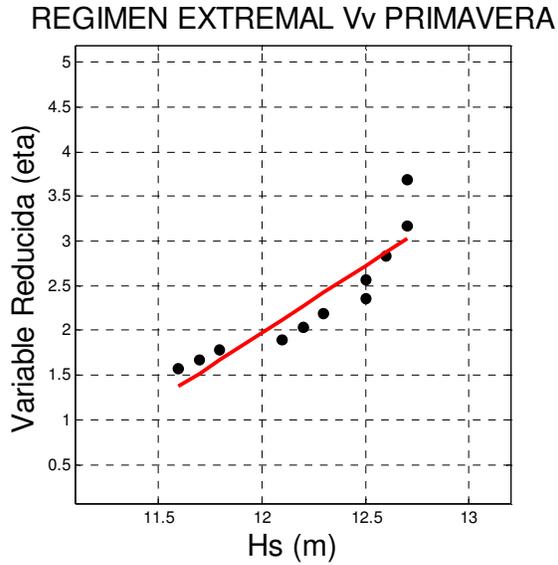


Figura A 130 Régimen Extremal Primavera

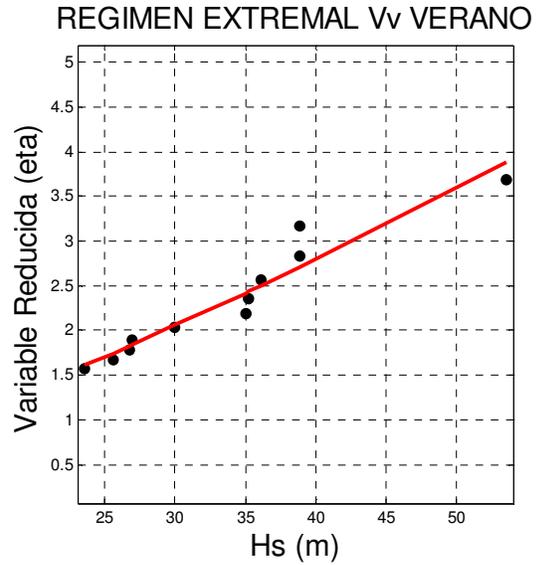


Figura A 131 Régimen Extremal Verano

Análisis de tormentas

Duración media de tormentas

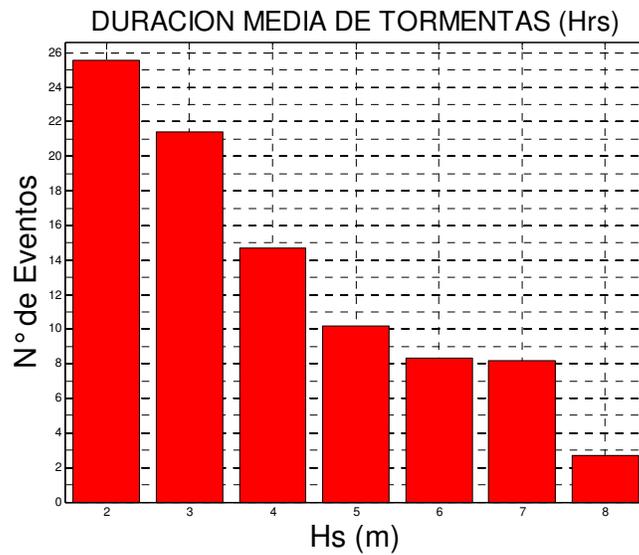


Figura A 132 Duración Media de Tormentas

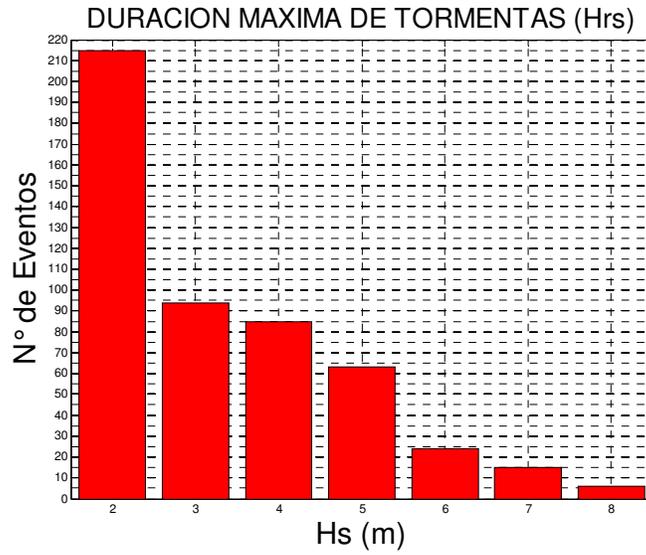


Figura A 133 Duración Máxima de Tormentas

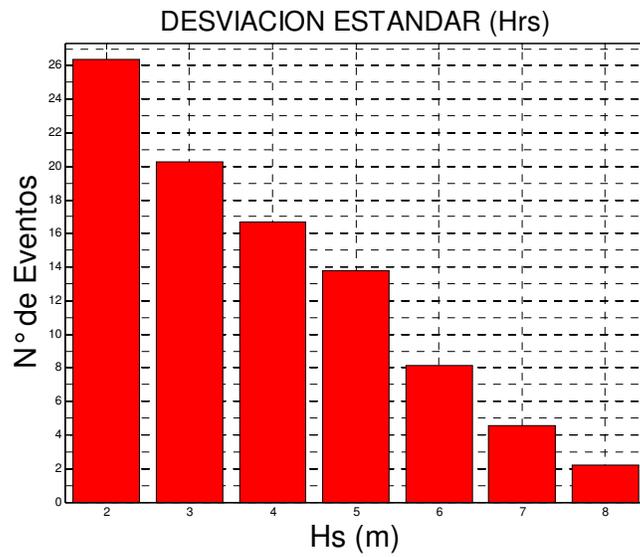


Figura A 134 Desviación Estándar

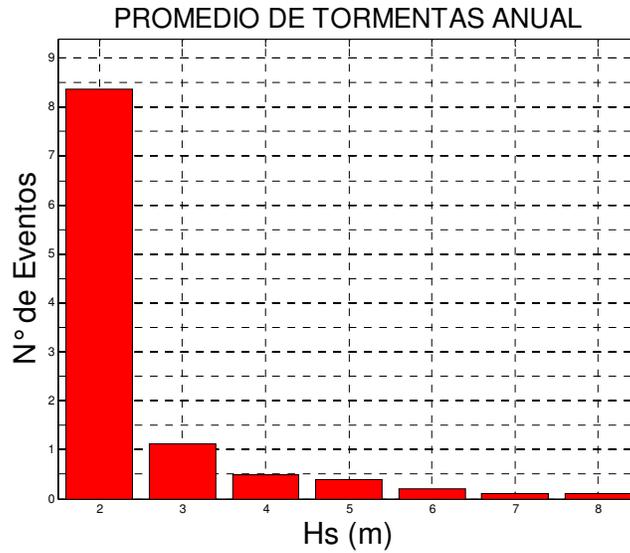


Figura A 135 Promedio de Tormentas Anual

Presentación de alturas de ola significativa por mes

