



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

DISEÑO MUELLE TURÍSTICO PUERTO WILLIAMS

Felipe Andrés Rifo Osorio

Enero 2017

DISEÑO MUELLE TURISTICO EN PUERTO WILLIAMS

Felipe Andrés Rifo Osorio

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

MATÍAS QUEZADA LABRA

Profesor guía

FELIPE CASELLI BENAVENTE

Docente

MAURICIO REYES GALLARDO

Docente

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

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

AGRADECIMIENTOS

Es complejo realizar este apartado, ya que si empiezo a rebobinar a los inicios de este camino..... uuuffff..... esta lista de agradecimiento seria larguísima.

- Padres.... Pucha que han esperado este momento jejejeje, pero aquí estamos cumpliendo con lo que siempre conversamos! Muchas Gracias por apoyar a este gordito en su "TINCADA" por estudiar algo relacionado con el mar.
- Tios suegros AL FIN! También estoy cumpliendo con ustedes... que también me apoyaron en las buenas y en las malas.... Y hasta el ultimo momento preguntando.... Y??? CUANDO??. Los quiero mucho.
- Amig@s, Pia, Cele, Gordita, Molteni, El Moneto y Mildred, Benito y Mona gracias por su preocupacion y estar conmigo en las buenas y malas.
- MI MUJER: Me soportaste, me soportas y me seguiras soportando (eso espero) porque yo si o si seguiré amándote y espero seguir un largo camino junto a ti, hasta Tatitas arrugados como pasitas.

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	MARCO TEÓRICO.....	2
2.1	ASPECTOS GENERALES	2
2.2	OCEANOGRAFÍA FÍSICA	3
2.2.1	MAREAS.....	3
2.2.2	CORRIENTES.....	5
2.2.3	OLEAJE	6
2.3	GENERACIÓN DEL OLEAJE POR VIENTO.....	10
2.3.1	ASPECTOS GENERALES.....	10
2.3.2	MODELO CMS-WAVE	11
2.3.3	ESPECTRO DE OLEAJE POR VIENTO.....	14
2.4	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS COSTERAS.....	15
2.4.1	MUELLES	15
3	OBJETIVOS	18
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.	18
4	METODOLOGÍA.....	19
4.1	BATIMETRÍA.....	19
4.2	ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS.....	21
4.2.1	CORRIENTES.....	21
4.2.2	VIENTOS.	24
4.2.3	MAREA.	26

4.2.4	OLEAJE.....	27
4.3	GENERACIÓN DE OLAJE.....	28
5	RESULTADOS.....	30
5.1	ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS.....	30
5.1.1	CORRIENTES LAGRANGEANAS.....	30
5.1.2	CORRIENTES EULERIANAS.....	35
5.1.3	VIENTOS.....	42
5.1.4	MAREA.....	57
5.1.5	OLEAJE.....	62
5.2	GENERACION DE OLAJE POR VIENTO.....	68
5.3	CLIMA OPERACIONAL, OLAJE GENERADO.....	79
5.4	CLIMA EXTREMO, OLAJE GENERADO.....	82
6	BASES DE DISEÑO.....	83
6.1	UBICACIÓN DEL MUELLE.....	84
6.2	ORIENTACION DEL MUELLE.....	89
6.3	LONGITUD DE FRENTE DE ATRAQUE.....	91
6.4	ACCESOS DE MUELLE.....	92
7	TRACK DE NAVEGACIÓN.....	94
7.1	ANCHURA DE VIA DE NAVEGACIÓN.....	94
7.2	TRACK Y ZONA DE NEVEGACIÓN.....	96
8	PRESUPUESTO Y COSTOS.....	97
9	CONCLUSIONES.....	99
10	REFERENCIAS.....	101
11	ANEXOS.....	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Desplazamiento de la superficie oceánica por acción de la fuerza gravitatoria centrífuga.	4
Figura 2-2: Características de una ola.	7
Figura 2-3: Desarrollo de olas generadas por viento.	8
Figura 2-4: Tipos de Oleaje.	9
Figura 4-1 Detalle de la ubicación de los instrumentos.	21
Figura 4-2: Esquema de medición por celdas en ADCP.	23
Figura 4-3: Zona de estudio.	29
Figura 5-1: Derivadores en marea llenante y vaciante en sicigia lunar, verano.	30
Figura 5-2: Derivadores en marea llenante y vaciante en sicigia lunar, invierno.	32
Figura 5-3: Derivadores en marea llenante y vaciante en cuadratura lunar, Verano.	33
Figura 5-4: Derivadores para marea llenante y vaciante en cuadratura lunar, invierno.	34
Figura 5-5: Rosas de corrientes (2, 5, 8 (m)), verano.	36
Figura 5-6: Histogramas de direcciones e intensidades, corrientes verano.	37
Figura 5-7: Rosas de corrientes (2, 5, 8 (m)), invierno.	40
Figura 5-8: Histogramas de direcciones e intensidades, corrientes invierno.	41
Figura 5-9: Rosa de vientos, verano e invierno.	43
Figura 5-10: Histogramas de vientos, verano e invierno.	44
Figura 5-11: Rosa de direcciones e intensidades, Data histórica (2010).	45
Figura 5-12: Histograma de escala de Beaufort (m/s), vientos históricos 2010.	47
Figura 5-13: Histograma de direcciones, vientos históricos 2010.	47
Figura 5-14: Comparación Rosas de vientos verano.	49
Figura 5-15: Comparación de % incidencia.	51
Figura 5-16: Comparación Rosas de vientos, invierno.	52
Figura 5-17: Comparación de % incidencia.	54

Figura 5-18: Linealización Weibull para vientos extremos.	56
Figura 5-19: Marea registrada (roja), Marea pronosticada (azul), residuo (negro).	59
Figura 5-20: Principales planos mareales.	61
Figura 5-21: Rosa de direcciones v/s Hmo, y v/s Tp. Oleaje Verano 2014.	62
Figura 5-22: Rosa de direcciones v/s Hmo y, v/s Tp. Oleaje Invierno 2014.	65
Figura 5-23: Comparación H _{modelo} v/s Intensidad Vientos.	68
Figura 5-24: Comparación de alturas de olas, medida v/s generada.	69
Figura 5-25: Comparación de Hmo asimilado.	70
Figura 5-26: Comparación de H _{modelo} v/s H _{modelo final}	71
Figura 5-27: Salida modelo de generación por viento para dirección N, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).	72
Figura 5-28: Salida modelo de generación por viento para dirección NE, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).	73
Figura 5-29: Salida modelo de generación por viento para dirección E, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).	74
Figura 5-30: Salida modelo de generación por viento para dirección W, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).	75
Figura 5-31: Salida modelo de generación por viento para dirección NW, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).	76
Figura 5-32: Correlación entre datos medidos v/s datos modelados.	77
Figura 5-33: Aproximación polinómica y función error del modelo de hindcast.	78
Figura 5-34: Correlación de datos medidos v/s datos modelados, luego de Asimilación.	78
Figura 5-35: Rosa de dirección para alturas de olas generadas.	79
Figura 6-1: Batimetría de la zona de estudio.	86
Figura 6-2: Batimetría en área de estudio (zoom).	87
Figura 6-3: Extensión del calado de atraque.	88
Figura 6-4: Área de extensión de calado.	88
Figura 6-5: Posición, orientación, y ubicación final del muelle.	90

Figura 6-6: Dimensiones muelle Puerto Williams.	93
Figura 6-7: Dimensión de acceso muelle de penetración, (zoom).	93
Figura 7-1: Demarcación de zona de navegación.	96

INDICE DE TABLAS

Tabla 2—1: Categorías de los modelos de generación del oleaje.	11
Tabla 5—1: Resumen por celda de las corrientes eulerianas de la campaña de verano.	38
Tabla 5—2: Resumen por celda de las corrientes eulerianas de la campaña de invierno.	42
Tabla 5—3: Resumen de campaña de vientos.	43
Tabla 5—4: Tabla de incidencia, vientos históricos (2010).	46
Tabla 5—5: Estadística direccional, vientos históricos (2010).	46
Tabla 5—6: Comparación, tablas de incidencias, verano.	50
Tabla 5—7: Comparación, tablas de incidencias, invierno.	53
Tabla 5—8: Valores extremos, Vientos Históricos 2010.	55
Tabla 5—9: Periodo de retorno, Vientos.	56
Tabla 5—10: Constituyentes armónicos de la marea.	58
Tabla 5—11: Planos Mareales.	60
Tabla 5—12: Tabla de incidencia Hmo v/s Dir, Oleaje ADCP Verano.	63
Tabla 5—13: Tabla de incidencia Tp v/s Dir, Oleaje ADCP Verano.	63
Tabla 5—14: Tabla de incidencia Hmo v/s Tp, Oleaje ADCP Verano.	64
Tabla 5—15: Tabla de incidencia Hmo v/s Dir, Oleaje ADCP Invierno.	66
Tabla 5—16: Tabla de incidencia Tp v/s Dir, Oleaje ADCP Invierno.	66
Tabla 5—17: Tabla de incidencia Hmo v/s Tp, Oleaje ADCP Invierno.	67
Tabla 5—18: Tabla de incidencia Hmo v/s Dir, para oleaje operacional.	80
Tabla 5—19: Tabla de incidencia Tpeak v/s Dir, Oleaje operacional.	80
Tabla 5—20: Tabla de incidencia Tpeak v/s Hmo, Oleaje operacional.	81
Tabla 5—21: Valores extremos de oleaje generado por viento.	82
Tabla 6—1: Resguardos de línea de atraque, según eslora.	91

Tabla 7—1: Factores para cálculo del ancho vía de navegación.....	95
Tabla 8—1: Costo de realización de tareas.....	98

Resumen

El proyecto presentado en este informe incluye los resultados de estudios en Puerto Williams, modelación de oleaje de la misma zona y las bases del diseño para la obra de ingeniería que significa la construcción de un muelle. Los estudios consideraron muestras de temporada estival e invernal con el objetivo de identificar el comportamiento en estaciones totalmente opuestas, pero complementarias para el conocimiento profundo de la zona.

Los vientos estudiados del sector, vienen principalmente del N y NW, esto se identificó en ambas campañas e incluso en el análisis realizado con vientos históricos. Las corrientes predominantes del área, tanto en invierno como en verano, se dirigen hacia el NE, con velocidades entre 0.0 y 0.12 (m/s), con promedio de 0.08 (m/s). La amplitud de marea para Puerto Williams, es de aproximadamente de 2 (m), y el NRS del sector corresponde a 0.323 (m). El régimen de mareal corresponde a mixto semidiurno.

El oleaje local del sector, obtenido del ADCP, proviene del N y NW, con alturas de entre 0.2 y 0.5 (m).

Para la generación de oleaje por vientos, se utilizó el software CMS WAVE, validando este modelo con los datos obtenidos del ADCP, ajustándose en un 97%. El oleaje predominante (generado), es principalmente el proveniente del N con alturas entre 0.4 y 0.8 (m).

Respecto al diseño del muelle, se optó por un muelle de penetración y en el cabezo de éste un frente de atraque paralelo a la línea de costa, de 290 (m). El frente de atraque antes mencionado estaría ubicado en el veril de los 14 (m), siendo esta última profundidad el calado mínimo. El acceso vehicular del muelle estaría dado por un ancho de 10 (m), y considera 2 pistas, además de veredas en ambos costados del muelle de penetración.

Finalmente, los costos asociados a este proyecto, bordean los 31 millones de pesos, valor que va por debajo del presupuesto que asigna el organismo.

1 INTRODUCCIÓN.

Puerto Williams es la capital de la provincia de la Antártica Chilena y está catalogada como la localidad más austral de Chile y es considerada un puerto estratégico debido a la conexión entre los océanos Pacífico y Atlántico, como también con el territorio antártico. Cuenta con aproximadamente 1900 habitantes y las actividades económicas de mayor relevancia corresponden al sector pesquero y turístico.

En la Actualidad, esta localidad cuenta con dos muelles de atraque para embarcaciones navales de poco calado. El primero de ellos corresponde al muelle Guardián Brito, el cual es de uso exclusivo naval, y restringido a naves de un calado máximo de 6 (m). El segundo es el Muelle Covadonga, el cual es usado por naves pesqueras, remolcadores y otras embarcaciones menores, con un calado máximo de 2,5 (m). Ninguno de ellos cumple con los requisitos para recibir una embarcación tipo crucero de turismo.

Siendo el turismo una de las actividades económicas más significativas de la localidad surge la necesidad de proyectar un muelle turístico que permita el atraque de embarcaciones de mayor envergadura, con el fin de admitir la recalada de embarcaciones tipo tender, científicas, transbordadores y principalmente cruceros.

Para obtener el diseño de un muelle apropiado para la zona se trabajará en estudios básicos que contemplan vientos, mareas, oleaje para realizar posteriormente una propagación del oleaje por viento; con esta información se identificará el oleaje local del sector, lo que en complemento con el resto de los resultados permitirá el diseño del muelle apropiado para esta zona específica.

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 ASPECTOS GENERALES

Los primeros estudios e investigaciones en el diseño de estructuras marítimas en Chile se desarrollaron en el año 1953, con la creación del Instituto Nacional de Hidráulica (INH), como laboratorio perteneciente a la Dirección de Obras Portuarias (DOP). Mediante ensayos de laboratorio y el uso de modelaciones físicas a escala, se replicaba el comportamiento de la hidrodinámica en costas, ríos y la respuesta de estructuras costeras ante estos fenómenos.

La mayoría de las obras marítimas ejecutadas, por consultores y empresas constructoras, en suelo nacional, se han llevado a cabo principalmente bajo la guía de normas y recomendaciones internacionales, tales como el “Shore Protection Manual (SPM)” y “Coastal Engineering Manual (CEM)” de Estados Unidos, las “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (TSPHF)” de Japón, y las “Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM)” de España, entre otras. Esto implica que, al ser normas extranjeras, están orientadas a resolver problemas en las condiciones naturales propias del país en que se han desarrollado, por lo que su aplicación en Chile se basa en la que logra ajustarse de mejor manera a las condiciones de proyecto. Ante esta situación, la DOP, en conjunto con Universidades, consultoras, constructoras y la Armada, publicaron el año 2013, la primera edición de la “Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras en Chile”, documento que presenta un conjunto de recomendaciones, normativas vigentes y criterios técnicos que permiten el correcto funcionamiento de la obra.

Dado que el presente estudio se enmarca principalmente en establecer las condiciones de diseño (conceptual) de una infraestructura portuaria que permita el atraque directo de embarcaciones de mayor envergadura, para servicios de transferencia de carga y personas, se presenta el análisis bibliográfico de aquellos aspectos fundamentales para desarrollar lo descrito, los que corresponden a

oceanografía física, modelamiento numérico y tipología estructural de obras costeras, bajo la guía de las instrucciones establecidas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), en su publicación N° 3201 y la guía de la DOP, antes mencionada.

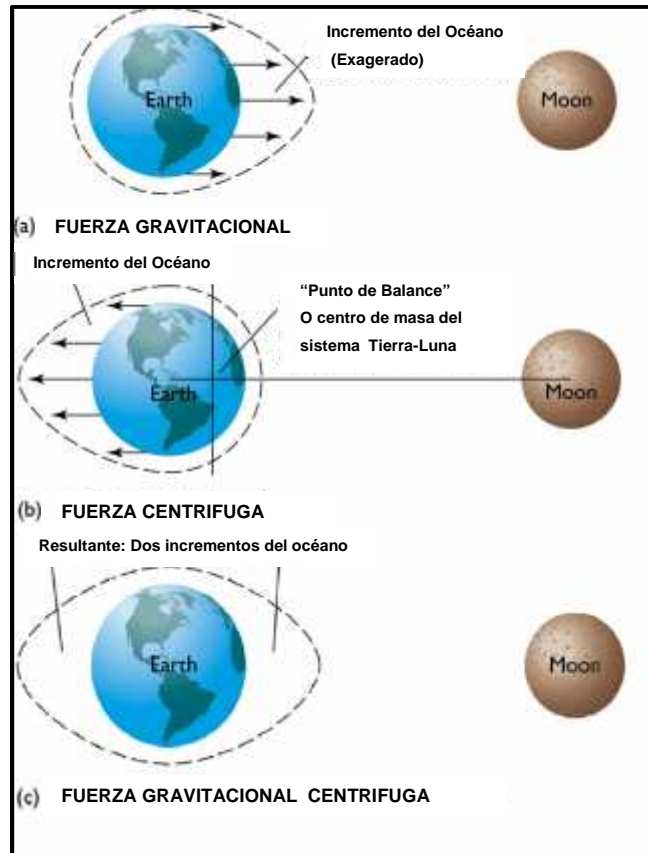
2.2 OCEANOGRAFÍA FÍSICA

Los agentes que rigen la hidrodinámica marítima son diversos y su comportamiento varía en regiones oceánicas y costeras. En los océanos dominan, principalmente, los gradientes de presión, el arrastre del viento y el efecto de coriolis, mientras que, en ambientes costeros, la complejidad aumenta dado que existe una mayor cantidad de factores que se deben considerar para caracterizar la hidrodinámica, tales como, la marea, el viento, las corrientes y el oleaje, que adquieren mayor relevancia y que son los agentes que se estudiarán a continuación. Otros factores que también se vuelven significativos, pero no están considerados en esta tesis, son los efectos friccionales, advectivos, la modificación de ondas largas en aguas someras y la aparición de ondas internas en zonas con gradientes de densidad elevados.

2.2.1 MAREAS

Las mareas son resultado de la interacción de dos fuerzas principales: la atracción gravitacional de la luna y el sol, y la fuerza centrífuga por la rotación de la tierra, que balancea en la dirección opuesta (Figura 2-1). Como resultado de la oposición de estas dos fuerzas, se genera un levantamiento de la superficie del Océano bajo la posición de la luna y en el lado opuesto de la tierra, la que se asemeja a protuberancias de agua que se desplazan a medida que la luna se mueve en torno a la tierra, y que representan las altas mareas durante el día.

Figura 2-1: Desplazamiento de la superficie oceánica por acción de la fuerza gravitatoria centrífuga.



Fuente: Pinet, 1998

De esta manera es posible explicar cómo se presentan dos mareas altas (Pleamar) y dos bajas (marea semidiurna), en la mayoría de los sitios de la tierra durante el transcurso de un día lunar. Cabe señalar que un día lunar es el tiempo de rotación de la tierra con respecto a la luna, igual a 24.84 horas. La mitad de este tiempo (12.42 hrs.) corresponde a la componente principal de la marea lunar semidiurna denominada M_2 .

El cálculo predictivo de mareas es realizado en base a mediciones del nivel del mar, las que se descomponen en constituyentes sinusoidales. Existen tres categorías de constituyente:

1. Semidiurnas, con periodos alrededor de 12 horas
2. Diurnas, con periodos alrededor de 24 horas
3. De largo periodo, mayores a 24 horas.

Aunque se requieren 20 o más constituyentes para predecir la marea con exactitud, las cuatro más importantes son:

1. Lunar semidiurna (M_2), periodo de 12.42 horas.
2. Solar semidiurna (S_2), periodo de 12.00 horas.
3. Lunisolar diurna (K_1), periodo de 23.93 horas.
4. Lunar principal diurna (O_1), periodo de 25.82 horas.

La amplitud de la M_2 es aproximadamente dos veces la amplitud de las otras tres, para ambientes de características predominantemente semidiurnas.

2.2.2 CORRIENTES

Los principales forzantes de la hidrodinámica en fiordos y estuarios son la marea, el viento y el efecto de las descargas de agua dulce. Durante su desplazamiento el flujo puede ser modificado por el efecto de la rotación de la tierra, y por la interacción con la batimetría y la línea de costa, entre otros agentes. En sitios particulares, el oleaje superficial y las ondas internas pueden también tener influencia en la modificación del flujo original. En la mayoría de estos sistemas, sin embargo, el balance hidrodinámico está determinado principalmente por la acción de la marea y el flujo estuarino de agua dulce.

Las corrientes de marea tienen fluctuación periódica, preferentemente con ciclo semidiurno, producidas por la atracción lunar y en menor grado, del sol. Las corrientes por descarga de río están asociadas al gradiente de presión baroclínico que se desarrolla a lo largo de un estuario una vez que el agua dulce ingresa a éste. Al presentarse eventos de viento, las fuerzas de arrastre originan desplazamiento superficial por acción friccional de la tensión de corte, la que puede modificar sustancialmente los efectos de la corriente de marea y del flujo

de río. Durante eventos de tormenta, la influencia de las corrientes de oleaje puede hacerse más importante, modificando gran parte del litoral.

El efecto de la corriente, cuando es uniforme y desde el punto de vista de las obras portuarias, tenderá a trasladar al buque en su conjunto en el mismo sentido y velocidad con que esta circula. En el caso de un buque amarrado la acción de la corriente será resistida por amarras y defensas. En el caso de un buque parado sin amarrar la deriva del buque se producirá según el efecto anteriormente expuesto, es decir en el mismo sentido y velocidad con que fluye la corriente uniforme. En el caso más general de buque en movimiento, será necesario tomar en consideración todas las acciones externas e internas del buque para poder determinar su trayectoria, tomando en consideración que en todos estos casos la corriente que realmente actúa sobre el buque es la corriente aparente o relativa con relación a él, cuya dirección e intensidad son las resultantes de la corriente absoluta real y de una velocidad igual y contraria a la absoluta del buque.

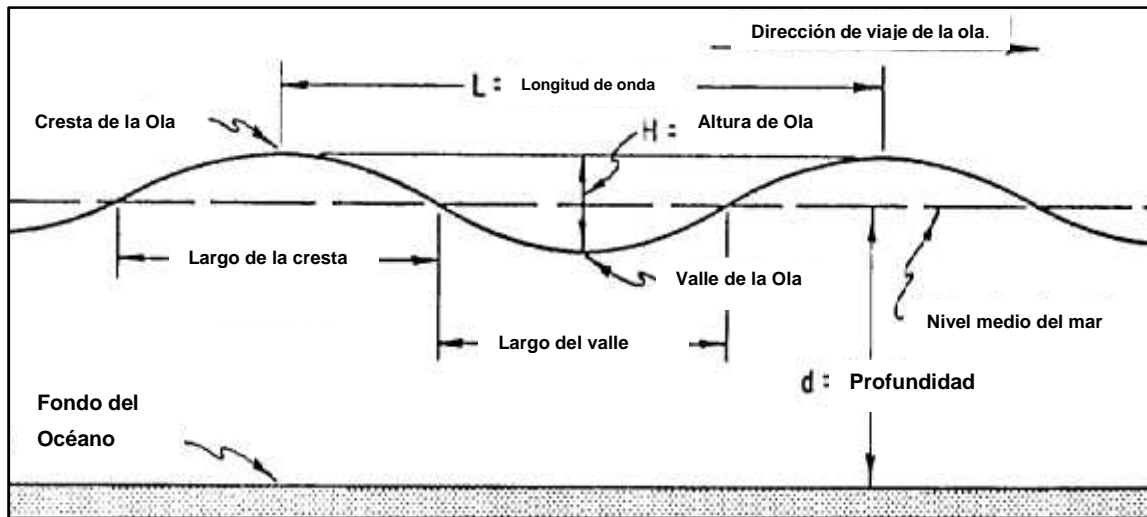
2.2.3 OLEAJE

2.2.3.1 ASPECTOS GENERALES

Las olas que arriban a las costas resultan de perturbaciones en la superficie del Océano generadas por diferentes mecanismos, siendo el viento, la principal fuente. Otros mecanismos pueden ser desprendimiento de masas de tierra, interacción gravitacional entre la tierra y sus astros, sismos, embarcaciones, arrojar un elemento a un cuerpo de agua, entre otros.

Al igual que cualquier onda, las olas poseen características que permiten identificarlas y pueden ser descritas a través de parámetros, tales como período (T), longitud (L), amplitud (H) y la profundidad en la que se propagan (d). El resto de los parámetros, tales como las velocidades y aceleraciones, pueden determinarse, teóricamente, a partir de los ya descritos (Dean & Dalrymple, 1991).

Figura 2-2: Características de una ola.



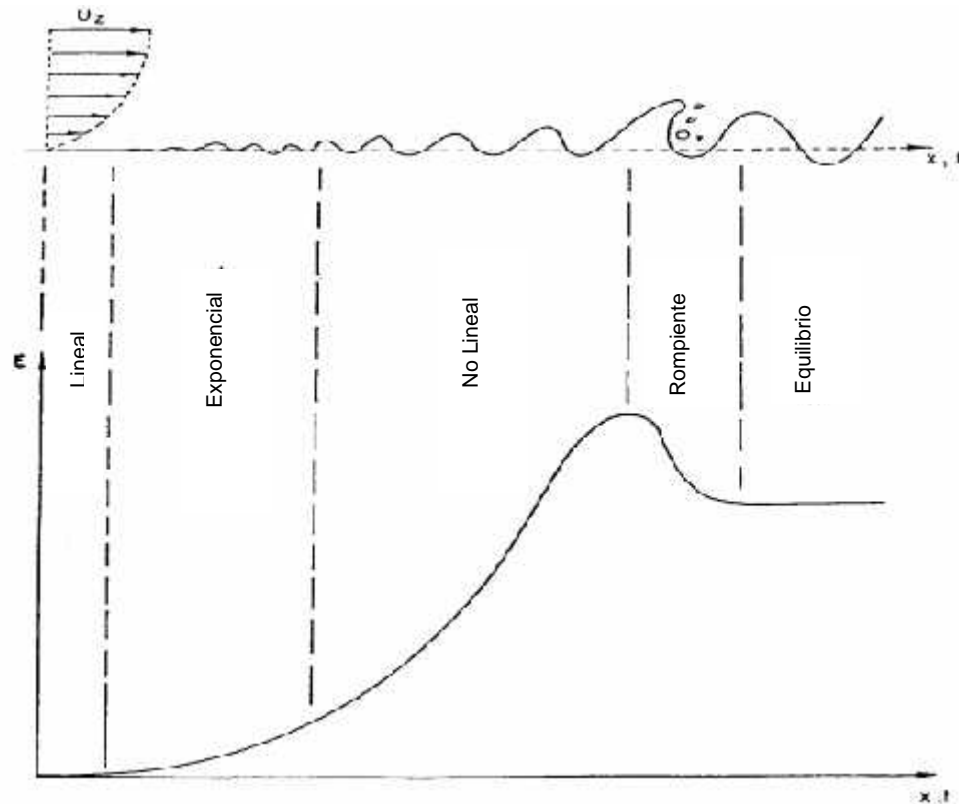
Fuente: SPM, 1984.

2.2.3.2 GENERACIÓN DEL OLEAJE

Las zonas de generación del oleaje por viento suelen poseer grandes dimensiones en las que los vientos transfieren momentum a la región superficial del cuerpo de agua por determinados períodos de tiempo. Mientras mayor sea la intensidad y duración del viento, mayor será la altura de ola, sin embargo, este comportamiento no es infinito y ocurre hasta alcanzar un punto de equilibrio que se ha clasifica como "mar completamente desarrollado", donde la energía transferida es disipada por la rotura de la ola. Luego, estas se propagan en todas direcciones alejándose del Fetch y modificando sus características en el trayecto, lo que permite clasificar al oleaje en dos tipos (Figura 2-4): Sea y Swell.

El oleaje tipo Sea se caracteriza por presentar una forma irregular, ya que carece de una periodicidad marcada debido a la gran asimetría entre la forma del valle y la cresta de las olas. Otra característica, es que presentan alturas relativamente grandes en comparación con la longitud de onda. Este tipo de olas pueden pasar por cinco etapas (Figura 2-3); crecimiento lineal, crecimiento exponencial, crecimiento no lineal y rotura o whitecapping (Abdalla, 1991).

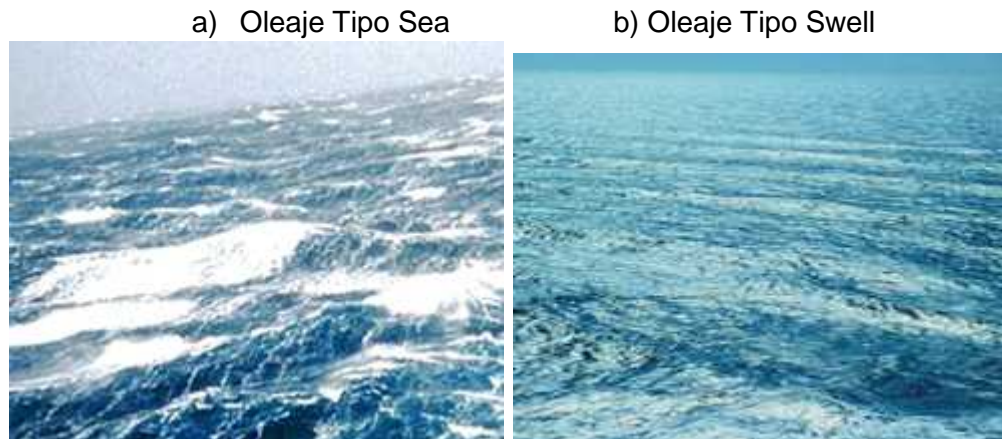
Figura 2-3: Desarrollo de olas generadas por viento



Fuente: Abdalla, 1991.

El oleaje tipo Swell se produce cuando las olas salen de la zona de generación y comienzan a viajar hacia las costas (Losada y Giménez-Curto, 1979). En su trayecto, estas se dispersan en todas direcciones y a velocidades que varían de acuerdo al período de la onda. Aquellas ondas con mayor longitud viajan más rápido que las de menor longitud.

Figura 2-4: Tipos de Oleaje



Fuente: Elaboración Propia

2.2.3.3 PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Cuando los trenes de ondas se aproximan a regiones costeras, con menores profundidades, comienzan a sufrir otros efectos de la propagación, tales como:

- Refracción, donde la interacción con el fondo marino o corrientes, modifican la celeridad, induciendo un cambio en la dirección, lo que normalmente provoca que se alineen en forma paralela a las líneas batimétricas.
- La difracción, proceso en el cual la onda transfiere energía lateralmente a lo largo de los trenes, producto de encontrarse con algún obstáculo en su trayecto, ya sean rocas, buques o estructuras costeras.
- La reflexión, que ocurre producto de la interacción con estructurales naturales y/o artificiales, provocando un cambio súbito en la dirección de propagación, que generalmente las envía de vuelta a mar abierto.
- Otros procesos del oleaje en su viaje a la costa son las interacciones no lineales entre ola-ola u ola-corriente.

