



Memoria para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**“EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE MODELADO PARA DEFINIR EL  
OLEAJE EN ZONAS DE DIFRACCIÓN EN AGUAS DE  
PROFUNDIDAD RELATIVA INTERMEDIA, APLICADO A LA BAHÍA  
DE VALPARAISO, V REGIÓN-CHILE”**

**GUSTAVO ADOLFO HAFEMANN OYARZUN**

Octubre 2016

**“EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE MODELADO PARA DEFINIR EL OLEAJE EN ZONAS DE DIFRACCIÓN EN AGUAS DE PROFUNDIDAD RELATIVA INTERMEDIA, APLICADO A LA BAHÍA DE VALPARAISO, V REGIÓN-CHILE”**

GUSTAVO ADOLFO HAFEMANN OYARZUN

**COMISIÓN REVISORA**

**CALIFICACIONES**

**Nota**

**Firma**

**PROFESOR GUÍA**  
SR. MATÍAS ALDAY

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**PROFESOR REVISOR 2**  
SR. MAURICIO MOLINA

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**PROFESOR REVISOR 3**  
SR. MARCO MATAMALA

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## DECLARACIÓN

*Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados 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.*

---

Matías Alday González  
Profesor Guía

---

Gustavo Hafemann Oyarzún  
Alumno Memorista

*... El conocimiento si no se sabe aplicar es peor que la ignorancia...*

*Charles Bukowski (1920-1994)*

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecer el apoyo de mi tutor Matías Alday por su dedicación, vocación y motivación en la explotación del aprendizaje constante que estimularon mis ganas de terminar éste proceso universitario de buena manera. Por otro lado, agradezco al profesor Patricio Winckler por su tiempo para brindar observaciones y sugerencias que sirvieron para mejorar el desarrollo de la tesis.

Esta etapa de mi vida no pudo haberse llevado a cabo sin el apoyo incondicional de mis padres quienes me brindaron cariño, confianza y soporte moral durante todo el periodo académico. Sin ustedes definitivamente no lo hubiese logrado. Mil gracias por todo, los amo infinitamente y agradeceré hasta la eternidad la oportunidad y facilidad que ambos me dieron para estudiar y ser un profesional.

Quiero agradecer de forma especial a mi hermano Carlitos Andrés, quien el 2008 nos dejó para descansar y cuidarnos desde el cielo. Una persona muy importante en mi vida que seguiré admirando profundamente y que, sin duda alguna, me brindó las fuerzas y energías necesarias para culminar esta etapa con alegría y éxito. Te amo hermanito.

Gracias a mis abuelitas Lastenia y Emelina que siempre me brindaron ayuda, apoyo y cariño durante toda la vida y toda la carrera, las quiero mucho.

Gracias les doy a mis primos y tíos /as que siempre preocupados me presionaban para terminar.

Gracias también a mis amigos y compañeros que con sus palabras de aliento y apoyo aportaron a construir este camino, especialmente a Cristian Santander por su apoyo incondicional, a Juan Pablo Jorquera, a Pablo Vera y también a Francisca Araya por su paciencia y compañía. Infinitas gracias por brindar valiosa ayuda y apoyo en las distintas etapas del proceso de desarrollo de la tesis. Gracias de corazón por todo.

Para terminar, gracias a Dios por darme la oportunidad de estudiar, conocer y aprender de ésta bella carrera.

Dedicado a mi Padres  
y en especial a mi hermano Q.E.P.D  
con todo el amor del mundo...

## **CONTENIDO**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 2     | OBJETIVOS.....   | 2  |
| 3     | ESTADO DEL ARTE .....  | 4  |
| 3.1   | OLEAJE .....   | 4  |
| 3.2   | GENERACION DEL OLEAJE.....                                   | 5  |
| 3.3   | CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE .....                               | 8  |
| 3.4   | TEORÍAS DE OLEAJE.....                                       | 11 |
| 3.4.1 | TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE .....                               | 12 |
| 3.4.2 | ECUACIÓN DE GOBIERNO Y CONDICIONES DE FRONTERA.....          | 13 |
| 3.4.3 | CONDICIONES DE BORDE .....                                   | 14 |
| 3.4.4 | OLEAJE NO LINEAL.....  | 17 |
| 3.5   | VALIDEZ DE LAS DISTINTAS TEORÍAS DEL OLEAJE .....            | 20 |
| 3.6   | TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE EN LA PROPAGACIÓN .....            | 21 |
| 3.6.1 | CONCEPTOS PREVIOS.....                                       | 21 |
| 3.6.2 | REFRACCIÓN .....   | 23 |
| 3.6.3 | ASOMERAMIENTO (SHOALING).....                                | 27 |
| 3.6.4 | DIFRACCIÓN.....  | 30 |
| 3.6.5 | REFRACCIÓN – DIFRACCIÓN .....                                | 37 |
| 3.7   | ECUACIÓN DE LA PENDIENTE SUAVE (MSE).....                    | 37 |
| 3.7.1 | ECUACIÓN DIFERENCIAL ELÍPTICA .....                          | 38 |
| 3.7.2 | APROXIMACIÓN PARABÓLICA.....                                 | 39 |
| 3.7.3 | ANÁLISIS DE LAS FORMULACIONES DE LA MSE.....                 | 41 |
| 3.7.4 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA APROXIMACIÓN PARABÓLICA.....      | 43 |
| 3.8   | MODELOS NUMÉRICOS .....                                      | 48 |
| 3.8.1 | CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS .....                 | 48 |
| 4     | APLICACIÓN DE MIKE 21 SW, EMS Y PMS EN CASOS BENCKMARKS..... | 54 |
| 4.1   | CREACIÓN DE MALLAS BENCHMARKS .....                          | 55 |
| 4.2   | CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 SW.....                             | 57 |
| 4.3   | CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 EMS.....                            | 61 |
| 4.4   | CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 PMS.....                            | 63 |
| 4.5   | COEFICIENTES DE DIFRACCIÓN DE WIEGEL Y JHONSON.....          | 65 |
| 4.6   | RESULTADOS DE PROPAGACIONES EN CASOS BENCKMARKS .....        | 68 |
| 4.7   | ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA CASOS BENCHMARKS .....           | 74 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5     | APLICACIÓN DE MIKE 21 SW, EMS Y PMS EN LA BAHIA DE VALPARAISO ..... | 79  |
| 5.1   | DETERMINACIÓN DE FRONTERAS DEL PROBLEMA .....                       | 80  |
| 5.2   | ANTECEDENTES GENERALES .....  | 83  |
| 5.2.1 | DATOS PARA PROPAGACIONES DE OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS ..            | 83  |
| 5.2.2 | DATOS DISPONIBLES PARA PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN .....             | 84  |
| 5.3   | METODOLOGIA DE TRANSFERENCIA DE OLEAJE .....                        | 87  |
| 5.3.1 | DEFINICIÓN PARÁMETRO DE RESUMEN .....                               | 87  |
| 5.3.2 | TRANSFERENCIA POR MEDIO DE PARÁMETROS DE RESUMEN .....              | 88  |
| 5.4   | CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 SW .....                                   | 90  |
| 5.4.1 | ACOPLE DE MODELOS .....   | 93  |
| 5.5   | CONFIGURACIÓN DE MIKE21 EMS .....                                   | 94  |
| 5.6   | CONFIGURACIÓN DE MIKE21 PMS .....                                   | 97  |
| 5.7   | RESULTADOS APLICACIÓN EN BAHIA DE VALPARAISO .....                  | 101 |
| 5.8   | ANÁLISIS DE RESULTADOS EN BAHIA DE VALPARAISO .....                 | 111 |
| 6     | CONCLUSIONES .....  | 118 |
| 7     | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                    | 120 |
| 8     | ANEXOS .....  | 123 |
| 8.1   | ANEXO I .....   | 124 |
| 8.1.1 | ANÁLISIS DE CLIMA MEDIO PARA AGUAS PROFUNDAS .....                  | 124 |
| 8.1.2 | ROSAS DE OLEAJE EN LA BOYA .....                                    | 128 |
| 8.2   | ANEXO II .....  | 129 |
| 8.2.1 | COEFICIENTES DE AGITACIÓN COMBINACIÓN SUR/NORTE .....               | 129 |
| 8.2.2 | RESULTADOS DE MODELOS SW EN VALPARAÍSO .....                        | 131 |
| 8.2.3 | RESULTADOS DE MODELOS EMS EN VALPARAÍSO .....                       | 140 |
| 8.2.4 | RESULTADOS DE MODELOS PMS EN VALPARAÍSO .....                       | 163 |

## LISTA DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS CONFORME A LA PROFUNDIDAD RELATIVA.....  | 8   |
| TABLA 2: RESUMEN FUERZAS GENERADORAS Y RESTAURADORAS DEL OLEAJE.....   | 9   |
| TABLA 3: PARÁMETROS DE LA TEORÍA DE AIRY PARA AGUAS PROFUNDAS, DE TRANSICIÓN Y SOMERAS. ....                             | 16  |
| TABLA 4: CLASIFICACIÓN DE LAS EDP DE SEGUNDO ORDEN.....  | 42  |
| TABLA 5: PARÁMETROS DE OLEAJE SELECCIONADO PARA SIMULACIÓN EN <i>MIKE21-EMS-PMS-SW</i> .....                             | 56  |
| TABLA 6: PARÁMETROS SELECCIONADOS PARA LA SIMULACIÓN DEL CASO 1 Y 2 EN MIKE 21-SW.....                                   | 59  |
| TABLA 7: COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE EVALUACIÓN - CASO 1 Y 2. ....  | 60  |
| TABLA 8: PARÁMETROS SELECCIONADOS PARA LA SIMULACIÓN DEL CASO 1 Y 2 EN MIKE 21-PMS.....                                  | 64  |
| TABLA 9: TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS RECTANGULARES A POLARES CASO 1 Y 2. ....  | 65  |
| TABLA 10: COEFICIENTES DE LOS ÁBACOS DE DIFRACCIÓN. ....   | 66  |
| TABLA 11: RESULTADOS DE MIKE21-SW-EMS-PMS VS WIEGEL Y JHONSON. ....  | 74  |
| TABLA 12: CÁLCULO DE ERROR RELATIVO DE MODELOS VS ÁBACOS DE DIFRACCIÓN. ....   | 75  |
| TABLA 13: COORDENADAS BOYA S4ADW - UTM. ....   | 82  |
| TABLA 14: DATOS ENTREGADOS POR EL SHOA PARA LA CONFECCIÓN DE GRILLA. ....  | 84  |
| TABLA 15: DATA DE REGISTRO DE LA BOYA S4ADW.....   | 86  |
| TABLA 16: SERIES DE TIEMPO APLICADO EN SIMULACIONES CON MIKE21 - SW, CASO VALPARAÍSO. ....                               | 88  |
| TABLA 17: PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE ALTURA DE OLA SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE GLUKHOVSKIY..                             | 96  |
| TABLA 18: COMPARACIÓN DE CORRELACIÓN DE ALTURAS ENTRE MODELOS VS BOYA- CASO VALPARAÍSO....                               | 114 |
| TABLA 19: TABLA DE INCIDENCIA PORCENTUAL ALTURA - DIRECCIÓN.....   | 124 |
| TABLA 20: TABLA DE INCIDENCIA PORCENTUAL PERIODO - DIRECCIÓN.....  | 125 |
| TABLA 21: TABLA DE INCIDENCIA PORCENTUAL ALTURA - PERIODO.....   | 125 |
| TABLA 22: COEFICIENTES DE AGITACIÓN -COMBINACIÓN SUR/NORTE- OBTENIDOS DEL MODELO SW PARA INPUT DE MÓDULOS EMS Y PMS..... | 129 |
| TABLA 23: COEFICIENTES DIRECCIONAL -COMBINACIÓN SUR/NORTE- OBTENIDOS DEL MODELO SW PARA INPUT DE MÓDULOS EMS Y PMS. .... | 129 |

## **LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1: CLASIFICACIÓN DE LAS OLAS .....   | 4  |
| FIGURA 2: ONDAS CAPILARES .....   | 6  |
| FIGURA 3: OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....   | 6  |
| FIGURA 4: OLEAJE TIPO SEA. ....   | 6  |
| FIGURA 5: OLEAJE TIPO SWELL .....   | 7  |
| FIGURA 6: OLEAJE LLEGANDO A LA COSTA (ZONA DE ROTURA). ....                                   | 7  |
| FIGURA 7: ESPECTRO DE OLEAJE VALPARAÍSO, OLEAJE SEA & SWELL. ....                             | 9  |
| FIGURA 8: ONDA SINUSOIDAL. ....   | 10 |
| FIGURA 9: TEORÍAS DE OLEAJE Y SUS PROFUNDIDADES DE APLICACIÓN. ....                           | 11 |
| FIGURA 10: CONDICIONES DE BORDE PARA DEFINIR LA TLO. ....                                     | 14 |
| FIGURA 11: TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS DE AGUA DE AIRY Y STOKES. ....                           | 18 |
| FIGURA 12: EJEMPLO DE APROXIMACIONES DE STOKES EN AGUAS PROFUNDAS.....                        | 18 |
| FIGURA 13: EJEMPLO DE APLICACIÓN DE TEORÍAS DE OLAS NO LINEALES VS LINEAL. ....               | 19 |
| FIGURA 14: RANGO DE VALIDEZ DE LAS DIFERENTES TEORÍAS DE OLEAJE. ....                         | 20 |
| FIGURA 15: RAYOS QUE DEFINEN LA TRAYECTORIA SOBRE LA CRESTA DE LA OLA.....                    | 22 |
| FIGURA 16: EFECTO DE REFRACCIÓN. ....   | 23 |
| FIGURA 17: ESQUEMA DE TEORÍA DEL RAYO SOBRE BATIMETRÍA IDEALIZADA.....                        | 24 |
| FIGURA 18: ESQUEMA DE LA LEY DE SNELL. ....   | 25 |
| FIGURA 19: DEFINICIÓN DE EJES Y PARÁMETROS, INCIDENCIA OBLICUA. ....                          | 25 |
| FIGURA 20: DIVERGENCIA Y CONVERGENCIA DE LAS OLAS EN LA COSTA. ....                           | 26 |
| FIGURA 21: ESQUEMA DEL CAMBIO DE DENSIDAD DE ENERGÍA EN LA ORTOGONAL. ....                    | 28 |
| FIGURA 22: FENÓMENO DE SHOALING O ASOMERAMIENTO DEL OLEAJE.....                               | 29 |
| FIGURA 23: ESQUEMA DE ONDA DIFRACTADA. ....   | 30 |
| FIGURA 24: ONDA QUE REPRESENTA LA DIFRACCIÓN AL ATRAVESAR LA RENDIJA.....                     | 31 |
| FIGURA 25: FENÓMENO DE DIFRACCIÓN.....  | 31 |
| FIGURA 26: DIFRACCIÓN PARA UN DIQUE SEMI-INFINITO CON INCIDENCIA OBLICUA DEL OLEAJE. ....     | 34 |
| FIGURA 27: DIAGRAMA DE JHONSON PARA CASO DE ROMPEOLAS SEPARADO POR $2L$ .....                 | 35 |
| FIGURA 28: DIFRACCIÓN PARA ROMPEOLAS SEPARADO POR UN ANCHO MAYORES A $5L$ ( $B/L > 5$ ). .... | 36 |
| FIGURA 29: INCIDENCIA OBLICUA DEL OLEAJE EN ROMPEOLAS SEPARADO. ....                          | 36 |
| FIGURA 30: PLAYA LARGA CON PRESENCIA DE ESPIGONES.....  | 40 |
| FIGURA 31: PLAYA LARGA O ABIERTA.....   | 40 |
| FIGURA 32: METODOLOGÍAS DE RESOLUCIÓN.....  | 47 |
| FIGURA 33 : DIFERENCIAS DE LAS APROXIMACIONES DERIVADAS DE LA MILD SLOPE. ....                | 47 |
| FIGURA 34: TIPOS DE MODELOS DE OLEAJE Y ECUACIONES QUE RESUELVE. ....                         | 49 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 35: CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS QUE PROMEDIAN LA FASE. ....                  | 50 |
| FIGURA 36: CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS QUE RESUELVEN LA FASE. ....                  | 50 |
| FIGURA 37 MODELACIÓN UTILIZANDO MIKE 21 EMS. ....  | 51 |
| FIGURA 38: EJEMPLO MODELO MIKE21-PMS... ..   | 52 |
| FIGURA 39: EJEMPLO MODELO MIKE 21-SW. ....   | 52 |
| FIGURA 40: BATIMETRÍA IDEALIZADA CON UN MOLO DE ABRIGO DE LONGITUD SEMI-INFINITA, CASO 1.....  | 55 |
| FIGURA 41: BATIMETRÍA IDEALIZADA CON 2 MOLOS DE ABRIGO SEPARADOS EN 2 LONGITUDES DE ONDA. .... | 56 |
| FIGURA 42: CONDICIONES DE BORDE, TRIANGULACIÓN E INTERPOLACIÓN DE MALLA CASO 1.....            | 57 |
| FIGURA 43: CONDICIONES DE BORDE, TRIANGULACIÓN E INTERPOLACIÓN DE MALLA CASO 2.....            | 58 |
| FIGURA 44: PUNTOS DE SALIDA DEL MODELO SW PARA EL CASO 1 (IZQUIERDA) Y 2 (DERECHA).....        | 60 |
| FIGURA 45: CAPA DE ESPONJA EN MODELO ELÍPTICO EMS PARA EL CASO 1. ....                         | 62 |
| FIGURA 46: CAPAS DE ESPONJA EN MODELO ELÍPTICO EMS PARA EL CASO2. ....                         | 62 |
| FIGURA 47: BATIMETRÍA MODELO PARABÓLICO PMS PARA EL CASO 1 CON BORDES POSITIVOS (VALOR 10). .  | 64 |
| FIGURA 48: SISTEMA DE COORDENADAS POLARES. ....  | 65 |
| FIGURA 49: DIAGRAMA WIEGEL ESCALADO EN BASE A LONGITUD DE ONDA Y COORDENADAS POLARES.....      | 66 |
| FIGURA 50: DIAGRAMA JHONSON ESCALADO EN BASE A LONGITUD DE ONDA Y COORDENADAS POLARES. ....    | 66 |
| FIGURA 51: RESULTADO MIKE 21 SW, EMS, PMS PARA EL CASO 1. ....                                 | 68 |
| FIGURA 52: RESULTADO MIKE 21 SW, EMS, PMS PARA EL CASO 2. ....                                 | 69 |
| FIGURA 53: ISOLÍNEAS DE LA SIMULACIÓN ELÍPTICA (IZQUIERDA) Y PARABÓLICA (DERECHA).....         | 70 |
| FIGURA 54: PERFIL TRANSVERSAL DE LAS ALTURAS DE OLAJE ELÍPTICO VS PARABÓLICO. ....             | 70 |
| FIGURA 55: PERFIL LONGITUDINAL DE LAS ALTURAS DE OLAJE ELÍPTICO VS PARABÓLICO. ....            | 71 |
| FIGURA 56: PERFIL TRANSVERSAL PARA MODELO ESPECTRAL - CASO 2. ....                             | 72 |
| FIGURA 57: PERFIL LONGITUDINAL PARA MODELO ESPECTRAL - CASO 2. . ....                          | 72 |
| FIGURA 58: ELEVACIÓN DE SUPERFICIE MIKE 21 EMS (IZQUIERDA) VS PMS (DERECHA) - CASO 2. ....     | 73 |
| FIGURA 59: ELEVACIÓN DE SUPERFICIE MIKE 21 EMS (ABAJO) VS PMS (ARRIBA) - CASO 1.....           | 73 |
| FIGURA 60: GRÁFICO DE BARRAS PARA EL CASO 1 VS WIEGEL.....                                     | 76 |
| FIGURA 61: GRÁFICO DE BARRAS PARA EL CASO 2 VS JHONSON. ....                                   | 76 |
| FIGURA 62: BAHÍA DE VALPARAÍSO, V REGIÓN CHILE. ....   | 80 |
| FIGURA 63: PUNTA ÁNGELES - BAHÍA DE VALPARAÍSO.....  | 81 |
| FIGURA 64: UBICACIÓN DE LA BOYA S4ADW- BAHÍA DE VALPARAÍSO. ....                               | 82 |
| FIGURA 65: NODO DE AGUAS PROFUNDAS DEL MODELO OLAS-CHILE II PARA VALPARAÍSO. ....              | 83 |
| FIGURA 66: SUPERPOSICIÓN DE CARTAS NÁUTICAS Y GEBCO EN VALPARAÍSO, V REGIÓN DE CHILE. ....     | 84 |
| FIGURA 67: SUPERPOSICIÓN DE FUENTES BATIMÉTRICAS PARA LA BAHÍA DE VALPARAÍSO. ....             | 85 |
| FIGURA 68: SERIE DE TIEMPO DE ALTURAS DE OLA REGISTRADAS POR LA BOYA.....                      | 86 |
| FIGURA 69: MATRIZ CON MARCAS DE CLASE PARA PROPAGACIÓN DE SERIES DE TIEMPO. ....               | 89 |
| FIGURA 70: METODOLOGÍA DE TRANSFERENCIA DE OLAJE DE AGUAS PROFUNDAS HACIA LA COSTA. ....       | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 71: MALLA BATIMÉTRICA MIKE21-SW, BAHÍA DE VALPARAÍSO.....                                | 90  |
| FIGURA 72: OLEAJE INCIDENTE EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO.....                                      | 91  |
| FIGURA 73: ZONA LÍMITE DE OLEAJE PENETRANTE EN LA BAHÍA, CASO SUR. ....                         | 92  |
| FIGURA 74: OUTPUT DEL MODELO MIKE21-SW, BAHÍA VALPARAÍSO. ....                                  | 92  |
| FIGURA 75: ACOPLÉ DE MALLAS DE CÁLCULO EN MODELOS SW-EMS-PMS. ....                              | 93  |
| FIGURA 76: MALLAS BATIMÉTRICAS MIKE21-EMS, 4TO CUADRANTE. BAHÍA DE VALPARAÍSO.....              | 94  |
| FIGURA 77: MALLAS BATIMÉTRICAS MIKE21-EMS, 3ER CUADRANTE. BAHÍA DE VALPARAÍSO.....              | 95  |
| FIGURA 78: MALLA BATIMÉTRICA PARA DIRECCIÓN W. BAHÍA DE VALPARAÍSO.....                         | 95  |
| FIGURA 79: MALLA DE CÁLCULO ORIENTADA EN DIRECCIÓN OESTE PARA MÓDULO PMS. ....                  | 97  |
| FIGURA 80: SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE PMS CON INTERFAZ DISIPATIVO. ....                       | 98  |
| FIGURA 81: SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE PMS SIN INTERFAZ DISIPATIVO.....                        | 99  |
| FIGURA 82: RESULTADO ESPECTRAL PARA CASOS DE DIRECCIONES SW-W-NW-N. T = 12[s].....              | 101 |
| FIGURA 83: COMPARACIÓN DE INCIDENCIA NORTE EN MODULO SW.....                                    | 102 |
| FIGURA 84: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA PROPAGACIÓN A PUNTO BOYA – COEF.DE AGITACIÓN. ...    | 103 |
| FIGURA 85: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA PROPAGACIÓN A PUNTO BOYA –COEF.DE DIRECCIÓN.....     | 103 |
| FIGURA 86: SERIE DE TIEMPO ALTURA Y PERIODO PROPAGADA SW VS BOYA - TRAMO 1.....                 | 104 |
| FIGURA 87: SERIE DE TIEMPO DE DIRECCIONES PROPAGADAS SW VS BOYA - TRAMO 1.....                  | 104 |
| FIGURA 88: SERIE DE TIEMPO ALTURA Y PERIODO PROPAGADA SW VS BOYA - TRAMO 2.....                 | 105 |
| FIGURA 89: SERIE DE TIEMPO DE DIRECCIONES PROPAGADAS SW VS BOYA - TRAMO 2.....                  | 105 |
| FIGURA 90: SERIE DE TIEMPO ALTURA Y PERIODO PROPAGADA SW VS BOYA - TRAMO 3.....                 | 106 |
| FIGURA 91: SERIE DE TIEMPO DE DIRECCIONES PROPAGADAS SW VS BOYA - TRAMO 3.....                  | 106 |
| FIGURA 92: RESULTADOS ELÍPTICOS PARA CASOS DE DIRECCIÓN SW-W-N-NW. T = 12 [s]. ....             | 107 |
| FIGURA 93: SERIE DE TIEMPO ALTURA PROPAGADA EMS VS BOYA - TRAMO 1.....                          | 108 |
| FIGURA 94: SERIE DE TIEMPO ALTURA PROPAGADA EMS VS BOYA - TRAMO 2.....                          | 108 |
| FIGURA 95: SERIE DE TIEMPO ALTURA PROPAGADA EMS VS BOYA - TRAMO 3.....                          | 108 |
| FIGURA 96: RESULTADOS PARABÓLICOS - CASOS DE DIRECCIONES SW-W-N-NW CON T = 12 [s]. ....         | 109 |
| FIGURA 97: SERIE DE TIEMPO ALTURA PROPAGADA PMS VS BOYA - TRAMO 1.....                          | 110 |
| FIGURA 98: SERIE DE TIEMPO ALTURA PROPAGADA PMS VS BOYA - TRAMO 2.....                          | 110 |
| FIGURA 99: SERIE DE TIEMPO ALTURA PROPAGADA PMS VS BOYA - TRAMO 3.....                          | 110 |
| FIGURA 100: DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO. MIKE 21SW. DIR SW Y T=12 [s]. .. | 112 |
| FIGURA 101: ELEVACIÓN DE SUPERFICIE EN MODELOS EMS (DERECHA) Y PMS (IZQ.). VALPARAÍSO.....      | 112 |
| FIGURA 102: GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE ALTURAS CASO VALPARAISO, MIKE21-SW VS BOYA.....            | 113 |
| FIGURA 103: GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE ALTURAS CASO VALPARAÍSO, MIKE21-EMS VS BOYA.....           | 113 |
| FIGURA 104: GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE ALTURAS CASO VALPARAISO, MIKE21-PMS VS BOYA.....           | 114 |
| FIGURA 105: SERIES DE TIEMPO MIKE21 -SW-EMS-PMS VS BOYA PARA EL TRAMO 1.....                    | 115 |
| FIGURA 106: SERIES DE TIEMPO MIKE21-SW-EMS-PMS VS BOYA PARA EL TRAMO 2.....                     | 116 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 107: SERIES DE TIEMPO MIKE21-SW-EMS-PMS vs BOYA PARA EL TRAMO 3.....             | 116 |
| FIGURA 108: PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA ENTRE LOS MODELOS VERSUS LA BOYA S4ADW.....   | 117 |
| FIGURA 109: ROSAS DE OLAJE PARA LOS 3 TRAMOS EN LA BOYA.....                            | 128 |
| FIGURA 110: COEFICIENTES DE AGITACIÓN COMO INPUT DE ENTRADA PARA MODELOS EMS Y PMS..... | 130 |
| FIGURA 111: COEFICIENTE DIRECCIONAL COMO INPUT DE ENTRADA PARA MODELOS EMS Y PMS.....   | 130 |
| FIGURA 112: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 131 |
| FIGURA 113: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 132 |
| FIGURA 114: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 133 |
| FIGURA 115: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 134 |
| FIGURA 116: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 135 |
| FIGURA 117: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 136 |
| FIGURA 118: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 137 |
| FIGURA 119: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 138 |
| FIGURA 120: MODELOS DE MIKE21 SW - CASO N.....  | 139 |
| FIGURA 121: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=22[s].....                                | 140 |
| FIGURA 122: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=20[s].....                                | 140 |
| FIGURA 123: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=18[s].....                                | 140 |
| FIGURA 124: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=16[s].....                                | 141 |
| FIGURA 125: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=14[s].....                                | 141 |
| FIGURA 126: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=12[s].....                                | 141 |
| FIGURA 127: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=10[s].....                                | 142 |
| FIGURA 128: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO N, T=8[s].....                                 | 142 |
| FIGURA 129: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=22[s].....                              | 142 |
| FIGURA 130: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=20[s].....                              | 143 |
| FIGURA 131: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=18[s].....                              | 143 |
| FIGURA 132: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=16[s].....                              | 143 |
| FIGURA 133: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=14[s].....                              | 144 |
| FIGURA 134: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=12[s].....                              | 144 |
| FIGURA 135: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=10[s].....                              | 144 |
| FIGURA 136: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NNW, T=8[s].....                               | 145 |
| FIGURA 137: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=22[s].....                               | 145 |
| FIGURA 138: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=20[s].....                               | 145 |
| FIGURA 139: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=18[s].....                               | 146 |
| FIGURA 140: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=16[s].....                               | 146 |
| FIGURA 141: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=14[s].....                               | 146 |
| FIGURA 142: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=12[s].....                               | 147 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 143: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=10[s].  | 147 |
| FIGURA 144: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO NW, T=8[s].   | 147 |
| FIGURA 145: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WNW, T=22[s]. | 148 |
| FIGURA 146: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WNW, T=20[s]. | 148 |
| FIGURA 147: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WNW, T=18[s]. | 148 |
| FIGURA 148: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WNW, T=16[s]. | 149 |
| FIGURA 149: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WNW, T=14[s]. | 149 |
| FIGURA 150: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WNW, T=12[s]. | 149 |
| FIGURA 151: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WNW, T=10[s]. | 150 |
| FIGURA 152: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=22[s].   | 150 |
| FIGURA 153: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=20[s].   | 150 |
| FIGURA 154: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=18[s].   | 151 |
| FIGURA 155: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=16[s].   | 151 |
| FIGURA 156: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=14[s].   | 151 |
| FIGURA 157: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=12[s].   | 152 |
| FIGURA 158: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=10[s].   | 152 |
| FIGURA 159: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO W, T=8[s].    | 152 |
| FIGURA 160: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=22[s]. | 153 |
| FIGURA 161: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=20[s]. | 153 |
| FIGURA 162: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=18[s]. | 153 |
| FIGURA 163: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=16[s]. | 154 |
| FIGURA 164: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=14[s]. | 154 |
| FIGURA 165: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=12[s]. | 154 |
| FIGURA 166: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=10[s]. | 155 |
| FIGURA 167: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO WSW, T=8[s].  | 155 |
| FIGURA 168: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=22[s].  | 155 |
| FIGURA 169: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=20[s].  | 156 |
| FIGURA 170: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=18[s].  | 156 |
| FIGURA 171: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=16[s].  | 156 |
| FIGURA 172: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=14[s].  | 157 |
| FIGURA 173: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=12[s].  | 157 |
| FIGURA 174: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=10[s].  | 157 |
| FIGURA 175: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SW, T=8[s].   | 158 |
| FIGURA 176: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=22[s]. | 158 |
| FIGURA 177: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=20[s]. | 158 |
| FIGURA 178: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=18[s]. | 159 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 179: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=16[s]. | 159 |
| FIGURA 180: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=14[s]. | 159 |
| FIGURA 181: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=12[s]. | 160 |
| FIGURA 182: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=10[s]. | 160 |
| FIGURA 183: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO SSW, T=8[s].  | 160 |
| FIGURA 184: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO S, T=22[s].   | 161 |
| FIGURA 185: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO S, T=20[s].   | 161 |
| FIGURA 186: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO S, T=18[s].   | 161 |
| FIGURA 187: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO S, T=16[s].   | 162 |
| FIGURA 188: MODELOS DE MIKE21 EMS - CASO S, T=14[s].   | 162 |
| FIGURA 189: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=22[s].   | 163 |
| FIGURA 190: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=20[s].   | 163 |
| FIGURA 191: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=18[s].   | 163 |
| FIGURA 192: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=16[s].   | 164 |
| FIGURA 193: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=14[s].   | 164 |
| FIGURA 194: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=12[s].   | 164 |
| FIGURA 195: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=10[s].   | 165 |
| FIGURA 196: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=8[s].    | 165 |
| FIGURA 197: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO N, T=6[s].    | 165 |
| FIGURA 198: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=22[s]. | 166 |
| FIGURA 199: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=20[s]. | 166 |
| FIGURA 200: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=18[s]. | 166 |
| FIGURA 201: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=16[s]. | 167 |
| FIGURA 202: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=14[s]. | 167 |
| FIGURA 203: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=12[s]. | 167 |
| FIGURA 204: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW T=10[s].  | 168 |
| FIGURA 205: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=8[s].  | 168 |
| FIGURA 206: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NNW, T=6[s].  | 168 |
| FIGURA 207: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=22[s].   | 169 |
| FIGURA 208: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=20[s].   | 169 |
| FIGURA 209: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=18[s].   | 169 |
| FIGURA 210: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=16[s].   | 170 |
| FIGURA 211: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=14[s].   | 170 |
| FIGURA 212: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=12[s].   | 170 |
| FIGURA 213: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=10[s].   | 171 |
| FIGURA 214: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=8[s].    | 171 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 215: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO NW T=6[s].   | 171 |
| FIGURA 216: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WNW T=22[s]. | 172 |
| FIGURA 217: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WNW T=20[s]. | 172 |
| FIGURA 218: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WNW T=18[s]. | 172 |
| FIGURA 219: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WNW T=16[s]. | 173 |
| FIGURA 220: MODELOS DE MIKE21 PMS – CASO WNW T=14[s]. | 173 |
| FIGURA 221: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WNW T=12[s]. | 173 |
| FIGURA 222: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WNW T=10[s]. | 174 |
| FIGURA 223: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WNW T=8[s].  | 174 |
| FIGURA 224: MODELOS DE MIKE21 PMS – CASO WNW T=6[s].  | 174 |
| FIGURA 225: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=22[s].   | 175 |
| FIGURA 226: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=20[s].   | 175 |
| FIGURA 227: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=18[s].   | 175 |
| FIGURA 228: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=16[s].   | 176 |
| FIGURA 229: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=14[s].   | 176 |
| FIGURA 230: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=12[s].   | 176 |
| FIGURA 231: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=10[s].   | 177 |
| FIGURA 232: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=8[s].    | 177 |
| FIGURA 233: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO W T=6[s].    | 177 |
| FIGURA 234: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=22[s]. | 178 |
| FIGURA 235: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=20[s]. | 178 |
| FIGURA 236: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=18[s]. | 178 |
| FIGURA 237: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=16[s]. | 179 |
| FIGURA 238: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=14[s]. | 179 |
| FIGURA 239: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=12[s]. | 179 |
| FIGURA 240: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=10[s]. | 180 |
| FIGURA 241: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=8[s].  | 180 |
| FIGURA 242: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO WSW T=6[s].  | 180 |
| FIGURA 243: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=22[s].  | 181 |
| FIGURA 244: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=20[s].  | 181 |
| FIGURA 245: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=18[s].  | 181 |
| FIGURA 246: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=16[s].  | 182 |
| FIGURA 247: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=14[s].  | 182 |
| FIGURA 248: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=12[s].  | 182 |
| FIGURA 249: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=10[s].  | 183 |
| FIGURA 250: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=8[s].   | 183 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 251: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SW T=6[s].....     | 183 |
| FIGURA 252: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=22[s]. ..... | 184 |
| FIGURA 253: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=20[s]. ..... | 184 |
| FIGURA 254: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=18[s]. ..... | 184 |
| FIGURA 255: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=16[s]. ..... | 185 |
| FIGURA 256: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=14[s]. ..... | 185 |
| FIGURA 257: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=12[s]. ..... | 185 |
| FIGURA 258: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=10[s]. ..... | 186 |
| FIGURA 259: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=8[s]. .....  | 186 |
| FIGURA 260: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO SSW T=6[s]. .....  | 186 |
| FIGURA 261: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=22[s]. .....   | 187 |
| FIGURA 262: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=20[s]. .....   | 187 |
| FIGURA 263: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=18[s]. .....   | 187 |
| FIGURA 264: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=16[s]. .....   | 188 |
| FIGURA 265: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=14[s]. .....   | 188 |
| FIGURA 266: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=12[s]. .....   | 188 |
| FIGURA 267: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=10[s]. .....   | 189 |
| FIGURA 268: MODELOS DE MIKE21 PMS - CASO S T=8[s]. .....    | 189 |
| FIGURA 269: MODELOS DE MIKE21 PMS – CASO S T=6[s]. .....    | 189 |

## **RESUMEN**

En la práctica actual, para replicar el fenómeno de difracción, asomeramiento y refracción del oleaje en su proceso de transición, son empleados generalmente modelos del tipo Boussinesq (hiperbólicos). Pese a esto, no se usa para aguas profundas debido a que las ecuaciones del modelo están limitadas por profundidad (ecuaciones débilmente no lineales) y además requiere de un alto recurso computacional. Ésta razón motiva a evaluar modelos cuyas soluciones provienen de la ecuación de la pendiente suave, que utilizan un menor recurso computacional y que no poseen límites de profundidad.

El presente trabajo se centra en la evaluación y análisis del estado del arte relativo a modelos matemáticos del software *Mike21*, en su versión espectral, elíptica y parabólica, cuyos últimos dos contienen ecuaciones que permiten ser empleados para el estudio de la difracción del oleaje. En primer lugar son aplicados a casos con batimetrías idealizadas (benchmarks) en condiciones de aguas profundas, y posteriormente a un caso práctico en la Bahía de Valparaíso - V Región de Chile, que presenta una batimetría irregular, y además se encuentra bajo la influencia de la Punta Ángeles quien domina la difracción del lugar.

Los parámetros del oleaje propagados en el caso práctico corresponden a datos del modelo Olas-Chile II, mientras que para los casos idealizados se utilizan alturas de olas unitarias.

Para analizar, comparar y validar los resultados de los casos benchmarks se utilizaron los coeficientes de difracción obtenidos de los diagramas de Wiegel y Jhonson. Mientras que para el caso de la bahía de Valparaíso se cuenta con el registro de la boya S4ADW, frente a muelle Barón, que contrarresta las simulaciones de los modelos versus la medición in situ.

Los resultados finales de los modelos evaluados presentan diferencias notables a la hora de calcular la difracción en Valparaíso cuando éste es el principal fenómeno de interés en un fondo variable. Sin embargo, para casos en donde la pendiente de la playa es escasa, como lo son los benchmarks (profundidad constante), la distribución de direcciones y alturas es mejor definida por las ecuaciones elípticas y parabólicas, mientras que el modelo espectral presenta una distribución energética menos precisa en contraste con las soluciones gráficas de Wiegel y Jhonson.

# **1 INTRODUCCIÓN**

Uno de los aspectos más importantes de la agitación inducida por el oleaje en zonas portuarias y costeras es la difracción. Éste se caracteriza por la cesión lateral de energía a lo largo de la cresta, y por lo tanto, en la dirección perpendicular a la dirección predominante de la propagación cuando la amplitud presenta una discontinuidad o grandes variaciones (G.I.O.C G. d., 2000a). La difracción tiene especial importancia en el diseño portuario y en el estudio de propagación de las ondas, especialmente cuando se dan zonas de alta concentración de energía.

Las primeras propuestas para estudiar el fenómeno mencionado anteriormente, aparecen a partir de los diagramas de difracción (Wiegel, 1964), sin embargo, en la actualidad existen diferentes técnicas de modelado que se usan para representarla, así lo indica (Iñigo J. Losada, 2000b) en su artículo “modelos matemáticos y numéricos para el estudio de la agitación portuaria” donde se realiza una revisión de técnicas de modelado consideradas en estudios de agitación portuaria, en el cual manifiesta que existen modelos que trabajan resolviendo la fase de la onda como el modelo Boussinesq que son comúnmente usados, pero que tienen limitaciones de profundidad y gastan mayor recurso computacional (Philip L.-F.Liu, 2000), mientras que otros modelos, como el *mike21 SW*, trabajan en base al dominio espectral utilizando menor recurso.

Dentro de los modelos que trabajan en el dominio de la fase se encuentran los que consideran la aproximación impuesta por la ecuación de la pendiente suave derivada por Berkhoff, J (1976). De ella se derivan distintas soluciones numéricas que simulan diferentes transformaciones del oleaje, donde las aproximaciones parabólicas y elípticas son las presentadas en ésta memoria.

El objetivo de ésta tesis radica en aplicar, evaluar y comparar los métodos anteriormente señalados para ver las diferencias que éstos tienen en cuanto a la simulación de la evolución del oleaje en el transcurso de su propagación en diferentes casos de aplicación.

El primer caso de aplicación considera 2 mallas batimétricas idealizadas con profundidad constante en presencia de rompeolas, para inducir la difracción, mientras que el segundo caso considera modelar la bahía de Valparaíso, ubicado en la V Región de Chile, quien cuenta con una fuerte influencia a efectos difractivos producto de la presencia de Punta Ángeles.

Para el desarrollo de esta memoria se utilizaron los programas computacionales *Mike 21* en su versión *EMS*, *PMS* y *SW* otorgadas por la licencia DHI Canadá, además de los datos de oleaje en aguas profundas (parámetros de resumen) proporcionados por la Universidad de Valparaíso, y los datos batimétricos y mediciones in situ del sector de estudio facilitados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

## **2 OBJETIVOS**

### **El objetivo general de la presente memoria de título es:**

- Evaluar y comparar técnicas de modelado con esquema numérico parabólico, elíptico y espectral para definir el oleaje en zonas de difracción para condiciones de aguas de profundidad relativa intermedia, aplicada a la bahía de Valparaíso, mediante el uso de software Mike 21 en sus módulos SW, EMS y PMS.

### **Objetivos específicos:**

- Indicar diferentes técnicas o métodos de modelado apropiados para representar el oleaje en zonas de difracción.
- Análisis de formulaciones de las ecuaciones de gobierno de la teoría lineal del oleaje y de la ecuación de la pendiente suave.
- Realizar propagaciones de oleaje unitario en casos prácticos, usando los esquemas numéricos espectral, elíptico y parabólico, considerando batimetrías idealizadas (Benchmarks) con profundidad constante y en condición de aguas profundas.
- Realizar propagaciones de oleaje desde aguas profundas hacia la zona de interés utilizando el esquema numérico elíptico, parabólico y espectral usando la batimetría de la Bahía de Valparaíso.
- Validar o no los modelos elípticos EMS, parabólicos PMS y espectral SW del Mike 21, mediante comparación con datos medidos del lugar facilitados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).
- Analizar el resultado obtenido y recomendar una herramienta confiable que produzca representatividad de los datos en el sector, para considerarla en futuras obras marítimas en la bahía de Valparaíso, basándose en el aprendizaje que se obtuvo con los antecedentes y análisis previo de estas técnicas.

# MARCO TEÓRICO

### 3 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen todos los conceptos utilizados en el desarrollo de esta memoria, comenzando por describir los elementos relacionados con el oleaje, tales como su definición, generación, transformación, teorías y derivación matemática de éstas. Posteriormente se explica el origen y aplicación de la ecuación de la pendiente suave en su versión elíptica y su consecutiva derivación a la aproximación parabólica. Finalmente, se describen y clasifican los modelos numéricos existentes en base a los conceptos asociados a la propagación del oleaje.

#### 3.1 OLAJE

Rosales (2005), define al oleaje como una sucesión de ondas que viajan sobre una superficie de agua, las cuales se propagan desde mar adentro hacia la costa, presentando diferentes formas, direcciones, alturas (H) y periodos irregulares (T) las cuales corresponden al tiempo transcurrido entre crestas sucesivas. De acuerdo a como éstas se generan, existen diversos tipos de ondas en el océano. Sin embargo, éste estudio considera únicamente las ondas generadas por viento.

En general, las ondas, se pueden clasificar de acuerdo a sus periodos o longitudes. La Figura 1 muestra, de forma esquemática, la energía de las ondas de superficie asociada a cada frecuencia. Donde puede observarse que el tipo de ondas superficiales abarca desde onda capilares con periodos inferiores a 1 segundo hasta oscilaciones inducidas por el mar con periodos del orden de horas e incluso días.

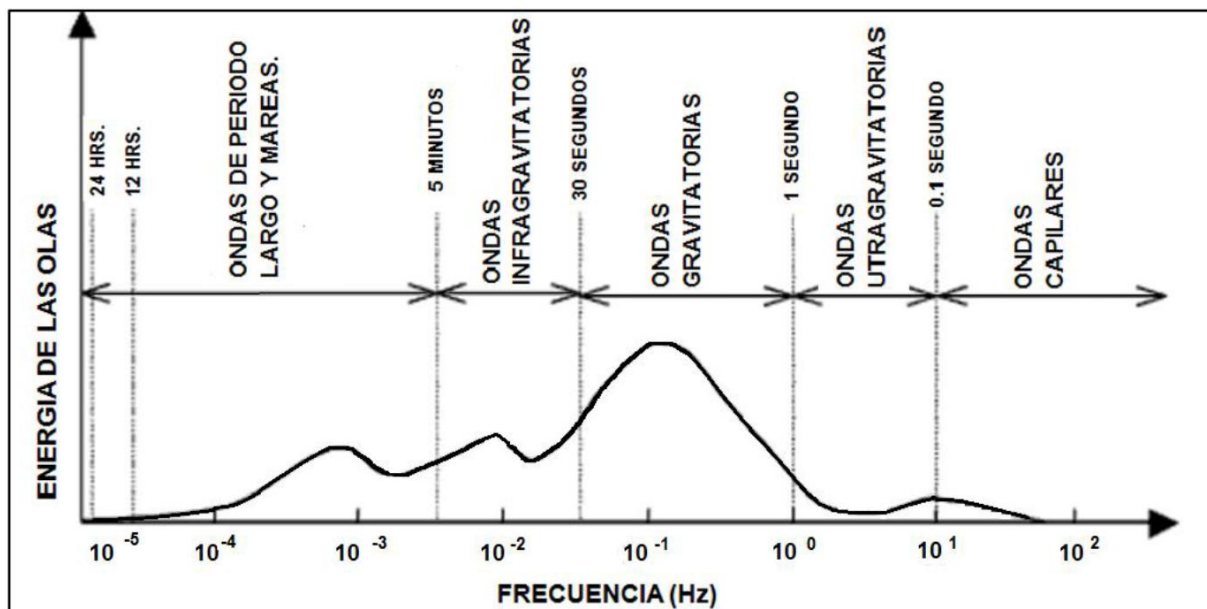


Figura 1: Clasificación de las olas

Fuente: Adaptado de Kinsman (1965).

Es importante tener presente que el oleaje representa una de las fuentes dominantes de energía en gran parte de las zonas costeras, interviniendo de manera significativa en la circulación, transporte de sedimentos y la modelación de las costas, entre otros factores (Wright y Coleman, 1973). En este contexto, el conocimiento de los procesos de oleaje permite comprender mejor la dinámica de los sistemas costeros, que dependen de un amplio conjunto de parámetros hidrodinámicos, atmosféricos, morfológicos y biológicos (Haslett, 2000).

### 3.2 GENERACION DEL OLAJE

Los mecanismos de generación no se conocen con precisión, pero principalmente se deben a turbulencias e inestabilidades en la interfaz aire-agua, según Miles J.W. (1957), Phillips O. M. (1966) y Snyder, R.L. y Ch. S. Cox. (1966), donde además indican que el viento origina el oleaje, pero no existe una teoría científica satisfactoria que nos permita construir una función puramente analítica para describir su crecimiento.

Debido a esto, se considera al proceso de generación de oleaje como una caja negra (funciones de transferencia de energía) que entrega una descripción cualitativa del mecanismo de generación y propagación del oleaje explicada de la siguiente manera por Miles y Phillips, (1957) y Munk (1951).

“De la radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra, una fracción se invierte en un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmosfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire (viento) de mayor o menor intensidad, viento que al rozar sobre la superficie del mar trae como consecuencia la generación de oleaje, el cual actúa como un acumulador de energía que se almacena y se transporta de un lugar a otro; la intensidad del oleaje depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual éste transmite energía a la superficie del agua”.

Al soplar el viento sobre el océano, transfiere energía y momento a su capa superficial. Las fluctuaciones del viento provocan fluctuaciones en la tensión normal (presión) y tangencial a la superficie del mar, generando ondas capilares que evolucionan hasta formar el oleaje, ver Figura 2.

Las ondas capilares, con longitudes de onda de pocos centímetros, tienen un papel esencial en la formación del oleaje por el viento, pero una vez generado éste, tienen un papel despreciable en su evolución. Una particularidad de estas ondas es que adicionalmente a la fuerza gravitatoria, la tensión superficial actúa en ellas como una fuerza que trata de restablecer el equilibrio.

Al crecer estas ondas en tamaño, la tensión superficial pasa a ser despreciable en su evolución y comienza a crecer el oleaje, primero de una forma lineal con el tiempo y luego de una forma exponencial. Dentro de este proceso, las componentes de alta frecuencia crecen rápidamente para luego disipar o transferir su energía (disipación-transferencia) a frecuencias bajas.

El oleaje en sí, comienza después de soplar el viento durante horas a lo largo de un área de la superficie del océano del orden de kilómetros (*fetch*). En esta fase del crecimiento, existe una diferencia de presión normal en la cara anterior y la cara posterior de la ola, y ésta crece por arrastre. Para vientos superiores a 7 - 8 [m/s] aparece espuma en la parte superior de las olas provocada por la rotura de las crestas (Munk, 1951), ver Figura 3.



**Figura 2: Ondas capilares**

Fuente: <http://nuvoldepoma.blogspot.com>

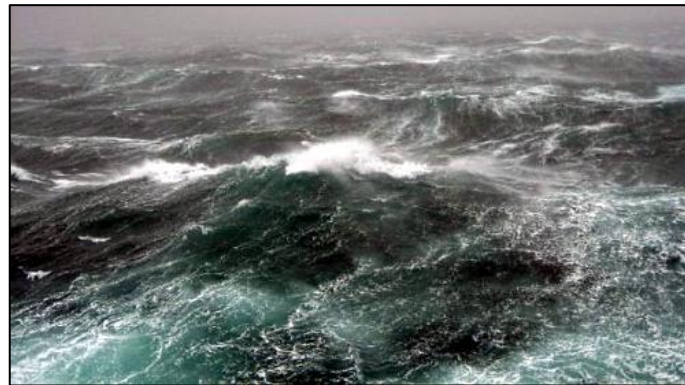


**Figura 3: Oleaje en aguas profundas**

Fuente: <http://nuvoldepoma.blogspot.com>

El crecimiento continúa hasta llegar a una fase de equilibrio en la que la absorción de momento es igual a la pérdida producida por rotura de la ola. En el proceso, intervienen tensiones tangenciales de arrastre por el viento, formación de ondas capilares, roturas de las crestas, variaciones en el peralte de las olas (relación entre la altura y la longitud de onda) y otros fenómenos cuyo papel no es del todo conocido.

El oleaje en formación (*sea*) es irregular y de periodo corto, donde las longitudes de onda rara vez sobrepasan los 100 [m], y los periodos se mantienen por debajo de 8 [s] (Munk, 1951), ver Figura 4. Luego, aparecen olas más regulares de periodo largo cuya energía proviene de las olas anteriores. Estas se desplazan más rápidamente que el viento que las generó y por tanto abandonan la zona de generación originando así el oleaje regular (*swell*), donde sus crestas largas conservan prácticamente intacta su energía durante largas distancias (hasta miles de kilómetros, Figura 5).



**Figura 4: Oleaje tipo Sea.**

Fuente: <http://adnnavivo.wordpress.com/2011/01/12/las-olas-ritmo-y-movimiento/>

Al aumentar la distancia, las alturas de las olas disminuyen, las longitudes de onda pueden alcanzar varios centenares de metros, y los periodos pueden alcanzar los 25 [s].



**Figura 5: Oleaje tipo Swell**

Fuente: <http://www.surf30.net/2011/03/ha-sido-bueno-este-invierno.html>

A medida que el oleaje se aleja de la zona de generación experimenta una modificación en su distribución de períodos, desde un espectro de frecuencias altas (olas cortas) a uno de frecuencias menores (olas largas). Este fenómeno se debe a la transferencia no lineal de frecuencias.

Posteriormente, el oleaje llega a alguna zona en la que comienza a notar los efectos del fondo (fricción, cambios bruscos del fondo marino, interacción con corrientes). Luego al desplazarse más lentamente en estas zonas, conserva su periodo, la longitud de onda se reduce y aumenta la altura de las olas. En ese momento comienza a sufrir pérdidas de energía por rozamiento con el fondo y también puede cambiar su dirección por refracción y difracción. Si pasa por zonas en las que la profundidad o la corriente estén cambiando rápidamente en el tiempo, también cambia el periodo del oleaje (Munk, 1951).

Finalmente, al llegar a la costa, las olas terminan por romper y su energía se disipa de varias formas distintas (Figura 6).



**Figura 6: Oleaje llegando a la costa (zona de rotura).**

Fuente: <http://visionesdeferrolterra.blogspot.com/2012/10/senda-litoral-costa-artabra-santa-comba.html>

En resumen, para que se genere el oleaje se necesitan tres parámetros:

- a) Velocidad del viento
- b) Duración del viento
- c) Fetch o longitud de la zona de generación en la dirección del viento.

Existen otros fenómenos generadores de olas, tales como los terremotos, mareas, corrientes y erupciones volcánicas submarinas, pero, como se mencionó anteriormente, las olas generadas por viento serán las de interés para este estudio.

### 3.3 CLASIFICACIÓN DEL OLAJE

De acuerdo a lo anteriormente citado, existen diferentes tipos de ondas, según Kinsman (1965), éstas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Conforme al periodo:  
Ondas Capilares, Ondas de Gravedad, Ondas de periodo largo y Ondas de transmarea.
- b) Conforme a la altura de onda:  
Ondas de amplitud pequeña (Teoría de Airy) y Ondas de amplitud finita.
- c) Conforme al desplazamiento de la cresta:  
Crestas progresivas y Crestas estacionarias.
- d) Conforme a la profundidad relativa (delimitada por  $d/L$ ):  
Esta clasificación es una de las más importantes tanto desde el punto de vista teórico como práctico. Según la relación que hay entre la profundidad ( $d$ ) en la cual se propaga el oleaje y la longitud de la onda ( $L$ ), se pueden dividir en ondas en aguas profundas, intermedias y someras.

Desde el punto de vista teórico (considerando la teoría lineal y la ecuación de dispersión) e ingenieril, para clasificar a las ondas con ese criterio se pueden aceptar los valores indicados en la Tabla 1.

| Tipos de aguas    | $d/L$<br>Teórico   |
|-------------------|--------------------|
| Aguas Profundas   | $d/L > 1/2$        |
| Aguas Intermedias | $1/2 < d/L < 1/20$ |
| Aguas Someras     | $d/L < 1/20$       |

**Tabla 1: Clasificación de las ondas conforme a la profundidad relativa.**

Fuente: (G.I.O.C, 2000a)

- e) Conforme al tiempo de aplicación instantánea de una fuerza o acción perturbadora:  
El oleaje donde la fuerza restauradora es la gravedad, se origina por la transferencia de energía del viento sobre la superficie del agua y se clasifica en dos tipos:

Oleaje Local (Oleaje por viento sea), el cual se genera en el área denominada como *fetch*, por lo general el oleaje es caótico, presenta periodos y longitudes cortas, superficie irregular cambiante, además de viajar en todas direcciones.

Oleaje Distante (Oleaje de fondo *swell*), se presenta cuando sale de la zona de generación y la influencia del viento se puede considerar despreciable, éste oleaje presenta longitudes de ola que llegan a alcanzar hasta cientos de metros con periodo y alturas irregulares, pero con dirección más definida.

A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 7, una caracterización espectral (energía) de oleaje para diferenciar el oleaje tipo sea y swell. A medida que aumenta la distancia al área de generación, el espectro se hace más estrecho.

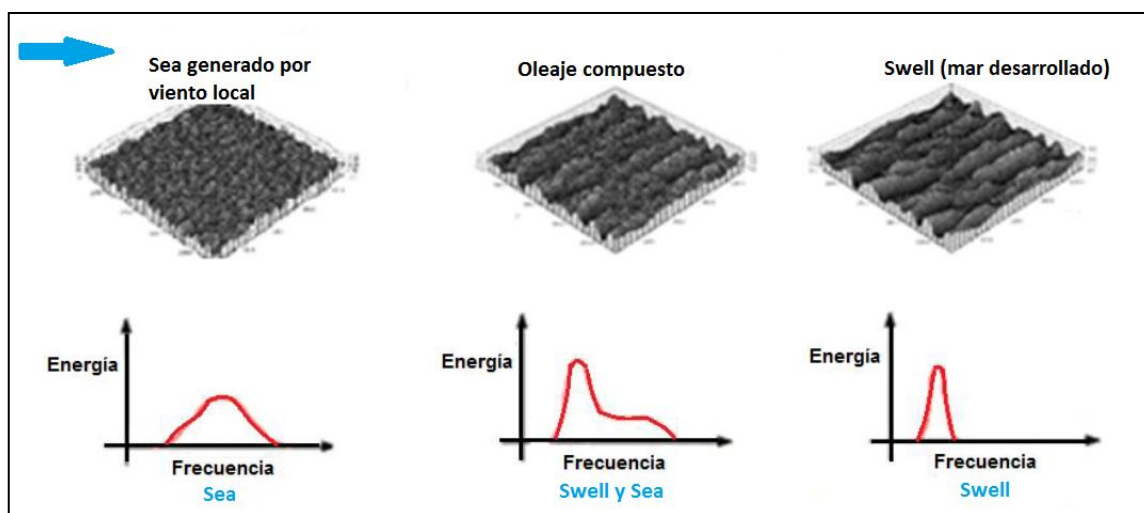


Figura 7: Espectro de oleaje Valparaíso, oleaje Sea & Swell.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestran los diferentes tipos de onda con sus mecanismos generadores, periodo y longitudes características así como fuerzas de control.

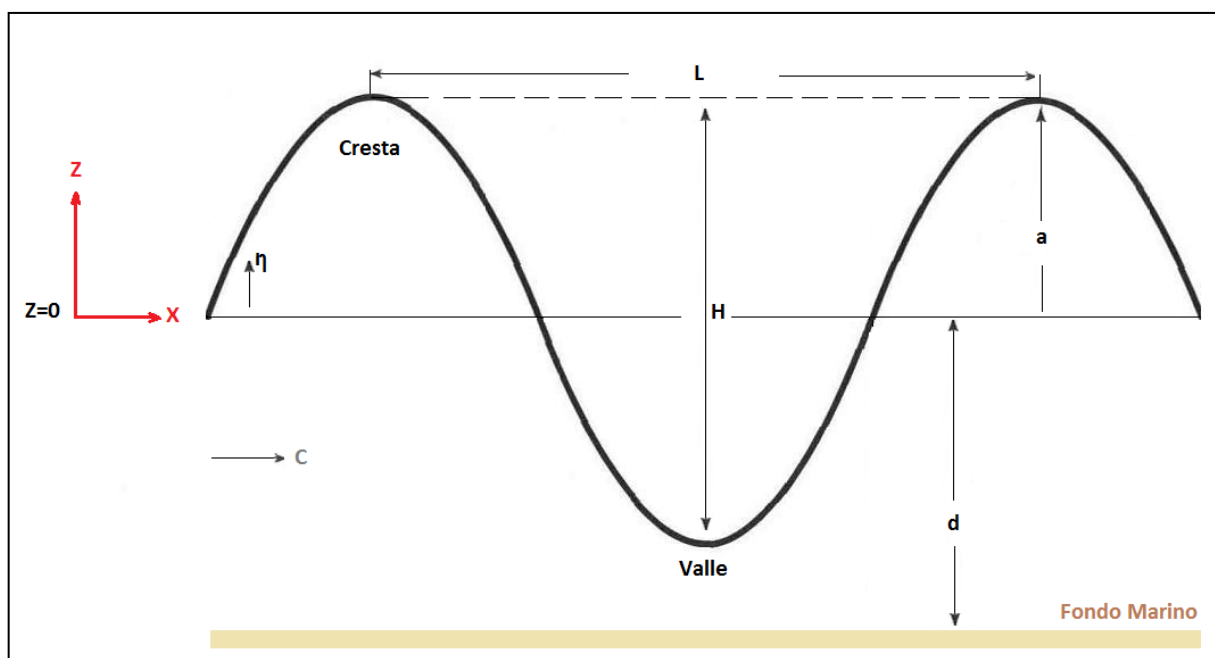
| Movimiento                 | Periodo o Longitud                | Fuerza generadora                           | Fuerza de control             | Ejemplos                     |
|----------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| Corrientes oceánicas       | $10^6$ m                          | Gradiente de densidad y viento              | Fricción, coriolis, gravedad. | Corrientes de <i>golfo</i> . |
| Corrientes costeras        | $10^5$ m                          | Viento y corrientes oceánicas               | Fricción, coriolis, gravedad. | Afloramientos                |
| Corrientes de rotura       | $10^3$ m                          | Ondas gravitatorias                         | Fricción, gravedad            | Corrientes de retorno        |
| Corrientes de marea        | $10^3$ m                          | Marea astronómica                           | Fricción, gravedad            | Bahías y estuarios           |
| Ondas capilares            | $0.1s / 10^{-2}$ m                | Viento                                      | Tensión superficial, gravedad | Rizado del viento            |
| Ondas ultragravitatorias   | $0.1 - 1$ s / 100m                | Viento                                      | Gravedad                      | Ondas de viento en un charco |
| Ondas gravitatorias        | $0.1 - 30s / 1 - 10^3$ m          | Viento y oleaje de viento                   | Fricción, gravedad            | Sea y Swell                  |
| Ondas infragravitatorias   | $30s - 5min / 10^3 - 10^5$ m      | Viento y ondas gravitatorias                | Fricción, coriolis, gravedad. | Ondas de borde.              |
| Ondas largas               | $5$ min / $10^5 - 10^6$ m         | Borrascas y terremotos                      | Fricción, coriolis, gravedad. | Tsunamis                     |
| Ondas de marea astronómica | $12 - 24$ hr / $10^7$ m           | Atracción de la Tierra / atracción luna sol | Fricción, coriolis, gravedad. | Marea astronómica            |
| Ondas transmareales        | $24$ hr / $10^7$ m                | Orbita solar / gravitacional                | Fricción, coriolis, gravedad. | Marea meteorológica          |
| Ondas internas             | $4$ min - $25$ hr / $10 - 10^5$ m | Borrascas ondas de gravedad                 | Fricción, coriolis, gravedad. | Ondas de densidad            |

Tabla 2: Resumen fuerzas generadoras y restauradoras del oleaje.