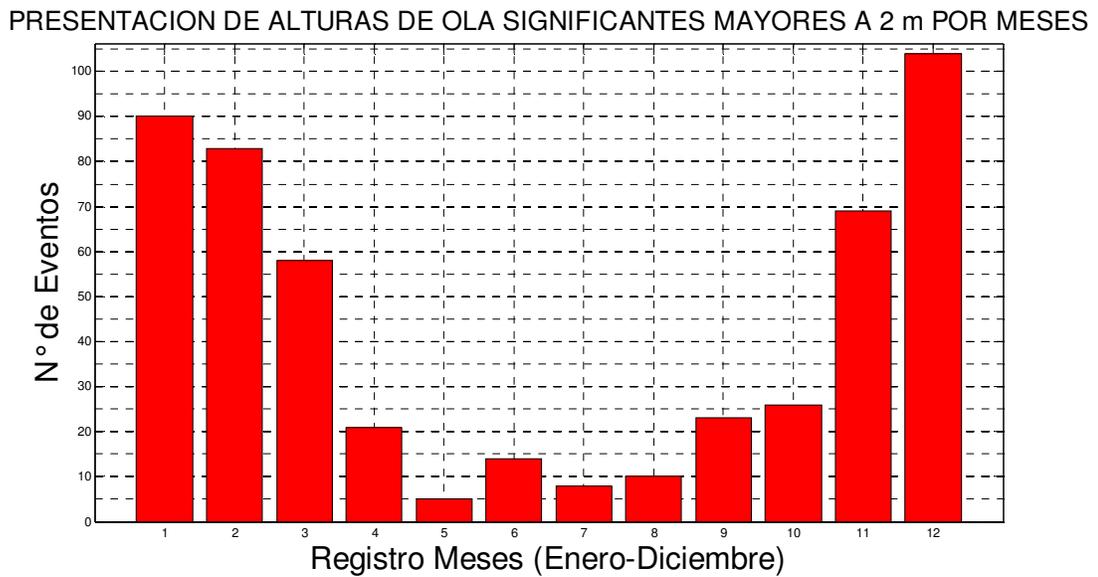


Figura A 136 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR MESES

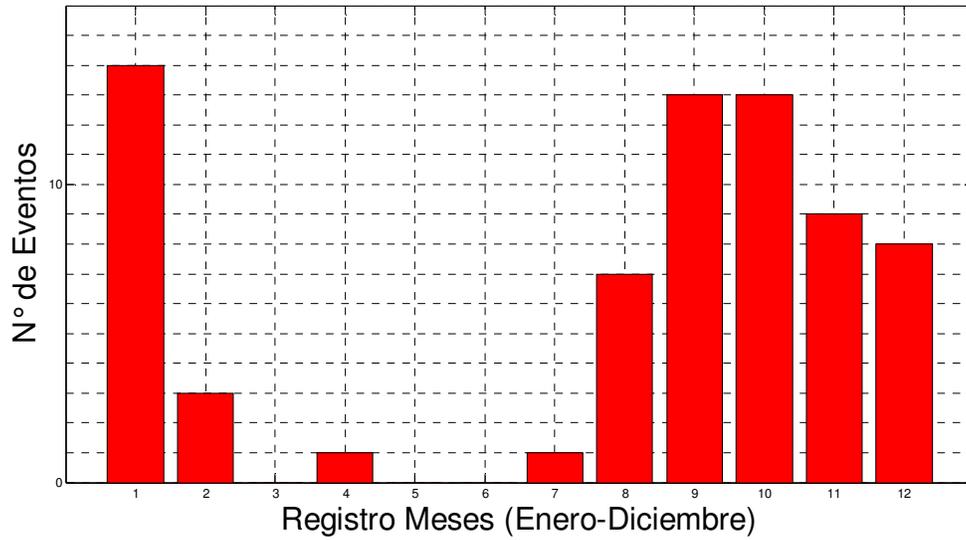


Figura A 137 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 3m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR MESES

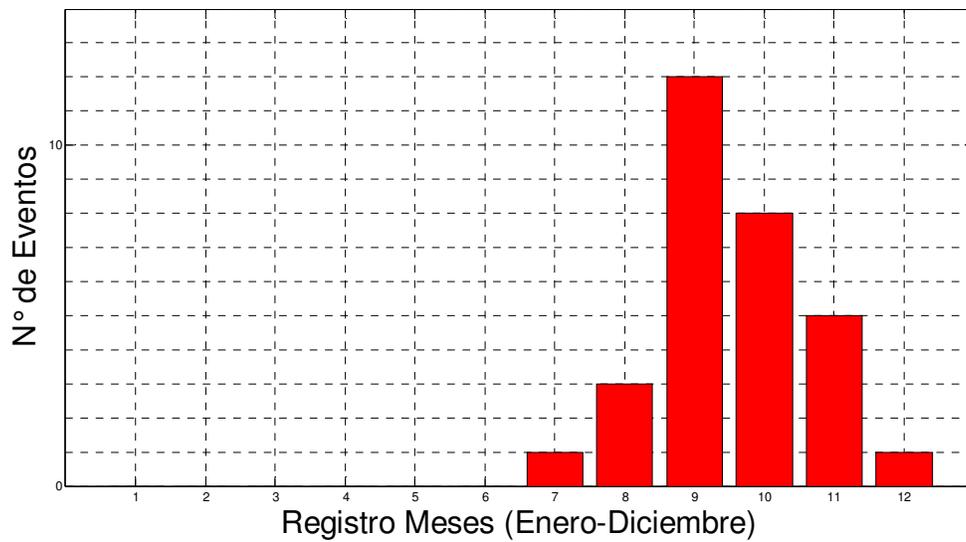


Figura A 138 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 4m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR MESES

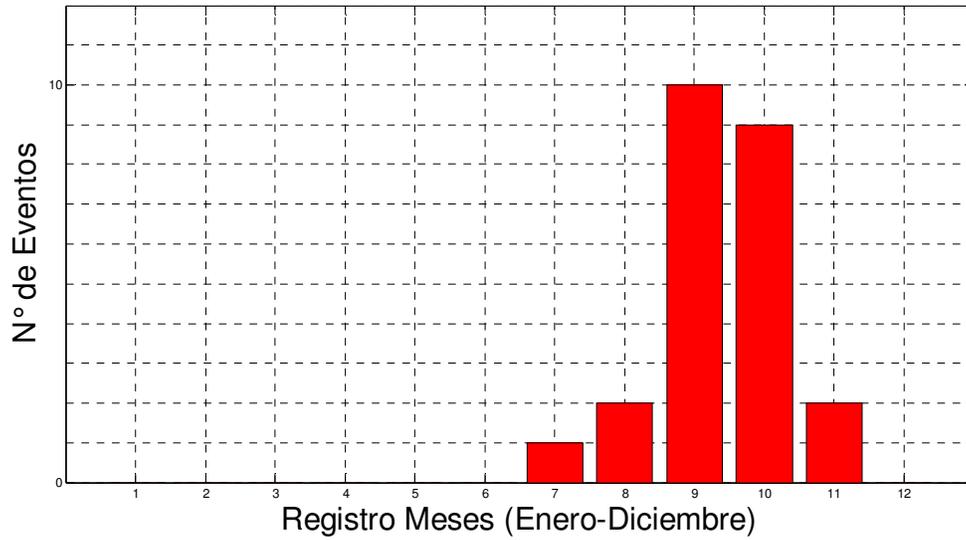


Figura A 139 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 5m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR MESES