Finalmente se produce un efecto familiar y fácil de observar desde la costa, el asomeramiento, esto ocurre debido a la interacción de los trenes de onda con el fondo, que inducen una modificación de la longitud de onda,

produciéndose un ‘apilamiento’ del tren y que, por conservación de la energía, compensa con el peralte de la misma hasta el punto en que la masa de agua colapsa y disipa energía por rotura.

2.3 GENERACIÓN DEL OLEAJE POR VIENTO

2.3.1 ASPECTOS GENERALES

Determinar las características del oleaje operacional de largo plazo en zonas costeras o aguas interiores para el diseño y/u operación de obras, requiere del conocimiento de periodos de tiempo suficientemente largos (20 o más años), los que usualmente no están disponibles como registros instrumentales y se requiere de técnicas numéricas para su construcción.

El estudio de la generación de oleaje debido al viento, comienza con el trabajo de Sverdrup and Munk (1947) proponen uno de los modelos empíricos ampliamente utilizados para la generación del oleaje. Posteriormente Bretschneider (1952, 1958) propone modificaciones para mejorar su capacidad de predicción, pasándose a llamar el método SMB.

Posteriormente este método fue modificado nuevamente y recibió el nombre de SPM-Method (1984), el cual permite conocer la altura significativa espectral (H_{m0}) y el periodo peak del oleaje (T_p).

En la actualidad, las técnicas de generación de oleaje se basan en la solución de modelos numéricos, que, empleando la ecuación de conservación de la energía espectral, obtienen las características de la densidad espectral bidimensional del oleaje en aguas profundas.

La evolución de los modelos se puede ver en la siguiente tabla, que los clasifica por “generaciones”. Actualmente los grandes centros de predicción utilizan modelos de tercera generación.

Estos modelos han alcanzado tal nivel de desarrollo que el mayor error en la predicción del oleaje en mar abierto procede del error en la predicción de viento.

Tabla 2—1: Categorías de los modelos de generación del oleaje.

Autor	Tipo de modelo	Característica
Pierson (1955) Gelci et al. (1957) Hasselmann (1962)	Primera Generación	No hay transferencia no lineal entre componentes
Hasselmann (1962)	Segunda Generación	Transferencia no lineal entre componentes de oleaje parametrizada
JONSWAP (1972) Hasselmann (1985) Tolman (1997)	Tercera Generación	El espectro no asume forma predeterminada. Transferencia no lineal entre componentes representada mediante la física.

Fuente: Elaboración propia.

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación, se aplicó una técnica numérica de tercera generación de micro escala (aplicable a aguas interiores y resoluciones del orden de las centenas a decenas de metros), denominada como CMS-WAVE y cuya licencia fue facilitada por la empresa Ecotecnos S.A; siendo este descrito a continuación.

2.3.2 MODELO CMS-WAVE

CMS-WAVE fue desarrollado por Lin *et al.* (2006b) y Demirbilek *et al.* (2007), previamente este modelo se llamó WABED (Wave-Action Balance Equation Diffraction) y corresponde a un modelo espectral bidimensional basado en la ecuación con aproximación parabólica, incluyendo disipación de energía y términos que simulan la difracción de acuerdo con Mase *et al.* (2005a).

Las principales capacidades de CMS-WAVE son:

- Refracción
- Shoaling
- Rompiente
- Disipación debido a la rotura
- Disipación por fricción de fondo

- Difracción
- Reflexión
- Interacción oleaje corrientes
- Generación y crecimiento del oleaje (incluyendo *withecapping*)
- Sobrepaso y run-up del oleaje en playas
- Interacción no lineal del oleaje

La ecuación principal que resuelve el modelo CMS-WAVE es la de acción de ondas, descrita según la ecuación Ecuación 2—1.

Ecuación 2—1: Conservación de la acción de onda

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{k}{2\sigma} \left[CC_\theta \cos^2 \theta N_{yy} - \frac{CC_\theta}{2} \cos^2 \theta N_{yy} - \varepsilon_b N - S \right]$$

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Dónde:

N: Acción de onda.

E: Densidad de energía espectral.

σ : Frecuencia.

θ : Dirección.

C: Celeridad de la onda.

C_g : Celeridad de grupo.

N_y y N_{yy} : Primera y segunda derivada de N respecto de y.

$C_{x, y, \theta}$: Celeridad de la onda respecto de x, y o θ , respectivamente.

k: Parámetro empírico que representa la intensidad de la difracción.

ε_b : Disipación de energía debido a la rotura.

S: términos fuente, incluyendo ingreso y pérdidas de energía.

Cabe destacar que el primer término de la derecha de la Ecuación 2—1, corresponde a la difracción de acuerdo a la aproximación de Mase *et al.* (2005b), que, según diversos ensayos de laboratorios desarrollados por el mismo autor, es capaz de representar los efectos de obras de longitud semi infinitas y diversas configuraciones, mediante la calibración del coeficiente k .

Para determinar la interacción oleaje corrientes, CMS-WAVE incorpora la metodología de Larson & Kraus (2002) considerando el efecto “Doppler shifting”, que según la investigación desarrollada por Lai *et al.* (1989) permite que la teoría lineal del oleaje se ajuste de manera adecuada.

Respecto de la reflexión del oleaje CMS-WAVE aplica un coeficiente sin representar el fenómeno físico propiamente tal, mientras que para estimar la altura de oleaje rompiente aplica el criterio de Miche (1951) y para la disipación de energía debido a rotura se puede emplear alguno de los siguientes métodos:

- Ecuación extendida de Goda (Sakai *et al.* 1989).
- Ecuación extendida de Miche (Batjjes 1972; Mase *et al.* 2005b).
- Batjjes & Janssen (1978).
- Chawla & Kirby (2002).

La pérdida de energía por fricción de fondo es calculada mediante la metodología de Collins (1972) usando coeficientes del tipo Darcy-Weisbach.

En el caso de la interacción con estructuras, CMS-WAVE incluye el *run-up* y sobrepaso, tal como se comentó previamente. En el caso de la primera variable (*run-up*) se resuelve la ecuación de momento, mientras que la segunda, se realiza mediante coeficientes de transmisión. Desde un punto de vista numérico, CMS-WAVE es un modelo en diferencias finitas que permite usar grillas con elementos rectangulares y anidar¹ para optimizar la resolución.

¹ El anidamiento puede ser entre varias grillas y con distintas orientaciones, es decir, no necesariamente la grilla fina debe tener la misma dirección principal que la gruesa. Sin embargo, no se recomienda exceder un ángulo de 45°.

2.3.3 ESPECTRO DE OLEAJE POR VIENTO

Los espectros de oleaje permiten describir la distribución de energía del oleaje sobre un rango de frecuencias y direcciones (ángulo θ), y se puede expresar como:

Ecuación 2—2: Distribución de energía del oleaje

$$S(f, \theta) = S(f)G(\theta|f)$$

Donde $S(f, \theta)$ es la función direccional de densidad espectral de la ola o, simplemente, el espectro direccional de la ola, y $G(\theta|f)$ corresponde a la función de dispersión direccional, llamada también función de dispersión, función de distribución angular o distribución direccional (Goda, 2000), esta última no posee dimensiones y se puede normalizar como:

Ecuación 2—3: Fusión de dispersión, normalizada

$$\int_{-\pi}^{\pi} G(\theta|f) d\theta = 1.$$

El modelo que describe el oleaje completamente desarrollado inducido por viento fue introducido por Pierson y Moskowitz (1964) (PM) del análisis de mediciones en el Atlántico Norte. El espectro PM puede ser escrito en su forma general como

Ecuación 2—4: Espectro Pierson y Moskowitz

$$S(f) = 8.10 \times 10^{-3} g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}}$$

Donde f_p es la frecuencia peak en la mayor densidad espectral del espectro.

2.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS COSTERAS

La característica principal de una obra de atraque es proporcionar seguridad tanto a las naves que utilicen esta infraestructura, como a los pasajeros y trabajadores. Los tipos de estructuras para obras de atraque, según la guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras², se pueden clasificar en:

- Muelles.
- Duques de alba.
- Postes de amarre.
- Multiboyas y monoboyas.
- Soluciones mixtas.
- Estaciones de transferencia a flote.

2.4.1 MUELLES

Consisten en estructuras que permiten el atraque adosado de las embarcaciones, y poseen un área para realizar operaciones de carga y descarga, ya sea de mercancías o pasajeros. Los muelles se pueden clasificar de acuerdo a su orientación y de acuerdo a su impacto sobre la dinámica costera, esto según la Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras.

² Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Portuarias, Gobierno de Chile.

2.4.1.1 MUELLES DE ACUERDO A SU ORIENTACIÓN

2.4.1.1.1 Muelle de penetración:

Su característica principal es su orientación perpendicular o con un ángulo respecto a la línea de costa, ingresando al mar. Son también conocidos como pantalán o tipo espigón.

2.4.1.1.2 Muelle marginal

Consta de una estructura paralela y adjunta a la línea de costa, son también llamados malecón y permiten el atraque directo de las naves.

2.4.1.2 MUELLE DE ACUERDO AL IMPACTO EN LA DINÁMICA COSTERA

2.4.1.2.1 Muelles transparentes

Aquellos muelles fijos que se componen de pilotes o pilas. La característica principal es la no alteración del flujo de agua, ya sea, corrientes u oleaje. Con esto no se afecta mayormente la hidrodinámica ni el funcionamiento del muelle.

2.4.1.2.2 Muelle de Pilotes

Consta de una plataforma apoyada en pilotes inclinados o verticales, donde las principales solicitaciones de este muelle son transmitidas directamente al suelo marino.

2.4.1.2.3 Muelle de Pilas

Este tipo de muelle se caracteriza por ser estructuras de gravedad, en comparación con los pilotes, poseen una estructura más robusta capaz de recibir y resistir cargas verticales como horizontales, y su transmisión a la cimentación se realiza a través de las pilas.

2.4.1.2.4 Muelles opacos

Su estructura principal es continua a lo largo de todo el frente de atraque, impidiendo el flujo normal de las aguas, corrientes u oleaje. Estas estructuras pueden comportarse como protecciones de obras, tal como rompeolas, diques verticales etc.

2.4.1.2.5 Muelles de gravedad

Estos tienen como objetivo contener el terreno mediante su propio peso, estos pueden construidos en roca, arena o arcilla.

2.4.1.2.6 Muelles – pantalla

Son muelles construidos mediante empotramiento al terreno y con anclajes en trasdós, permitiendo equilibrio de empujes, este método es utilizado en terrenos arenosos u limosos.

2.4.1.2.7 Duques de alba.

Son estructuras exentas y separadas de la costa, se utilizan como puntos de atraque y/o amarre, pueden ser flexibles o rígidos, principalmente consiste en un cajón de hormigón apoyados sobre una columna o grupo de pilotes. Su función principal es resistir el impacto de naves atracadas y la fuerza de las espías. Pueden o no estar en la infraestructura del muelle.

2.4.1.2.8 Poste de amarre.

Estructuras parecidas a los duques de alba, solo que resisten la fuerza de las espías, su función es únicamente para amarre de las embarcaciones. Estos se encuentran en las cercanías del muelle de atraque.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar a nivel conceptual una infraestructura portuaria en Puerto Williams, que cumpla con las condiciones necesarias para el atraque de una nave de diseño tipo Crucero Holland América.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Realizar una caracterización oceanográfica del área de estudio, incluyéndose en esta caracterización análisis de vientos, corriente y marea.
- Analizar los vientos históricos en el sector de interés, con una data obtenida del Explorador Eólico de la Universidad de Chile.
- Analizar oleaje medido insitu.
- Realizar la generación de oleaje por vientos, y validar con data insitu.
- Proponer un diseño conceptual del muelle asociado a la infraestructura portuaria
- Brindar una recomendación del track y señalización para la navegación, para la ejecución de la faena de atraque.

4 METODOLOGÍA.

Esta sección del documento tiene como objetivo dar a conocer los procedimientos relativos a cada una de las mediciones realizadas en campo, así como también del procesamiento de los datos obtenidos.

4.1 BATIMETRÍA.

El levantamiento batimétrico se realizó por el presente autor, bajo el marco de una campaña de campo llevada a cabo para propósitos de diseño de las obras marítimas de Puerto Williams.

Para la realización de la batimetría, fue necesario monumentar vértices geodésicos, los cuales fueron vinculados a la red geodésica nacional, y nivelados a una cota fija de marea. Con este procedimiento se aseguró la determinación de las coordenadas geográficas o UTM de las estaciones de sondaje.

La navegación fue guiada por GPS Diferencial, compuesta por una estación base, ubicada en los vértices geodésicos construidos, y una estación móvil dentro del bote la que se desplaza por la zona que se requiere levantar.

Respecto a la medición de las profundidades, se utilizó un ecosonda inscriptor con capacidad de sondear profundidades menores a 25 (m). Las cuales quedaron registradas tanto de manera digital como gráfica en los ecogramas.

El bote con GPS móvil y ecosonda recorrió el área de estudio de manera perpendicular a la costa, trazando de este modo perfiles de playa, a una distancia de no más de 5 (m) entre ellos.

Al iniciar, finalizar o en caso de una suspensión del trabajo, se realizó la comprobación de las mediciones, mediante la prueba de barra, la que consiste en descender una barra de acero por el área donde se ubica el transductor del ecosonda, se baja cada 2 (m) a partir de la superficie hasta los 20 (m) o hasta la profundidad máxima del sector, registrándose en el ecograma las profundidades en descenso y ascenso de la barra. Con esto se verifica la precisión del ecosonda.

Dado que la superficie del mar experimenta variaciones durante la ejecución del levantamiento batimétrico, se instaló un mareógrafo para registrar el nivel del mar de manera continua por el tiempo de duración de los sondajes. Estos registros se referenciaron al NRS mediante la nivelación del instrumento con los vértices construidos en campo, al igual que las sondas registradas. El proceso verificación de los datos se realizó mediante la comparación de las sondas digitales y las sondas transcritas en el ecograma.

Ilustración 4-1: Navegación mediante GPS, durante la realización de la batimetría.



Fuente: Elaboración propia

4.2 ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS.

Los estudios fueron realizados conforme a la Publicación SHOA 3201 instrucciones oceanográficas N°1 “Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos”. La que establece las normas a que deberán someterse las actividades oceanográficas que realicen las empresas, para cumplir con el reglamento de concesiones marítimas. Los estudios corresponden a corrientes, vientos, mareas y oleaje.

Las ubicaciones de los instrumentos de medición se detallan en la siguiente Figura 4-1.

Figura 4-1 Detalle de la ubicación de los instrumentos.



Fuente: Elaboración propia

4.2.1 CORRIENTES.

El objetivo de estas mediciones, fue realizar una caracterización de las corrientes, para la determinación del patrón de circulación general en el área de interés donde se realizará el proyecto. Para esto se ejecutaron mediciones mediante dos metodologías las cuales se detallan a continuación.

4.2.1.1 MEDICION EULERIANA.

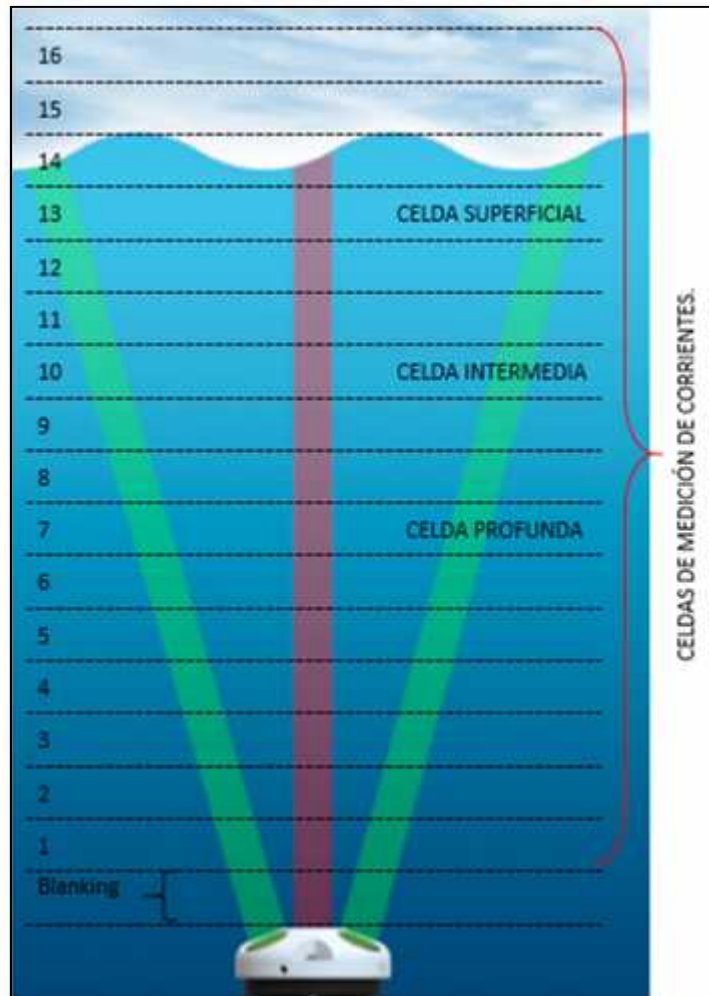
Para realizar estas mediciones se instaló un perfilador acústico doopler, (ADCP), modelo AWAC de Nortek, que tiene la capacidad de registrar velocidades y direcciones de corrientes en capas de 1 (m) desde fondo a la superficie. Su sistema consta de una frecuencia acústica de 600KHz, lo que permite un rango máximo de perfiles de corriente de 50 m. Posee 4 haces acústicos, uno vertical y 3 inclinados 25°, posee una batería que proporciona autonomía para aproximadamente 50 días. Además, tiene sensores de temperatura, los cuales pueden captar un rango de temperaturas entre -4° a 40°C.

Para poder realizar estas mediciones la ADCP se montó en una estructura que restringió la movilidad en los ejes X e Y. Adicionalmente, se dotó de peso muerto para evitar desplazamientos en Z.

Este perfilador se instaló a una profundidad de 14 (m) y fue configurado para obtener registros de corriente (velocidad y direcciones) en celdas de 1 m. cada 10 minutos, durante 30 días con el objetivo de cubrir las fases lunares de cuadratura y sicigia.

Una vez retirado el equipo, se descargó y procesó el registro para obtener las velocidades y direcciones de cada una de las capas medidas a lo largo de la columna de agua. De estas, se seleccionan 3 celdas, las fueron denominadas capa superficial, central y profunda, estando estas asociadas a 1, 5 y 8 (m) de profundidad. Estas distancias fueron seleccionadas de acuerdo a la ubicación en donde las corrientes pueden llegar a afectar de mayor manera a la embarcación, como lo es la quilla, hélice de propulsión y casco de la obra viva de la nave.

Figura 4-2: Esquema de medición por celdas en ADCP.



Fuente: Elaboración propia

Cada una de estas celdas fueron analizadas estadísticamente, lo que considera rangos de dirección y magnitud, para así realizar tablas de incidencia y rosas, además de resumir con parámetros estadísticos, como máximos, mínimos desviación estándar, promedio.

Este procedimiento y análisis fue realizado para dos campañas: verano e invierno.

4.2.1.2 MEDICIÓN LAGRANGIANA.

Para la realización de estas mediciones se utilizaron derivadores del tipo veleta cruzada a dos profundidades (1 y 5 (m)), los que fueron lanzados al mar en el punto de interés y fueron seguidos por una embarcación, la cual fue posicionada mediante GPS.

Estos ensayos fueron realizados en cuadratura y sicigia lunar, en los dos estados de marea (vaciente y llenante). Su seguimiento se ejecutó durante un periodo de una hora aproximadamente, registrándose la hora cuando el borde del bote pasa por el costado del derivador.

Los archivos de GPS se procesaron para obtener las posiciones del bote cada segundo y luego realizar el cruce de los horarios registrados por el observador, para así obtener las coordenadas de la posición de los derivadores. Con estas coordenadas y horarios, se consiguieron las distancias recorridas y velocidad de desplazamiento para cada uno de los derivadores.

4.2.2 VIENTOS.

Para la medición de vientos se utilizó una estación HOBO micro que posee 4 conexiones para sensores y, para fines específicos de este proyecto se utilizaron los siguientes:

- Presión barométrica (660 a 1072 mb).
- Temperatura (0 a 50 ° C).
- Dirección del viento (0 a 360 °).
- Velocidad del viento (0 a 76 (m/s)).

La estación meteorológica fue instalada a 10 (m) sobre el suelo y configurada para registrar velocidad y dirección de vientos cada 5 minutos.

Ilustración 4-2: Instalación de estación meteorológica, Puerto Williams.



Fuente: Elaboración propia

Luego, y a partir de la serie de datos, se realizaron las rosas de vientos, tablas de incidencia y el análisis estadístico de los registros.

Adicionalmente se emplearon y analizaron vientos históricos, los cuales fueron obtenidos del Explorador Eólico de la Universidad de Chile, con datos simulados y calibrados para el año 2010. El Explorador de Energía Eólica es una herramienta de análisis del recurso viento, que entrega resultados de una simulación numérica de las condiciones de viento y densidad del aire, de manera gráfica y cómoda para el usuario. Estas simulaciones fueron realizadas por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), un modelo avanzado, ampliamente utilizado para analizar el recurso eólico en el mundo. La información entregada por el Explorador Eólico permite realizar una evaluación preliminar del recurso eólico en un determinado lugar.³

A pesar de la calibración y validación de los datos, se realizó una comparación con las dos campañas de viento, para corroborar que estos puedan ser utilizados para la generación de oleaje. Además, se realizará un análisis extremo de los vientos históricos, el que consiste en extrapolar intensidades a distintos periodos de retorno.

4.2.3 MAREA.

El registro de las mareas realizado por un instrumento marca HOBO, que consta de un sensor de presión absoluta, el cual no tiene necesidad de mantenimiento ya que cuenta con una protección de acero inoxidable de larga duración. Tiene un rango de medición entre 0 a 30 (m) de profundidad, con un error promedio 0.5 a 1.0 (cm). Además, tiene incorporado un sensor de temperatura el cual fluctúa entre -20° a 50°C.

Este sensor fue ubicado dentro de un tubo PVC el cual se demarcó cada 10 (cm) y se adjuntó a uno de los pilotes del muelle Covadonga, cuyo tope fue nivelado a la cota SHOA correspondiente. Así los registros obtenidos del mareógrafo fueron referenciados al NRS oficial del sector de estudio.

³ <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

Ilustración 4-3: Mareógrafo instalado en muelle fiscal, Puerto Williams



Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se generó una serie de tiempo, la cual fue procesada para obtener las principales constituyentes armónicas, y los respectivos planos mareales.

4.2.4 OLEAJE.

El oleaje del sector, fue medido por medio del mismo ADCP, que midió corrientes. Los registros de desnivelación instantánea del mar se realizaron a una tasa de 2 Hz, durante un intervalo de tiempo de 35 minutos, cada 3 horas, durante 30 días seguidos.

La metodología que utiliza esta ADCP corresponde a una detección acústica de la superficie mediante un transductor vertical (AST, Acoustic Surface Tracking) de esta manera se evitan las limitaciones de los sistemas de medida de oleaje

basados en la velocidad y presión. Esta tiene la capacidad de estimar parámetros de oleaje tanto tipo Swell como Sea.

Una vez descargado los datos de la ADCP, el archivo se procesó por medio del software QuickWave, para obtener H_{mo} , T_{peak} ; Dir, en una serie de tiempo, la cual fue analizada mediante rosas de oleaje y tablas de incidencia.

Este registro de oleaje, independiente de ayudar a analizar el clima operacional del sector, fue de suma importancia, ya que con él se calibró y validó el modelo de hindcast propuesto.

4.3 GENERACIÓN DE OLAJE.

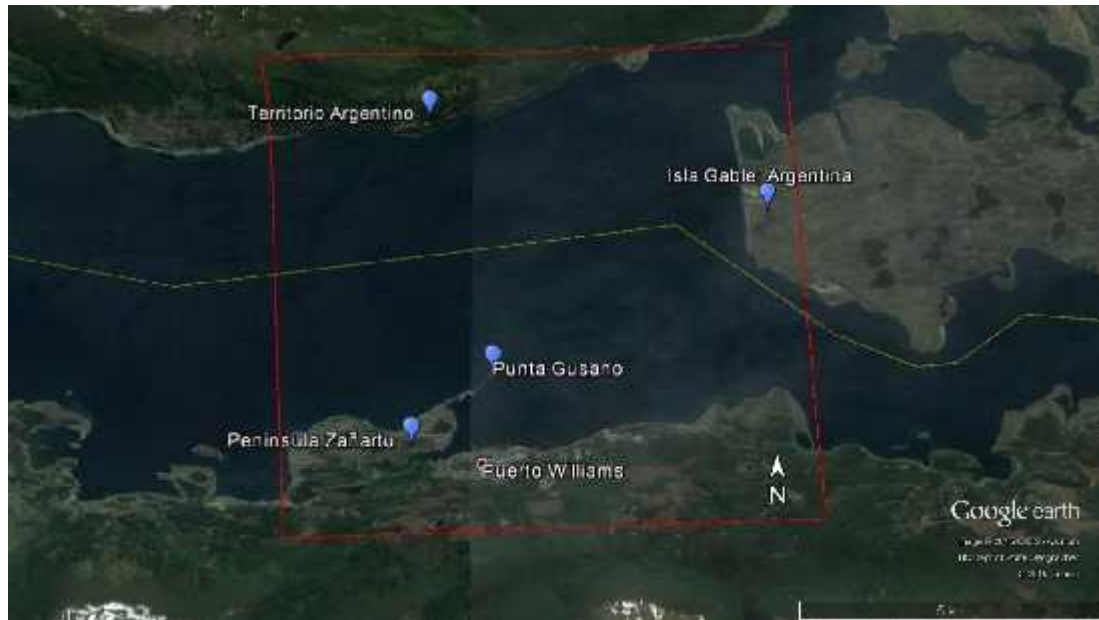
Para conocer el oleaje operacional de largo plazo, se realizó un hindcast por medio del software SMS (Surface-Water Modeling System), a través de uno de sus modelos denominado CMS-Wave. Los archivos necesarios para la realización de este punto corresponden a batimetría (X, Y, Z), línea de costa del área de interés y alrededores (X, Y, Z=0).

Una vez ingresados los datos anteriores, se creó una grilla, la cual consideró el área de acción de los fenómenos que se desean modelar: zona de generación del oleaje, la zona de propagación y finalmente el área de interés del estudio. Para este caso, la grilla contempló el sector denominado “Punta Gusano” que incluye el “Banco la Herradura”, que es un sector bajo que protege el área de emplazamiento y acceso a Puerto Williams, además se consideró el borde costero opuesto a Puerto Williams, el cual corresponde a territorio argentino. Por el sector Este, se consideró la Isla Gable, y el “Paso Mackinlay” como se ilustra en la siguiente Figura 4-3.

Una vez generada la grilla y con los estudios de vientos ya realizados, se integraron las intensidades y direcciones de los vientos al modelo, cabe destacar que independiente de la orientación en que se encuentre la grilla, el modelo tiene la capacidad de generar oleaje desde cualquiera de sus bordes. Primero se generó oleaje de cada una de las direcciones influyentes en este estudio, que corresponde a las direcciones E, NE, N, NW, W. Con esto se compararon los

resultados numéricos con los medidos por ADCP, con el objetivo de calibrar y corregir el modelo para cada una de las direcciones de generación.

Figura 4-3: Zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se procedió a modelar el clima operacional de vientos, para así generar la estadística de larga data. Este procedimiento se realizó, tomando cada una de las marcas de clase de la tabla de incidencia de vientos y su respectiva dirección de procedencia.

Una vez conocidas las características operacionales del oleaje, se estimó clima extremo mediante la modelación de los vientos de la misma naturaleza, siendo estos los que producirían las mayores alturas de ola en la zona de estudio.

5 RESULTADOS.

5.1 ESTUDIOS OCEANOGRÁFICOS.

5.1.1 CORRIENTES LAGRANGEANAS

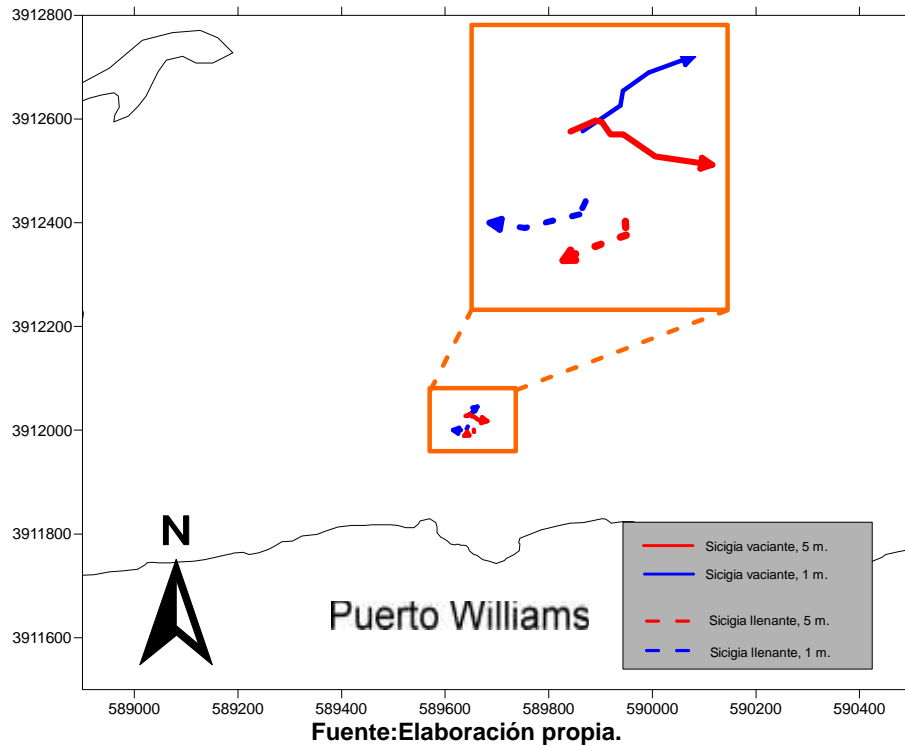
5.1.1.1 SICIGIA

5.1.1.1.1 VERANO

Durante el periodo de sicigia lunar en llenante, los derivadores de ambas profundidades, tuvieron el mismo comportamiento, esto es, su dirección de movimiento fue hacia el interior de la poza, tomando una dirección NE.