Fuente: G.I.O.C (2000a).

Para el problema analizado en el presente documento, las ondas más importantes son fundamentalmente las generadas por viento con periodos entre 6.0 y 22[s].

La forma más común de clasificar el oleaje es considerándolo sinusoidal (Figura 8). Se trata de una simplificación teórica, pero tiene la ventaja de su comodidad para el tratamiento matemático del oleaje real como descomposición y superposición de éste en varias ondas sinusoidales. De estas se derivan las teorías de oleaje conocidas en la actualidad.



**Figura 8: Onda sinusoidal.**

Fuente: Elaboración propia.

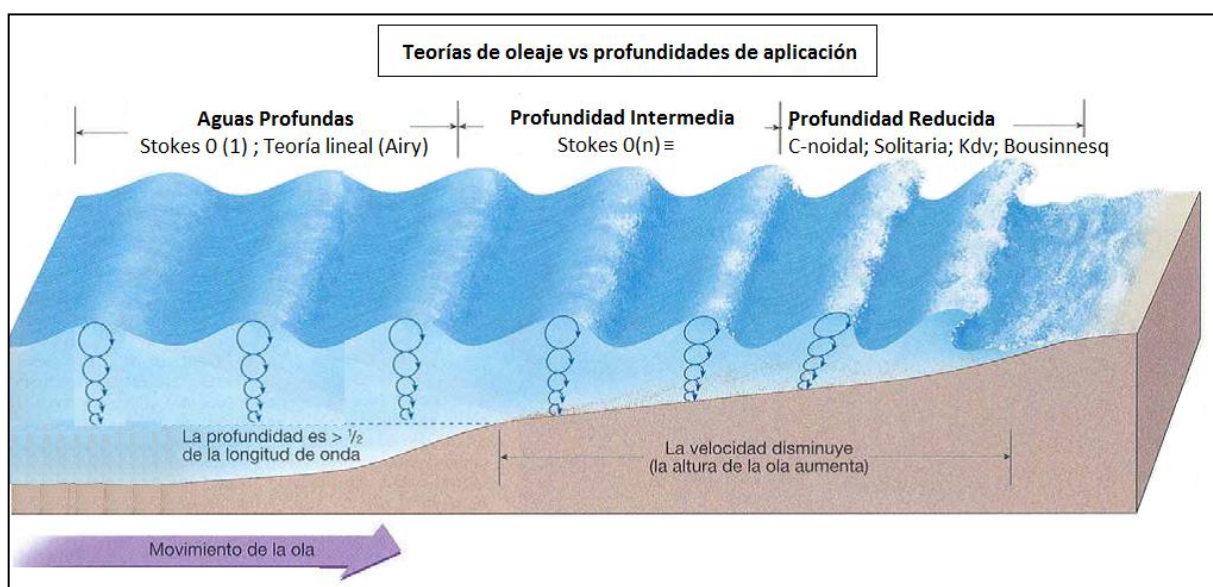
Dónde:

- L: Longitud de onda [m].
- H: Altura de ola [m].
- C: Celeridad de onda [m/s].
- d: Profundidad [m].
- $\eta$ : Desnivelación de la superficie de agua.
- a: Amplitud de la onda.

### 3.4 TEORÍAS DE OLAJE

Las teorías de olas, son formulaciones matemáticas que determinan los cambios en las propiedades de las olas (altura, periodo, velocidad de las partículas, etc.) cuando éstas abandonan las áreas de generación y comienzan a llegar a la costa, y que permiten estimar las características de las olas en aguas someras a partir de datos de aguas profundas, se remontan al siglo XIX. De esta forma, comenzando con los trabajos clásicos de Airy y Stokes, muchos científicos, ingenieros y matemáticos han postulado las diferentes formas de movimientos de las olas sobre el océano y sus interacciones con el viento, con variaciones en la complejidad y exactitud, poniéndose de manifiesto que en aguas someras la complejidad de las teorías aplicables es mayor que en aguas profundas (Engineers U. A., 2003).

Las teorías sobre generación y propagación de ondas pueden clasificarse en dos grandes grupos: la teoría sobre ondas de pequeña amplitud (Teoría lineal) que es ampliamente usada para describir ondas gravitatorias, sobre todo en aguas profundas; y en segundo lugar las teorías no lineales o amplitud finita, más adecuadas para su aplicación en aguas someras. La Figura 9 muestra sus profundidades de aplicación.



**Figura 9: Teorías de oleaje y sus profundidades de aplicación.**  
Fuente: Adaptación de <http://josabeth-geo-terra.blogspot.cl/p/semana-13.html>.

A continuación se detalla la teoría lineal del oleaje, sus hipótesis, ecuaciones de gobierno y condiciones de frontera que originan los parámetros del oleaje de Airy.

### **3.4.1 TEORÍA LINEAL DEL OLAJE**

Es la teoría de oleaje más simple, también denominada Teoría de Airy, en honor al primer autor que la derivó en 1845. Aunque tiene limitaciones en su aplicación, puede ser muy útil para describir los fenómenos principales en la propagación de ondas, cuyas hipótesis de partida se describen a continuación.

#### **3.4.1.1 HIPÓTESIS PARA LA TLO**

Los siguientes puntos corresponden a los supuestos y simplificaciones utilizados para obtener la TLO.

- El fluido es homogéneo e incompresible; (lo que implica que la densidad,  $\rho$ , es constante en el tiempo y el espacio).
- La tensión superficial puede ser despreciada.
- El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser despreciado.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El agua del mar carece de viscosidad.
- No existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino. El flujo es irrotacional<sup>1</sup>.
- El fondo del mar constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y espacio.
- Se suponen ondas de crestas largas.

Una vez establecidas las hipótesis, el siguiente paso para la derivación de la TLO, consiste en tener presente que cuando un fluido es irrotacional existe una función potencial ( $\phi$ ) tal que su derivada con respecto a una determinada dirección es la componente de velocidad en esa dirección (G.I.O.C, 2000a).

Para obtener la función potencial de velocidad, del cual se derivan los parámetros de oleaje como la ecuación de dispersión, es necesario solucionar directamente el problema de contorno utilizando las ecuaciones de continuidad, de Laplace, Bernoulli y Euler, aplicando métodos de resolución de ecuaciones diferenciales parciales y usando las condiciones de borde linealizadas.

---

<sup>1</sup>En un fluido en el que no se producen esfuerzos tangenciales no es posible inducir la rotación de las partículas, por ello para un fluido no viscoso, las partículas que no rotan se mantienen sin rotación, y el flujo se llama irrotacional (G.I.O.C, 2000a).

### 3.4.2 ECUACIÓN DE GOBIERNO Y CONDICIONES DE FRONTERA

La ecuación que rige el comportamiento del agua dentro del dominio en la que se define, es llamada ecuación de gobierno, y para resolverlas deben conocerse las características del flujo en los límites del dominio, también llamados condiciones de frontera o de contorno (ver Figura 10). La solución de una ecuación de gobierno puede ser analítica, cuando los conceptos y métodos matemáticos lo permitan, o a través de modelaciones numéricas las cuales dan solución al problema mediante esquemas numéricos.

La ecuación de continuidad o de conservación de la masa y la de conservación del movimiento derivada de la segunda ley de Newton, son las dos ecuaciones básicas que rigen el movimiento de los fluidos en todos los problemas de hidráulica. El movimiento de un fluido es descrito por las tres componentes de la velocidad, tres coordenadas espaciales y dos cantidades termodinámicas, la densidad y la presión del fluido. En la mayoría de las teorías de oleaje se utiliza la teoría del flujo potencial, en la que se asume que el flujo es irrotacional y que existe una función escalar llamada potencial de velocidades  $\phi(x, y, z, t)$ , cuyo gradiente representa al campo de velocidades  $\vec{u} = \nabla\phi$ . Para estos fines el agua puede considerarse incompresible, entonces la ecuación de continuidad del flujo queda representada por medio de la ecuación de Laplace, que es la ecuación de gobierno a resolver. Junto con la ecuación de gobierno, es necesario definir las condiciones de contorno de manera adecuada como se definen a continuación.

#### 3.4.2.1 FUNCIÓN POTENCIAL ( $\phi$ )

Despreciando la viscosidad y asumiendo un flujo irrotacional, existe una función llamada potencial de velocidad, cuyo gradiente es igual a la velocidad.

$$\nabla\phi = \vec{V}$$

Ecuación 1

Donde a partir de la combinación de la ecuación de continuidad para un flujo incompresible y el flujo potencial se obtiene la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0$$

Ecuación 2

A través de ella se pueden hallar las componentes de la velocidad  $u$  y  $w$ , representadas en la Ecuación 3, la cual implica que si se conoce el potencial  $\phi(x, z, t)$  en todo el ámbito del estudio, se pueden conocer también las velocidades de las partículas, mediante derivación bidimensional.

$$u = \frac{\partial\phi}{\partial x} ; w = \frac{\partial\phi}{\partial z}$$

Ecuación 3

### 3.4.3 CONDICIONES DE BORDE

Al aplicar los supuestos de la TLO, el problema se reduce a integrar la ecuación de Laplace, donde las condiciones de borde son linealizadas despreciando los términos de orden superior. La Figura 10 esquematiza el paso de una onda en un momento determinado y permite visualizar algunas de las condiciones de frontera a enunciar:

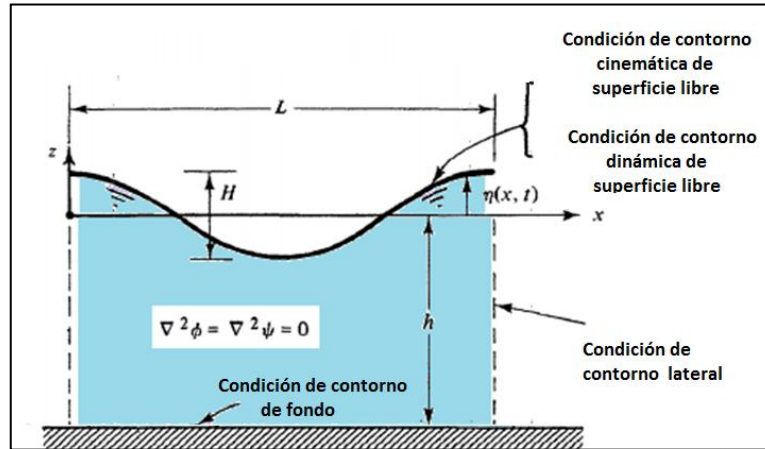


Figura 10: Condiciones de borde para definir la TLO.

Fuente: Elaboración propia.

- a) **Condición de contorno de fondo:** Se asume un fondo plano, impermeable y fijo. De esta manera las partículas no pueden atravesar el fondo. La función que delimita el fondo es  $z = -h(x)$ .

$$w = -u * \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

Ecuación 4

Luego para la condición en la superficie libre existe la condición cinemática y dinámica.

- b) **Condición cinemática de superficie:** Las partículas en la superficie permanecen en ella.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{z=\eta(t)}$$

Ecuación 5

- c) **Condición dinámica de superficie:** Al no considerar la interacción de la superficie libre con la atmósfera, y considerando un fluido irrotacional, incompresible, unidireccional y estacionario, se tiene la siguiente forma de la ecuación de Bernoulli:

$$g * \eta + \frac{\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2}{2} + \frac{\partial \phi}{\partial t} = \text{cte}$$

Ecuación 6

Linealizando la expresión anterior se llega a:

$$g * \eta + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \Big|_{z=0}$$

Ecuación 7

d) **Condición en bordes laterales:** Para un oleaje periódico, progresivo, de forma constante (monocromático), para la dirección x se tiene:

$$\phi(x, z, t) = \phi(x + nL, z, t)$$

Ecuación 8

$$\frac{\partial \phi}{\partial x}(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x}(x + nL, z, t)$$

Ecuación 9

Dónde:

L= Longitud de onda [m].  
n= número entero.

Luego, utilizando las condiciones señaladas anteriormente se puede solucionar la ecuación de Laplace mediante un proceso matemático (separación de variables) que permite obtener la solución del potencial de velocidades presentada en la siguiente ecuación.

$$\phi = - \frac{H C \cosh k(z + d)}{2 \sinh(kd)} \text{sen}(wt - kx)$$

Ecuación 10

Dónde:

H = Altura de la ola [m].

c =  $\omega/k$ : Velocidad de la ola [m/s].

k =  $2\pi/L$ : Número de onda.

Z = Profundidad total [m].

D = Profundidad desde el nivel estático hasta el fondo, asumido horizontal [m].

w =  $2\pi f$ : Frecuencia angular [ $s^{-1}$ , rad  $s^{-1}$ ].

T = Tiempo x: Posición en el eje X [s].

De ésta manera se desprenden las ecuaciones comúnmente usadas en la TLO que se pueden clasificar dependiendo de la profundidad relativa en la que se encuentre el oleaje (G.I.O.C, 2000a). Ver Tabla 3.

### 3.4.3.1 PARÁMETROS DEL OLAJE

Las ecuaciones que describen las velocidades de la superficie de agua, aceleraciones de las partículas, periodo de la ola, longitud de ola, celeridad de onda y celeridad de grupo, se presentan en la Tabla 3, la que indica bajo qué condiciones de profundidad son aplicables.

| Profundidad Relativa   | Aguas Someras<br>$\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$   | Aguas Intermedias<br>$\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$  | Aguas profundas<br>$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$  |
|--|---|--|---|
| Perfil de ola  | Igual que $\rightarrow$   | $\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) - \frac{H}{2} \cos\theta$   | $\leftarrow$ Igual que  |
| Celeridad de onda  | $C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$   | $C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$   | $C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$   |
| Longitud de onda   | $L = T\sqrt{gd} = CT$   | $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$   | $L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0T$  |
| Velocidad de grupo   | $C_g = C = \sqrt{gd}$   | $C_g = nC = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)} \right] C$  | $C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$   |
| Velocidad partículas de agua:<br>a) Horizontal<br>b) Vertical      | $u = \frac{H}{2} \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{d}} \cos\theta$<br>$w = \frac{H\pi}{T} \left(1 - \frac{z}{d}\right) \sin\theta$                          | $u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos\theta$<br>$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin\theta$ | $u = \frac{\pi H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos\theta$<br>$w = \frac{\pi H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin\theta$                                      |
| Aceleración de partículas de agua:<br>a) Horizontal<br>b) Vertical | $a_x = \frac{H\pi}{T} \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{d}} \sin\theta$<br>$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$ | $a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin\theta$<br>$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos\theta$            | $a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin\theta$<br>$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos\theta$ |
| Desplazamiento partículas de agua:<br>a) Horizontal<br>b) Vertical | $\xi = -\frac{HT}{4\pi} \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{d}} \sin\theta$<br>$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$                  | $\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin\theta$<br>$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos\theta$                    | $\xi = -\frac{H}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin\theta$<br>$\zeta = \frac{H}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos\theta$                                       |
| Presión subsuperficial   | $p = \rho g(\eta - z)$  | $p = \rho g\eta \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} - \rho g z$   | $p = \rho g\eta e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} - \rho g z$   |

**Tabla 3: Parámetros de la Teoría de Airy para aguas profundas, de transición y someras.**

Fuente: Coastal Engineers Manual (2002) – Parte II Coastal Hydrodynamics –Adaptación de la figura II-1-9.

### **3.4.3.2 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TEORÍA LINEAL**

Rodolfo Silva (2005), dice que la TLO es una gran herramienta de ingeniería ya que permite modelar el oleaje en base a supuestos que simplifican la matemática del problema. Además los supuestos enunciados son bastante esperables en la realidad. Lamentablemente en el sector costero muchos de los supuestos dejan de ser válidos, por ejemplo el fondo deja de ser plano, y existen fenómenos de alta turbulencia. Así, por ejemplo, la teoría no es válida en el sector de la rompiente de la ola.

Dada estas limitantes, existen otras teorías no lineales que van aumentando en complejidad a medida que abarcan más variables, pero que se hacen más representativas al comportamiento real del oleaje. A modo de ejemplo se puede mencionar la Teoría de Stokes y la Teoría Cnoidal. Estas teorías manifiestan su diferencia con la teoría lineal principalmente en aquellas propiedades que dependen de  $H$ . De esta forma, por ejemplo, el cálculo de la celeridad no debiera presentar grandes diferencias.

### **3.4.4 OLEAJE NO LINEAL**

Cuando el oleaje generado en mar abierto se propaga hacia la costa con una dirección preferencial sobre aguas menos profundas, la ola sufre una deformación, dejando de ser sinusoidal, para hacerse asimétrica. El pico de las crestas se vuelve más agudo y los senos se vuelven más planos y más prolongados (Svendsen, 2006). Al entrar en profundidades reducidas, la onda presenta cambios en su forma física que la vuelven cada vez más asimétrica producto del escaso seno que se forma y el progresivo aumento de su cresta. Esta deformación provoca una inestabilidad que culminará cuando la ola arribe a la costa generando el fenómeno conocido como rotura (ver Figura 6). Frecuentemente durante su propagación, la onda puede presentar transformaciones conocidas como shoaling, refracción, difracción, reflexión, etc., debido a la presencia de obstáculos, tales como bajos, obras marítimas, islotes, etc., que provocan una profunda modificación de la onda incidente.

La teoría de oleaje no-lineal fue ampliamente desarrollada por Stokes (1847,1880), quien describe olas de "amplitud finita" con características de un perfil de crestas más altas, puntiagudas y senos aplanados. Por lo tanto, se permite que la altura sea pequeña pero finita.

Una de las diferencias principales con la teoría lineal es que la asimetría en el perfil de Stokes también se refleja en las velocidades orbitales. Debido a que las partículas de agua no tienen una trayectoria cerrada, las partículas tienen un transporte de masa (también conocida como deriva de Stokes) en la dirección de propagación del oleaje (lo que tiene un efecto importante en los procesos litorales), ver Figura 11.

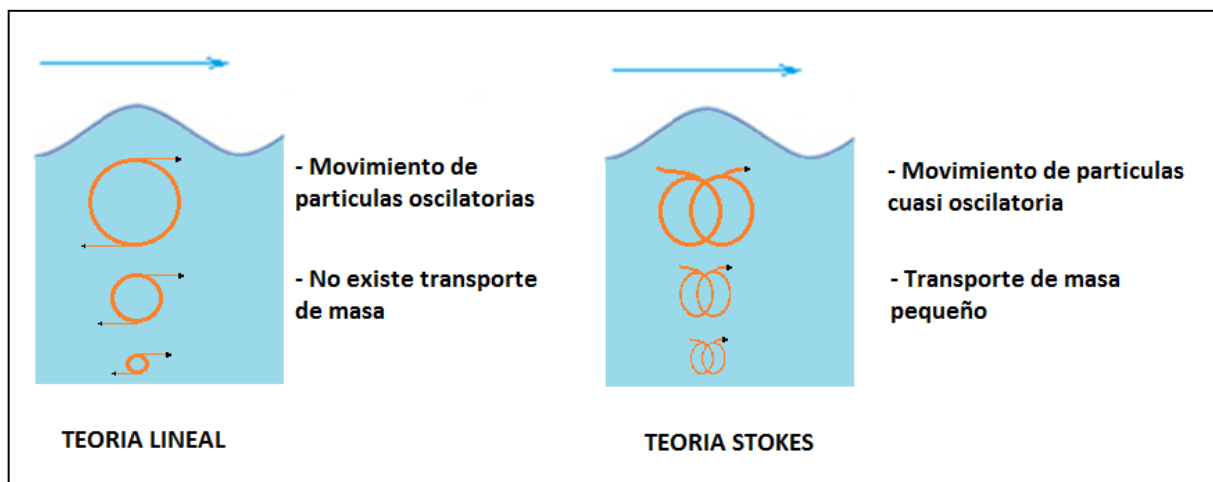


Figura 11: Trayectoria de partículas de agua de Airy y Stokes.

Fuente: Elaboración propia.

En contraste, la celeridad y longitud de onda son similares, dada su dependencia débil a la altura, aunque las velocidades para las olas más grandes en aguas profundas pueden ser hasta un 10% mayor que aquellas calculadas por la TLO.

La teoría de Stokes describe el oleaje no-lineal mediante el desarrollo de soluciones en series de segundo, tercer y orden superior, para poder representar con mayor exactitud el comportamiento del oleaje en aguas de profundidad intermedia. Donde cabe destacar que la solución de primer orden es idéntica a la teoría lineal del oleaje. La Figura 12 ilustra, a modo de ejemplo, una comparación de los perfiles asociados a diferentes órdenes de aproximación para una altura de ola en aguas profundas, donde se refleja que para series mayores al tercer orden la celeridad de la onda aumenta.

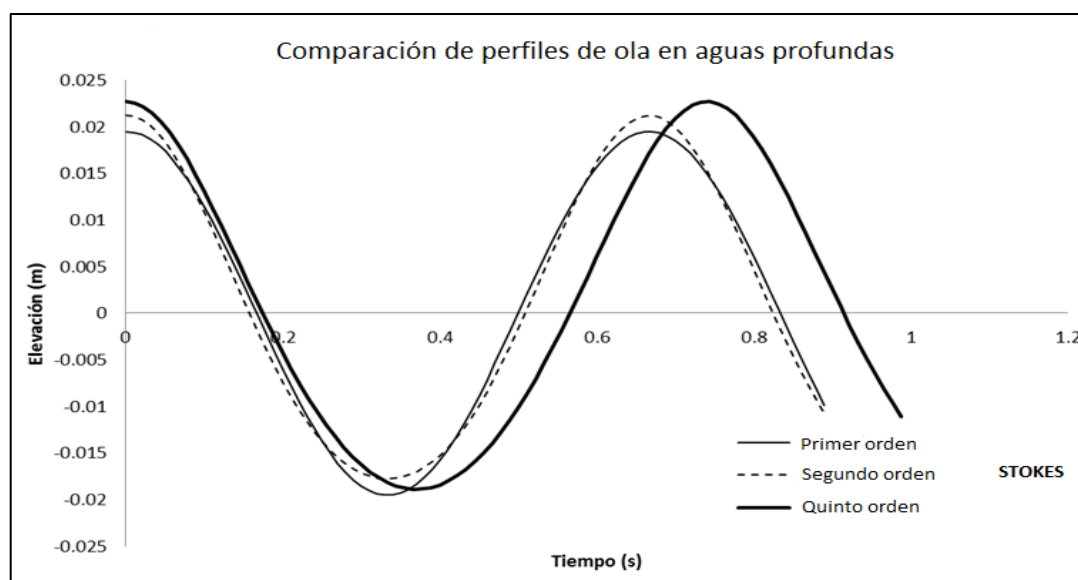


Figura 12: Ejemplo de aproximaciones de Stokes en aguas profundas.

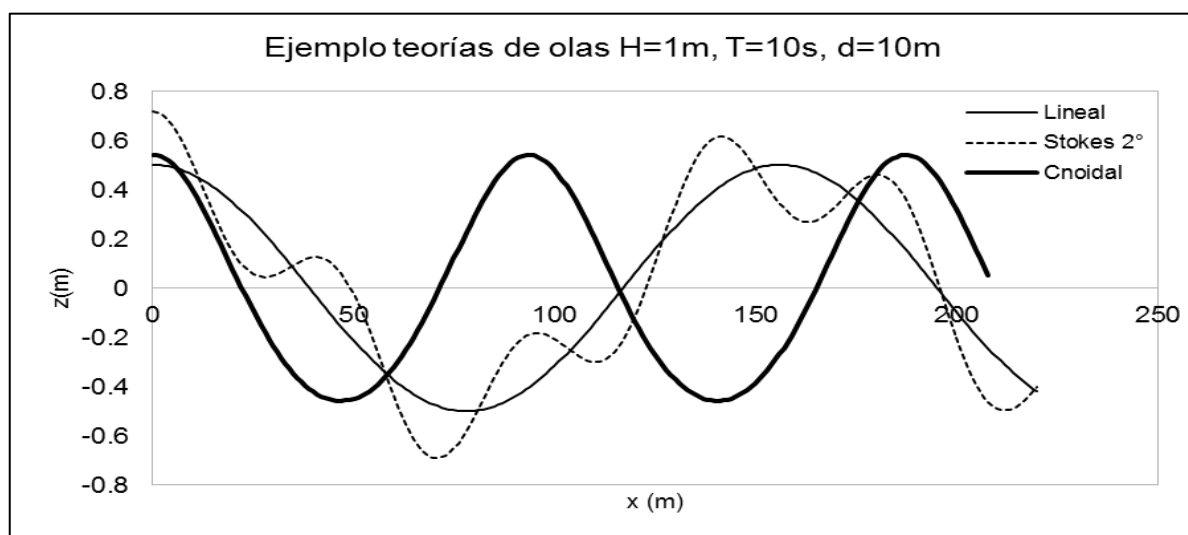
Fuente: (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2000a).

En este contexto, la teoría no-lineal describe de manera más precisa el oleaje en general, y sobre todo en aquellas ondas que se aproximan a la costa y a la zona de rompiente (Svendsen, 2006).

Además de Stokes, existen otras teorías como la de onda solitaria y de la onda Cnoidal iniciada por Boussinesq (1872), y Korteweg y De Vries (1895), con aportes posteriores realizadas por Keulegan & Patterson (1940) y Keller (1948). Los detalles de la teoría Cnoidal pueden encontrarse en Svendsen & Brink-Kjaer (1972) y Skovgaard et al. (1974), el uso de esta teoría es sumamente complicada, por lo que se utiliza poco para fines prácticos. En su lugar puede hacerse uso de la teoría de ondas solitarias, bajo el supuesto de que el oleaje en la zona cercana a la costa tiene crestas diferentes separadas por valles largos y aplanados, por lo que ahí el oleaje podría considerarse como una serie de ondas solitarias. El rango aproximado de validez de la teoría Cnoidal es  $d/L < 0.1$  (Svendsen, 2006).

Por regla general, a mayor aproximación las teorías no-lineales crecen en dificultad de aplicación de manera importante. La Figura 13 ejemplifica lo antes señalado ilustrando las diferencias que existen, entre algunas de las teorías, a la hora de representar un perfil de ola en aguas someras.

Estas teorías no-lineales no serán descritas en esta memoria, ya que no son del alcance que ésta pretende lograr.



**Figura 13: Ejemplo de aplicación de teorías de olas no lineales vs lineal.**

Fuente:(Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2000a).

### 3.5 VALIDEZ DE LAS DISTINTAS TEORÍAS DEL OLAJE

Uno de los parámetros adimensionales que es utilizado para clasificar la validez de las distintas teorías de oleaje, corresponde al Número de Ursell ( $U_r$ ) definido como:

$$U_r = H \frac{L^2}{d^3}$$

Ecuación 11

En dinámica de fluidos, el número Ursell indica la no linealidad de largas ondas de gravedad superficiales en una capa de fluido. Es un parámetro importante ya que sirve para definir el régimen al que corresponden las ondas y, por tanto, ayuda a seleccionar la teoría más adecuada en cada caso. En la práctica TLO es válida para  $U < 5$  y las teorías Cnoidal y Stokes hasta  $U < 25$  (Fenton, 1990). La Figura 14 muestra el gráfico de Le Méhauté (1976), en el cual se representan las áreas de validez de las diferentes teorías de oleaje.

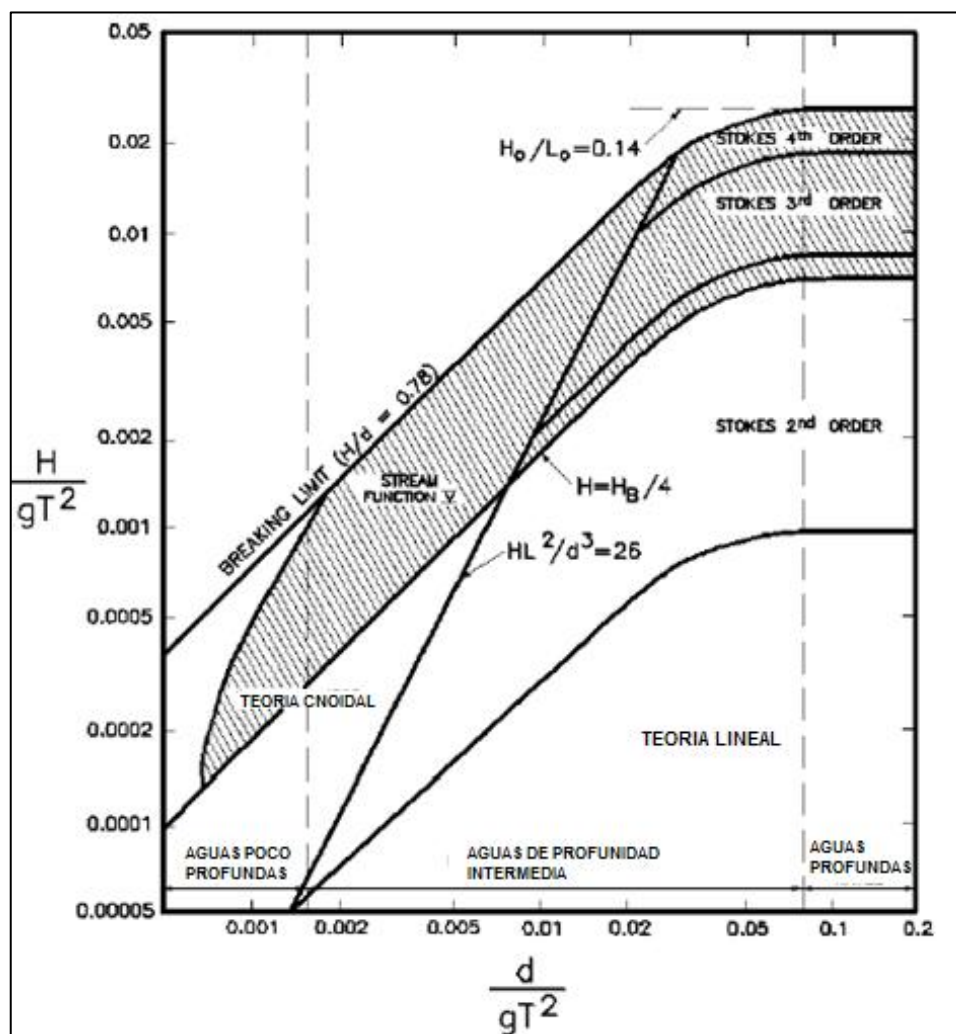


Figura 14: Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje.

Fuente: (Coastal Engineering Manual, 2003).

## 3.6 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE EN LA PROPAGACIÓN

Cuando el oleaje comienza a acercarse a las proximidades de la costa, experimenta una serie de transformaciones que hacen cambiar sus características mecánicas debido a la influencia de la pendiente y rugosidad (ripples) del fondo. Siendo los más comunes la refracción, difracción, reflexión, asomeramiento y rotura, entre otros. A continuación se describen los fenómenos de mayor importancia para este estudio siguiendo la teoría lineal del oleaje.

### 3.6.1 CONCEPTOS PREVIOS

Para entender de mejor manera como se determinan las principales transformaciones del oleaje como el asomeramiento y la refracción, se presenta de forma resumida la ley de conservación de masa y la teoría del rayo.

#### 3.6.1.1 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

La ley de la conservación de la energía mecánica afirma que la energía en un sistema aislado permanece invariable en el tiempo, además no puede crearse ni destruirse, y solo se puede cambiar de una forma a otra. A partir de esto y considerando un fluido no viscoso, irrotacional, en ausencia de corriente, sin disipación y de fondo horizontal, se cumple la siguiente ecuación (G.I.O.C, 2000a).

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{E}{\omega} \vec{C}_g \right) = 0$$

Ecuación 12

Esta ecuación implica que cualquier variación de la energía en el tiempo debe compensarse con variaciones espaciales del flujo de energía (G.I.O.C, 2000a).

En cambio, si se considera una propagación en un fondo suavemente variable, la ecuación anterior es modificada tal que:

$$\frac{\partial (E/\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{E}{\omega} \vec{C}_g \right) = 0$$

Ecuación 13

Donde  $(E/\omega)$  se conoce como la acción de onda.

### 3.6.1.2 TEORÍA DEL RAYO

La teoría del rayo es un método semi-gráfico basado en conceptos óptico-geométricos, principalmente en la ley de Snell de refracción óptica, que fue utilizado ampliamente por los ingenieros en décadas pasadas. Se emplea para calcular únicamente refracción y asomeramiento de una onda sinusoidal simple que se propaga sobre un fondo uniforme (pendiente constante) y líneas batimétricas paralelas.

Los rayos son líneas que representan las trayectorias de varios puntos equidistantes sobre la cresta de una onda, desde aguas profundas hasta la línea de costa, ver Figura 15. El espacio comprendido entre dos rayos se llama canal de energía, ya que se considera que la energía contenida en una sección transversal se mantiene constante durante toda la propagación (conservación de la energía). Con base en lo anterior, se calcula la desviación del frente de onda mientras se va refractando, y el asomeramiento producto de la reducción del ancho de los canales de energía. Este método proviene de la teoría del rayo la cual no incluye a la difracción.

Dado que los rayos son perpendiculares a los frentes de olas a veces suelen recibir el nombre de ortogonales. Sin embargo, en la refracción por efecto de una corriente no se cumple esta condición de ortogonalidad, por lo cual es preferible mantener el nombre de rayo.



**Figura 15: Rayos que definen la trayectoria sobre la cresta de la ola.**  
Fuente: Adaptación del Curso Mecánica de Olas, Universidad de Valparaíso 2010.

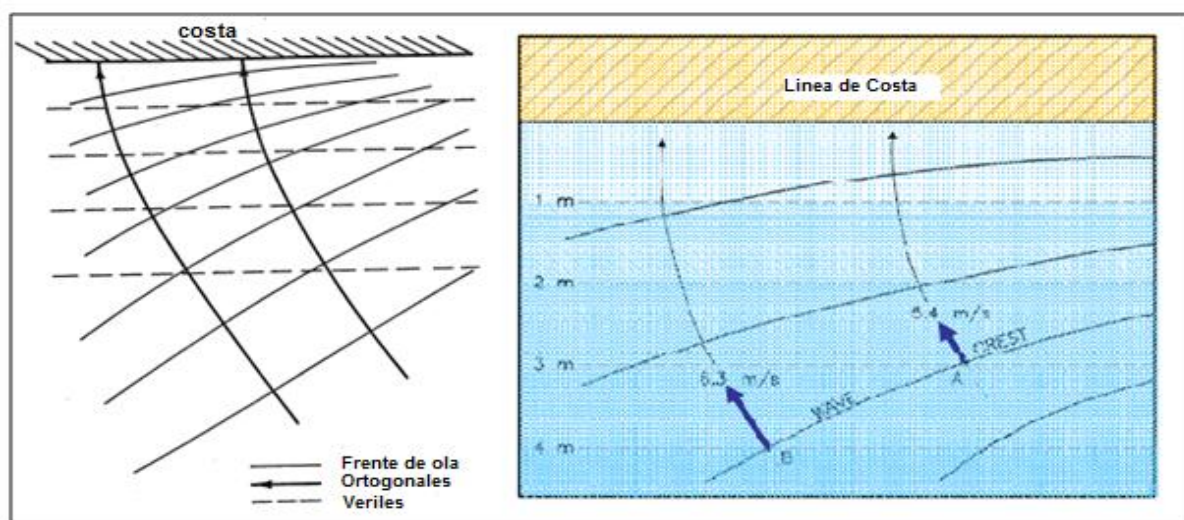
Basándose en ésta teoría, se desarrollan métodos gráficos (rayos) y métodos numéricos (Ley de Snell), que permiten obtener y analizar la refracción del oleaje en su propagación hacia la costa, ver acápite 3.6.2.

### 3.6.2 REFRACCIÓN

A medida que las olas se acercan a la costa, el fondo afecta a su velocidad, de manera que la forma del frente de ola se va adaptando a la forma del litoral.

En otras palabras, la refracción es un fenómeno que produce un cambio de altura y dirección del oleaje, debido a que la ola cuando se aproxima en sentido oblicuo a la costa, las secciones del tren de olas interactúan con el fondo disminuyendo su velocidad de fase y su longitud de onda, experimentando así una curvatura progresiva que tiende a alinear el frente de olas con los veriles (contornos de profundidad), ver Figura 16.

Por otro lado, cabe mencionar que la refracción es debida tanto al efecto del fondo como a la presencia de una corriente G.I.O.C (2000a).



**Figura 16: Efecto de refracción.**

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Dalrymple (1984).

Es importante señalar que la refracción siempre viene acompañada del fenómeno de asomeramiento.

Siguiendo la TLO, para estimar el efecto de la refracción sobre el oleaje debido al cambio de profundidad se considera una batimetría recta y paralela a la costa, como se observa en la Figura 17.

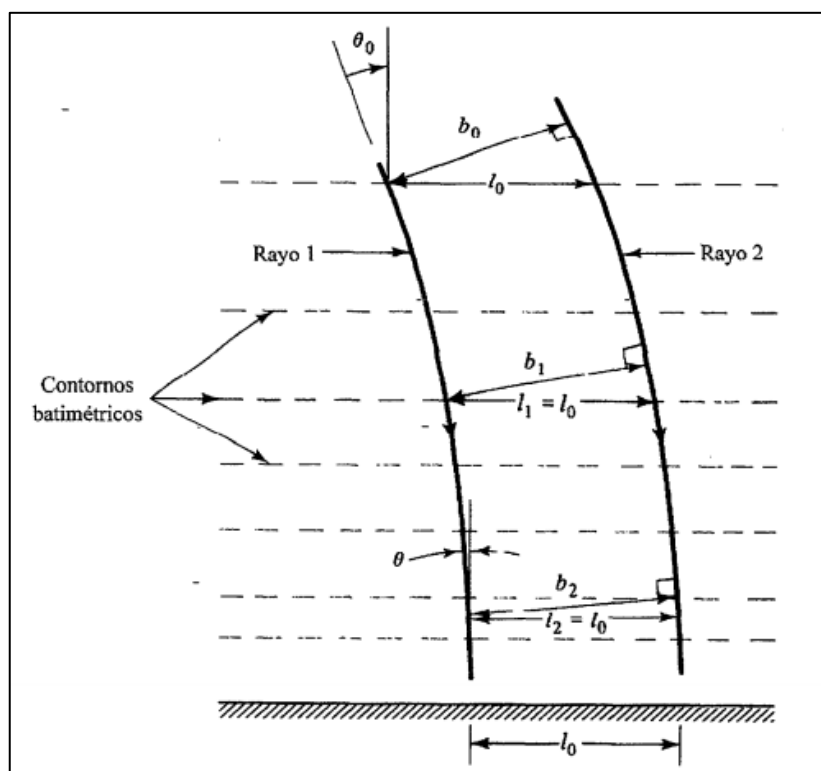


Figura 17: Esquema de teoría del rayo sobre batimetría idealizada.

Fuente: Dalrymple (1984).

Si se considera la propagación del oleaje entre los puntos de la Figura 17, además de que el flujo de energía entre ellos es constante, es decir, no existen términos disipativos, entonces:

$$\left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_1 b_1 = \left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_2 b_2 = \text{cte}$$

Ecuación 14

De donde se obtiene:

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$$

Ecuación 15

El término  $\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$  corresponde al coeficiente de refracción, éste coeficiente depende de la separación entre rayos.

Para obtener  $b_1$  y  $b_2$ , se puede hacer una aproximación simple mediante la Ley de Snell, que se rige según la Ecuación 18 y es ilustrada en la Figura 18.

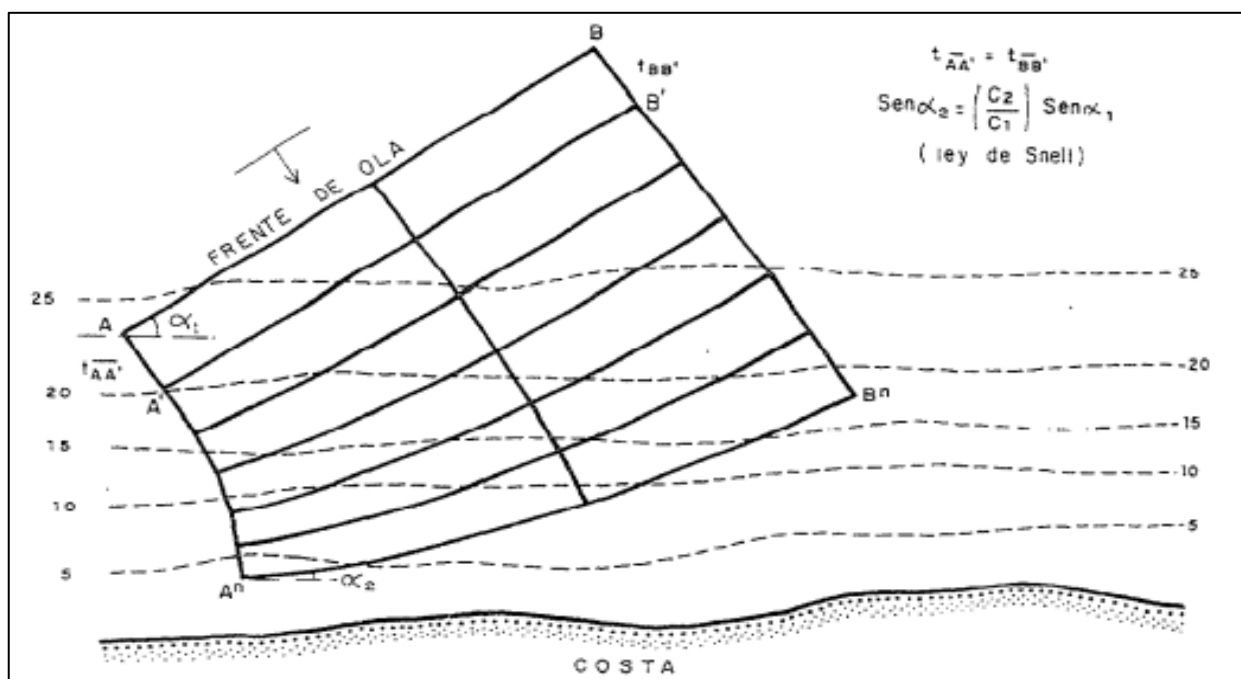


Figura 18: Esquema de la Ley de Snell.

Fuente: Dalrymple (1984).

La ley de Snell indica que para costas en las que la batimetría sea rectilínea y paralela, la dirección de los frentes de onda,  $\alpha$ , decrece a medida que las olas interactúan con el fondo, es decir, entran en aguas someras, tendiendo a que se aproximen a la costa perpendicularmente.

Las soluciones para encontrar una relación entre las variaciones de la dirección y las de celeridad de ola, parten por la definición de ejes y parámetros del oleaje con incidencia oblicua como lo indica la Figura 19.

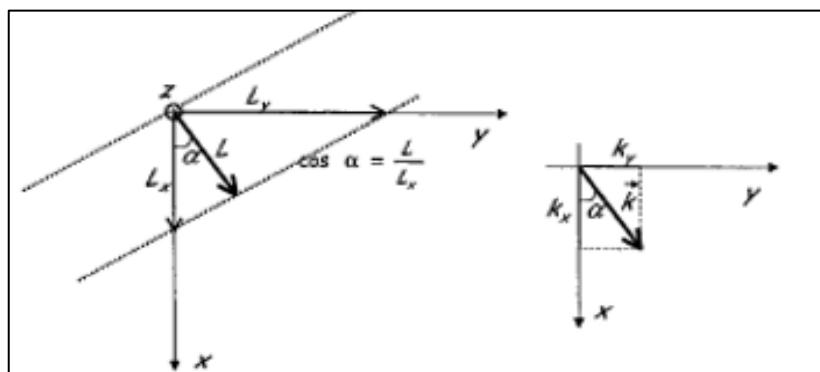


Figura 19: Definición de ejes y parámetros, incidencia oblicua.

Fuente: (G.I.O.C, 2000a).

Luego, para una costa con batimetría recta y paralela, las variaciones de cualquiera de las variables respecto al eje "y" son nulas, por lo tanto la ecuación se representa por:

$$\frac{d(k\sin\theta)}{dx} = 0$$

Ecuación 16

Esto implica que  $k\sin\theta = cte$ . Luego teniendo en cuenta que  $C = \omega/k$  se llega a que

$$\frac{\sin\theta}{C} = cte$$

Ecuación 17

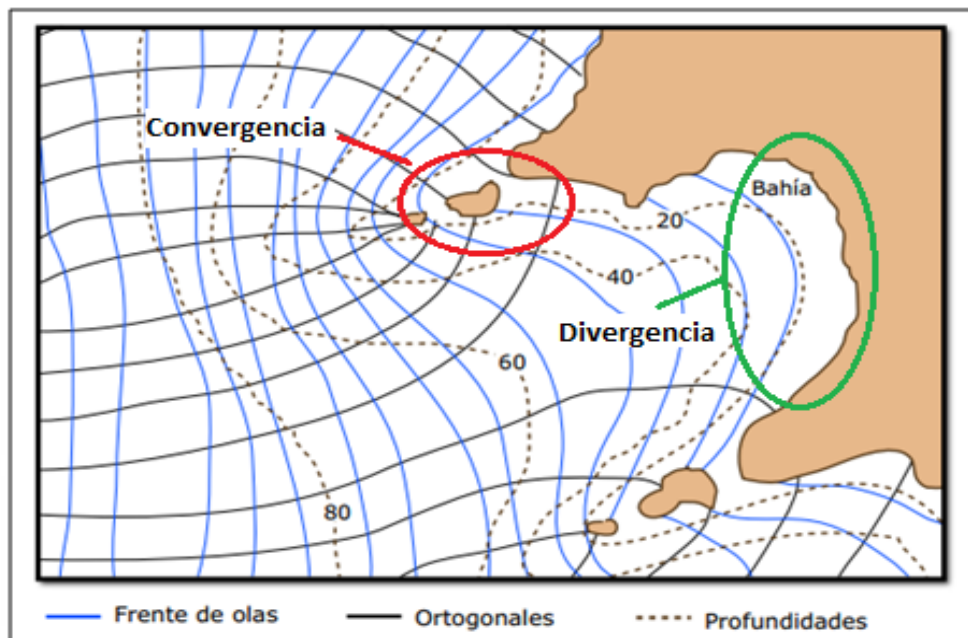
En general, la constante se evalúa en profundidades indefinidas con lo que la ecuación anterior pasa a ser:

$$\frac{\sin\theta}{C} = \frac{\sin\theta_0}{C_0} = 0$$

Ecuación 18

Esta última es conocida como la ley de Snell, quien propuso que las funciones seno de los ángulos eran directamente proporcionales dando como cociente una constante al igual que las velocidades.

El cambio de dirección de las ortogonales (líneas perpendiculares a la cresta) de diferentes partes de la ola resulta en convergencia o divergencia de energía. Este cambio de dirección se puede analizar trazando líneas perpendiculares al frente de ola como se muestra en la Figura 20.



**Figura 20: Divergencia y convergencia de las olas en la costa.**

Fuente: <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>

Por lo tanto, cuando las líneas ortogonales se juntan indican la convergencia de energía de la ola, lo cual implicaría aumentar su altura. Por otro lado, una separación de las líneas trazadas perpendicularmente al frente de olas indica divergencia de energía (menor altura).

### **3.6.3 ASOMERAMIENTO (SHOALING)**

En aguas profundas el perfil del oleaje tipo *swell* es aproximadamente sinusoidal, con crestas suaves y redondeadas. En esta zona, ni la topografía del fondo ni su rugosidad afectan apreciablemente el paso de las olas. Conforme las olas se propagan, primero en aguas intermedias y después en aguas poco profundas sobreviene una transformación que ocurre como consecuencia de la disminución de la profundidad provocando una disminución en la longitud de la onda y por lo tanto una disminución de la celeridad, pero debido a la concentración de la energía, la altura de la ola aumenta (por lo que el peralte también aumenta) y el periodo se supone que permanece constante. A ese proceso se le denomina shoaling (Kinsman, 1965), ver Figura 22.

Ya cerca de la zona de rompientes, el aumento en la altura de onda trae consigo un peraltamiento de ésta y el perfil se vuelve significativamente asimétrico, con crestas muy pronunciadas y separadas por valles relativamente planos. Finalmente el perfil de las crestas se vuelve inestable y la ola rompe. Por lo tanto, la altura de una ola en rotura puede ser bastante mayor que en aguas profundas.

La resolución de éste fenómeno requiere plantear un problema de contorno con fondo variable cuya resolución analítica es compleja especialmente si la teoría de ondas utilizada para modelar el fenómeno es no-lineal (G.I.O.C, 2000a).

En general, y sea cual sea la teoría escogida, para la resolución del asomeramiento, el problema se plantea asumiendo que el proceso es bidimensional ( $x, z$ ), y que el periodo de la onda ( $T$ ) y el flujo de energía en la dirección de la propagación de la misma sean constantes. Estas hipótesis requieren además que la variación del fondo sea suave con lo cual no se produce reflexión y que no se produzca disipación de energía por fricción en el fondo o aporte de energía por viento (G.I.O.C, 2000a).

Por lo tanto, siguiendo la TLO y considerando que una onda se propaga con incidencia normal hacia una costa recta con veriles paralelos a ella, y que la energía se propaga entre los rayos u ortogonales, se puede obtener una ecuación para calcular la altura ( $H$ ).

La Figura 21 muestra una ola aproximándose directamente a la costa con incidencia normal bajo condiciones estacionarias y sin disipación, permitiendo así que la energía de onda que atraviesa el plano 1 es igual a la que pasa a través del plano 2.

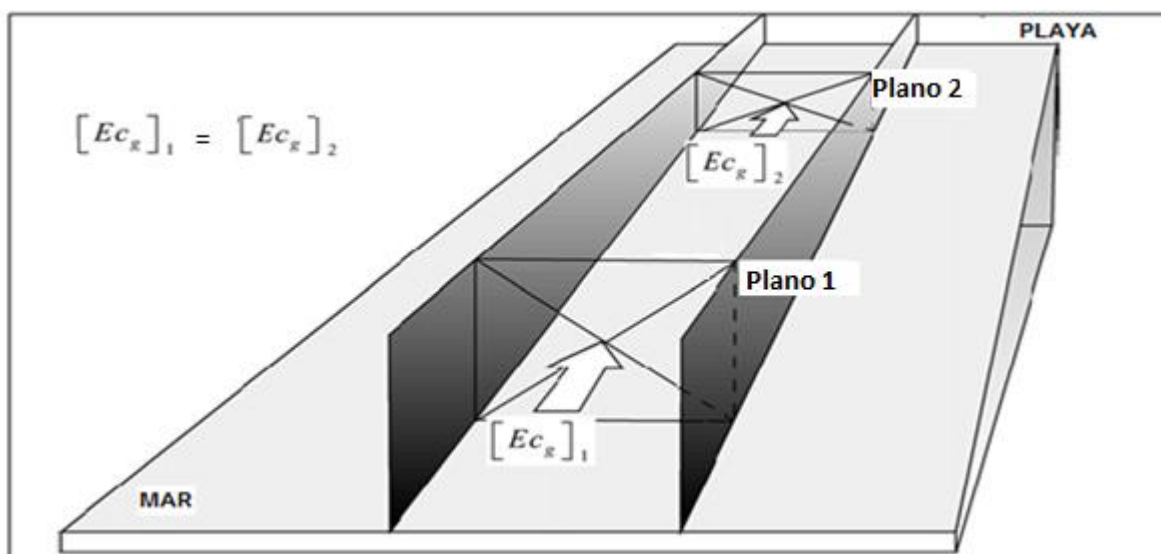


Figura 21: Esquema del cambio de densidad de energía en la ortogonal.

Fuente: Holthuijsen (2007).

A partir de esto y considerando la figura anterior, se puede asumir que la ganancia de energía (por viento) es menor si la distancia entre 1 y 2 es menor a 50–100 longitudes de onda. Por el contrario, si se separan a menos de 20 longitudes de onda, las pérdidas son apreciables según Holthuijsen (2007) (si es mayor hay que reconsiderar).

Luego, asumiendo para la determinación de la altura de onda que no hay rompimiento ni “whitecaps”<sup>2</sup>), surge la siguiente ecuación:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1 * \tanh(kd_1) * d_1}{n_2 * \tanh(kd_2) * d_2}}$$

Ecuación 19

Donde,

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right)$$

Ecuación 20

<sup>2</sup> White caps, se refiere a las olas que rompen en aguas profundas tras alcanzar un a esbeltez que provoque inestabilidad y posterior rotura.

El coeficiente  $n$  tiende a valores de  $n=1/2$  en aguas profundas, y en aguas poco profundas  $n=1$ , lo cual indica que la energía en aguas profundas se desplaza a la mitad de la velocidad de la ola, mientras que en aguas someras la energía de la ola se propaga a la misma velocidad.

Luego, si solo se considera el efecto de shoaling, la expresión de la altura de la ola en la profundidad de interés se expresa como el producto de un coeficiente y la altura en aguas profundas:

$$H = K_s * H_0$$

Ecuación 21

Donde el coeficiente de shoaling se define como:

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{2n * \tanh(kd)}}$$

Ecuación 22

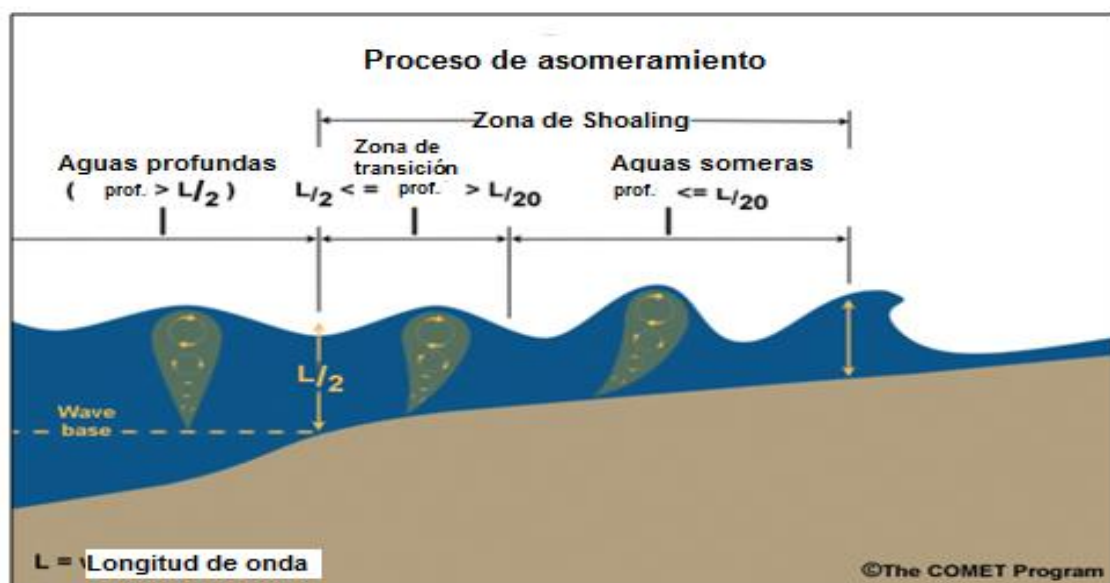
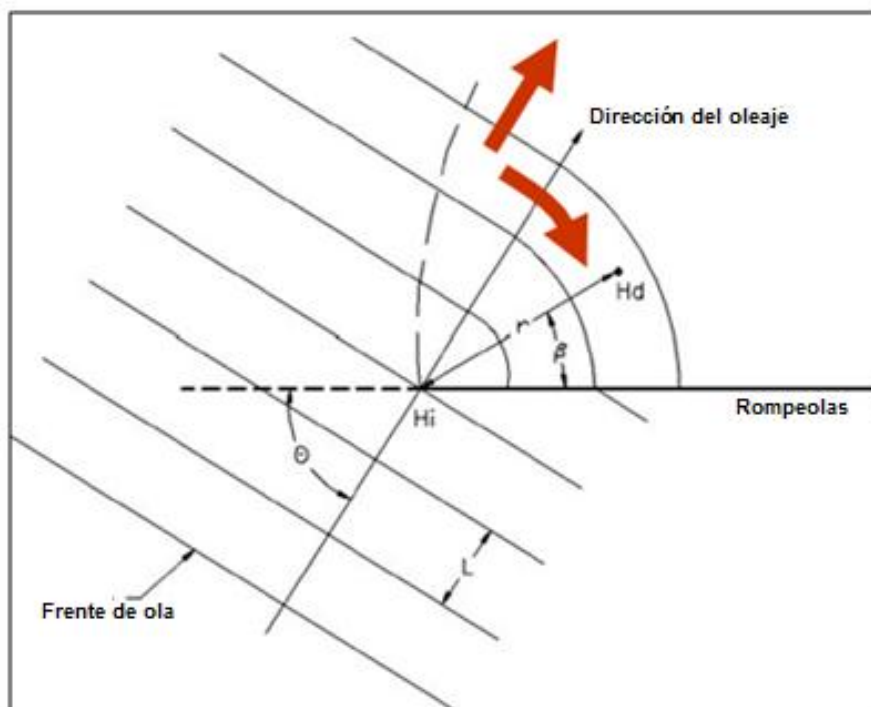


Figura 22: Fenómeno de shoaling o asomeramiento del oleaje.

Fuente: Adaptación de página web <http://stream2.cma.gov.cn>

### 3.6.4 DIFRACCIÓN

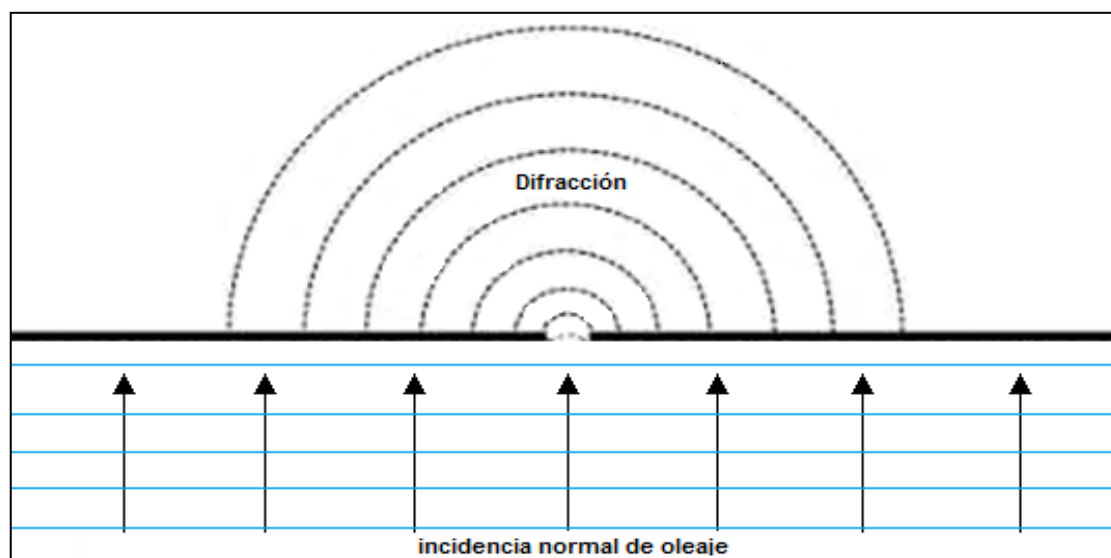
La difracción se produce como consecuencia de la cesión lateral de energía como resultado de la interacción del oleaje con un obstáculo finito cuyo radio de curvatura sea de orden igual o menor que la longitud de onda (G.I.O.C, 2000a).



**Figura 23: Esquema de Onda Difractada.**

Fuente: (G.I.O.C, 2000a).

Este fenómeno puede ser entendido a nivel fenomenológico usando el principio de Huygens, según el cual se puede visualizar una curvatura de la energía de las olas alrededor de un obstáculo. Esto se logra impidiendo la propagación de prácticamente todo el frente de ondas, salvo una pequeña parte, donde el resultado debería ser, bajo condiciones isotropas y homogéneas, un frente de onda circular, en una situación 2D, o esférico, en una 3D (Figura 24). A diferencia de las partículas que siguen en línea recta, las ondas se doblan en un área detrás del obstáculo llamada "zona de sombra". Las olas difractadas contienen menos energía que las ondas suministradas originalmente, ya que se distribuye en toda la zona de sombra. Dependiendo del objeto con el que las olas chocan y en la dirección de incidencia, la energía de las olas va a reaccionar de manera diferente. Además, la energía difractada resultante es una función de la longitud de onda de la onda original.



**Figura 24: Onda que representa la difracción al atravesar la rendija.**

Fuente: Elaboración propia.

En otras palabras, éste fenómeno consiste en la dispersión de la energía del oleaje a sotavento de una barrera, como un rompeolas o pequeña isla, el cual permite la aparición de pequeños sistemas de olas en aguas protegidas por un obstáculo (Figura 25). Cuando la ola traspasa la barrera, el frente de las olas adopta una forma curva, entrando en una zona de calma por detrás de la barrera, disminuyendo su altura  $H$  en esa zona, mientras que la celeridad y la longitud  $L$  de la ola no se modifican.



**Figura 25: Fenómeno de difracción.**

Fuente: <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>

La altura de la ola en la zona de difracción es función del ángulo del oleaje incidente con respecto a la barrera, de la longitud de la barrera, de la profundidad del agua y de la posición del punto en cuestión en la zona de difracción.

El cálculo de la difracción es importante por varias razones. Permite conocer la distribución de las alturas de ola dentro de una zona portuaria o bahía, por lo que debe tenerse en cuenta en el diseño de las estructuras marítimas. Por otro lado, el diseño apropiado y emplazamiento de las entradas de un puerto para reducir problemas tales como la sedimentación y la resonancia, también requieren un conocimiento del efecto difractivo.

Las primeras propuestas para estudiar este fenómeno surgen de Putnam & Arthur (1948) que presentan datos experimentales verificando un método de solución propuesto por Penny & Price (1944) para describir el comportamiento de una onda después de pasar un rompeolas. Wiegel (1962) utiliza un enfoque teórico para el estudio de la difracción de onda alrededor de un rompeolas individual. Blu y Johnson (1949) abordan el problema del comportamiento de la onda después de pasar por un espacio entre dos brazos de rompeolas.