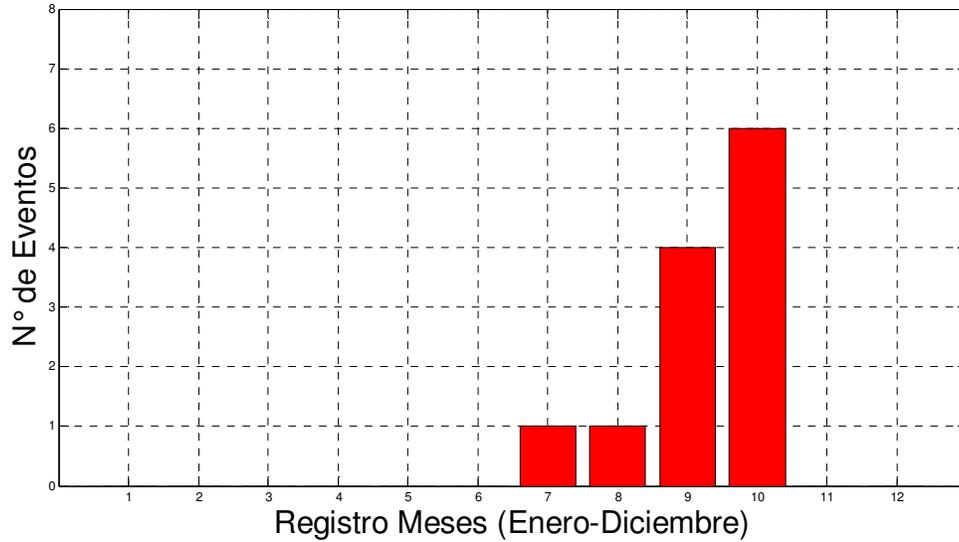


Figura A 140 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 6m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR MESES