El recorrido del derivador, de 1 (m) de profundidad, fue de aproximadamente 60 (m) con una velocidad promedio de 0.01 (m/s) y para el caso del derivador de 5 (m), recorrió aproximadamente 90 (m), en la misma dirección, con 0.07 (m/s) como velocidad promedio. (Ver Figura 5-1)

Figura 5-1: Derivadores en marea llenante y vaciante en sicigia lunar, verano.



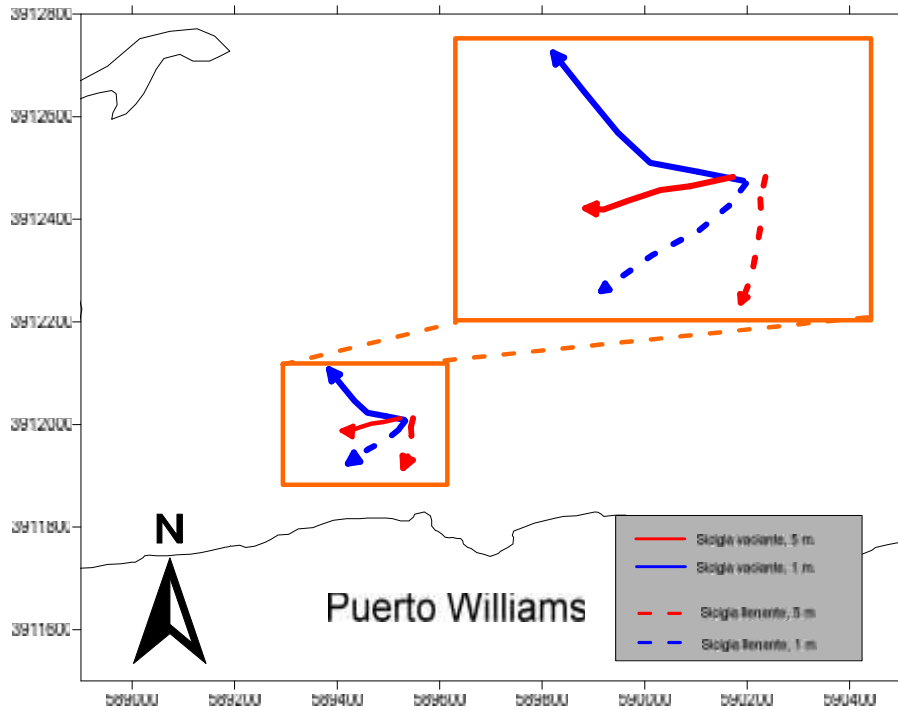
El experimento para las condiciones de marea vaciante, dio como resultado la Figura 5-1 que muestra que el derivador de 5 (m) tomo una dirección E, con una velocidad promedio de 0.01 (m/s) y recorriendo una distancia de 46.9 (m), lo que difiere del derivador superficial de 1 (m) de profundidad, el cual demostró una tendencia leve hacia el SE teniendo la misma velocidad promedio, y recorriendo una distancia de 46.5 (m).

5.1.1.1.2 INVIERNO

Durante el mismo fenómeno lunar, pero en periodo invernal y marea llenante, ambos derivadores tomaron una trayectoria en dirección SW, básicamente se dirigieron hacia la costa de Puerto Williams. El derivador de 1 (m) de profundidad recorrió una distancia promedio de 186.9 (m) con una velocidad de 0.05 (m/s), mientras que el derivador de 5 (m) de profundidad recorrió 117.5 (m) y promediando 0.03 (m/s).

Durante marea vaciante, los derivadores en total recorrieron 328 (m), de los cuales las mediciones a 1 (m) de profundidad aportaron 228.5 (m), con una velocidad promedio de 0.06 (m/s) y tomando una trayectoria con dirección NW. Gráficamente este derivador entra a la bahía para luego tomar dirección hacia la Punta Gusano. El derivador de 5 (m) de profundidad viajó alrededor de 100 (m) a una velocidad de 0.03 (m/s), y al contrario del derivador superficial, este tomo trayectoria con rumbo W, entrando a la bahía con dirección al Seno Lautu.

Figura 5-2: Derivadores en marea llenante y vaciante en sicigia lunar, invierno.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2 CUADRATURA

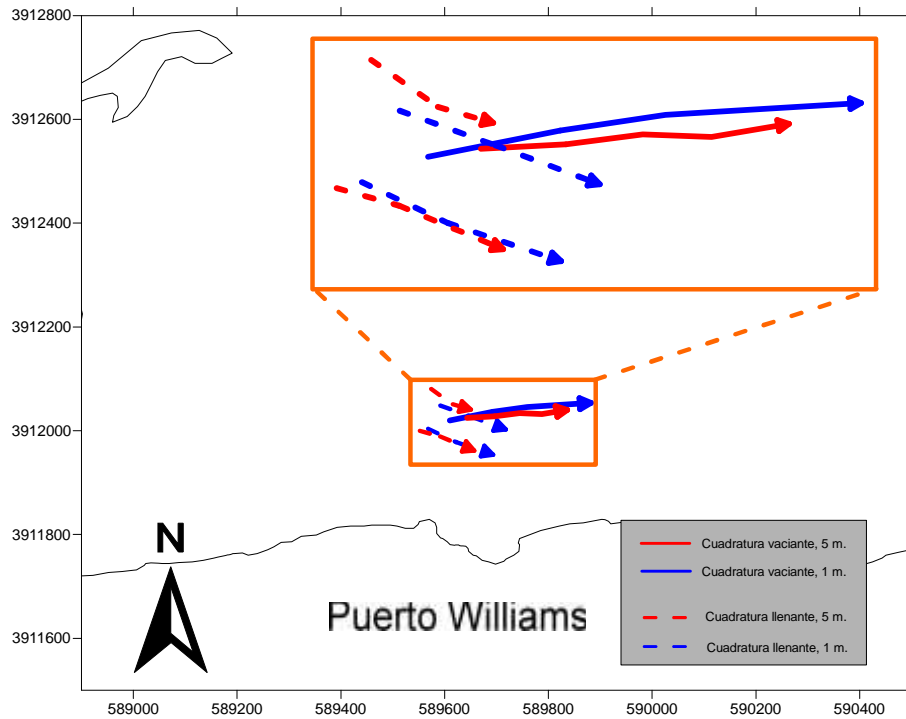
5.1.1.2.1 VERANO

En temporada estival, ambos derivadores tomaron una dirección SE, lo que significa que los derivadores se fueron hacia la costa de Puerto Williams, ambos lances del derivador de 1 (m), recorrieron una distancia similar, de 134 (m), sumando un total de 268.7 (m) con una velocidad de 0.11 (m/s).

Para el caso del derivador de 5 (m), ambos lances tomaron dirección SE al igual que el derivador superficial, recorriendo en total una distancia de 294 (m).

En este experimento, solo se realizó un lance para cada profundidad, y ambos derivadores tomaron una trayectoria con dirección E. La veleta de 1 (m) de profundidad recorrió una distancia de 274.7 (m) a una velocidad promedio de 0.10 (m/s). y para el caso de 5 (m) recorrió una distancia de 196 (m) con una velocidad promedio de 0.08 (m/s).

Figura 5-3: Derivadores en marea llenante y vaciante en cuadratura lunar, Verano.



Fuente: Elaboración propia

5.1.1.2.2 INVIERNO

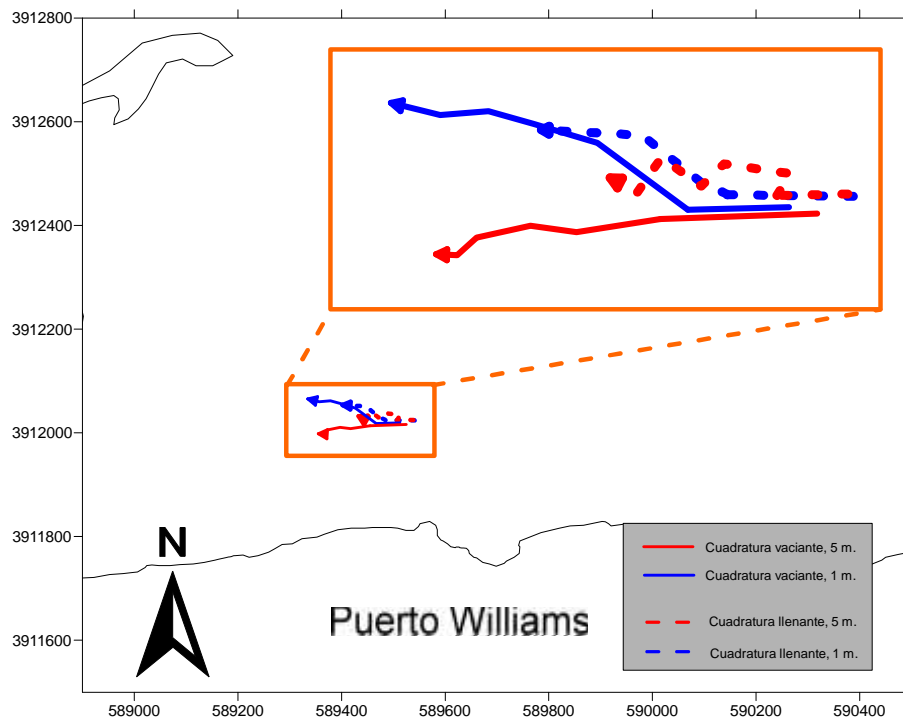
En esta ocasión ambos estados de marea tuvieron un comportamiento similar, definiendo su trayectoria hacia el interior de la bahía protegida por Punta Gusano, (al W). En los ensayos anteriores, se apreciaron diferencias notorias de los comportamientos de los derivadores, entre ambas mareas ingresando y /o saliendo de la bahía.

Para el caso de marea llenante, el derivador de 1 (m), se desplazó aproximadamente 267.8 (m) a una velocidad promedio de 0.06 (m/s). mientras que el de 5 (m) recorrió una distancia de 141.6 (m) con una velocidad promedio de 0.03 (m/s).

Estos derivadores recorrieron una menor distancia que en llenante, el derivador de 1 (m) de profundidad tuvo una distancia de 189.8 m, 78 (m) menos que en llenante. Para el caso del derivador amarillo (5 (m)) recorrió una distancia de

189.3 m. Ambas experiencias se tuvieron a una velocidad promedio de 0.05 (m/s).

Figura 5-4: Derivadores para marea llenante y vaciante en cuadratura lunar, invierno.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 CORRIENTES EULERIANAS.

5.1.2.1 CAMPAÑA VERANO.

Para la celda de 2 (m) de profundidad, se visualizó una mayor ocurrencia de corrientes en los intervalos comprendidos entre 0.0 – 0.06 (m/s) y 0.06 – 0.12 (m/s) sumando un 79.8 % de los registros medidos; es este último intervalo el que abarca mayor cantidad de ocurrencias con un 42.3% de la estadística.

Las corrientes procedentes del NE lideran la data con el 17.83%, seguida por las corrientes de dirección SW y W. Cabe mencionar que ninguna supera una frecuencia del 20% de los datos medidos.

En promedio la velocidad de las corrientes es de 0.08 (m/s), siendo los máximos valores registrados 0.42, 0.44 y 0.49 (m/s), proveniente de E, SE y S respectivamente.

Las corrientes registradas en la celda central de 5 (m) de profundidad, poseen una gran movilidad de dirección de incidencia, en ninguna superan el 20% del total de registros; las direcciones que más frecuentan en el sector son NE y SW con un 16.54% y 14.75% de ocurrencia, respectivamente.

Respecto a las velocidades, se concentra el 91% de los datos entre 0.0 y 0.12 (m/s), donde el intervalo con mayor ocurrencia es 0.0 a 0.06 (m/s) con un 49.15%, seguido por el intervalo 0.06 a 0.12 (m/s) con el 42% de la muestra.

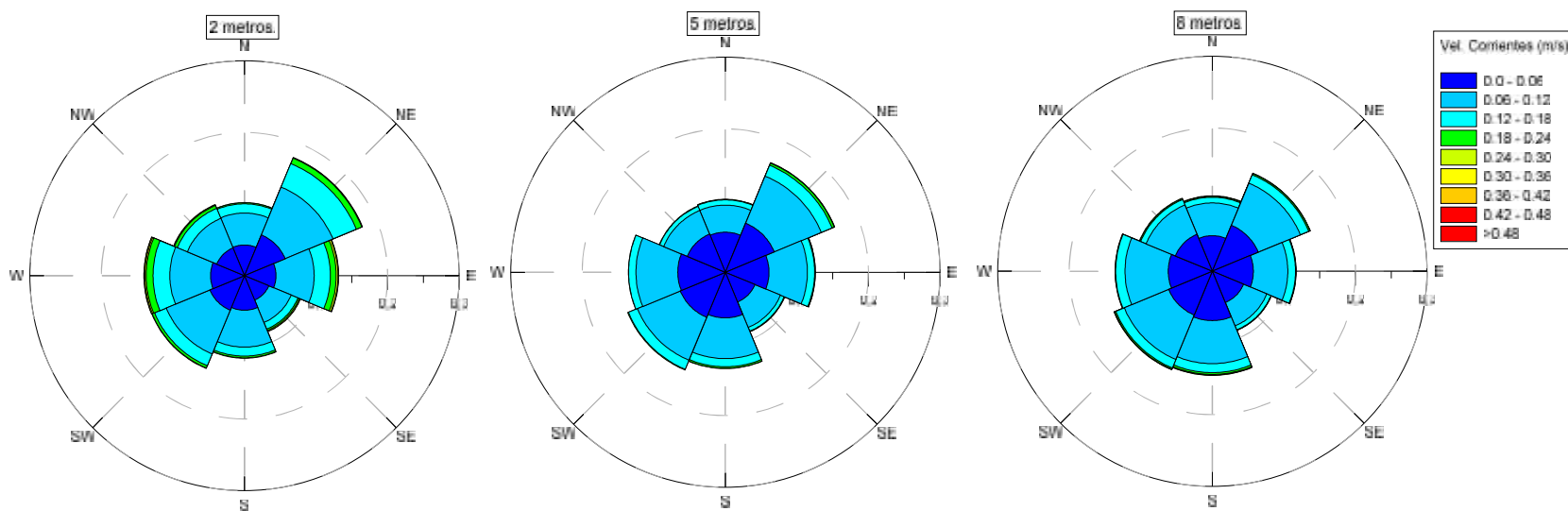
Las velocidades de las corrientes en la celda central promediaron un 0.07 (m/s) en todas las direcciones; la máxima velocidad observada fue 0.31 (m/s), proveniente de la dirección E y NE.

Finalmente, la celda de 8 (m) de profundidad, entregó como principales direcciones las provenientes del SW, NE y S, con un porcentaje de ocurrencia de 14.85%, 14.81% y 14.55%, respectivamente.

En cuanto a la intensidad de las corrientes, se mantuvieron con el mismo comportamiento de las anteriores capas, registrándose la mayor ocurrencia en el intervalo 0.00 a 0.06 (m/s) con un 47.60% de las estadísticas, seguido por el intervalo comprendido entre 0.06 y 0.12 (m/s) con un 42.46%.

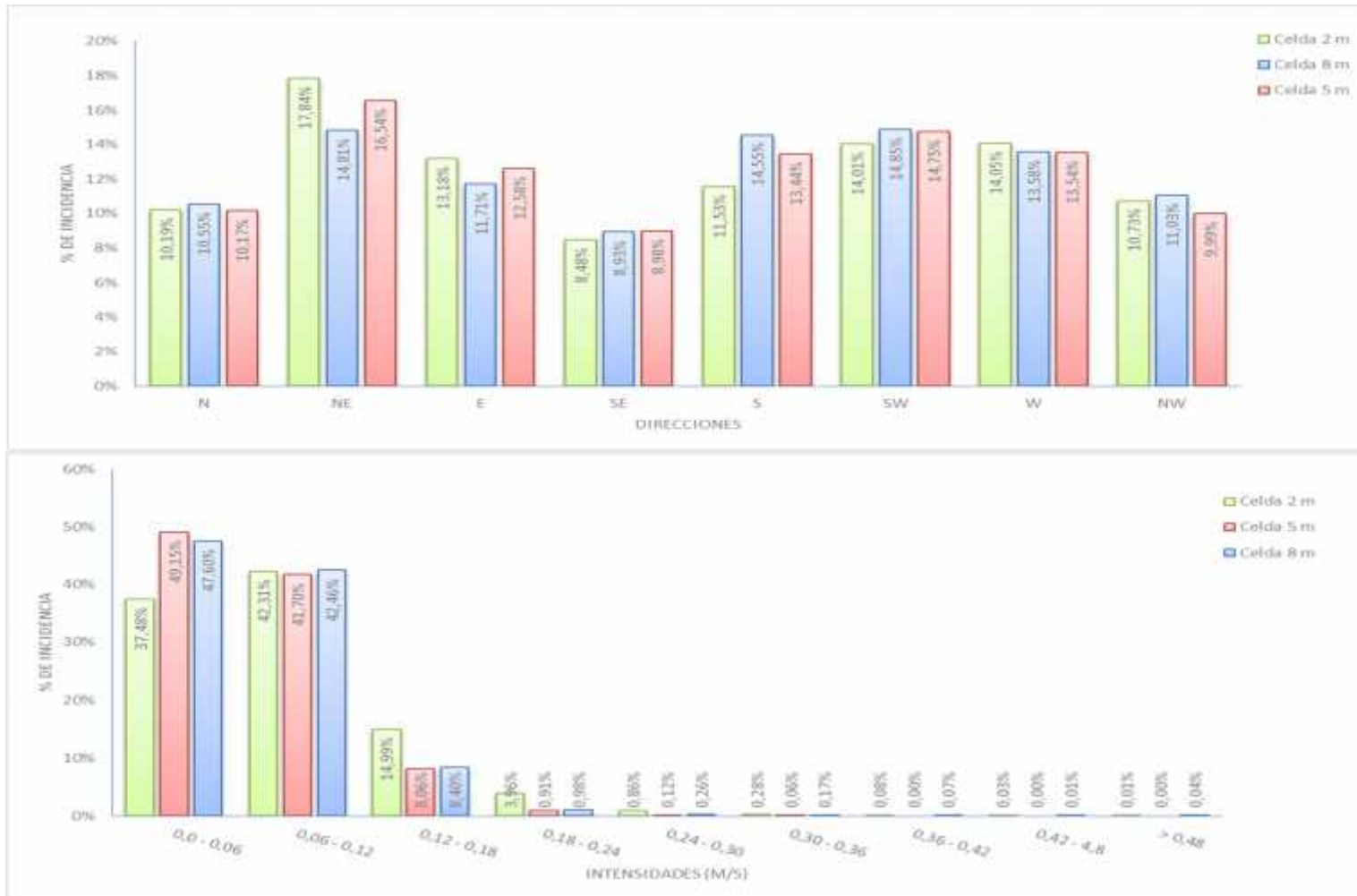
El análisis estadístico es ilustrado en Figuras 5–5, 5–6 y Tabla 5—1.

Figura 5-5: Rosas de corrientes (2, 5, 8 (m)), verano.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-6: Histogramas de direcciones e intensidades, corrientes verano.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5—1: Resumen por celda de las corrientes eulerianas de la campaña de verano.

Celda	Magnitudes de corriente (m/s)		Dirección (º)	
	Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
2 m.	0,06 - 0,12	42,3%	NE	17,8%
5 m.	0,0 - 0,06	49,1%	NE	16,5%
8 m.	0,0 - 0,06	47,6%	NE; SW	14,9%

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2 CAMPAÑA INVIERNO.

En corrientes registradas en la celda de 2 (m), se visualizó un comportamiento marcado en las direcciones de incidencia, siendo las direcciones del primer cuadrante las que dominan la estadística con un 60.76%, siendo la principal el NE, son las que dominan con un 28.19.

Respecto a la intensidad de las corrientes, éstas se concentran en los primeros dos intervalos que corresponden a 0.0 a 0.12 (m/s), sumando un 87.67%. En el rango comprendido entre 0.0 y 0.06 (m/s) hay un 45.37% de los datos, seguido por un 42.30% correspondiente a las magnitudes comprendidas entre 0.06 y 0.12 (m/s).

La máxima velocidad de la corriente de superficie se encontró en la dirección W, y fue de 0.52 (m/s).

A los 5 (m) de profundidad, las corrientes mostraron un comportamiento similar a las superficiales, manteniendo la dispersión, con una leve concentración hacia el primer cuadrante. La rosa de corrientes corrobora lo anterior y muestra que la componente direccional NE es la principal dirección de incidencia, seguida por la dirección E y N, cuyos porcentajes de ocurrencia suman el 54 % de las corrientes medidas. Se observa una disminución de estas ocurrencias a esta profundidad, respecto de las corrientes superficiales.

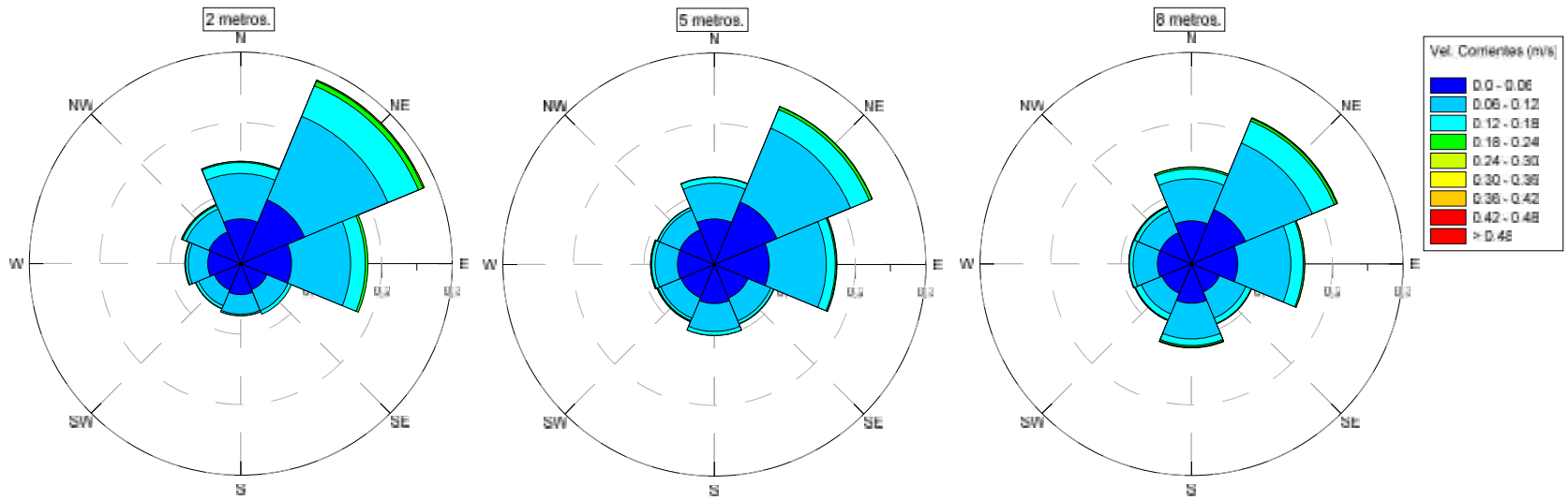
Las intensidades se concentran al igual que en las superficiales, en los primeros dos intervalos, que son 0.0 a 0.06 (m/s) y 0.06 a 0.12 (m/s), sumados ambos rangos un 91.52% de los datos, en esta profundidad, sin embargo, el primer de ellos aumentó su ocurrencia por lo tanto las intensidades más frecuentes disminuyeron. En promedio las velocidades fluctuaron en los 0.06 (m/s), y como máximas velocidades registradas se encuentran 0.42 (m/s) y 0.32 (m/s) provenientes del SW y W, respectivamente.

En la profundidad de la columna de agua, se pudo apreciar una distribución muy semejante a las corrientes analizadas anteriormente. Las direcciones siguen con la concentración de datos en el primer cuadrante, con corrientes provenientes del NE, con un 22.44% seguido por las corrientes provenientes del E, con 16.09% y del N, con 13.76%.

Las intensidades de las corrientes submarinas, mantienen los mismos intervalos de ocurrencia, siendo el primer intervalo el que posee un 44.99% de los datos medidos en campo. Seguido por el intervalo 0.06 a 0.12 (m/s) con un 42.80%. La mayor intensidad registrada es de 0.58 (m/s), la cual proviene desde el W y el promedio de velocidad corresponde a 0.07 (m/s).

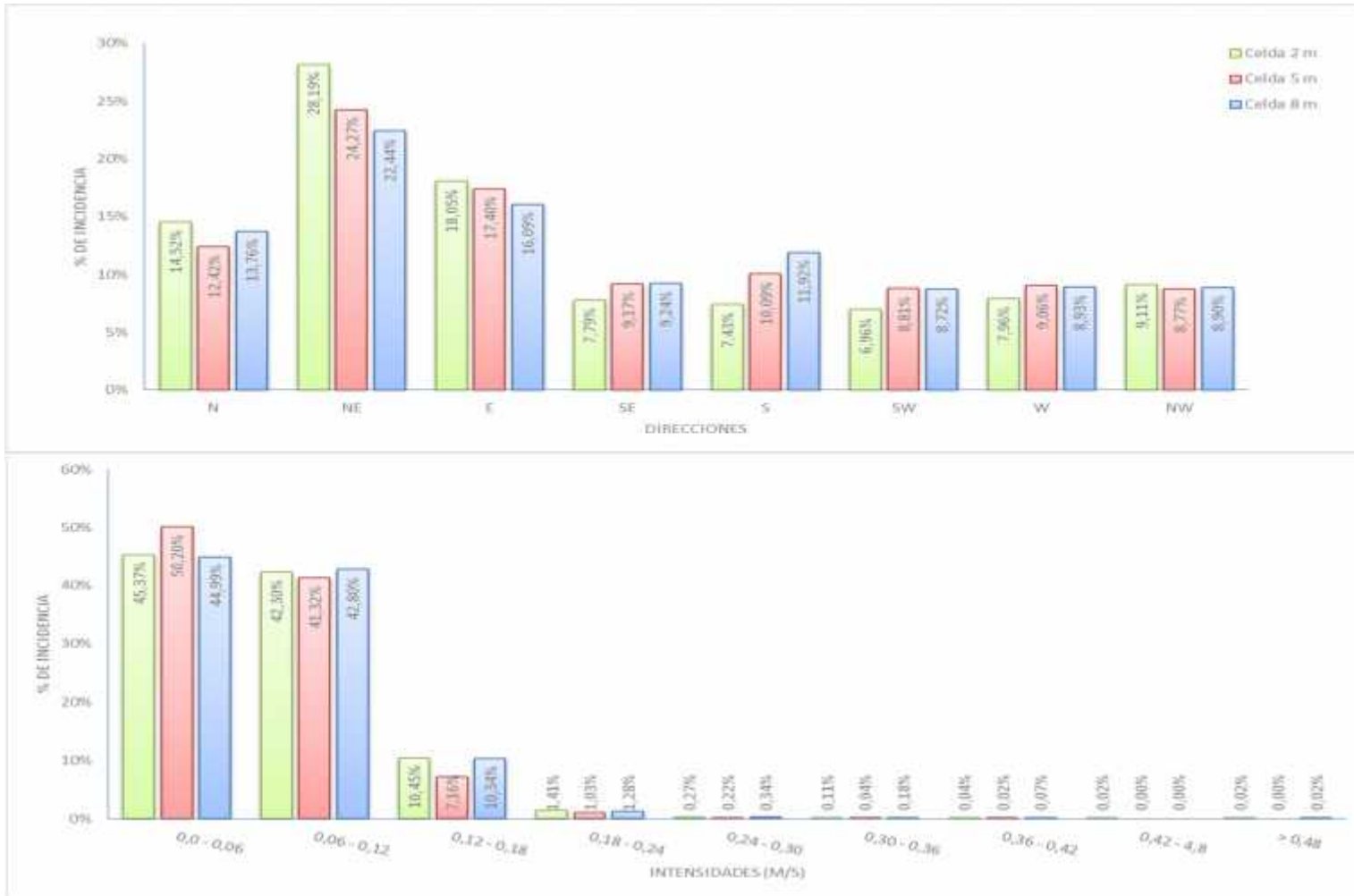
El resumen del análisis estadístico es ilustrado a continuación en las Figuras 5–7, 5–8 y Tabla 5—2.

Figura 5-7: Rosas de corrientes (2, 5, 8 (m)), invierno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-8: Histogramas de direcciones e intensidades, corrientes invierno.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—2: Resumen por celda de las corrientes eulerianas de la campaña de invierno.

Celda	Magnitudes de corriente (m/s)		Dirección (°)	
	Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
2 m.	0,0 - 0,06	45,4%	NE	28,2%
5 m.	0,0 - 0,06	50,2%	NE	24,3%
8 m.	0,0 - 0,06	45,0%	NE	22,4%

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 VIENTOS.

Durante el periodo estival, los vientos predominantes en el área de estudio, corresponden a los provenientes del NW y W teniendo un porcentaje de ocurrencia de 29.3% y 28%, respectivamente, como se observa en la Figura 5-9. Las direcciones NW y W son las direcciones que aportan las mayores intensidades que aproximadamente son un 9 % de los vientos medidos, de acuerdo a la información en Tabla 5—3.