Los supuestos hechos generalmente en el desarrollo de las teorías de difracción según U.S. Army Corps of Engineers (1984), son:

- El agua es un fluido ideal, es decir, no viscoso e incompresible.
- Las olas son de pequeña amplitud y se pueden describir por la teoría lineal.
- Flujo irrotacional y se ajusta a una función potencial, que satisface la ecuación de Laplace.
- La profundidad hacia la costa del dique es constante.

Si la última hipótesis no es válida, entonces los procesos tanto de refracción y difracción entran en juego.

Las ecuaciones que rigen este fenómeno se pueden expresar en función del potencial y se resumen a continuación según (G.I.O.C, 2000a):

$$\nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad -d(x) \leq z \leq 0$$

**Ecuación 23**

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = 0$$

**Ecuación 24**

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = 0$$

**Ecuación 25**

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = 0 \quad \text{En el obstáculo}$$

**Ecuación 26**

Al solucionar estas ecuaciones se obtiene un coeficiente de difracción conocido comúnmente como  $K_d$ , el cual se utiliza para conocer la altura de ola. Hoy en día, éste coeficiente se consigue empleando modelos numéricos, ya que la solución analítica de éstas es compleja.

En la actualidad existen diferentes técnicas de modelado que se usan para estudiar la difracción, así lo indica Iñigo J. Losada, (2000) en su artículo “modelos matemáticos y numéricos para el estudio de la agitación portuaria” donde menciona que mediante programas computacionales es capaz de describir el fenómeno. Existen también otras formas de calcular la difracción utilizando esquemas o diagramas que permiten obtener un coeficiente  $K_d$  y a su vez la distribución de las alturas de olas en los casos que se quiera analizar la interacción del oleaje-estructura.

### 3.6.4.1 CÁLCULOS DE DIFRACCIÓN

- a) Olas pasando por un rompeolas individual. De una presentación por Wiegel (1962), se han preparado los diagramas de difracción con variaciones en sus ángulos de incidencia (12 condiciones distintas) para una profundidad uniforme adyacente a una estructura impermeable, que muestran líneas de reducción de la misma altura de las olas (Engineers U. S., 1984), como se puede ver en la Figura 26. Las coordenadas del gráfico están en unidades de longitud de onda. La reducción de la altura de onda se da en términos de un coeficiente de difracción que está definida como la relación de una altura de ola  $H$  en la zona afectada por difracción y la altura de la ola incidente  $H_i$  en el área no afectada. Por lo tanto,  $H$  y  $H_i$  se determinan por la Ecuación 28.

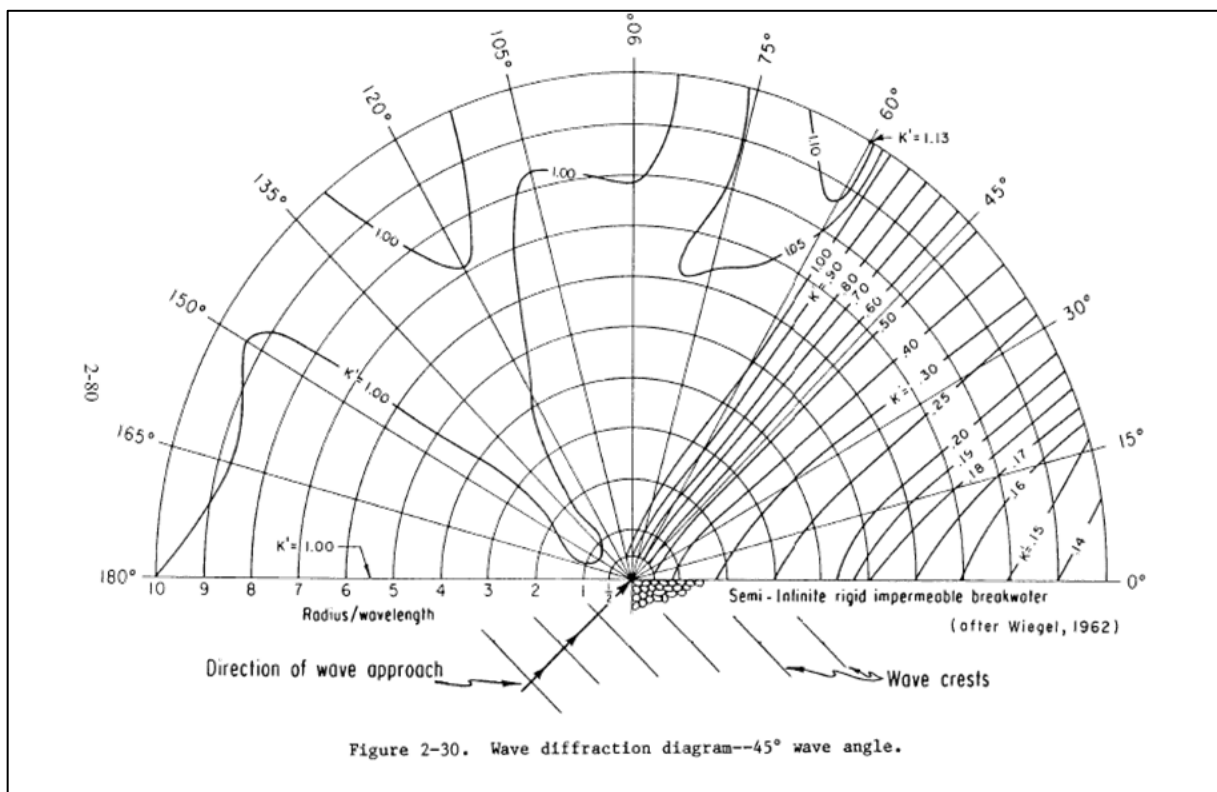
Uno de los casos comúnmente utilizados para la determinación del coeficiente de difracción es considerando un dique semi-infinito e incidencia normal. Ésta condición permite demostrar que dicho coeficiente adopta un valor dado por la Ecuación 27 donde  $\eta$  es la desnivelación máxima difractada y  $A$  es la amplitud de onda incidente.

$$K_d = \frac{|\eta|}{A}$$

**Ecuación 27**

$$K_d = \frac{H_d}{H_i}$$

**Ecuación 28**



**Figura 26: Difracción para un dique semi-infinito con incidencia oblicua del oleaje.**  
Fuente: (G.I.O.C, 2000a).

La altura de ola difractada se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$H_d = H_I * K_d$$

**Ecuación 29**

Dónde:

$H_I$  = Altura de ola incidente [m].

$H_d$  = Altura de ola difractada [m].

$K_d$  = Coeficiente de difracción.

- b) Ondas que pasan por un espacio de un ancho inferior a cinco longitudes de onda en incidencia normal. La solución de este problema es más compleja que la de un rompeolas individual, y no es posible construir un diagrama de todas las condiciones. Debe trazarse un diagrama independiente para cada relación B/L (distancia B a la longitud de onda L). El diagrama para una relación B/L de 2 se muestra en la Figura 27, que también ilustra su uso. Existen otras figuras elaboradas por Jhonson (1952) que muestran líneas de coeficientes de difracción iguales para relaciones B/L de 0.50, 1.0, 1.41, 1.64, 1.78, 2.0, 2.5, 2.95, 3.82, y 5.0. Estos diagramas se han incluido para representar la mayor parte B/L encontrados en la práctica, los cuales se pueden encontrar y ver en mayor detalle en el libro "Shore Protection Manual-vol 1 (SPM)".

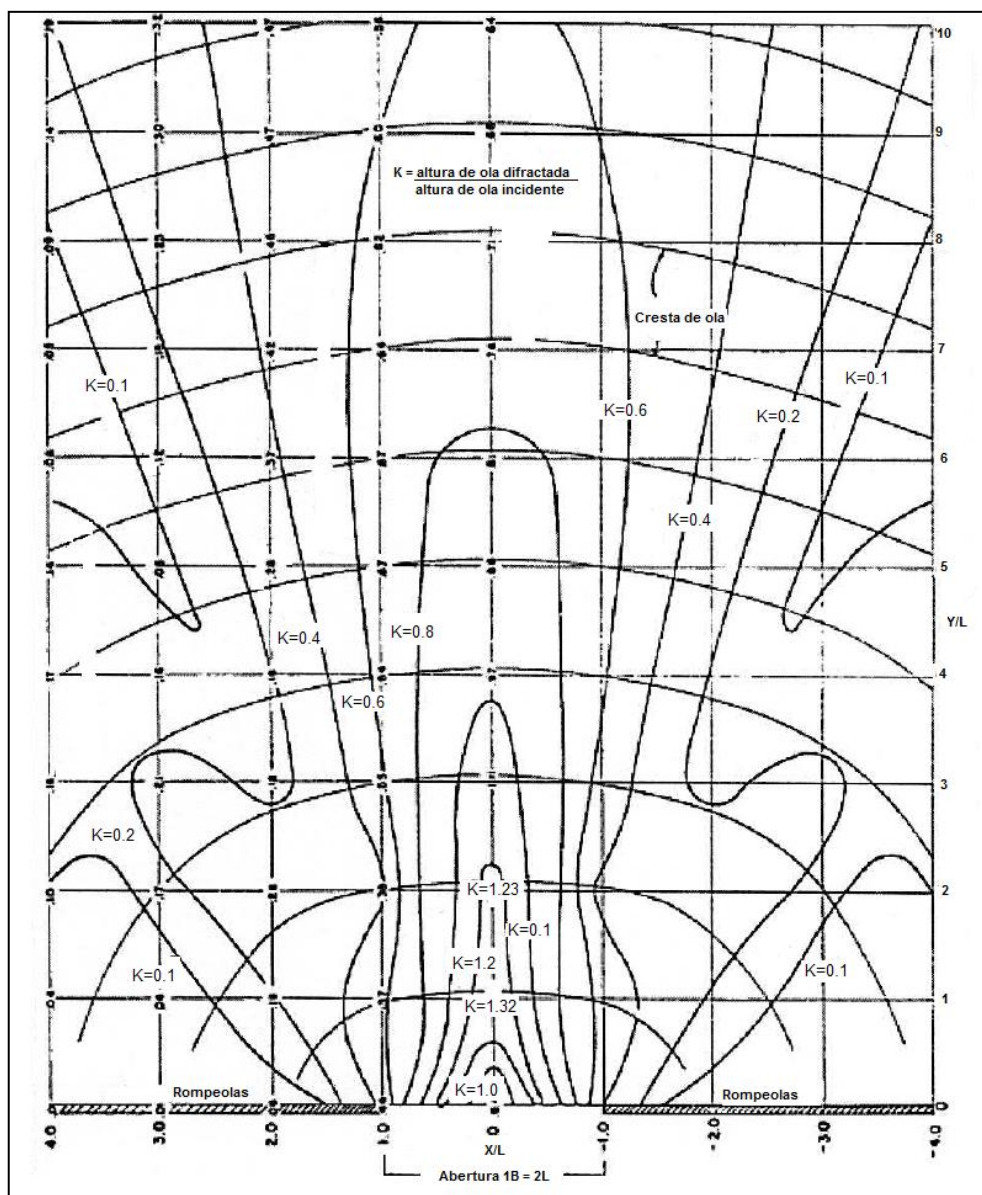
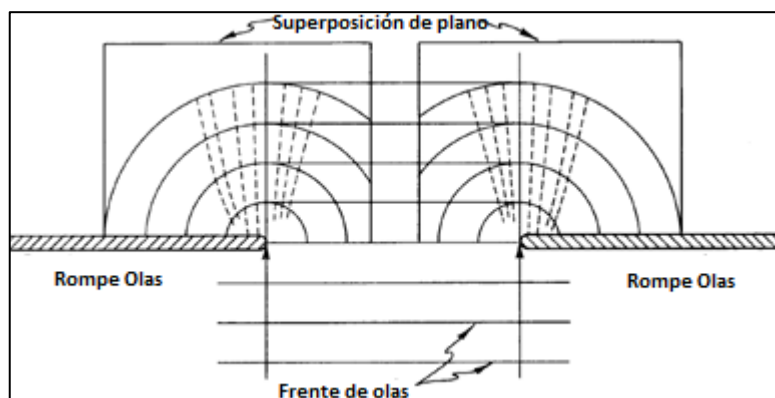


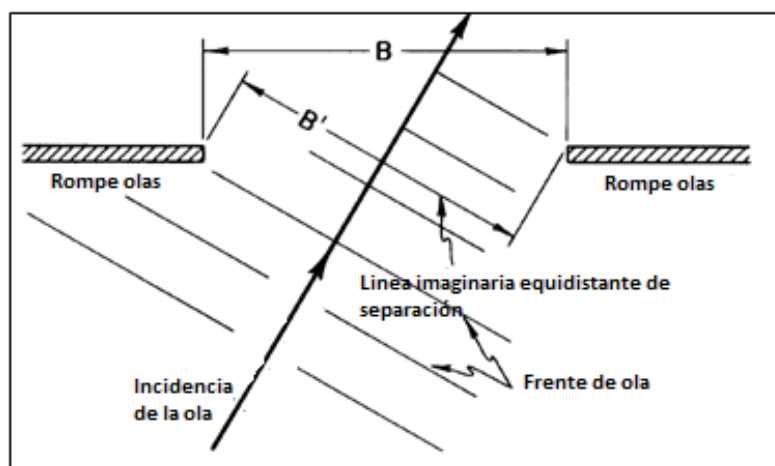
Figura 27: Diagrama de Jhonson para caso de rompeolas separado por 2L.

Fuente: U.S. Army Corps of Engineers (1984).

- c) Ondas que pasan por un espacio de un ancho superior a cinco longitudes de onda en incidencia normal. Cuando el ancho de separación del rompeolas es mayor que cinco longitudes de onda, los efectos de difracción de cada ala son casi independientes, y el esquema (Figura 28), puede usarse para definir la característica de difracción de ambas alas como un rompeolas individual con incidencia de  $90^\circ$ .



**Figura 28: Difracción para rompeolas separado por un ancho mayores a  $5L$  ( $B/L > 5$ ).**  
Fuente: U.S. Army Corps of Engineers (1984).



**Figura 29: Incidencia oblicuo del oleaje en rompeolas separado.**  
Fuente: U.S. Army Corps of Engineers (1984).

Así como los casos mencionados anteriormente, los cuales calculan la difracción mediante diagramas o esquemas que permiten obtener coeficientes para obtener las alturas de las olas, existen otros casos (ver Figura 29, con incidencia oblicua del oleaje) que permiten calcularla y que pueden ser estudiados y analizados con mayor detalle en el *SPM*, ya que escapan al alcance de esta memoria.

### 3.6.5 REFRACCIÓN – DIFRACCIÓN

Hasta ahora se ha visto la refracción y la difracción como dos fenómenos independientes que afectan a la dirección y a la altura de ola en su proceso de transformación. Sin embargo, ambos fenómenos no pueden separarse completamente dado que la refracción puede dar lugar a gradientes en la altura de ola que conducen a fenómenos de difracción. Además, en la proximidad de estructuras de protección de costas o naturales (islas, arrecifes, etc.), en presencia de cambios batimétricos, ambos fenómenos pueden ser importantes, lo cual requiere un estudio conjunto de refracción y difracción. Hasta ahora, la propagación de las ondas se ha presentado sobre fondo horizontal al menos localmente horizontal (G.I.O.C, 2000a).

Berkhoff (1973) desarrolló una ecuación para el estudio de ondas propagándose por fondo suavemente variable conocida como ecuación de la pendiente suave o *Mild Slope Equations (MSE)*. A partir de ésta se derivan las aproximaciones parabólicas y elípticas que serán evaluadas en el presente trabajo mediante modelos numéricos como Mike 21 EMS y PMS. Este conjunto de modelos son comúnmente utilizados hoy en día en proyectos de ingeniería, principalmente debido a que su implementación es mucho más sencilla que la MSE completa.

### 3.7 ECUACIÓN DE LA PENDIENTE SUAVE (MSE)

Para abordar el problema de la propagación del oleaje en un fondo variable existen diferentes aproximaciones, siendo la TLO la que ha demostrado ser la más conveniente y sencilla para estudiar su transformación desde aguas profundas hacia aguas someras. Los modelos numéricos que están basados en la ecuación de la pendiente suave permiten estimar en forma combinada los efectos de difracción, reflexión, asomeramiento y refracción, tanto por rotura como por fricción, donde fue Eckart (1952) el primero en proponer una forma de esta ecuación, pero Berkhoff (1972) es quien utiliza el planteamiento anterior para estimar la propagación del oleaje monocromático lineal sobre un fondo que varía gradualmente y que además es impermeable, el cual fue estudiado y descrito posteriormente por Smith & Spring (1975).

A partir de lo anterior, existen diversos estudios que han sido llevados a cabo para propagar el oleaje en un fondo impermeable con cualquier configuración, por ejemplo, Kirby (1986) trabajando con una expansión alrededor del nivel medio del agua y modificando las condiciones de borde en el fondo, derivó la ecuación conocida como la extensión de la MSE. Posteriormente Massel (1993), expuso una nueva aproximación de la misma, la cual incluye el efecto de los modos evanescentes<sup>3</sup>. Otros autores como Chamberlain & Porter (1995) propusieron retener los términos de segundo orden, los cuales desprecia Berkhoff (1972), dando origen a una versión modificada de la MSE, mientras que Porter & Staziker (1995) toman en cuenta una solución que considera los efectos evanescentes además de una corrección a las condiciones de borde.

---

<sup>3</sup> Onda estacionaria que muestra un decaimiento exponencial, las cuales son formadas en el límite de un medio con diferentes propiedades de movimiento y son más intensas con un tercio de su longitud de onda desde que empieza su formación.

### 3.7.1 ECUACIÓN DIFERENCIAL ELÍPTICA

Berkhoff (1972) considerando la TLO y haciendo la hipótesis de que el fondo varía muy suavemente en una longitud de onda, obtuvo una ecuación capaz de enlazar los efectos de la refracción y la difracción. Definiendo el potencial de velocidad total para una onda armónica simple como:

$$\phi(x, y, z, t) = \phi(x, y) \frac{\cosh k(d + z)}{\cosh kd} e^{i\omega t}$$

**Ecuación 30**

Luego, multiplicando la ecuación de Laplace por la función  $\omega(z)$  se realiza la integración de la Ecuación 31:

$$\int_{-d}^{\eta} \omega(z) \nabla^2 \phi dz = 0$$

**Ecuación 31**

Donde,

$$\omega(z) = \frac{\cosh k(d + z)}{\cosh kd}$$

**Ecuación 32**

Mediante ésta integración, la ecuación de Laplace en tres dimensiones se transforma en la Ecuación 33 de dos dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( CC_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( CC_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k^2 CC_g \phi = 0$$

**Ecuación 33**

O de forma más compacta

$$\nabla(CC_g \nabla \phi) + k^2 CC_g \phi = 0$$

**Ecuación 34**

Dado que se ha considerado ondas armónicas simples y que  $\eta = -\left(\frac{1}{g}\right)\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)$  se puede obtener una expresión alternativa en función de la superficie libre tal que:

$$\nabla(CC_g \nabla \eta) + k^2 CC_g \eta = 0$$

**Ecuación 35**

La Ecuación 35 es conocida como la ecuación diferencial elíptica de la pendiente suave donde para llegar a ésta es necesario hacer la hipótesis de que la pendiente del fondo varia suavemente, es decir  $\nabla d / (kd) \leq 1$ . Booij (1983) demostró que esta ecuación da resultados satisfactorios para fondo plano con pendientes de hasta 1:3. Posteriormente, otros autores

como Massel (1993) y Porter & Staziker (1995), han realizado extensiones de la MSE que permiten utilizar esta ecuación para pendientes mayores (G.I.O.C, 2000a).

Partiendo de la ecuación de Berkhoff se han desarrollado numerosas variantes y aproximaciones, utilizadas en modelos numéricos, que se clasifican en elípticos, parabólicos e hiperbólicos. Donde las primeras dos son estudiadas en éste trabajo.

### **3.7.2 APROXIMACIÓN PARABÓLICA**

El grupo de ingeniería oceanográfica y de costas de la universidad de Cantabria (G.I.O.C, 2000a), define ésta aproximación de la siguiente manera:

La ecuación de la MSE en su forma original corresponde a una ecuación diferencial elíptica cuya resolución requiere el conocimiento de las condiciones de contorno en todos los contornos (offshore, costa y contornos laterales). Existen varios modelos numéricos que resuelven mediante elementos finitos esta ecuación diferencial en su forma elíptica, sin embargo, la difícil implementación de las condiciones de contorno ha hecho que estos sean utilizados fundamentalmente para el estudio de agitación portuaria donde las condiciones de contorno en diques y muelles son relativamente sencillas de modelar. Para problemas de propagación que cubran múltiples longitudes de ondas (grandes dominios), como es el caso de las propagaciones para estudios de playas, se han desarrollado asimismo algunos modelos que resuelven la ecuación en su forma elíptica trabajando en diferencias finitas (Panchang et al. (1991), Li y Anasasiou (1992)). Sin embargo, para estos casos se ha desarrollado una teoría basada en la aproximación parabólica de la Ecuación 36 que es la más extendida en el estudio de la acción combinada de la refracción y difracción en grandes dominios (Radder (1979), Kirby y Dalrymple (1983)). La ventaja fundamental de este tipo de aproximación es que la integración numérica de la ecuación puede realizarse desde profundidades indefinidas hacia la costa, sin especificar las condiciones de contorno en la misma, lo cual es sumamente difícil pues se desconoce dónde se va a producir la rotura. A pesar de que esta aproximación es muy sencilla de utilizar presenta dos limitaciones importantes:

- La aproximación requiere que las ondas tengan una dirección principal de propagación, dado que la difracción se produce exclusivamente en la dirección perpendicular a la misma.
- Los efectos de la reflexión en el sentido opuesto al de propagación deben ser despreciables.

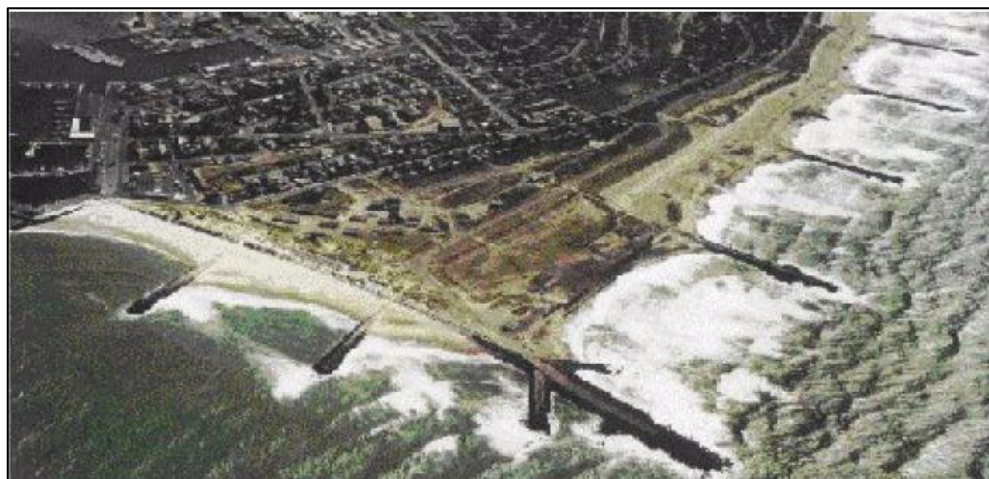
La ecuación que define la aproximación parabólica viene dada de la siguiente manera (Svendsen, 2006):

$$2ikc_g A_x + sk(k - k_0)cc_g A + i(kc_g)_x A + (cc_g A_y)_y = 0$$

**Ecuación 36**

Esta aproximación es aplicada generalmente para estimar perturbación de ondas en áreas costeras abiertas (playas largas) y en zonas costeras con estructuras cuando la dispersión se pueda despreciar y la difracción sea predominantemente perpendicular a la dirección de onda principal. A menudo se utiliza para el cálculo de campos de ondas en lugares donde

existan obras como espigones y diques extensos (Figura 30 y 31). En cambio la versión elíptica es recurrentemente utilizada para estudios en puertos y áreas encerradas.



**Figura 30: Playa larga con presencia de espigones.**

Fuente: Manuales técnicos y científicos de Mike 21-PMS.



**Figura 31: Playa larga o abierta.**

Fuente: <http://listas.20minutos.es/lista/mejores-playas-en-america-17837>

Para comprender de mejor manera estos sistemas de modelos, se presenta a continuación una descripción y revisión con mayor detalle de las diferencias entre la versión elíptica de la MSE y la aproximación parabólica, con el fin de analizar sus disimilitudes tanto en las formulaciones de la ecuación como en los fenómenos físicos que representan.

### **3.7.3 ANÁLISIS DE LAS FORMULACIONES DE LA MSE**

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la descripción de los fenómenos de refracción, asomeramiento y difracción combinados se debe a partir de la ecuación de la pendiente suave implementada por Berkhoff.

Partiendo de esta ecuación, se han desarrollado diferentes aproximaciones de la MSE que son utilizadas en modelos numéricos y que se clasifican en elípticos, parabólicos e hiperbólicos. Donde las primeras dos son las de mayor interés de estudio en esta memoria.

A continuación se revisan las formulaciones de la aproximación parabólica y la elíptica para conocer las diferencias y similitudes de sus ecuaciones además de los fenómenos físicos que representan. Para realizar esto, se deben conocer las ecuaciones en derivadas parciales que darán una primera pista de sus diferencias a la hora de ser aplicadas, y posteriormente describir los fundamentos teóricos que dan origen a la aproximación parabólica.

#### **3.7.3.1 ECUACIÓN EN DERIVADAS PARCIALES**

Las ecuaciones en derivadas parciales se emplean en las formulaciones matemáticas utilizadas para describir procesos físicos y otras ciencias que relacionan las funciones de las variables espacio y tiempo. Problemas típicos son la propagación del sonido o del calor, la electrostática, la electrodinámica, la dinámica de fluidos, la elasticidad, la mecánica cuántica y muchos otros.

En esta memoria las ecuaciones mencionadas anteriormente son importantes para comprender el origen y las diferencias entre las aproximaciones parabólicas y elípticas.

Una ecuación en derivadas parciales (a veces abreviado como EDP) se define como aquella cuyas incógnitas son funciones de diversas variables, con la peculiaridad de que en dicha ecuación figuran no solo las propias funciones sino también sus derivadas, según V.P. Mijailov (1978).

Una ecuación en derivadas parciales (EDP) para la función  $u(x_1, \dots, x_n)$  tiene la siguiente forma:

$$F\left(x_1, \dots, x_n, u, \frac{\partial}{\partial x_1} u, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} u, \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_1} u, \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} u, \dots\right) = 0$$

**Ecuación 37**

Donde a partir de ésta, se pueden obtener soluciones generales y completas que se clasifican en ecuaciones diferenciales ordinarias, de segundo orden y de orden superior (Svendsen, 2006).

### 3.7.3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS EDP DE SEGUNDO ORDEN

Las EDP de segundo orden se clasifican habitualmente dentro de cuatro tipos de EDP que son de interés fundamental, a continuación se dan ejemplos de estos cuatro tipos:

| Ecuación   | Nombre    | Tipo        |
|--|-----------|-------------|
| $\nabla^2 u = 0$                                     | Laplace   | Elíptica    |
| $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u$ | Onda      | Hiperbólica |
| $\frac{\partial u}{\partial t} = k \nabla^2 u$       | Difusión  | Parabólicas |
| $\nabla^2 u = ku$                                    | Helmholtz | Elíptica    |

**Tabla 4: Clasificación de las EDP de segundo orden**

Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n\\_en\\_derivadas\\_parciales](http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_en_derivadas_parciales).

Con mayor generalidad, si se tiene una ecuación de segundo orden del tipo:

$$Au_{xx} + 2Bu_{xy} + Cu_{yy} + Du_x + Eu_y + F = 0$$

**Ecuación 38**

- se dice que es *elíptica* si la matriz  $Z = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$  tiene un determinante mayor a 0.
- se dice que es *parabólica* si la matriz  $Z = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$  tiene un determinante igual a 0.
- se dice que es *hiperbólica* si la matriz  $Z = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}$  tiene un determinante menor a 0.

Otra manera de entender estos diferentes esquemas es recordando las formas cónicas que se usan en geometría analítica, donde se utilizan variables tipo A, B y C para saber si estamos en presencia de una parábola, elipse o hipérbola, ya que estos esquemas numéricos siguen el mismo principio.

Las ecuaciones elípticas se diferencian de las parabólicas e hiperbólicas en que éstas últimas son ecuaciones de evolución y hay un parámetro que se puede identificar como tiempo, mientras que en las elípticas no.

### 3.7.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA APROXIMACIÓN PARABÓLICA

Esta aproximación tiene origen considerando la ecuación de pendiente suave obtenida por Berkhoff, quien siguiendo la TLO y la teoría en 2D para estudios de refracción y difracción en grandes extensiones, utiliza una onda monocromática de frecuencia  $\omega$  y una superficie libre  $\eta$  con un potencial de velocidades descrita en la Ecuación 30, de la cual se obtiene la Ecuación 35 correspondiente a la ecuación elíptica de la MSE.

Según lo presentado en el ítem 3.7 y considerando el trabajo realizado por López Gutiérrez (2004), se describen a continuación los fundamentos teóricos para obtener la aproximación parabólica mediante la versión elíptica de la MSE.

Según Berkhoff la versión elíptica también puede ser expresada como:

$$\nabla(CC_g \nabla \phi) + (k^2 CC_g + i\omega W)\phi = 0$$

Ecuación 39

Donde,

|              |  |  |
|--------------|--|--|
| $\nabla$     | Operador gradiente bidimensional $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$               |  |
| $C(x, y)$    | Celeridad de la onda   | [m/s]                                    |
| $C_g(x, y)$  | Celeridad de grupo   | [m/s]                                    |
| $\phi(x, y)$ | Potencial de velocidad en la superficie libre media, la cual se relaciona con el potencial de velocidad total mediante |  |
|              | $\frac{\phi}{x}(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} \phi(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t}$                |  |
| $z$          | Elevación de la superficie del agua a partir del nivel medio   | [m]                                      |
| $h$          | Profundidad  | [m]                                      |
| $k$          | Numero de onda $\frac{2\pi}{L}$  | $[m^{-1}]$                               |
| $W$          | Términos de disipación $\frac{E_{dis}}{E}$   |  |
| $E_{dis}$    | Tasa media de energía disipada por unidad de tiempo y unidad de superficie   |  |
| $E$          | Energía por unidad de superficie   | [J/m <sup>2</sup> ]                      |
| $\omega$     | Frecuencia angular   | [s <sup>-1</sup> , rad s <sup>-1</sup> ] |
| $L$          | Longitud de onda   | [m]                                      |

Hay que indicar que la elevación de la superficie libre también se puede expresar como: (Dalrymple., 1984)

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0}$$
$$\eta = \phi(x, y) e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})}$$

**Ecuación 40**

Para ondas progresivas de cresta larga, el potencial de la superficie libre se puede expresar como:

$$\phi = A^*(x, y) e^{i\psi}$$

**Ecuación 41**

Donde,

$$\psi = \int k \cos \theta \, dx + \int k \sin \theta \, dy$$

**Ecuación 42**

$\theta$  es el ángulo entre la dirección de propagación de las ondas respecto al eje horizontal.

Si se asume que la dirección de propagación predominante es el eje horizontal (x), entonces la ecuación de la función de fase quedaría como:

$$\psi = \int k \, dx$$

**Ecuación 43**

Para simplificar el problema elíptico, y descomponiendo la función potencial en una componente de reflexión que se dispersa y en una de difracción, se obtiene una ecuación representativa del fenómeno de propagación, transformando el problema elíptico a parabólico empleando conceptos de potencial complejo asumiendo que la dirección de propagación es el eje x, y despreciando los fenómenos de “Back-Scatter”<sup>4</sup> y de difracción a lo largo de esta dirección (López Gutierrez, 2004). Estos últimos fenómenos se debilitan en esa dirección de avance. El desarrollo completo se encuentra en el artículo de Berkhoff, Booij y Radder, (1982).

Siguiendo con lo anterior, la Ecuación 39 se puede expresar como:

---

<sup>4</sup> El fenómeno Back-Scatter (retro-dispersión) corresponde a una reflexión difusa de la onda, al chocar con una pared, cuando la dispersión supera ángulos mayores a 90° con respecto a la dirección inicial de propagación.

$$(CC_g\phi_x)_x + (CC_g\phi_y)_y + (k^2CC_g + i\omega W)\phi = 0$$

**Ecuación 44**

Los subíndices x e y representan las derivadas parciales respecto de x e y.

Empleando la Ecuación 41, los términos del gradiente se pueden escribir como:

$$\phi_x = (ikA^* + A_x^*)e^{i\psi}$$

**Ecuación 45**

$$CC_g\phi_x = (i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*)e^{i\psi}$$

**Ecuación 46**

$$(CC_g\phi_x)_x = [ik(i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) + i\omega C_g A_x^* + i\omega A^*(C_g)_x + (CC_g A_x^*)_x]e^{i\psi}$$

**Ecuación 47**

El último término de la expresión anterior representa la influencia de los resultados en los nodos precedentes y en la difracción a lo largo de la dirección x, el cual se desprecia en la aproximación parabólica. Por lo tanto la Ecuación 47 queda expresada de la siguiente forma:

$$(CC_g\phi_x)_x \cong [-k\omega C_g + i\omega(C_g)_x]A^* + 2i\omega C_g A_x^*]e^{i\psi}$$

**Ecuación 48**

Finalmente, empleando la Ecuación 41, se obtiene:

$$(CC_g\phi_y)_y = (CC_g A_y^*)_y e^{i\psi}$$

**Ecuación 49**

Sustituyendo la Ecuación 48 y 49 en la Ecuación 44 se obtiene:

$$A_x^* - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y^*)_y + A^* \frac{(C_g)_x}{2C_g} + A^* \frac{W}{2C_g} = 0$$

**Ecuación 50**

$$\phi = A(x, y)e^{ik_0 x}$$

**Ecuación 51**

Donde  $k_0$  es un número de onda de referencia y  $A(x, y)$  es una función compleja de variación lenta. Por tanto, resultaría que

$$A^*(x, y) = A(x, y)e^{i\theta} \quad ; \quad \theta = k_0 x - \int k dx$$

**Ecuación 52**

En consecuencia, la Ecuación 51 se enuncia como:

$$A_x - i(k - k_0)A + \frac{A}{2C_g} (C_g)_x - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y)_y + \frac{W}{2C_g} A = 0$$

**Ecuación 53**

La Ecuación 53 es la aproximación parabólica más simple a la ecuación elíptica de la pendiente suave. Esta aproximación es válida para ondas que se propagan en una dirección predominante (eje x positivo) o con variaciones angulares pequeñas respecto de la dirección de propagación (eje x). El número de onda de referencia  $k_0$  utilizado es el número de onda medio a lo largo del eje y".

Kirby (1986) amplió la ecuación anterior para la propagación de ondas con variaciones angulares mayores respecto de la dirección de propagación (eje x). De la cual se obtuvo la siguiente expresión:

$$A_x + i(k_0 - \beta k)A + \frac{A}{2C_g} (C_g)_x + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} (CC_g A_y)_y + \frac{\sigma_2}{\omega C_g} (CC_g A_y)_{yz} + \frac{W}{2C_g} A = 0$$

**Ecuación 54**

Donde,

$$\sigma_1 = i\left(\beta_2 - \beta_3 \frac{k_0}{k}\right) + \beta_3 \left(\frac{k_x}{k^2} + \frac{(C_g)_x}{2kC_g}\right) \quad ; \quad \sigma_2 = -\frac{\beta_3}{k}$$

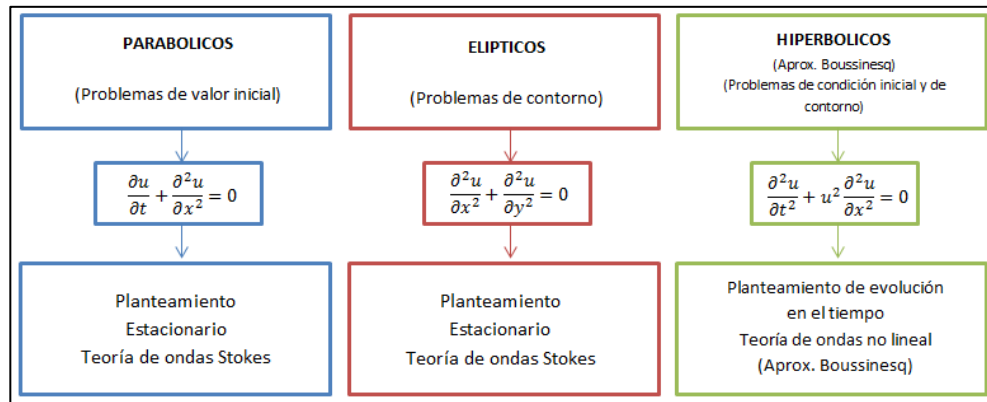
**Ecuación 55**

Donde, el término  $\beta$  representa la relación de variación angular entre secciones de dos rayos adyacentes.

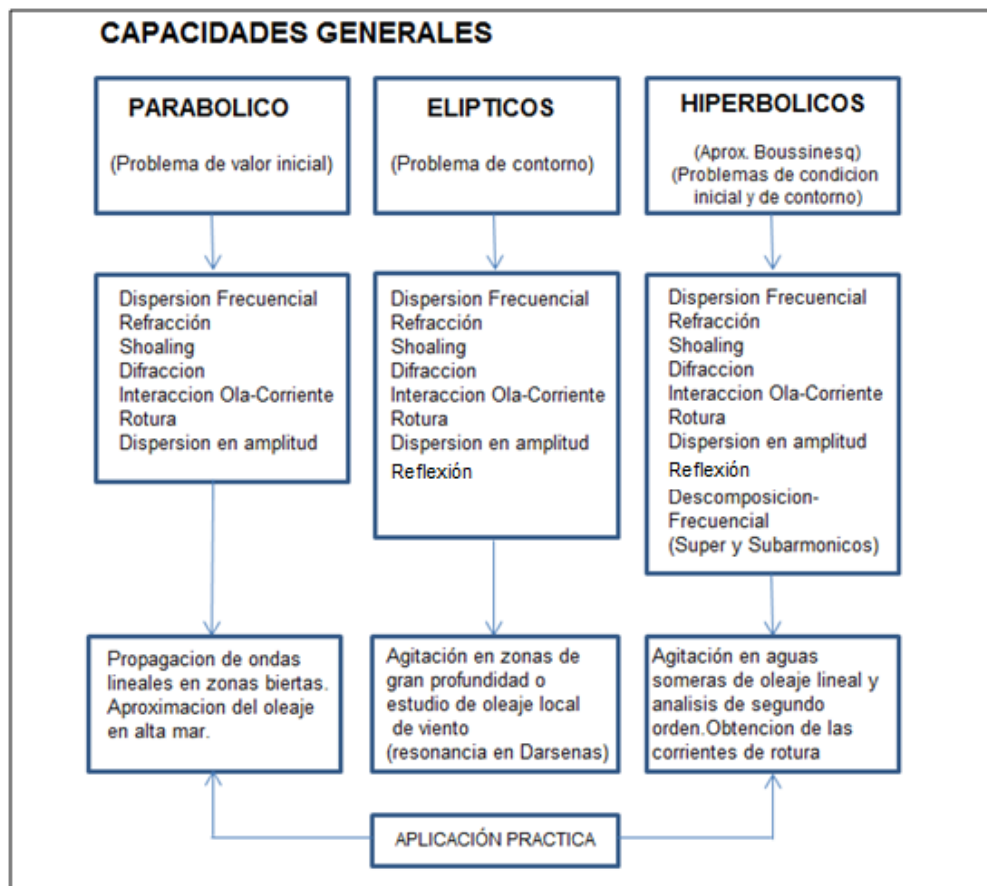
Finalmente, la Ecuación 54 es la ecuación básica que resuelve el problema de la ecuación de la pendiente suave y es la empleada en el módulo del modelo numérico Mike 21 PMS. En este modelo el fenómeno de la reflexión es casi despreciable frente a los modelos elípticos en los cuales el efecto del flujo de energía (reflexión) es importante.

En cuanto a las capacidades para representar los fenómenos físicos del oleaje, tanto la versión elíptica como parabólica de la MSE, presentan diferencias en cuanto a las metodologías de resolución del problema, a las extensiones del área de estudio y a la definición de las condiciones de contorno del problema (ver Figura 32 y 33). De esta manera, teniendo en cuenta los antecedentes explicados en los ítems anteriores podemos decir que la versión parabólica es usada generalmente para propagar el oleaje hasta la zona cercana a la costa (G.I.O.C, 2000a) e incluso para el estudio de las corrientes generadas por el oleaje, sin embargo, la ausencia de reflexión en la versión parabólica exige la utilización de la versión elíptica de la ecuación para estudios de agitaciones portuarias.

Se debe tener presente que el modelo parabólico tiende a linealizar los términos asociados al cálculo de la difracción, por lo que su aplicación está sujeta a limitaciones de sus resultados, siempre que éste sea el principal fenómeno de interés.



**Figura 32: Metodologías de resolución.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 33 : Diferencias de las aproximaciones derivadas de la Mild Slope.**  
Fuente: Elaboración propia.

La MSE es utilizada hoy en día, mediante modelos numéricos, para poder estimar los fenómenos de difracción y refracción combinados en un determinado sector. Para comprender de mejor manera estos sistemas de modelo se presenta a continuación una descripción sobre ellos.

## **3.8 MODELOS NUMÉRICOS**

De las distintas teorías del oleaje que se han ido desarrollando, se pueden obtener modelos analíticos y descripciones de las características para la mayoría de tipos de olas (oleaje tipo *sea*, *swell*, etc.), lo que permite su análisis y estudio. Sin embargo, aún existen aspectos teóricos relacionados con las ecuaciones de gobierno del movimiento ondulatorio y las ecuaciones de contorno, sobre todo en condiciones no lineales dominantes, que dificultan obtener soluciones analíticas completas. Respecto a esto, en los últimos años se ha producido un importante avance en el desarrollo computacional de soluciones numéricas para las ecuaciones diferenciales, utilizando esquemas de diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos, entre otros, que gobiernan las teorías del oleaje, lo cual se traduce en la aparición de modelos de simulación más completos y precisos capaces de resolver las ecuaciones de gobierno y dar una aproximación más real al problema de la propagación de olas en las proximidades de la costa (Guisado, Malvárez, & Navas., 2010).

### **3.8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS**

En un primer nivel se pueden clasificar los modelos relacionados con el oleaje como:

- a) Modelos simples, empíricos o paramétricos: Los modelos empíricos predicen parámetros como la altura significativa de la ola a partir de valores como la velocidad del viento, el fetch, la duración del viento y la profundidad a través de análisis dimensionales. Son modelos básicos que permiten realizar cálculos rápidos durante el tiempo de que se esté en terreno. Este método ha caído en desuso, ya que está limitado a situaciones muy concretas, tanto por la incapacidad de simular los procesos más importantes que intervienen en la propagación del oleaje, como por los crecientes avances y evolución de los modelos complejos.
- b) Modelos de generación: Se utilizan para modelar la formación y crecimiento del oleaje originado por la acción del viento. En general, se aplican a grandes áreas oceánicas que consideran una situación no estacionaria. No toman en cuenta los efectos de las variaciones de profundidad. Sus formulaciones se basan fundamentalmente en la densidad espectral, cuya evolución en el tiempo y en el espacio se calcula por medio de una ecuación de balance de energía. De todo esto se traduce una concepción probabilística del oleaje en el tratamiento del problema
- c) Modelos de propagación: Estos modelos parten del oleaje totalmente desarrollado y modelan las transformaciones que sufre el oleaje en su propagación desde aguas profundas hasta aguas someras. En este caso las variaciones de profundidad son fundamentales. Generalmente consideran un estado estacionario y su rango de aplicación espacial es más reducido que los modelos de generación. Estos modelos se basan en ecuaciones que describen el estado instantáneo del movimiento.

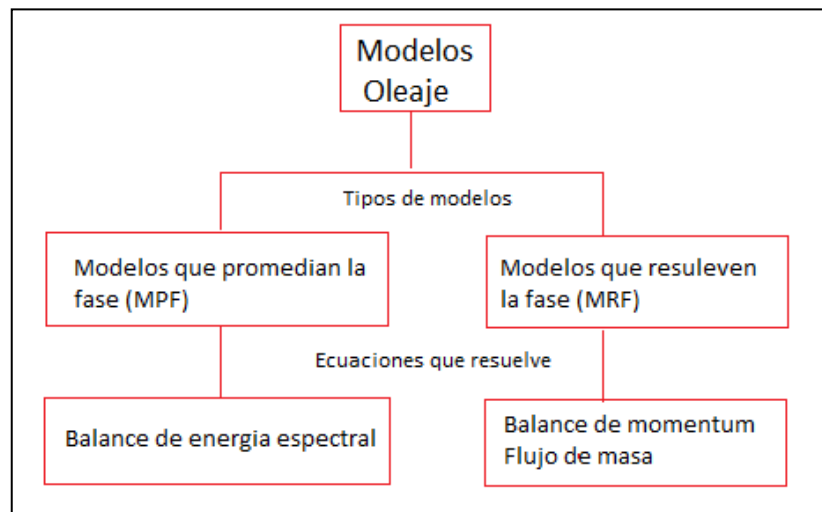
Hoy en día, con el desarrollo de nuevas metodologías para simular el oleaje, se han presentado modelos que, basándose en la función de densidad espectral y el balance de energía, permiten el cálculo de su propagación hasta aguas someras y además, en algunos casos, consideran situaciones estacionarias (Holthuijsen, 2007), sin la necesidad de ser consideradas como modelos de generación. Por otro lado, existen modelos que sin

emplearla función de densidad espectral permiten tener en cuenta el aporte de energía debido al viento (López Gutierrez, 2004).

Por consiguiente, la clasificación en un primer nivel es sustituida por la siguiente manera:

- a. Modelos espectrales (modelos que promedian la fase).
- b. Modelos no espectrales (modelos que resuelven a fase).

La Figura 34 muestra, de forma esquemática, la clasificación de los modelos anteriormente señalado, especificando además las ecuaciones que resuelven.



**Figura 34: Tipos de modelos de oleaje y ecuaciones que resuelve.**

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos que promedian la fase, se basan en la conservación de la energía espectral, y asumen que las propiedades de las olas varían lentamente a escala de longitud de onda. Estos consideran los fenómenos de generación, disipación de energía y las interacciones no lineales en los que la superficie del mar es descrita por un espectro de energía (Bolaños, 2004). La Figura 35 muestra la clasificación de los modelos espectrales, y en color rojo los softwares de ejemplos que son aplicables.

Por su parte, los modelos que resuelven la fase están basados en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad de movimiento integradas en vertical, son usados para condiciones de oleaje muy variables en dominios pequeños y generalmente no consideran generación ni disipación de energía (Ris, 1997; Massel, 1996; Monbaliu et al., 2000), siendo una de las principales ventajas su buena simulación de los procesos de difracción y refracción. La aplicación de estos se limita a áreas relativamente pequeñas mientras que los otros modelos no precisan una resolución tan pequeña por lo que pueden ser aplicados en áreas mayores. La Figura 36 muestra la clasificación de los modelos considerados como no espectrales, y en color rojo los ejemplos de los softwares aplicables.

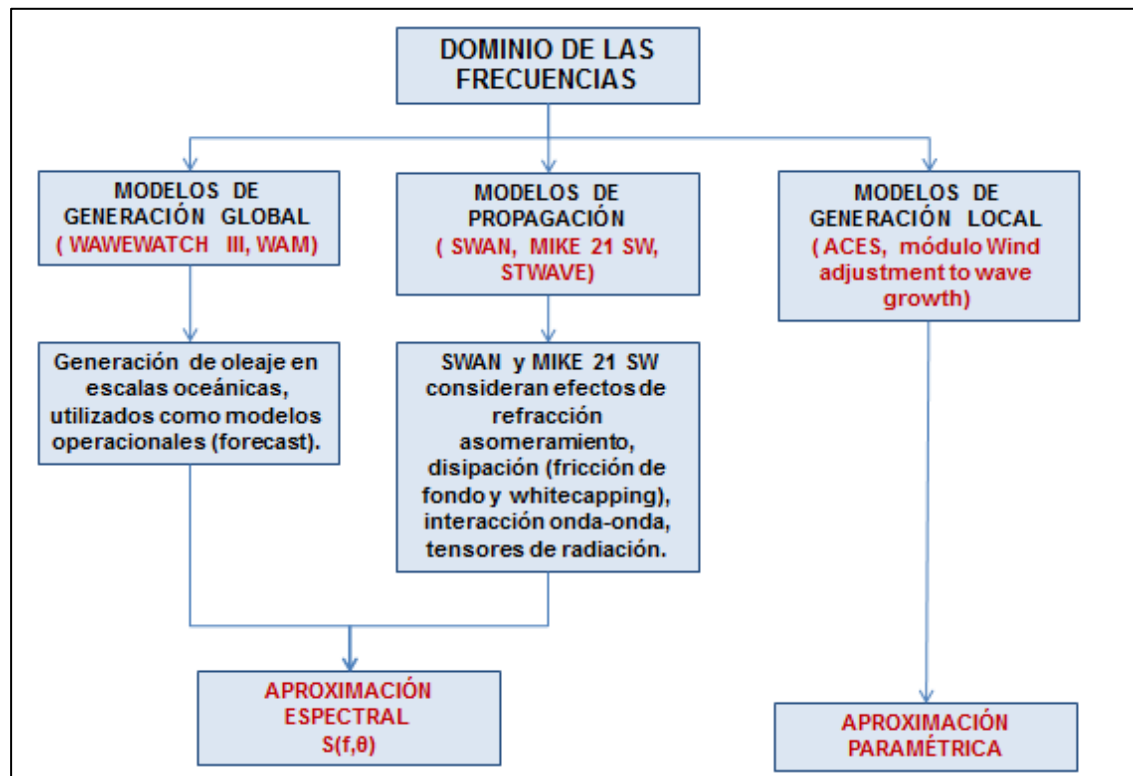


Figura 35: Clasificación de los modelos numéricos que promedian la fase.

Fuente: Elaboración propia.

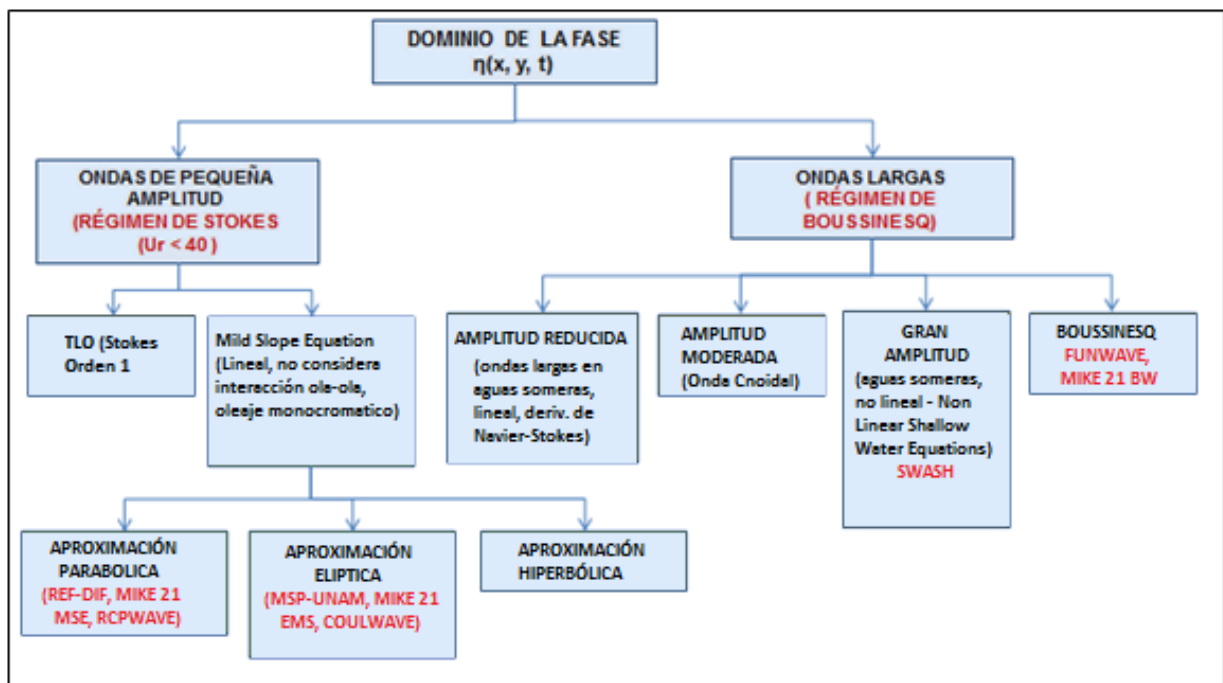


Figura 36: Clasificación de los modelos numéricos que resuelven la fase.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.1.1 MODELOS BASADOS EN LA ECUACIÓN DE LA PENDIENTE SUAVE

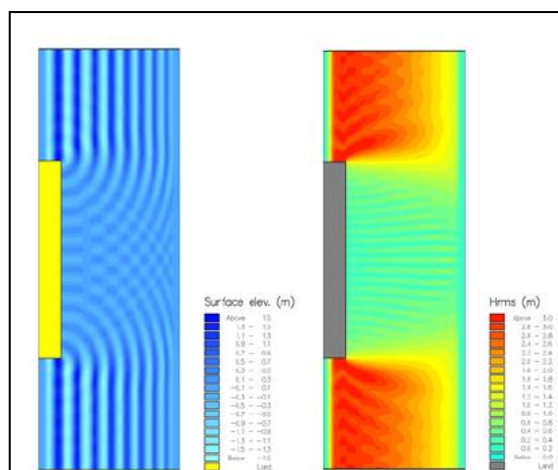
La MSE es una ecuación elíptica que se puede emplear en cualquier profundidad cumpliendo con la restricción de que su pendiente varíe lentamente, es decir, se debe cumplir que  $m \ll kd$ , siendo  $m$  la pendiente del fondo y  $kd$  la profundidad relativa (Battjes, 1994). La MSE se deriva de la TLO y se debe cumplir la restricción de que  $ak \ll 1$ , siendo  $a$  la amplitud de la onda y  $k$  el factor de dispersión (número de onda).

A partir de esta ecuación se han desarrollado numerosas variantes y aproximaciones que se clasifican en elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Es importante destacar que los diferentes procesos involucrados en la propagación del oleaje (disipación, refracción, difracción, interacciones no lineales, etc.) no son tratados de igual forma en estos métodos, por lo que se recomienda aplicar uno u otro en función de las condiciones predominantes en cada caso, de la zona de estudio y del interés en conocer unas u otras variables (Battjes, 1994).

Finalmente, ya que el objetivo de esta memoria consiste en evaluar técnicas de modelado que trabajen en base a la misma ecuación de gobierno y que representen a los fenómenos combinados de difracción y refracción, los modelos utilizados son el Mike21-EMS y PMS. En contraste, para obtener otra evaluación de las diferentes técnicas de modelado, será incorporado el modelo Mike 21 SW, el cual no se basa en la ecuación de la pendiente suave, sino en la ecuación de balance de energía y densidad espectral.

### 3.8.1.2 MODELO MIKE 21 EMS

Es un módulo elíptico de pendiente suave que gobierna el movimiento de oleaje armónico sobre una batimetría de variación suave, y que incorpora la transmisión y reflexión parcial a través de obras marítimas. Es un modelo lineal de refracción-difracción donde se incluye la rotura de olas, fricción y dispersión. Las “capas esponja” se aplican cuando es requerida una absorción total de la energía de la onda. El modelo incluye unas fórmulas generales de tensores de radiación para ser aplicado en áreas de fuerte difracción y zonas de reflexión.



**Figura 37 Modelación utilizando Mike 21 EMS.**  
Fuente: Manuales técnicos y científicos de Mike 21-EMS

### 3.8.1.3 MODELO MIKE 21PMS

Este es un modelo lineal de difracción-refracción basado en una simplificación simple de la ecuación elíptica de pendiente suave que asume la propagación de ondas en una dirección predominante (x-dir), anulando la capacidad de resolver el fenómeno de reflexión. El modelo tiene en cuenta los efectos de la refracción y shoaling debido a la variación de profundidad, difracción a lo largo de la perpendicular de la dirección del oleaje predominante y disipación de energía por fricción en profundidad y rotura de oleaje.

Cabe mencionar que una desventaja de este modelo radica en la limitación del ángulo de propagación del oleaje a  $\pm 60^\circ$ , con respecto al eje principal (x-dir), por lo tanto, las soluciones son más aproximadas cuanto menor variación haya respecto a esa dirección principal.

MIKE 21 PMS puede ser aplicado para el estudio de agitaciones en zonas costeras abiertas y para el cálculo del campo de oleaje (en áreas costeras con estructuras como, por ejemplo, malecones, rompeolas, etc.) cuando el “back-scatter” puede ser omitido y la difracción es principalmente perpendicular a la dirección de la ola. Además puede reproducir tensores de radiación necesarios para la simulación de las corrientes inducidas por el oleaje, el cual es muy importante en el cálculo del transporte de sedimentos costeros.

### 3.8.1.4 MODELO MIKE 21 SW

Es un modelo espectral de tercera generación de oleaje generado por viento, basado en mallas no estructuradas. El modelo simula el crecimiento, disminución y transformación del oleaje, generado por el viento y mar de fondo, en zonas costeras y en aguas profundas. El modelo incluye aumento de oleaje por la acción del viento, interacción no lineal oleaje-oleaje, interacción corriente-oleaje, disipación por “white-capping”, disipación por fricción del fondo, disipación por rotura de las olas y refracción por variaciones de profundidad.

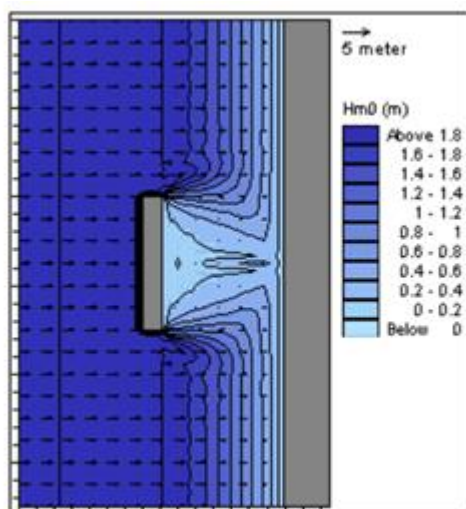


Figura 38: Ejemplo modelo mike21-PMS  
Fuente: Manuales técnicos de Mike 21-PMS

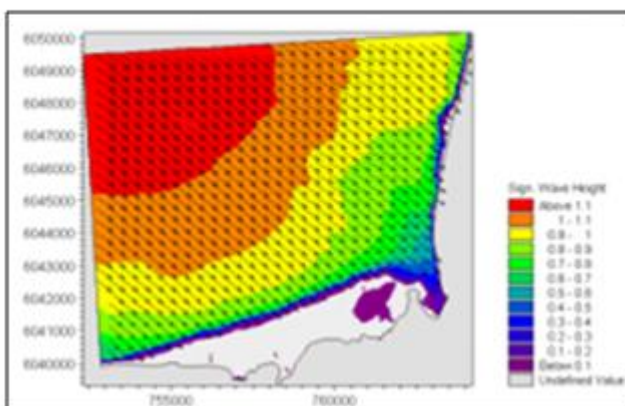


Figura 39: Ejemplo modelo Mike 21-SW.  
Fuente: Manuales técnicos de Mike 21-SW.

# METODOLOGÍA

## **4 APLICACIÓN DE MIKE 21 SW, EMS Y PMS EN CASOS BENCHMARKS**

Esta memoria está enfocada en la evaluación de técnicas de modelado para definir el oleaje en zonas donde ocurre difracción en profundidades intermedias, aplicado a la Bahía de Valparaíso, mediante el uso de modelos numéricos del mike21. Sin embargo, antes de aplicar un caso real se consideró realizar un análisis de sensibilidad usando una metodología de propagación de parámetro de oleaje con altura unitario sobre dos mallas batimétricas idealizadas (benchmarks), definiendo su creación y configuración de parámetros de cálculo en cada modelo, para finalmente presentar y comparar los resultados con estudios anteriores asociados a diagramas de difracción. Las mallas idealizadas a evaluar en esta primera etapa son:

- 1) Un molo de abrigo de longitud semi-infinita con un fondo plano, constante y en condiciones de aguas profundas, que sirve de obstáculo para generar la difracción del oleaje (caso 1).
- 2) Dos molos de abrigo separados por una ranura de 2 longitudes de onda, considerando un periodo peak de 10 [s], y ubicados en un fondo plano, constante y en condiciones de aguas profundas (caso 2).

Cabe señalar que al definir una malla de fondo plano y en condiciones de aguas profundas, se evitan los procesos de refracción y asomeramiento permitiendo visualizar de manera más clara la definición de la difracción.

El objetivo principal de la primera etapa es evaluar y analizar las diferencias que se presentan en las simulaciones logradas por los modelos elípticos (*Mike21 EMS*), parabólicos (*Mike21 PMS*) y espectrales (*Mike21 SW*), a la hora de definir el fenómeno de difracción aplicando casos prácticos. De esta manera, es posible identificar las restricciones y capacidades que tienen los programas para describir dicha transformación, mediante un análisis cualitativo, cuantitativo y gráfico.

Posteriormente, para obtener una comparación entre los diferentes modelos con experiencias anteriores que estudian el fenómeno de difracción, se realizó una comparación con los diagramas presentados por Wiegel (1962) y Jhonson (1952) en el *Shore Protection Manual (SPM)*, ver Figuras 27 y 28.