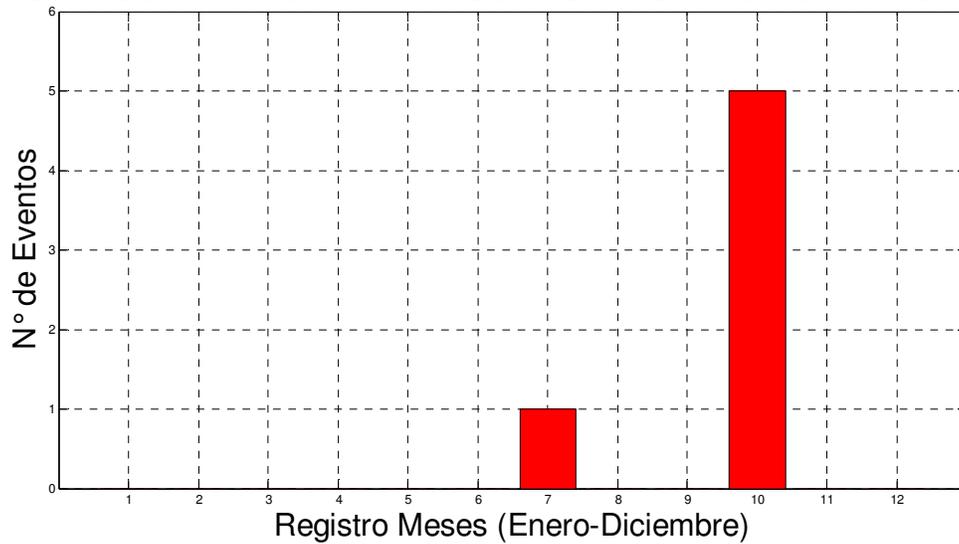


Figura A 141 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 7m por mes

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 8 m POR MESES

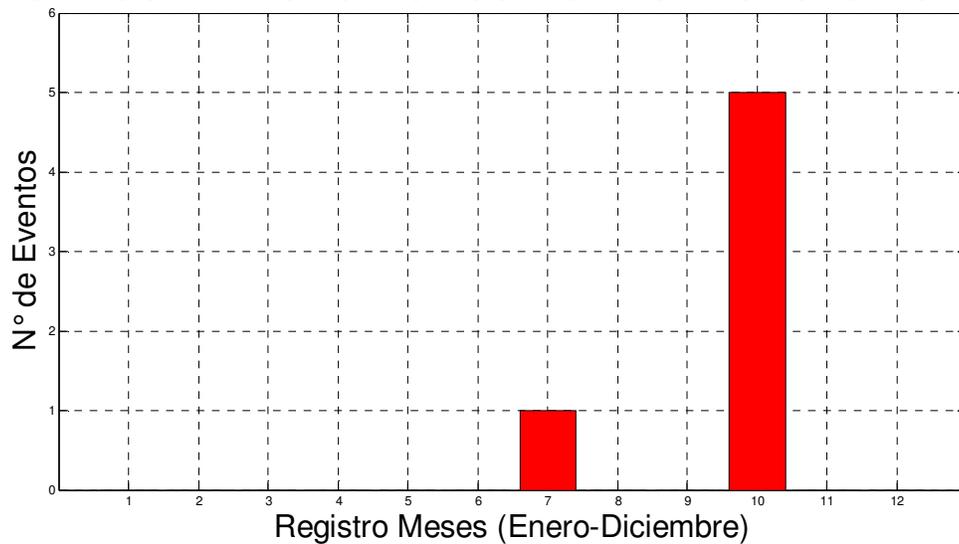


Figura A 142 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 8m por mes

Presentación de Tormentas normalizadas por mes

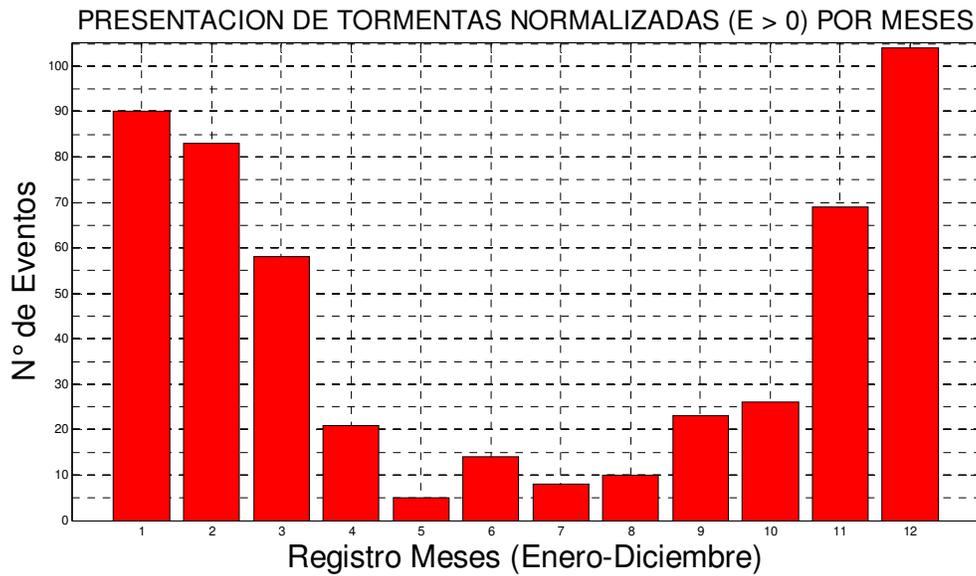


Figura A 143 Presentación de Tormentas Normalizadas ($E > 0$) por mes

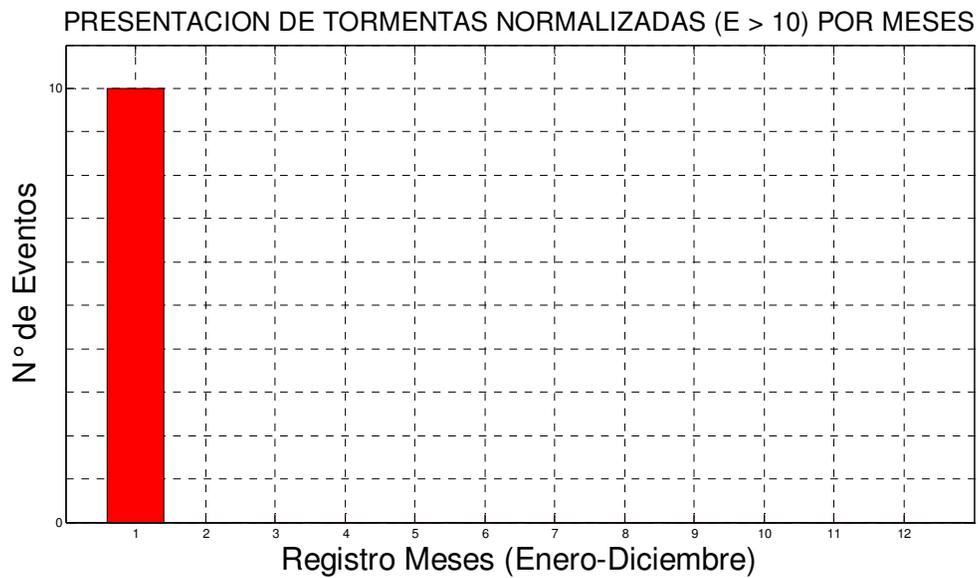


Figura A 144 Presentación de Tormentas Normalizadas ($E > 10$) por mes

Presentación de alturas de ola significante por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 2 m POR AÑO

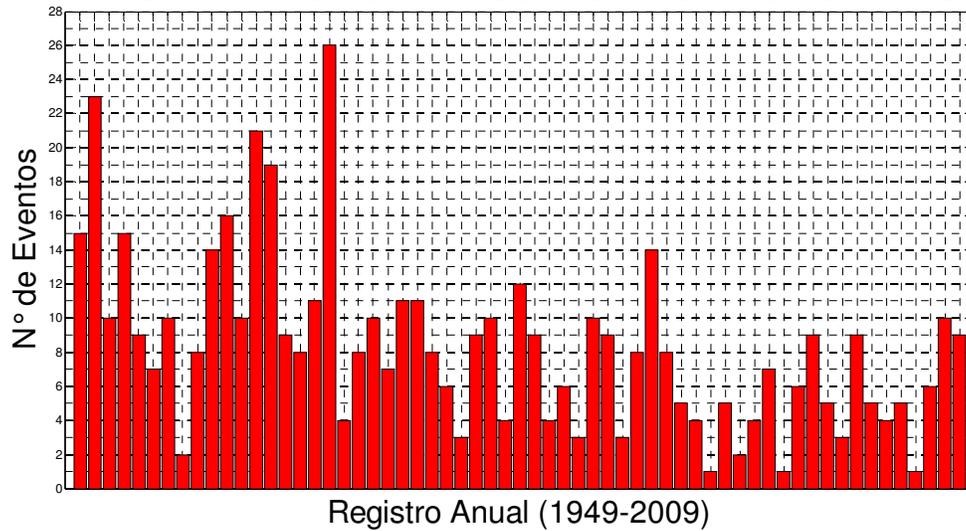


Figura A 145 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 2m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 3 m POR AÑO

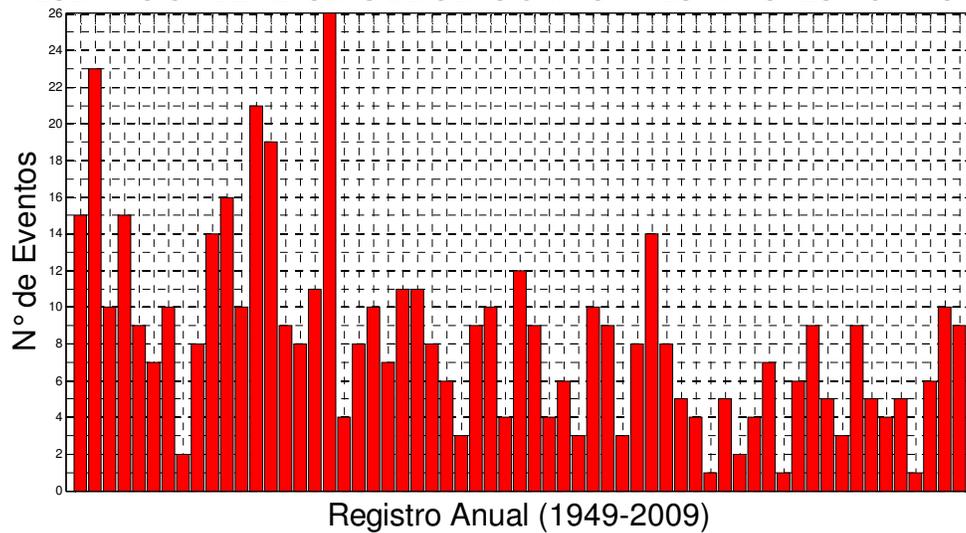


Figura A 146 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 3m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 4 m POR AÑO

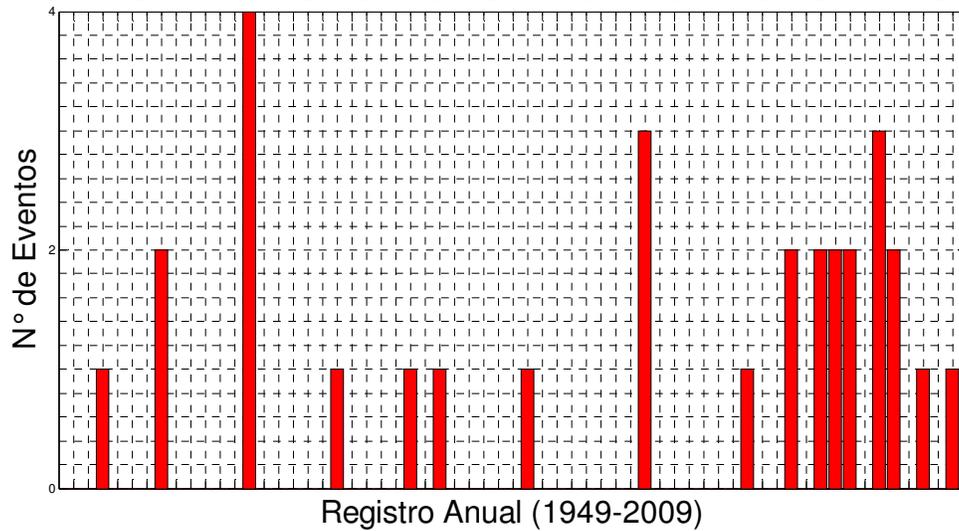


Figura A 147 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 4m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 5 m POR AÑO