Los intervalos con mayor frecuencia, corresponden a los comprendidos entre 1.6 y 3.3 (m/s) con un 26.56%, estado que es denominado “Brisa” en la escala de Beaufort. Seguido por el intervalo viento suave, que corresponde a intensidades entre 3.3 y 5.5 (m/s). Los vientos con intensidades menores a 0.3 (m/s) son denominados calmas, y corresponden a un 14.37%, Tabla 5—3.

Las mayores intensidades corresponden al intervalo comprendido entre 11.0 y 14.0 (m/s), catalogado como viento fuerte.

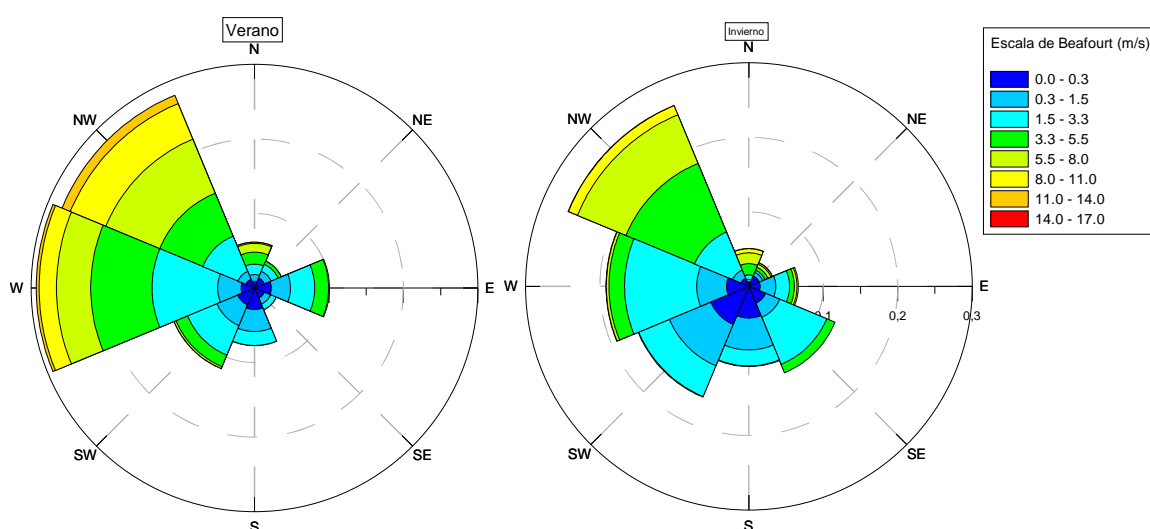
Durante el invierno los vientos no sufren gran cambio, respecto a la temporada estival, ya que las direcciones predominantes provienen del NW y W. En esta temporada se observa un aumento en los vientos provenientes desde tierra, es decir de dirección SW, S y SE.

Las mayores intensidades son provenientes de las direcciones NW, N y estas corresponden a vientos denominados viento moderado y viento regular.

Los vientos predominantes son “brisas”, que se caracterizan por intensidades fluctuantes entre 1.5 y 3.3 (m/s), seguidos por “brisas leves” correspondientes a vientos entre 0.3 y 1.5 (m/s). Un 19.91% de los registros son vientos están catalogados como “calma”, Figura 5-9.

Las mayores intensidades registradas son 12.59 (m/s) y 12.34 (m/s) que fueron observaciones provenientes del N y NE, respectivamente Figura 5-10.

Figura 5-9: Rosa de vientos, verano e invierno.



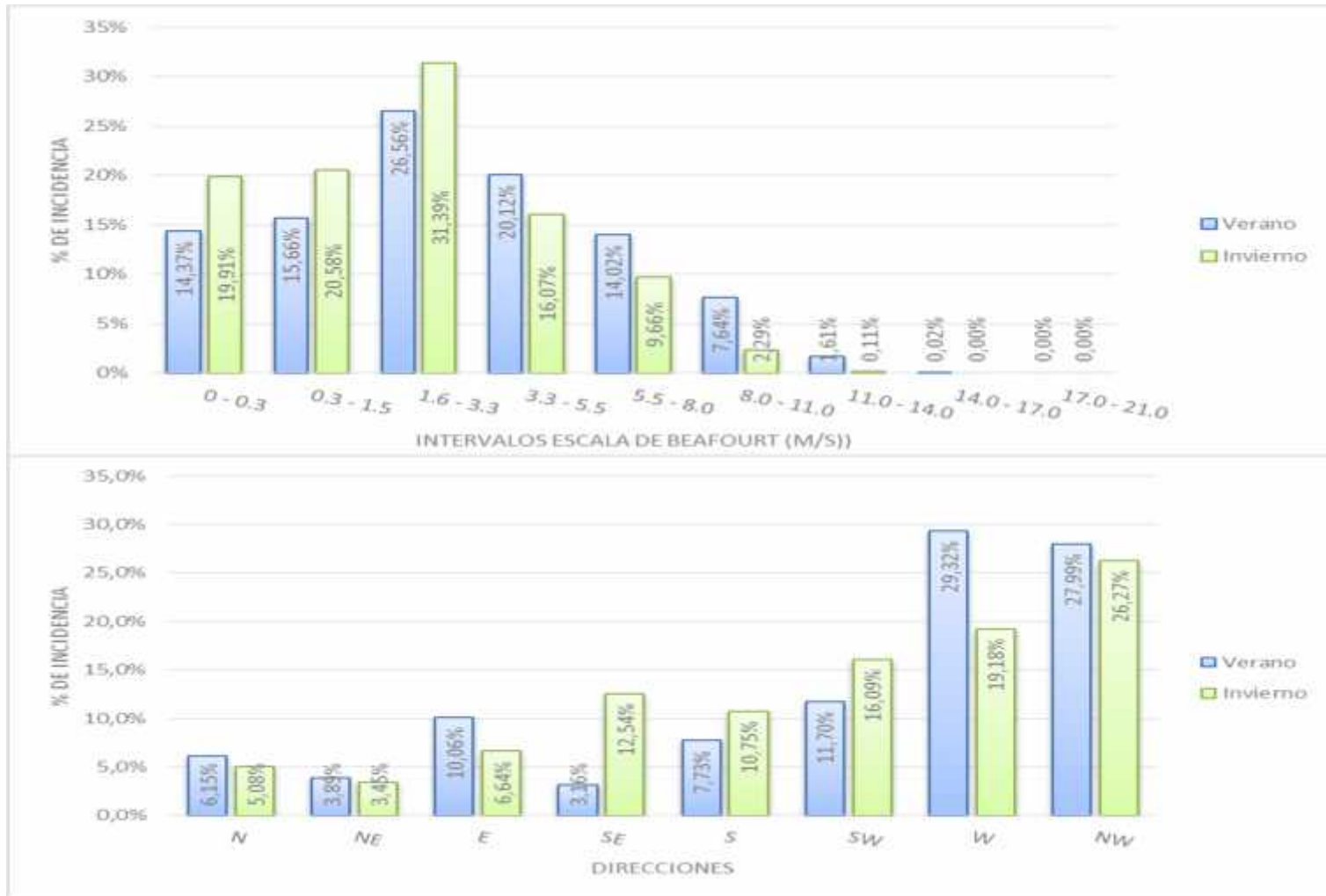
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—3: Resumen de campaña de vientos.

Campaña	Intensidades vientos (m/s)		Dirección (º)	
	Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
Verano	1,6 - 3,3	26,6%	W	29,3%
	3,3 - 5,5	20,1%	NW	28,0%
Invierno	1,6 - 3,3	31,4%	W	26,3%
	0,3 - 1,5	20,6%	NE	19,2%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-10: Histogramas de vientos, verano e invierno.



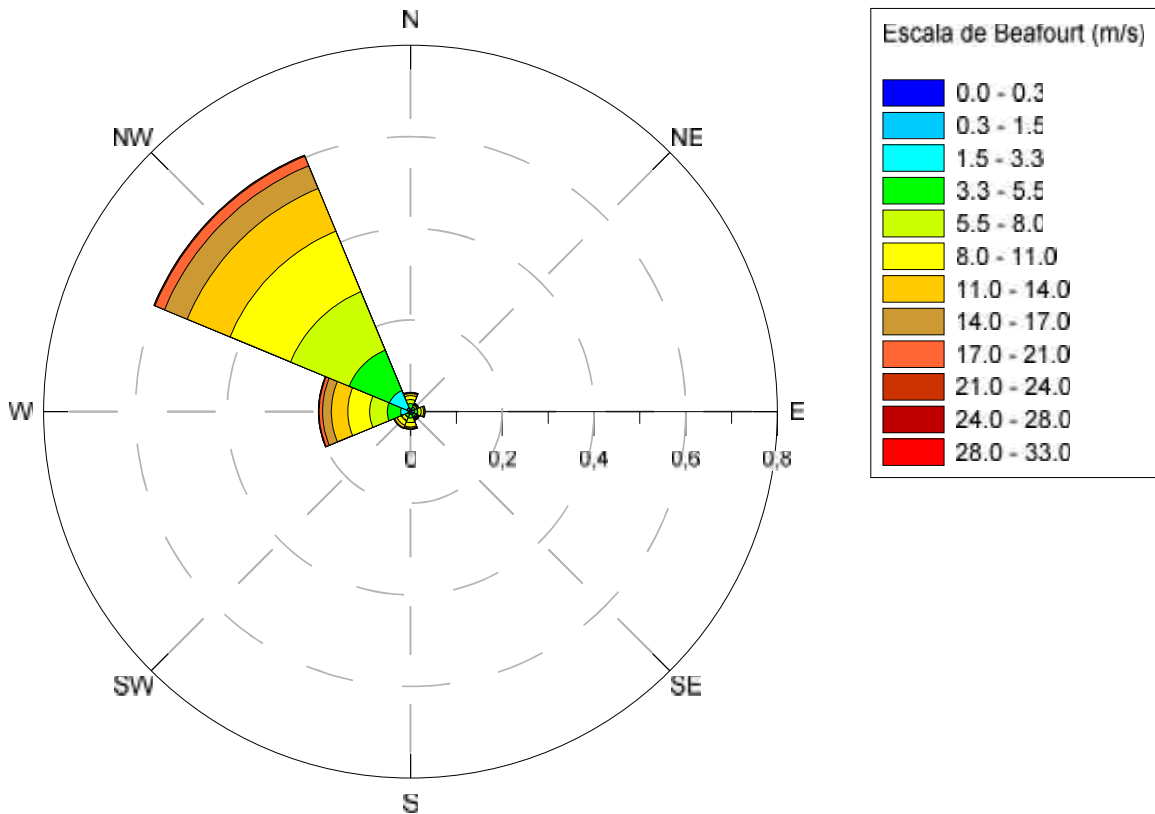
Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.1 HISTÓRICOS.

Esta estadística de viento, muestra en la Tabla 5—4, una predominancia de los vientos provenientes del NW con un 60.57% de ocurrencia, seguida de la dirección W con un 20.08% de los datos. Cabe destacar el bajo porcentaje de vientos considerados calma, que corresponde al 1.24% de los datos. Existe una amplia variación de las intensidades de los vientos, siendo los denominados como regular (8.0 a 11.0 (m/s)) los más frecuentes, seguidos por los moderados de intensidad 5.5 a 8.0 (m/s),

Las máximas velocidades se registran en las direcciones NW y W y corresponden a intensidades de 13.85 y 14.61 (m/s).

Figura 5-11: Rosa de direcciones e intensidades, Data histórica (2010).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—4: Tabla de incidencia, vientos históricos (2010).

		Intervalos escala de Beaufort (m/s)														
Intervalos		0 - 0.2	0.3 - 1.5	1.6 - 3.3	3.4 - 5.4	5.5 - 7.9	8.0 - 10.7	10.8 - 13.8	13.9 - 17.1	17.2 - 20.7	20.8 - 24.4	24.5 - 28.5	28.6 - 32.6	32.7 - 36.4	Total	Frec %
Dirección (º)	N	11	7	39	94	78	74	41	9	13	2	0	0	0	368	4,21%
	NE	7	4	32	53	40	23	9	5	1	0	0	0	0	174	1,99%
	E	9	14	50	61	68	45	22	6	2	0	0	0	0	277	3,17%
	SE	7	7	48	47	30	24	15	4	4	0	0	0	0	186	2,13%
	S	5	4	42	71	89	81	23	14	7	2	0	0	0	338	3,87%
	SW	7	11	35	60	75	93	52	9	5	1	0	0	0	348	3,98%
	W	27	21	139	255	336	417	313	168	64	9	3	2	0	1754	20,08%
	NW	35	41	358	833	1207	1249	881	471	196	20	1	0	0	5292	60,57%
	Total	108	109	743	1474	1923	2006	1356	686	292	34	4	2	0	8737	100,00%
	Frec %	1,24%	1,25%	8,50%	16,87%	22,01%	22,96%	15,52%	7,85%	3,34%	0,39%	0,05%	0,02%	0,00%	100,00%	

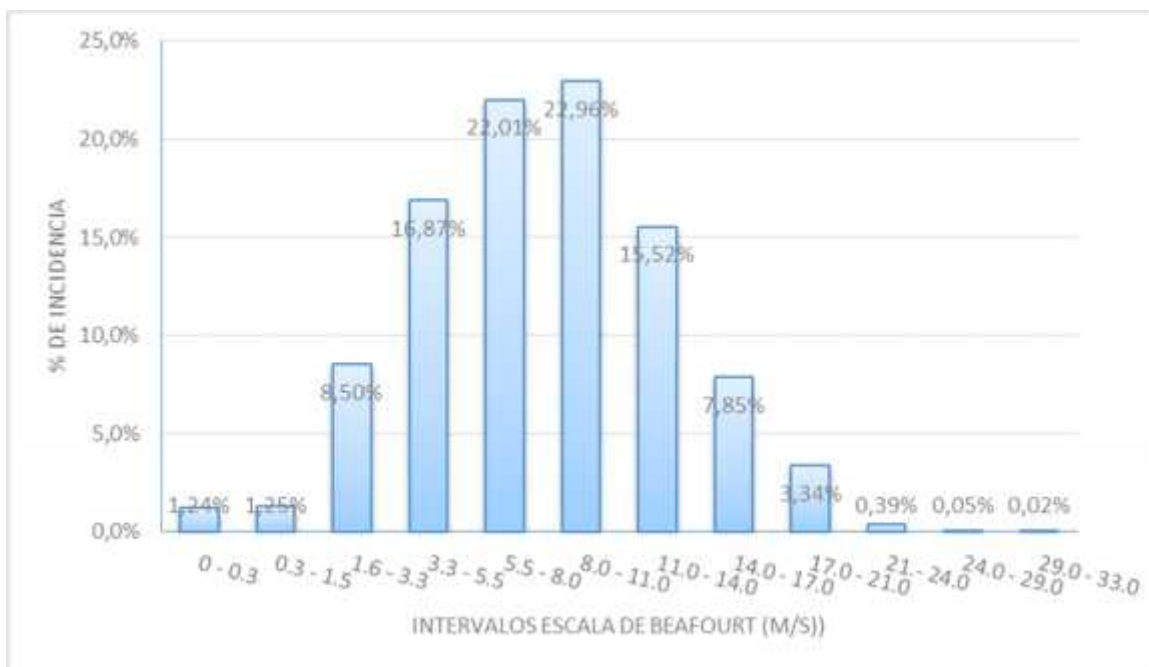
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—5: Estadística direccional, vientos históricos (2010).

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Promedio (m/s)	3,33	1,33	1,83	0,82	0,85	1,82	3,96	5,53
Max (m/s)	13,09	6,04	6,55	3,53	3,78	8,81	14,61	13,85
Min (m/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desv. Est.	2,47	1,44	1,55	0,88	0,79	1,57	2,66	3,02

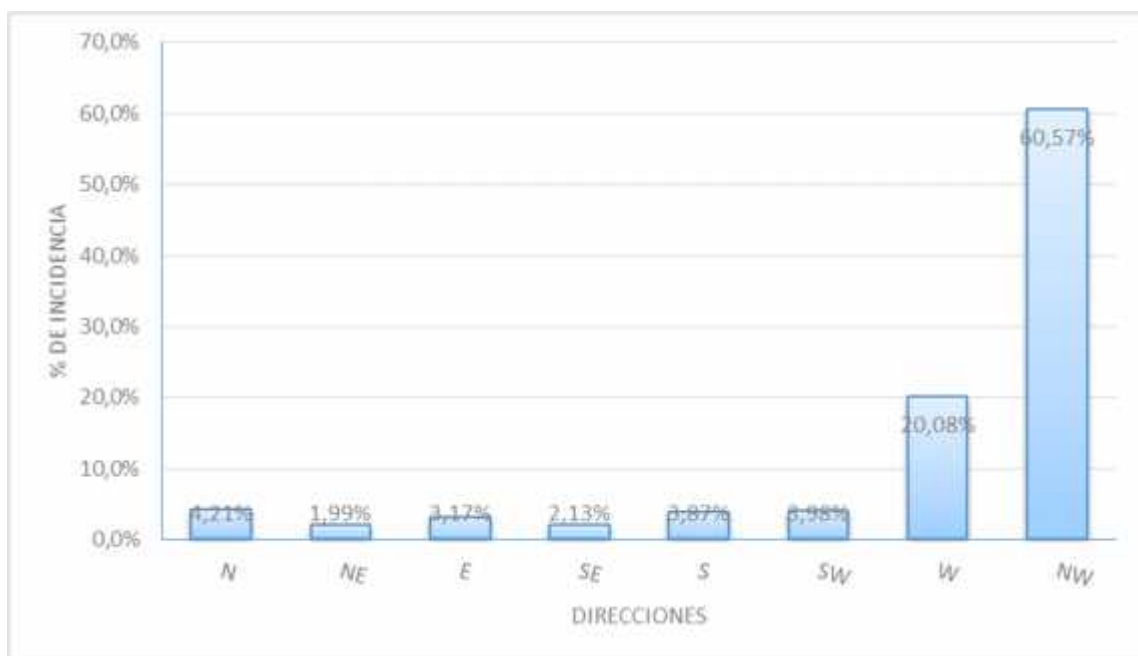
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-12: Histograma de escala de Beaufort (m/s), vientos históricos 2010.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-13: Histograma de direcciones, vientos históricos 2010.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.2 COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN.

5.1.3.2.1 Verano 2014 v/s Verano histórico 2010.

Para la temporada estival, se observan distintos comportamientos en el aspecto direccional, tanto en históricos de 5 (m) y de 15 (m); estas variaciones se deben a la geografía del lugar, lo que influye directamente en la modelación de los vientos.

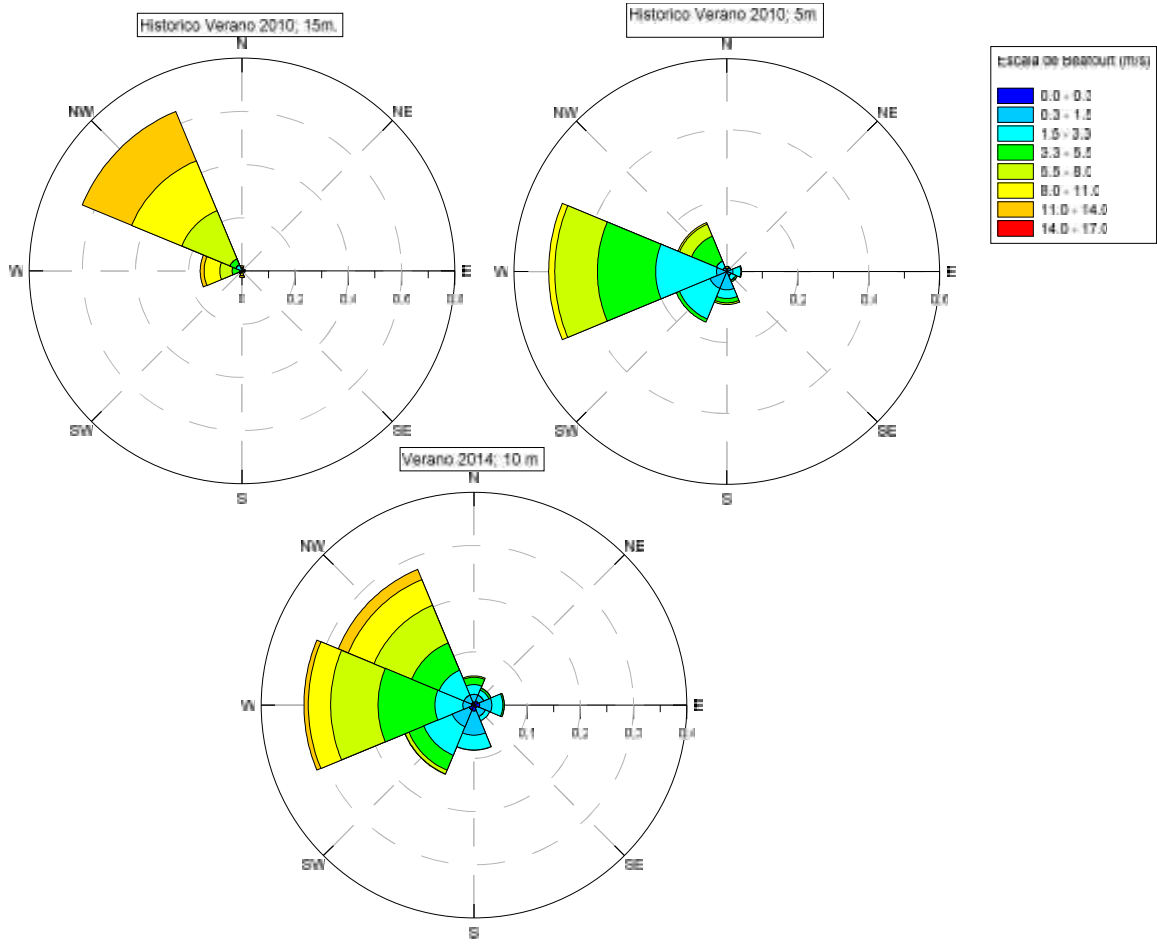
Los resultados de la medición in-situ, a 10m de altura tienen direcciones predominantes NW, W y SW, esto se puede observar en la Figura 5-14.

Las intensidades de los vientos históricos aumentan de acuerdo a la altura de modelación, esto coincide con lo descrito en la ley exponencial de Hellmann, que indica que los vientos varían su intensidad de acuerdo a la altura, además Hellmann indica que existe otro factor que influye en la intensidad, tal como la rugosidad del terreno, ya sea lugares llanos, terrenos poco accidentados, terrenos accidentados.

Las velocidades medidas durante la campaña de verano del año 2014, tienen un comportamiento similar con las intensidades entregadas por el modelo a 5 m, concentrando el porcentaje de incidencia en los primeros cinco intervalos que corresponden a velocidades entre 0.0 (m/s) y 8.0 (m/s). En ambos casos, el 90% de los datos se concentran en estos intervalos, siendo el rango entre 1.6 y 3.3 (m/s) el de mayor incidencia, esto se puede apreciar en la Tabla 5—6.

Al realizar una estimación, correspondiente al promedio de las dos datas históricas del modelo, de 15 y 5 (m) de altura, de la Universidad de Chile, se observa un acercamiento a la curva de incidencia de los datos registrados in-situ a 10 (m) de profundidad (Figura 5-15). La Figura 5-14 muestra que los valores de las intensidades no se alteran en exceso, además las direcciones predominantes siguen siendo las del cuarto cuadrante. por lo anterior que se puede afirmar que los datos modelados por el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, son válidos para Puerto Williams y representativos para el sector específico de estudio.

Figura 5-14: Comparación Rosas de vientos verano.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—6: Comparación, tablas de incidencias, verano.

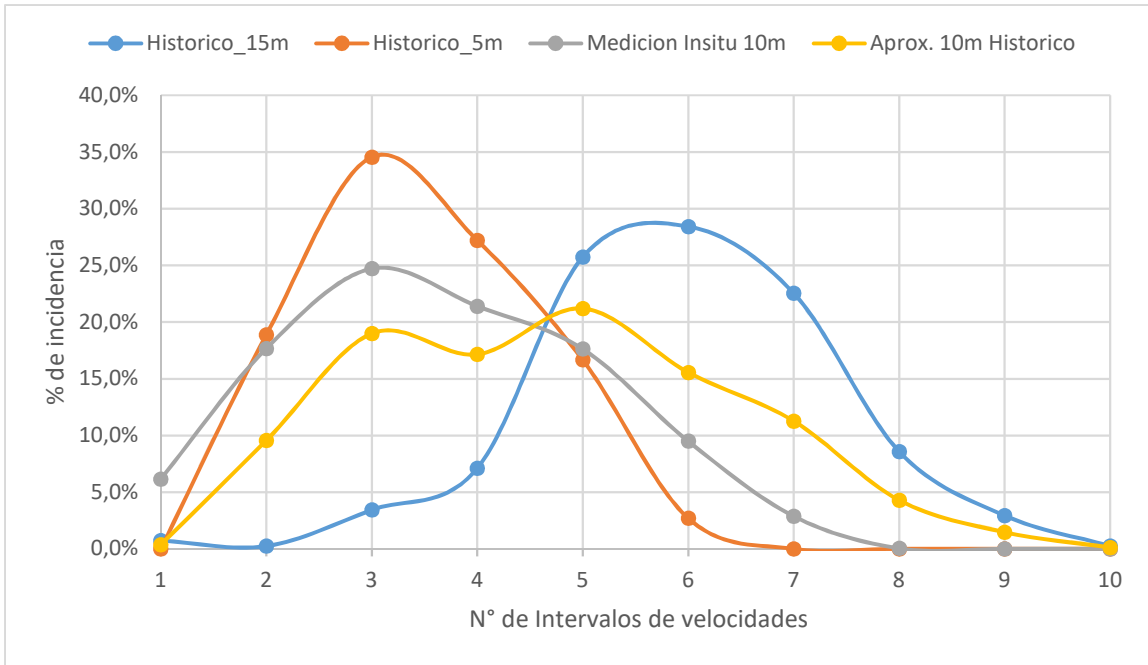
VERANO HISTORICO 15 m													
Intervalos escala de Beaufort (m/s)													
Dirección (º)	Intervalos	0 - 0.3	0.3 - 1.5	1.6 - 3.3	3.3 - 5.5	5.5 - 8.0	8.0 - 11.0	11.0 - 14.0	14.0 - 17.0	17.0 - 21.0	21.- 24.0	Total	Frec %
N		1	0	1	2	2	2	0	0	0	0	8	1,96%
NE		1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0,49%
E		0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	5	1,23%
SE		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,25%
S		0	0	0	0	2	5	3	1	1	1	13	3,19%
SW		0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	6	1,47%
W		0	0	4	11	19	24	6	6	4	0	74	18,14%
NW		1	0	9	10	80	83	82	27	7	0	299	73,28%
Total		3	1	14	29	105	116	92	35	12	1	408	100,00%
Frec %		0,74%	0,25%	3,43%	7,11%	25,74%	28,43%	22,55%	8,58%	2,94%	0,25%	100,00%	

VERANO HISTORICO 5 m													
Intervalos escala de Beaufort (m/s)													
Dirección (º)	Intervalos	0 - 0.3	0.3 - 1.5	1.6 - 3.3	3.3 - 5.5	5.5 - 8.0	8.0 - 11.0	11.0 - 14.0	14.0 - 17.0	17.0 - 21.0	21.- 24.0	Total	Frec %
N		0	1	0	1	2	2	0	0	0	0	6	1,47%
NE		0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1,23%
E		0	7	9	1	0	0	0	0	0	0	17	4,17%
SE		0	5	6	2	0	0	0	0	0	0	13	3,19%
S		0	21	10	5	2	0	0	0	0	0	38	9,31%
SW		0	21	38	4	0	0	0	0	0	0	63	15,44%
W		0	12	70	67	49	7	0	0	0	0	205	50,25%
NW		0	5	8	31	15	2	0	0	0	0	61	14,95%
Total		0	77	141	111	68	11	0	0	0	0	408	100,00%
Frec %		0,00%	18,87%	34,56%	27,21%	16,67%	2,70%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	

VERANO 2014													
Intervalos escala de Beaufort (m/s)													
Dirección (º)	Intervalos	0 - 0.3	0.3 - 1.5	1.6 - 3.3	3.3 - 5.5	5.5 - 8.0	8.0 - 11.0	11.0 - 14.0	14.0 - 17.0	17.0 - 21.0	21.- 24.0	Total	Frec %
N		27	67	86	64	12	0	0	0	0	0	256	5,49%
NE		39	54	49	19	2	0	0	0	0	0	163	3,50%
E		50	107	96	12	1	0	0	0	0	0	266	5,71%
SE		29	79	41	0	0	0	0	0	0	0	149	3,20%
S		52	211	130	2	0	0	0	0	0	0	395	8,47%
SW		45	160	270	142	35	3	0	0	0	0	655	14,05%
W		22	75	244	499	415	196	38	2	0	0	1491	31,98%
NW		23	71	236	260	357	244	96	0	0	0	1287	27,61%
Total		287	824	1152	998	822	443	134	2	0	0	4662	100,00%
Frec %		6,16%	17,67%	24,71%	21,41%	17,63%	9,50%	2,87%	0,04%	0,00%	0,00%	100,00%	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-15: Comparación de % incidencia.



Fuente: Elaboración propia.