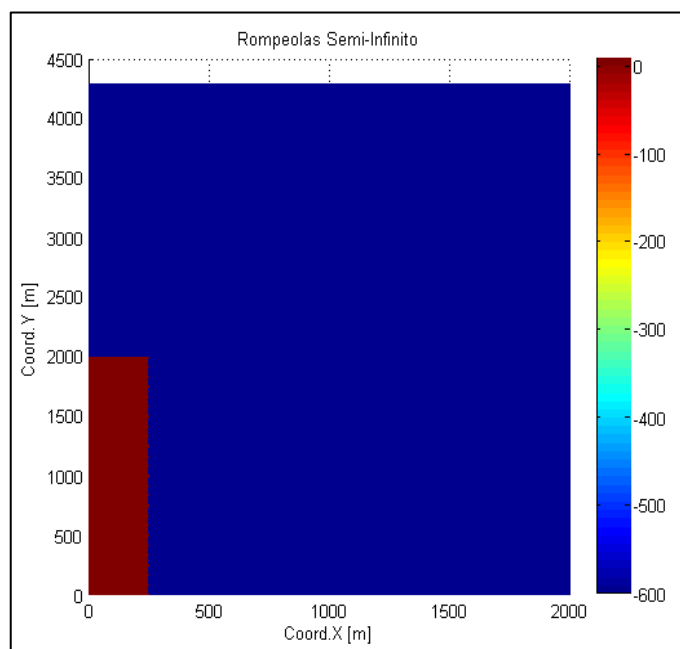
A continuación, ésta primera etapa se divide en 3 partes, siendo la primera la creación de mallas benchmarks en matlab. Posteriormente la aplicación de los 3 modelos especificando la configuración y calibración seleccionadas. Finalmente la presentación de resultados considerando la comparación con los ábacos de difracción.

## 4.1 CREACIÓN DE MALLAS BENCHMARKS

Para realizar un primer análisis de los efectos de difracción de ondas es necesario generar una malla idealizada con un molo de abrigo que cumpla con la condición de aguas profundas y fondo constante. Para asegurar esta condición se genera un mallado de 2000[m] en el eje de la abscisa, 4300[m] en el eje de la ordenada, y -600[m] en su eje z. Donde el eje z corresponde a la profundidad.

La batimetría se creó mediante una matriz de 3 columnas que contienen las coordenadas en X e Y (posición de puntos), y los datos de profundidad de fondo y del molo, considerando para éste último un valor de profundidad de 10[m]. Las dimensiones del molo contempla un ancho de 250[m] y un largo de 2000[m] teniendo como punto de partida el origen (0,0).

La matriz creada incorpora todas las combinaciones de puntos del mallado 2D, con una resolución de 10x10[m], ver Figura 40.



**Figura 40: Batimetría idealizada con un molo de abrigo de longitud semi-infinita, caso 1.**

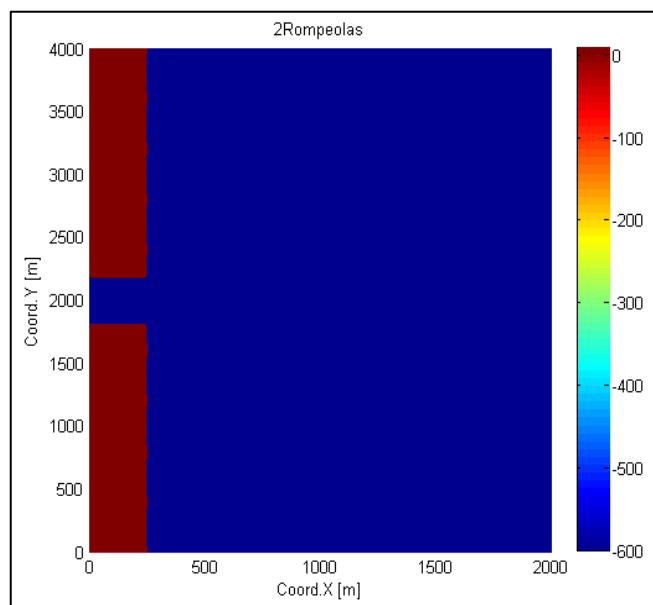
Fuente: Elaboración propia.

Obs: La paleta de colores representa la profundidad de la malla.

Para el caso 2 se aplica la misma metodología señalada en el caso 1 (generando un código matlab), pero con algunas modificaciones en cuanto a sus dimensiones y en la cantidad de molos de abrigo.

La dimensión de la malla tiene un largo de 4000 [m] en el eje de la ordenada, 2000 [m] en el eje de la abscisa y una profundidad constante de -600 [m] en el eje z. Donde el eje Z corresponde a la profundidad.

Para el caso de la barrera que provocará la difracción del oleaje se consideran 2 molos de abrigo separados a una distancia de 2 longitudes de onda, en este caso de 300 [m] considerando un periodo peak de 10 [s], con un ancho de 250 [m] y ubicados a partir de la coordenada (0,0). La grilla cuenta con una resolución de mallado de 10x10[m], ver Figura 41.



**Figura 41: Batimetría idealizada con 2 molos de abrigo separados en 2 longitudes de onda.**

Fuente: Elaboración propia.

Obs: La paleta de colores representa la profundidad de la malla.

Para analizar la difracción en los 2 casos prácticos, se propago el mismo parámetro de oleaje ( $H$ ,  $T_p$ ,  $Dir$ ) en los 3 módulos de *mike21*, sin embargo, la diferencia radica en que los modelos EMS y PMS, al ser monocromáticos, consideran una dirección de propagación unidireccional, mientras que el SW es cuasi-unidireccional (ver Tabla 5).

| Parámetros de oleaje - casos Benchmarks |       |                         |                      |                      |
|---|-------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| H                                       | Tpeak | Dir. Grados cartesianos | Spread direccional   | Módulo <i>Mike21</i> |
| 1[m]                                    | 10[s] | 270[°]                  | Cuasi-Unidireccional | SW                   |
|   |       |                         | Unidireccional       | EMS                  |
|   |       |                         | Unidireccional       | PMS                  |

**Tabla 5: Parámetros de oleaje seleccionado para simulación en *Mike21-EMS-PMS-SW*.**

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 SW

Para trabajar con este modelo se requiere seguir una serie de pasos sugeridos por el desarrollador, donde el primero de ellos consiste en la construcción de la malla batimétrica utilizando la herramienta *mesh generator* del producto Mike Zero.

En este paso es necesario contar con dos archivos .xyz que deben contener la información de la línea de costa (dique semi-infinito) y de sondajes. Luego, es necesario seleccionar la zona de interés para definir las condiciones de borde a las cuales estará sometido el modelo.

Posteriormente se procede a la creación de la triangulación de la malla flexible, donde se elige el tamaño de los elementos mediante la verificación de que el número de Courant<sup>5</sup> no exceda al valor 1 para asegurar una estabilidad y convergencia de la simulación numérica. Una revisión simple consiste en dividir el paso del tiempo por el tamaño del elemento más grande de la malla. En ambos casos se utilizó un área máxima 2000 [m<sup>2</sup>] y un ángulo de 28 [°] para dar origen a los triángulos. Después, para mejorar la distribución de la triangulación se puede suavizar la malla para generar un reacondicionado de los elementos. La Figura 42 muestra la malla para el caso 1.

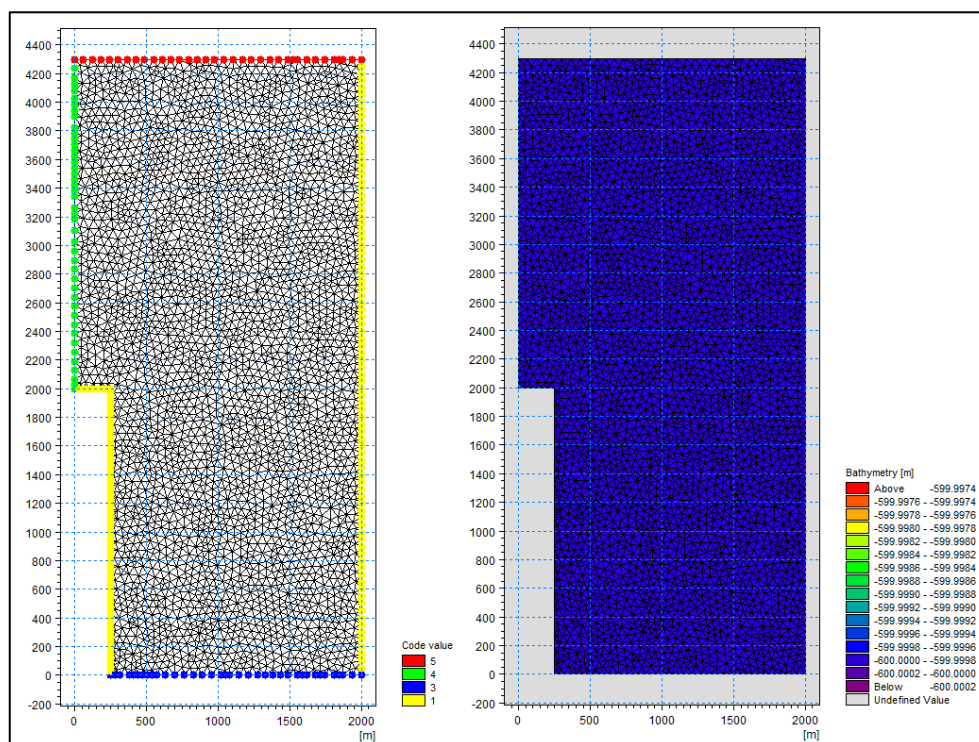


Figura 42: Condiciones de borde, triangulación e interpolación de malla caso 1.  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>5</sup>El número de Courant (C) es el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito. Se aplica en la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Cabe mencionar que courant no es un factor crítico en el modelo espectral debido a las ecuaciones que resuelve, porque el time step está relacionado al tiempo de medición o simulación, mientras que en los modelos que resuelven la fase éste se asocia a la resolución de malla convirtiéndolo en una variable crítica.

Finalmente, se procede a realizar la interpolación de los datos y una posterior exportación de la malla batimétrica creada para ser utilizada como input en el programa SW. La Figura 43 muestra la malla, para el caso 2, la cual tiene un tamaño triangular homogéneo en todo el dominio para definir la difracción del oleaje.

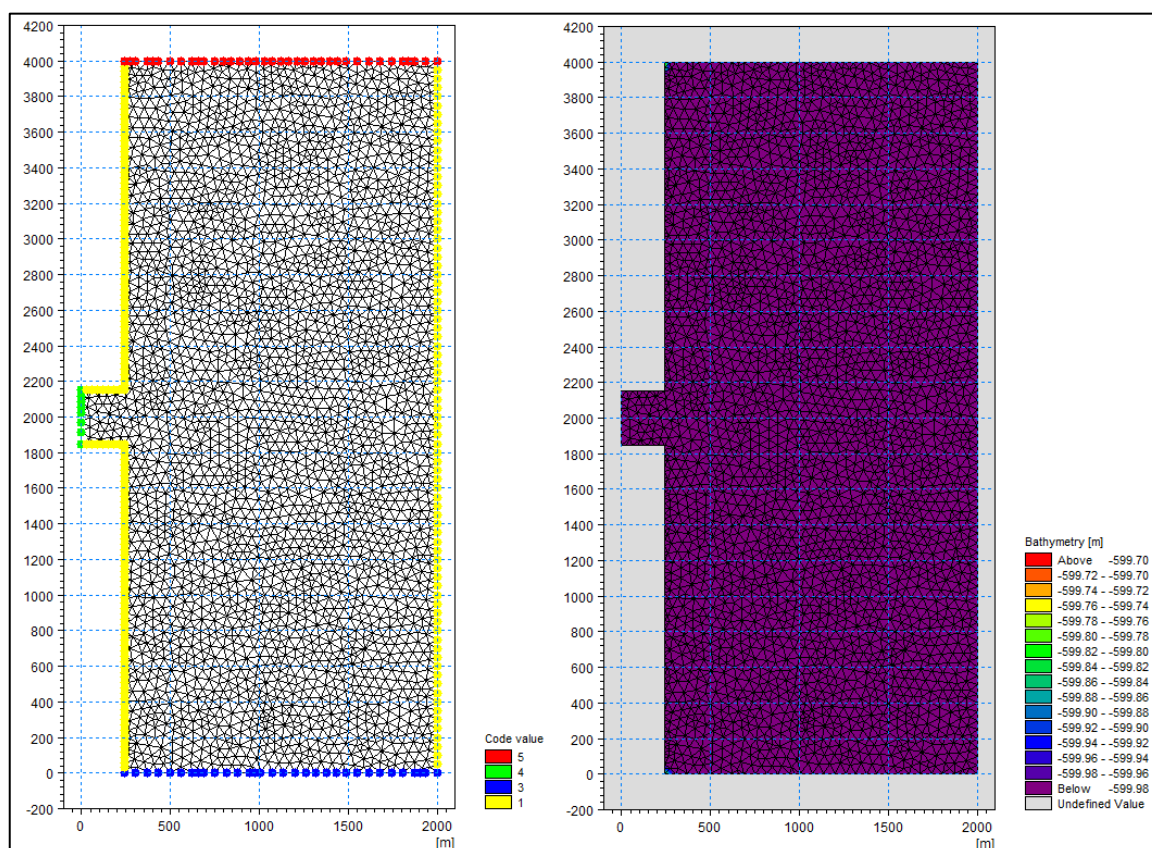


Figura 43: Condiciones de borde, triangulación e interpolación de malla caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

El segundo paso consiste en la configuración y calibración del programa, donde se deben especificar parámetros como: período de simulación, ecuaciones básicas, discretización espectral, solución técnica, condiciones de marea, condiciones de corrientes, fuerzas de viento, rompiente de la ola, fricción con el fondo, condiciones iniciales, condiciones de borde y salida del modelo.

Los parámetros seleccionados para el caso 1 y 2 en *Mike21-SW* se pueden ver en la siguiente tabla:

|                                 |   |  |
|---------------------------------|---|--|
| <b>Período de Simulación</b>    | <b>N° pasos de tiempo</b><br>1  | <b>Time Step</b><br>10800 [s]  |
| <b>Ecuaciones Básicas</b>       | <b>Formulación espectral</b><br>Paramétrica direccionalmente desacoplada            | <b>Formulación de tiempo</b><br>Formulación Cuasi-estacionaria.                  |
| <b>Discretización Espectral</b> | <b>Discretización direccional</b><br>Dir max 360[°], Dir min 180[°], Delta 5.625[°] | <b>N° direcciones</b><br>32  |
| <b>Solución Técnica</b>         | <b>Método</b><br>iteración Newton -Raphson  | <b>N° iteraciones</b><br>500.  |
| <b>Condiciones Iniciales</b>    | <b>Espectro desde formulaciones empíricas</b><br>Jonswap                            |  |
| <b>Condiciones de borde</b>     | <b>Codo 3 - Codo 5</b><br>Bordes laterales absorbentes.                             | <b>Codo 4</b><br>Hmo = 1[m], T = 10[s], Dir = 270[°]<br>Spread Direccional = 100 |

**Tabla 6: Parámetros seleccionados para la simulación del caso 1 y 2 en Mike 21-SW.**

Fuente: Elaboración propia.

La altura propagada es unitaria, por lo que se espera un resultado equivalente a los coeficientes de difracción. Luego, para obtener la altura de ola en el sitio de interés se utiliza la siguiente expresión:

$$H_s = H_o * K_s * K_r * K_d$$

**Ecuación 56**

Donde:

$K_s$ : Coeficiente de asomeramiento

$K_r$ : Coeficiente de refracción

$K_d$ : Coeficiente de difracción

$H_o$ : Altura de ola en aguas profundas

$H_s$ : Altura de ola en sitio de interés

Para establecer en el modelo la condición de oleaje cuasi-unidireccional, se trabajó con la función coseno de distribución direccional utilizada para repartir la energía (Ecuación 56). Ésta nos dice que al utilizar índices bajos estaremos en presencia de un mayor rango direccional de propagación de la energía, por lo tanto, se utilizó un índice alto (100) para estar más cerca del caso unidireccional.

$$D(\theta) = \beta \cos^n$$

**Ecuación 57**

Luego, para conocer de manera cualitativa los resultados, se programó la salida de puntos ubicados en la zona de sombra (difracción) que entregan el valor de la altura de ola propagada en el sitio. Estos valores se extraen para ser comparados posteriormente con los diagramas de Wiegell y Jhonson, quienes muestran líneas de reducción de alturas de olas propagadas en una profundidad uniforme, adyacente a una estructura impermeable.

Del caso 1 y 2 se extraen 7 puntos de control que están indicados por la Tabla 7 e ilustrado en la Figura 44.

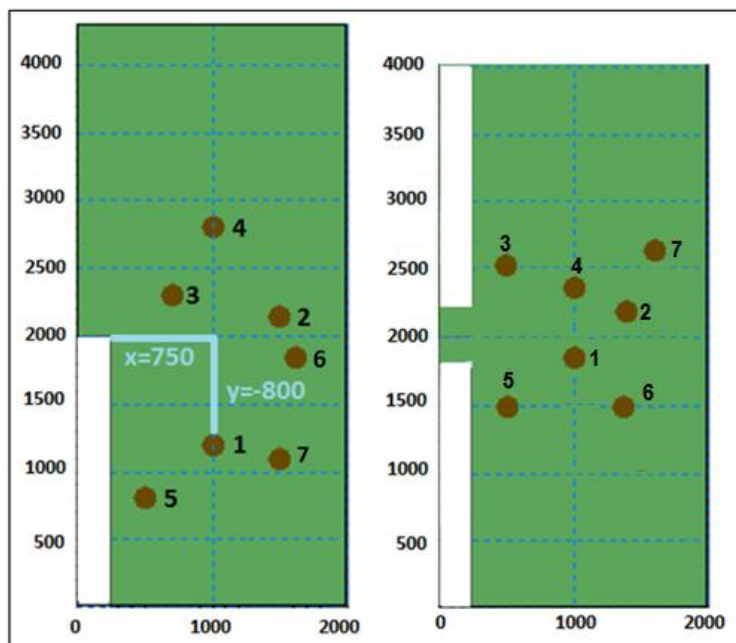


Figura 44: Puntos de salida del modelo SW para el caso 1 (izquierda) y 2 (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Obs: Líneas celestes indican distancia descontando ancho del molo.

| Ubicación en Coordenadas (x,y) |      |        |                    |      |
|--------------------------------|------|--------|--------------------|------|
| Caso 1 ( Wiegel )              |      | Puntos | Caso 2 ( Jhonson ) |      |
| x                              | y    |        | x                  | y    |
| 1000                           | 1200 | Pto. 1 | 1000               | 1825 |
| 1500                           | 2150 | Pto. 2 | 1500               | 2150 |
| 700                            | 2300 | Pto. 3 | 500                | 2500 |
| 1000                           | 2800 | Pto. 4 | 1000               | 2350 |
| 500                            | 800  | Pto. 5 | 500                | 1500 |
| 1500                           | 1110 | Pto. 6 | 1500               | 1490 |
| 1700                           | 1800 | Pto. 7 | 1600               | 2600 |

Tabla 7: Coordenadas de los puntos de evaluación - Caso 1 y 2.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que los puntos de salida presentados en las tablas anteriores son evaluados en los 3 modelos utilizados, para ambos casos, donde se indica la posición (x,y) considerando como origen el (0,0).

### 4.3 CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 EMS

El módulo elíptico se basa en una solución numérica eficiente de la ecuación de la pendiente suave, que regula el movimiento de las ondas de altura infinitesimal (ondas lineales) en una batimetría de pendiente suave y con profundidad de agua arbitraria.

El modelo es capaz de determinar las alturas de las olas, las componentes de la velocidad de partículas, la elevación de la superficie, y en caso de rotura entrega los tensores de radiación. Es regularmente usado para estudiar la agitación portuaria y usa un método de solución mediante un esquema de diferencias finitas utilizando el algoritmo de ADI<sup>6</sup>.

Para confeccionar la malla de cálculo es necesario contar con un archivo .xyz de 4 columnas que debe contener la información de la coordenada x, coordenada y, línea de costa, sondas, y finalmente una enumeración correspondiente al número de casos. Luego, es necesario seleccionar la zona de interés para definir las condiciones de borde a las cuales estará sometido el modelo.

Luego, se define el espaciamiento de la grilla de 10x10 [m] y se elige un radio de alcance de 50 [m] para la interpolación de la malla (interpolación tipo natural Neighbour) y generación de la batimetría. Posteriormente, finalizado lo anterior, se procede a dar origen a una capa de esponja.

Esta capa es la encargada de absorber la energía del oleaje en los puntos en que se defina. De esta manera se evita la generación de olas producto de la reflexión del oleaje incidente en los contornos del dominio. Es por ésta misma absorción de energía que se debe tener precaución en su ubicación, para que no coincida con las líneas de generación del oleaje, ni se encuentre por delante de ésta. El desarrollador recomienda considerar entre 10-20 capas de esponja para ondas cortas y 20 o más para ondas largas con incidencia oblicua.

Para la creación de la capa se utilizó la herramienta *Mike 21-toolbox*, donde el archivo de input es la malla generada anteriormente. De manera consecutiva se selecciona el número de capas absorbentes (20 en este caso), además se le asignó un valor representativo en el dominio (valor 9), puesto a que éste debe ser distinto al del molo de abrigo (valor 10), para así dar origen a la esponja con sus respectivos coeficientes sin provocar inconvenientes en el reconocimiento del modelo, ver Figura 45.

Finalmente se obtiene la batimetría cuya visualización se aprecia en la Figura 46.

---

<sup>6</sup> En análisis numérico, el método implícito de dirección alternante (ADI) es una ecuación diferencial parcial utilizado como método de diferencias finitas para resolver ecuaciones parabólicos, elípticos e hiperbólicos.

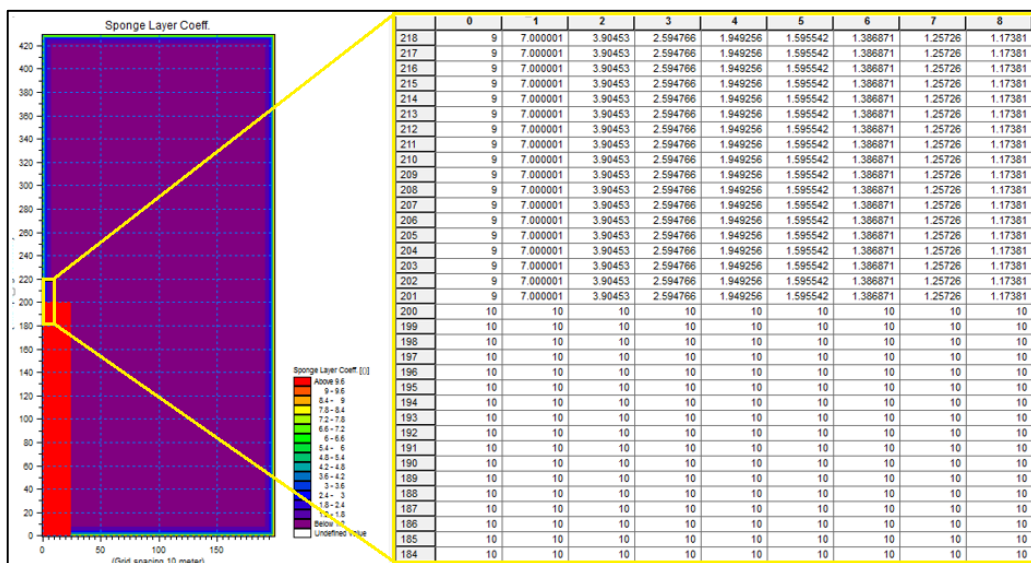


Figura 45: Capa de esponja en modelo elíptico EMS para el caso 1.

Fuente: Elaboración propia.

Obs: La paleta de colores representa el coeficiente de esponja (ejemplo área amarilla).

Para la creación de la batimetría para el caso 2 se realizó considerando 20 capas de esponja dando como resultado la siguiente malla regular:

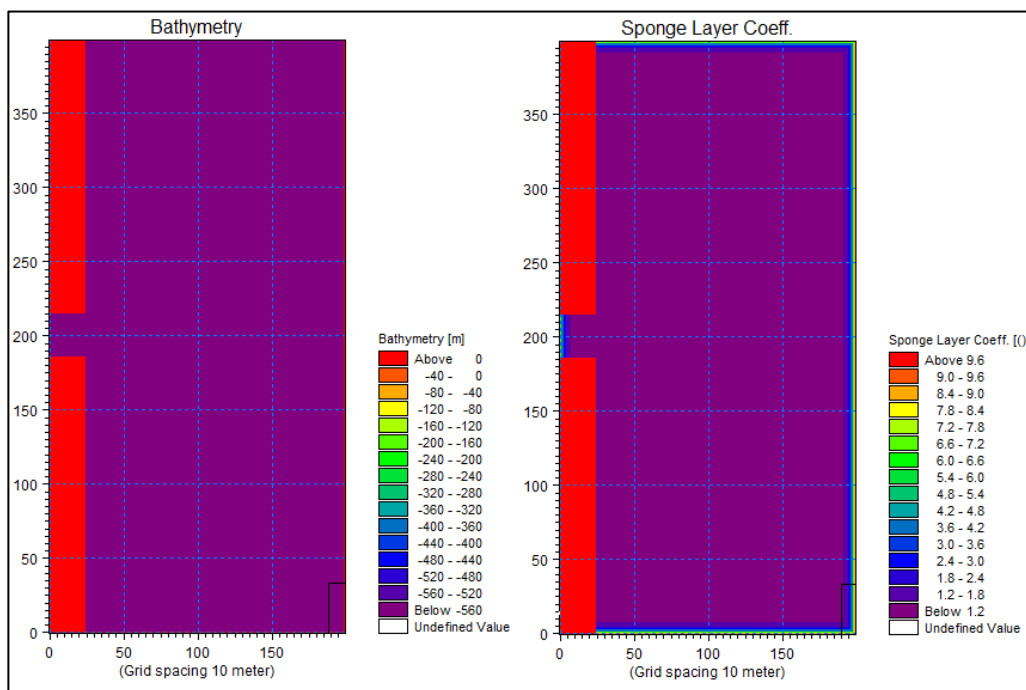


Figura 46: Capas de esponja en modelo elíptico EMS para el caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso consiste en la configuración y calibración del programa, donde se deben especificar parámetros como: Descripción de la iteración, parámetros del modelo y los archivos de salida.

Dentro de los parámetros del modelo es importante mencionar que el módulo elíptico trabaja con un oleaje monocromático (oleaje regular y unidireccional) que para entregar sus resultados de las alturas propagadas considera la altura media cuadrática (Hrms), en caso de usar disipación de energía con distribución Rayleigh, y para su generación utiliza dos líneas internas y paralelas entre sí para representar los frentes de onda incidentes. La razón de lo anterior, es debido a que la cantidad de agua propagada viaja en 2 direcciones opuestas, por lo que solamente la mitad de la energía entra en el área de interés.

Las condiciones de oleaje elegidas corresponden a los presentados en la Tabla 5, y los puntos de salida y evaluación para los casos 1 y 2 del modelo elíptico, corresponden a los presentados en la Tabla 7.

#### 4.4 CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 PMS

*Mike21-PMS* es una aproximación parabólica a la ecuación elíptica de pendiente suave. El modelo tiene en cuenta los efectos de la refracción y bancos de arena debido a la variación de la profundidad, difracción a lo largo de la perpendicular a la dirección del oleaje predominante y disipación de energía debido a la fricción con el fondo y la rotura de la ola. El modelo también tiene en cuenta el efecto de la frecuencia y dispersión direccional utilizando superposición lineal.

La metodología de creación de mallado es idéntica a la realizada en *Mike21-EMS*, sin embargo difiere en la utilización de capas de esponjas, debido a que el programa parabólico no lo requiere. Esto último se debe a que el modulo-PMS no incorpora la reflexión, ya que asume la propagación de ondas en una dirección predominante (x-dir). Por lo tanto, para la creación de las mallas de cálculo de los casos 1 y 2 se utilizan los mismos archivos .xyz de 4 columnas citado en el acápite 4.3, y posteriormente se definen los bordes laterales como tierra (valor 10, igual al dique) para que el programa reconozca el dominio (ver Figura 47).

Una vez originadas las mallas, el siguiente paso consiste en la configuración y calibración del programa, donde se deben especificar variables como: parámetros batimétricos, periodo de simulación, condiciones de borde, elevación de superficie, solución de los parámetros, fricción de fondo, rotura de oleaje y salida del modelo.

Para las condiciones de borde debe especificarse el tipo de oleaje que dominará el modelo (monocromático, parámetro de resumen, irregular unidireccional, regular direccional e irregular direccional) y posteriormente definir la altura [m], periodo [s] y dirección [°] según sea el caso. Además de esto, debe seleccionarse si el borde lateral norte y sur serán absorbentes o simétricos, donde se recomienda utilizar la última por el desarrollador del módulo-PMS.

Dentro de la solución de parámetros existen varias aproximaciones parabólicas que se implementan en *Mike21-PMS*, las cuales van desde una aproximación simple, válida para ángulos pequeños (ángulo entre la dirección x de la malla, y la dirección de propagación), a las aproximaciones más sofisticadas, válidos para grandes ángulos de incidencia (hasta, por ejemplo, +/- 60°). La ecuación parabólica se resuelve mediante el esquema de diferencias finitas de Crank-Nicholson.

Los datos de salida del modelo son los parámetros como la altura media cuadrática (Hrms), el periodo peak y la dirección media de las olas. Otros datos de salida que se pueden obtener son los tensores de radiación y elevaciones de la superficie instantánea.

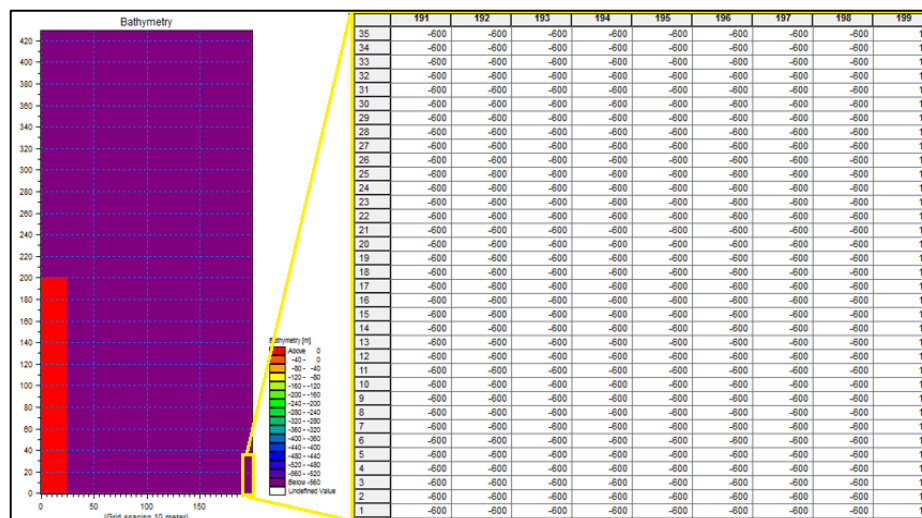


Figura 47: Batimetría modelo parabólico PMS para el caso 1 con bordes positivos (valor 10). Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los parámetros seleccionados para evaluar la difracción en los casos benchmarks 1 y 2, corresponden a los presentados en la Tabla 8, mientras que para las condiciones de oleaje se consideró la Tabla 5.

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Periodo de simulación</b>   | Descripción tipo estacionario  |
| <b>Elevación de superficie</b> | Valor constante = 0  |
| <b>Fricción de fondo</b>       | No considerada   |
| <b>Rotura de Oleaje</b>        | No considerada   |
| <b>Condiciones de borde</b>    | Oleaje Monocromático presentado en Tabla 5.<br>Borde Norte y Sur simétricos.   |
| <b>Solución de parámetros</b>  | Coefficiente PMS = Simple model (apertura 10° Caso 1).<br>= Minimax model (apertura 60° Caso 2).<br>Interfaz disipativo para disminuir error = 0.25 (defecto). |

Tabla 8: Parámetros seleccionados para la simulación del caso 1 y 2 en Mike 21-PMS. Fuente: Elaboración propia.

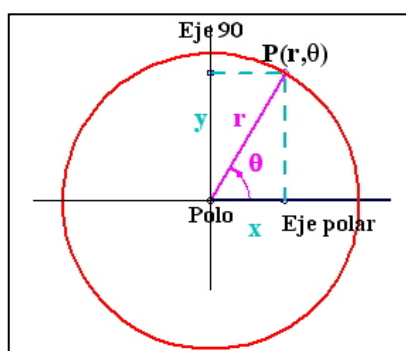
El interfaz disipativo se utiliza para filtrar el alto ruido del número de onda que se produce en ciertas aplicaciones con modelos de aproximación parabólica. Éste es especialmente el caso en aplicaciones que implican variaciones bruscas de la altura de ola debido a rotura de la ola, el fabricante recomienda un valor de 0.25 para disminuir el error.

## 4.5 COEFICIENTES DE DIFRACCIÓN DE WIEGEL Y JHONSON

Para contrarrestar los resultados de los modelos benchmarks, versus los ábacos de Wiegel y Jhonson, se deben realizar unos cálculos previos para poder introducirse en él.

Para localizar y obtener los coeficientes de difracción ( $K_d$ ) dentro del plano de Wiegel, se utilizó la herramienta Autocad para escalar el ábaco en base a la longitud de onda equivalente a 155.97 [m], considerando que el periodo modelado es de 10 [s], y teniendo en cuenta las coordenadas de la Tabla 7.

Una vez escalado el plano se procede a realizar la proyección hacia la posición de interés usando la transformación de coordenadas rectangulares a polares (Figura 48 y Tabla 9), y considerando la ubicación desde el punto del molo (Figura 44), para obtener la localización del punto y consecutivamente el  $K_d$ , ver Figura 49.



**Figura 48: Sistema de coordenadas polares.**

Fuente: [http://aulavirtual.ing.uc.edu.ve/file.php/282/polares/paso\\_de\\_coordenadas\\_polares\\_a\\_cartesianas\\_y\\_viceversa.html](http://aulavirtual.ing.uc.edu.ve/file.php/282/polares/paso_de_coordenadas_polares_a_cartesianas_y_viceversa.html)

| Caso 1 | Coordenadas rectangulares |       | Coordenadas Polares |          |
|--------|---------------------------|-------|---------------------|----------|
|        | x                         | y     | r                   | $\Theta$ |
| Pto 1  | 750                       | -800  | 1096.58561          | -46.848  |
| Pto 2  | 1250                      | 150   | 1258.96783          | 6.843    |
| Pto 3  | 450                       | 300   | 540.832691          | 33.690   |
| Pto 4  | 750                       | 800   | 1096.58561          | 46.848   |
| Pto 5  | 250                       | -1200 | 1225.76507          | -78.232  |
| Pto 6  | 1250                      | -890  | 1534.47059          | -35.451  |
| Pto 7  | 1450                      | -200  | 1463.72812          | -7.853   |
| Caso 2 | Coordenadas rectangulares |       | Coordenadas Polares |          |
|        | x                         | y     | r                   | $\Theta$ |
| Pto 1  | 750                       | -175  | 770.14609           | -13.134  |
| Pto 2  | 1250                      | 150   | 1258.96783          | 6.843    |
| Pto 3  | 250                       | 500   | 559.016994          | 63.435   |
| Pto 4  | 750                       | 350   | 827.647268          | 25.017   |
| Pto 5  | 250                       | -500  | 559.016994          | -63.435  |
| Pto 6  | 1250                      | -510  | 1350.03704          | -22.195  |
| Pto 7  | 1450                      | 600   | 1569.23548          | 22.479   |

**Tabla 9: Transformación de Coordenadas rectangulares a polares caso 1 y 2.**

Fuente: Elaboración propia.

Análogamente éste método es reproducido en el ábaco de Jhonson (ver Figura 50) y en todo el documento considerando la Tabla 7.

Finalmente los coeficientes obtenidos de los diagramas de difracción, para un oleaje que incide de forma paralela al rompeolas, se pueden ver en la Tabla 10.

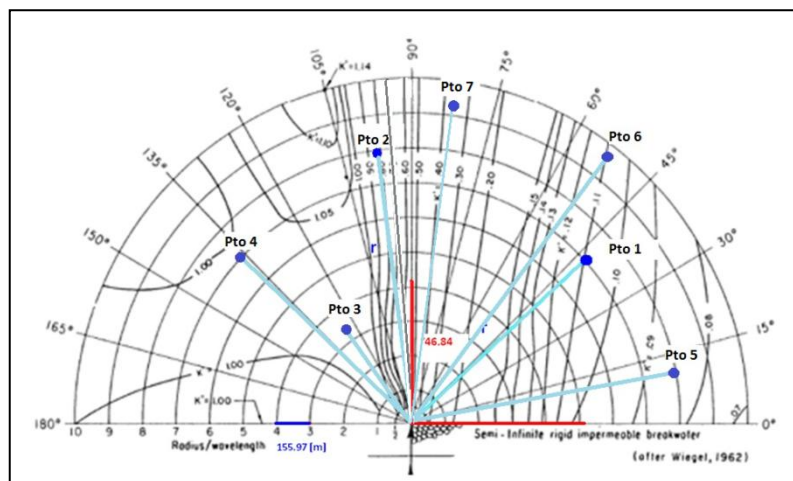


Figura 49: Diagrama Wiegel escalado en base a longitud de onda y coordenadas polares.  
Fuente: Elaboración propia.

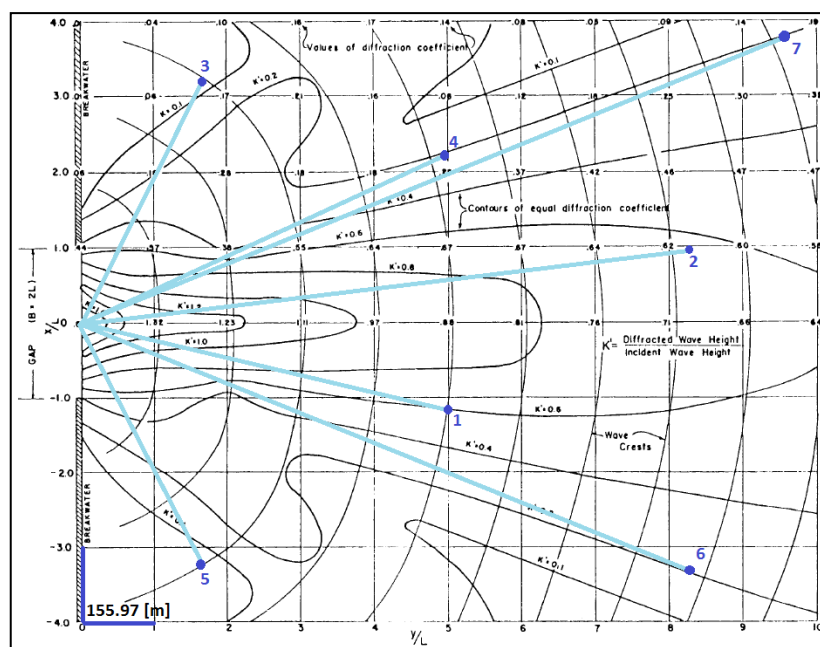


Figura 50: Diagrama Jhonson escalado en base a longitud de onda y coordenadas polares.  
Fuente: Elaboración propia.

| Coefficientes (Kd) | Pto 1 | Pto 2 | Pto 3 | Pto 4 | Pto 5 | Pto 6 | Pto 7 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ábaco Wiegel       | 0.11  | 0.81  | 1     | 1     | 0.08  | 0.11  | 0.38  |
| Ábaco Jhonson      | 0.60  | 0.62  | 0.10  | 0.20  | 0.09  | 0.20  | 0.14  |

Tabla 10: Coeficientes de los ábacos de difracción.  
Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS BENCHMARKS

## 4.6 RESULTADOS DE PROPAGACIONES EN CASOS BENCHMARKS

Los resultados de la simulación espectral, elíptica y parabólica indican la distribución de las alturas propagadas detrás de la zona de abrigo para el caso 1 y 2, donde se considera una misma escala de colores para identificar las diferencias de alcance y definición de la difracción en cada uno de los modelos. La Figura 51 ilustra el resultado para el caso 1.

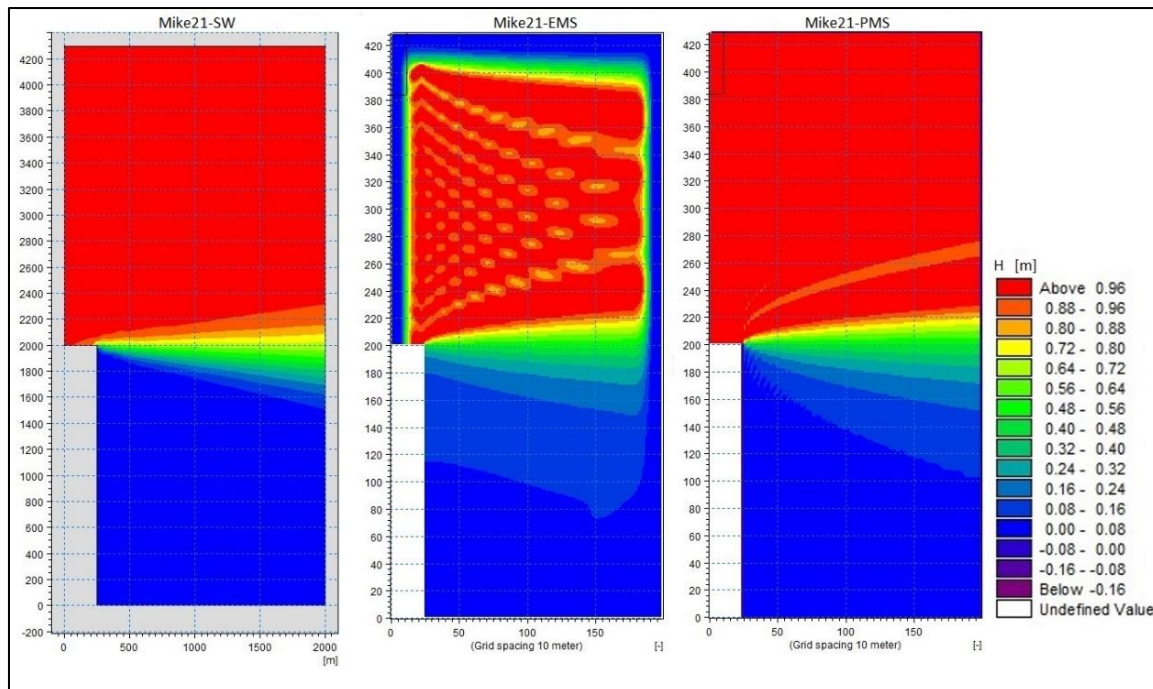


Figura 51: Resultado Mike 21 SW, EMS, PMS para el caso 1.

Fuente: Elaboración propia.

Obs: Paleta de colores representa la distribución de alturas propagadas en [m]

Del resultado EMS se puede indicar que: al ser éste un modelo que resuelve las fases de las ondas, se producen cambios de direcciones y cierta superposición de ondas, producto de la difracción numérica presente en los contornos y el molo, que pueden provocar desnivelaciones mayores, como también anulaciones parciales entre estas, generando en distintos puntos energías altas como también bajas. Lo anterior se traduce en una variación de alturas puntuales que no significan necesariamente un error de simulación, si no que corresponden a soluciones típicas de un modelo de éstas características.

Los resultados presentados consideran un máximo de 500 iteraciones con un intervalo de tiempo de 0.5 [s] para el modelo EMS y PMS, con un input de oleaje unitario, periodo de 10 [s], dirección de incidencia de 270° y unidireccional. Por otro lado, el modelo espectral SW fue configurado con una dirección cuasi-unidireccional. El resultado de los tres modelos para el caso 2 es mostrado en la Figura 52.

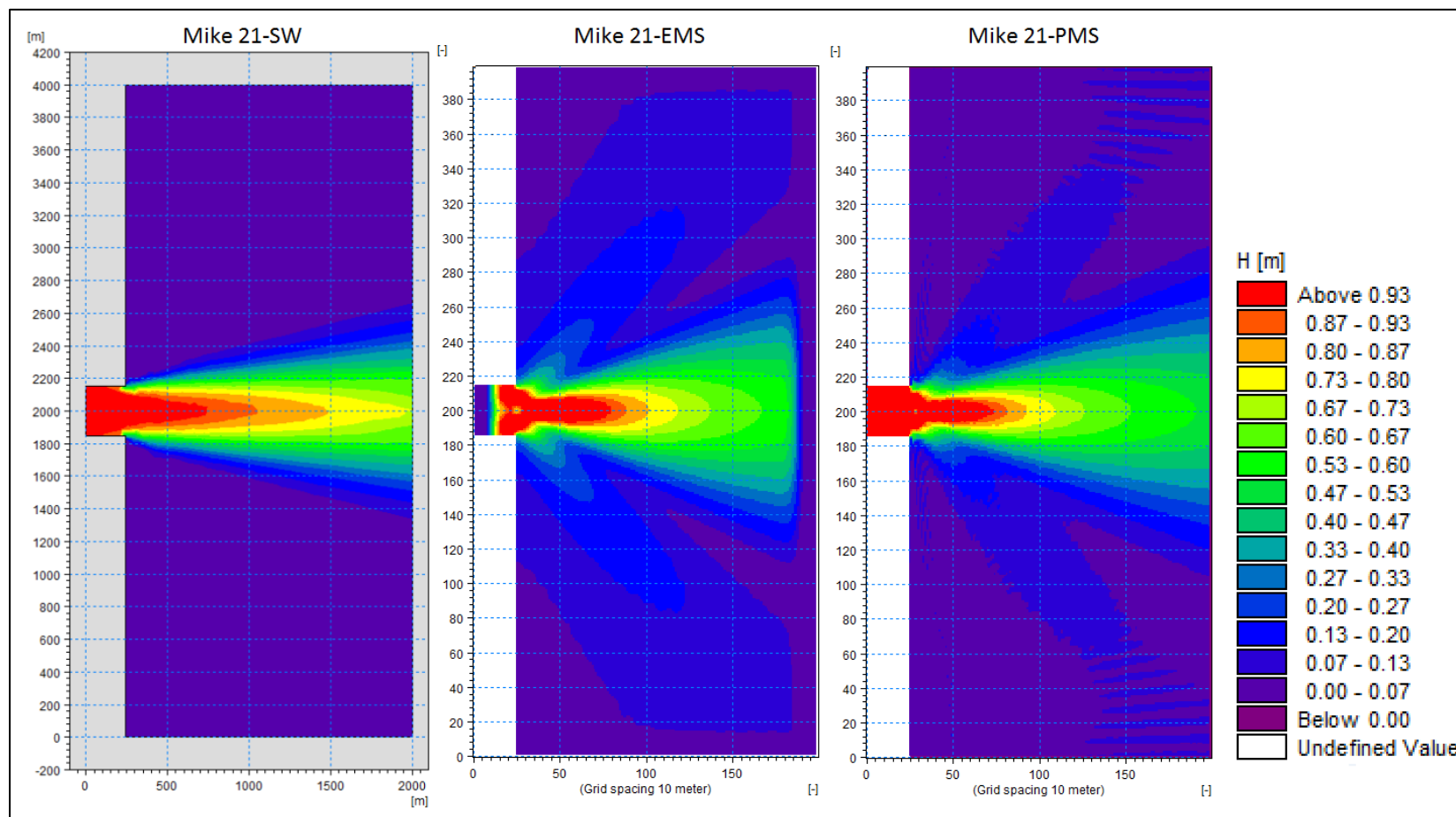


Figura 52: Resultado Mike 21 SW, EMS, PMS para el caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

Obs: Paleta de colores representa la distribución de alturas propagadas en [m].

La Figura 53 muestra una comparación del resultado de la simulación elíptica y parabólica del caso 2, considerando las líneas de contorno marcadas. La Figura 54 indica la variación de alturas de olas de un tramo transversal para visualizar de mejor manera su distribución en cada modelo, y la Figura 55 muestra la variación en el tramo longitudinal.

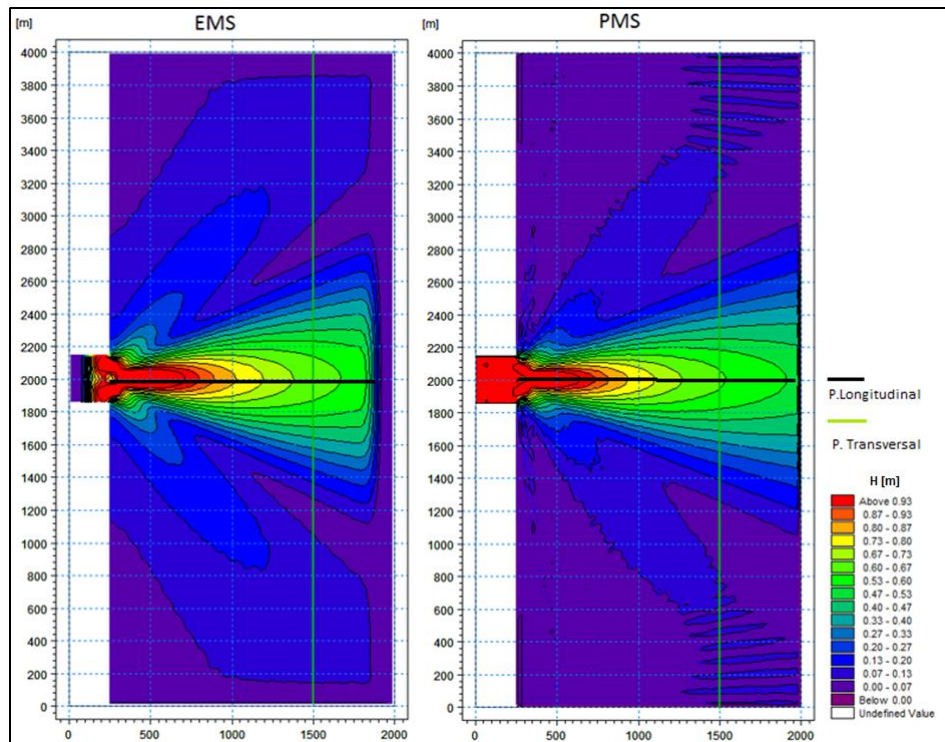


Figura 53: Isolíneas de la simulación elíptica (izquierda) y parabólica (derecha).  
Fuente: Elaboración propia.

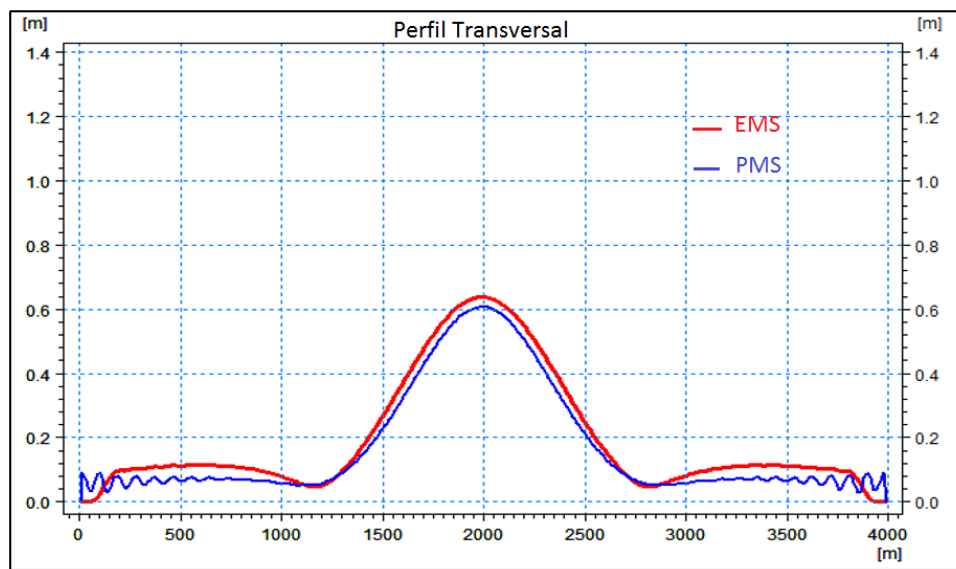
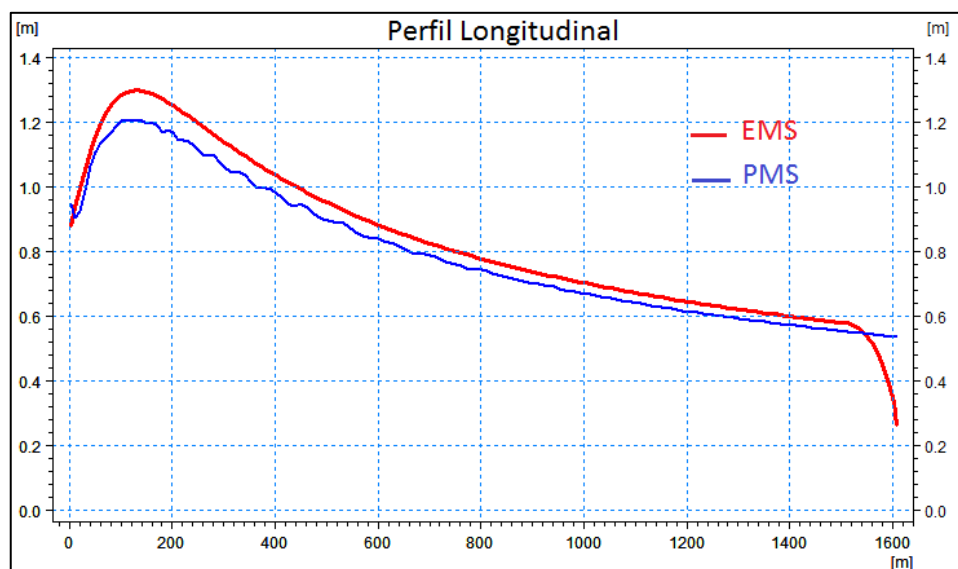


Figura 54: Perfil transversal de las alturas de oleaje Elíptico vs Parabólico.  
Fuente: Elaboración propia.



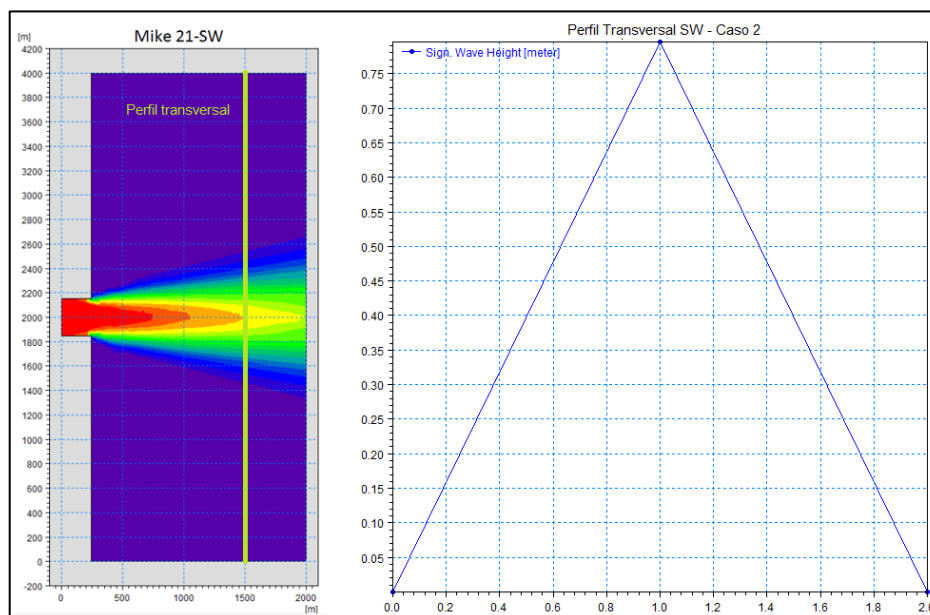
**Figura 55: Perfil longitudinal de las alturas de oleaje Elíptico vs Parabólico.**

Fuente: Elaboración propia.

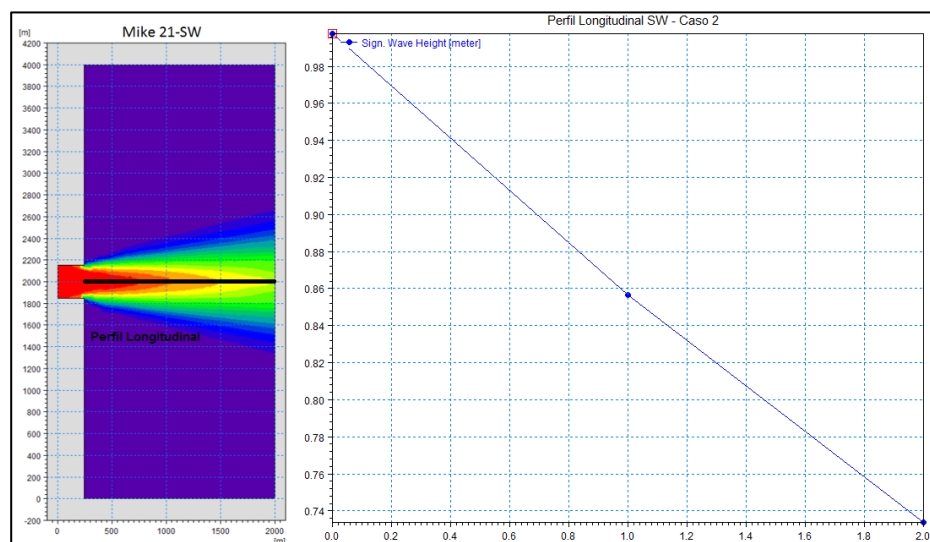
De la comparación del perfil transversal entre modelos (Figura 54), se puede inferir que existe una diferencia leve, en cuanto a la distribución de la altura de ola propagada, en la zona central de la malla, mientras que cerca de los bordes norte y sur se aprecia una distribución discontinua para el caso PMS. La razón de lo anterior, se justifica básicamente por la presencia de efectos de ruido numérico e incremento parcial de energía en sus contornos, debido a la condición de contorno abierto que emplea el modelo. Cabe destacar que para disminuir el ruido se utilizó el filtro de interfaz disipativo que incorpora el programa para reducir estas perturbaciones.

Por otro lado, el modelo EMS muestra una disminución de la altura de ola en sus bordes, debido a la presencia de la capa de esponja que absorbe la energía y evita la reflexión del oleaje. Este efecto también está presente en el caso del perfil longitudinal (Figura 55).

Finalmente, cabe mencionar que los resultados del modelo espectral, para ambos casos, presentan una distribución de alturas menos descriptiva, en contraste con el EMS y PMS, esto es debido a que el fenómeno de difracción no es bien representada por las ecuaciones de gobierno que la rigen. A continuación se presentan los perfiles transversal y longitudinal para el caso 2 del módulo SW



**Figura 56: Perfil Transversal para modelo espectral - caso 2.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 57: Perfil Longitudinal para modelo espectral - caso 2.**  
Fuente: Elaboración propia.

Dentro de las capacidades de los modelos EMS y PMS se encuentran las salidas de las elevaciones de superficie de agua, que ilustran la propagación de la onda en el dominio asignado definiendo la difracción que ocurre detrás del molo de abrigo.

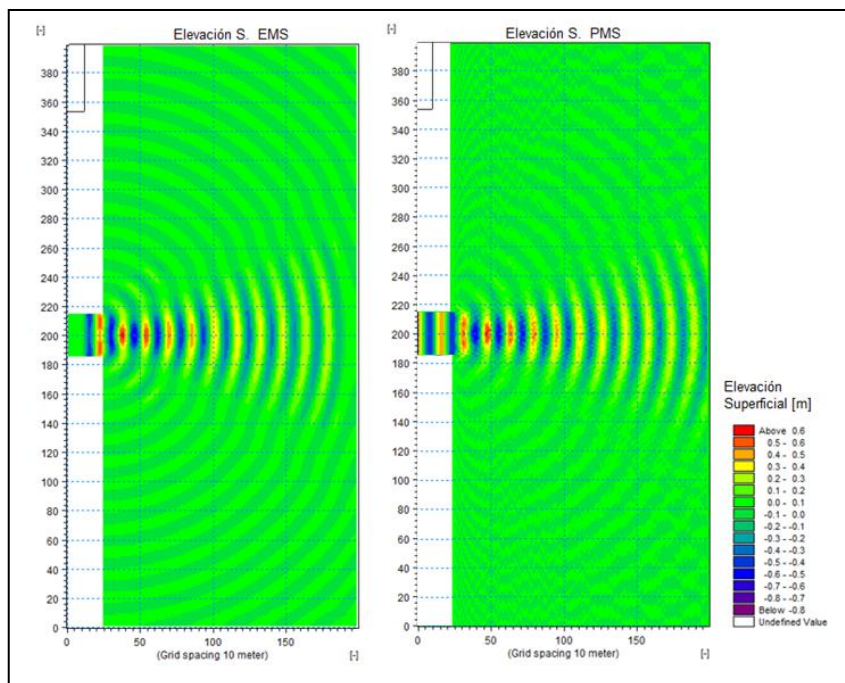


Figura 58: Elevación de superficie Mike 21 EMS (izquierda) vs PMS (derecha) - Caso 2.  
Fuente: Elaboración propia.