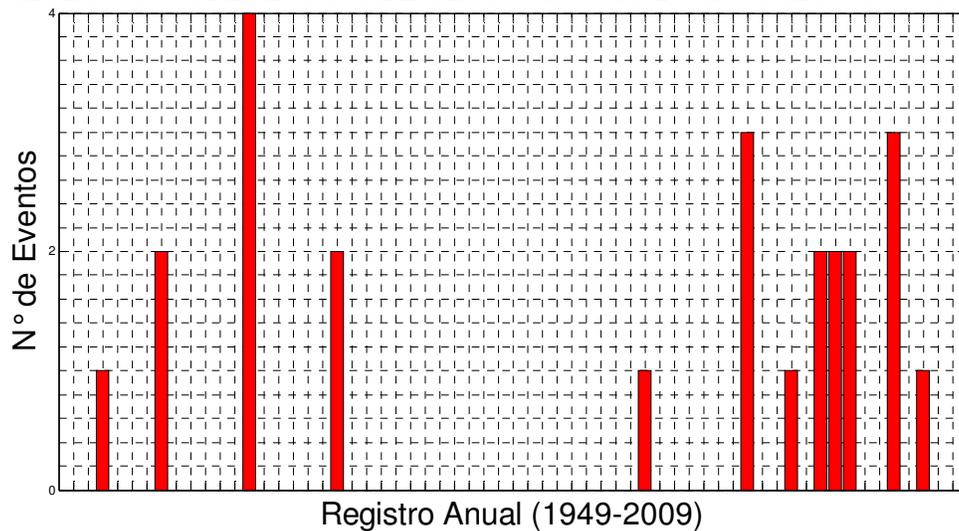


Figura A 148 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 5m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 6 m POR AÑO

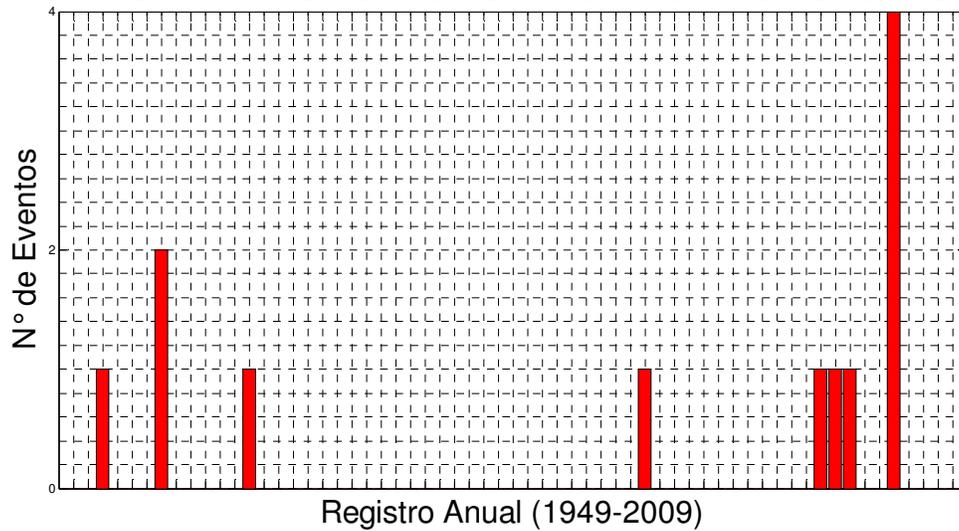


Figura A 149 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 6m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 7 m POR AÑO