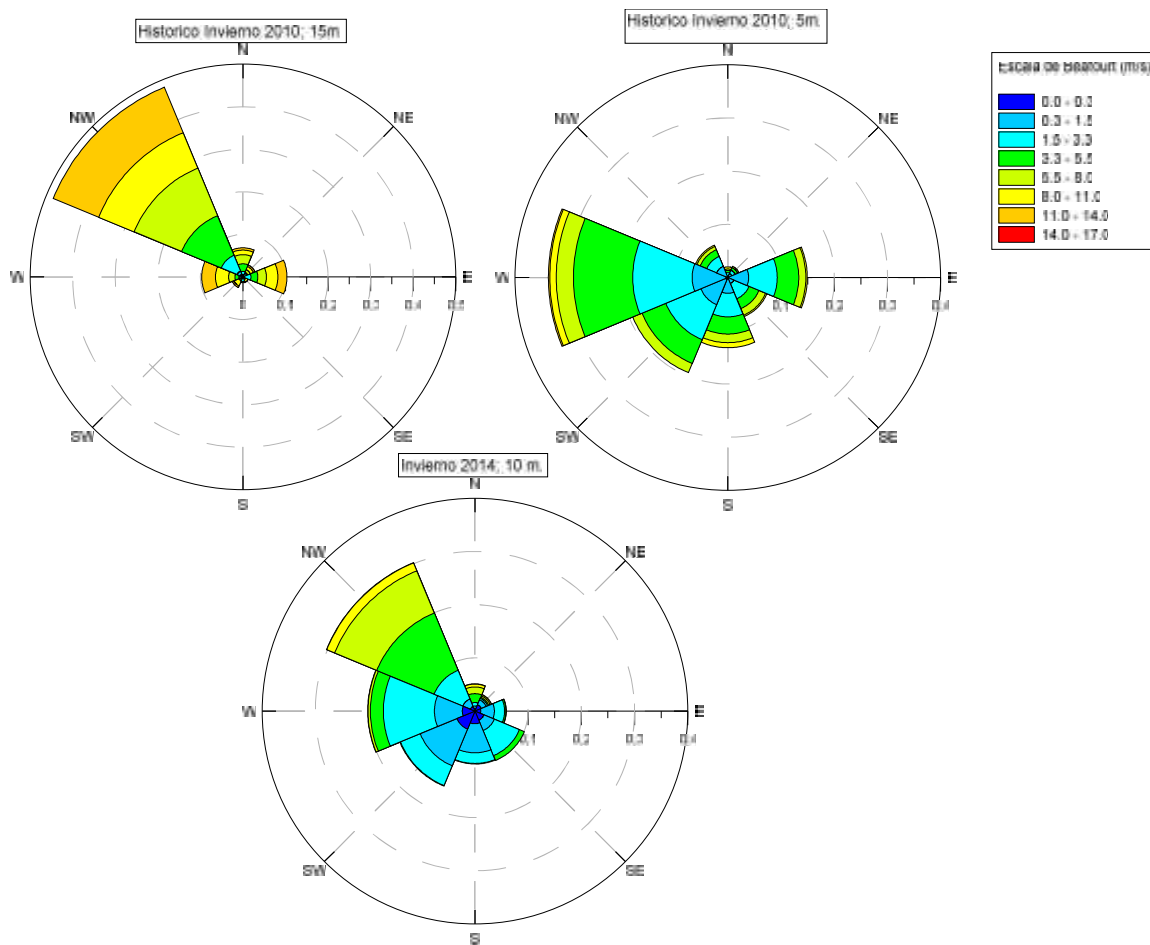
5.1.3.2.2 Invierno 2014 v/s Invierno histórico 2010.

Los datos históricos de invierno, tanto 15 (m) como 5 (m), poseen direcciones de incidencia completamente distintas, dado que en 15 (m) predomina el NW con casi el 60% de los datos, mientras que a 5 (m) de altura, el modelo arrojó direcciones predominantes provenientes del W y SW, las que suman un 54% de los datos. Las muestras in-situ arrojan una variabilidad importante de direcciones, que principalmente es una mezcla de los históricos. Estas variaciones se deben, como ya se nombró en la comparación de verano, a la configuración geográfica del sector.

Respecto a las intensidades, la condición histórica de 5 (m) de altura, coincide en los intervalos 0.3 a 1.5 (m/s), 1.6 a 3.3 (m/s) y 3.3 a 5.5 (m/s).

Los vientos a 15 (m) de altura son de mayor intensidad, siendo el intervalo de mayor ocurrencia el de 5.5 a 8.0 (m/s).

Figura 5-16: Comparación Rosas de vientos, invierno.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—7: Comparación, tablas de incidencias, invierno.

		INVIERNO HISTORICO 15 m											
		Intervalos escala de Beaufort (m/s)											
Dirección (°)	Intervalos	0 - 0.3	0.3 - 1.5	1.6 - 3.3	3.3 - 5.5	5.5 - 8.0	8.0 - 11.0	11.0 - 14.0	14.0 - 17.0	17.0 - 21.0	21.- 24.0	Total	Frec %
	N	0	4	6	13	16	8	4	6	0	0	57	7,66%
	NE	1	0	6	2	5	6	3	0	0	0	23	3,09%
	E	0	2	12	12	15	20	16	7	0	0	84	11,29%
	SE	0	0	2	1	2	5	0	0	0	0	10	1,34%
	S	0	1	7	0	1	1	0	0	0	0	10	1,34%
	SW	1	1	1	1	3	10	3	0	0	0	20	2,69%
	W	0	2	5	7	11	23	24	20	14	0	106	14,25%
	NW	5	6	30	75	90	67	86	49	23	3	434	58,33%
	Total	7	16	69	111	143	140	136	82	37	3	744	100,00%
	Frec %	0,94%	2,15%	9,27%	14,92%	19,22%	18,82%	18,28%	11,02%	4,97%	0,40%	100,00%	

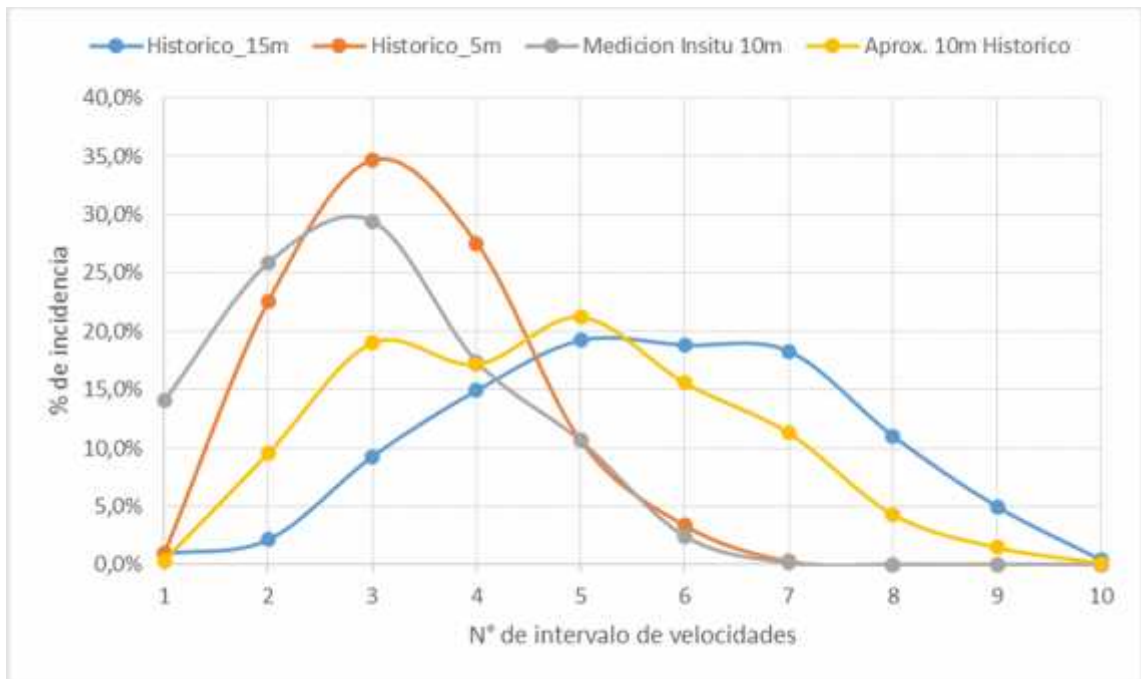
		INVIERNO HISTORICO 5 m											
		Intervalos escala de Beaufort (m/s)											
Dirección (°)	Intervalos	0 - 0.3	0.3 - 1.5	1.6 - 3.3	3.3 - 5.5	5.5 - 8.0	8.0 - 11.0	11.0 - 14.0	14.0 - 17.0	17.0 - 21.0	21.- 24.0	Total	Frec %
	N	0	1	6	3	2	3	0	0	0	0	15	2,02%
	NE	0	6	5	4	2	0	0	0	0	0	17	2,28%
	E	0	29	40	30	10	2	0	0	0	0	111	14,92%
	SE	0	9	23	15	10	2	0	0	0	0	59	7,93%
	S	1	21	33	24	12	7	0	0	0	0	98	13,17%
	SW	3	38	53	36	14	0	0	0	0	0	144	19,35%
	W	3	47	83	83	24	9	2	0	0	0	251	33,74%
	NW	0	17	15	10	5	2	0	0	0	0	49	6,59%
	Total	7	168	258	205	79	25	2	0	0	0	744	100,00%
	Frec %	0,94%	22,58%	34,68%	27,55%	10,62%	3,36%	0,27%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	

		INVIERNO 2014											
		Intervalos escala de Beaufort (m/s)											
Dirección (°)	Intervalos	0 - 0.3	0.3 - 1.5	1.6 - 3.3	3.3 - 5.5	5.5 - 8.0	8.0 - 11.0	11.0 - 14.0	14.0 - 17.0	17.0 - 21.0	21.- 24.0	Total	Frec %
	N	46	39	59	149	112	47	6	0	0	0	458	5,13%
	NE	115	90	27	19	27	20	4	0	0	0	302	3,38%
	E	97	230	170	22	4	3	0	0	0	0	526	5,89%
	SE	164	189	456	89	0	0	0	0	0	0	898	10,06%
	S	212	488	178	9	0	0	0	0	0	0	887	9,94%
	SW	326	668	358	10	0	0	0	0	0	0	1362	15,26%
	W	211	468	857	218	39	5	0	0	0	0	1798	20,14%
	NW	83	137	522	1040	766	144	5	0	0	0	2697	30,21%
	Total	1254	2309	2627	1556	948	219	15	0	0	0	8928	100,00%
	Frec %	14,05%	25,86%	29,42%	17,43%	10,62%	2,45%	0,17%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-17 se observa que los datos históricos de 5 (m) de altura tienen un comportamiento similar con los datos obtenidos in-situ, mientras que los datos a 15 (m) llegan a aumentar la estadística, los que no afecta al estudio, de hecho, ayudan a realizar una estimación más conservadora del sector.

Figura 5-17: Comparación de % incidencia.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.3 VIENTOS EXTREMOS.

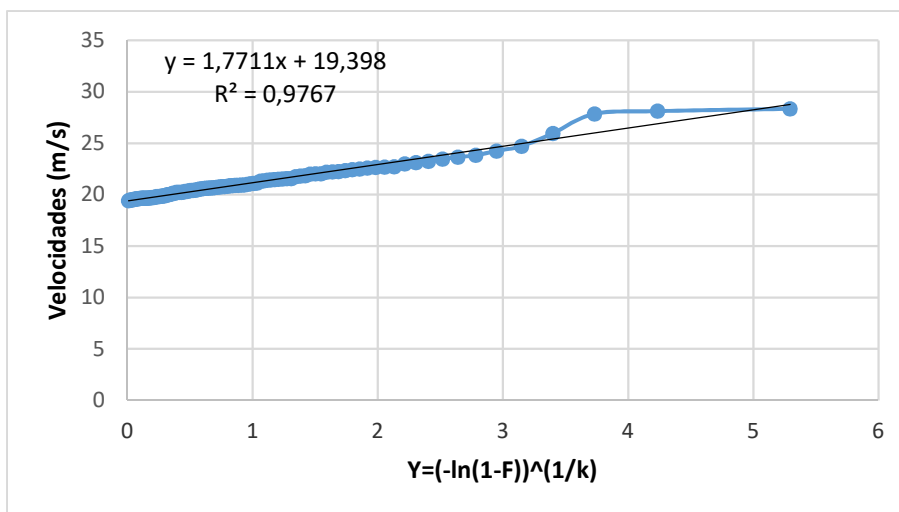
Para la determinación de los valores extremos de vientos se promediaron los datos y se calculó su respectiva desviación estándar. Con estos parámetros estadísticos se calculó el valor $\bar{x} + 4\sigma$ lo que asegura la obtención de los valores extremos, ya estos valores que superan el valor calculado se encuentran en la cola de la curva o campana de Gauss y que corresponden al 5% de la estadística. Los valores extremos se presentan en la siguiente Tabla 5—8.

Tabla 5—8: Valores extremos, Vientos Históricos 2010.

N°	Valores Extremos (m/s)	N°	Valores Extremos (m/s)	N°	Valores Extremos (m/s)	N°	Valores Extremos (m/s)	N°	Valores Extremos (m/s)
1	28,34	22	22,19	43	20,94	64	20,40	85	19,75
2	28,12	23	22,04	44	20,92	65	20,37	86	19,74
3	27,85	24	22,03	45	20,91	66	20,32	87	19,73
4	25,96	25	22,00	46	20,88	67	20,31	88	19,71
5	24,71	26	21,86	47	20,87	68	20,25	89	19,69
6	24,25	27	21,83	48	20,82	69	20,24	90	19,68
7	23,82	28	21,76	49	20,80	70	20,24	91	19,68
8	23,66	29	21,57	50	20,77	71	20,22	92	19,66
9	23,45	30	21,56	51	20,75	72	20,21	93	19,66
10	23,24	31	21,53	52	20,73	73	20,13	94	19,65
11	23,11	32	21,52	53	20,70	74	20,12	95	19,65
12	23,00	33	21,46	54	20,66	75	20,07	96	19,64
13	22,70	34	21,45	55	20,66	76	20,02	97	19,61
14	22,69	35	21,39	56	20,64	77	20,02	98	19,60
15	22,65	36	21,35	57	20,62	78	19,94	99	19,59
16	22,60	37	21,30	58	20,61	79	19,88	100	19,53
17	22,48	38	21,13	59	20,57	80	19,88	101	19,53
18	22,45	39	21,11	60	20,54	81	19,86	102	19,51
19	22,33	40	21,05	61	20,46	82	19,83	103	19,48
20	22,23	41	20,99	62	20,43	83	19,83	104	19,47
21	22,22	42	20,95	63	20,41	84	19,82	105	19,42

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-18: Linealización Weibull para vientos extremos.



Fuente: Elaboración propia

Se realizaron pruebas de ajuste con distintas distribuciones de las cuales, la que obtuvo mayor ajuste fue la distribución Weibull con un 97.67 % de correlación. Luego se realizó el cálculo de los períodos de retorno (T_r), obteniéndose que para 3 años se estiman velocidades máximas de 29.59 (m/s), mientras que, en 6 años, alcanzarían los 30.81 (m/s) (Tabla 5—9).

Tabla 5—9: Periodo de retorno, Vientos.

Periodo de Retorno	
Tr (años)	Intensidad (m/s)
2	28,87
3	29,59
4	30,10
5	30,49
6	30,81

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 MAREA

5.1.4.1 ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA MAREA.

Los resultados del análisis armónico se muestran en la Tabla 5—10, donde las componentes más importantes fueron M2, K1, K2, O1, S1, N2, con los cuales se realizó el cálculo del coeficiente determinante del régimen de marea, cuyo valor corresponde a 0.49. Este valor identifica a la marea de Puerto Williams con un régimen mixto semidiurno, esto quiere decir que existen dos pleamares y dos bajamares cada día, como también una pleamar o una bajamar.

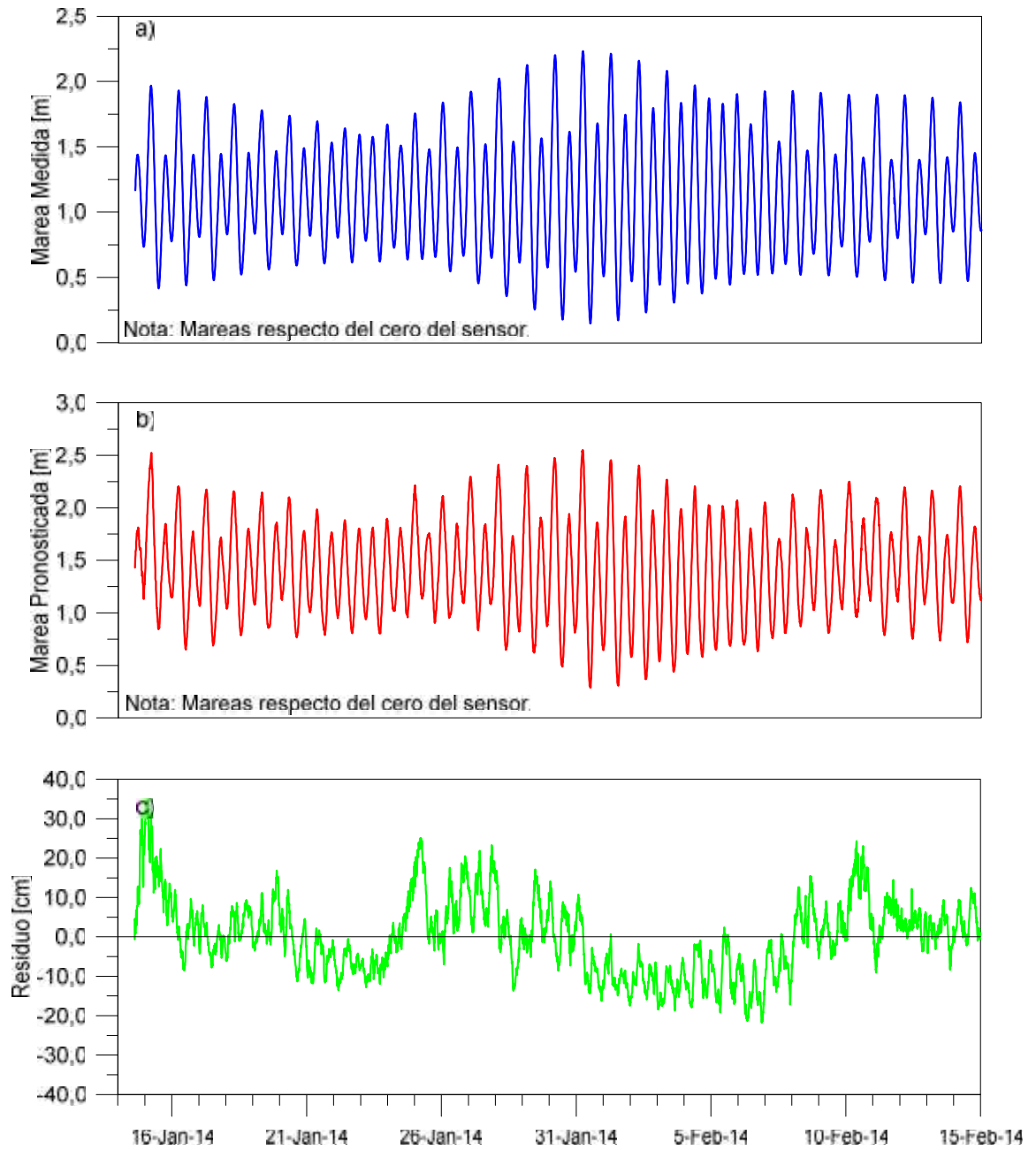
También se calculó el Nivel de Reducción de Sondas (NRS) obteniéndose un valor de 0.323 (m) respecto del cero instrumental.

Tabla 5—10: Constituyentes armónicos de la marea.

Constituyente	Frecuencia (cph)	Amplitud (cm)	Fase (°)
MSF	0,002822	0,0782	290,65
2Q1	0,035706	0,0107	300,6
*Q1	0,037219	0,0381	342,88
*O1	0,038731	0,15	13,79
NO1	0,040269	0,0135	171,53
*K1	0,041781	0,2115	79,09
J1	0,043293	0,0035	49,39
OO1	0,044831	0,0139	278,78
UPS1	0,046343	0,0036	135,68
*N2	0,078999	0,1652	112,1
*M2	0,080511	0,546	155,57
*S2	0,083333	0,0683	188,81
ETA2	0,085074	0,0001	34,21
MO3	0,119242	0,0023	216,35
*M3	0,120767	0,0041	187,78
*MK3	0,122292	0,0053	230,23
*SK3	0,125114	0,0104	340,64
MN4	0,159511	0,0026	352,91
*M4	0,161023	0,0092	342,13
*MS4	0,163845	0,0046	77,75
*S4	0,166667	0,0056	174,85
2MK5	0,202804	0,0043	148,85
*2SK5	0,208447	0,0142	22,08
*2MN6	0,240022	0,0054	75,58
*M6	0,241534	0,0087	118,23
*2MS6	0,244356	0,0065	208,84
2SM6	0,247178	0,0035	178,63
3MK7	0,283315	0,0011	244,29
*M8	0,322046	0,0039	282,28

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-19: Marea registrada (roja), Marea pronosticada (azul), residuo (negro).



Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2 ANÁLISIS NO ARMÓNICO DE LA MAREA.

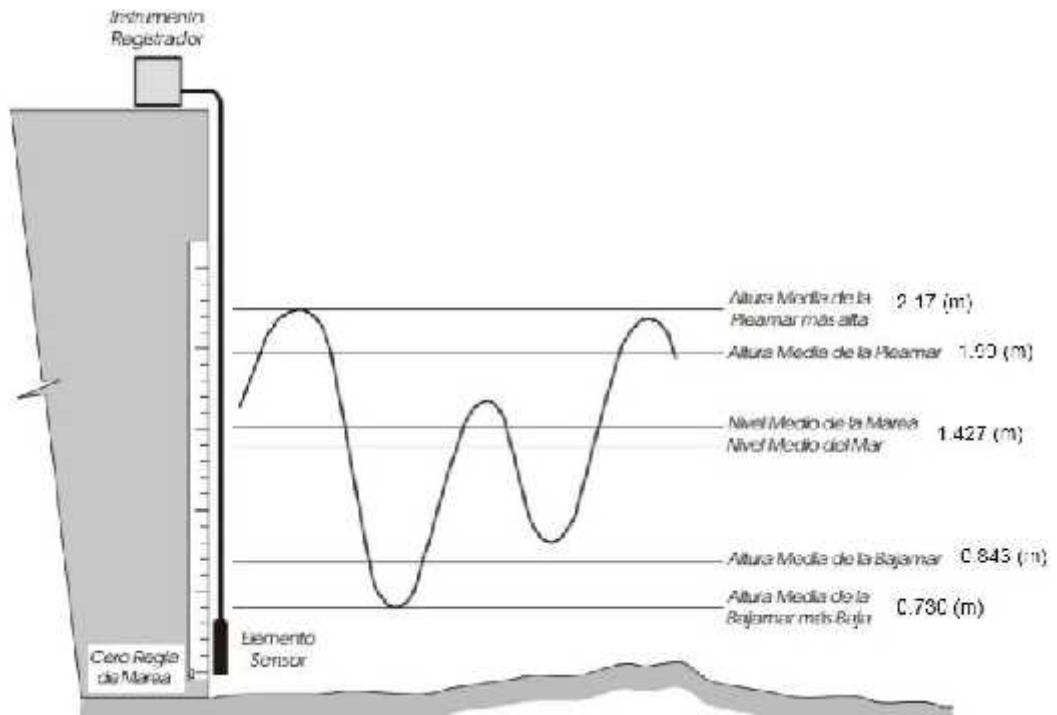
Este análisis entrega como resultado los planos mareales que principalmente indican los valores de referencia del nivel del mar en condición estática, tales como lo es el nivel medio del mar, altura media de pleamar, como bajamar.

Tabla 5—11: Planos Mareales.

Componentes no armónicos de la marea	[m]
Nivel medio de la Marea	1,427
Altura media de la pleamar	1,992
Altura media de la pleamar más alta	2,178
Altura de la pleamar máxima	2,511
Altura media de la bajamar	0,843
Altura media de la bajamar más baja	0,730
Altura de la bajamar mínima	0,414
Nivel de reducción de sondas	0,323

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-20: Principales planos mareales.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 OLAJE

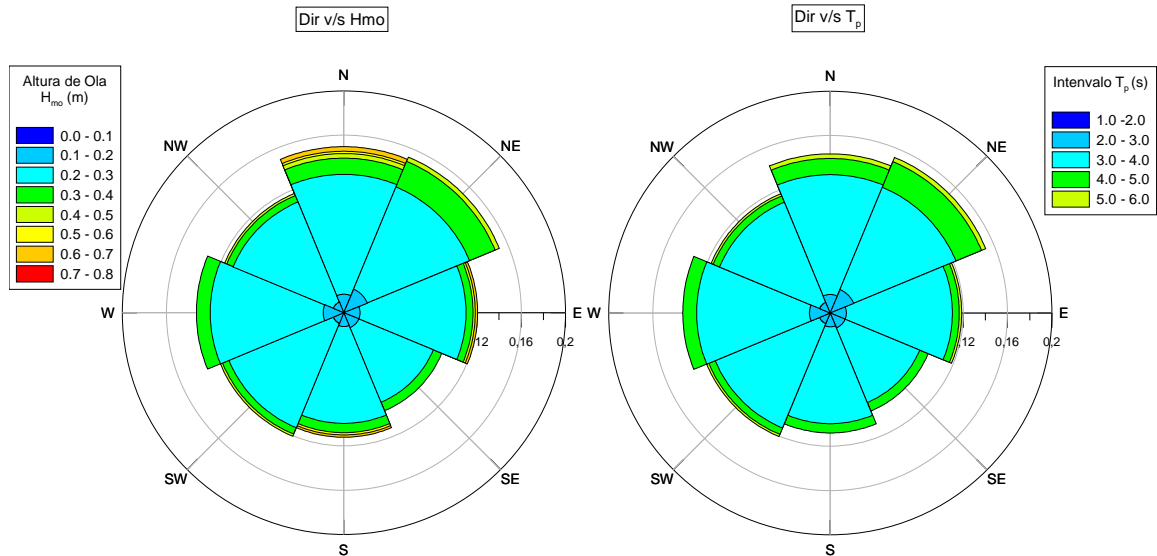
5.1.5.1 VERANO 2014.

El oleaje predominante del sector proveniente del N y NW, que son las direcciones que tuvieron mayor porcentaje de ocurrencia con un 15.18% y 14.97%, respectivamente, esto pese a la gran variabilidad direccional de los datos obtenidos de la medición con ADCP.

Las alturas de ola, se concentraron entre 0.2 y 0.3 (m) con un 76.51% seguidas por las olas entre 0.1 y 0.2 (m), con un 12.06% (ver Tabla 5—12). Estos intervalos de alturas hacen clasificar el oleaje como mar rizado y con marejadilla.

Los períodos se mantuvieron constantes en el intervalo de 3.0 a 4.0 (s), 99.58% de las olas tienen como característica este periodo (ver Tabla 5—13).

Figura 5-21: Rosa de direcciones v/s H_{mo}, y v/s T_p. Oleaje Verano 2014.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—12: Tabla de incidencia Hmo v/s Dir, Oleaje ADCP Verano.

		Hmo (m)										
Dirección (º)		Intervalos	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	0.5 - 0.6	0.6 - 0.7	0.7 - 0.8	Total	Frec %
Dirección (º)	N	0	8	52	7	2	1	2	0	0	72	14,97%
	NE	0	11	48	12	2	0	0	0	0	73	15,18%
	E	0	7	46	3	1	0	1	0	0	58	12,06%
	SE	0	7	35	4	0	0	0	0	0	46	9,56%
	S	0	6	42	4	0	1	1	0	0	54	11,23%
	SW	0	5	49	3	1	0	0	0	0	58	12,06%
	W	0	9	49	6	0	0	0	0	0	64	13,31%
	NW	0	5	47	3	1	0	0	0	0	56	11,64%
Total		0	58	368	42	7	2	4	0	0	481	100,00%
Frec %		0,00%	12,06%	76,51%	8,73%	1,46%	0,42%	0,83%	0,00%	100,00%		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—13: Tabla de incidencia Tp v/s Dir, Oleaje ADCP Verano

		Tpeak (s)							
Dirección (º)		Intervalos	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	Total	Frec %
Dirección (º)	N	0	0	71	1	0	0	72	14,97%
	NE	0	0	73	0	0	0	73	15,18%
	E	0	0	57	1	0	0	58	12,06%
	SE	0	0	46	0	0	0	46	9,56%
	S	0	0	54	0	0	0	54	11,23%
	SW	0	0	58	0	0	0	58	12,06%
	W	0	0	64	0	0	0	64	13,31%
	NW	0	0	56	0	0	0	56	11,64%
Total		0	0	479	2	0	0	481	100,00%
Frec %		0,00%	0,00%	99,58%	0,42%	0,00%	100,00%		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—14: Tabla de incidencia Hmo v/s Tp, Oleaje ADCP Verano

	Intervalos	Tpeak (s)					Total	Frec %
		1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0		
Hmo (m)	0.0 - 0.1	0	0	0	0	0	0	0,00%
	0.1 - 0.2	0	0	58	0	0	58	12,06%
	0.2 - 0.3	0	0	368	0	0	368	76,51%
	0.3 - 0.4	0	0	41	1	0	42	8,73%
	0.4 - 0.5	0	0	6	1	0	7	1,46%
	0.5 - 0.6	0	0	2	0	0	2	0,42%
	0.6 - 0.7	0	0	4	0	0	4	0,83%
	0.7 - 0.8	0	0	0	0	0	0	0,00%
	>0.8	0	0	0	0	0	0	0,00%
	Total	0	0	479	2	0	481	100,00%
Frec %	0,00%	0,00%	99,58%	0,42%	0,00%	100,00%		

Fuente: Elaboración propia.