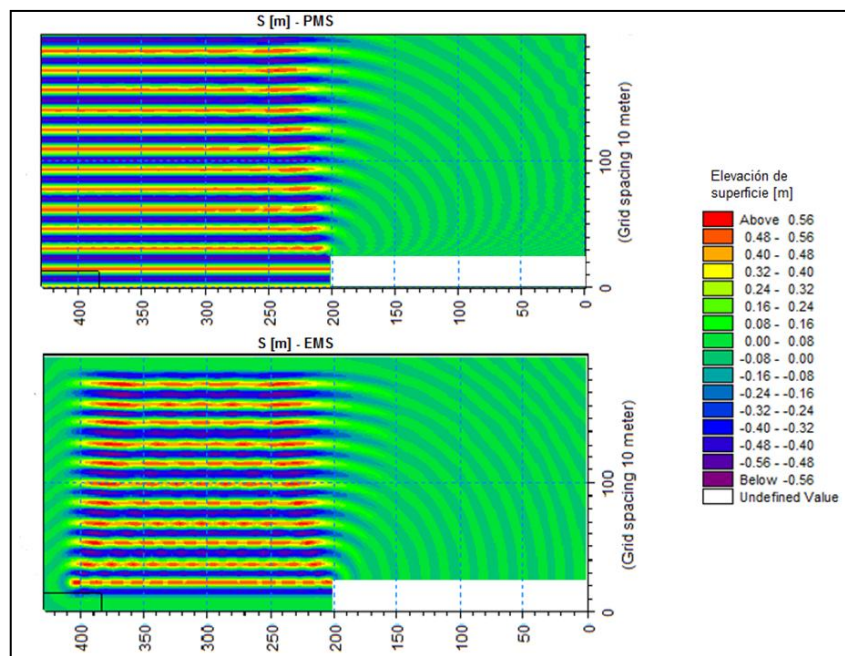


Figura 59: Elevación de superficie Mike 21 EMS (abajo) vs PMS (arriba) - Caso 1.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA CASOS BENCHMARKS

Los 3 modelos evaluados en éste trabajo demostraron ser capaces de entregar valores de la distribución de alturas de olas propagadas, sobre un dominio batimétrico condicionado en aguas profundas, considerando la presencia de estructuras como el molo de abrigo para inducir la difracción del oleaje. Sin embargo, debido a las diferencias que presentan cada modelo en cuanto a las formulaciones matemáticas que las gobiernan, al método numérico utilizado para la resolución de las condiciones de borde y transformaciones de oleaje, y al tipo de olas que pueden ser caracterizados como input de generación, existen divergencias en cuanto a los resultados obtenidos para cada caso.

Para comenzar el análisis es preciso ver los resultados de cada modelo (ver Tabla 11), para apreciar cuantitativamente las alturas obtenidas en los puntos de salida presentados en la Tabla 7.

| Modelo        | SW           | EMS  | PMS  | Wiegel    |
|---------------|--------------|------|------|-----------|
| <b>Caso 1</b> | <b>H [m]</b> |      |      | <b>kd</b> |
| Pto 1         | 0.00         | 0.09 | 0.06 | 0.11      |
| Pto 2         | 0.90         | 0.78 | 0.77 | 0.81      |
| Pto 3         | 1.00         | 1.03 | 1.04 | 1.00      |
| Pto 4         | 1.00         | 1.01 | 1.00 | 1.00      |
| Pto 5         | 0.00         | 0.07 | 0.00 | 0.08      |
| Pto 6         | 0.00         | 0.10 | 0.08 | 0.11      |
| Pto 7         | 0.34         | 0.29 | 0.28 | 0.38      |
| <b>Caso 2</b> | <b>H [m]</b> |      |      | <b>kd</b> |
| Pto 1         | 0.62         | 0.60 | 0.55 | 0.60      |
| Pto 2         | 0.66         | 0.59 | 0.55 | 0.62      |
| Pto 3         | 0.00         | 0.17 | 0.09 | 0.10      |
| Pto 4         | 0.14         | 0.24 | 0.22 | 0.20      |
| Pto 5         | 0.00         | 0.17 | 0.09 | 0.09      |
| Pto 6         | 0.09         | 0.24 | 0.21 | 0.20      |
| Pto 7         | 0.05         | 0.19 | 0.17 | 0.14      |

**Tabla 11: Resultados de Mike21-SW-EMS-PMS vs Wiegel y Jhonson.**

Fuente: Elaboración propia.

Los procesos de transformación como shoaling, refracción y rotura no son incorporados en estas simulaciones, por lo tanto los resultados de la Tabla 11 dejan en evidencia que existen claras diferencias entre modelos para representar la difracción. Para saber cuál es el modulo que mejor la describe se calcula el error relativo entre alturas de salida vs los coeficientes extraídos de los ábacos presentados en la Tabla 12.

| <b>Error Relativo (modelo vs Wiegel y Jhonson)</b> |               |               |               |
|--|---------------|---------------|---------------|
| <b>Caso 1</b>                                      | <b>SW</b>     | <b>EMS</b>    | <b>PMS</b>    |
| Pto 1  | 99.97%        | 14.81%        | 45.45%        |
| Pto 2  | 11.39%        | 3.87%         | 5.23%         |
| Pto 3  | 0.08%         | 2.84%         | 3.65%         |
| Pto 4  | 0.00%         | 0.51%         | 0.48%         |
| Pto 5  | 99.98%        | 14.92%        | 100.00%       |
| Pto 6  | 99.83%        | 12.20%        | 25.65%        |
| Pto 7  | 10.42%        | 23.30%        | 25.44%        |
| <b>Caso 2</b>                                      | <b>SW</b>     | <b>EMS</b>    | <b>PMS</b>    |
| Pto 1  | 3.0%          | 0.2%          | 8.9%          |
| Pto 2  | 6.6%          | 5.0%          | 11.0%         |
| Pto 3  | 99.9%         | 70.0%         | 5.4%          |
| Pto 4  | 32.3%         | 20.0%         | 9.8%          |
| Pto 5  | 99.8%         | 88.9%         | 3.5%          |
| Pto 6  | 57.2%         | 20.0%         | 5.9%          |
| Pto 7  | 63.6%         | 35.7%         | 19.1%         |
| <b>Promedio error Caso 1</b>                       | <b>45.95%</b> | <b>10.35%</b> | <b>29.42%</b> |
| <b>Promedio error Caso 2</b>                       | <b>51.8%</b>  | <b>34.3%</b>  | <b>9.1%</b>   |

**Tabla 12: Cálculo de error relativo de modelos vs ábacos de difracción.**

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior ilustra que la simulación del módulo EMS, para el caso 1, presenta un error relativo promedio del 10.35%, respecto al ábaco de Wiegel, permitiendo describir con mayor precisión los puntos frente al dique así como en las zonas laterales, ya que los resultados corresponden a la solución original de la ecuación de la pendiente suave. Por otro lado, los resultados del caso 2 presentan una bondad de ajuste favorable a la aproximación parabólica por sobre la elíptica, debido a las diferencias que existen en los resultados de los puntos de salida 3 y 5, donde el EMS tiende a sobreestimar los valores de H.

Los resultados generales inducen a una superioridad de la ecuación elíptica para definir la difracción, sin embargo, el comportamiento del modelo parabólico presenta valores de aproximación no tan lejana en puntos cercanos al centro, mientras que en zonas alejadas presenta una dispersión de energía menos regular en comparación con el módulo EMS (ver Figura 53).

En cuanto al modelo SW, se presenta un mayor error a la hora de definir una distribución de los gradientes de energía asociados a cambios de dirección por efecto de difracción, ya sea en zonas laterales como centrales, debido a que utiliza ecuaciones de gobierno muy diferentes a la de pendiente suave. Para visualizar las diferencias se muestran los siguientes gráficos:

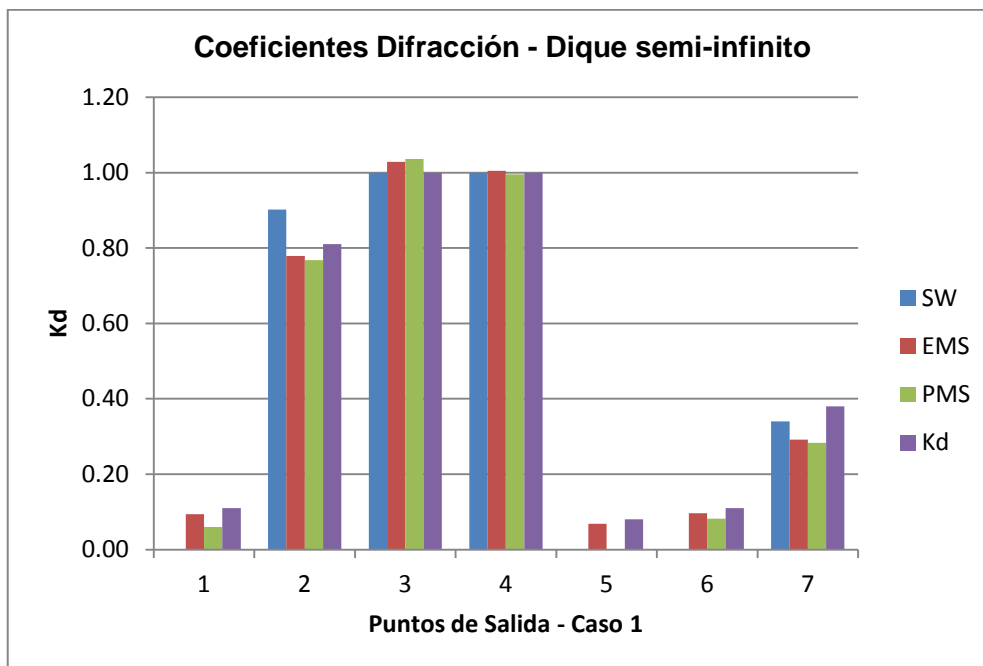


Figura 60: Gráfico de barras para el caso 1 vs Wiegel

Fuente. Elaboración propia.

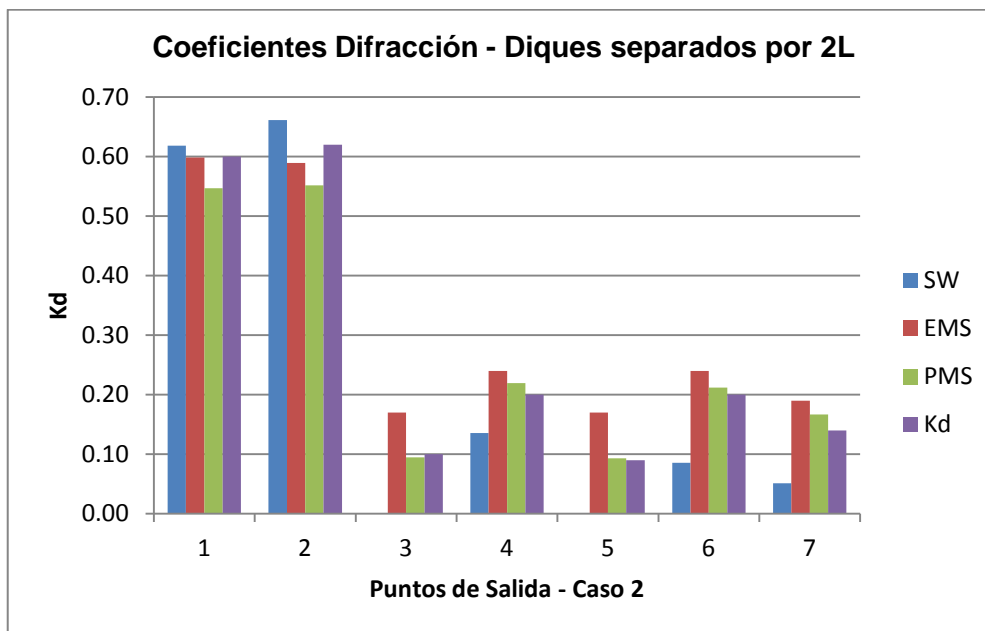


Figura 61: Gráfico de barras para el caso 2 vs Jhonson.

Fuente: Elaboración propia.

Como análisis del comportamiento de cada modelo en su aplicación, considerando los resultados de los casos prácticos con batimetrías idealizadas, se puede decir que:

**a) Modelo Espectral:**

Este modelo es el más distante en cuanto a resultados, ya que para ambos casos batimétricos los puntos de salida están muy por debajo del coeficiente de Wiegel y Jhonson, mientras que en otros puntos cercanos al centro tienden a sobreestimar los valores en comparación al resto. Por lo tanto, como primer análisis se puede inferir que la difracción pierde representatividad en las zonas más distantes a la punta del dique, debido a que el modelo está limitado para resolver los fenómenos de difracción.

Otro elemento que interfiere en la representatividad de la difracción en comparación a los ábacos, consiste en la formulación del tiempo de propagación que tiene el modulo espectral, ya que éste trabaja con un oleaje cuasi-estacionario, mientras que los diagramas utilizan olas estacionarias.

Un aspecto importante a considerar es que éste modelo no se basa en la ecuación de la pendiente suave, sino en la ecuación de balance de energía y densidad espectral, por lo tanto los resultados no serán 100% equivalentes a los diagramas de difracción debido a que estos últimos consideran un oleaje regular y caracterizado por un spread direccional unidireccional, mientras que el modelo SW propaga un espectro de oleaje irregular y caracterizado por un spread direccional cuasi-unidireccional.

**b) Modelo Elíptico:**

El módulo elíptico logra una buena representación de la difracción, obteniendo los resultados con menor diferencia en comparación con el diagrama de Wiegel, mientras que con Jhonson presenta una pequeña subestimación del valor de las alturas. Sin embargo, es un modelo potente para describir los fenómenos difractivos.

La razón de su potencia es producto a que el modelo fue diseñado para la determinación de la resonancia y agitación portuaria debido a las ondas de periodo largo y para el cálculo de los campos de onda en las zonas costeras más pequeñas, mediante la representación de una onda monocromática y unidireccional.

Se debe recordar que la MSE gobierna el tiempo de movimiento para ondas armónicas de altura infinitesimal en una batimetría de pendiente suave con una profundidad de agua arbitraria. Sin embargo, como la profundidad utilizada en ambos casos es constante en todo el dominio, la ecuación básica se reduce a la clásica ecuación de Helmholtz que permite definir la difracción de una onda armónica.

La Figura 52 indica claramente una distribución energética más ordenada y limpia para el módulo elíptico en contraste con la distribución parabólica, quedando en evidencia que los resultados son prácticamente equivalentes a los diagramas, porque ambos utilizan un oleaje regular, unidireccional y estacionario permitiendo la coherencia y concordancia entre ellos.

Este modelo es diferente, en un sentido fundamental de otros, porque la variable dependiente de la ecuación que la rige es la elevación de la superficie de agua.

**c) Modelo Parabólico:**

Como en todas las aproximaciones parabólicas, el módulo PMS no representa los efectos de difracción con precisión, ya que al ser una simplificación de la MSE supone que la propagación de ondas es en una dirección predominante (x-dir), descuidando la definición de la difracción cuando ésta no es perpendicular a la dirección de incidencia generando una distribución discontinua como se puede apreciar en las Figuras 52 y 53.

Un aspecto importante que fue evaluado en las simulaciones del modelo PMS, corresponde a los coeficientes que el mismo módulo propone para definir la aproximación numérica a utilizar, de los cuales se destacan los coeficientes Simple, de Pade y Minimax para definir los límites angulares de simulación y distribución direccional de la difracción. Siendo para el caso 1 el mejor ajuste la aproximación Simple ( $\leq 10^\circ$ ), mientras que para el caso 2 el coeficiente Minimax ( $\geq 60^\circ$ ).

Otro aspecto relevante es que el modelo requirió un esfuerzo computacional más bajo al EMS, siendo aproximadamente 50 veces más rápido que el modelo EMS para la misma configuración.

Finalmente, se puede inducir que la aplicación de los 3 modelos en los casos benchmarks ha destacado la capacidad de EMS y PMS, y debilidad del SW para definir la difracción en condiciones de aguas profundas.

## **5 APLICACIÓN DE MIKE 21 SW, EMS Y PMS EN LA BAHIA DE VALPARAISO**

Esta segunda etapa tiene como propósito evaluar y analizar los 3 modelos considerando una aplicación en la Bahía de Valparaíso, mediante una comparación del resultado simulado versus la boya S4ADW especificada más adelante. Se justifica la elección de la Bahía de Valparaíso, ya que presenta una configuración geográfica fuertemente dominada por la difracción, especialmente para los frentes de oleaje provenientes del tercer cuadrante que disipan su energía generando zonas de aguas tranquilas en varios sectores.

Para su aplicación en los programas se usaron cartas náuticas electrónicas (CNE) y datos GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean*), facilitados por el SHOA, quienes cuentan con líneas de costa y puntos de sondajes para conformar la malla batimétrica del lugar. Por otro lado, se utilizaron parámetros de resumen de Olas Chile II del año 2000 y comienzos del 2001, facilitados por la Universidad de Valparaíso, para la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia la costa.

Para la propagación de oleaje en los 3 módulos del mike21 se utilizó un método conocido como transferencia de parámetros de resumen, especificado en el acápite 5.3, el cual especifica su relación con el acople de modelos.

Para el análisis de los resultados obtenidos con los modelos, se realizó una comparación con los registros tomados por una boya, perteneciente al SHOA, que cuenta con un registro de 9 meses de parámetros de resumen de forma discontinua.

A continuación, se presenta el desarrollo de ésta segunda etapa la cual se divide en 4 partes, siendo la primera la determinación de fronteras del problema. Luego la creación de mallas en los 3 modelos especificando la configuración y calibración seleccionada. Posteriormente la descripción de la metodología de propagación aplicada y acople de modelos. Y la última corresponde a la presentación de resultados considerando la comparación con datos reales del sector.

## 5.1 DETERMINACIÓN DE FRONTERAS DEL PROBLEMA

Para los fines de este estudio se delimita una zona de interés entre las coordenadas representativas  $33^{\circ} 01' S$ ,  $71^{\circ} 38' O$ , que corresponde a la Bahía de Valparaíso. Su ubicación específica es a 120 [km] al noroeste de Santiago y 8 [km] al sur de Viña del Mar en el Océano Pacífico.



**Figura 62: Bahía de Valparaíso, V Región Chile.**

Fuente: Elaboración Propia.

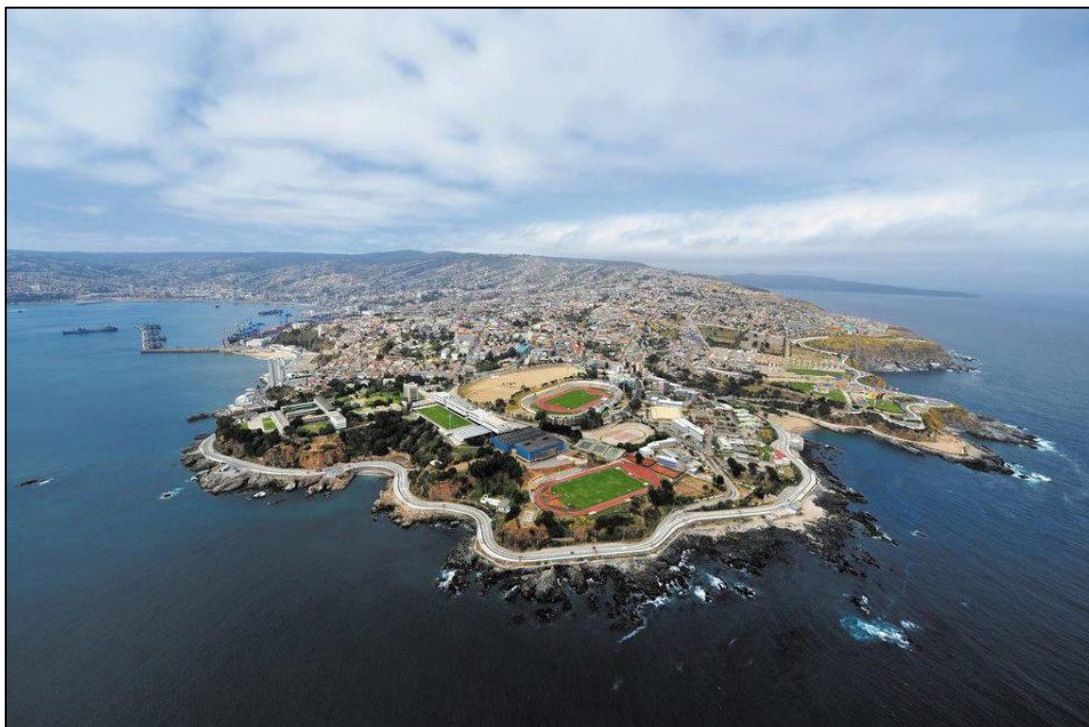
La bahía presenta un ancho de casi 7 millas entre Punta de Con-Con y Punta Ángeles. La profundidad media es de 80 [m] en la parte central, con un marcado declive hacia el W y SW. El relleno de la cuenca hacia el NE, debido al aporte de sedimentos del río Aconcagua, se refleja en la posición de la isobata de los 100 [m]. Salvo el reducido espacio del puerto artificial, la bahía queda enteramente expuesta a los vientos y marejadas del N y NW y gran parte de ella recibe, además, la influencia predominante de los vientos y oleaje del SW.

Para complementar lo antes mencionado se ha realizado un análisis de clima medio en aguas profundas, donde se presentan tablas de incidencia y rosas de oleaje que reafirman la predominancia del oleaje del tercer cuadrante (ver Anexo I).

La bahía de Valparaíso posee un terminal portuario de contenedores y pasajeros catalogado como los de mayor actividad de Sudamérica. Anualmente transfiere más de 10 millones de toneladas de carga general y por sus terminales pasan sobre el 30% de todo el comercio exterior del país. Asimismo, por temporada, atiende a cerca de 40 cruceros y 150 mil

visitantes. Todo esto debido a la influencia de la barrera natural denominada “Punta Ángeles” que actúa como disipador de energía frente a los trenes de ondas que provienen del Sur (WSW, SW, SSW) generando una zona de abrigo que permite el desarrollo de las actividades portuarias mediante la difracción del oleaje.

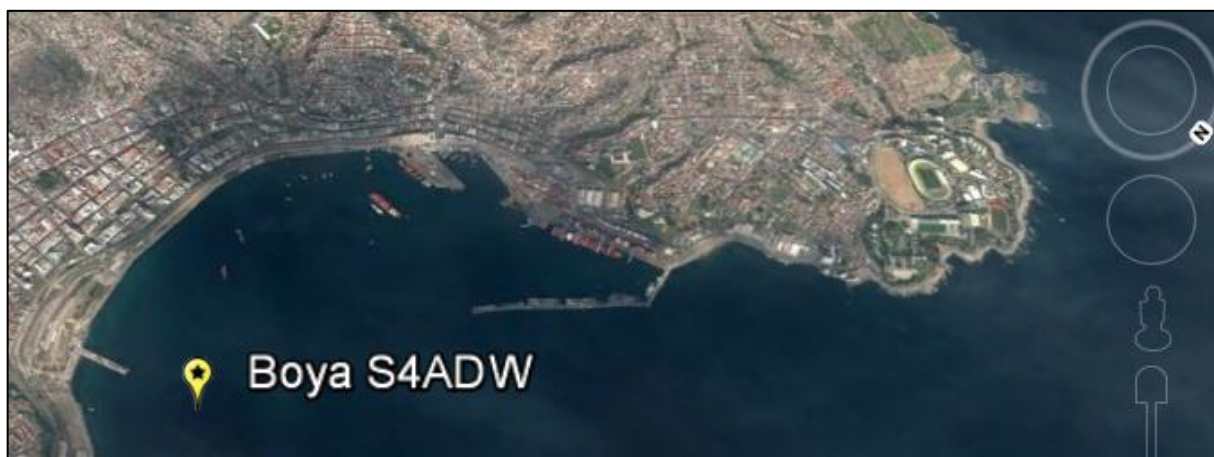
Dentro del enfoque especial que tiene este proyecto de título, es la definición del oleaje en las zonas donde ocurre la difracción, específicamente en el sector de Punta Ángeles (Figura 63), realizando una caracterización del gradiente de energía que se genera, para finalmente obtener parámetros representativos del oleaje cercanos al puerto de Valparaíso.



**Figura 63: Punta Ángeles - Bahía de Valparaíso**

Fuente: <http://whocares-nl.fotki.com/chile/scannen0002-jpg-1.html>

Este trabajo utiliza métodos numéricos de modelación que representan el oleaje y su propagación, comparando entre sí cual se asemeja a la transformación real del oleaje en la zona en cuestión. Para esto se utilizó los datos de la boya S4ADW que está ubicada frente al muelle Barón (Figura 64–Tabla 13) y contiene un registro de 9 meses de estadística (2000-2001) de forma discontinua.



**Figura 64: Ubicación de la Boya S4ADW- Bahía de Valparaíso.**

Fuente: Elaboración propia a través de Google Earth.

| Coordenadas Boya S4ADW (UTM) |             |       |        | Profundidad Fondo |
|------------------------------|-------------|-------|--------|-------------------|
| Este                         | Norte       | Datum | Huso   |                   |
| 256342 [m]                   | 6341607 [m] | WGS84 | 19 Sur | 35 [m]            |

**Tabla 13: Coordenadas Boya S4ADW - UTM.**

Fuente: Elaboración propia.

Esta metodología se aplica solo a la bahía de Valparaíso y no se contempló campañas de terreno. Además solo se analiza el oleaje y no sus efectos sobre el puerto, ni las embarcaciones. Por otro lado, los fenómenos naturales que influyen en el oleaje, como las fuerzas de viento, corrientes, variaciones de marea y variaciones de rugosidad de fondo, entre otros, tampoco son considerados.

Si bien el objetivo principal consiste en definir el oleaje en una zona donde la difracción es importante, la configuración geográfica y batimétrica de Valparaíso impide analizar el fenómeno como evento aislado debido a la presencia de las transformaciones de asomeramiento y refracción de forma inherente. Por lo tanto, estos fenómenos son considerados en los modelos elíptico, parabólico y espectral del *mike21*.

Por otro lado, esta memoria tampoco considera los factores biológicos y ecológicos asociados al efecto en las poblaciones de la flora y fauna marina existentes en el área de estudio.

## 5.2 ANTECEDENTES GENERALES

En este capítulo se presenta la información con la que se desarrolló la memoria de titulación. Dentro de esta información, se encuentran los datos adquiridos a través de la Universidad de Valparaíso y del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

### 5.2.1 DATOS PARA PROPAGACIONES DE OLAJE DE AGUAS PROFUNDAS

Según la publicación SHOA N° 3201, que establece las especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, para caracterizar adecuadamente el clima de oleaje en aguas profundas, se debe contar con 20 años de estadística, información que puede ser obtenida a partir de modelos de hindcasting adecuadamente validados o mediciones de larga data. Sin embargo, esta memoria no busca caracterizar el oleaje, sino evaluar la difracción en la bahía, y para ello se cuenta con un registro correspondiente a 4 años de parámetros de resumen de oleaje (2000 a 2004), obtenidas del análisis espectral del proyecto Olas Chile II, desarrollado por el SHOA y Baird & Associates S.A. con el objeto de definir una base de datos de largo plazo del oleaje espectral direccional en aguas profundas sobre toda la costa de Chile. Dentro de éste periodo, sólo se consideró un análisis de los 9 meses de data simultáneo al registro de la boya. La data fue facilitada por la Universidad de Valparaíso. La Figura 65 muestra la ubicación del nodo Olas Chile II.



Figura 65: Nodo de aguas profundas del modelo Olas-Chile II para Valparaíso.

Fuente: Elaboración propia.

Como se menciona anteriormente, no se busca definir el clima de oleaje. Sin embargo, es necesario realizar en primera instancia un "Análisis de Clima Medio", en aguas profundas, para conocer la incidencia recurrente de la Bahía en diferentes periodos del año. El proceso de éste análisis consiste en procesar y ordenar los parámetros de resumen, para ser representados en tablas de incidencia. Las tablas entregan información en términos de cantidad de datos y porcentajes de concentración, de cada uno de los sucesos, para identificar a los casos con mayor frecuencia de ocurrencia. Otra manera de representación, incluye la implementación de rosas de oleaje e histogramas de Altura significativa [Hs], Periodo peak [Tp] y Dirección peak [Dir], con el fin de mostrar gráficamente las direcciones predominantes del oleaje existente en el área de estudio, ver Anexo I.

## 5.2.2 DATOS DISPONIBLES PARA PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN

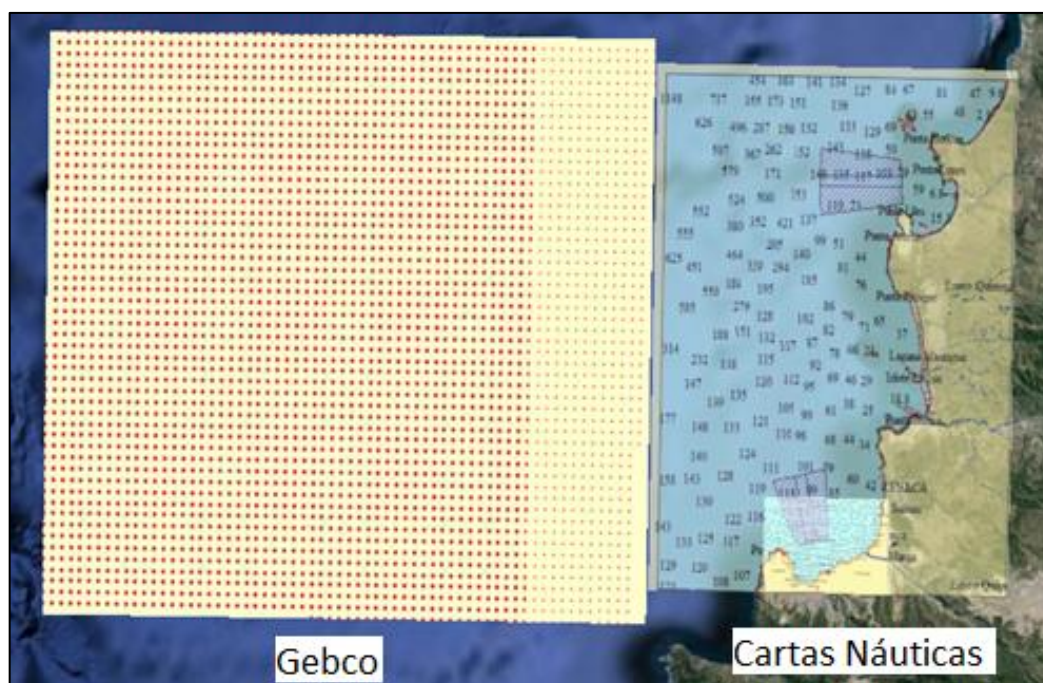
Para la confección de los modelos de propagación se utilizó información batimétrica entregada por el SHOA (Tabla 14). Esta base de datos corresponde a las cartas náuticas en la zona de Valparaíso, que son empleadas para obtener los puntos de sondajes, veriles y líneas de costa correspondientes. Además se trabajó con la base de datos de sondas GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) que sirven para complementar y definir de mejor forma las zonas de aguas profundas, ver Figura 66.

| CARTAS NÁUTICAS                         | N°    |
|---|-------|
| Bahía de Quintero a Bahía de Valparaíso | 4320  |
| Bahía y Puerto de Valparaíso            | 5111  |
| Extracto aguas profundas de Valparaíso  | GEBCO |

**Tabla 14: Datos entregados por el SHOA para la confección de Grilla.**

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que cuando las 3 bases de datos se plasman en una sola malla, se presentan zonas con traslape de sondas que generan ciertas diferencias en cuanto a la definición de las profundidades. Para resolver este dilema, se dio preferencia a los datos de las cartas náuticas, ya que presentan mejor resolución y descripción del fondo, dejando afuera de esas áreas los datos Gebco, evitando de esta manera algún tipo de interferencia. Sin embargo, es preciso indicar que las diferencias que se producen en zonas de aguas profundas son muy poco significativas como para ocasionar efectos sobre el oleaje propagado.



**Figura 66: Superposición de cartas náuticas y GEBCO en Valparaíso, V Región de Chile.**

Fuente: Elaboración propia.

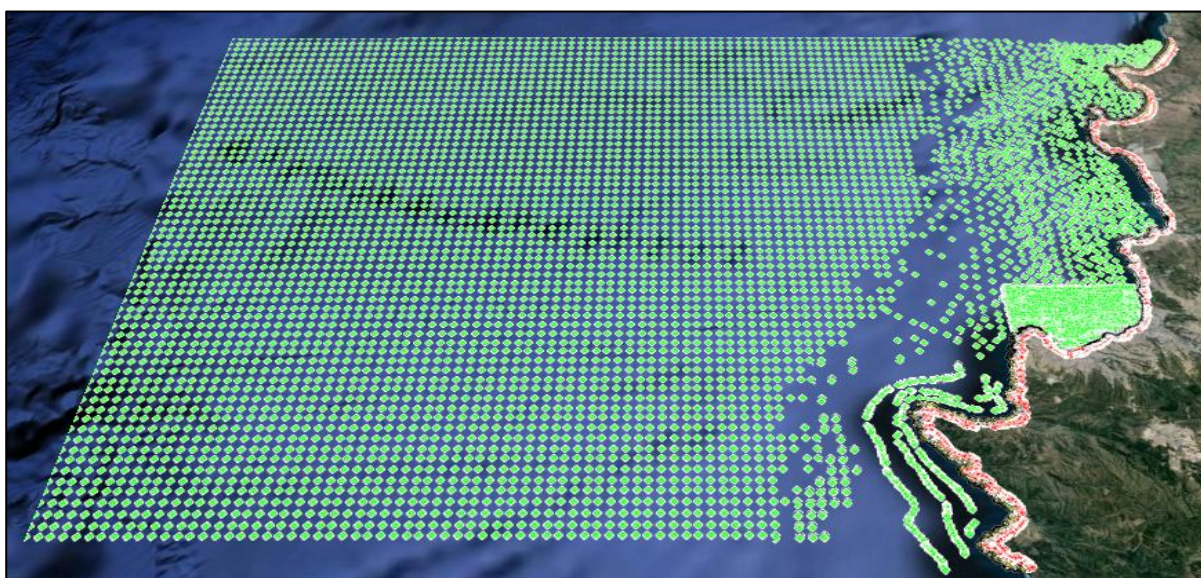
Para el procesamiento de datos se utilizaron diversas herramientas, tales como Global Mapper, Excel, Matlab, Google Earth y Didger. A continuación se realiza una descripción de algunas de ellas:

**Global Mapper:** Sistema de información geográfica (SIG) desarrollado por Blue Marble Geographics que se ejecuta en Microsoft Windows. Ésta herramienta maneja todo tipo de orígenes de datos vectoriales, ráster, y elevación, y proporciona la visión, la conversión, y otras entidades SIG. Este programa permite realizar transformaciones de coordenadas, conversión de formatos, generación de superficies, correlación de imágenes, generación de curvas de nivel, generación de perfiles longitudinales, entre otros. Por lo tanto, este programa fue usado para realizar una limpieza de datos de las cartas náuticas y extraer posteriormente los puntos de sondajes, veriles y líneas de costas en coordenadas UTM, Datum WGS84 y Huso 19 S.

**Excel:** Herramienta perteneciente al conjunto de programas denominados hoja de cálculo electrónica, en la cual se puede escribir, almacenar, manipular, calcular y organizar todo tipo de información numérica o de texto. Fue desarrollado por Microsoft, el cual se encuentra dentro del paquete de herramientas o programas llamados Office. La hoja de cálculo Excel fue utilizado para la limpieza y correcciones de datos extraídos desde Global Mapper.

**Matlab 7.0:** Abreviatura de *Matrix Laboratory*, “laboratorio de matrices” es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces gráficas de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. Este programa es utilizado para la generación de batimetrías idealizadas (Benchmarks) y transferencia de parámetros de resumen.

Las herramientas Google Earth y Didger fueron utilizados para la superposición de fuentes batimétricas en la Bahía de Valparaíso. La Figura 67 muestra el resultado obtenido tras utilizar las herramientas anteriores.



**Figura 67: Superposición de fuentes batimétricas para la Bahía de Valparaíso.**

Fuente: Elaboración propia.

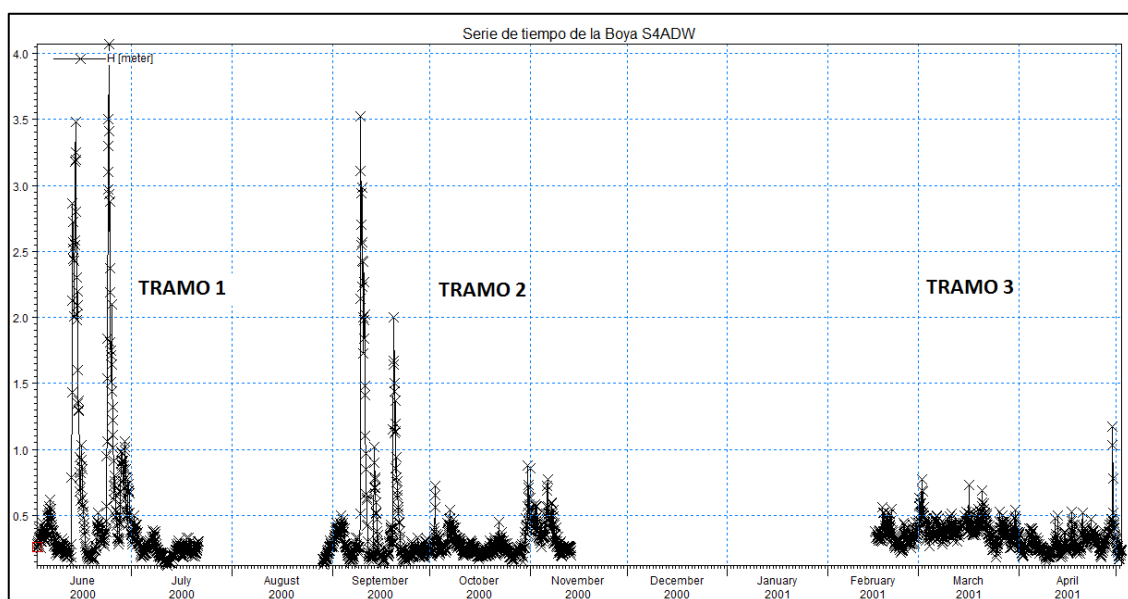
Obs: Puntos verdes representan sondajes, puntos rojos son línea de costa.

Para la validación de las modelaciones realizadas por los módulos de *Mike21*, se posee información de parámetros de oleaje de 9 meses discontinuos (2000-2001) evaluados en 3 tramos (Tabla 15 y Figura 68), donde la boya presenta intervalos de separación temporal de 2 horas como estado de mar entre cada dato.

| Fecha de registro boya SAADW |                          | Año  |
|------------------------------|--------------------------|------|
| Tramo 1                      | 6 Junio - 21 Julio       | 2000 |
| Tramo 2                      | 28 Agosto - 13 Noviembre | 2000 |
| Tramo 3                      | 15 Febrero - 02 Mayo     | 2001 |

**Tabla 15: Data de Registro de la Boya S4ADW.**

Fuente: elaboración propia.



**Figura 68: Serie de tiempo de alturas de ola registradas por la Boya.**

Fuente: Elaboración propia.

La data de oleaje presente en la boya presenta una altura máxima de 4.07 [m] y un mínimo de 0.12 [m] en el tramo 1, una máxima de 3.52 [m] y mínimo de 0.13 [m] para el tramo 2, y un registro entre 1.17 [m] y 0.15 [m] en el tramo 3.

Es importante destacar que los datos de la boya S4ADW, son parámetros de resumen extraídos de registros espectrales que caracterizan la energía del sitio.

Por otro lado, cabe señalar que la data de Olas Chile II fue interpolada para obtener intervalos de separación temporal de 2 horas entre cada estado de mar, para poder ser comparada congruentemente con la boya. Esto último debido a que la data original posee un intervalo temporal de 3 horas entre cada dato.

## **5.3 METODOLOGIA DE TRANSFERENCIA DE OLAJE**

Este capítulo, tiene como finalidad explicar la metodología aplicada en la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia la costa, mediante el uso del modelo espectral y su acople a los modelos elípticos y parabólicos.

### **5.3.1 DEFINICIÓN PARÁMETRO DE RESUMEN**

Los parámetros importantes de oleaje para describir la propagación de las olas son: la altura de ola, el periodo, la dirección de incidencia y la profundidad donde se están propagando. El conjunto de las primeras 3 variables son comúnmente conocidas como parámetros de resumen.

El parámetro de resumen describe el clima de olas resumiendo toda la información de las mediciones en tres parámetros: altura significativa ( $H_s$ ), periodo peak ( $T_p$ ), y dirección promedio de la energía de las olas ( $D_m$ ). A continuación una mayor descripción de estos:

#### **Altura significativa de ola ( $H_s$ )**

Por concepto, la altura significativa es la altura promedio de la tercera parte de alturas de olas más altas en un periodo de medición. La altura significativa  $H_s$  puede ser estimada de un análisis ola a ola en cuyo caso ésta es denodada  $H_{1/3}$ , pero más a menudo es estimada de la integral de la varianza espectral en cuyo caso esta es denotada  $H_{m0}$ . En aguas profundas  $H_s$  y  $H_{m0}$  tienen muy poca variación entre ellos, mientras que en zonas cercanas a la rompiente esta diferencia se hace notar (Engineers U. A., 2003).

Cabe mencionar que tanto  $H_{m0}$  como  $H_{1/3}$  son estimaciones de la altura significativa de ola, sin embargo, sus determinaciones obedecen a criterios diferentes y en la actualidad el parámetro  $H_{m0}$ , basado en la energía espectral del oleaje, es reconocido dentro del ámbito de ingeniería costera como el parámetro apropiado para estimar la altura significativa (Atria Baird Consultores, 2001). Sin embargo, ésta memoria utiliza el valor  $H_s$  (parámetro geométrico-estadístico) para presentar los resultados, ya que no se propagan espectros.

#### **Periodo peak de energía ( $T_p$ )**

El periodo peak del oleaje es el periodo con que se propagan las olas que tienen la mayor energía. Puede estar asociado a espectros 2D o 1D.

#### **Dirección promedio del oleaje ( $D_m$ )**

La dirección promedio de la energía que se extrae de un espectro 2D, es la dirección resultante de promediar la energía total del espectro en una sola dirección.

Es importante destacar que los datos de olas chile II utilizados en esta memoria, corresponden a una data de parámetros de resumen extraídos de los espectros de energía 2D, correspondiente a la caracterización en aguas profundas frente a la Bahía de Valparaíso.

### 5.3.2 TRANSFERENCIA POR MEDIO DE PARÁMETROS DE RESUMEN

Para realizar la transferencia de olas desde aguas profundas hacia aguas someras existen diferentes metodologías, según Massel (1996), como:

- Transferencia por medio de parámetros de resumen
- Transferencia por medio del espectro 1D de energía
- Transferencia por medio del espectro 2D (direccional) de energía

Siendo la transferencia por medio de parámetros de resumen la utilizada para esta memoria.

Para la aplicación de éste método solo se necesita conocer la altura significativa de la ola (Hs), el periodo peak (Tp) y la dirección promedio de la energía del oleaje (Dm). Estos datos se obtienen del colapso de toda la información de un clima de oleaje en una sola ola característica. Los parámetros anteriormente mencionados se transfieren mediante metodologías de cálculo simple o modelos numéricos, para luego obtener las características (Hs, Tp, Dm) en aguas someras.

#### 5.3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRANSFERENCIA

De la data en aguas profundas de Olas-Chile II, se buscan los valores máximos y mínimos de sus parámetros de resumen, con el fin de generar una tabla que contenga una serie de tiempo a propagar acorde a sus rangos de medición.

La configuración de la serie de tiempo para el modelo SW presenta propagaciones de alturas de olas unitarias, una variación de los periodos desde 6 a 22 [s], una dirección mínima de 180 [°] y máxima de 360 [°], discretizados cada 22.5 [°], considerando un delta de 5.625 [°] para la propagación, y un spread direccional asociado a cada periodo (ver Tabla 16) para la distribución direccional de la energía.

| SERIES DE TIEMPO PROPAGADAS EN MIKE21-SW |    |        |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|--|----|--------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| H  | T  | Spread | S   | SSW   | SW  | WSW   | W   | WNW   | NW  | NNW   | N   |
| 1  | 6  | 8      | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 8  | 8      | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 10 | 12     | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 12 | 16     | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 14 | 18     | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 16 | 20     | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 18 | 30     | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 20 | 30     | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |
| 1  | 22 | 30     | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 | 360 |

**Tabla 16: Series de tiempo aplicado en simulaciones con Mike21 - SW, caso Valparaíso.**

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, para representar a todo el intervalo de cada dirección de incidencia, definida en la Tabla 16, se utilizan las marcas de clase que son equivalentes al punto medio de dicho intervalo (ver Figura 69).

| PERIODOS OLAJE [s] |       | DIRECCIONES OLAJE [°]                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  | Rangos              |
|--------------------|-------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|---------------------|
|                    |       | [168.75 - 191.25]                         | [191.25 - 213.75] | [213.75 - 236.25] | [236.25 - 258.75] | [258.75 - 281.25] | [281.25 - 303.75] | [303.75 - 326.25] | [326.25 - 348.75] | [348.75 - 11.25] | Marca               |
|                    |       | 180°                                      | 202.5°            | 225°              | 247.5°            | 270°              | 292.5°            | 315°              | 337.5°            | 360°             |                     |
| Rangos             | Marca | S   | SSW               | SW                | WSW               | W                 | WNW               | NW                | NNW               | N                |                     |
| [1 - 3]            | 2     | Ka : Coeficientes de agitación propagados |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  | Alturas de Olas [m] |
| [3 - 5]            | 4     |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [5 - 7]            | 6     |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [7 - 9]            | 8     |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [9 - 11]           | 10    |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [11 - 13]          | 12    |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [13 - 15]          | 14    |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [15 - 17]          | 16    |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [17 - 19]          | 18    |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| [19 - 21]          | 20    |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |
| > 21               | 22    |   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                     |

Figura 69: Matriz con marcas de clase para propagación de series de tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, es necesario determinar las funciones de transferencia del oleaje hacia la zona de estudio, las cuales dependen de la dirección, del periodo, y de la altura de ola en el sitio de interés. Estas funciones se determinan una vez propagada la serie de tiempo (Tabla 16) para cada dirección, obteniendo valores de  $H_s$  equivalentes a los coeficientes de agitación ( $K_a$ ), y valores de dirección media, los cuales son una ponderación de los coeficientes de asomeramiento, refracción y difracción en el punto de salida del modelo que se defina.

Posteriormente, se aplican los coeficientes de agitación y dirección a cada componente de la data de aguas profundas (Parámetros Olas-Chile II), mediante un código matlab que ordena e interpola los coeficientes para luego multiplicarlos usando la Ecuación 55, obteniendo así parámetro de resumen en aguas someras en los puntos de interés.

Esta metodología es aplicada en primera instancia por el modulo SW, luego el EMS y finalmente el PMS. La Figura 70 muestra un esquema del método de transferencia explicado.

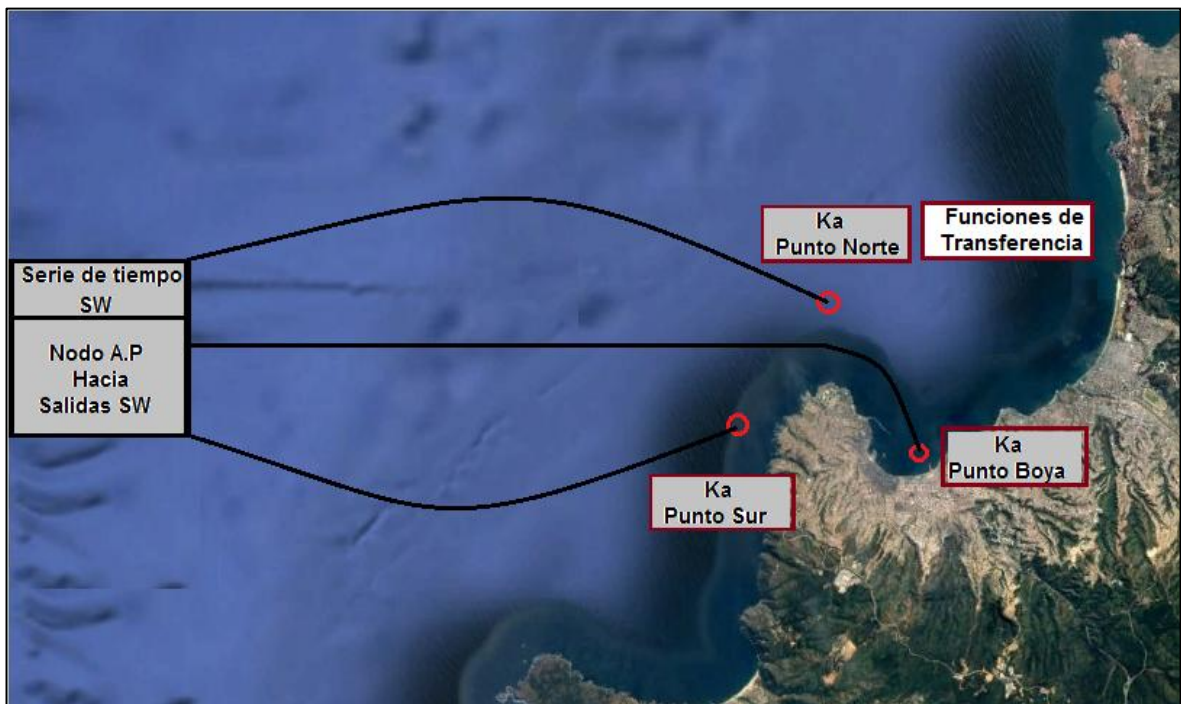


Figura 70: Metodología de transferencia de oleaje de aguas profundas hacia la costa.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.4 CONFIGURACIÓN DE MIKE 21 SW

Siguiendo con lo anteriormente descrito y replicando la metodología utilizada de casos benchmarks, se definieron las condiciones de borde, las mallas batimétricas, los parámetros de propagación, y las salidas de datos del modelo SW y su posterior acople con los módulos EMS, y PMS en la Bahía de Valparaíso. A continuación se detallan los procesos de creación y configuración de cada modelo:

### a) Definición del dominio batimétrico:

Para la definición de las condiciones de bordes sur, este y norte, se consideró establecer los puntos de inicio de frontera en condición de aguas profundas, tal que al ingresar el oleaje por aquellas zonas, éstas no provengan de una profundidad inadecuada que presenten efectos de refracción y asomeramiento, evitando errores de arrastre en el proceso de propagación y por ende en los resultados.

### b) Definición de la malla de cálculo:

La configuración en SW tiene una variación en cuanto al tamaño de los elementos triangulares presentes en el dominio de la malla, ya que se consideró un criterio de decrecimiento a razón de 1/3 a través de los polígonos formados, partiendo con un área máxima de 2.500.000 [m<sup>2</sup>] en aguas profundas, hasta un área de 10.000 [m<sup>2</sup>] para aguas someras, obteniendo así una resolución aproximada en el sitio de interés de 150 x 150 [m] (Figura 71). Cabe mencionar que se realizaron varias mallas de prueba con diferentes tamaños de elementos que iban entre resoluciones de 300 x 300 [m] hasta 40 x 40 [m] en el sitio de interés, con el fin de comparar el resultado obtenido, siendo el mejor ajuste la configuración ilustrada en la Figura 69. Para crear la triangulación se hicieron pruebas con una transición de 1/2 en los polígonos para comparar posibles problemas de estabilidad y convergencia de los resultados, los cuales no presentan diferencias significativas en los resultados en comparación al criterio de transición de 1/3.

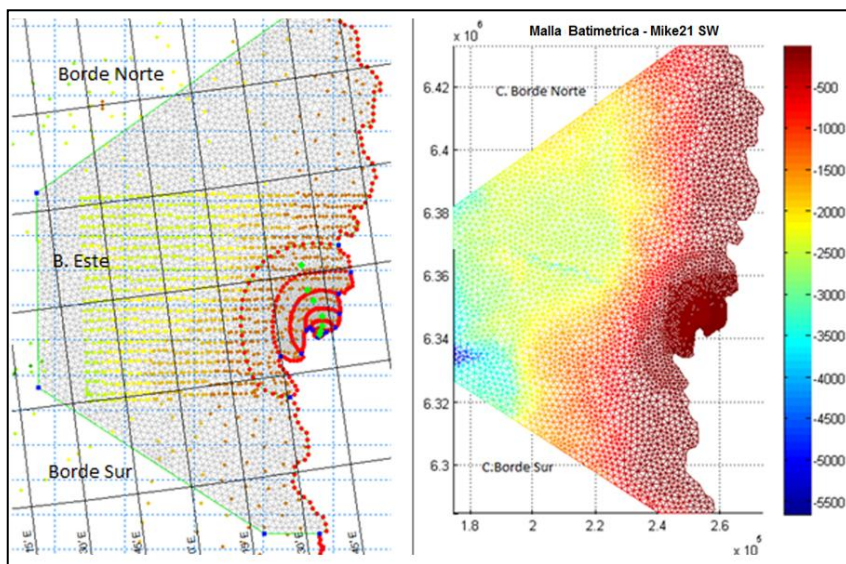


Figura 71: Malla Batimétrica Mike21-SW, Bahía de Valparaíso.

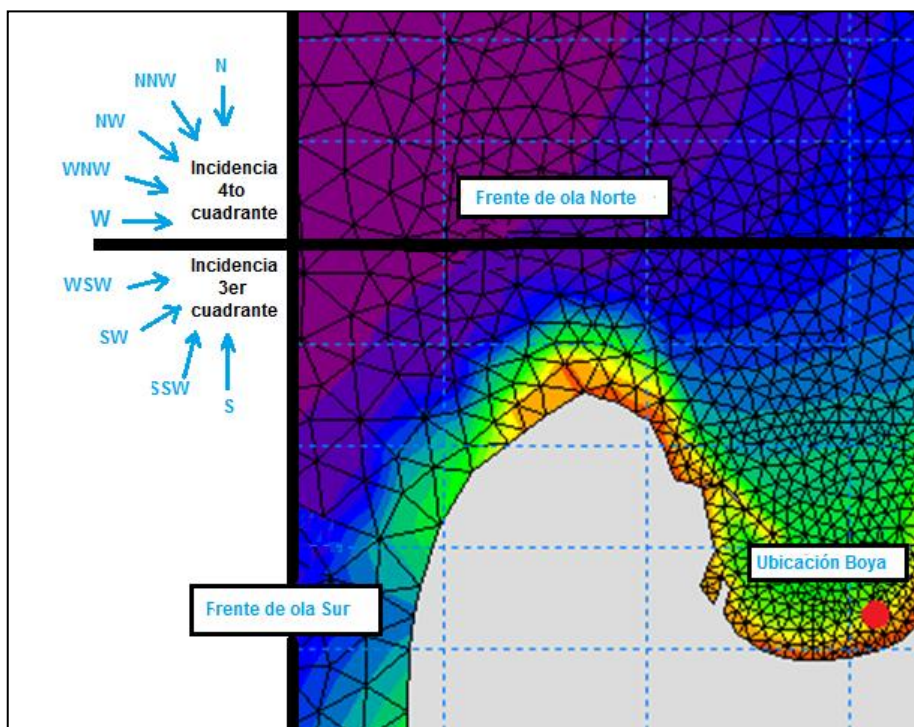
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, tras haber configurado las propagaciones de las series de tiempo especificadas en la Tabla 16, es necesario definir el criterio de selección de los parámetros de salida del módulo espectral SW, considerando su posterior integración a los modelos EMS y PMS, para la obtención de resultados. En la siguiente sección se explica en mayor detalle lo antes mencionado.

### **c) Definición de la salida del modelo:**

Esta etapa consiste en configurar las salidas del modelo SW, para entregar resultados en parámetros de resumen como altura significativa ( $H_s$ ), periodo peak ( $T_p$ ) y dirección media ( $D_m$ ), en diferentes puntos del dominio propagado, mediante la definición de criterios que establezcan la cantidad y ubicación de éstos.

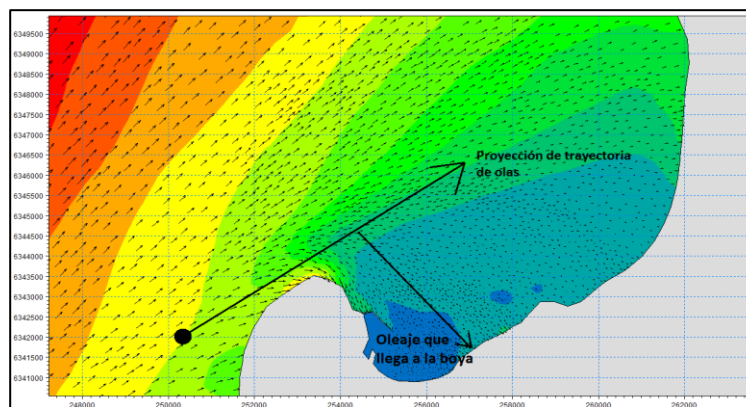
Para definir la cantidad de puntos de salida, es necesario tener presente que los módulos EMS y PMS son modelos monocromáticos que funcionan con 2 líneas de generación de oleaje en forma paralela, impidiendo variaciones de sus parámetros a lo largo del frente de incidencia. Por lo tanto, si se considera un solo punto de salida en la zona sur, éste no sería representativo para el oleaje que proviene del cuarto cuadrante, ya que su incidencia penetra en la bahía en forma directa sin interactuar con obstáculos naturales o artificiales que afecten su energía. Por lo tanto, para generar mayor representatividad en los resultados se consideraron 2 puntos de control y 1 de comparación correspondiente al lugar de la boya. La Figura 72 ilustra el oleaje incidente en la bahía de Valparaíso.



**Figura 72: Oleaje incidente en la Bahía de Valparaíso.**

Fuente: Elaboración propia.

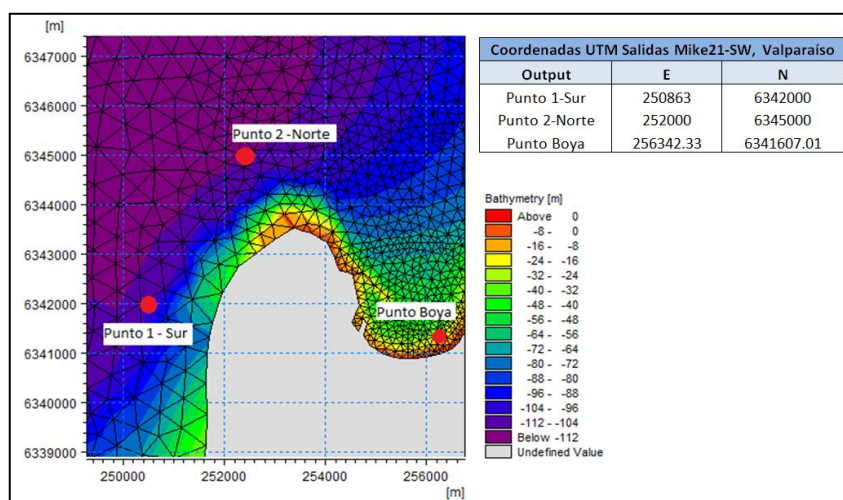
Para definir la ubicación de puntos de salida, se realizó una serie de propagaciones de alturas unitarias con dirección de incidencia variante entre el 3er y 4to cuadrante, para identificar la zona límite donde el oleaje es capaz de penetrar en la bahía y por consecuencia influir en el registro de la boya. De esta manera se realizó una proyección de la dirección vectorial de la ola incidente, antes de Punta Ángeles (ver Figura 73), ya que el objetivo es evaluar las diferencias en la definición de la difracción en los modelos elíptico y parabólico.



**Figura 73: Zona límite de oleaje penetrante en la bahía, caso sur.**  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se establece la ubicación del primer punto a una profundidad de 120 [m], en la zona sur de Valparaíso, detrás de la Punta Ángeles, donde el oleaje incidente proviene del 3er cuadrante y aún no sufre efectos de difracción. El segundo punto, ubicado en la zona norte frente a P. Ángeles a una profundidad de 110 [m], y el tercero es la ubicación de la Boya S4ADW a 35 [m] de profundidad frente al muelle Barón (ver Figura 74).

La salida del punto 1–Sur, corresponde a las simulaciones realizadas con incidencia de oleaje en direcciones S, SSW, SW y WSW. Mientras que el punto 2-Norte representa la salida de las propagaciones de oleaje provenientes de direcciones W, WNW, NW, NNW y N (ver Figura 74).



**Figura 74: Output del Modelo Mike21-SW, Bahía Valparaíso.**  
Fuente: Elaboración Propia.

### 5.4.1 ACOUPLE DE MODELOS

El concepto de acople de modelos hidrodinámicos hace referencia a la vinculación que existe entre ellos a través de sus mallas de cálculo, respetando las ecuaciones de gobierno y método de resolución de cada uno, para definir o caracterizarla transformación del oleaje en un determinado sector, mediante la utilización de transferencia de parámetros de resumen, explicado en el acápite 5.3 e ilustrado en la Figura 70.

La vinculación existente entre modelos radica en la selección de puntos de salida del módulo SW, ya que los puntos denominados 1-sur y 2-norte corresponden a las funciones de transferencia que ingresaran como input de oleaje a los modelos elíptico y parabólico para ser propagados hasta el punto de boya. Estos puntos representan coeficientes de agitación ponderados, en profundidad de aguas intermedias, que aún no están afectos a variaciones en su energía debida a la presencia de la Punta Ángeles, permitiendo evaluar la difracción en los modelos EMS y PMS en la bahía de Valparaíso.

Ya conocidos los puntos de salida del SW es posible realizar la confección de las mallas de cálculo para los modelos EMS y PMS, identificando el dominio de propagación y límites del contorno.

Para evaluar el modulo elíptico y parabólico se dio origen a 9 mallas de cálculo diferentes, asociadas a cada dirección de incidencia del oleaje del 3er y 4to cuadrante (ver Figura 72). La razón de esto último, es debido a que ambos programas utilizan 2 paletas paralelas de generación de ola que obligan a modificar las condiciones de borde cada vez que se propaguen olas con incidencias de otras direcciones, ya que si se utiliza una sola malla de cálculo, éstas traerían perdidas de energía, producto de reflexiones en el caso elíptico, que no son reales y que perjudican la definición de la difracción.

A continuación, la Figura 75 ilustra el acople de modelos a través de los puntos de salida del SW y las mallas de cálculo del EMS y PMS.