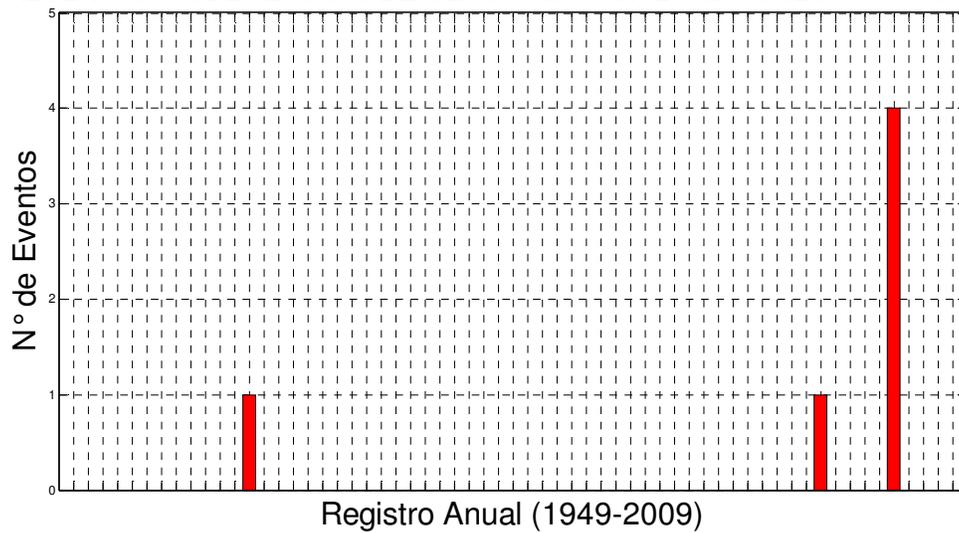


Figura A 150 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 7m por año

PRESENTACION DE ALTURAS DE OLA SIGNIFICANTES MAYORES A 8 m POR AÑO

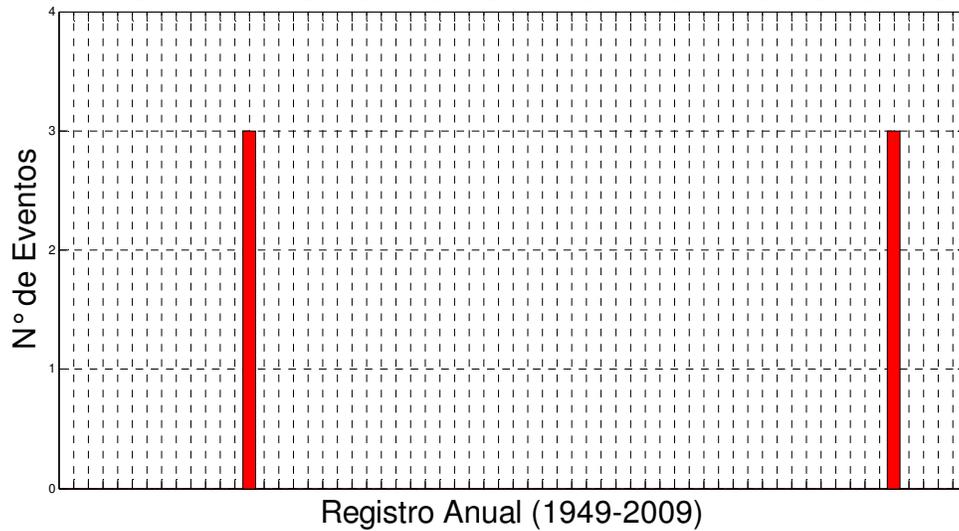


Figura A 151 Presentación de Alturas de Ola Significantes Mayores a 8m por año

Presentación de Tormentas normalizadas por año

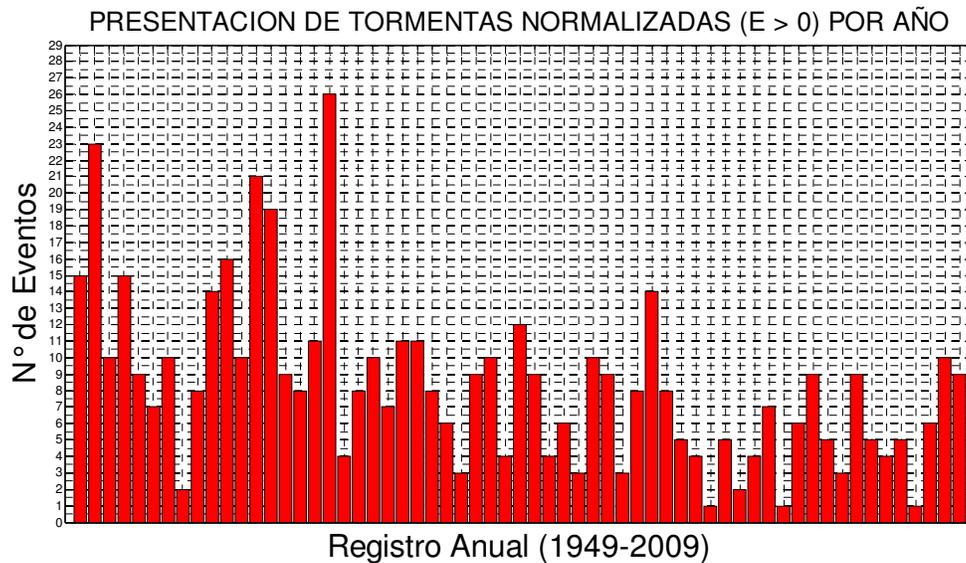


Figura A 152 Presentación de Tormentas Normalizadas (E>0) por año

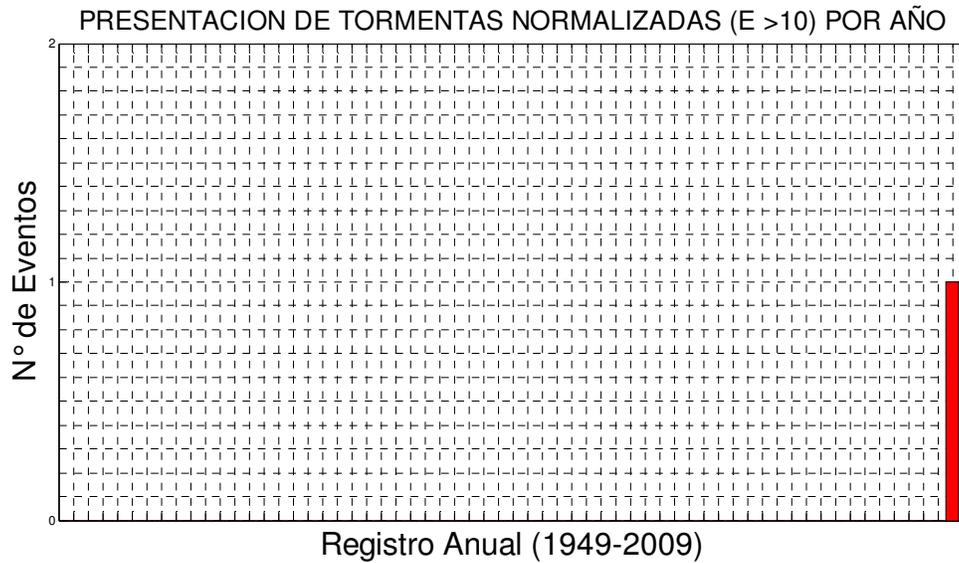


Figura A 153 Presentación de Tormentas Normalizadas (E>10) por año

Evolución temporal de altura de ola significativa de la última década

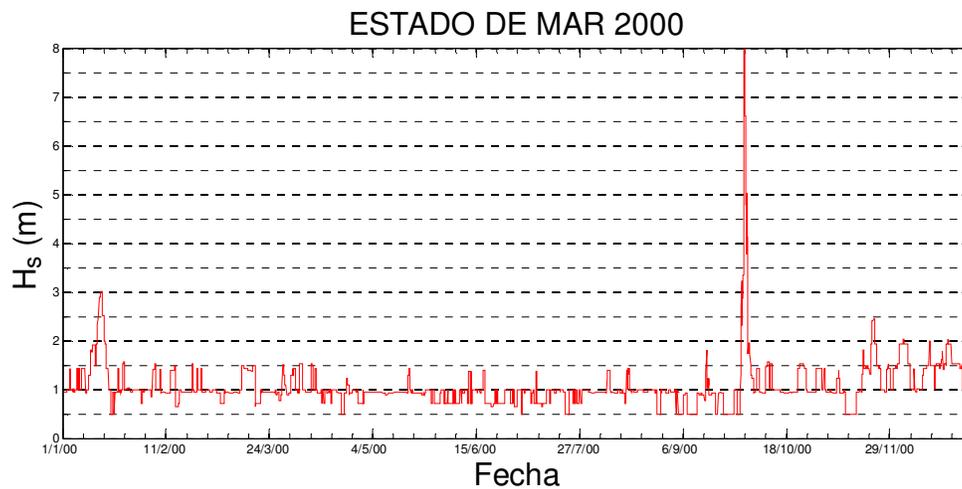


Figura A 154 Estado de Mar 2000

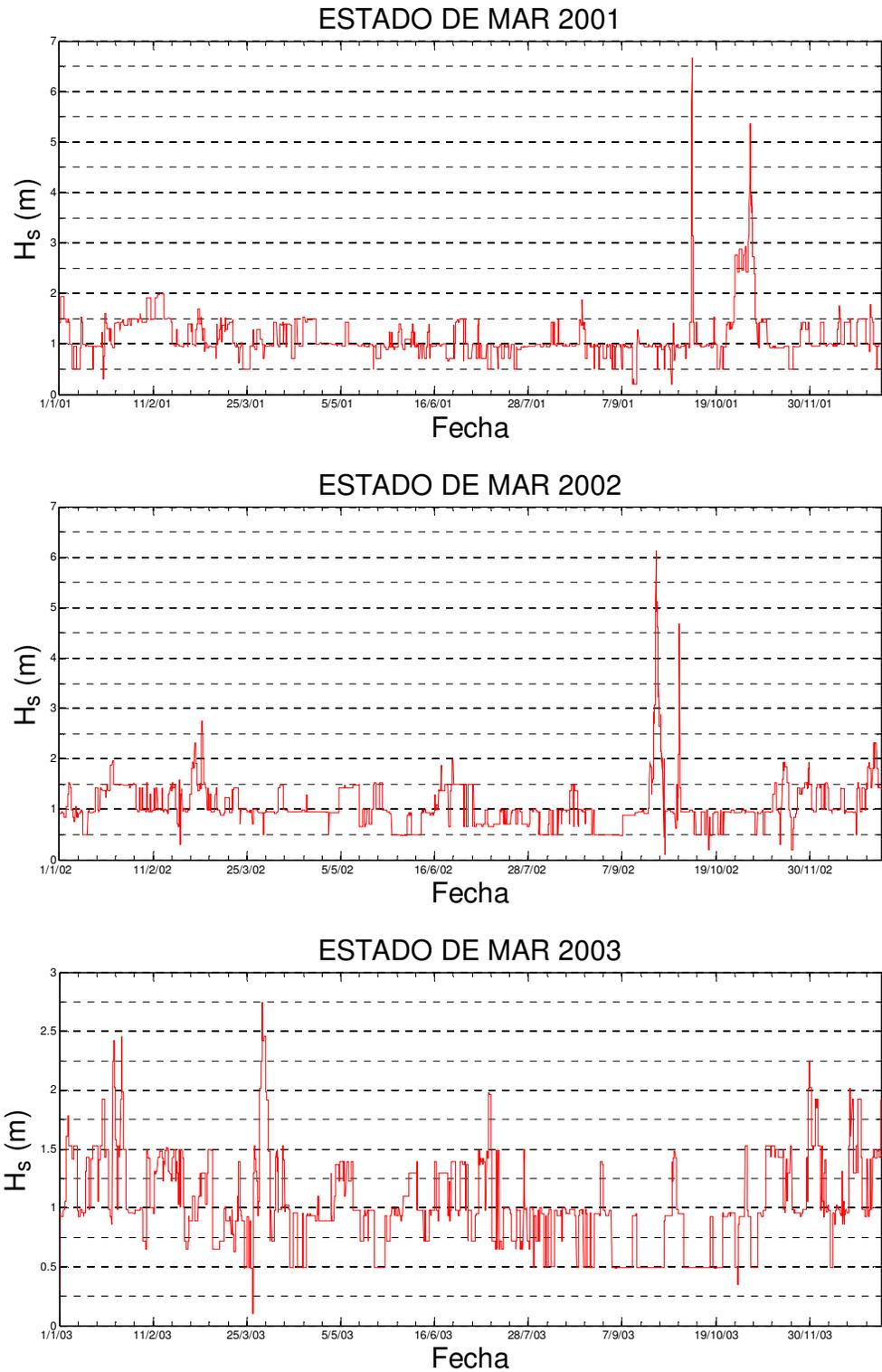


Figura A 155 Estados de Mar 2001-2003

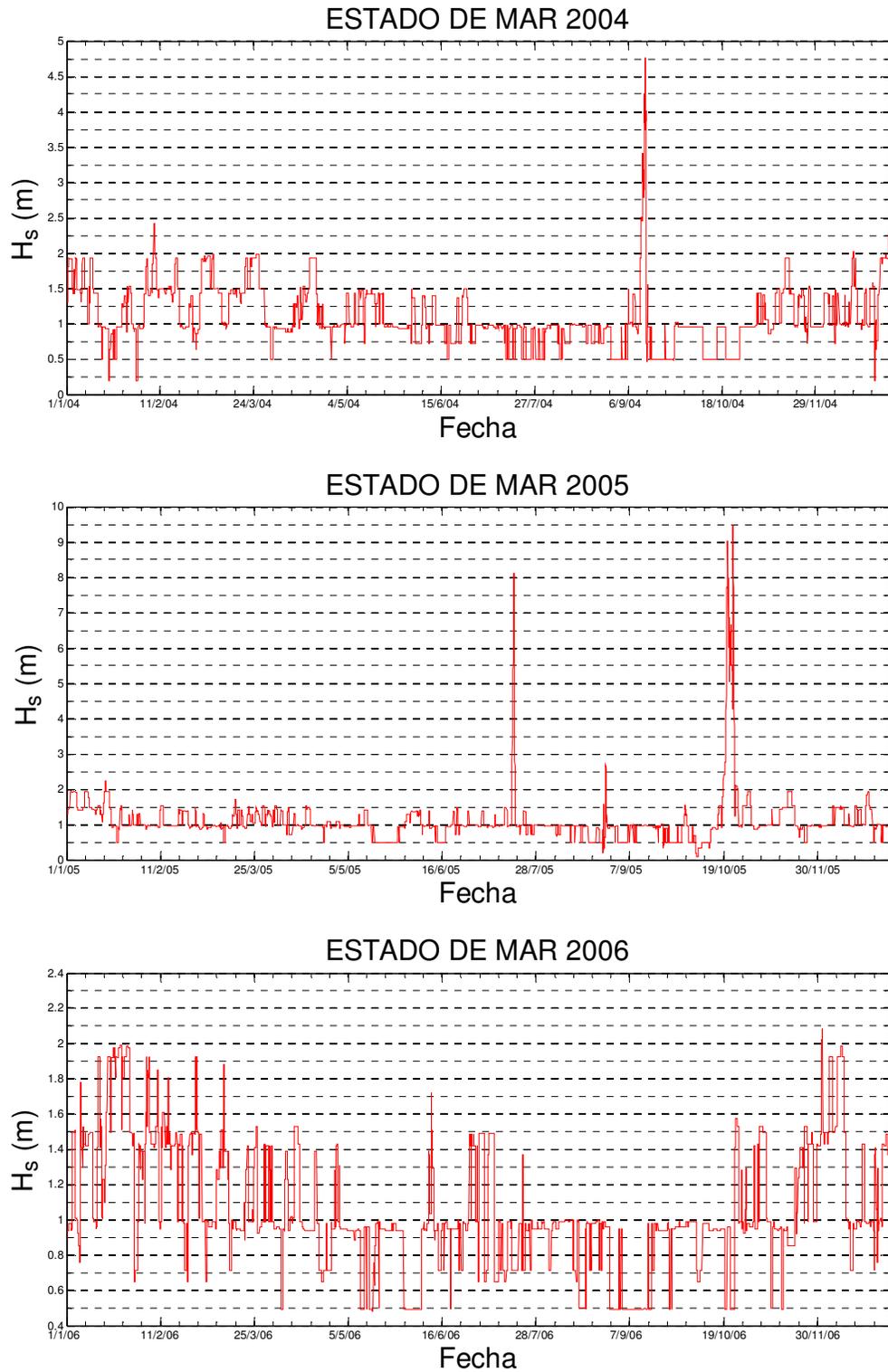


Figura A 156 Estados de Mar 2004-2006

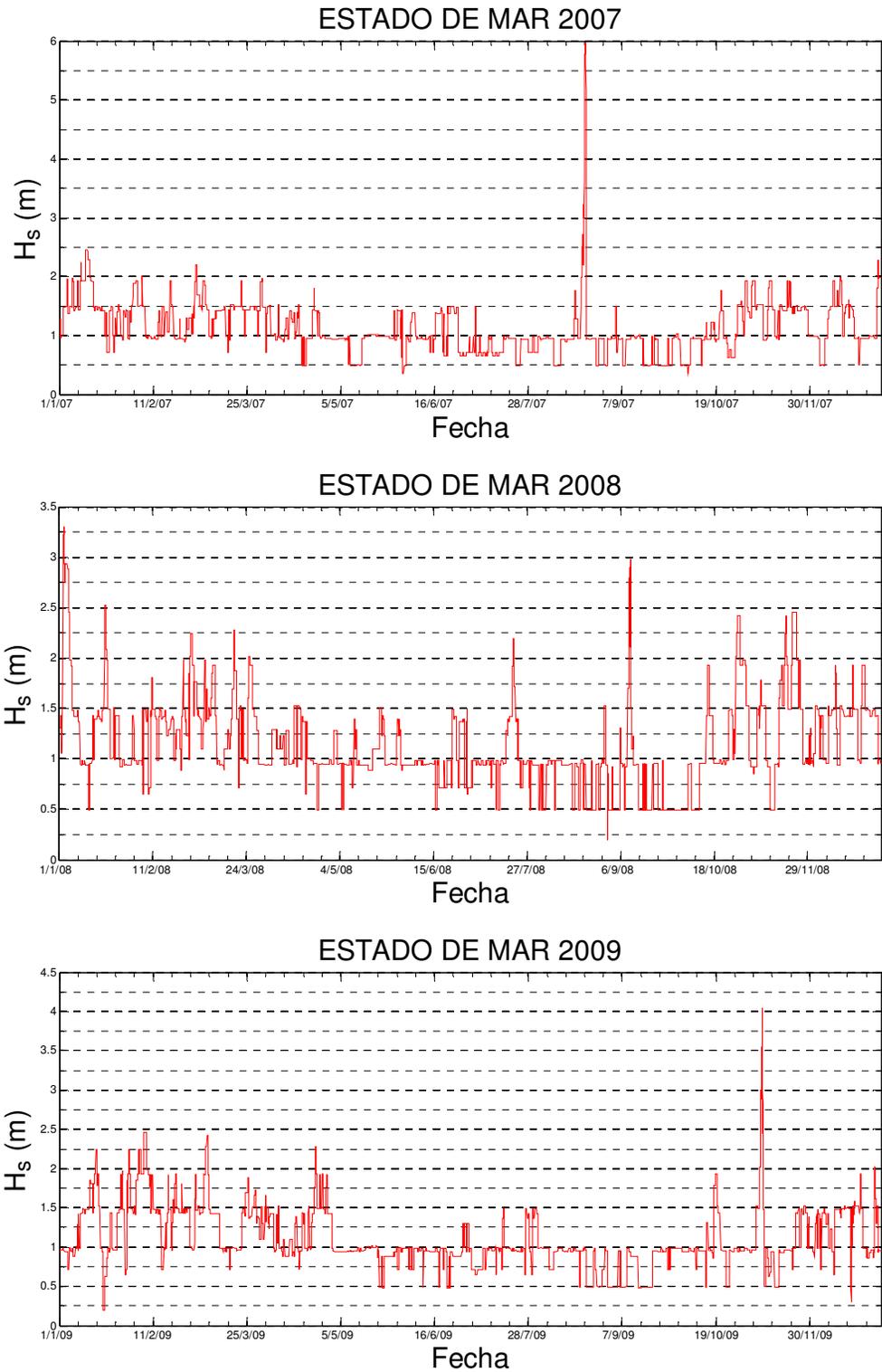


Figura A 157 Estados de Mar 2007-2009

REFERENCIAS

- Bolaños R. Sánchez, Sánchez Arcilla, Cautera A., Cateura J. (2007) "*Evaluation of Two Atmospheric Models for Wind – Wave Modelling in the NW Mediterranean*". Journal of Marine Systems.
- Bolaños R. Sánchez, Sánchez Arcilla, (2006) "*A note on nearshore wave features: Implication for wave generation*". Progress in Oceanography.
- Delft University of Technology User Manual SWAN Cycle III version 40.72 (2009) pp. 21-80.
- Ruiz M, Silva R, Pérez D, Posada G, Bautista E (2008) "*Modelo híbrido para la caracterización del oleaje*". Ingeniería Hidráulica en México
- Holthuijsen, L.H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press. USA., pp 286 - 309.