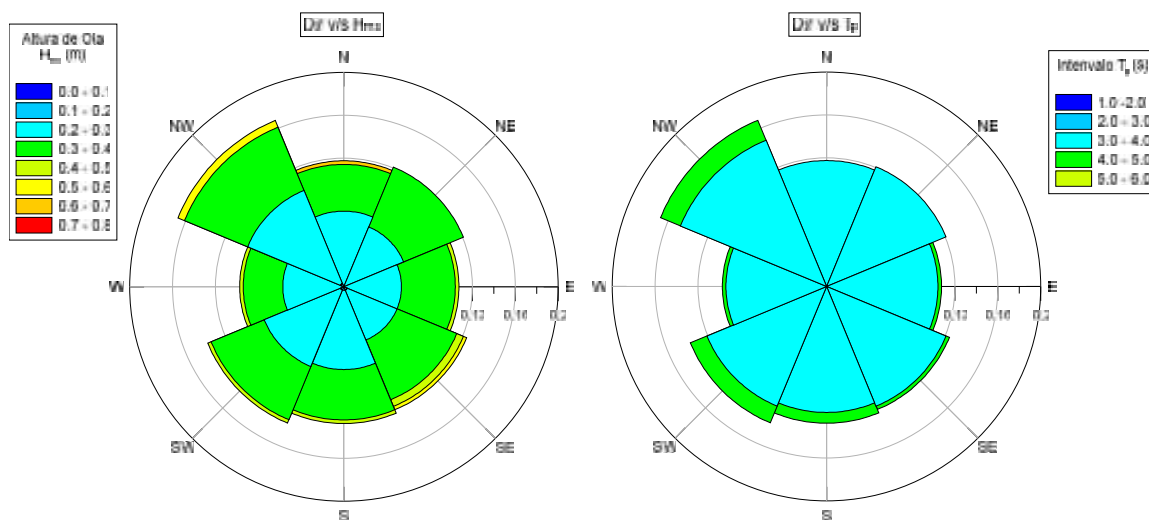
5.1.5.2 INVIERNO 2014

Durante la temporada de invierno el oleaje sufre modificaciones respecto a la temporada estival, siendo predominante el correspondiente al NW con un 16.78% de los casos (Tabla 5—15 y Tabla 5—16).

Las alturas de ola también ampliaron el rango de alturas ya que para este periodo se distribuye más equitativamente entre dos intervalos entre 0.1 a 0.2 (m) y 0.2 a 0.3 (m). Durante la temporada de invierno el primer intervalo es el predominante con un 53.69%, seguido con un 41.61% correspondiente a las olas entre 0.2 y 0.3 (m) (Tabla 5—15).

Los períodos de ola se mantuvieron entre 3.0 y 4.0 (s) (Tabla 5—16), de igual manera a lo previamente reportado para el verano.

Figura 5-22: Rosa de direcciones v/s H_m y, v/s T_p. Oleaje Invierno 2014.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—15: Tabla de incidencia Hmo v/s Dir, Oleaje ADCP Invierno.

		Hmo (m)							Total	Frec %	
Intervalos	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	0.5 - 0.6	0.6 - 0.7	0.7 - 0.8			
Dirección (°)	N	0	21	13	0	0	1	0	0	35	11,74%
	NE	0	18	18	0	0	0	0	0	36	12,08%
	E	0	16	15	1	0	0	0	0	32	10,74%
	SE	1	15	18	2	1	0	0	0	37	12,42%
	S	1	22	14	1	0	0	0	0	38	12,75%
	SW	1	23	16	1	0	0	0	0	41	13,76%
	W	0	17	11	1	0	0	0	0	29	9,73%
	NW	1	28	19	0	2	0	0	0	50	16,78%
	Total	4	160	124	6	3	1	0	0	298	100,00%
Frec %	1,34%	53,69%	41,61%	2,01%	1,01%	0,34%	0,00%	0,00%	100,00%		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—16: Tabla de incidencia Tp v/s Dir, Oleaje ADCP Invierno.

		Tpeak (s)					Total	Frec %
Intervalos	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0			
Dirección (°)	N	0	0	35	0	0	35	11,74%
	NE	0	0	36	0	0	36	12,08%
	E	0	0	31	1	0	32	10,74%
	SE	0	0	36	1	0	37	12,42%
	S	0	0	35	3	0	38	12,75%
	SW	0	0	36	5	0	41	13,76%
	W	0	0	28	1	0	29	9,73%
	NW	0	0	44	6	0	50	16,78%
	Total	0	0	281	17	0	298	100,00%
Frec %	0,00%	0,00%	94,30%	5,70%	0,00%	100,00%		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—17: Tabla de incidencia Hmo v/s Tp, Oleaje ADCP Invierno.

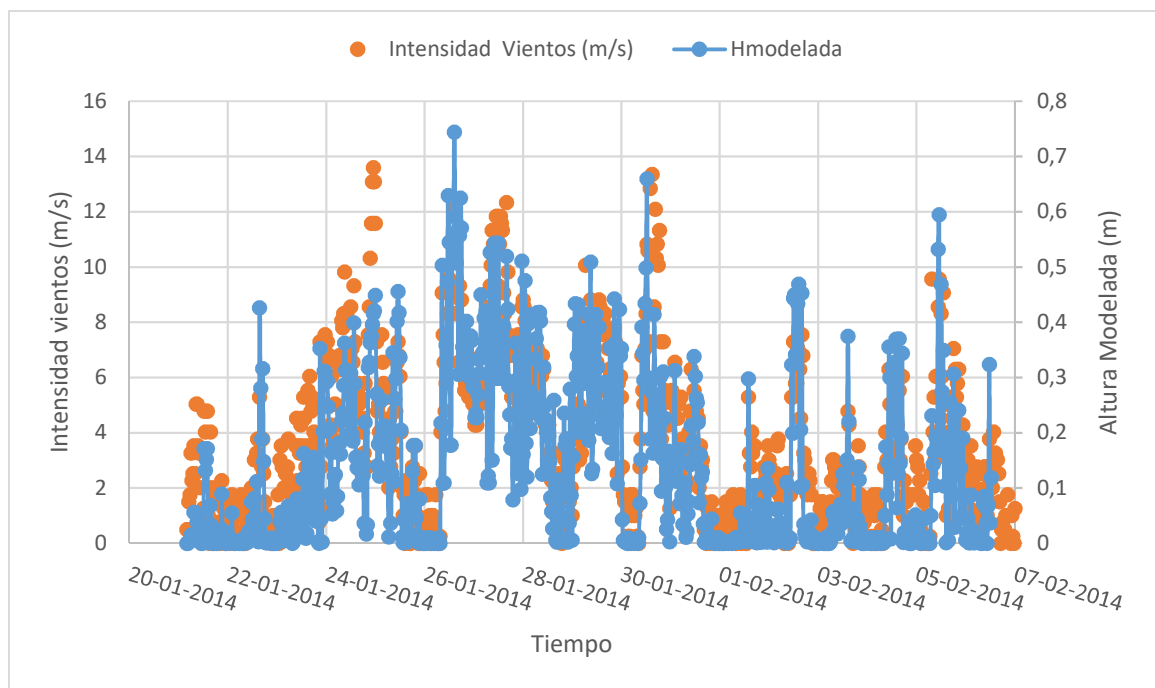
	Intervalos	Tpeak (s)					Total	Frec %
		1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0		
Hmo (m)	0.0 - 0.1	0	0	0	4	0	4	1,34%
	0.1 - 0.2	0	0	149	11	0	160	53,69%
	0.2 - 0.3	0	0	123	1	0	124	41,61%
	0.3 - 0.4	0	0	6	0	0	6	2,01%
	0.4 - 0.5	0	0	2	1	0	3	1,01%
	0.5 - 0.6	0	0	1	0	0	1	0,34%
	0.6 - 0.7	0	0	0	0	0	0	0,00%
	0.7 - 0.8	0	0	0	0	0	0	0,00%
	> 0.8	0	0	0	0	0	0	0,00%
	Total	0	0	281	17	0	298	100,00%
Frec %	0,00%	0,00%	94,30%	5,70%	0,00%	100,00%		

Fuente: Elaboración propia.

5.2 GENERACION DE OLAJE POR VIENTO.

Se realizó la generación de oleaje, en primera instancia, con un periodo de tiempo determinado de 10 días, con el objetivo de conocer el comportamiento del modelo, respecto a las alturas de olas generadas. Lo anterior fue decidido luego de realizar corridas con todas las direcciones e intensidades de la campaña de verano, lo que requería una gran capacidad computacional.

Figura 5-23: Comparación H_{modelo} v/s Intensidad Vientos.

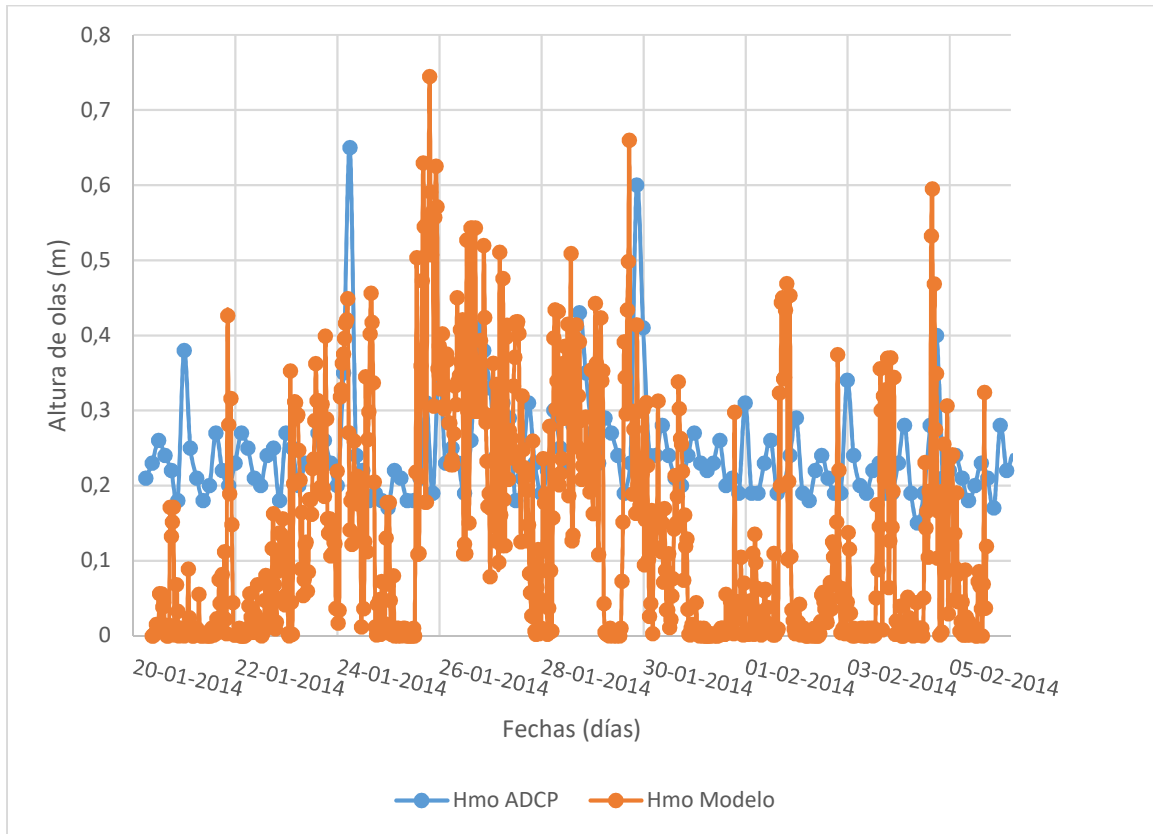


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-23, muestra las intensidades de los vientos generadores de oleaje, junto con las alturas de ola generadas por éstos. Se destaca un comportamiento similar con los aumentos y disminuciones de ambas variables, lo que demuestra que el modelo utilizado representa de gran forma las variaciones de intensidades. Esto se refleja gráficamente entre el 24 y el 26 de enero y luego del 26 de enero al 01 de febrero.

Posteriormente se realizó una primera comparación de las alturas generadas por el modelo y las obtenidas mediante la medición del ADCP, obteniendo los siguientes resultados Figura 5-24.

Figura 5-24: Comparación de alturas de olas, medida v/s generada



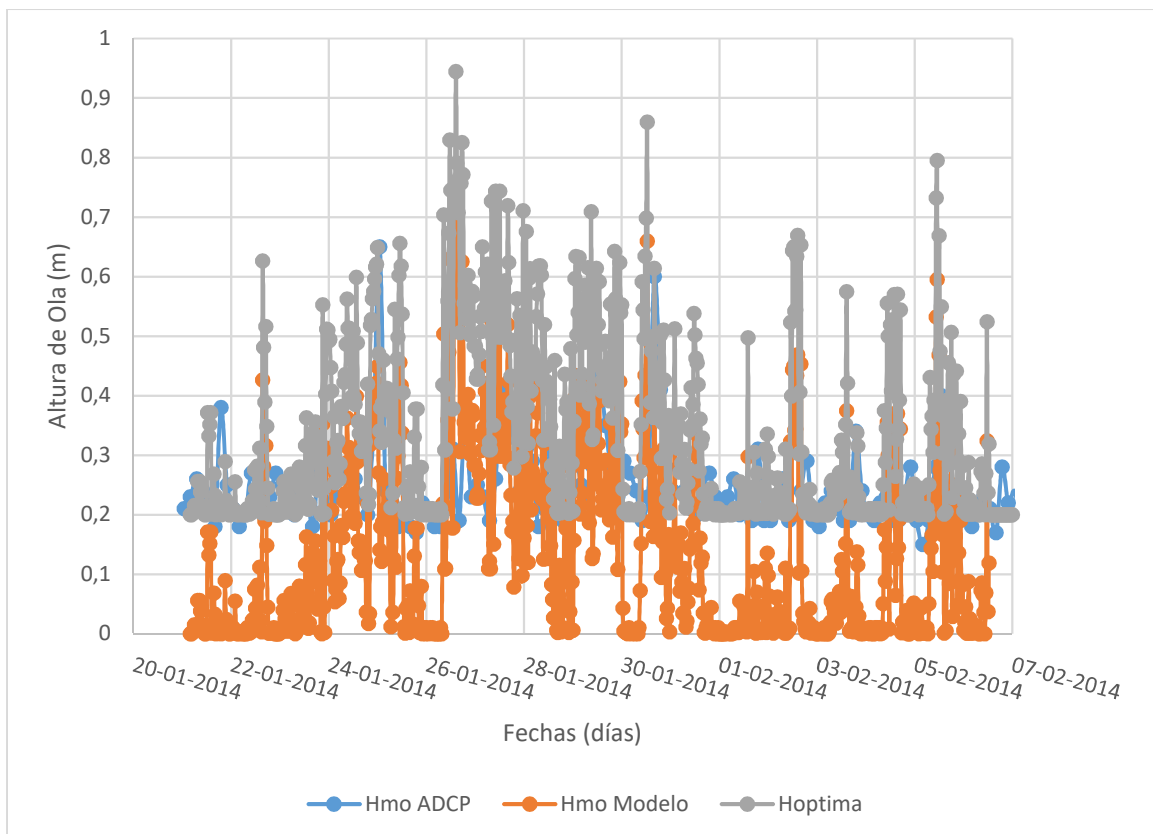
Fuente: Elaboración propia.

Se observa una diferencia constante de las alturas generadas, respecto a las entregadas por la ADCP. Principalmente hay un desfase de 0.2 (m), cabe destacar que hay sectores de la muestra que coinciden en forma. Es importante considerar que la ADCP mide oleaje cada 3 horas por 30 minutos, lo que corresponde a un dato de H, T y Dir. En cambio, el oleaje generado es producto de los vientos medidos in-situ cada 5 minutos, y filtrados cada media hora, es por ello la gran cantidad de alturas de olas y de variaciones, respecto a los medidos por la ADCP.

Debido a este desfase de alturas de olas entre las dos mediciones, se realizó una modificación a las intensidades de los vientos para cada una de las direcciones de incidencia generadoras de oleaje, para así llegar a una mejor correlación entre las dos muestras. La única variable en la generación de oleaje, que puede ser modificada es la intensidad del viento, por lo que se realizaron modelaciones para las distintas direcciones con el propósito de llevar las olas generadas, al mismo mínimo de alturas de oleaje (ADCP).

Luego de las modelaciones individuales se determinó un delta de velocidades, con el cual se asegura una altura mínima de ola obtenida de las mediciones in-situ.

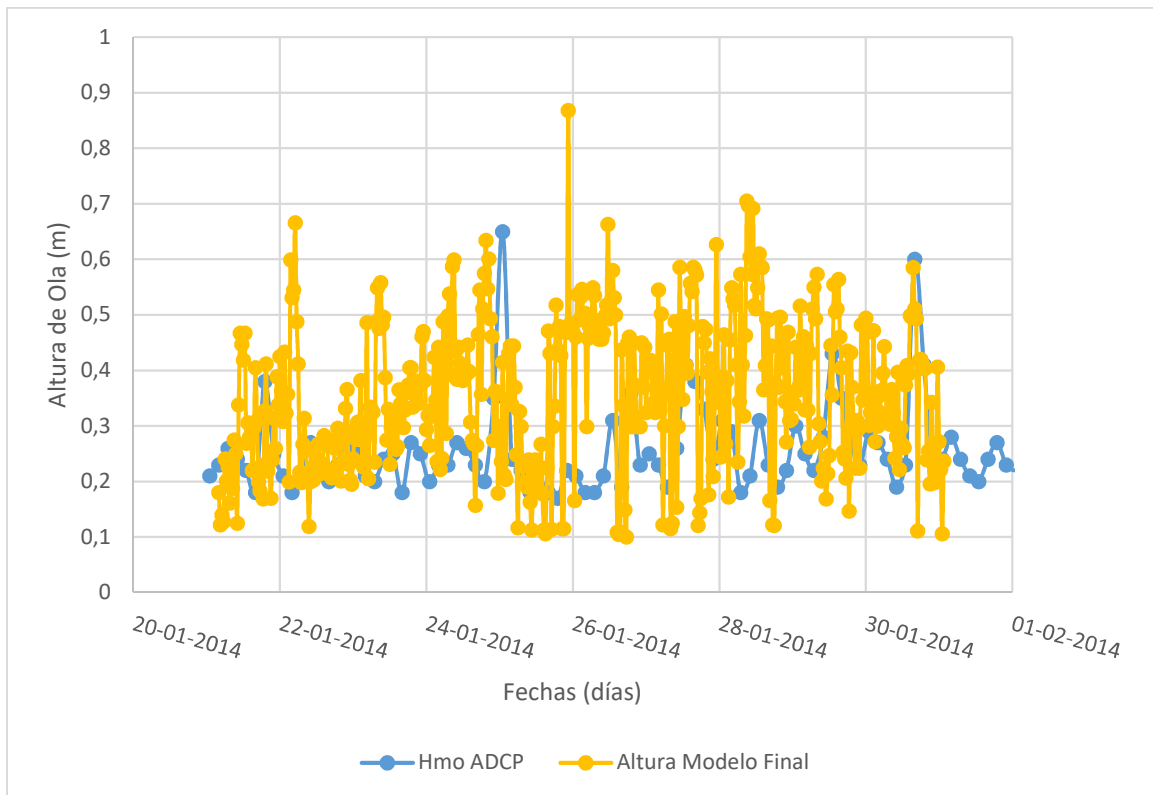
Figura 5-25: Comparación de Hmo asimilado.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-25 , se observa en línea color plomo, una estimación de las alturas de olas deseadas, como resultado de la modelación de oleaje por viento, una vez ya modificada la intensidad de acuerdo a la dirección de incidencia.

Figura 5-26: Comparación de H_{modelo} v/s $H_{\text{modelo final}}$.

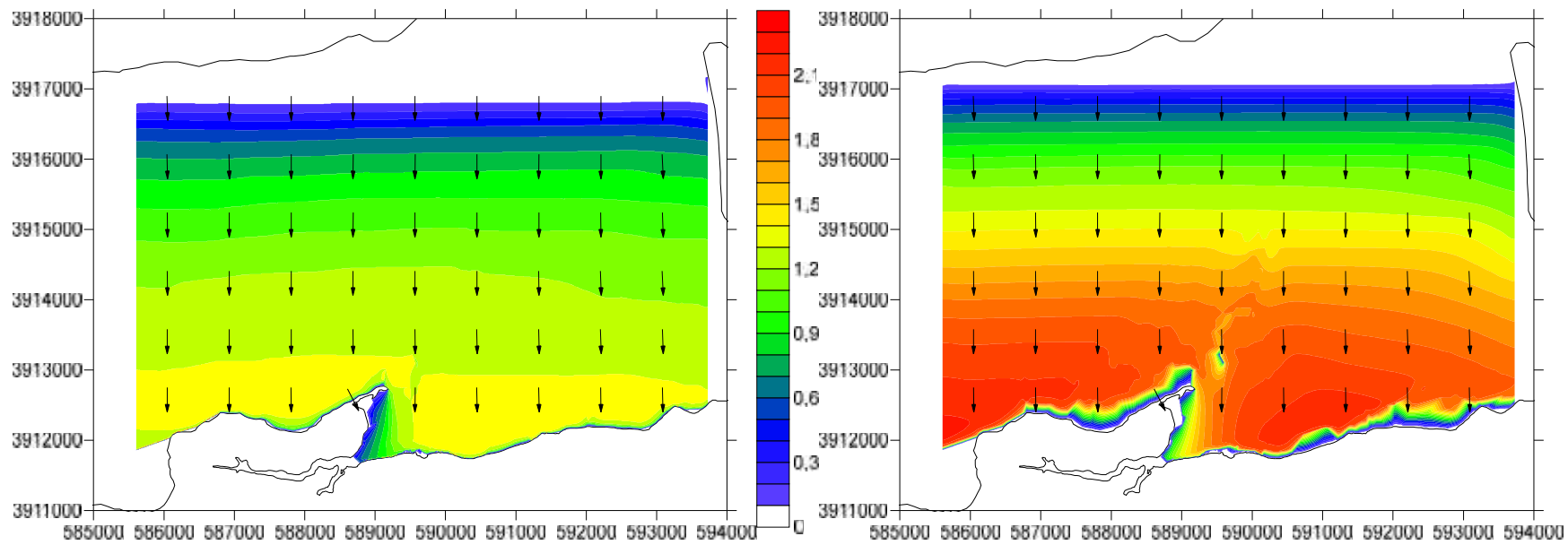


Fuente: Elaboración propia.

En amarillo el resultado de la modelación con los vientos modificados ($H_{\text{modelo_final}}$), en estos se aprecian mayores variaciones que en las alturas de ADCP graficadas en azul, esto se debe a la cantidad de datos generadores de oleaje. Lo anterior lleva a representar de mejor forma los decaimientos y crecimientos de los vientos y por ende de las alturas de ola.

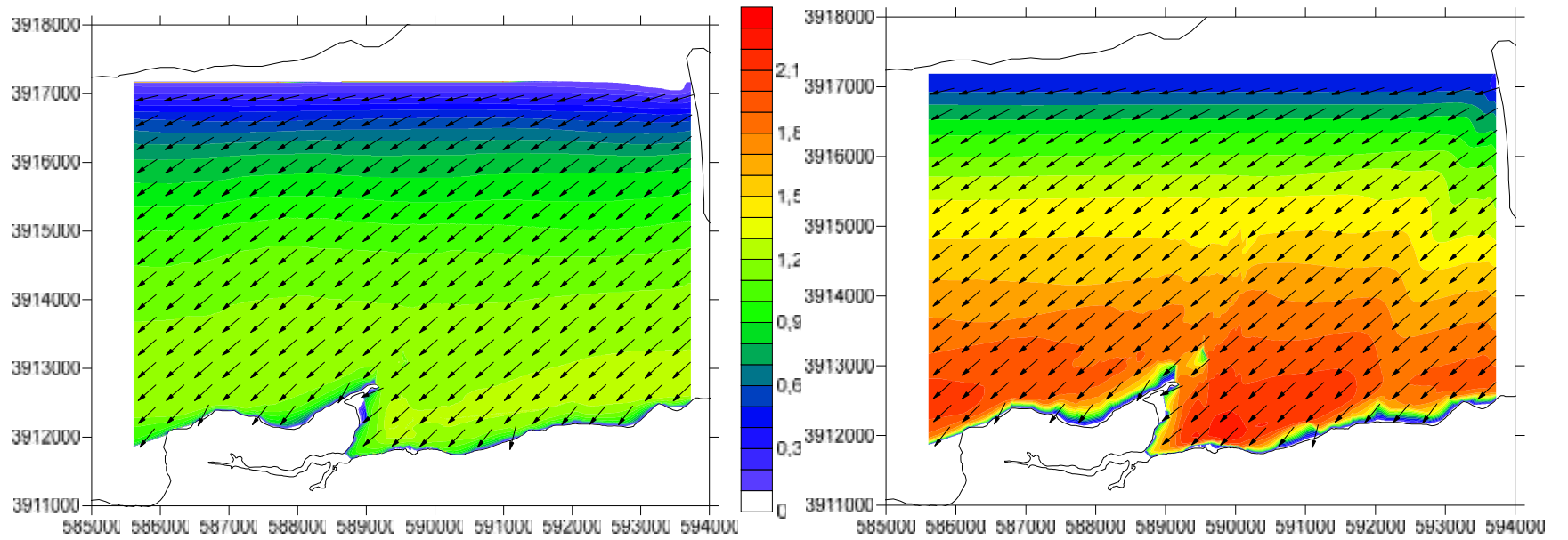
A continuación, se presentan salidas de modelación de generación de oleaje para cada una de las direcciones, a dos intensidades, así reflejar el comportamiento y modificación del oleaje.

Figura 5-27: Salida modelo de generación por viento para dirección N, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).



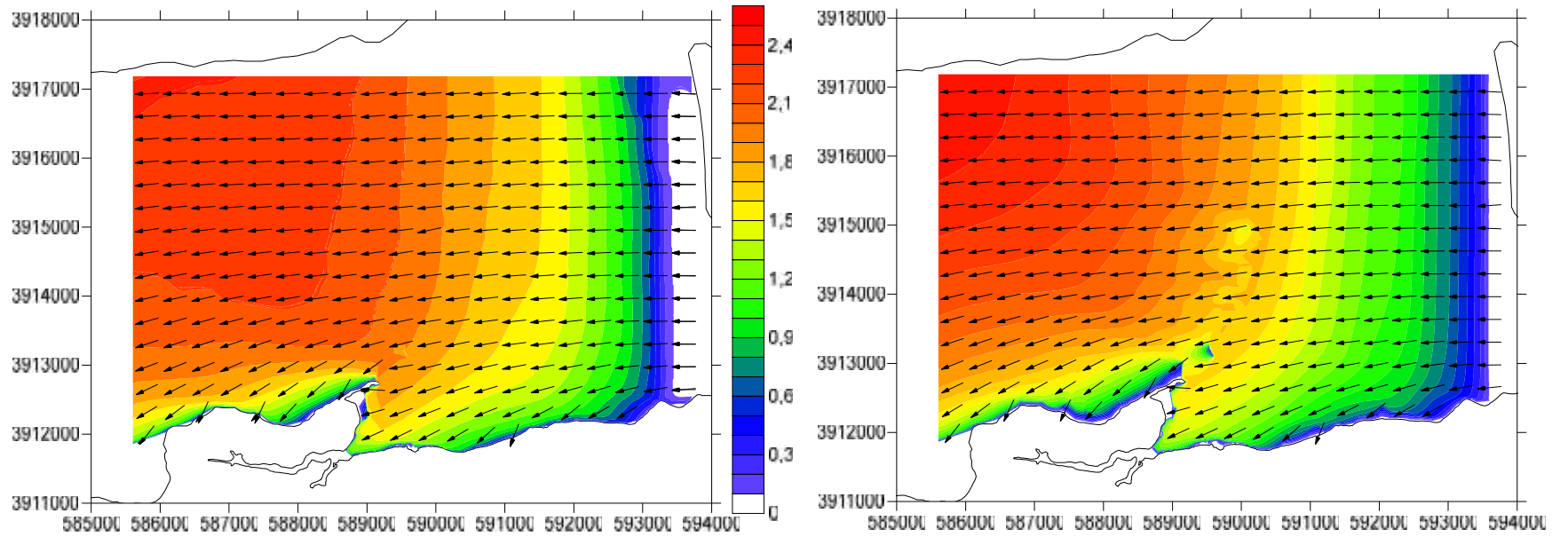
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-28: Salida modelo de generación por viento para dirección NE, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-29: Salida modelo de generación por viento para dirección E, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-30: Salida modelo de generación por viento para dirección W, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).