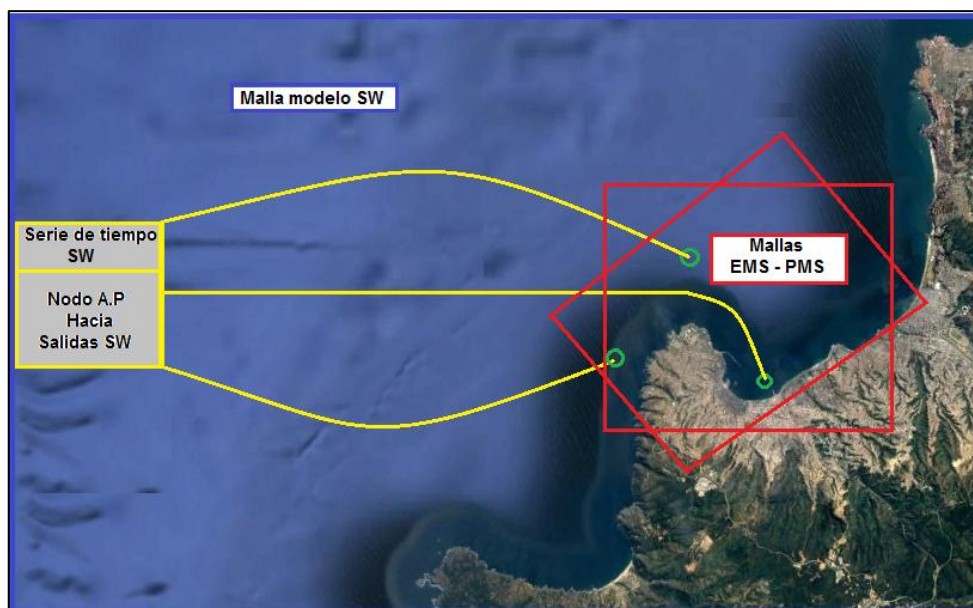


Figura 75: Acople de mallas de cálculo en modelos SW-EMS-PMS.

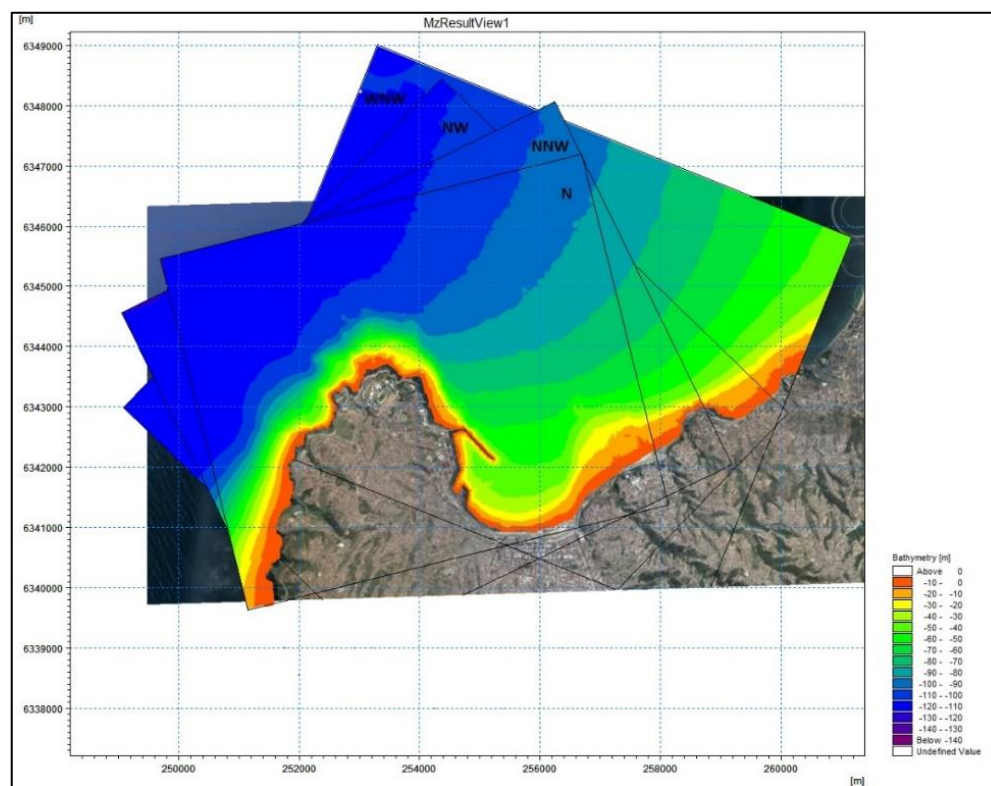
Fuente: Elaboración propia.

## 5.5 CONFIGURACIÓN DE MIKE21 EMS

### a) Definición de mallas de cálculo:

Las mallas en el modelo elíptico varían dependiendo de la dirección de incidencia del oleaje entregado en las salidas del modelo SW en los puntos 1-Sur y 2-Norte. Para crearlas se usaron proyecciones de las líneas de incidencia y cálculos para establecer el ancho y largo de cada malla. De lo anterior se originaron 9 grillas con resolución de 4 [m] en el eje x e y, para definir el oleaje entre 10 – 15 puntos por longitud de onda. Además se consideran 50 capas de esponja para periodos largos, 5 capas de porosidad de coeficiente 0.85 para las orillas de playa, un criterio de convergencia de 0.0005, y un máximo de 2500 iteraciones para los casos de periodos cortos, según lo recomendado por el desarrollador para bahías abiertas como Valparaíso.

A continuación se presentan las mallas para los casos del tercer y cuarto cuadrante:



**Figura 76: Mallas batimétricas Mike21-EMS, 4to Cuadrante. Bahía de Valparaíso.**

Fuente. Elaboración propia.

Debe tenerse en cuenta que las mallas utilizadas para la aplicación del modelo EMS y PMS, se han escogido suficientemente amplias como para que el dominio de estudio no se vea afectado por las perturbaciones de los contornos laterales, ya que es una de las posibles causas de problemas numéricos.

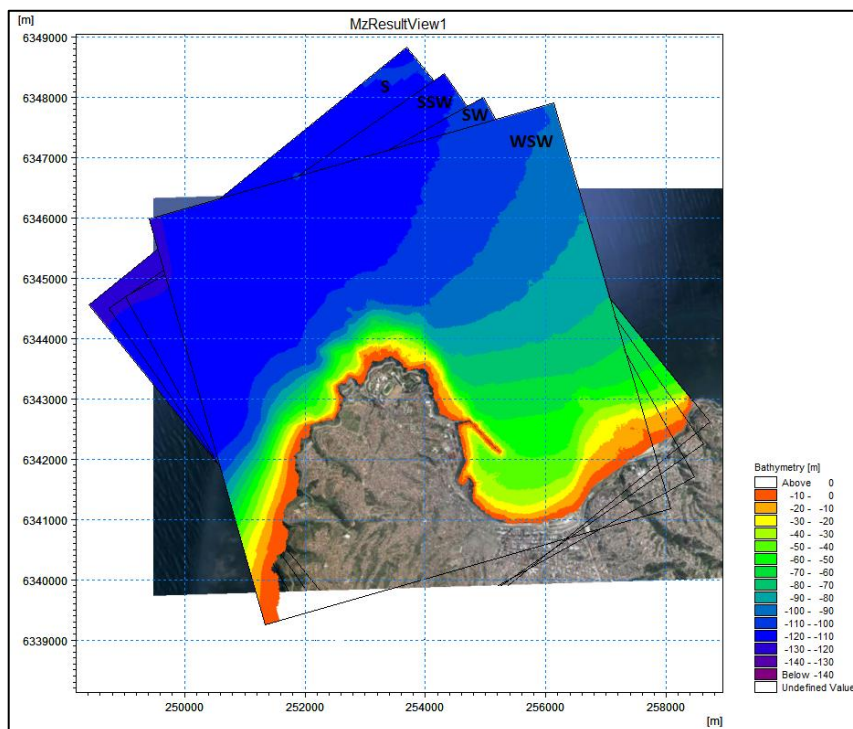


Figura 77: Mallas batimétricas Mike21-EMS, 3er Cuadrante. Bahía de Valparaíso.  
Fuente: Elaboración propia.

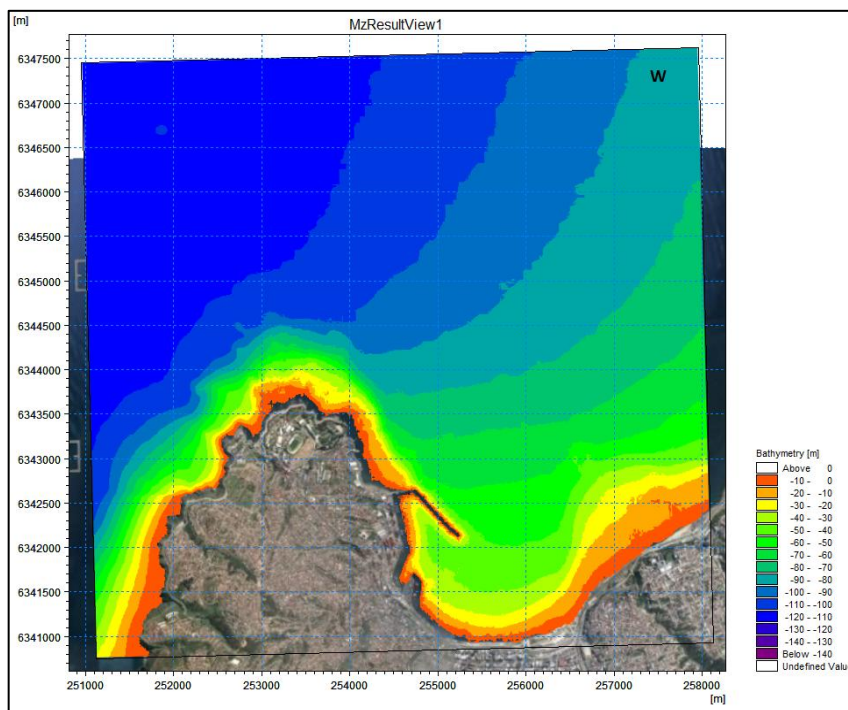


Figura 78: Malla batimétrica para dirección W. Bahía de Valparaíso.  
Fuente: Elaboración propia.

**b) Configuración de condiciones de borde del modelo:**

Es importante destacar que para la generación de oleaje el modelo EMS utiliza 2 paletas paralelas entre sí, donde el valor ingresado para la altura de ola corresponde al valor de la altura media cuadrática (Hrms) de la ola obtenida con el modelo SW, debido a que se consideró la definición de la disipación de energía mediante la distribución tipo Rayleigh. Para lograr esto, se realizó la conversión de altura significativa (Hs) a Hrms considerando el estudio realizado por Cesar Vidal de la Universidad de Cantabria, quien hizo un análisis de los modelos estadísticos del oleaje, en donde se define la distribución de alturas de olas en profundidad finita por Glukhovskiy (1966), quien desarrolló una extensión de la distribución de Rayleigh para aguas de profundidad finita.

La expresión de la función de densidad de la altura de ola es:

$$f(H) = \frac{b}{H} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{1+n}{1-n}} \exp \left[ -a \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{2}{1-n}} \right]; \text{ con:}$$

**Ecuación 58**

$$a = \frac{\pi}{4 \left(1 + \frac{n}{\sqrt{2\pi}}\right)} ; b = \frac{2a}{1-n}$$

La expresión  $n = \frac{\bar{H}}{d}$  es la relación entre la altura de la ola media y la profundidad,  $0 \leq n \leq 0.5$ , correspondiendo  $n = 0$  al caso de profundidades indefinidas y  $n = 0.5$  al límite con la zona de rompientes. La Tabla 17 representa la conversión para varios valores de n.

| n   | $\frac{H_{rms}}{\bar{H}}$ | $\frac{H_s}{H_{rms}}$ | $\frac{H_s}{\bar{H}}$ |
|-----|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0.0 | 1.1284                    | 1.4213                | 1.601                 |
| 0.1 | 1.1127                    | 1.4067                | 1.565                 |
| 0.2 | 1.0961                    | 1.3730                | 1.505                 |
| 0.3 | 1.0792                    | 1.3530                | 1.460                 |
| 0.4 | 1.0625                    | 1.3174                | 1.400                 |
| 0.5 | 1.0465                    | 1.2572                | 1.316                 |

**Tabla 17: Parámetros característicos de altura de ola según la distribución de Glukhovskiy.**

Fuente: Estadística de Oleaje, Cesar Vidal – Universidad de Cantabria.

Para relacionar el valor n con la profundidad, Glukhovskiy sugiere utilizar  $n = 0.1$  y  $0.2$  en profundidades intermedias, cuando son visibles los efectos de transformación de oleaje, mientras que recomienda un  $0.3$  cuando existen transformaciones (refracción-difracción) inducido por obstáculos artificiales en condiciones de aguas intermedias. Luego, considerando que las salidas de los puntos SW son de aguas profundas, se aplica la conversión de  $n = 0$  para cambiar Hs a Hrms.

Finalmente, para poder evaluar y comparar los resultados EMS con la boya, éstos deben ser nuevamente convertidos en Hs, pero ésta vez considerando la conversión de  $n = 0.3$ , ya que la boya se encuentra a una profundidad de 35 [m] cerca del molo de abrigo.

## 5.6 CONFIGURACIÓN DE MIKE21 PMS

### a) Definición de mallas de cálculo:

Para poder mantener el mismo patrón de comparación de parámetros entre los modelos evaluados, se utilizan las mismas mallas utilizadas en el caso elíptico de las Figuras 76, 77 y 78, las cuales sufren algunas modificaciones para ser reconocidas en el módulo PMS. Las modificaciones son:

- Quitar la esponja y porosidad de todas las mallas, debido a que el módulo PMS no los requiere.
- Cambiar el origen  $(x_0, y_0)$  de cada malla de cálculo para que la nueva orientación sea aplicable a las paletas de generación del módulo PMS. Esto último es debido a que el input de oleaje, en el modelo parabólico, permite solo la entrada por el lado oeste de la malla (dirección en sentido x), ver ejemplo Figura 79.

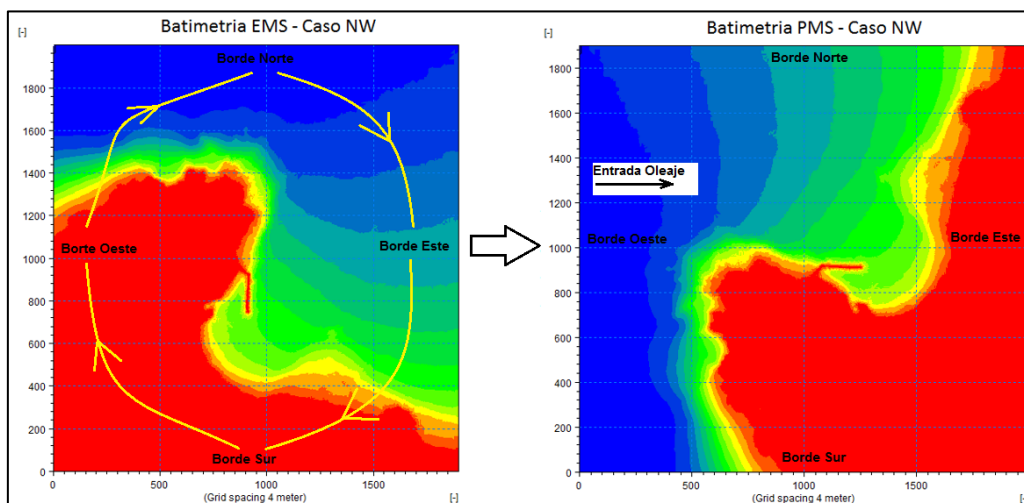


Figura 79: Malla de cálculo orientada en dirección Oeste para módulo PMS.

Fuente: Elaboración propia.

### b) Configuración de propagación del modelo:

En cuanto a la configuración de propagación se estableció una descripción tipo estacionario considerando las alturas de ola en Hrms, periodo peak y dirección media, proveniente de las salidas 1-Sur y 2-Norte del modelo espectral. Además se definen condiciones de borde laterales norte y sur simétricos, en la malla reorientada, ya que garantizan que el gradiente de las condiciones de onda a través del límite  $(d / dy)$  sean cero. Básicamente, esto es sinónimo de suponer que los contornos son localmente rectos y paralelos cerca de la frontera.

Luego, es necesario definir el coeficiente parabólico y el interfaz disipativo a utilizar. El coeficiente PMS es una aproximación que hace posible ampliar el ángulo admisible entre el eje x y la dirección de propagación de la ola  $\alpha$ , por ejemplo,  $\pm 60^\circ$ . Existen diferentes tipos de aproximaciones como la Simple, de Padé y Minimax. A continuación se describe cada uno de ellos, y además se define el interfaz disipativo:

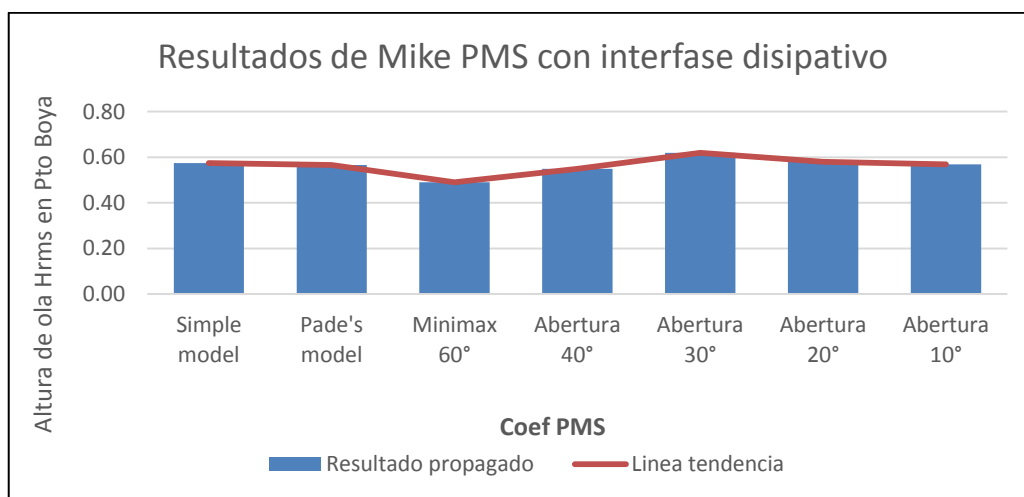
**Modelo Simple:** Corresponde a la aproximación más simple, el cual requiere que el ángulo entre la dirección x positiva y la dirección de propagación de la ola sea pequeña ( $<10^\circ$ ), de lo contrario errores significativos estarán presentes en la solución.

**Modelo de Padé:** Es una mejora del modelo simple, el cual permite ángulos más amplios, de hasta  $\pm 45^\circ$ , (ver Kirby, 1986) entre la dirección x positiva y la dirección de propagación de la ola.

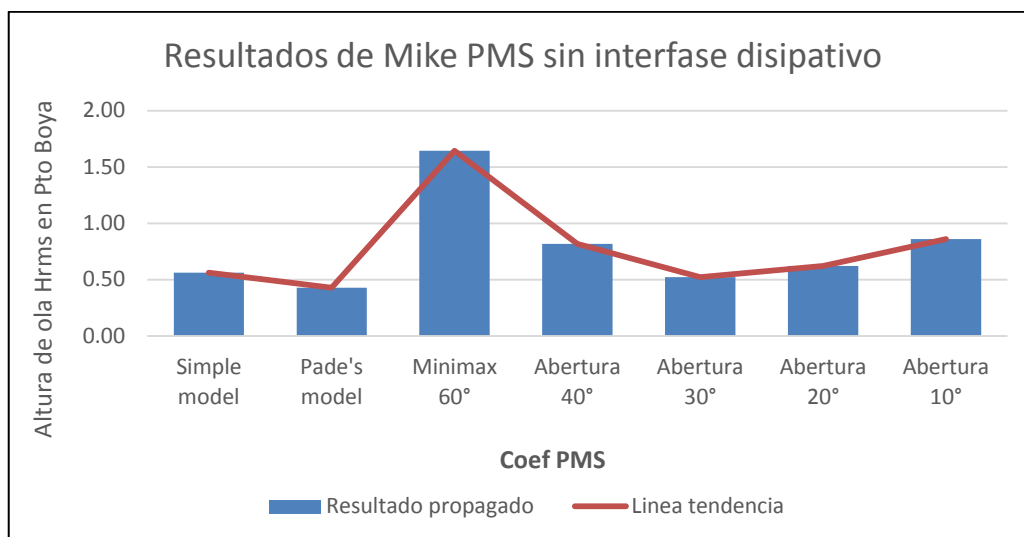
**Modelo Minimax:** Se basa en una minimización del error máximo en la aproximación parabólica para un ángulo de abertura dada. Por lo tanto, hay diferentes modelos Minimax de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ , etc. Si se considera utilizar el Minimax a  $60^\circ$  implica que se está utilizando una aproximación que minimiza el error de olas que se propagan dentro de los  $60^\circ$  al eje x. Sin embargo, pueden existir errores leves de olas que se propagan en ángulos más pequeños.

**Interfaz disipativo:** Se utiliza para filtrar el ruido elevado del número de onda producido en ciertas aplicaciones con modelos de aproximación parabólica. Este es especialmente el caso en aplicaciones que implican variaciones bruscas de la altura de ola debido a rotura de ola.

Para la selección del coeficiente PMS se realizó un análisis de sensibilidad, en Valparaíso, con soluciones del tipo simple, de Padé y Minimax con diferentes aproximaciones, incluyendo interfaz disipativo. La Figura 80 ilustra el ejemplo de una propagación con Hrms de 0.64 [m] y 8 [s] de periodo, usando la malla norte, indicando una diferencia mínima entre el resultado de Padé y Simple extraído en el punto de la boya, mientras que Minimax se acerca a los otros modelos cuando el ángulo es hasta  $10^\circ$ . Sin embargo, las diferencias comienzan a aparecer cuando el periodo de la ola aumenta y no se considera interfaz disipativo (Figura 81).



**Figura 80: Sensibilidad del coeficiente PMS con interfaz disipativo.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 81: Sensibilidad del coeficiente PMS sin interfaz disipativo.**

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el parámetro utilizado para la solución de aproximación parabólica, en la Bahía de Valparaíso, es el modelo simple, ya que genera un comportamiento más estable en la simulación, debido a la utilización de 9 mallas de cálculo para la propagación de las diferentes direcciones de incidencia. Esto último permite que el ángulo entre la incidencia del oleaje y el eje x de la malla sea menor a 10°. Cabe destacar que no se consideró fricción de fondo ni rotura.

# RESULTADOS EN LA BAHIA DE VALPARAISO

## 5.7 RESULTADOS APLICACIÓN EN BAHIA DE VALPARAISO

A continuación se presentan los resultados de la simulación espectral de la dirección SW, W, NW y N con periodos de 12 [s], para efectos de visualización, y luego las funciones de transferencia obtenido de la totalidad de propagaciones de la serie de tiempo de la Tabla 16. Para ver todos los resultados modelados del Mike-SW se recomienda ver el Anexo II.

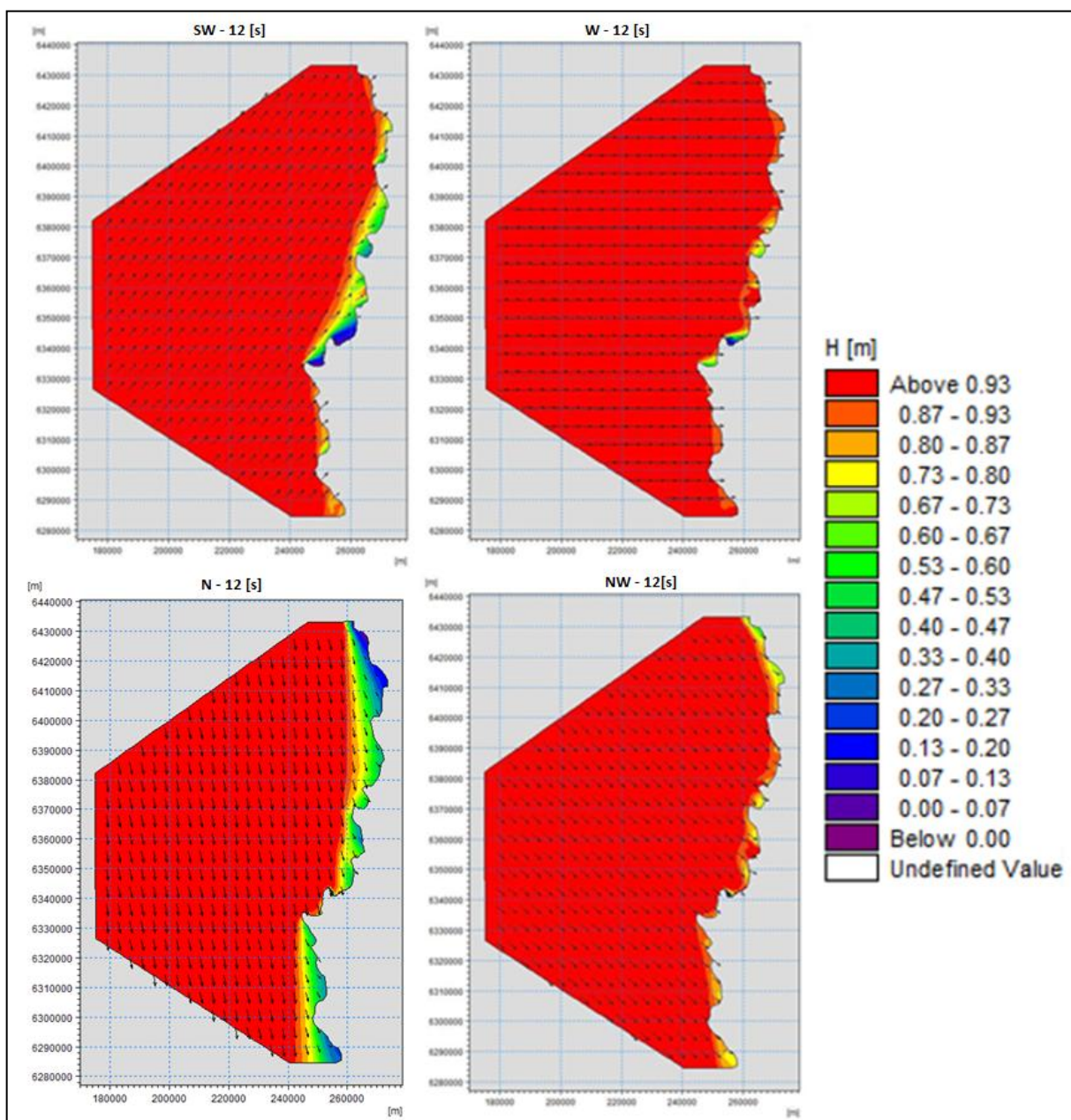


Figura 82: Resultado espectral para casos de direcciones SW-W-NW-N.  $T = 12[s]$ .

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que en casi todos los casos propagados con incidencia del 3er y 4to cuadrante se estableció como punto de inicio de frontera la condición de aguas profundas, sin embargo, para la incidencia del oleaje norte se definió evaluar el inicio en condición de aguas intermedias, ya que se generaban sombras numericas que inducian a una mala configuración y por ende una escaza influencia del oleaje sobre la bahía de Valparaíso.

Tras evaluar ambos modelos (ver Figura 83) es posible visualizar una clara desemejanza en la distribución de sombras energeticas en ambos casos, que tienden a creer en un error de configuración del modelo, sin embargo, el resultado cuantitativo no presenta diferencias significativas entre ellos, ya que existen diferencias de 8 [cm] en la altura de ola propagada para periodos cortos (6 y 8 segundos), mientras que los periodos largos presentan una variación entre 3 a 4 [cm] entre los dos modelos.

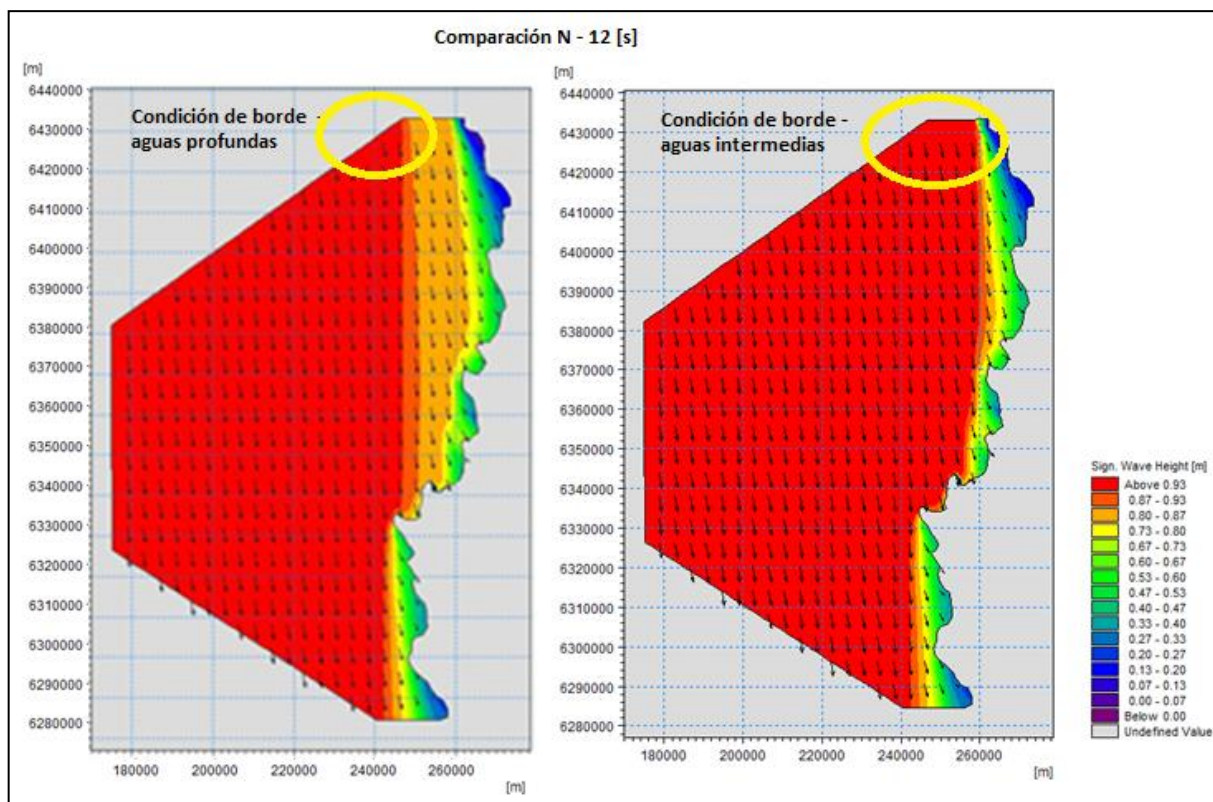
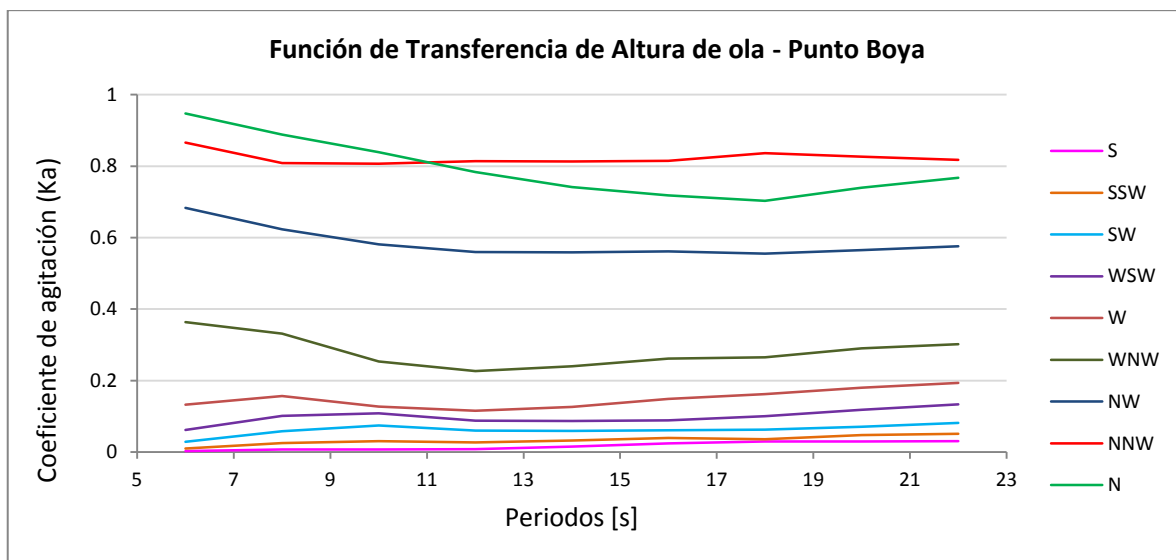


Figura 83: Comparación de incidencia norte en modulo SW.

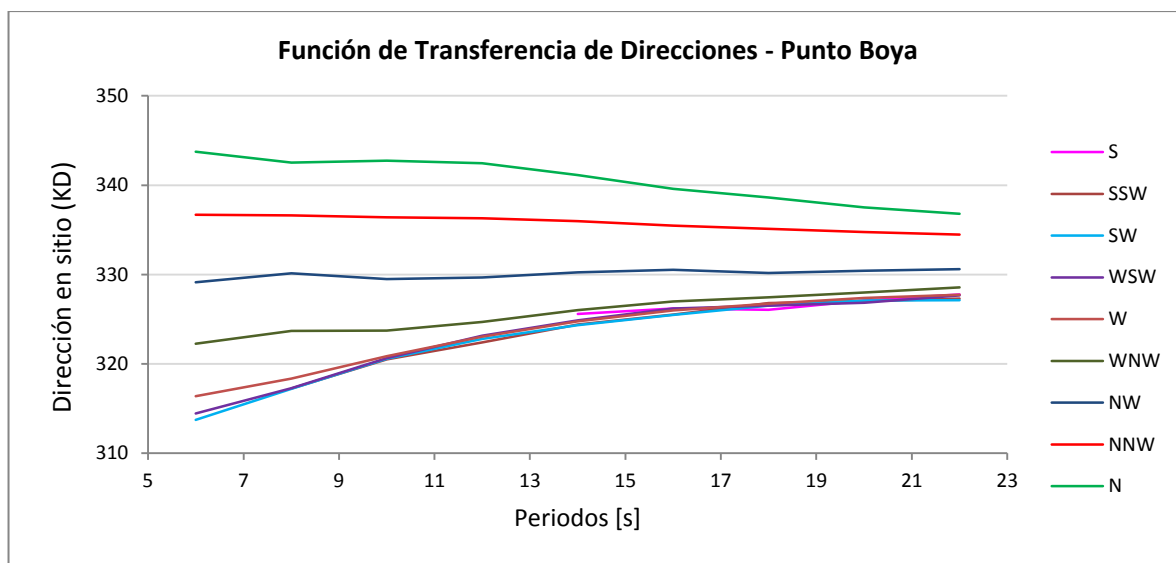
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente para la propagación de la serie de tiempo en la dirección norte, se utiliza como punto de inicio de frontera la condición de aguas intermedias, generando así una distribución homogénea de la energía en todo el dominio.

Tras propagar la totalidad de la serie de tiempo presentada en la Tabla 16, se presenta a continuación los resultados correspondientes a los coeficientes de agitación y dirección en el punto de la boya (funciones de transferencia) extraídos del SW. Mientras que los coeficientes obtenidos de la combinación 1-Sur y 2-Norte, input de entrada para módulos EMS y PMS, se pueden revisar en la Tabla 22 del Anexo II.



**Figura 84: Funciones de transferencia para propagación a punto boya – Coef.de agitación.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 85: Funciones de transferencia para propagación a punto boya –Coef.de dirección.**  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez asociados los coeficientes de agitación y dirección con los datos en aguas profundas del modelo Olas-Chile II, mediante la transferencia de parámetros de resumen, se presentan los siguientes resultados y ajustes en series de tiempo, para los 3 tramos descritos en la Tabla 15, que comparan las diferencias entre el modelo espectral trabajado con parámetros de resumen versus el registro de la boya.

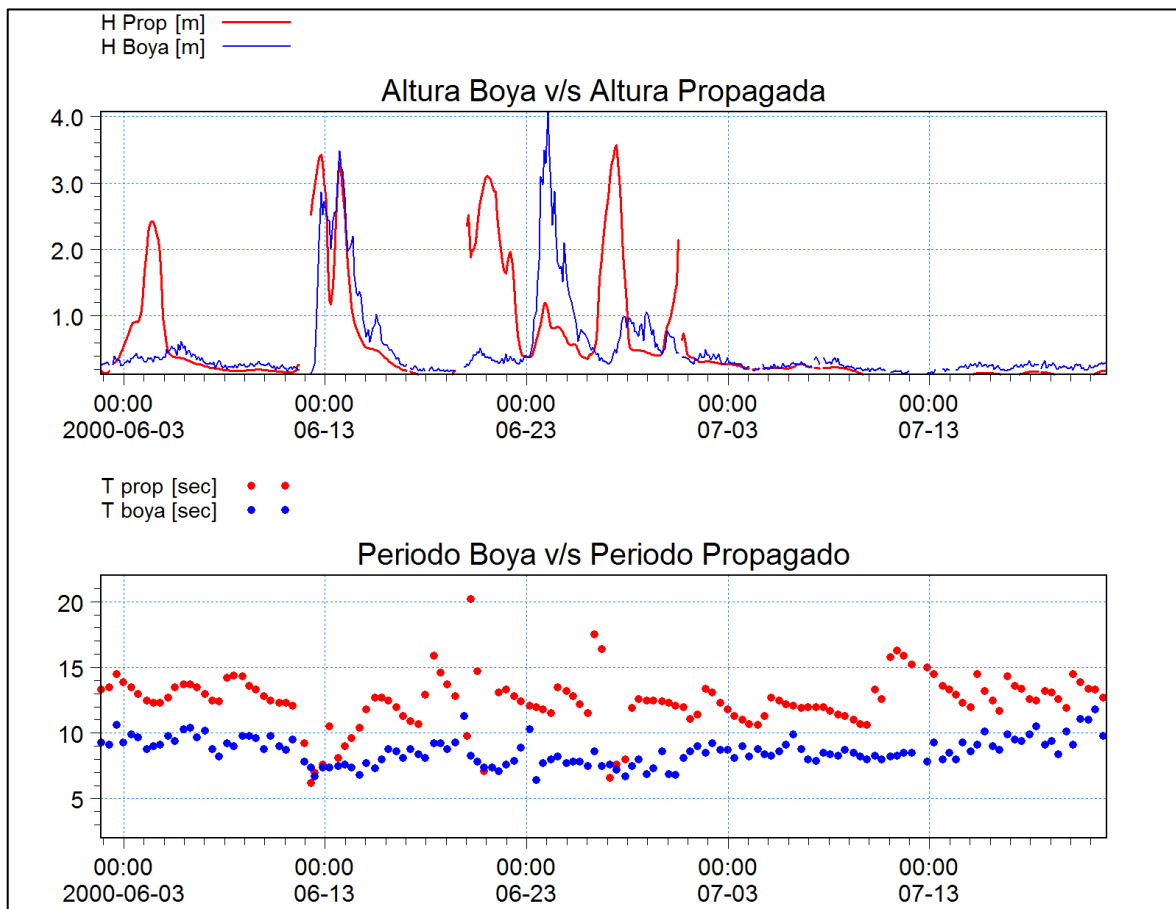


Figura 86: Serie de tiempo altura y periodo propagada SW vs Boya - Tramo 1.

Fuente: Elaboración propia.

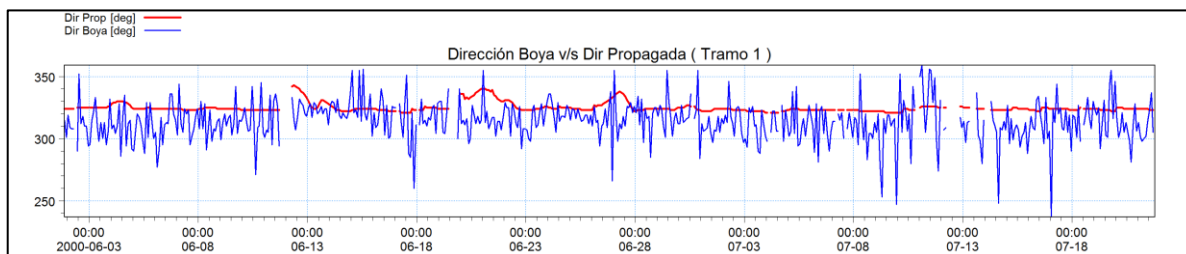


Figura 87: Serie de tiempo de direcciones propagadas SW vs Boya - Tramo 1.

Fuente: Elaboración propia.

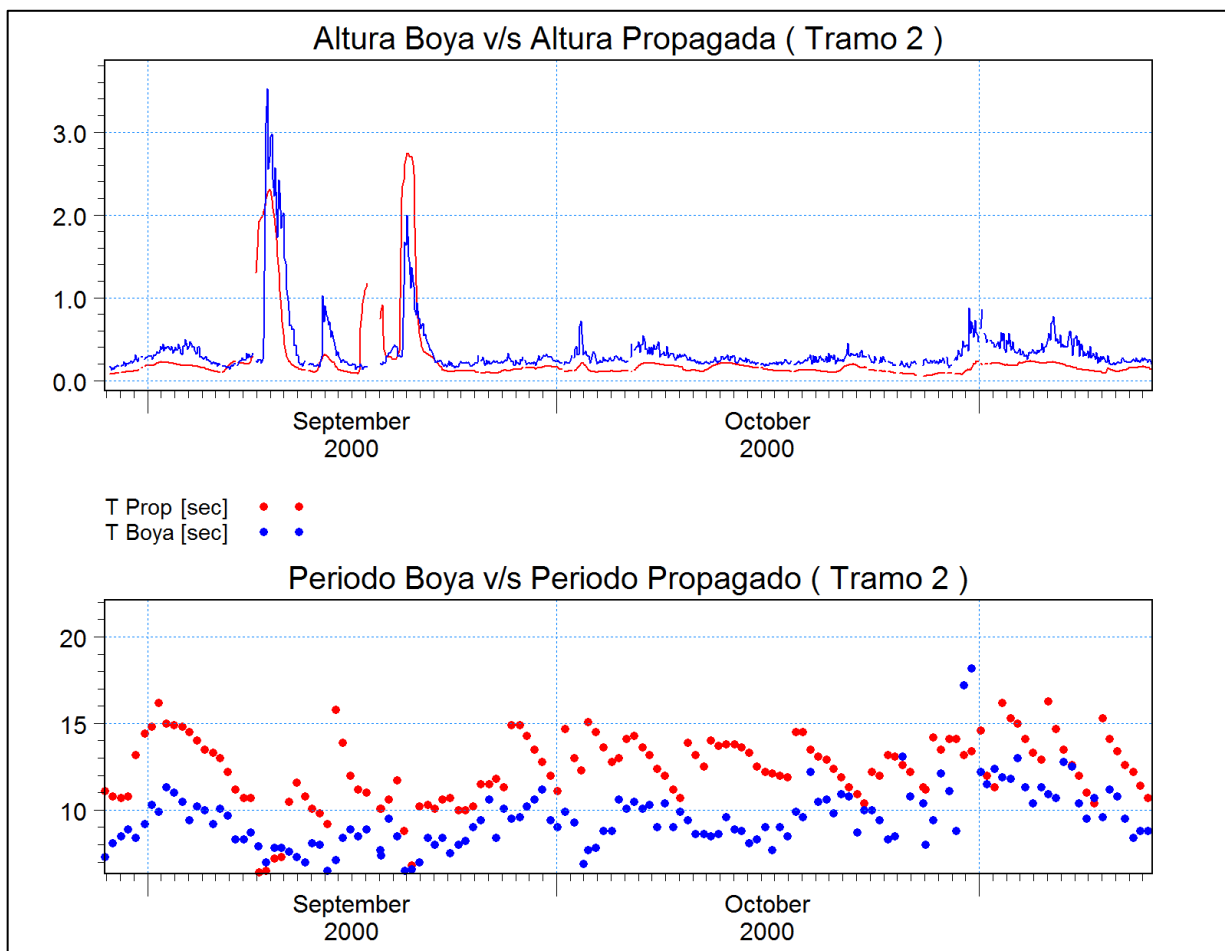


Figura 88: Serie de tiempo altura y periodo propagada SW vs Boya - Tramo 2.

Fuente: Elaboración propia.

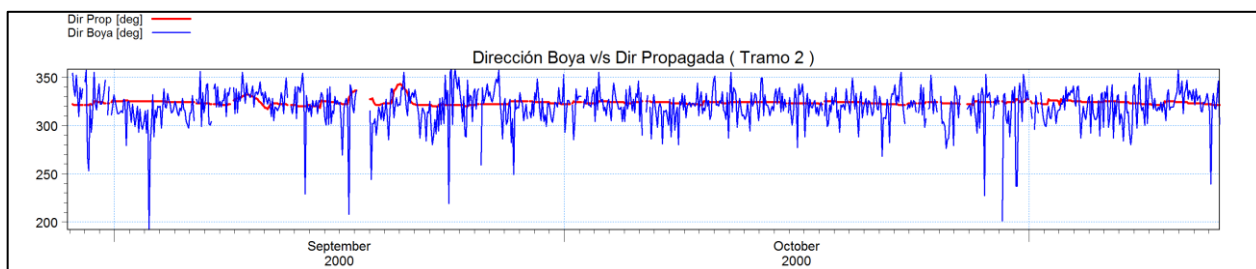
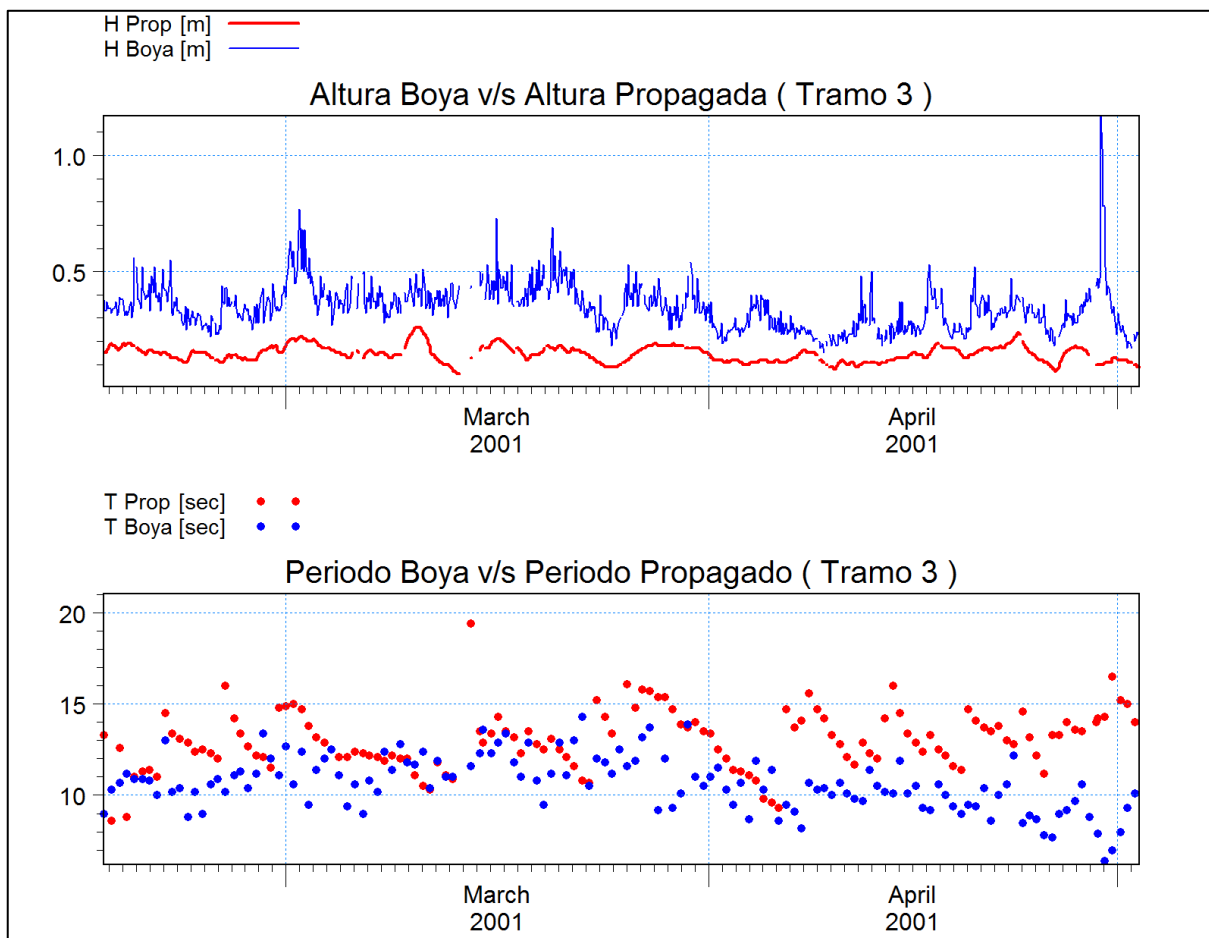
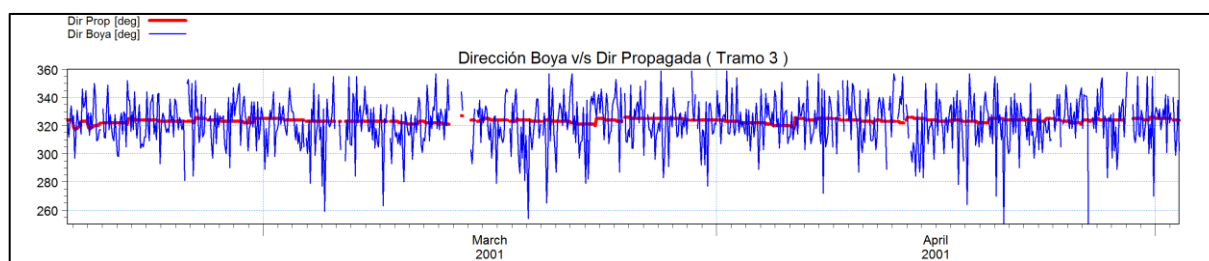


Figura 89: Serie de tiempo de direcciones propagadas SW vs Boya - Tramo 2.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 90: Serie de tiempo altura y periodo propagada SW vs Boya - Tramo 3.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 91: Serie de tiempo de direcciones propagadas SW vs Boya - Tramo 3.**  
Fuente: Elaboración propia.

Comentarios sobre las semejanzas y diferencias entre ajustes para cada tramo, se presentan a partir de la página 115, donde se ilustra la superposición de las series de tiempo de los 3 modelos versus la boya.

Terminada la transferencia de parámetros de resumen a través del modelo espectral, se continua con la propagación de oleaje en el módulo EMS, desde aguas intermedias hasta el punto de boya, mediante los coeficientes de agitación extraídos de los puntos de salida Sur/Norte (Tabla 22 del Anexo II), en las 9 mallas. A continuación se presenta el resultado de la Figura 92 que indica la simulación de oleaje para casos de incidencias SW-W-NW y N con periodo de 12 [s]. Para ver todos los modelos propagados se recomienda ver el Anexo II.

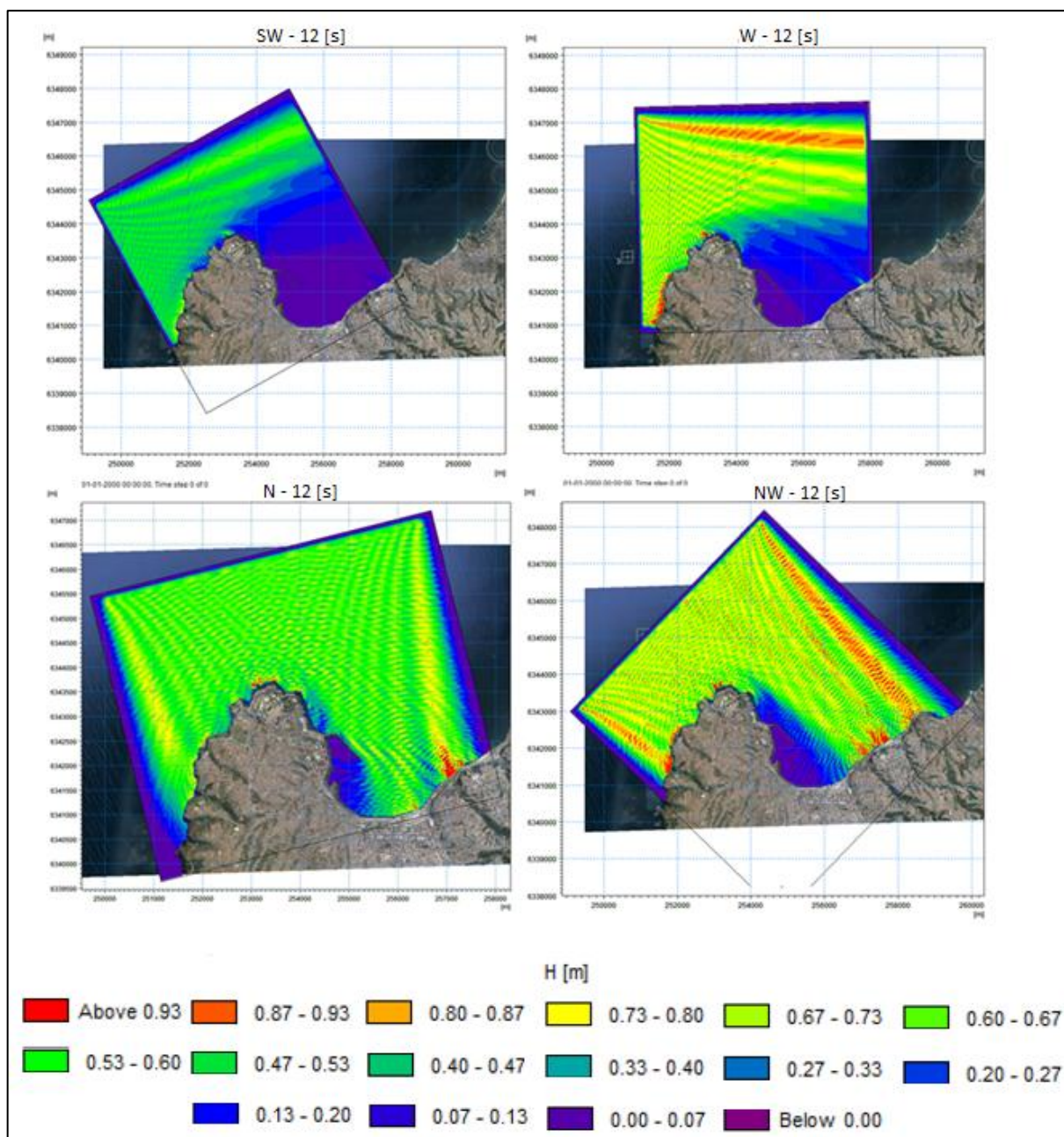
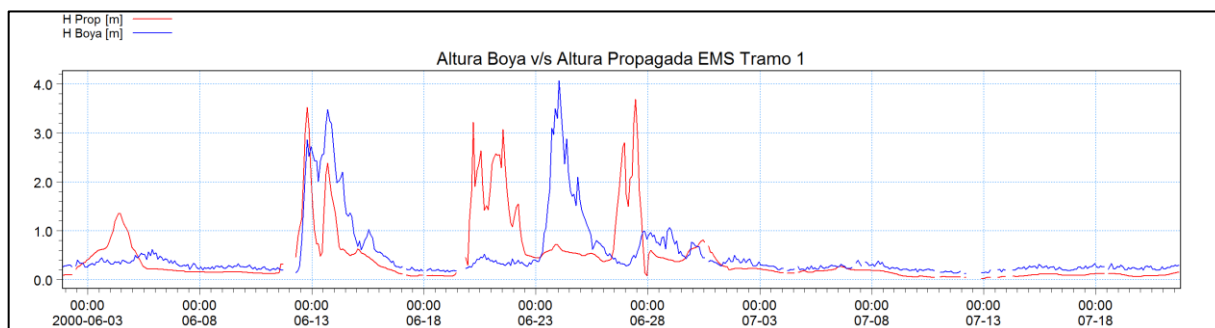
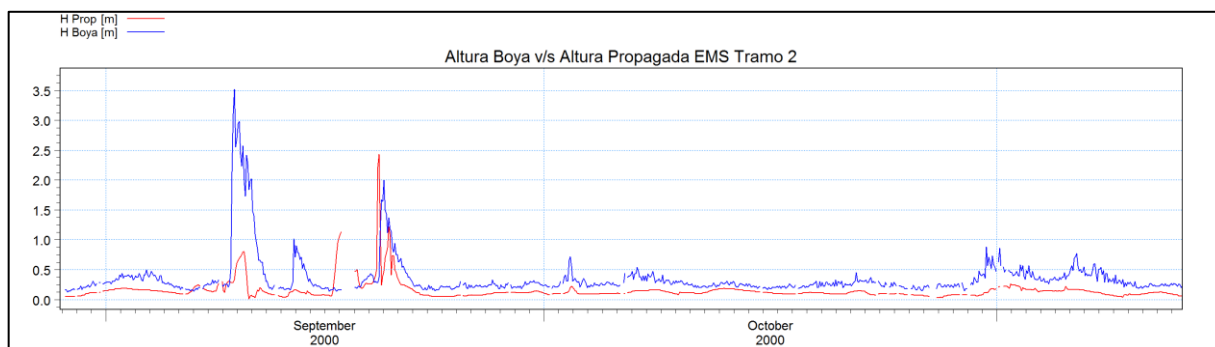


Figura 92: Resultados Elípticos para casos de dirección SW-W-N-NW. T = 12 [s].  
Fuente: Elaboración propia.

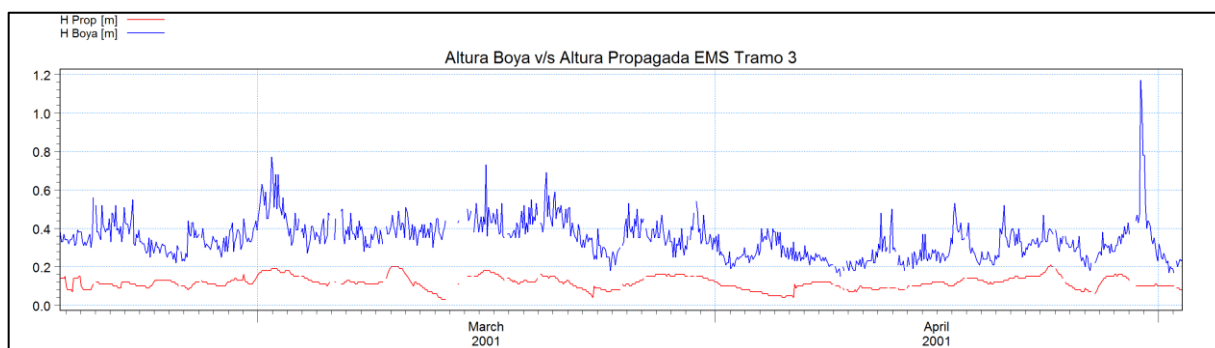
Una vez extraídos todas las alturas Hrms de la totalidad de los modelos elípticos (coeficientes de agitación) en el punto de la boya, y transformados en alturas significativas, mediante la distribución de Glukhovskiy, se realizó la transferencia de los parámetros de resumen desde aguas de profundidad intermedia hacia la boya obteniendo el ajuste para el tramo 1, 2 y 3 de las Figuras 93, 94 y 95.



**Figura 93: Serie de tiempo altura propagada EMS vs Boya - Tramo 1.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 94: Serie de tiempo altura propagada EMS vs Boya - Tramo 2.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 95: Serie de tiempo altura propagada EMS vs Boya - Tramo 3.**  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, utilizando las mismas salidas Sur/Norte (Tabla 22 del Anexo II) del modelo espectral y replicando la metodología usada en el caso EMS, se presenta a continuación los resultados del módulo PMS que ilustra la propagación de oleaje para los casos de incidencia SW, W, NW y N con periodo de 12 [s]. La totalidad de los modelos propagados del módulo parabólico se encuentran en el Anexo II.