- Bolaños R "*Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción*" Universidad Politécnica de Cataluña, España., pp 7 - 49
- Pérez, D.M., Bolaños, R., Silva, R. (2008). Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIII, No. 2.
- Silva, R. (2005). "*Análisis y descripción estadística del oleaje*". Serie Docencia 49. Instituto de Ingeniería, UNAM. México., 179 pag.
- Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G., Díaz, G., (2002), "*Oceanographic Vulnerability to Hurricanes on the Mexican Coast, International Conference on Coastal Engineering*", Coastal Engineering, ASCE, Cardif, Wales.
- Liste María, Méndez Fernando, Losada Iñigo, Medina Raúl, Olabarrieta Maitane (2004) "*Variaciones Hiperanuales de Parámetros Medios De Oleaje en el Litoral Mediterráneo Español en los Últimos Cincuenta Años: Efectos Sobre La Costa*" Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, nº 4, Santander, pp 1 – 12.
- Ruiz G (2009) "*Determinación el estado morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos*" Universidad Nacional Autónoma de México, pp 65 - 90
- Rivillas G (2008) "*Reanálisis de Oleaje*" Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 35 – 45.

Ruiz G, Silva R, Rivillas G, Posada G, Pérez D, Mendoza E, (2008) “*Atlas de clima marítimo para las vertientes Atlántica y Pacífica del litoral Mexicano*” XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena-Colombia

Jonathan P, Flynn J, Ewans K, (2010) “*Joint modeling of wave spectral parameters for extreme sea states*” Ocean Engineering, Elsevier