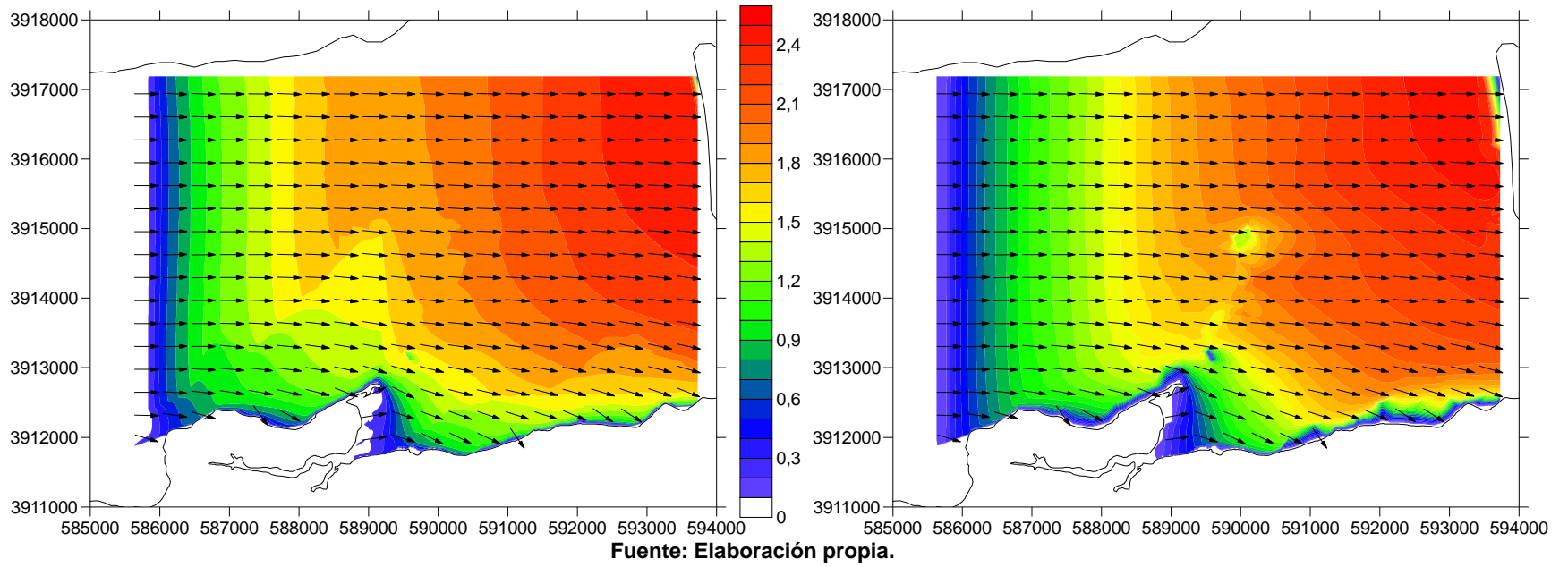
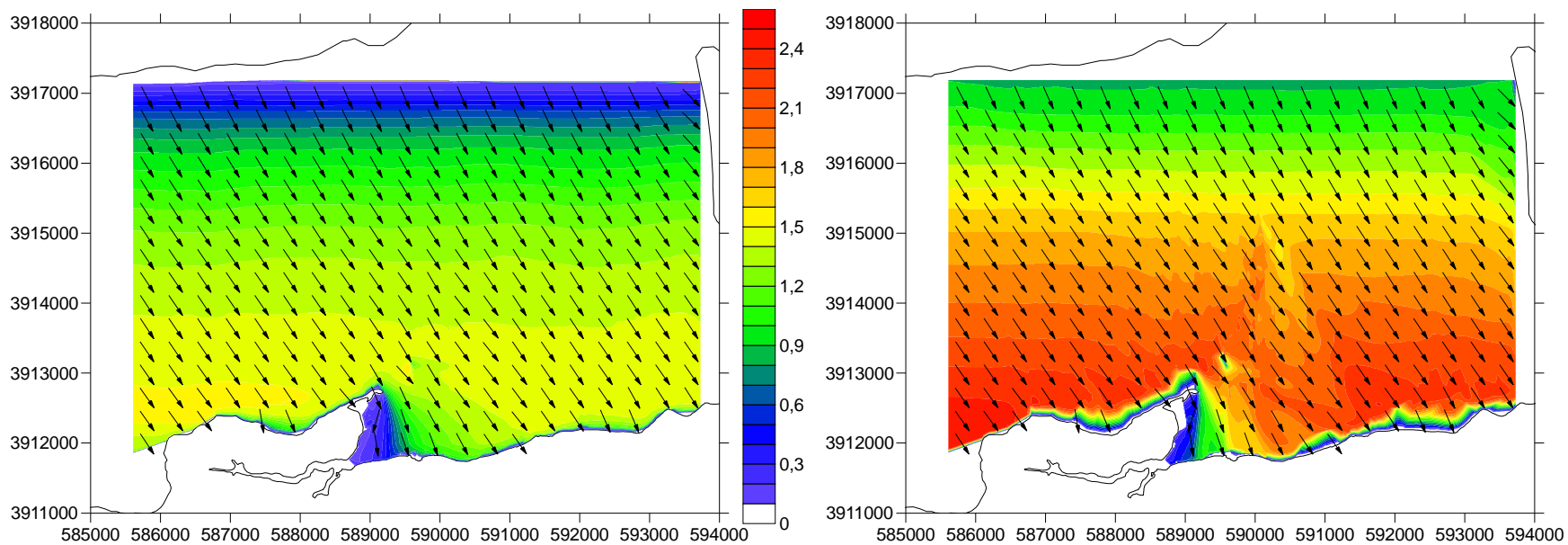


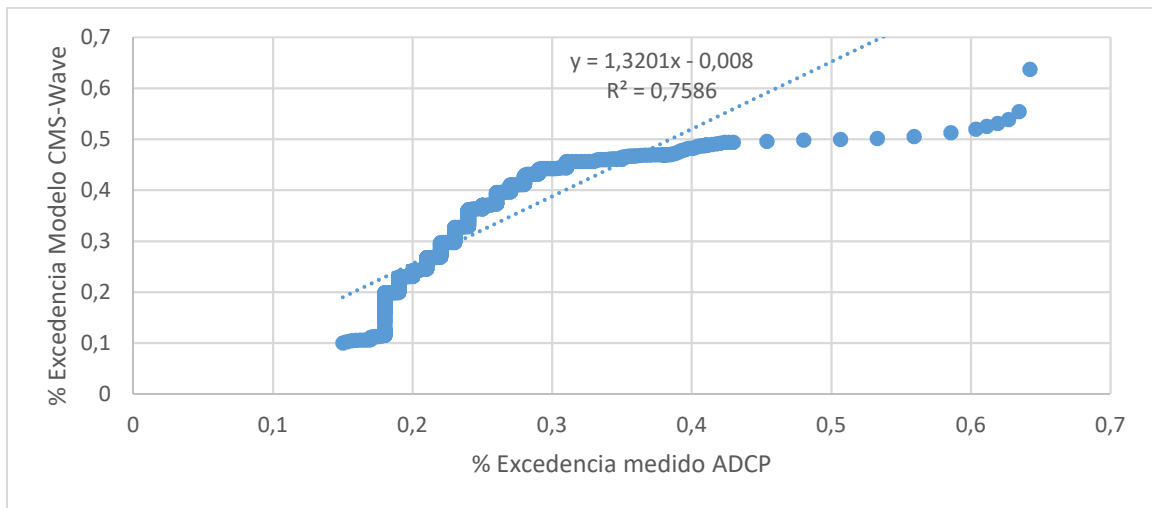
Figura 5-31: Salida modelo de generación por viento para dirección NW, intensidad mínima (izquierda), intensidad máxima (derecha).



Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar la calibración de los vientos para llevar las alturas de olas modeladas al mismo nivel que las mediciones, se realizó una comparación de las curvas de excedencia de ambas bases de datos, obteniendo la siguiente correlación.

Figura 5-32: Correlación entre datos medidos v/s datos modelados.

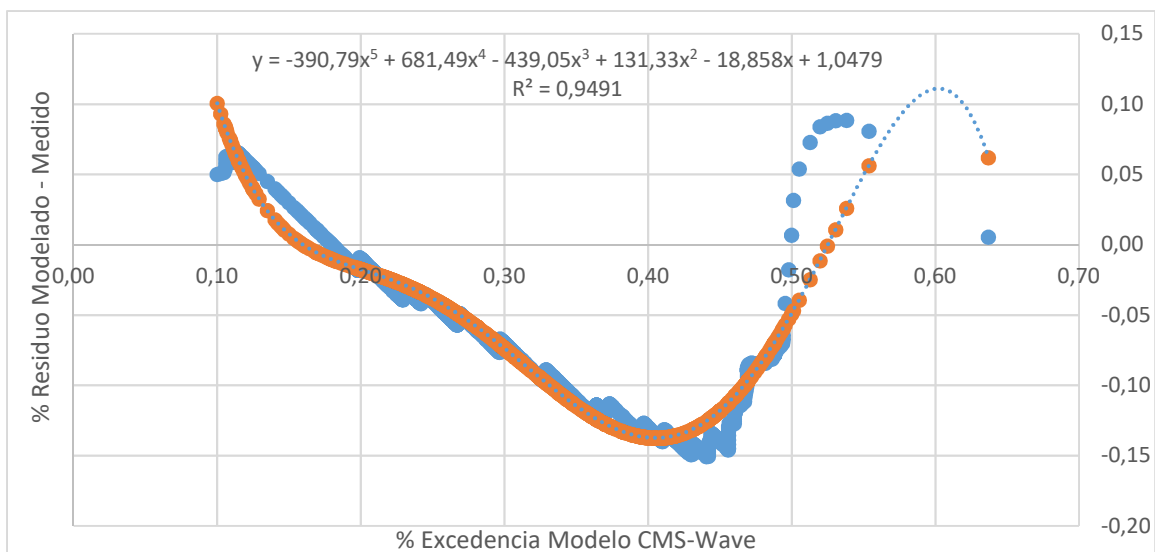


Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Figura 5-32, el grado de correlación entre ambas estadísticas es de un 75.86 %, lo que indica que la relación entre ambas variables es directa, este valor puede llegar a aumentar dependiendo del grado del polinomio de ajuste y de las variables que se puedan llegar a graficar.

Es por lo anterior que se estimó realizar un proceso de asimilación entre las dos variables, estimando el residuo y aproximando una función error a través de una aproximación polinómica, encontrando, luego de varias aproximaciones, que la mejor aproximación es la función polinómica de grado 5.

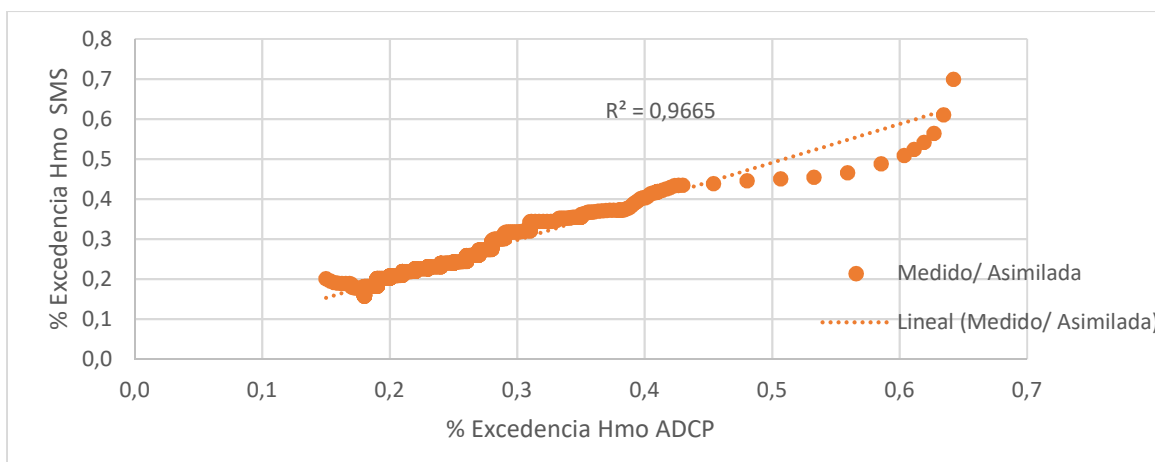
Figura 5-33: Aproximación polinómica y función error del modelo de hindcast.



Fuente: Elaboración propia.

Con la función error de la Figura 5-33, se genera el nuevo error el cual es aplicado a los datos de la curva de excedencia modelada. Obteniendo como resultado final, un valor de correlación mayor a la anterior, por lo tanto, ambas variables, modelación y ADCP, tienen una relación fuerte y directa, con un 96.65% de correlación.

Figura 5-34: Correlación de datos medidos v/s datos modelados, luego de Asimilación.



Fuente: Elaboración propia.

5.3 CLIMA OPERACIONAL, OLEAJE GENERADO.

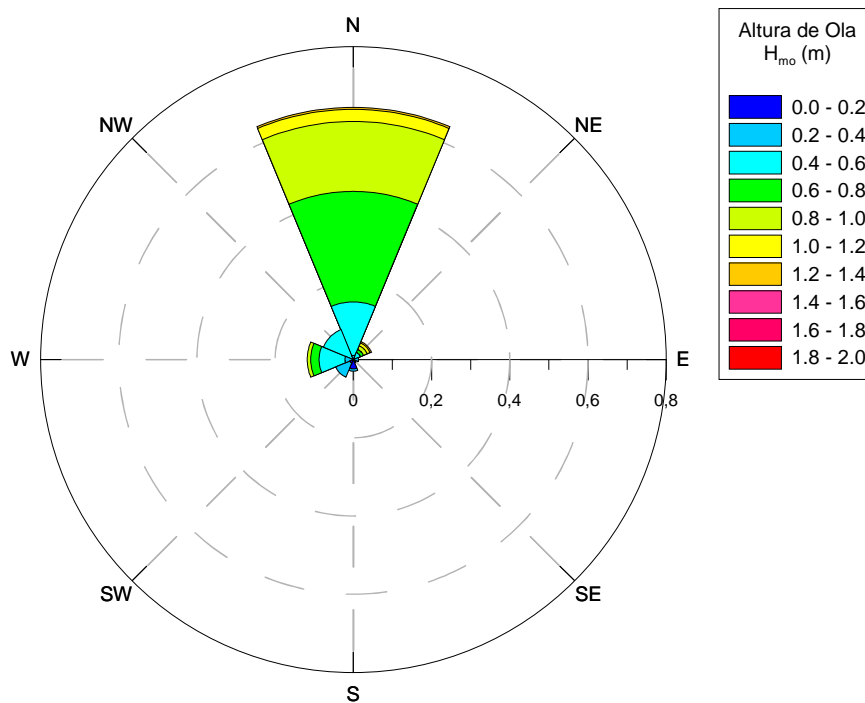
A continuación, se muestran las tablas de incidencia de las alturas de olas generadas al modelar los vientos históricos, representativas de una estadística de 1 año.

Estas alturas fluctúan entre 0.4 y 0.8 (m), donde se encuentran dos intervalos, los cuales suman un 62.3% de las olas generadas. Principalmente estas olas, son generadas por vientos del N, por ende y de acuerdo a las características del sector, el oleaje no sufre cambios importantes en la dirección, siendo esta coincidente con la orientación de la costa.

Existen 121 datos de alturas de olas que superan los 1.2 (m), lo que equivale a un 1.4% del registro de oleaje.

El oleaje incidente en el borde costero de Puerto Williams, es en un 64.8% proveniente del N, seguido del oleaje proveniente del W con un 11.8%.

Figura 5-35: Rosa de dirección para alturas de olas generadas.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5—18: Tabla de incidencia Hmo v/s Dir, para oleaje operacional.

		Hmo (m)									Total	Frec %	
Intervalos		0,0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0	1,0 - 1,2	1,2 - 1,4	1,4 - 1,6	1,6 - 1,8			1,8 - 2,0
Dirección (°)	N	0	94	1192	2469	1562	271	43	14	12	3	5660	64,8%
	NE	0	34	137	72	91	68	33	0	10	6	451	5,2%
	E	0	115	0	0	0	0	0	0	0	0	115	1,3%
	SE	4	67	0	0	0	0	0	0	0	0	71	0,8%
	S	208	52	0	0	0	0	0	0	0	0	260	3,0%
	SW	84	342	0	0	0	0	0	0	0	0	426	4,9%
	W	0	187	578	187	78	0	0	0	0	0	1030	11,8%
	NW	0	0	724	0	0	0	0	0	0	0	724	8,3%
	Total	296	891	2631	2728	1731	339	76	14	22	9	8737	
Frec %	3,4%	10,2%	30,1%	31,2%	19,8%	3,9%	0,9%	0,2%	0,3%	0,1%			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5—19: Tabla de incidencia Tpeak v/s Dir, Oleaje operacional.

		Tpeak (s)							Total	Frec %	
Intervalos		0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 7,0			7,0 - 8,0
Dirección (°)	N	0	2776	2884	0	0	0	0	0	5660	64,8%
	NE	0	243	208	0	0	0	0	0	451	5,2%
	E	29	41	0	0	0	45	0	0	115	1,3%
	SE	0	0	62	0	0	0	5	4	71	0,8%
	S	43	217	0	0	0	0	0	0	260	3,0%
	SW	261	129	18	0	0	0	0	18	426	4,9%
	W	0	1030	0	0	0	0	0	0	1030	11,8%
	NW	0	724	0	0	0	0	0	0	724	8,3%
	Total	333	5160	3172	0	0	45	5	22	8737	
Frec %	3,8%	59,1%	36,3%	0,0%	0,0%	0,5%	0,1%	0,3%			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5—20: Tabla de incidencia Tpeak v/s Hmo, Oleaje operacional.

		Tpeak (s)							Total	Frec %
Intervalos	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - ,70	7,0 - 8,0		
Hmo (m)	0,0 - 0,2	78	208	0	0	0	0	10	296	3,4%
	0,2 - 0,4	255	494	80	0	0	45	5	891	10,2%
	0,4 - 0,6	0	2631	0	0	0	0	0	2631	30,1%
	0,6 - 0,8	0	1546	1182	0	0	0	0	2728	31,2%
	0,8 - 1,0	0	78	1653	0	0	0	0	1731	19,8%
	1,0 - 1,2	0	203	136	0	0	0	0	339	3,9%
	1,2 - 1,4	0	0	76	0	0	0	0	76	0,9%
	1,4 - 1,6	0	0	14	0	0	0	0	14	0,2%
	1,6 - 1,8	0	0	22	0	0	0	0	22	0,3%
	1,8 - 2,0	0	0	9	0	0	0	0	9	0,1%
Total	333	5160	3172	0	0	45	5	22	8737	
Frec %	3,8%	59,1%	36,3%	0,0%	0,0%	0,5%	0,1%	0,3%		

Fuente: Elaboración propia

5.4 CLIMA EXTREMO, OLEAJE GENERADO.

Para la realización y análisis del oleaje extremal, se tomaron los vientos históricos extremos y sus respectivos periodos de retorno, para luego realizar una modelación con las direcciones más influyentes del oleaje que se revisó en el punto anterior las cuales son N, NW, W, siendo estos vientos los que predominan el área de estudio.

Los resultados de estas modelaciones se presentan en la Tabla 5—21

Tabla 5—21: Valores extremos de oleaje generado por viento.

Dir °	Tr (Años)	Int. Extremal	Hmo Resultante	Tp Resultante	Dir Resultante
NW 315°	2	28,9	0,09	7,7	329
	3	29,6	0,09	8,3	329
	4	30,1	0,09	8,3	329
	5	30,5	0,10	9,1	329
	6	30,8	0,10	9,1	329
	W 270°	2	28,9	0,80	1,4
3		29,6	0,79	1,5	288
4		30,1	0,80	1,5	288
5		30,5	0,80	1,6	288
6		30,8	0,81	1,6	288
N 0°		2	28,9	2,01	2,6
	3	29,6	2,04	3	7
	4	30,1	2,06	3	7
	5	30,5	2,05	2,3	8
	6	30,8	2,06	2,3	8

Fuente: Elaboración propia.

6 BASES DE DISEÑO

El diseño conceptual de la nueva infraestructura portuaria para Puerto Williams, se realizó considerando como nave de diseño un crucero Holland America, Tipo MS Amsterdam, cuyo calado máximo es de 8.5 (m), 240 (m) de eslora y finalmente una manga de 33 (m).

Ilustración 6-1: Crucero Amsterdam



Fuente: <http://cruiseweb.com/cruise-lines/holland-america-line>

A partir de estas dimensiones características del buque, se obtuvieron los resultados indicados a continuación.

6.1 UBICACIÓN DEL MUELLE.

El calado de la nave de diseño, corresponde a una de las limitantes principales en el diseño en planta de la instalación portuaria, en específico la ubicación del sitio de atraque, pues en dicho emplazamiento se deben cumplir los requerimientos de profundidad de agua total, la cual incorpora factores de seguridad.

De este modo, la ubicación del cabezo o frente de atraque se determinó de acuerdo a los siguientes requerimientos:

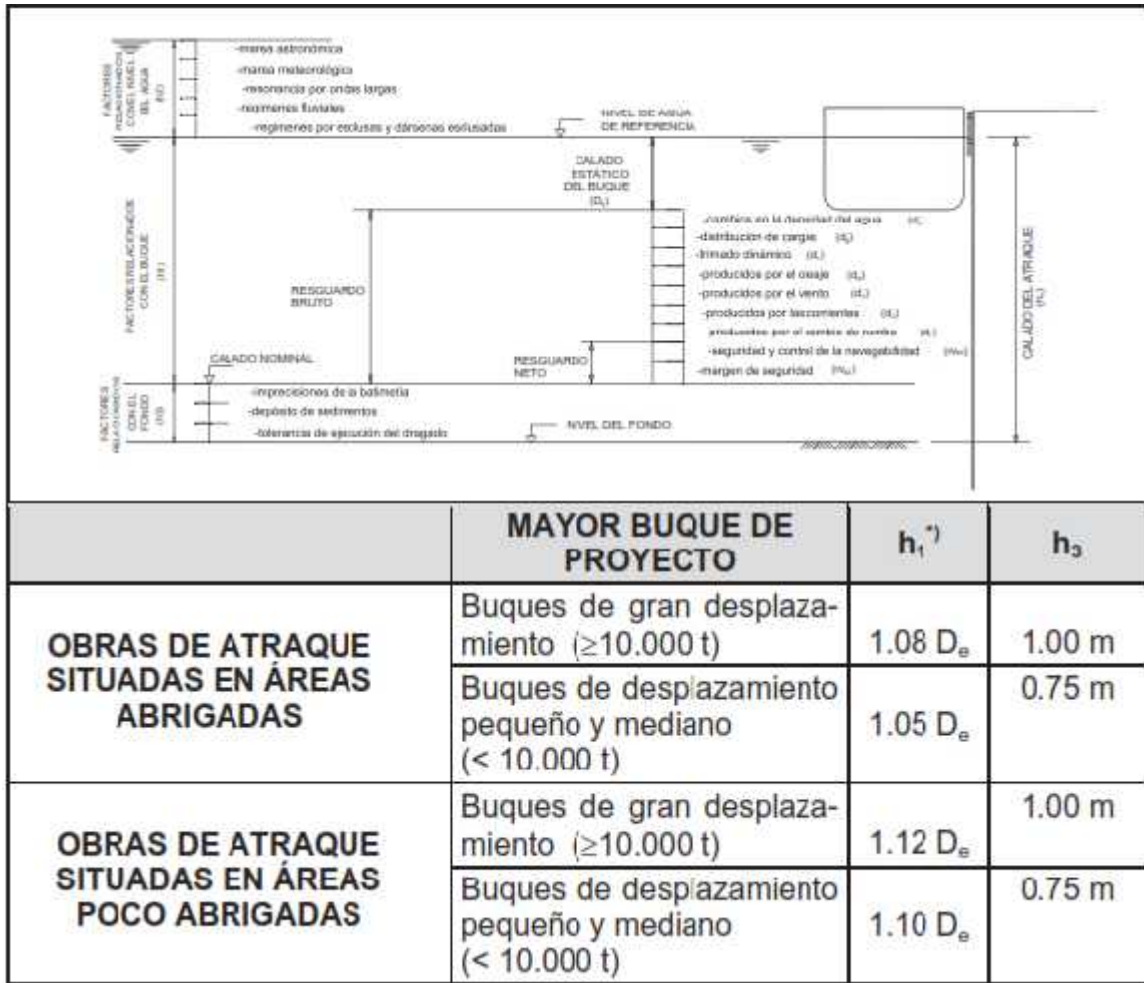
- **Factores relacionados con el buque:** Las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM 2.1), indica valores de acuerdo al desplazamiento de la nave de diseño como también la situación geográfica del sector, esto considerando dos casos de atraque posible (Ilustración 6-2), el primero, consiste en simular que nuestra obra de atraque se encuentra en un área abrigada, y el segundo contempla un área expuesta o poco abrigada. La bahía de Puerto Williams es una zona abrigada en el NW, por la punta Gusano, pero también puede ser considerada como bahía expuesta hacia el E, NE. De acuerdo a lo anterior, se utilizó la segunda condición ya esta es la condición más desfavorable.
Entonces, el factor relacionado con el buque, es calculado con el calado de la nave de diseño por un factor de 1.12 , entregando un valor que corresponde a un valor aproximado de **9.5 (m)**.

- **Factores relacionados con el fondo.** De la misma manera que los factores relacionados con el buque, se consideró una bahía expuesta por lo que se utilizó una distancia de **1.0 (m)**.
- **Factores relacionados con nivel del mar,** según el estudio de marea realizado y analizado en el capítulo 5.1.4, existe una amplitud máxima de

marea, obtenida de la diferencia entre la altura de pleamar máxima y la bajamar mínima, cuyo valor es de aproximadamente **2.1 (m)**.

Finalmente, y con estos valores, se calcula el calado mínimo de atraque, que estará en el veril de los 12.6 (m).

Ilustración 6-2: Valores y definiciones de calados mínimos obras de atraque



Fuente: ROM 2.1, (2012)

Adicionalmente y a modo de tener un calado con resguardo, se determinó el U.K.C. (*Under Keel Clearance*). Este valor fue obtenido por medio de la suma de:

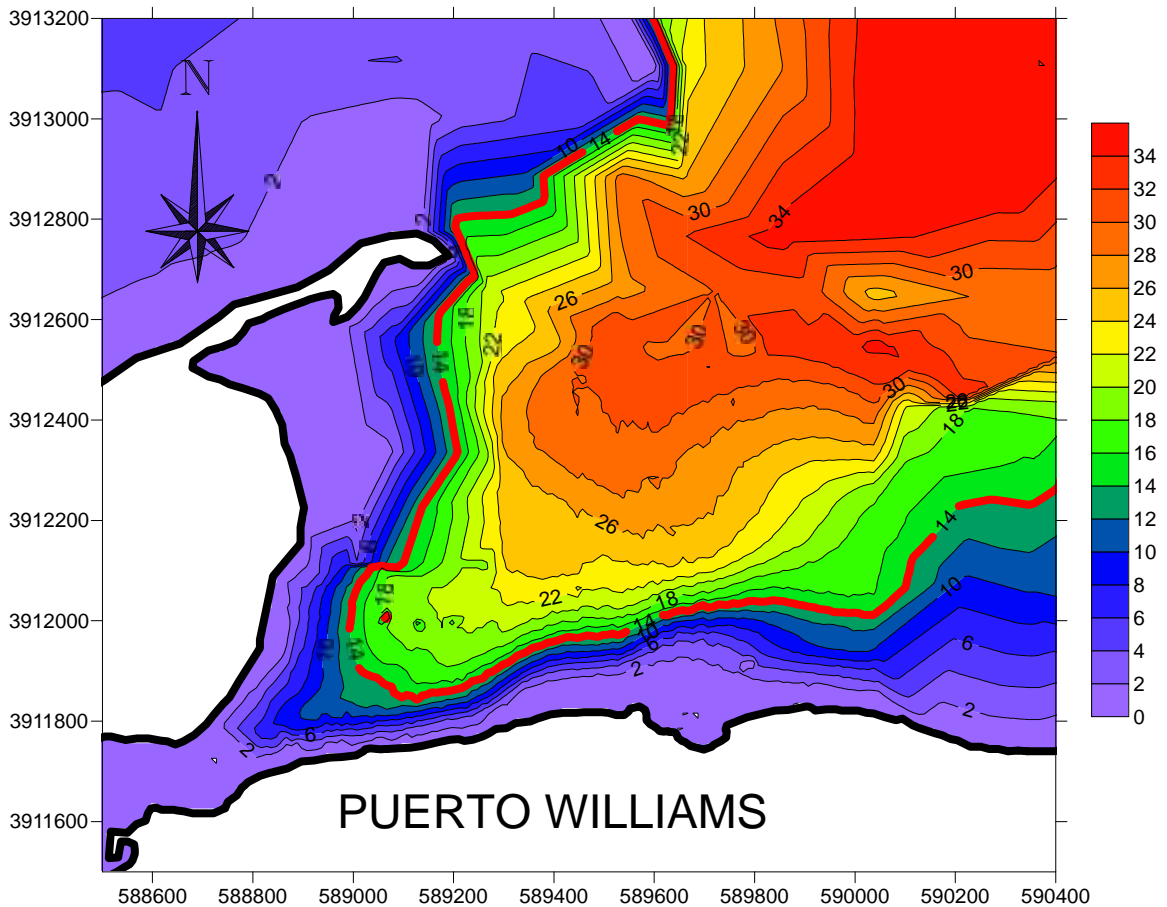
- 10% del calado máximo de la nave de diseño.
- 2/3 de la altura de ola.

- Efecto escora que correspondiente a $\frac{1}{2}$ manga x $\tan 2^\circ$. k

Aplicando los parámetros antes mencionados se determinó un valor de U.K.C cuyo valor es 2.8 (m), el cual adicionado a la marea 2.1 (m) y calado de la embarcación 8.5 (m), se obtiene una profundidad mínima del sitio de atraque de 13.4 (m).

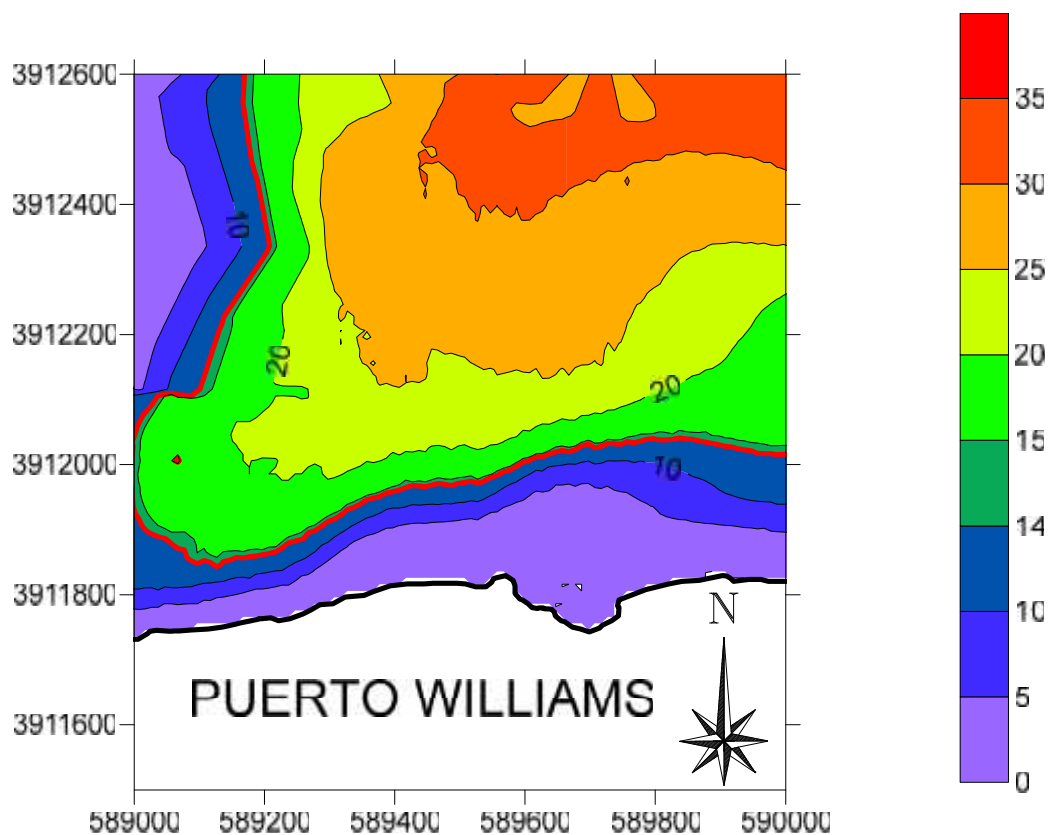
De ambos valores calculados, se optó por utilizar la mayor profundidad de calado mínimo. Además, y para asegurar el buen funcionamiento y movimiento de la nave, se optó por aumentar el calado mínimo a 14 (m).