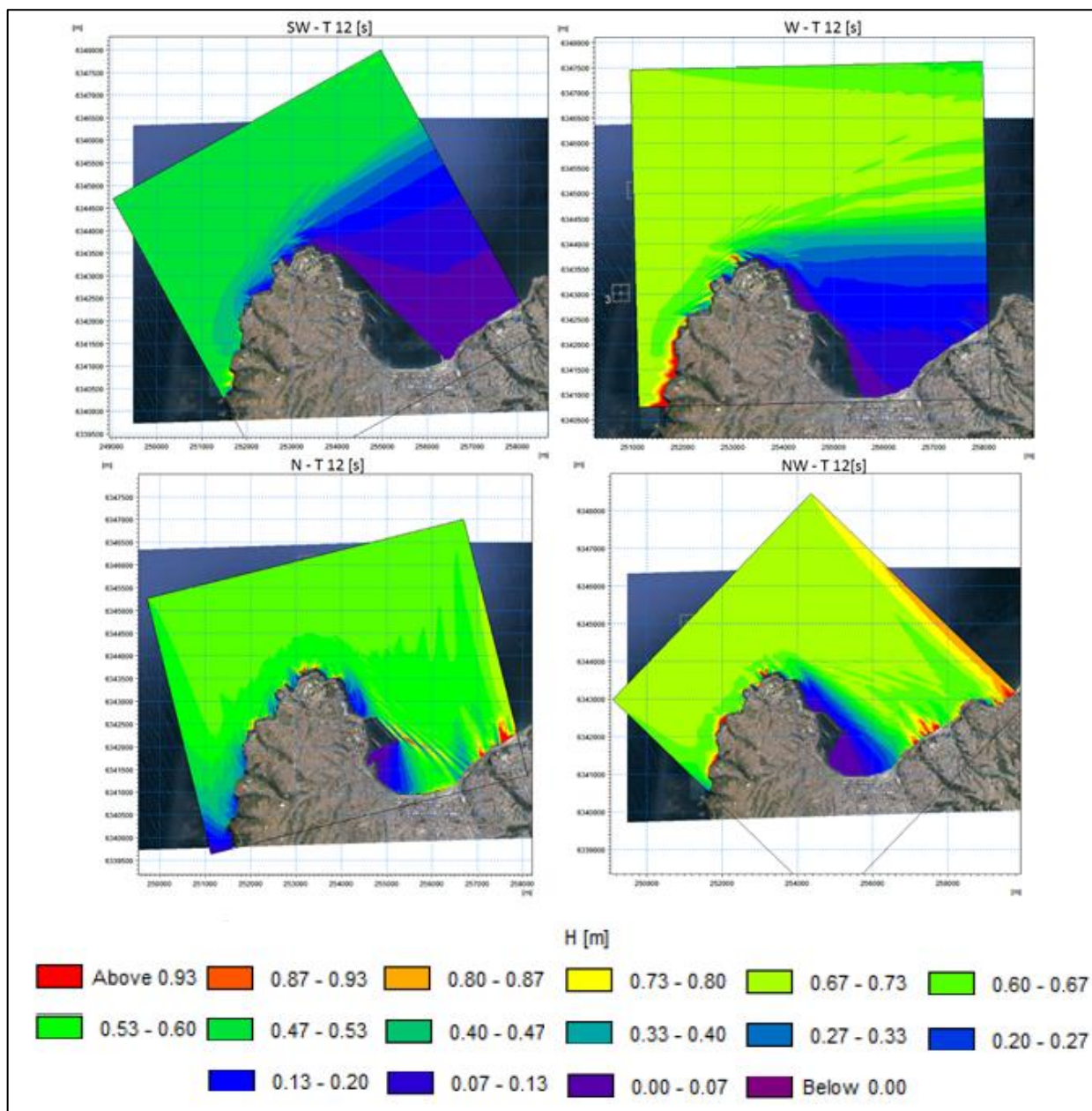
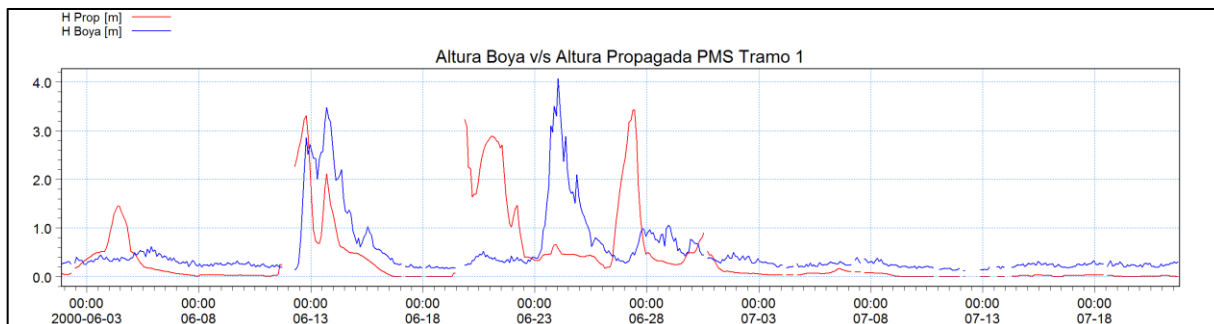


Figura 96: Resultados Parabólicos - casos de direcciones SW-W-N-NW con T = 12 [s].

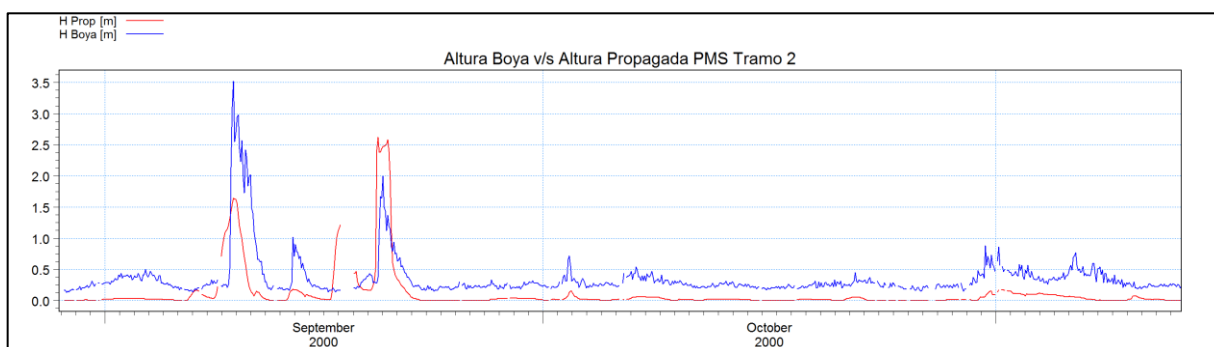
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, aplicando la misma metodología usada en el modelo EMS. Los resultados de ajuste para los tramos 1, 2 y 3 del módulo PMS son:



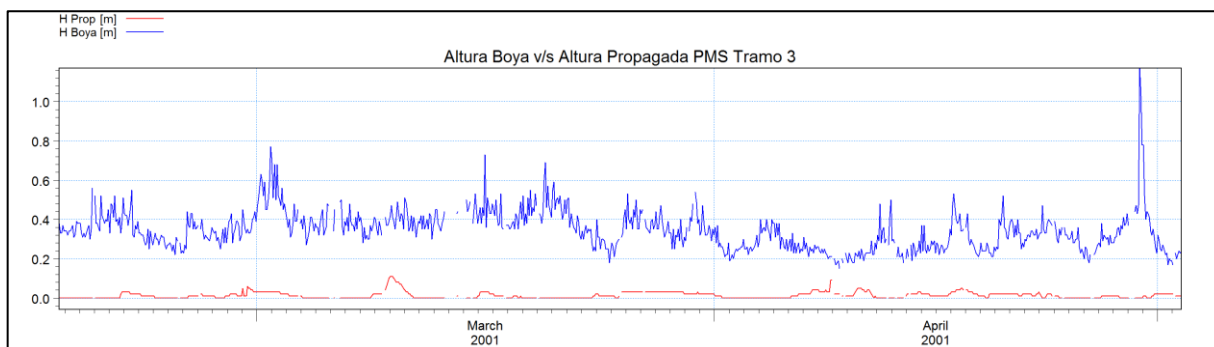
**Figura 97: Serie de tiempo altura propagada PMS vs Boya - Tramo 1.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 98: Serie de tiempo altura propagada PMS vs Boya - Tramo 2.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 99: Serie de tiempo altura propagada PMS vs Boya - Tramo 3.**

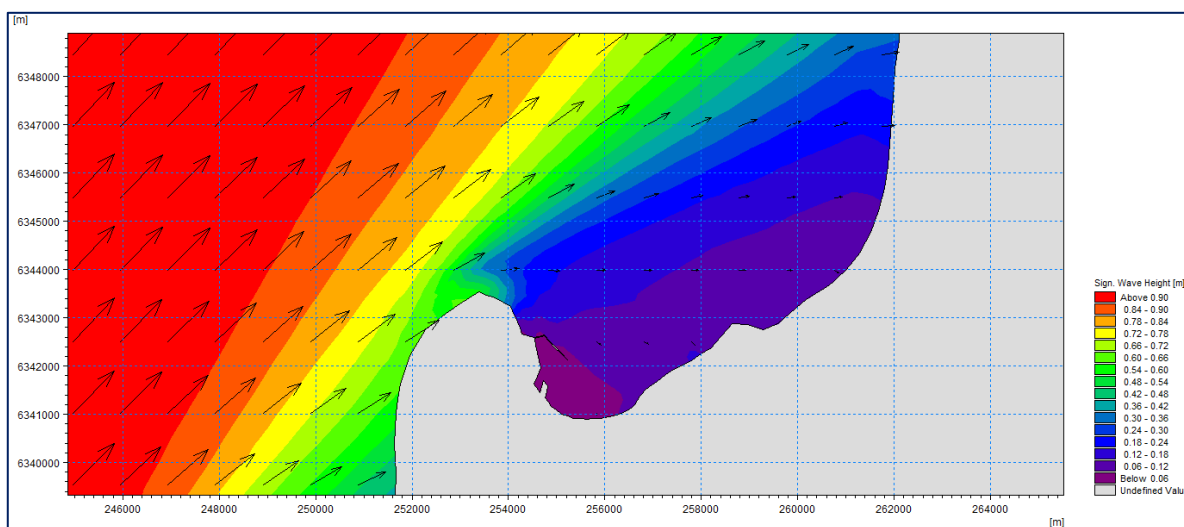
Fuente: Elaboración propia.

## **5.8 ANALISIS DE RESULTADOS EN BAHIA DE VALPARAISO**

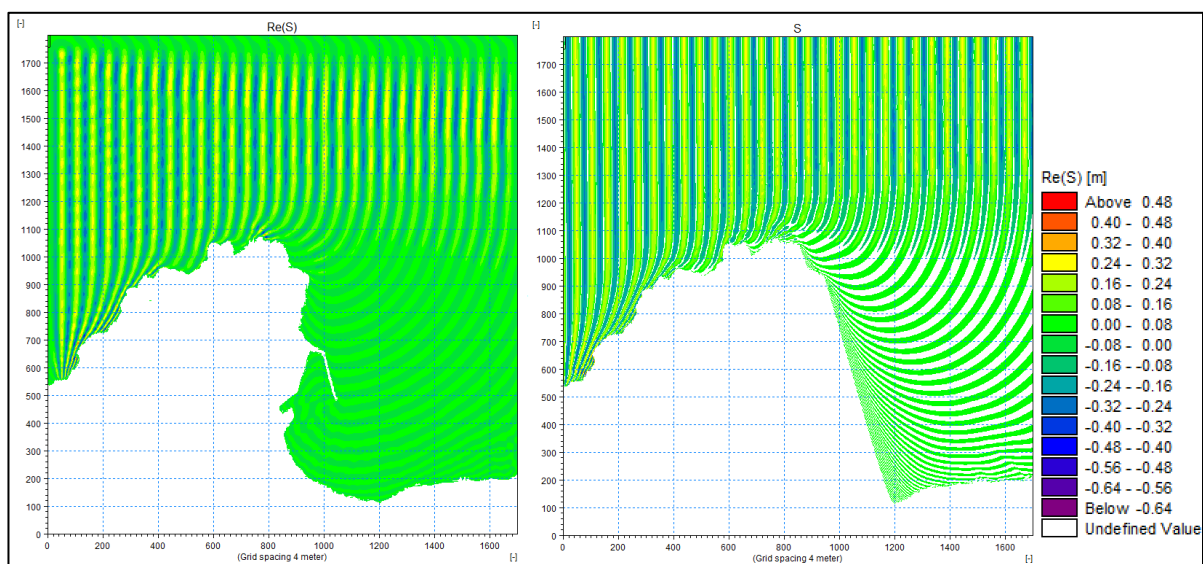
Los 3 modelos estudiados demostraron ser capaces de entregar valores de la distribución de alturas de olas propagadas, sobre un dominio real como la bahía de Valparaíso, cuya batimetría presenta discontinuidad e irregularidad en sus profundidades. Sin embargo, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Existen dos factores fundamentales en la modificación de las características del oleaje en su propagación hacia la costa: la refracción por fondo debido a las variaciones existentes en la batimetría, que se caracteriza por una ligera modificación de la altura de ola y dirección de propagación, y la refracción-difracción, causada por la presencia de Punta Ángeles, que afecta especialmente a los oleajes incidentes del SSW, SW, WSW, W y parcialmente al WNW, con importantes modificaciones de las alturas de ola y direcciones de propagación.
- Para los 3 modelos evaluados, el oleaje procedente del SW y SSW son los más afectados durante su propagación, obteniendo los menores coeficientes de agitación (es decir, la máxima pérdida de energía) y los mayores giros en su dirección, mientras que el oleaje incidente del N y NNW son menos afectados durante su propagación, obteniendo los mayores coeficientes y los menores giros en su dirección.
- Entre las diferentes direcciones de incidencia aplicada en los modelos, existe una clara graduación en la variación de los valores de las funciones de transferencia, y del giro del oleaje, de manera que los oleajes del 3er cuadrante están más afectados que los que provienen del 4to cuadrante. Esto debido a que las direcciones desde el S al W están influenciadas por la refracción-difracción de Punta Ángeles, mientras que las del norte lo están por la refracción del fondo.
- Pese a que los modelos parabólico y elíptico se puedan emplear en cualquier profundidad y que además cuenten con ecuaciones que definan mejor la difracción en comparación al espectral, éstos no entregan un ajuste completo. Una de las razones por la cual esto sucede, es porque la Bahía de Valparaíso tiene rápidas variaciones en su profundidad, presentando pendientes mayores a 1:3, lo cual induce a errores de simulación y por ende errores de arrastre durante la propagación.
- Los modelos EMS y PMS manifiestan un problema de convergencia a la hora de realizar simulaciones con periodos de oleaje bajo los 8[s], obligando a utilizar mayor número de iteraciones para llegar a una solución, incrementando los tiempos de espera.

Dentro de las primeras comparaciones que se pueden hacer, entre modelos, al momento de definir la difracción, se presenta en las Figuras 100 y 101 que ilustran la distribución del gradiente de energía detrás del molo de abrigo para un caso de dirección SW con periodo de 12 [s].



**Figura 100: Distribución de energía en la Bahía de Valparaíso. Mike 21SW. Dir SW y T=12 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 101: Elevación de superficie en modelos EMS (derecha) y PMS (izq.). Valparaíso.**  
Fuente: Elaboración propia.

Las figuras anteriores dan indicios claros de que la combinación refracción-difracción es representada de mejor manera por el módulo elíptico, quien genera una distribución de la energía por toda la bahía, incluyendo la poza de abrigo detrás del molo, mientras que el modelo parabólico y espectral presentan sombras numéricas en los sectores de la dársena debido a que sus esquemas numéricos para resolver las formulaciones matemáticas que las gobiernan, presentan limitaciones a la hora de definir los efectos de difracción.

Otra manera de representar las diferencias entre modelos simulados, es el cálculo del error relativo presente en cada módulo (ver Tabla 18). Para lograr esto, se realizaron gráficos de dispersión entre la altura de ola propagada versus el registro de la boya S4ADW considerando el periodo del tramo 2 de la Tabla 15.

Cabe señalar que el tramo 2 es quien presenta el mejor ajuste entre las series de tiempo modelada versus registrada por la boya. Lo anterior aplica para los resultados de los 3 modelos.

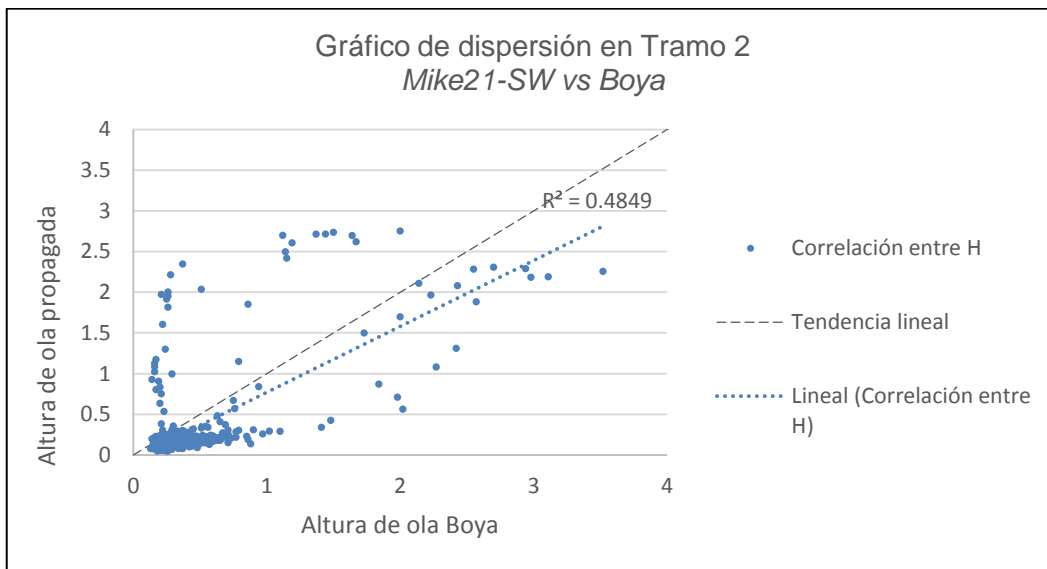


Figura 102: Gráfico de dispersión de alturas caso Valparaíso, Mike21-SW vs Boya.  
Fuente: Elaboración propia.

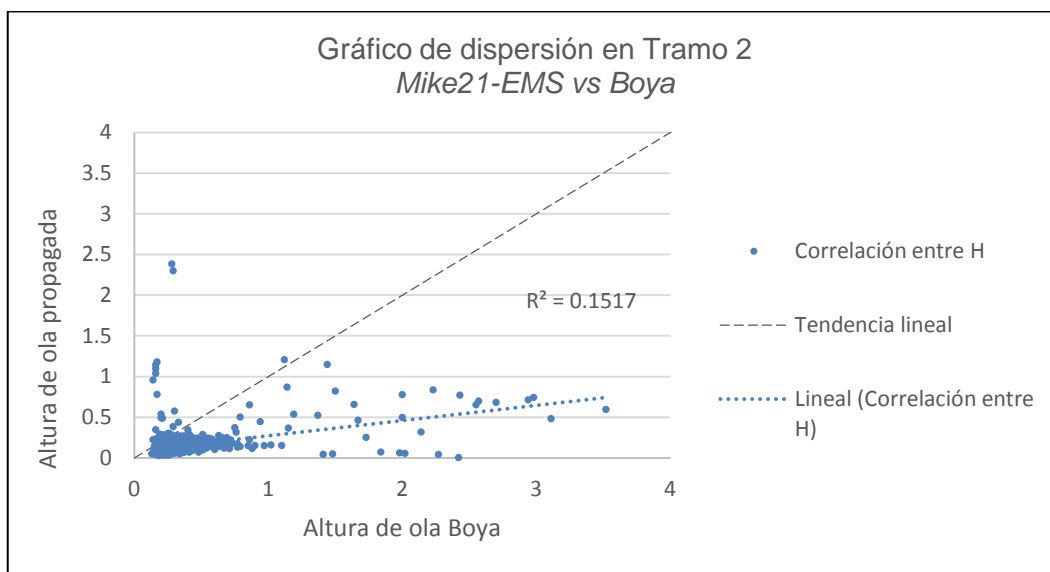


Figura 103: Gráfico de dispersión de alturas caso Valparaíso, Mike21-EMS vs Boya.  
Fuente: Elaboración propia.

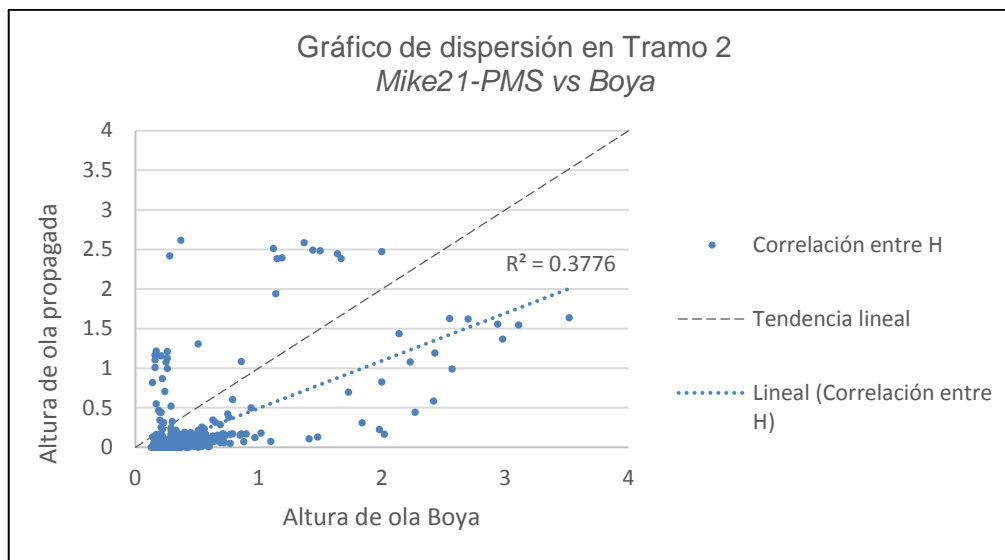


Figura 104: Gráfico de dispersión de alturas caso Valparaíso, Mike21-PMS vs Boya.

Fuente: Elaboración propia.

| Comparación entre modelos considerando el registro del Tramo 2 de la boya |                                    |                                   |                                    |                                   |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Mike21  | Coficiente Determinación ( $r^2$ ) | Coficiente Correlación Lineal (r) | Promedio Error [cm] Boya vs modelo | Promedio Error Relativo a la Boya |
| SW  | 48.4%                              | 0.70                              | 0.2                                | 57.10%                            |
| EMS   | 15.3%                              | 0.39                              | 0.228                              | 62.10%                            |
| PMS   | 37.2%                              | 0.61                              | 0.31                               | 94.93%                            |

Tabla 18: Comparación de correlación de alturas entre modelos vs boya- caso Valparaíso.

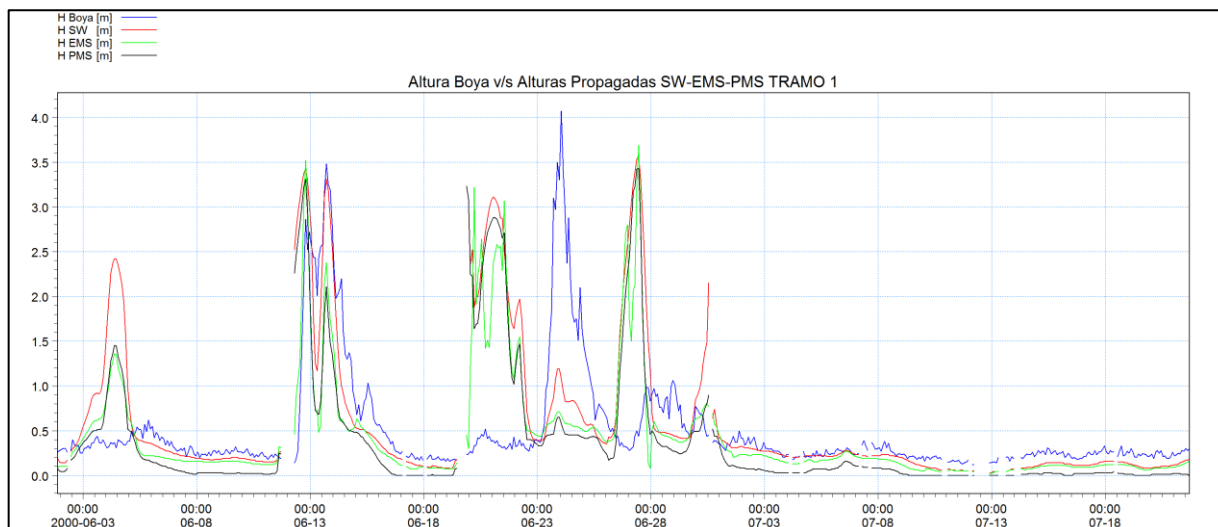
Fuente: Elaboración propia.

Para la interpretación de la Tabla 18, se debe tener en cuenta que la correlación lineal entre datos, no es un instrumento representativo para corroborar el ajuste exacto de los modelos, esto es debido a que la correlación mide el grado de asociación entre dos cantidades o variables de magnitud escalar, pero no mira el nivel de acuerdo o concordancia física que existe detrás de la propagación de oleaje. Sin embargo, es posible cuantificar el grado de asociación existente entre las variables de altura de ola en los 3 modelos.

La Tabla 18 ilustra que la correlación (r), en el caso SW, presenta la mejor asociación entre las alturas  $H_{sw}$  y  $H_{boya}$  con un coeficiente de 0.7, lo cual indica una relación lineal de tendencia positiva, entre variables, con un porcentaje de variabilidad del 48.4% de los datos, mientras que el modelo parabólico tiene un menor indicador porcentual con un ajuste del 37.2%, seguido por el módulo EMS con un 15.3%.

Lo anterior se contrapone con el resultado del error relativo, ya que éste indica que el modelo elíptico presenta un error promedio, entre las alturas de ola, de 22 [cm] y un error relativo del 62.1% del total, siendo éste mejor que el caso parabólico quien presenta un 94.93% de error relativo y 31[cm] de diferencia entre variables. Por otro lado, el modelo espectral no se ajusta satisfactoriamente (> 70%), pero es quien se asemeja más a la realidad de la boya con un 48.4%.

Finalmente, para una mejor visualización y contraste entre modelos, se presentan los ajustes de las series de tiempo de todos los tramos en las Figuras 105, 106 y 107.

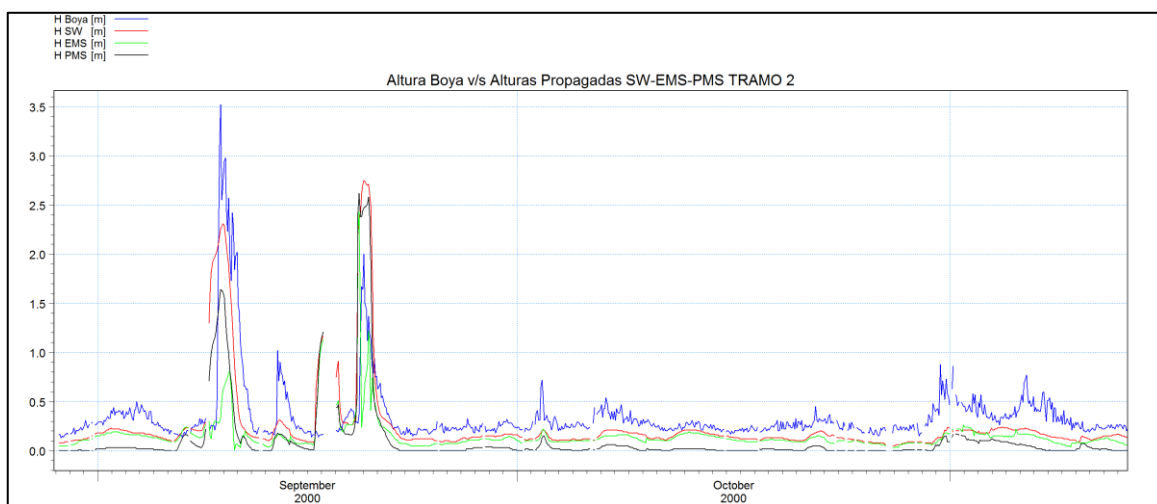


**Figura 105: Series de tiempo Mike21 -SW-EMS-PMS vs Boya para el tramo 1.**

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 105 indica una semejanza entre el modelo espectral y el registro de la boya en el segundo periodo del tramo 1, mientras que presenta diferencias en la mitad del registro correspondiente a la época de invierno del año 2000, cuya incidencia de oleaje en aguas profundas proviene generalmente del 3er cuadrante, pero con presencia de olas del 4to cuadrante (ver Anexo I), generando una combinación de frentes de olas que eventualmente no sería capaz de simular fidedignamente el modelo. Análogamente sucede lo mismo para los módulos EMS y PMS, mostrando diferencias que escapan de lo registrado para el segundo periodo de tiempo del tramo 1.

Cabe señalar que entre los 3 modelos, quien presenta menor diferencia de error es el modelo espectral, seguido por el EMS y finalmente el PMS. Esto último reafirma lo presentado por la Tabla 18.

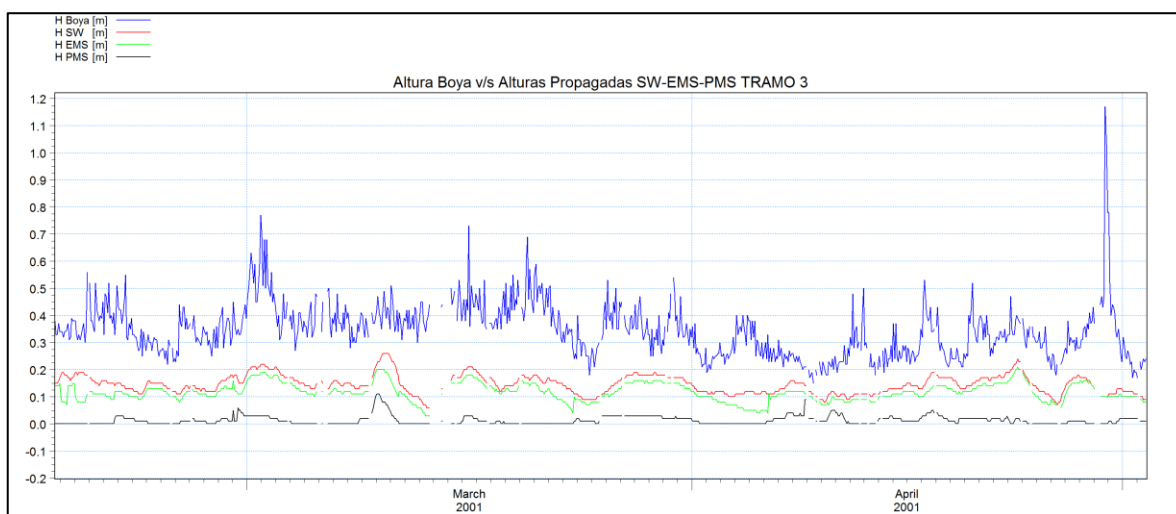


**Figura 106: Series de tiempo Mike21-SW-EMS-PMS vs Boya para el tramo 2.**

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para la comparación del tramo 2 (Figura 106), se puede decir que existe una buena semejanza en cuanto a distribución de alturas de oleaje entre la boya y modelo espectral, que se puede asociar al clima de oleaje reinante en ese periodo de tiempo, el cual proviene con incidencias de propagación desde el W al SW, presentando poca participación de frentes del 4to cuadrante y una baja influencia de tormentas locales favoreciendo un mejor registro por parte de la boya. Mientras que los modelos EMS y PMS si bien mantienen el mismo patrón de comportamiento, éstos tienden a estar por debajo de la curva espectral.

En cuanto a la Figura 107, éste presenta el ajuste más bajo, entre los 3 tramos de comparación, cuya diferencia se puede asociar a que la propagación efectuada desde aguas profundas hacia la costa, provienen entre las direcciones del SW y SSW, lo cual implica, que el fenómeno de transformación predominante durante la propagación es la difracción, lo que se traduce en una escasa representatividad por parte de la simulación con el modelo espectral.

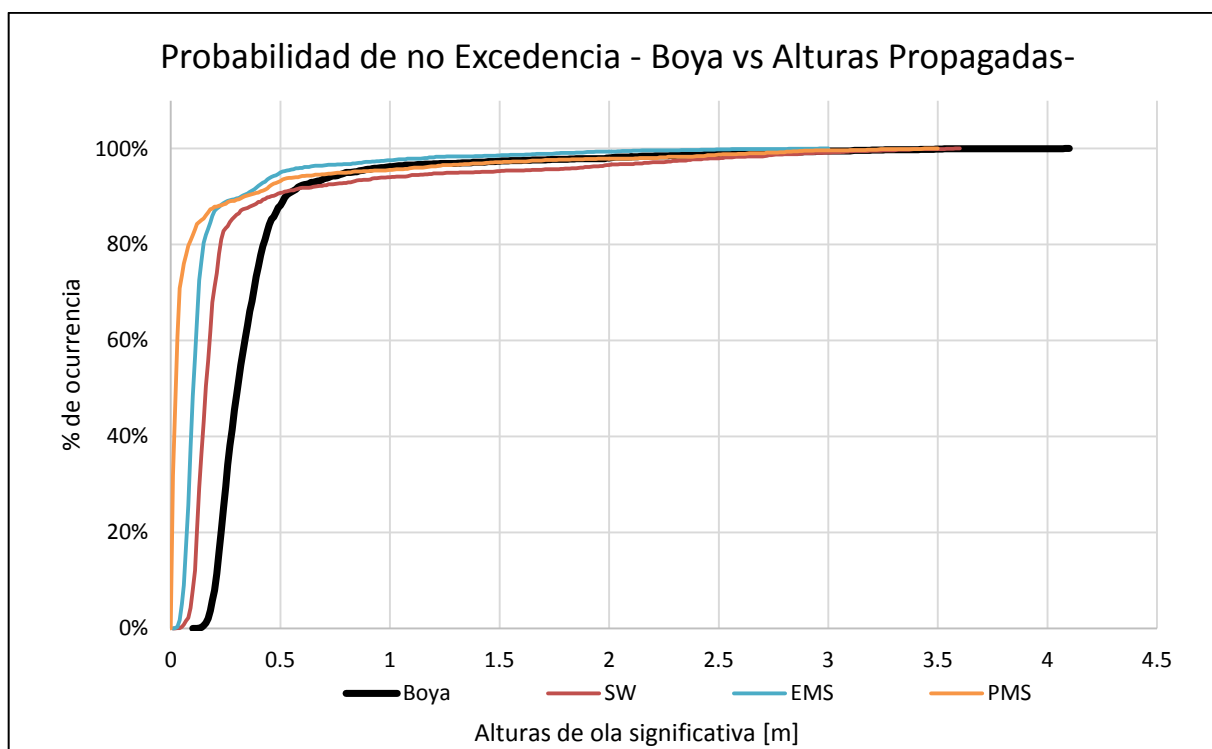


**Figura 107: Series de tiempo Mike21-SW-EMS-PMS vs Boya para el tramo 3.**

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para completar el análisis, se debe considerar lo mencionado en el acápite 5.2.2, donde se especifica que la boya contiene el registro de espectros de oleaje en aguas someras frente a Valparaíso, representando una descripción completa del oleaje local, mientras que las olas propagadas corresponden a parámetros de resumen de aguas profundas, que contienen un resumen de la energía de la ola en un estado de mar determinado. Por lo tanto, es preciso resaltar que no es de esperarse una similitud estrecha entre la boya y los modelos.

A continuación se presenta la probabilidad de no excedencia para cada modelo propagado, versus el registro de la boya ubicada frente a muelle Barón, a través de la siguiente figura:



**Figura 108: Probabilidad de no excedencia entre los modelos versus la boya S4ADW.**

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 108 ratifica lo señalado en la Tabla 18 y lo descrito en las series de tiempo anteriores, ya que la curva que más se acerca a los valores de las alturas de la Boya es la espectral, seguido del modelo elíptico y finalmente el parabólico.

## **6 CONCLUSIONES**

Referente a la metodología aplicada en casos idealizados se puede decir que:

- Las modelaciones en los casos benchmarks, destacan una buena definición de la difracción con el modulo elíptico y parabólico, generando gran similitud con los ábacos de Wiegel y Jhonson, sobresaliendo de mejor manera el primer modelo. Por otro lado, el modelo espectral presenta una descripción más pobre debido a las diferencias de sus ecuaciones de gobierno y a las limitantes propias de su configuración.
- El módulo PMS refleja limitaciones en la definición en transformaciones de refracción-difracción, cuando estos efectos son importantes, y en casos donde la ranura de entrada de olas es pequeña. En general, no se debe utilizar en los estudios donde la difracción es el fenómeno más importante de interés. Sin embargo este módulo representa de mejor manera dicha transformación que el modelo espectral (en los casos benchmarks), debido a que este calcula la desnivelación superficial de la ola utilizando un oleaje estacionario, monocromático y unidireccional. Mientras que el SW utiliza ecuaciones que resuelven la densidad espectral de la ola, propagando oleaje irregular en dirección cuasi-unidireccional. Se debe tener presente que el modelo parabólico tiende a linealizar los términos asociados al cálculo de la difracción, por lo que su aplicación está sujeta al objetivo de los estudios en los cuales se utilice.
- Para situaciones en donde se requiera evaluar la difracción en un dominio pequeño y en condiciones de aguas profundas, es recomendable aplicar el modelo elíptico. No así los modelos PMS y SW que tienen otras características de aplicación y resolución.

En cuanto a la metodología y resultados obtenidos en el caso aplicado se puede decir que:

- Debido a las distintas capacidades de los modelos utilizados en la simulación de un parámetro de oleaje, se pueden apreciar diferencias en sus resultados. Un modelo espectral como lo es Mike 21 SW, que promedia las fases, simula la energía en toda la frecuencia del espectro, como también el ancho direccional, mientras que el Mike 21 (EMS y PMS) resuelven la fase de la onda, presentando la desventaja de solo poder utilizarse en pendientes bajas, y no simula de modo correcto un espectro debido a que computa oleaje monocromático unidireccional.
- Los resultados y análisis presentados reflejan un comportamiento esperado en cuanto a la escasa definición de la difracción para las aproximaciones parabólicas y elípticas, ya que la bahía de Valparaíso presenta cambios bruscos en su batimetría frente a Punta Ángeles, forzando a errores de estabilidad y convergencia en las zonas aledañas al molo. Sin embargo, el módulo EMS resulta ser una herramienta potente a la hora de definir el patrón de distribución de los frentes de ola, ya que entrega información relevante para encontrar zonas de abrigo. No así el módulo PMS, puesto a que está diseñado para aplicación de playas largas y no a sectores confinados como la Bahía de Valparaíso, donde la presencia de Punta Ángeles

induce la aparición de zonas de sombra numérica que son producto de las limitaciones propias de la resolución de su esquema numérico.

- También se puede inducir que la aplicación de los 3 modelos aplicado al caso práctico, ha destacado la capacidad del EMS para definir la difracción y debilidad del SW y PMS. Sin embargo, este estudio sugiere que el modelo espectral tiene ventaja por sobre los módulos gobernados por la MSE, puesto a que la configuración geográfica evaluada no se acomoda a la ecuación de pendiente suave debido a las fuertes pendientes del fondo que conforman la bahía.
- Finalmente, es preciso indicar que la comparación entre los modelos y la boya difieren en cuanto al lenguaje de olas que los caracteriza, ya que la boya contiene el registro de espectros de oleaje, mientras que los datos de aguas profundas se compone por parámetros de resumen extraídos de espectros. Por lo tanto, al utilizar el método de propagación de parámetros de resumen, se considera una transferencia completa de la energía espectral, por lo que la simulación no representa espectros bi o multimodal, los cuales son frecuentes en zonas de aguas profundas frente a Valparaíso y que están presentes en el registro de la boya. Por ende, no es de esperar una correlación afinada entre las mediciones y las simulaciones realizadas con los modelos empleados, ya que los módulos EMS y PMS solo sirven para entregar un patrón de la distribución de la energía. Sin embargo, queda la incógnita sobre la definición y comportamiento de los 3 modelos aplicados en una playa larga, ya que podrían entregar variaciones significativas en los resultados.

## **7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Army, U. (1984). *Costal Engineering Research Center. 4ta Ed. Shore Protection Manual*, Costal Engineering Research Center. 4ta Ed.
- Battjes, J. A. (1994). *Shallow water wave modelling*. Proceedings of the International Symposium on Waves-Physical and Numerical Modelling, Vol.I, pp.1-23.
- Berkhoff, J. (1976). *Mathematical models for simple harmonic linear water waves; wave refraction and diffraction*. PhD thesis, Delft Technical University of Technology.
- Berkhoff, J. W. (1972). *Computation of combined refraction and diffraction*. Proceedings of the 13th International Coastal Engineering Conference, ASCE, 471-490.
- Bolaños, R. (2004). *Tormentas de oleaje en el Mediterraneo: Física y Predicción*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Casarín, R. S. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Serie Docencia ISBN 970-32-0710-3 , Instituto de Ingenieria UNAM ISBN 970-32-2813-5.
- CFE. (1983). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia, hidráulica Marítima*. México, Ed. Mexicana.: Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Electricas.
- Dalrymple., R. G. (1984). *waer wave mechanics for engineers and scientists*. Prentice Hall, Inc.
- DHI. (s.f.). <http://www.mikebydhi.es/>. Recuperado el 5 de mayo de 2013, de <http://www.mikebydhi.es/Products/CoastAndSea/MIKE21/Waves.aspx>
- Engineers, U. A. (2003). *Coastal Engineering Manual*. Volumen II, chapter 1. Volumen III, chapter 1,2 and 3,.
- Engineers, U. S. (1984). *Shore Protection Manual*. Volumen I and II.
- Frigaard, Z. L. (2001). *Generation and Analysis of Random Waves*. Instituttet for Vand, Jord og Miljøtcknik- Aalborg Universitet.
- G.I.O.C. (2000a). *Documento de Referencia V1 - Dinámicas*. España: Grupo de Ingeniería Oceanografica y de Costas, Universidad de Cantabria.
- Guisado, E., Malvárez, G., & Navas., F. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG*. Sevilla: Universidad de sevilla. Pp.861-872. ISBN: 978-84-472-1294-1.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. nEW yORK: Delft University of Technology and UNESCO -IHE - Cambridge UNIVERSITY PRESS The edinburgh building, cambridge CB2 8RU, UK.

- Iñigo J. Losada, P. L. (2000b). *Modelos Matemáticos y Numéricos para el Estudio de la Agitación Portuaria*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- J.Larsen, P. M. (1987). *An Efficient Finite- Difference Approach to the Mild-Slope Equation*. Amsterdam- Printed in the Netherlands: Coastal Engineering, 11 329.251 Elsevier Science Publishers B.V.
- Kinsman, B. (1965). *Wind Waves, Their generation and propagation on the ocean surface*. Toronto: Englewood Cliffs, N.J : Prentice-Hall, ISBN 0-486-49511-6.
- Liu, I. J.Philip (2000). *El modelado matematico de la propagacion del oleaje en ingenieria de costas*. Cantabria- España: Ingeniería del Agua. Vol. 7 N°1 .
- López Gutierrez, J. S. (2004). *Analisis de sensibilidad de observaciones visuales de oleaje en zonas de escasez de datos instrumentales*. Madrid: Tesis Doctoral, Tomo I. Universidad Politecnica de Madrid; E.T.S. Ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Massel, S. (1996). *Ocean Surface Waves: Their physics and Predictions*. Advanced Series On Ocean Engineering, Volume 11 Edit. World Scientific, 491 pp.
- McCormick, M. (2007). *Ocean Wave Energy Conversion*. Mineola: Dover.
- Monbaliu, J. P.-H. (2000). *The spectral wave model, WAM adapted for applications with high spatial resolution*. Coastal Engineering, 41, pp. 41-62.
- Munk, W. (1951). Origin and Generation of Waves. *First Conference on Coastal Engineering*. Berkeley: University of California.
- Reyes, E. R. (1977). *Climatología e Interacción Océano-Atmósfera en la Bahía de Valparaíso*. Valparaíso: Rev. Biología Marina. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Chile.
- Ris, R. (1997). *Spectral modelling of wind waves in coastal areas*. The Netherlands. 160 p.: (Ph.D. Dissertation Delft University of Technology, Department of Civil Engineering), Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, Delft University of Technology.
- Rosales. (2005). *Transmisión del oleaje irregular en rompeolas superficiales permeables a talud*. México D.F: Tesis de maestría en Ciencias, Instituto Politécnico nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U.Z.
- Svendsen, I. A. (2006). *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*. Singapore: University of Delaware, USA. Advanced series on ocean Engineering - Volume 24 World Scientific publishing Co. Pte. Ltd.
- Villaverde, M. (2009). *Ingeniería Marítima y Costas*. Madrid: Nautilus.
- Wiegel, R. (1964). *oceanographic Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs*.
- Winckler, P. (2009). Apuntes del curso Mecánica de olas (COI 414). Viña del Mar, Chile: Universidad de Valparaíso.

- Winckler, P. (2012). *Non Linear Wave Theories*. Department of Civil and Environmental Engineering, Cornell University.
- Wright L.D, C. J. (1973). *Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes*. .Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull 57(2), 370-398.

## **8 ANEXOS**

## 8.1 ANEXO I

### 8.1.1 ANÁLISIS DE CLIMA MEDIO PARA AGUAS PROFUNDAS.

#### 8.1.1.1 TABLAS DE INCIDENCIA

Para su creación se definen rangos de periodo, altura y dirección para poder generar mediante la programación de macros las 3 tablas de incidencia existentes. Estas tablas son:

- Altura - Periodo
- Periodo - Dirección
- Altura – Dirección

Estas tablas básicamente contienen la información estadística necesaria, entre las fechas presentadas en la Tabla 15, para entender el estado de mar característico en función de la altura, periodo y dirección. Las tablas de incidencia, en lo concreto, entregan la cantidad de veces que ocurre un suceso en específico, asociado a los parámetros de las tablas. Los datos utilizados para hacer este análisis corresponden a la data del modelo Olas-Chile II que fue proporcionada por la Universidad de Valparaíso.

Para el caso del rango de alturas, se establece un delta H de 0.5 [m], donde la altura máxima en aguas profundas registrada en la data corresponde a 5.82 [m] y la mínima de 1 [m].

Para el caso del periodo, se utiliza la misma hipótesis anterior, en base a un periodo máximo de 19.72 [s] y un mínimo de 6.14 [s]. El valor de delta T corresponde a 2 [s].

Para los valores asociados a las direcciones, se considera la hipótesis en la que el oleaje incidente en las costas chilenas, proviene entre las coordenadas Sur y Norte.

Los resultados del análisis de clima medio son presentados en el siguiente ítem.

A continuación se presentan las tablas resultantes para la caracterización del clima medio para aguas profundas en términos porcentuales.

|     |         | Dirección |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     |         | S         | SSW    | SW     | WSW    | W      | WNW    | NW     | NNW    | N      |        |
|     |         | 168.75    | 191.25 | 213.75 | 236.25 | 258.75 | 281.25 | 303.75 | 326.25 | 348.75 |        |
|     |         | 191.25    | 213.75 | 236.25 | 258.75 | 281.25 | 303.75 | 326.25 | 348.75 | 11.25  |        |
| Hmo | 1 - 1.5 | 0.04%     | 0.21%  | 1.58%  | 0.91%  | 0.33%  |        | 0.08%  | 0.17%  |        | 3.32%  |
|     | 1.5 - 2 | 0.17%     | 2.28%  | 10.51% | 2.24%  | 1.29%  | 0.08%  | 0.08%  | 0.08%  |        | 16.74% |
|     | 2 - 2.5 | 0.29%     | 2.57%  | 23.17% | 3.07%  | 0.54%  |        | 0.08%  |        |        | 29.73% |
|     | 2.5 - 3 |           | 1.58%  | 10.80% | 2.82%  | 0.54%  | 0.21%  | 0.25%  | 0.21%  | 0.04%  | 16.45% |
|     | 3 - 3.5 |           | 1.74%  | 9.59%  | 0.33%  | 0.71%  | 0.42%  | 1.16%  | 0.46%  | 0.25%  | 14.66% |
|     | 3.5 - 4 |           | 2.08%  | 5.40%  | 0.37%  | 0.75%  | 1.25%  | 0.12%  | 0.33%  | 0.21%  | 10.51% |
|     | 4 - 4.5 |           | 1.25%  | 2.12%  | 0.96%  | 0.46%  | 0.96%  | 0.62%  | 0.29%  |        | 6.64%  |
|     | 4.5 - 5 |           | 0.08%  | 0.25%  | 0.66%  | 0.25%  | 0.08%  | 0.12%  |        |        | 1.45%  |
|     | > 5     |           | 0.37%  |        |        |        | 0.12%  |        |        | 0.50%  |        |
|     |         | 0.50%     | 12.17% | 63.41% | 11.38% | 4.86%  | 2.99%  | 2.66%  | 1.54%  | 0.50%  | 100%   |

**Tabla 19: Tabla de Incidencia Porcentual Altura - Dirección.**

Fuente: Elaboración propia.

|    |       | Dirección |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    |       | S         | SSW    | SW     | WSW    | W      | WNW    | NW     | NNW    | N      |        |
| Tp | 6-8   | 168.75    | 191.25 | 213.75 | 236.25 | 258.75 | 281.25 | 303.75 | 326.25 | 348.75 | 3.61%  |
|    | 8-10  | 191.25    | 213.75 | 236.25 | 258.75 | 281.25 | 303.75 | 326.25 | 348.75 | 11.25  | 3.24%  |
|    | 10-12 |           | 0.42%  | 0.12%  |        | 0.21%  | 0.29%  | 1.08%  | 1.00%  | 0.50%  | 25.37% |
|    | 12-14 |           | 0.37%  | 1.54%  | 0.21%  | 0.58%  | 0.33%  | 0.21%  |        |        | 46.89% |
|    | 14-16 |           | 2.33%  | 14.66% | 5.02%  | 1.79%  | 1.00%  | 0.25%  | 0.33%  |        | 18.11% |
|    | 16-18 | 0.25%     | 6.15%  | 32.31% | 4.53%  | 1.70%  | 1.33%  | 0.79%  | 0.08%  |        | 2.53%  |
|    | 18-20 | 0.25%     | 2.74%  | 13.66% | 1.08%  | 0.25%  |        | 0.08%  | 0.04%  |        | 0.25%  |
|    | 20-25 |           | 0.08%  | 1.12%  | 0.42%  | 0.29%  | 0.04%  | 0.25%  | 0.08%  |        | 0.00%  |
|    | 25-30 |           | 0.08%  |        | 0.12%  | 0.04%  |        |        |        |        | 100%   |
|    |       |           | 0.50%  | 12.17% | 63.41% | 11.38% | 4.86%  | 2.99%  | 2.66%  | 1.54%  | 0.50%  |

**Tabla 20: Tabla de Incidencia Porcentual Periodo - Dirección.**

Fuente: Elaboración propia.

|     |         | Tp    |       |       |        |        |        |       |       |        |
|-----|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
|     |         | 6     | 8     | 10    | 12     | 14     | 16     | 18    | 20    |        |
| Hmo | 1 - 1.5 |       |       | 1.12% | 1.83%  | 0.12%  | 0.08%  | 0.17% |       | 3.32%  |
|     | 1.5 - 2 |       | 1.16% | 5.65% | 5.94%  | 3.11%  | 0.87%  |       |       | 16.74% |
|     | 2 - 2.5 | 0.21% | 1.00% | 9.88% | 12.00% | 5.86%  | 0.75%  | 0.04% |       | 29.73% |
|     | 2.5 - 3 | 0.66% | 0.08% | 5.07% | 8.31%  | 2.16%  | 0.12%  | 0.04% |       | 16.45% |
|     | 3 - 3.5 | 1.50% | 0.04% | 1.54% | 7.85%  | 3.41%  | 0.33%  |       |       | 14.66% |
|     | 3.5 - 4 | 0.58% | 0.33% | 1.54% | 5.77%  | 2.03%  | 0.25%  |       |       | 10.51% |
|     | 4 - 4.5 | 0.62% | 0.33% | 0.50% | 4.03%  | 1.04%  | 0.12%  |       |       | 6.64%  |
|     | 4.5 - 5 | 0.04% | 0.17% | 0.08% | 1.16%  |        |        |       |       | 1.45%  |
|     | 5 - 6   |       | 0.12% |       |        | 0.37%  |        |       |       | 0.50%  |
|     |         |       | 3.61% | 3.24% | 25.37% | 46.89% | 18.11% | 2.53% | 0.25% | 0.00%  |

**Tabla 21: Tabla de Incidencia Porcentual Altura - Periodo.**

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 19 se puede observar que la dirección relevante es la SW, lo cual es coherente ya que el oleaje reinante para la región de Valparaíso es la SW. Por otro lado, se aprecia que el oleaje proveniente del Norte está asociado a swells provenientes del Hemisferio Norte debido a las tormentas.

Respecto a las Tablas 20, y 21 la tendencia en aguas profundas de mayor incidencia es el oleaje con alturas entre 2 [m] – 3 [m] con periodos de entre 10 [s] -14 [s] cuyas bandas direccionales de mayor incidencia son del tercer cuadrante, SW (63.41%), seguido por direcciones del WSW (11.38%) y SSW (12.17%).

Este análisis permite identificar lo relevante que es definir el oleaje en la zona de Punta Ángeles, ya que el 92.32% del total de los casos de oleaje provienen con incidencia del tercer cuadrante, lo cual indica que la Bahía de Valparaíso está fuertemente dominada por la difracción.

### 8.1.1.2 ROSAS DE OLAJE

Para poder visualizar de mejor manera la incidencia de las ondas, se presenta a continuación las rosas de oleaje para cada tramo, representando las alturas predominantes en función de la dirección y periodo en cada periodo de evaluación. Estas muestran gráficamente la distribución de alturas en metros y periodos en segundos.

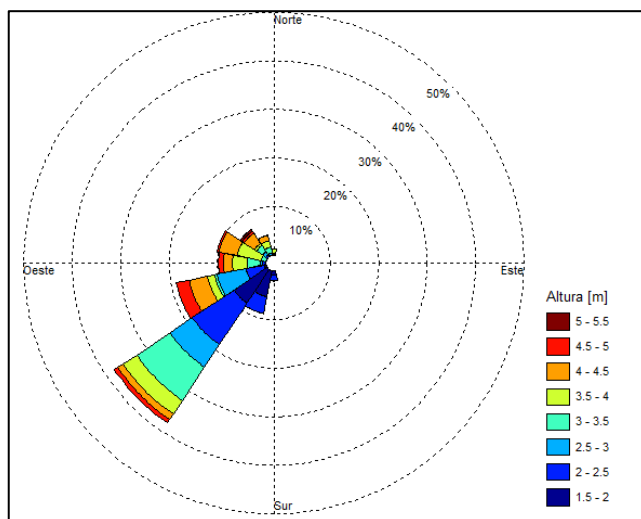


Gráfico 1: Rosa de oleaje Altura – Dirección para el Tramo 1.

Fuente: Elaboración propia.

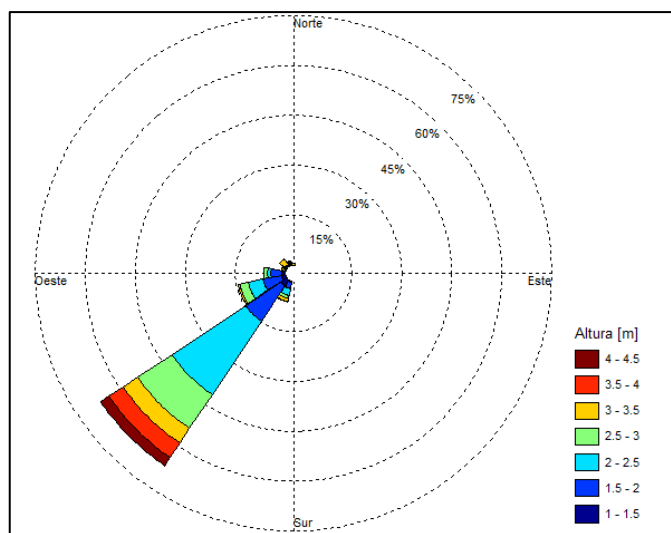
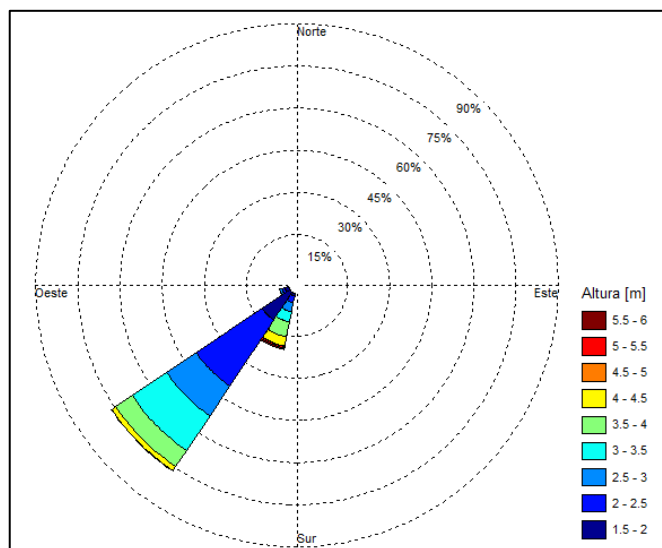


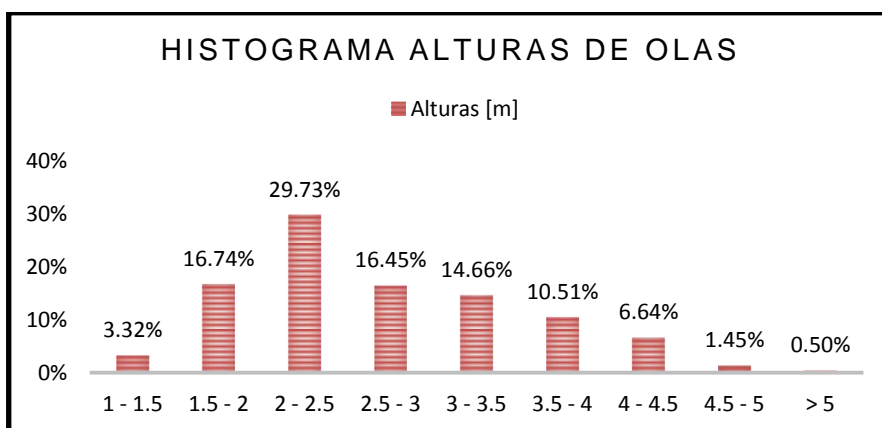
Gráfico 2: Rosa de oleaje Altura – Dirección para el Tramo 2.

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 3: Rosa de oleaje Altura -Dirección para el Tramo 3.**

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 4: Histograma de Alturas de olas.**

Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 5: Histograma de Dirección Peak.**

Fuente: Elaboración propia.

Para reafirmar lo anterior señalado se puede observar en el Gráfico 5 que el gran porcentaje de olas provienen de la dirección SW con una altura de ola que va entre los 1.5 [m] y 3.5 [m] aproximadamente (Gráfico 4), confirmando la información de las tablas de incidencia. Por otro lado, las rosas de oleaje difieren en cada tramo, indicando para el tramo 1 que la incidencia proviene generalmente del tercer cuadrante, pero con presencia de olas del segundo cuadrante. Mientras que para el tramo 2 existe un oleaje reinante entre el WSW y SW, y tramo 3 con ocurrencia entre SW y SSW.

Lo anterior tiene relevancia a la hora de analizar el ajuste de correlación existente entre los resultados simulados por cada modelo vs los datos medidos en cada tramo por la boya.

### 8.1.2 ROSAS DE OLEAJE EN LA BOYA

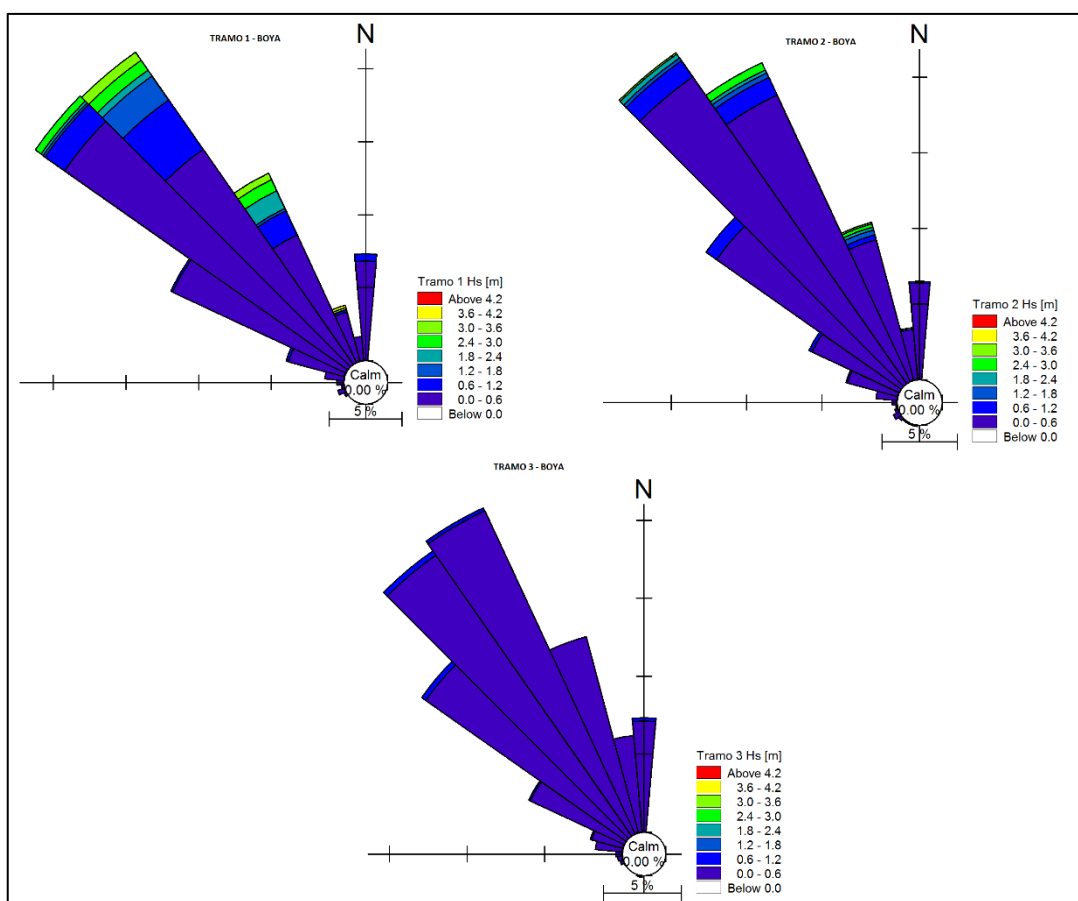


Figura 109: Rosas de oleaje para los 3 tramos en la boya.