Hasselmann K (1960) “*Grundgleichungen der Seegangsvorhersage*”. Schiffstechnik, Vol. 7, pp. 191 – 195.

Hasselmann K (1985) “*Computations and Parametrizations of the nonlinear transfer in gravity wave spectrum*”. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. J Phys. Oceanography, Vol. 15, pp. 1369 – 1377.

Janssen P. (1989), “*Wave Induced Stress and the Drag of Air Flow Over Sea Waves*”, J. Phys. Oceanography, Vol. 19, pp. 745 – 754.

Menendez Melisa, Méndez Fernando, Losada Iñigo, Medina Raúl, Abascal Ana, (2004), “*Variaciones del Régimen Extremal de Clima Marítimo en el Litoral Español en el Periodo 1958 - 2001* ”, Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, nº 4, Santander, pp.1 – 12.

Sánchez C., Silva, R., Govaere, G., Contreras, A., (1998). “*Comparison of a Wave Prediction Models*, 5th International Workshop on Wave Hindcast and Forecasting”, Melbourne, Florida.

Silva, R., Díaz, G., Contreras, A., Bautista, G., Sánchez, C., (2000), “*Determination of the Oceanographic Risks from Hurricanes on the Mexican coast*”, 6th International Workshop on Wave Hindcast and Forecasting”, Monterrey, California.

WAMDI Group. (1988). The WAM model – A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* Vol 18, pp. 1775-1810.

Ward Donald, Thompson Edward, Zhang Jun (2003) “*Selection of a Design Wave Height for Coastal Engineering*” Advances in Coastal Structure Design, ASCE, USA, pp. 116 – 180.

Weibull W. (1939), “*A Statical Theory of Strength of Materials*”, Ing. Vet. Ak Handl. (Stockholm), 151 pp.

World Meteorological Organization (1998). Guide to Wave Analysis and Forecasting, Geneva, pp 168.