Figura 6-1: Batimetría de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-2: Batimetría en área de estudio (zoom).



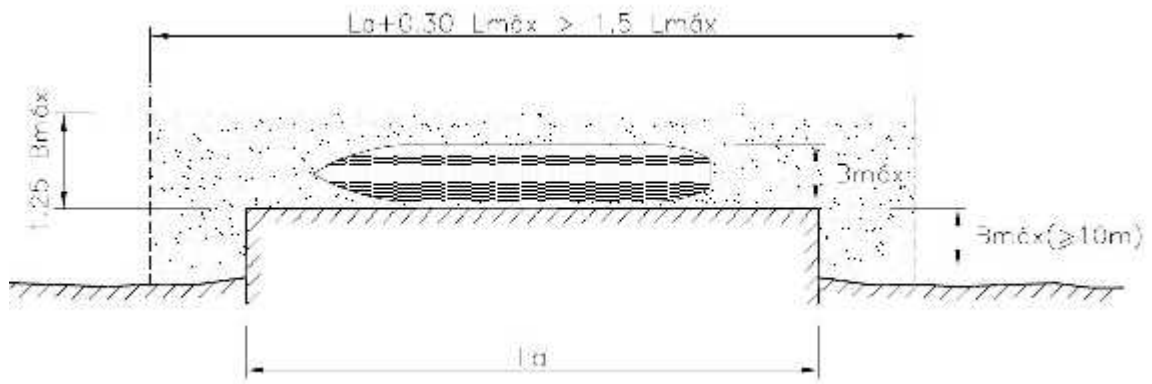
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-1 y Figura 6-2 se aprecia, de color magenta, el veril de 14 (m), que es el límite para poder realizar la obra, ya que la nave de diseño puede permanecer y realizar las maniobras de atraque, con un riesgo mínimo de encallar.

Dentro de las estimaciones de calado, las recomendaciones de obras marítimas, consideran un área donde el calado de atraque se extiende a lo largo de la longitud de la línea de atraque, extendiéndose 0.3 veces la eslora de la nave de diseño.

En el caso del ancho requerido desde el frente de atraque, su dimensión sugerida es de 1.25 veces la manga, además se considera una distancia no menor a 10 (m) por detrás de la línea de atraque como se muestra en la Figura 6-3.

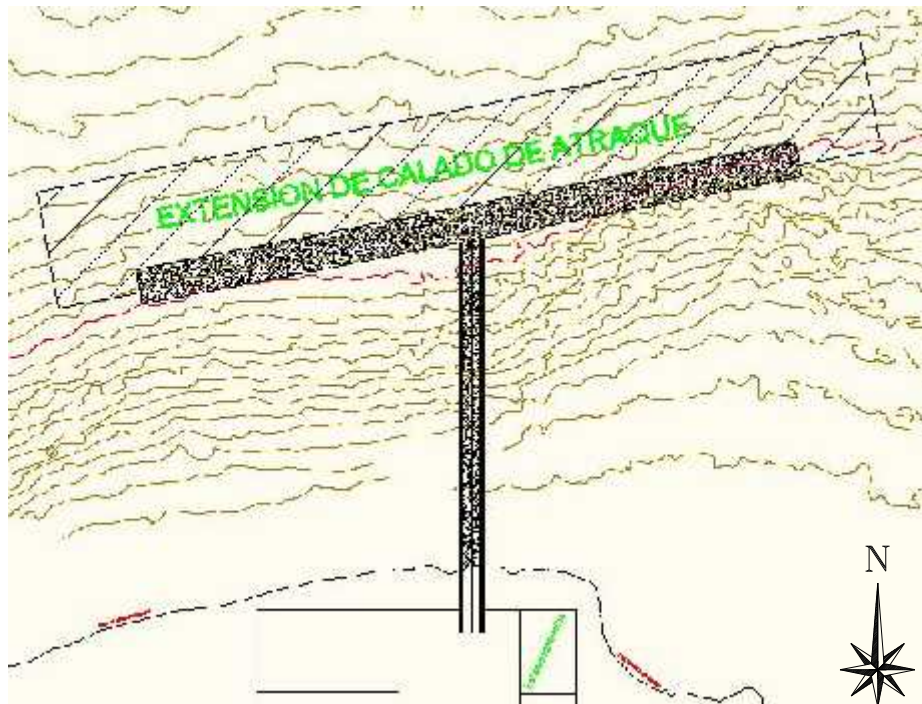
Figura 6-3: Extensión del calado de atraque.



Fuente: ROM 2.1, (2012).

De acuerdo a lo anterior, las distancias aplicadas a este proyecto corresponden a 41.25 (m) desde la línea de atraque hacia el mar, y 10 (m) hacia tierra. A lo largo de la línea de atraque, la distancia total será de 362 (m), teniendo en total un área de 14932.5 (m²).

Figura 6-4: Área de extensión de calado.



Fuente: Elaboración propia.

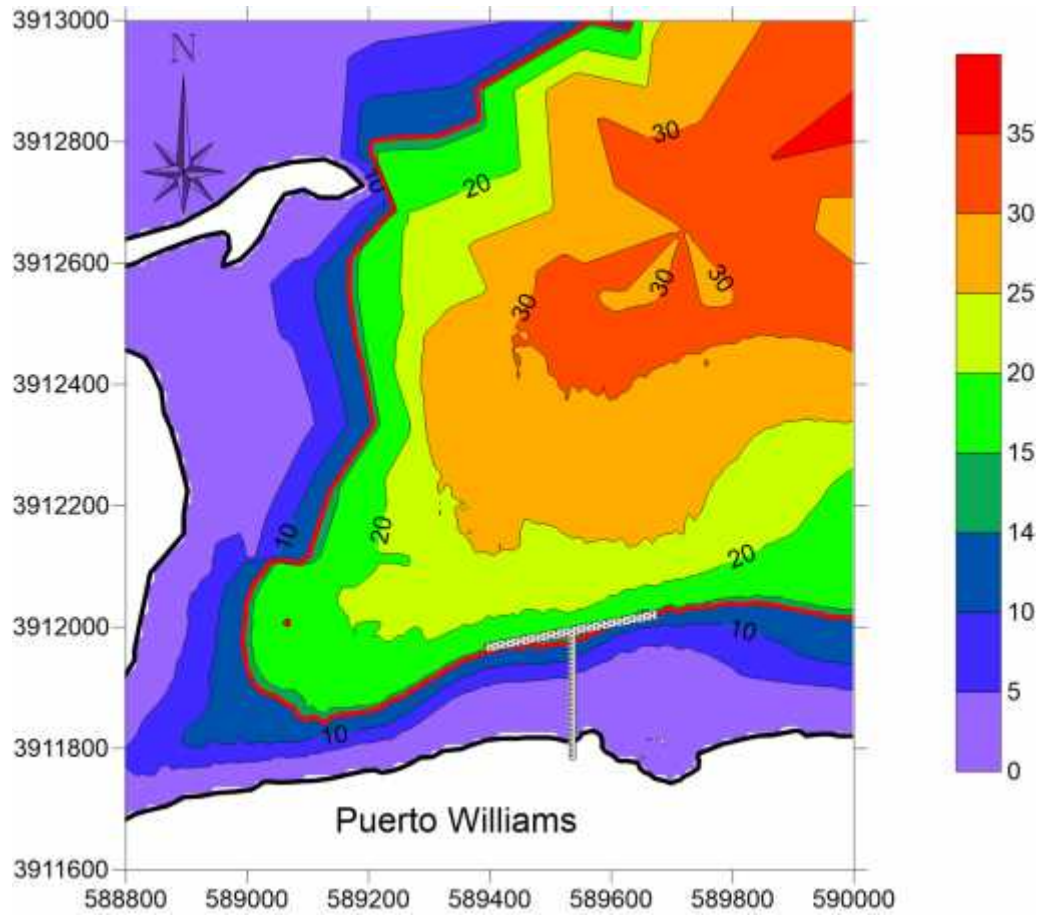
6.2 ORIENTACION DEL MUELLE

De acuerdo al punto anterior, donde se estipuló la profundidad del cabezo del muelle de penetración, además de la configuración batimetría del fondo, se opta por un muelle perpendicular a la costa, por lo que el largo del muelle de penetración, viene dado por la distancia entre el borde costero y el veril de los 14 (m), esta distancia es de 150 (m) desde la línea de costa.

Ademas si se considera que la eslora del buque de diseño es de 240 (m) mas los 150 (m) necesarios para llegar al calado minimo, el muelle de penetración continuo, y atraque perpendicular a la costa, tendría como mínimo una extensión de 390 (m) alcanzando aproximadamente al veril de los 30 (m), lo que interviene en la navegación de las embarcaciones que se dirigen a los muelles cercanos y club de yates Micalvi, que se encuentra al W del emplazamiento. Esta información se obtuvo directamente de la observación de las naves mientras se estuvo en la localidad.

Es por esto que se optó por realizar un muelle de penetración con un cabezo frente de atraque (Figura 6-5), de forma que la embarcación quede atracada en paralelo a la costa, siguiendo la orientación del veril de 14 (m). La siguiente grafica muestra la posición final del muelle con el respectivo veril rojo, lo que asegura el cumplimiento de la profundidad mínima de atraque.

Figura 6-5: Posición, orientación, y ubicación final del muelle.



Fuente: Elaboración propia.

6.3 LONGITUD DE FRENTE DE ATRAQUE.

Esta distancia fue calculada de acuerdo a las ROM, que estipulan longitudes de resguardo L_s (Tabla 6—1).

La embarcación de diseño de este proyecto cae en el rango de 201 a 300 (m) de eslora máxima por lo tanto se tomó como resguardo 25 (m) para cada uno de los extremos del frente de atraque. Con esto, el largo total del frente de atraque corresponde a 290 (m) (Figura 6-6).

Tabla 6—1: Resguardos de línea de atraque, según eslora.

ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL MUELLE	VALORES DE LAS VARIABLES EN FUNCION DE LA ESLORA TOTAL (L en m.) DEL BARCO MAYOR QUE AFECTA A LA DETERMINACION DE LA DIMENSION ANALIZADA.				
	MAJOR DE 300	300—201	200—151	150—100	MEJOR DE 100 (1)
1.—DISTANCIA " l_o " ENTRE BARCOS ATRACADOS EN LA MISMA AL NEACION (m.) 	30	25	20	15	10
2.—SEPARACION " l_s " ENTRE BARCO Y CAMBIOS DE ALINEACION O DE TIPOLOGIA ESTRJCTURAL (m.) 	30	25	20	10	5

Fuente: ROM 2.1, (2012)

6.4 ACCESOS DE MUELLE.

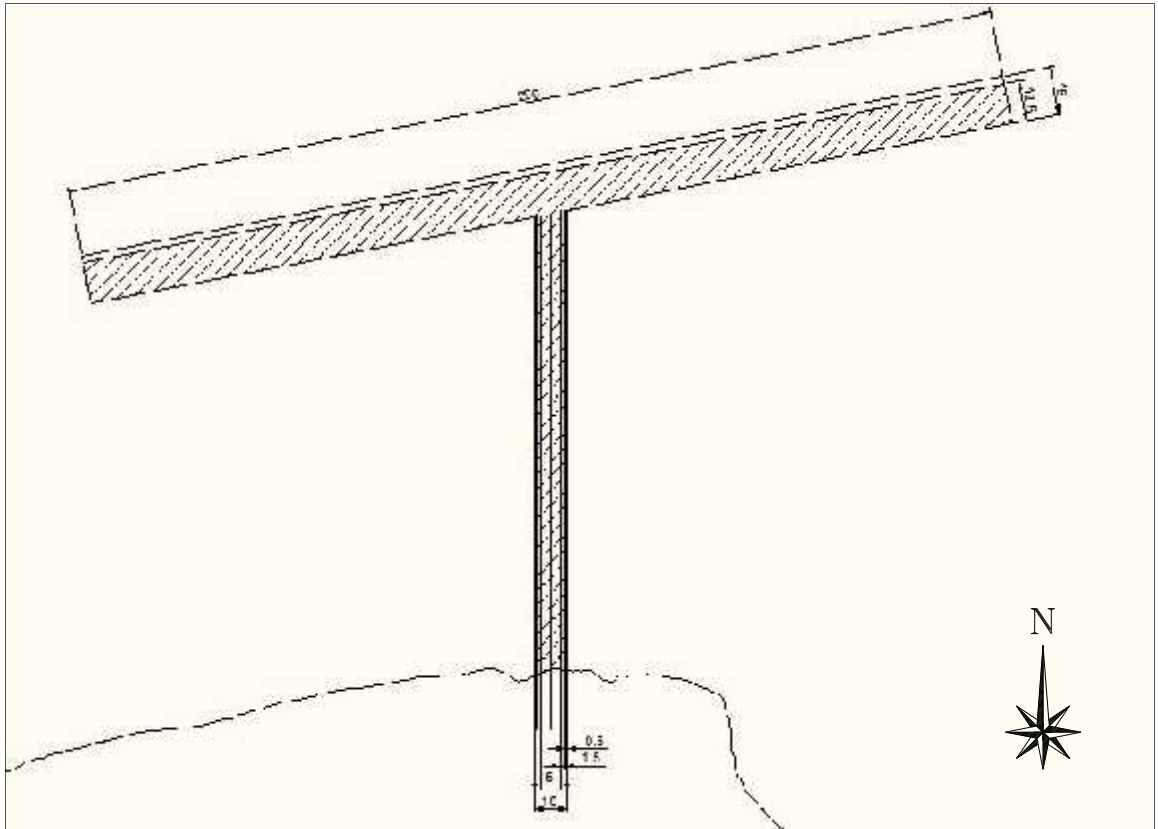
Las dimensiones del acceso al frente de atraque, fueron diseñados suponiendo un tránsito de vehículos con las siguientes características, 2.1 (m) de ancho y 5.8 (m) de largo, éstas dimensiones corresponden a las de un vehículo de pasajeros, para aproximadamente 12 personas. No se consideró un bus de mayor envergadura debido a que de acuerdo a criterios de maniobrabilidad del móvil, aumentarían excesivamente los espacios necesarios para su correcto movimiento y maniobrabilidad, tanto al interior del puente de acceso y cabezo del muelle.

De acuerdo a lo anterior, más las medidas contempladas en la Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras, Capítulo 2 "Instrucciones y criterios de diseño, de la Dirección de Obras Portuarias. Se estimó un ancho total de 10 (m), (Figura 6-7), considerando los siguientes tópicos

- Resguardo para bordes del acceso de 0.5 (m)
- Dos paseos peatonales a cada borde de 1.5 (m).
- Circulación vehicular de 6.0 (m).

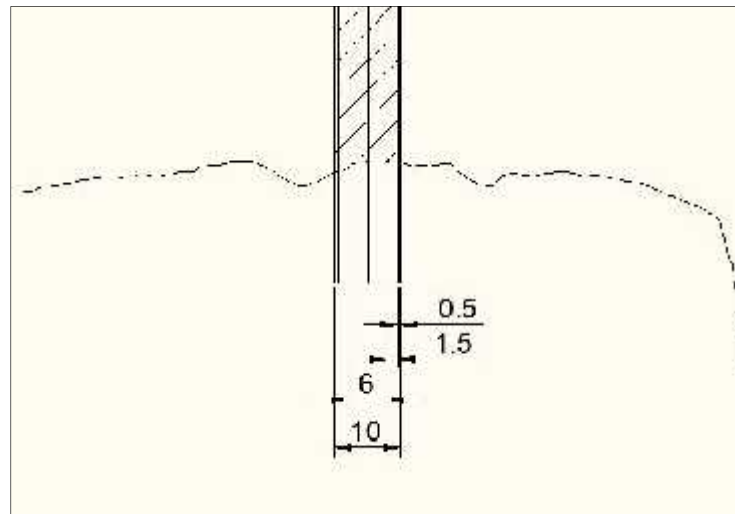
Se estimó una distancia de 6.0 (m) considerando una pista de 3 (m) en cada sentido, esta distancia es suficiente ya que cada pista de circulación es casi 1 (m) más ancho que el ancho del vehículo de diseño. (Figura 6-7).

Figura 6-6: Dimensiones muelle Puerto Williams.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-7: Dimensión de acceso muelle de penetración, (zoom).



Fuente: Elaboración propia

7 TRACK DE NAVEGACIÓN

7.1 ANCHURA DE VIA DE NAVEGACIÓN

Los valores de la vía de navegación, al igual que los anteriores capítulos fueron calculados con los criterios generales que entrega el capítulo 8.4 de las ROM 3.1-99, (2000).

El criterio antes mencionado, considera dos factores, el primero es llamado ancho nominal, el cual contempla la manga máxima de la nave de diseño, el factor deriva, producto del viento, corriente y oleaje, que consiste en la desviación del avance de la nave respecto al eje de navegación. Del mismo modo este ancho considera errores de posicionamiento de la embarcación, esto referido a la verdadera posición del buque respecto a la entregada por los distintos medios de información de georreferenciación, otro aspecto que se considera en el ancho nominal es la desviación producto de la maniobrabilidad de la embarcación, y por último se estima un error que pudiera resultar de los sistemas de balizamiento o señalización del sector. El segundo factor involucrado, corresponde a una anchura agregada considerada de resguardo adicional, que contempla el tipo de fondo y pendiente de este más la velocidad absoluta estimada por la vía de navegación.

Por lo tanto, tendremos la siguiente ecuación:

Ecuación 7—1: Ancho total de vía de navegación.

$$B_t = B + b_D + 2(b_e + b_r + b_B) + (rh_{sm} + rh_{sd})_l + (rh_{sm} + rh_{sd})_d$$

Siendo:

B : Manga máxima del buque de diseño.

b_D : Sobreancho de la senda del buque.

b_e : Sobreancho por errores de posicionamiento.

b_r : Sobreancho de respuesta (maniobrabilidad).

b_B : Sobreancho de balizamiento.

$(rh_{sm} + rh_{sd})$: Margen de seguridad.

En la siguiente Tabla 7—1 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los factores.

Tabla 7—1: Factores para cálculo del ancho vía de navegación

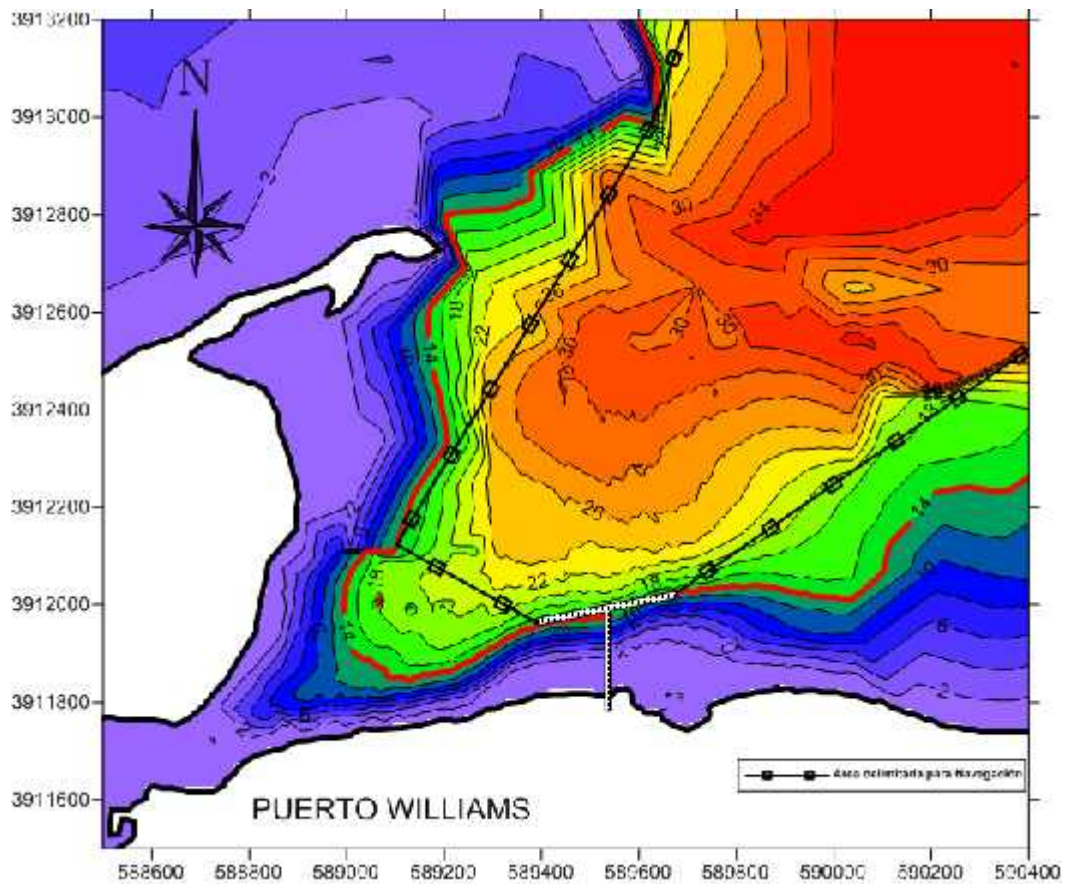
Total	Bt	242
<i>Br = Nominal</i>	B	33
	Bd	156
	be	10
	br	5
	bb	(-)
<i>Br = Adicional</i>	$rh_{sm}+rh_{sd}$	23

Fuente: Elaboración propia

7.2 TRACK Y ZONA DE NEVEGACIÓN

De acuerdo a los cálculos realizados en el punto anterior, el ancho de la vía de navegación deberá ser de 242 (m). Por lo tanto y al revisar la configuración batimétrica, el ancho que existe en el canal de acceso, esto es cumpliendo con las profundidades mínimas, es de 333 (m), esta distancia es considerada desde la punta del muelle de atraque hasta el veril de 14 (m) opuesto al muelle tal como se muestra en la Figura 7-1.

Figura 7-1: Demarcación de zona de navegación.



Fuente: Elaboración propia

8 PRESUPUESTO Y COSTOS

Los costos asociados al desarrollo de este proyecto de tesis, pasan principalmente por el tiempo utilizado en la realización de las tareas comprometidas.

Es por ello que se estima que la hora de trabajo de un alumno memorista corresponde a \$3500 pesos. A continuación, se presenta la Tabla 8—1 con las horas correspondientes a cada tarea y su respectivo valor.

De acuerdo a las características de este proyecto, no es posible cuantificar los costos de la construcción de la infraestructura, ya que para esto se debe realizar la cubicación de los distintos materiales requeridos, por lo tanto, se escapa de los objetivos de esta memoria.

Los costos asociados a la elaboración de la infraestructura, estudios básicos y diseño contemplan valores oficiales entre \$500.000.000 y \$1.000.000.000. Esta información fue obtenida en la página web de la dirección de planeamiento del Ministerio de Obras Públicas.

Tabla 8—1: Costo de realización de tareas.

	Tarea	Duración (días)	Horas	Valor
Trabajo de escritorio	Recopilación Bibliográfica	15	120	\$ 420.000
	Recopilación de datos	10	80	\$ 280.000
	Caracterización Oceanográfica	40	320	\$ 1.120.000
	Estudio de Oleaje	40	320	\$ 1.120.000
	Bases de Diseño	35	280	\$ 980.000
	Track de Navegación	10	80	\$ 280.000
	Conclusiones y Recomendaciones	10	80	\$ 280.000
Trabajo de Campo	Campaña verano	30	---	\$ 8.000.000
	Campaña invierno	30	---	\$ 8.000.000
	Costos asociados	15	---	\$ 3.000.000
Software's	CMS Wave	---	---	\$ 5.000.000
	Surfer	---	---	\$ 700.000
	Varios (Office, Windows)	---	---	\$ 1.500.000
			Total	\$ 30.680.000

Fuente: Elaboración propia

9 CONCLUSIONES

A partir de este documento y los estudios realizados, se pudo caracterizar a Puerto Williams como una bahía abrigada geográficamente por la Punta Gusano; este elemento natural protege la bahía tanto del oleaje como de los vientos provenientes del cuarto cuadrante.

Los vientos predominantes en la localidad corresponden a los provenientes del NW y W, esto se repite en las dos campañas (invierno y verano) en las que se realizaron los estudios. El análisis histórico confirmó la predominancia antes mencionada y las intensidades de los vientos fluctuantes entre brisa débil y viento fuerte.

Las corrientes provienen principalmente del primer cuadrante, con una mayor frecuencia de la dirección NE y la variación de intensidad oscila entre 0 y 0.18 (m/s). A medida que aumenta la profundidad, la intensidad de las corrientes va disminuyendo, y las direcciones de estas tienen mayor variación que en la superficie, a causa principalmente del viento del sector.

El oleaje de verano concentró alturas entre 0.1 y 0.3 (m), provenientes de N y NE, con periodos entre 3 y 4 (s); mientras que en invierno las direcciones más frecuentes corresponden a las provenientes del NW, manteniendo el mismo periodo.

El oleaje generado por modelo, arrojó resultados contundentes, con periodos entre 1 y 3 (s), direcciones predominantes N y W, y alturas entre 0.3 y 1 (m). Estos resultados tuvieron una aproximación adecuada a las mediciones, luego del proceso de asimilación, esto se vio reflejado claramente en el porcentaje de semejanza de los estudios. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo CMS-Wave es de mucha utilidad en zonas donde el oleaje es solo influido por el viento (Aguas interiores) además de tener la capacidad de representar de muy buena forma los fenómenos de asomeramiento, reflexión y refracción del oleaje.

Con estos resultados, se confirma que Puerto Williams tiene condiciones oceanográficas aptas para la realización de un proyecto de ingeniería de gran envergadura. En base a los resultados de la caracterización oceanográfica y las

dimensiones de la nave de diseño, se determinó la ubicación del muelle y la orientación de este, considerando para las bases de diseño una tipología en planta.

Respecto al diseño, se optó por un muelle de penetración, ya que, al elegir alguna otra estructura cercana a la línea de costa, tipo muelle marginal, se hubiese tenido que intervenir el fondo para llegar al calado mínimo necesario. El frente de atraque elegido, corresponde a uno de tipo continuo, ya que la envergadura de la nave de diseño requiere un muelle que cubra la eslora de ésta, con el objetivo de otorgar mayor seguridad a los pasajeros y tripulantes.

El proyecto considera una inversión inicial de \$30.680.000, monto que permitirá la ejecución de estudios en terreno y su posterior validación con modelos de generación de oleaje; con esta información se podrá proyectar la mejor propuesta de diseño de la obra gruesa.

10 REFERENCIAS

Las fuentes de información se detallan a continuación.

- “Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras”, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de obras Portuarias.
- Manual, S. P. (1984). Coastal Engineering Research Center. Department of the Army, Waterways Experiment Station.
- Abdalla, S. 1991. “development of a third Generation Wind Wave Model Applicable to finite depths”Ph.D. Thesis. Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Losada, M. A., & Gimenez-Curto, L. A. (1979). The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number. Coastal Engineering, 3, 77-96.
- Sverdrup, H. U., & Munk, W. H. (1947). Wind, sea, and swell: theory of relations for forecasting.
- Bretschneider, C. L. (1952). The generation and decay of wind waves in deep water. Eos, Transactions American Geophysical Union, 33(3), 381-389.
- Bretschneider, C. L. (1958). Selection of design wave for offshore structures. Journal of the Waterways and Harbors Division, 84(2), 1-37.
- Battjes, J. A. (1972). Set-Up Due to Irregular Waves. Coastal Engineering.
- Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Coastal Engineering Proceedings, 1(16).
- Chawla, A., & Kirby, J. T. (2002). Monochromatic and random wave breaking at blocking points. Journal of Geophysical Research: Oceans, 107(C7).
- Goda Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures (2nd Edition). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 443p.

- Pierson, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of geophysical research*, 69(24), 5181-5190.
- Pinet, P.R. 1998. *Invitation to Oceanography*. Sudbury, MA.: Jones and Bartlett Publishers. 596 pp. Sudbury, MA.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*.
- Manual, S. P. (1984). Coastal Engineering Research Center. Department of the Army, Waterways Experiment Station, 1.
- Losada, M. A., & Gimenez-Curto, L. A. (1979). The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number. *Coastal Engineering*, 3, 77-96.
- Sverdrup, H. U., & Munk, W. H. (1947). *Wind, sea, and swell: theory of relations for forecasting*.
- Lin, L., Demirbilek, Z., Mase, H., Zheng, J., & Yamada, F. (2008). CMS-Wave: A nearshore spectral wave processes model for coastal inlets and navigation projects (No. ERDC/CHL-TR-08-13). ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS COASTAL AND HYDRAULICS LAB.
- Goda, Y., & Takagi, H. (2000). A reliability design method of caisson breakwaters with optimal wave heights. *Coastal Engineering Journal*, 42(04), 357-387.
- Pierson, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of geophysical research*, 69(24), 5181-5190.

- Publicación SHOA N° 3201 “Especificaciones Técnicas para mediciones y análisis oceanográficos”.
- Publicación SHOA N° 3202 “Método oficial para el cálculo de los valores no armónicos de la marea” 2^{da} edición, 1999.
- Publicación SHOA N° 3000 “Catálogo de cartas y publicaciones náuticas”.
- CMS – Wave, Surface Water Modeling System, Abril 2010, Aqueaveo, Manual de uso.
- del Estado, P. Recomendación para el proyecto y construcción de obras marítimas. (ROM) Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. (2012). ROM 2.1. “Obras de atraque y amarre”.
- del Estado, P. (2000). Recomendaciones para obras marítimas. ROM. 3.1-99. Proyecto de la configuración marítima de los puertos; Canales de acceso y áreas de flotación. Ed. Puertos del Estado. Madrid.

11 ANEXOS

Se adjuntan los anexos en CD de respaldo.