## 8.2 ANEXO II

### 8.2.1 COEFICIENTES DE AGITACIÓN COMBINACIÓN SUR/NORTE

| PERIODOS OLAJE [s] |       | DIRECCIONES OLAJE [°] |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  | Rangos |
|--------------------|-------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------|
|                    |       | [168.75 - 191.25[     | [191.25 - 213.75[ | [213.75 - 236.25[ | [236,25 - 258,75[ | [258,75 - 281.25[ | [281.25 - 303.75[ | [303.75 - 326.25[ | [326.25 - 348.75[ | [348.75 - 11.25[ |        |
| Rangos             | Marca | S                     | SSW               | SW                | WSW               | W                 | WNW               | NW                | NNW               | N                | Marca  |
| [5 - 7[            | 6     | 0,14                  | 0,40              | 0,72              | 0,94              | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 0,97              | 0,90             |        |
| [7 - 9[            | 8     | 0,15                  | 0,40              | 0,72              | 0,94              | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 0,97              | 0,90             |        |
| [9 - 11[           | 10    | 0,09                  | 0,34              | 0,72              | 0,95              | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 0,98              | 0,88             |        |
| [11 - 13[          | 12    | 0,12                  | 0,36              | 0,71              | 0,93              | 1,00              | 1,00              | 1,00              | 0,98              | 0,86             |        |
| [13 - 15[          | 14    | 0,23                  | 0,43              | 0,67              | 0,88              | 0,98              | 0,99              | 0,99              | 0,97              | 0,84             |        |
| [15 - 17[          | 16    | 0,31                  | 0,44              | 0,64              | 0,83              | 0,95              | 0,96              | 0,97              | 0,94              | 0,80             |        |
| [17 - 19[          | 18    | 0,32                  | 0,42              | 0,63              | 0,79              | 0,90              | 0,95              | 0,96              | 0,91              | 0,73             |        |
| [19 - 21[          | 20    | 0,29                  | 0,42              | 0,64              | 0,77              | 0,86              | 0,94              | 0,94              | 0,89              | 0,69             |        |
| > 21               | 22    | 0,27                  | 0,45              | 0,65              | 0,77              | 0,83              | 0,94              | 0,93              | 0,88              | 0,66             |        |

Tabla 22: Coeficientes de agitación -combinación sur/norte- obtenidos del modelo SW para input de módulos EMS y PMS .Fuente: Elaboración propia.

| PERIODOS OLAJE [s] |       | DIRECCIONES OLAJE [°] |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  | Rangos |
|--------------------|-------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------|
|                    |       | [168.75 - 191.25[     | [191.25 - 213.75[ | [213.75 - 236.25[ | [236,25 - 258,75[ | [258,75 - 281.25[ | [281.25 - 303.75[ | [303.75 - 326.25[ | [326.25 - 348.75[ | [348.75 - 11.25[ |        |
| Rangos             | Marca | S                     | SSW               | SW                | WSW               | W                 | WNW               | NW                | NNW               | N                | Marca  |
| [5 - 7[            | 6     | 226,571               | 231,674           | 238,96            | 251,192           | 269,76            | 292,178           | 314,33            | 332,639           | 343,853          |        |
| [7 - 9[            | 8     | 226,584               | 231,681           | 238,972           | 251,205           | 269,762           | 292,153           | 314,329           | 332,64            | 343,856          |        |
| [9 - 11[           | 10    | 224,632               | 229,159           | 236,463           | 249,76            | 269,65            | 292,14            | 314,638           | 334,552           | 346,433          |        |
| [11 - 13[          | 12    | 226,142               | 228,631           | 235,78            | 250,022           | 269,677           | 292,137           | 314,685           | 335,532           | 347,988          |        |
| [13 - 15[          | 14    | 229,295               | 230,847           | 237,917           | 251,916           | 269,934           | 292,165           | 314,591           | 335,567           | 348,251          |        |
| [15 - 17[          | 16    | 232,224               | 234,137           | 241,473           | 254,491           | 270,544           | 292,198           | 314,317           | 335,003           | 347,758          |        |
| [17 - 19[          | 18    | 234,732               | 237,572           | 244,843           | 256,703           | 271,319           | 292,064           | 313,967           | 334,488           | 347,834          |        |
| [19 - 21[          | 20    | 237,719               | 242,061           | 248,43            | 259,797           | 272,45            | 292,001           | 313,503           | 332,809           | 345,833          |        |
| > 21               | 22    | 242,035               | 246,199           | 251,308           | 262,76            | 273,679           | 291,919           | 313,02            | 331,031           | 343,439          |        |

Tabla 23: Coeficientes direccional -combinación sur/norte- obtenidos del modelo SW para input de módulos EMS y PMS. Fuente: Elaboración propia.

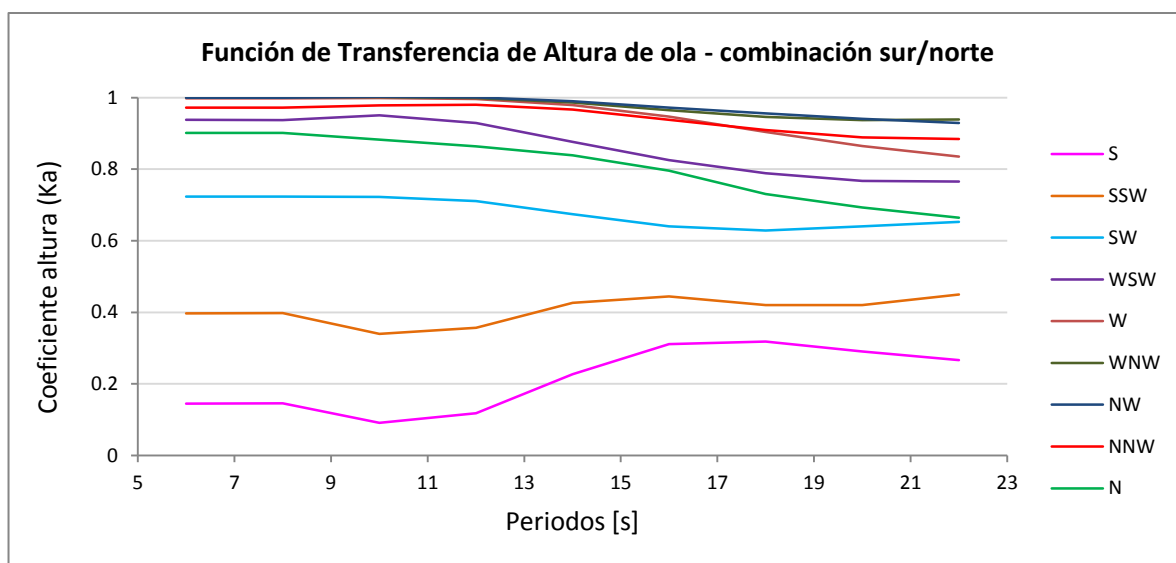


Figura 110: Coeficientes de agitación como input de entrada para modelos EMS y PMS.  
Fuente: Elaboración propia.

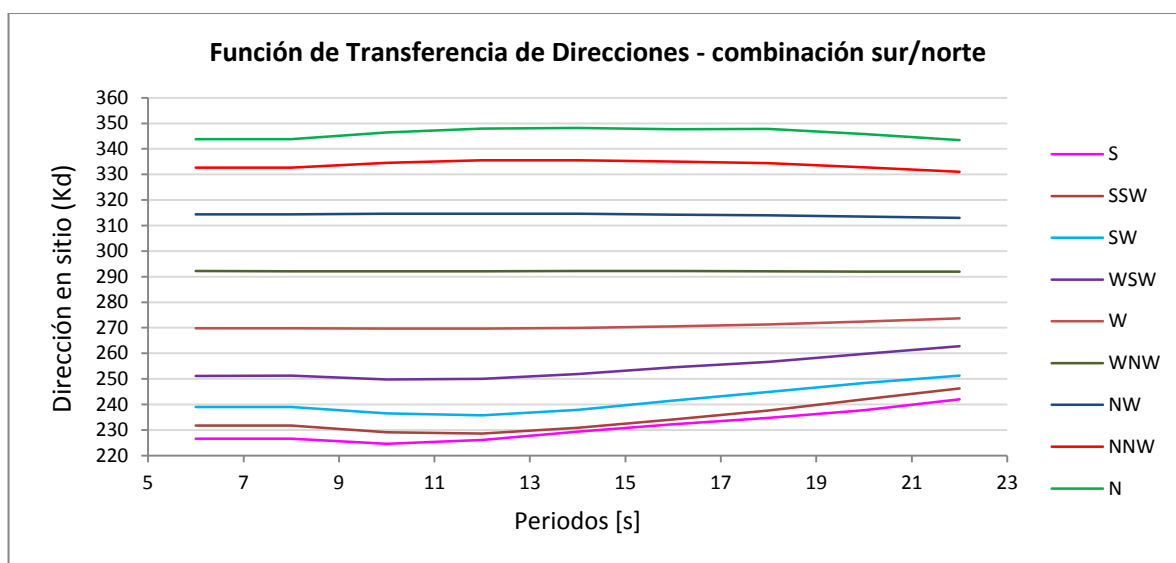


Figura 111: Coeficiente direccional como input de entrada para modelos EMS y PMS.  
Fuente: Elaboración propia.

## 8.2.2 RESULTADOS DE MODELOS SW EN VALPARAÍSO

Dirección N:

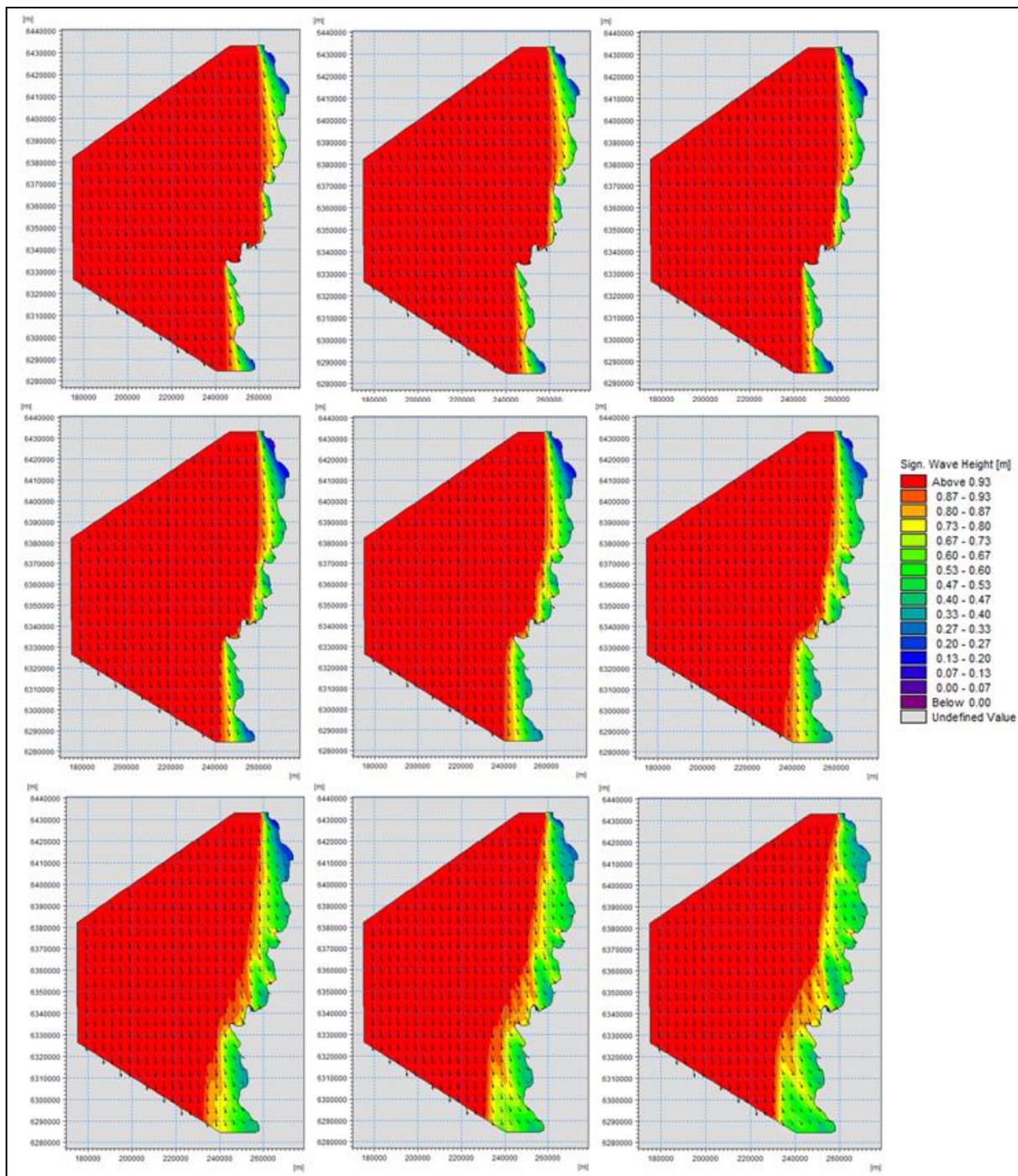
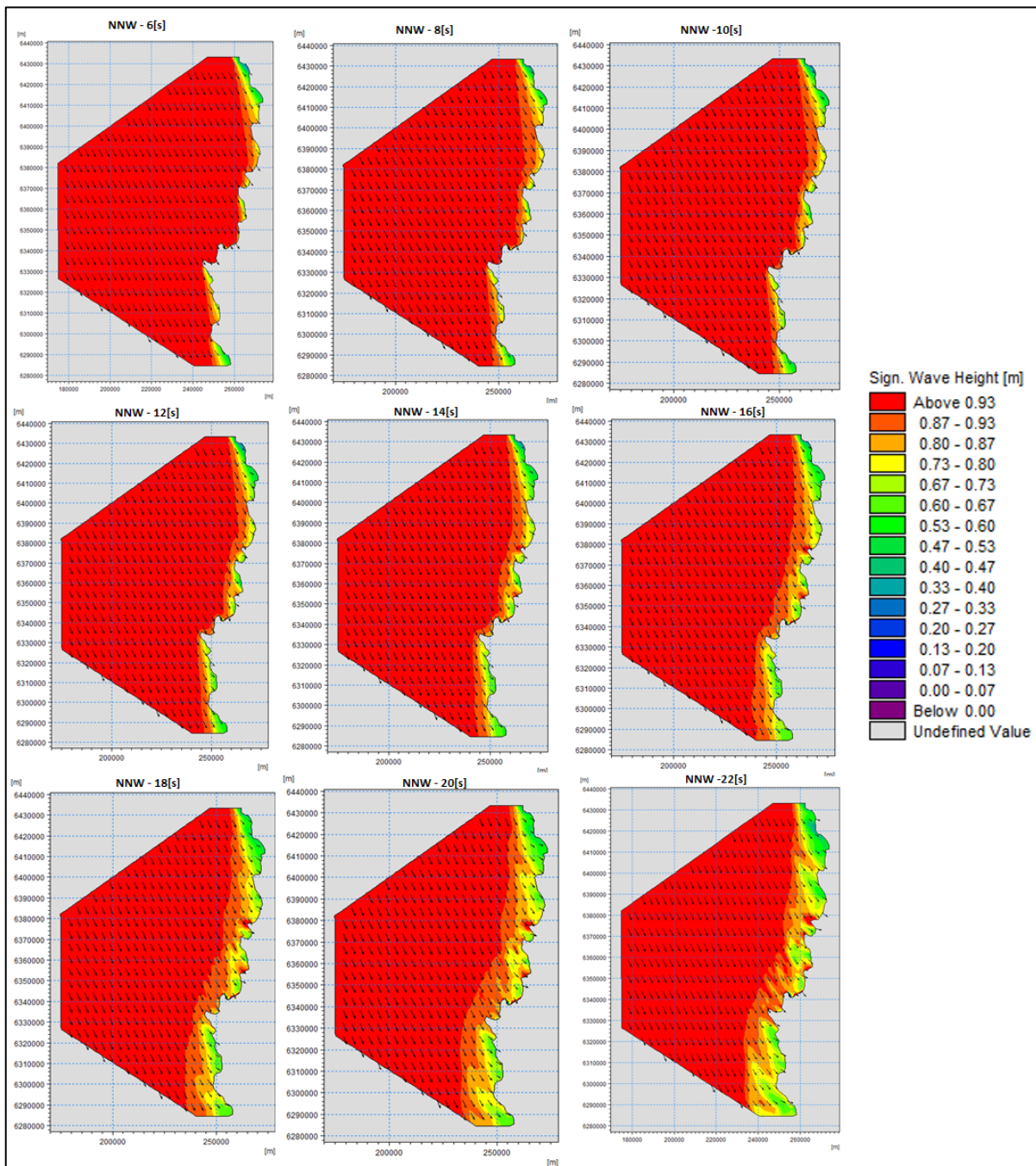


Figura 112: Modelos de mike21 SW - caso N.

Fuente: Elaboración propia.

**Dirección NNW:**



**Figura 113: Modelos de mike21 SW - caso N.**

Fuente: Elaboración propia.

### Dirección NW

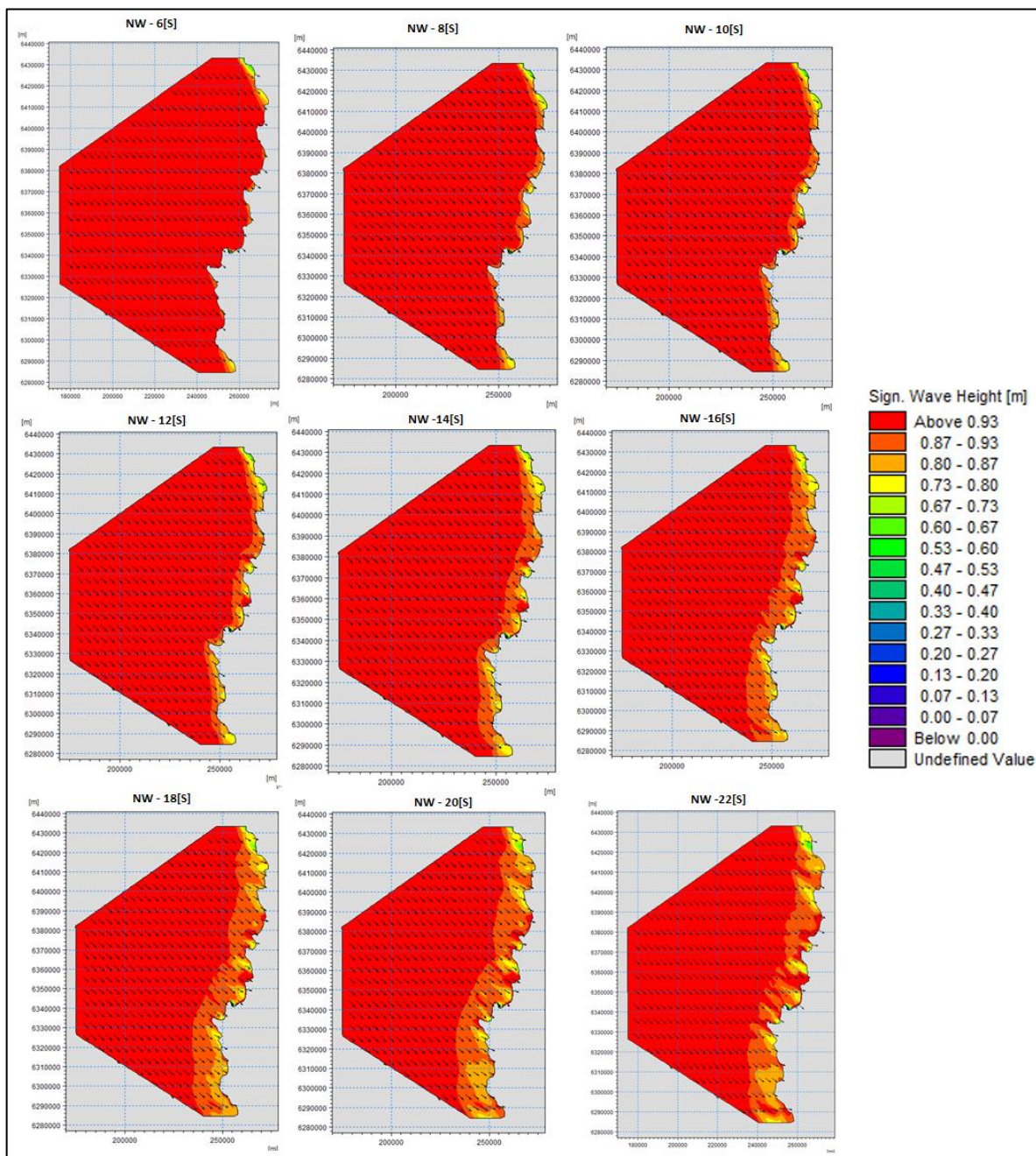
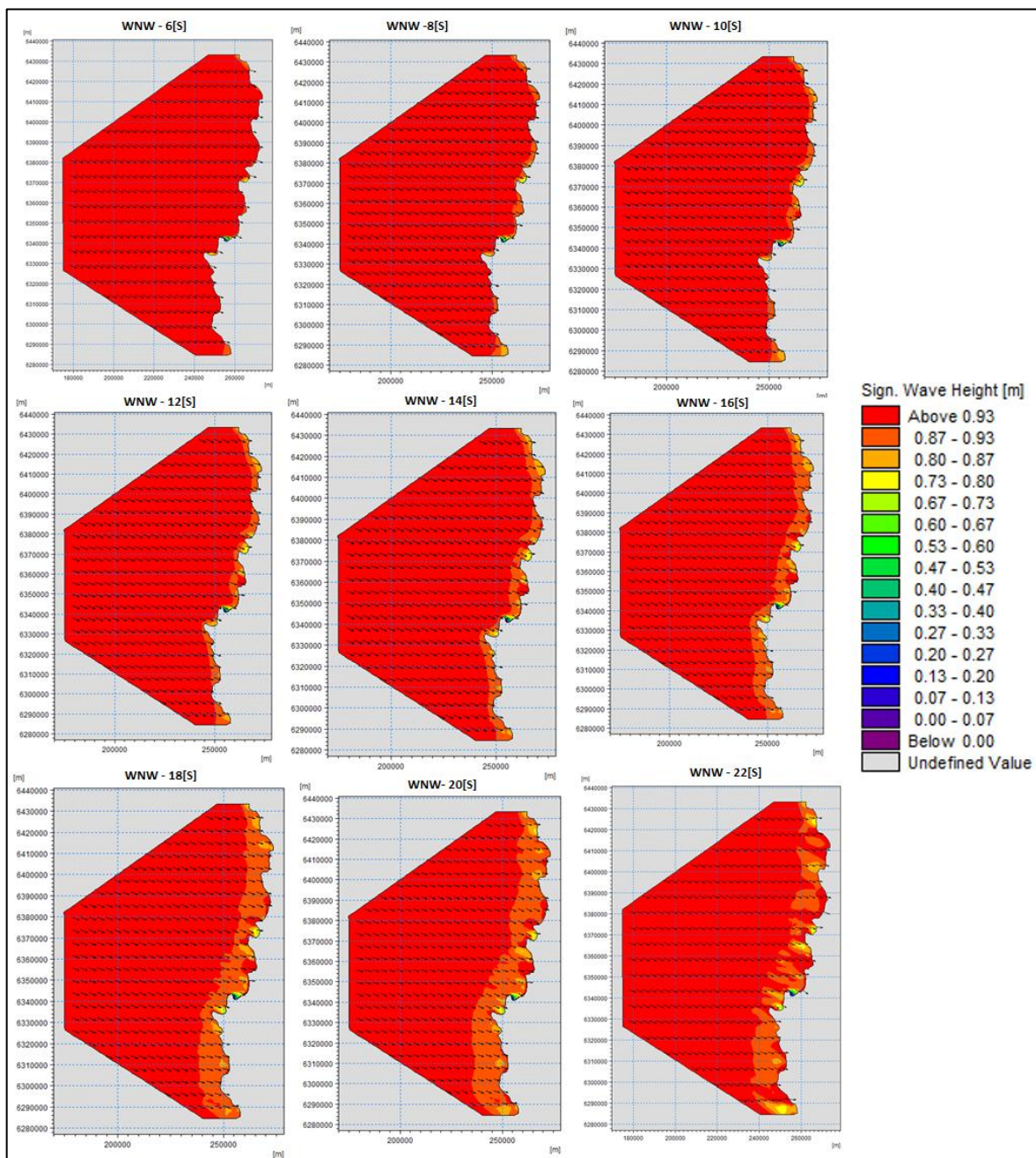


Figura 114: Modelos de mike21 SW - caso N.

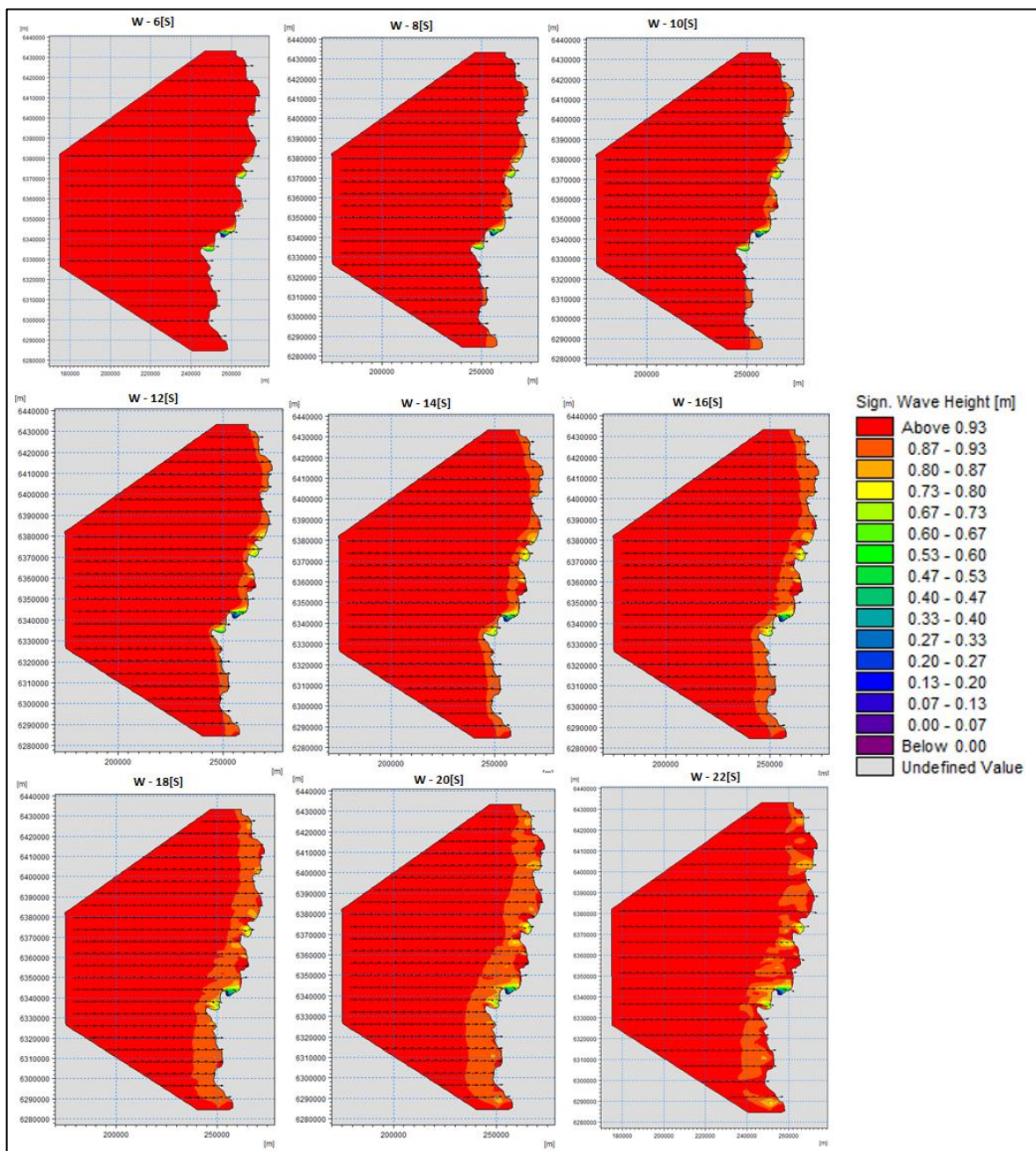
Fuente: Elaboración propia.

**Dirección WNW:**



**Figura 115: Modelos de mike21 SW - caso N.**  
Fuente: Elaboración propia.

**Dirección W:**



**Figura 116: Modelos de mike21 SW - caso N.**  
Fuente: Elaboración propia.

Dirección WSW:

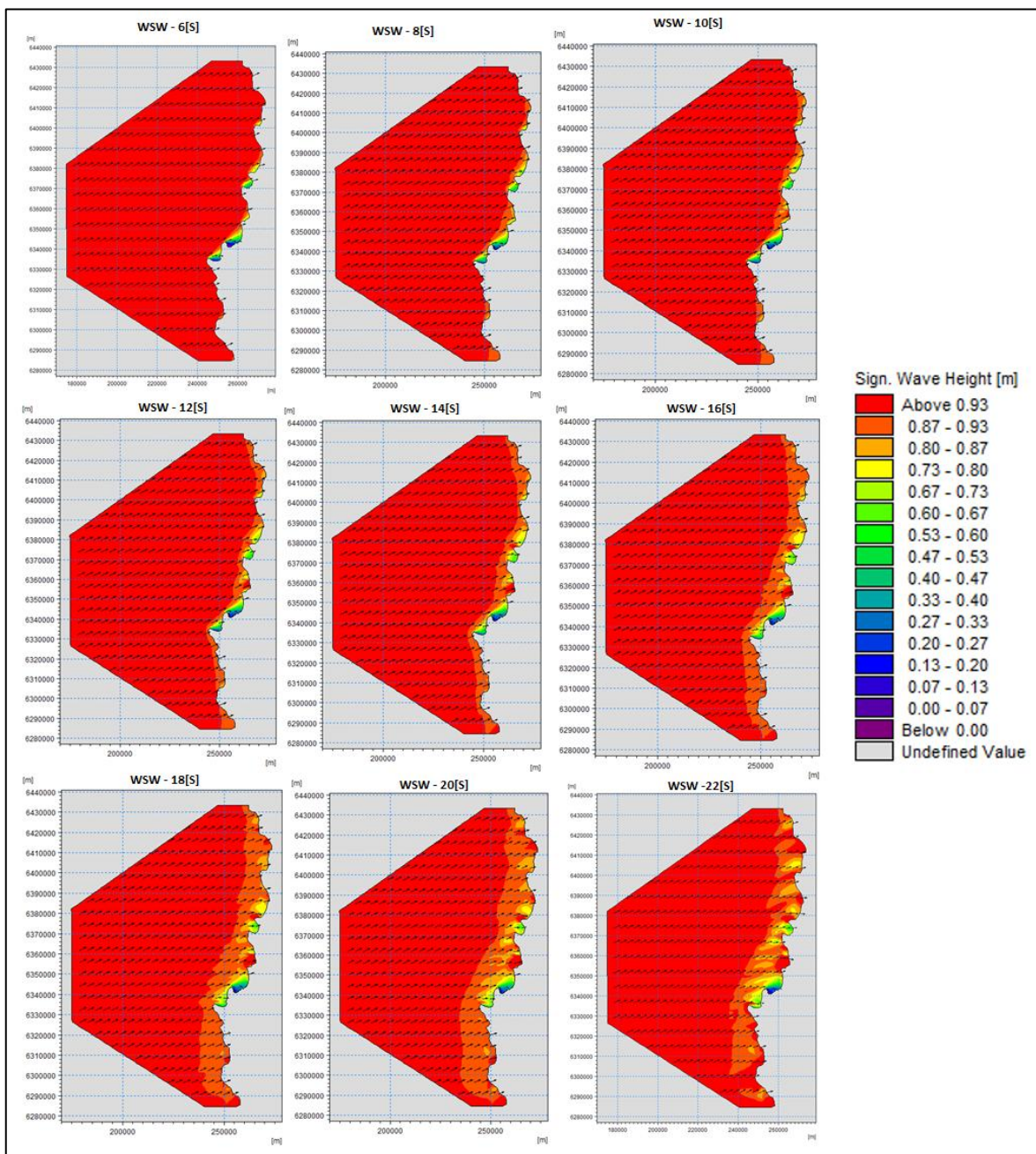
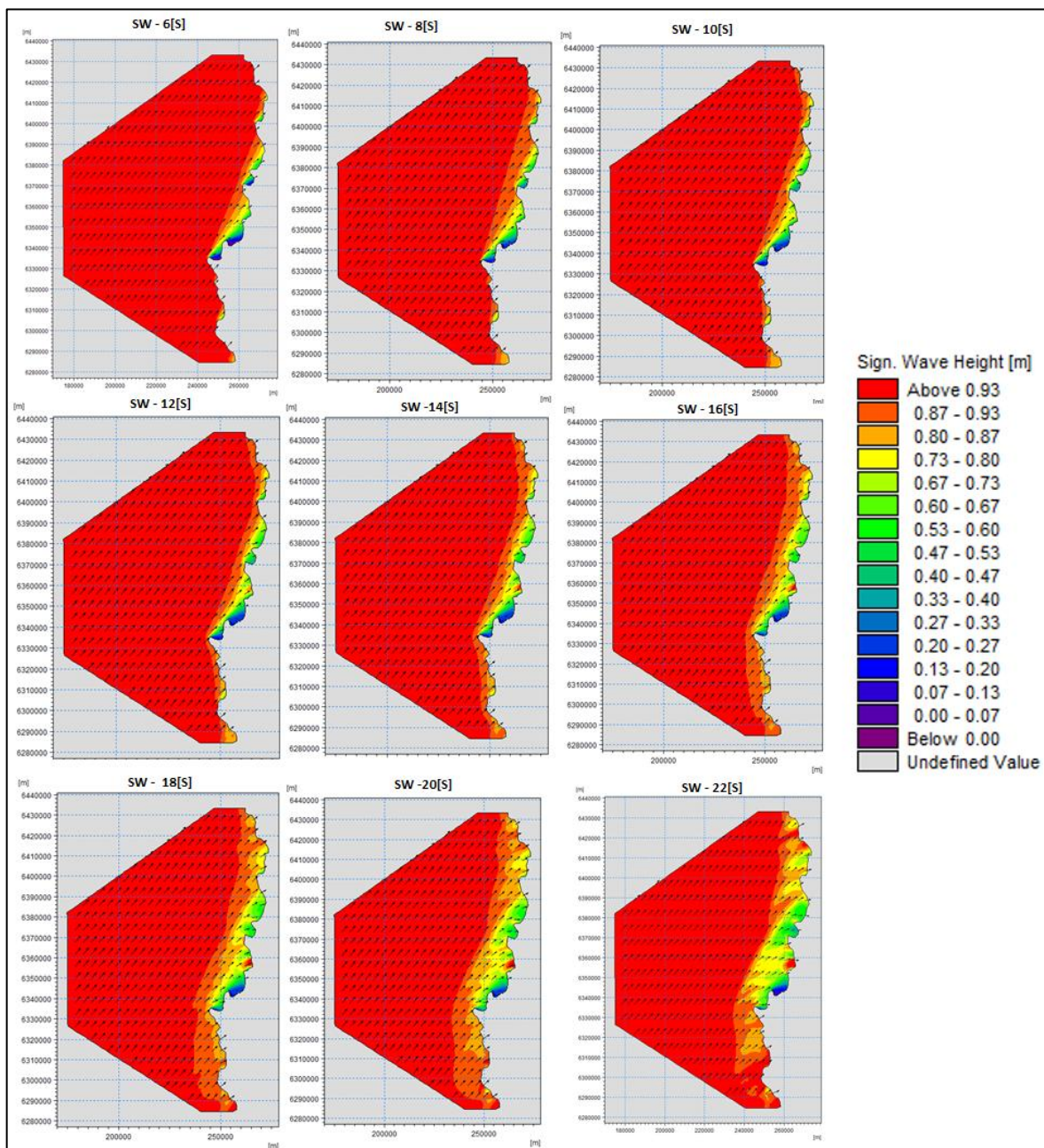


Figura 117: Modelos de mike21 SW - caso N.  
Fuente: Elaboración propia.

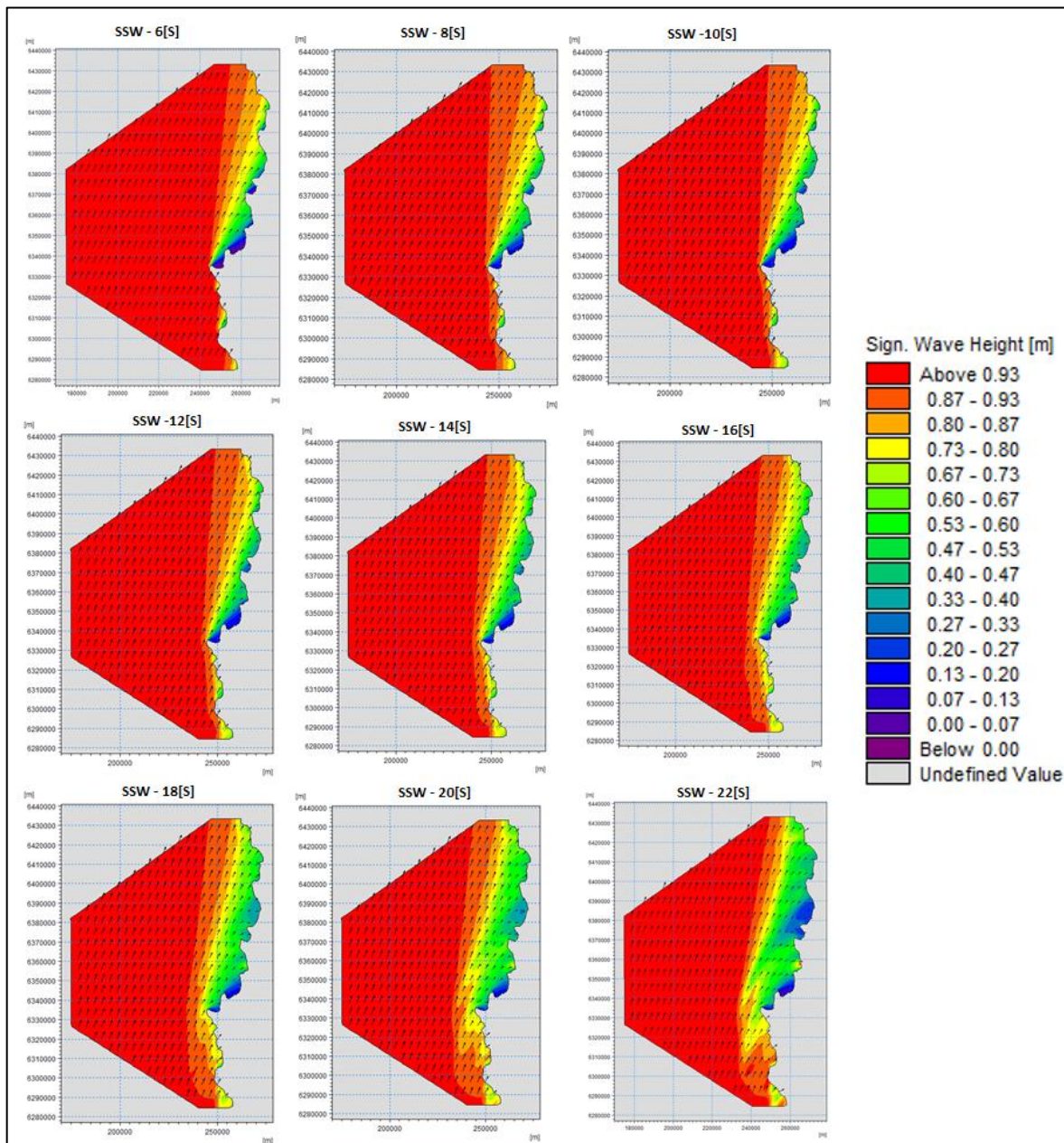
**Dirección SW:**



**Figura 118: Modelos de mike21 SW - caso N.**

Fuente: Elaboración propia.

**Dirección SSW:**



**Figura 119: Modelos de mike21 SW - caso N.**  
Fuente: Elaboración propia.

Dirección S:

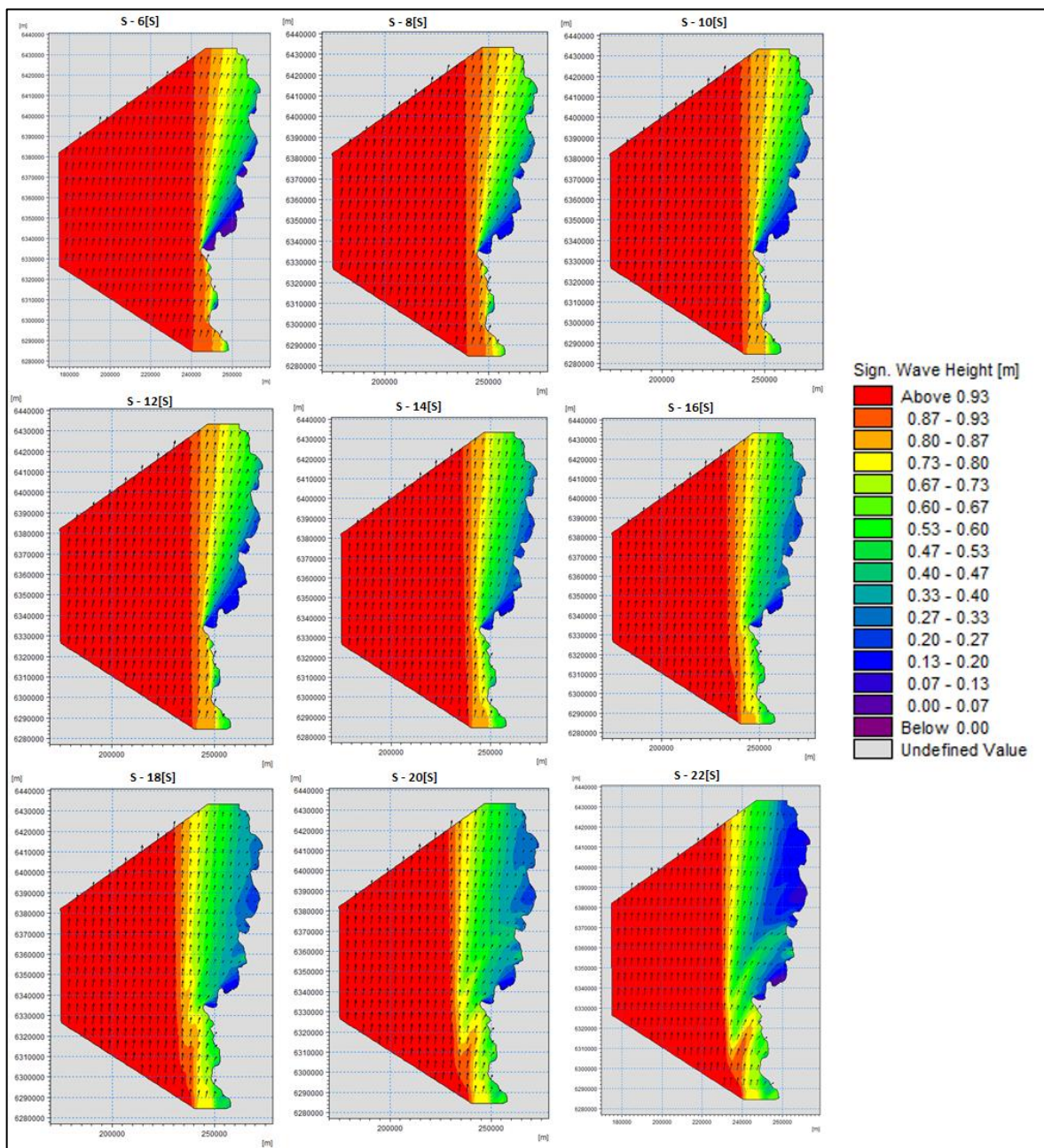


Figura 120: Modelos de mike21 SW - caso N.

Fuente: Elaboración propia.

### 8.2.3 RESULTADOS DE MODELOS EMS EN VALPARAÍSO

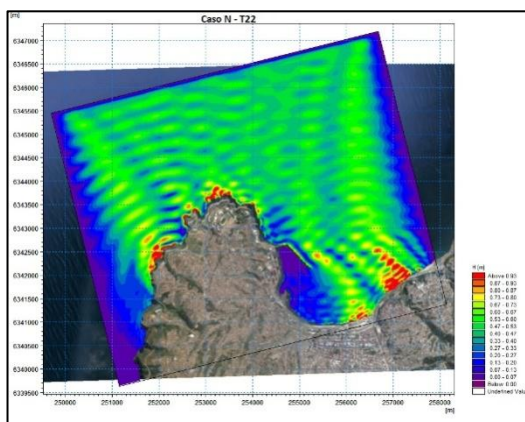


Figura 121: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=22[s].

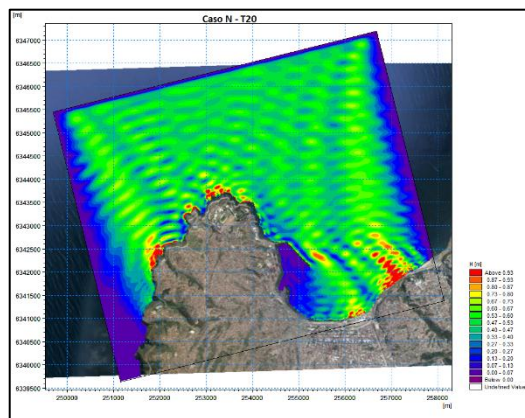


Figura 122: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=20[s].

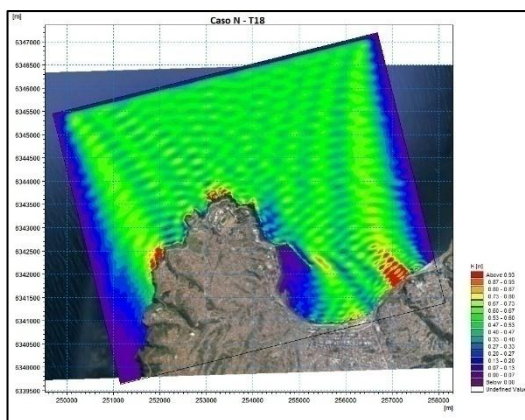


Figura 123: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=18[s].

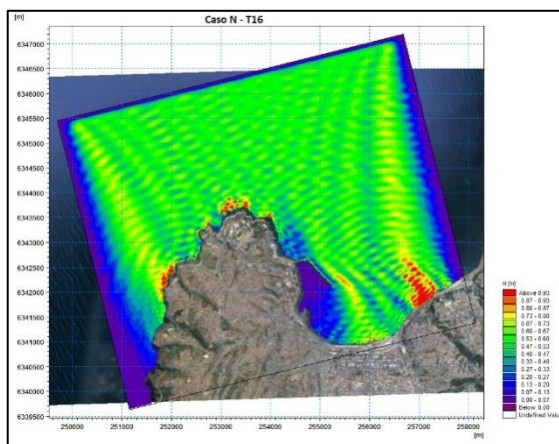


Figura 124: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=16[s].

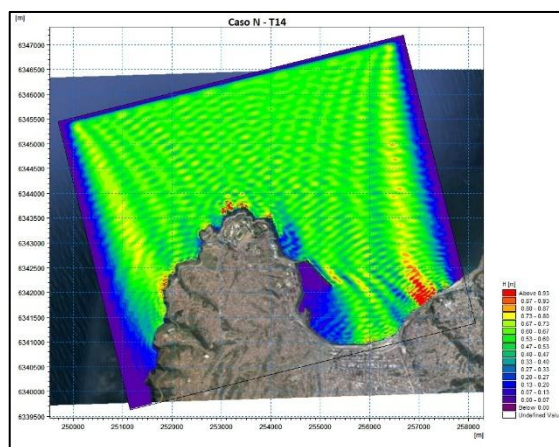


Figura 125: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=14[s].

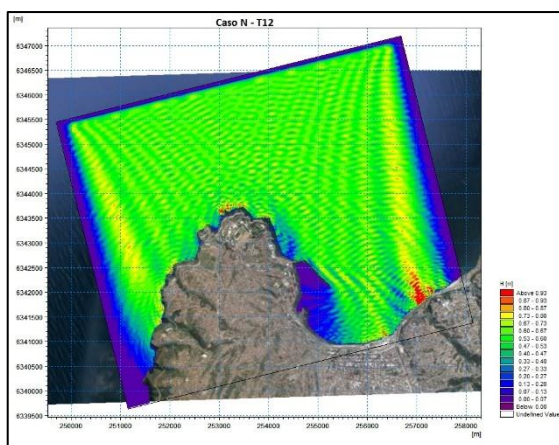


Figura 126: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=12[s].

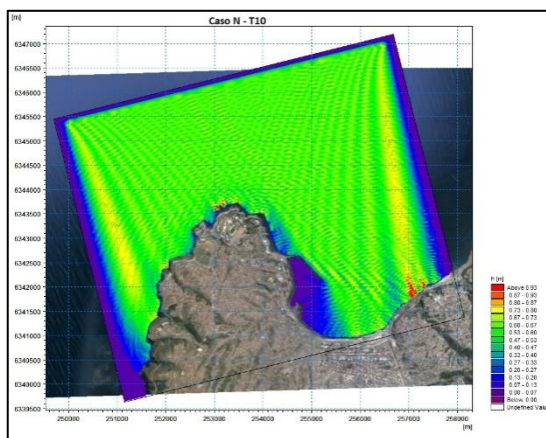


Figura 127: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=10[s].

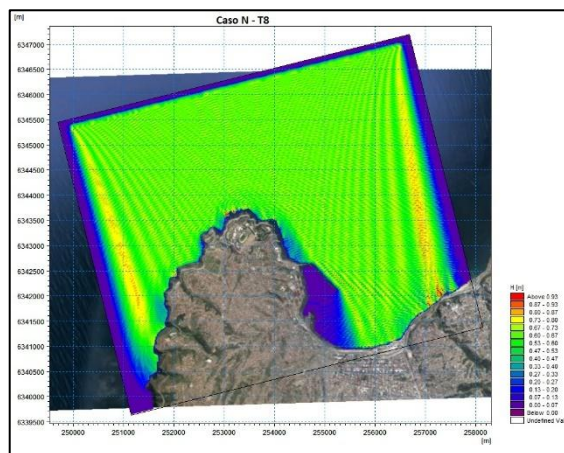


Figura 128: Modelos de mike21 EMS - Caso N, T=8[s].

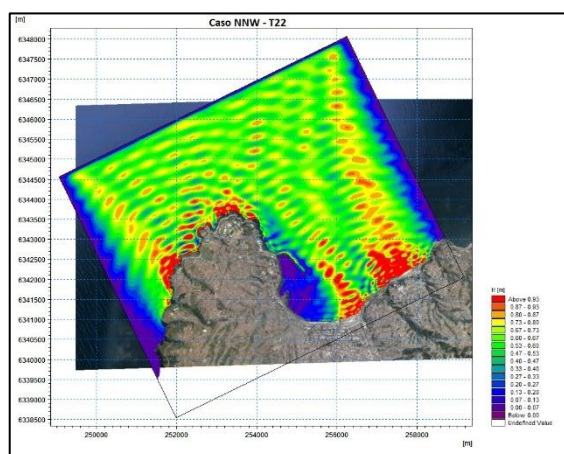


Figura 129: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=22[s].

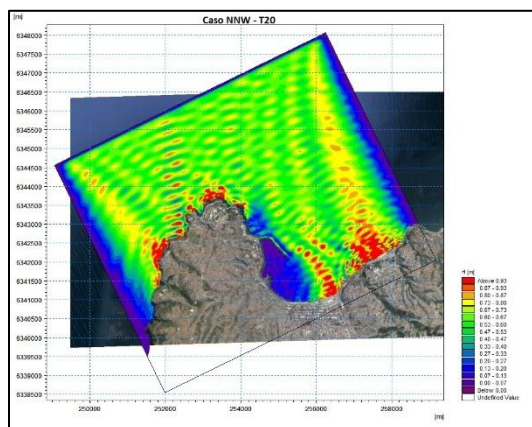


Figura 130: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=20[s].

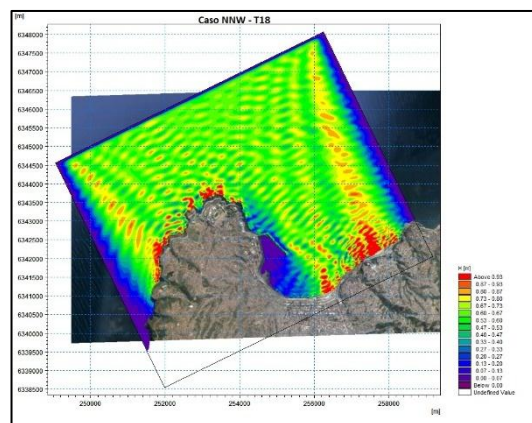


Figura 131: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=18[s].

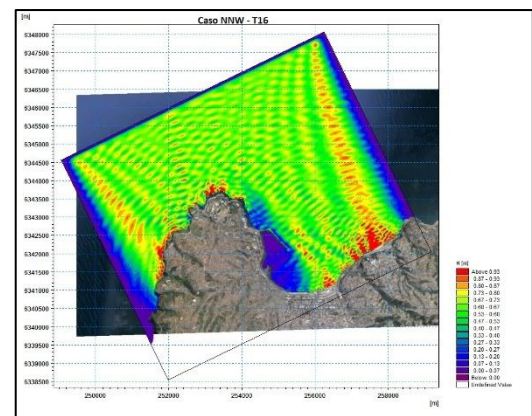


Figura 132: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=16[s].

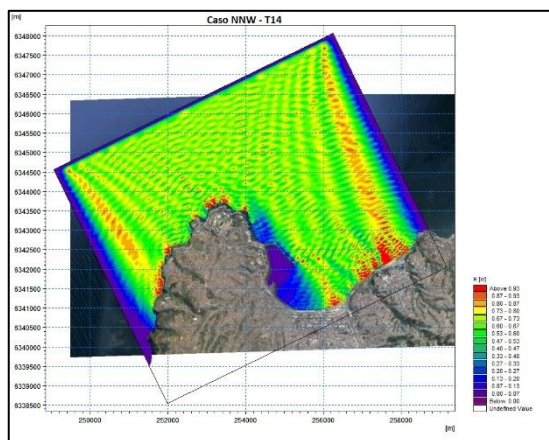


Figura 133: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=14[s].

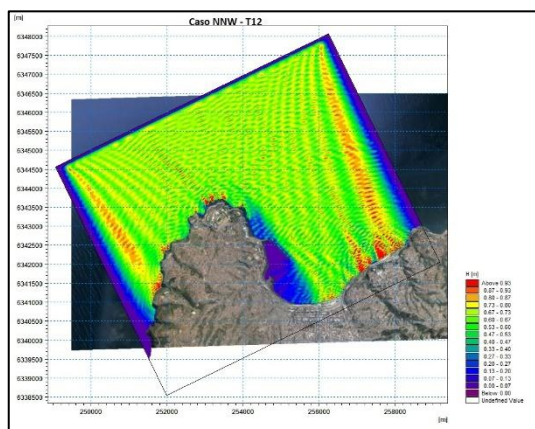


Figura 134: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=12[s].

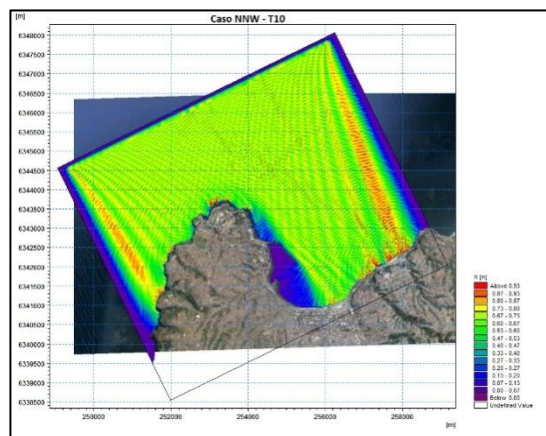


Figura 135: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=10[s].

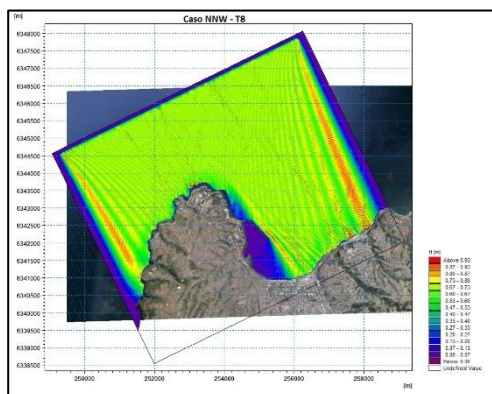


Figura 136: Modelos de mike21 EMS - Caso NNW, T=8[s].

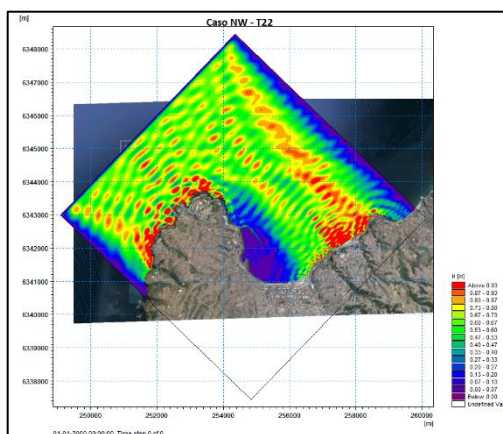


Figura 137: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=22[s].

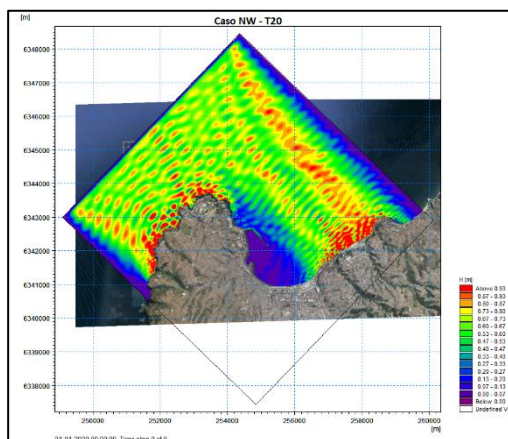


Figura 138: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=20[s].

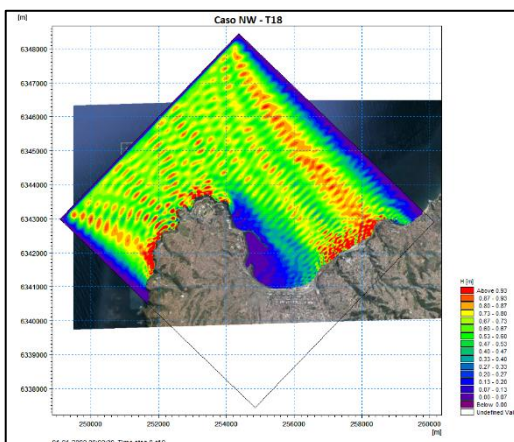


Figura 139: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=18[s].

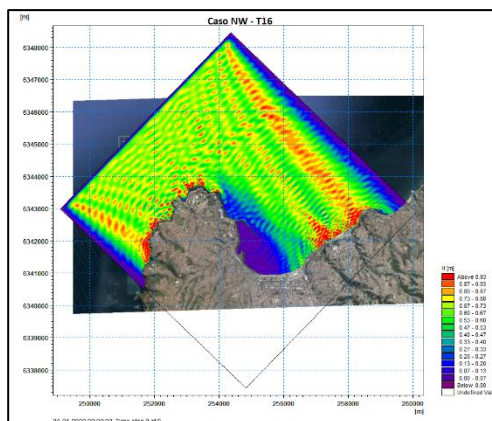


Figura 140: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=16[s].

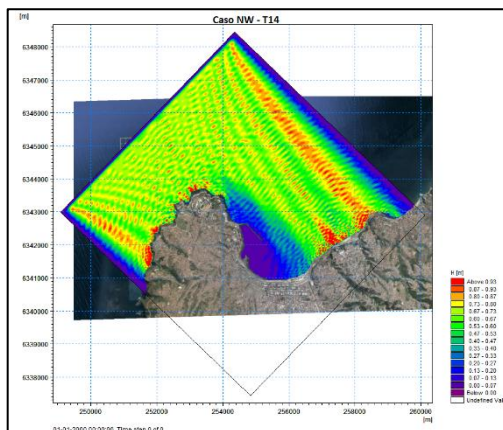


Figura 141: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=14[s].

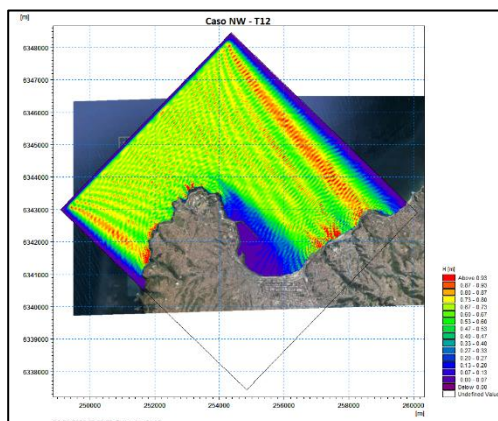


Figura 142: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=12[s].

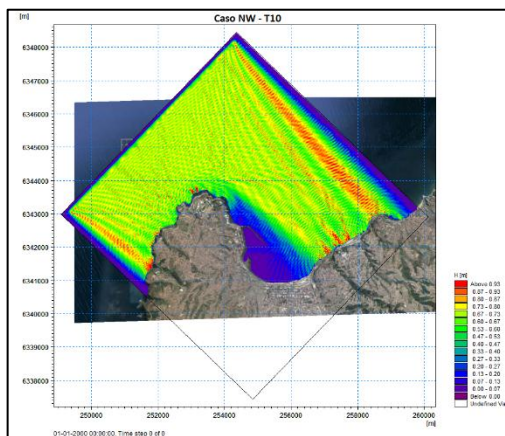


Figura 143: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=10[s].

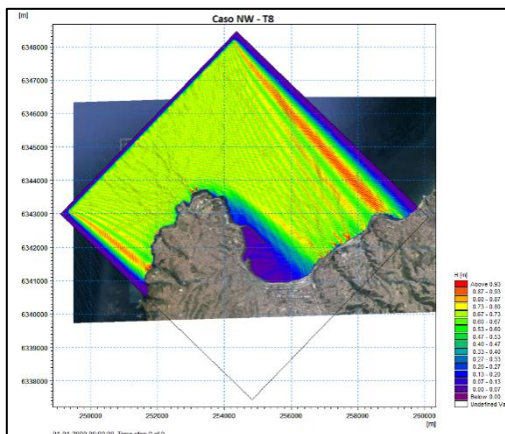


Figura 144: Modelos de mike21 EMS - Caso NW, T=8[s].

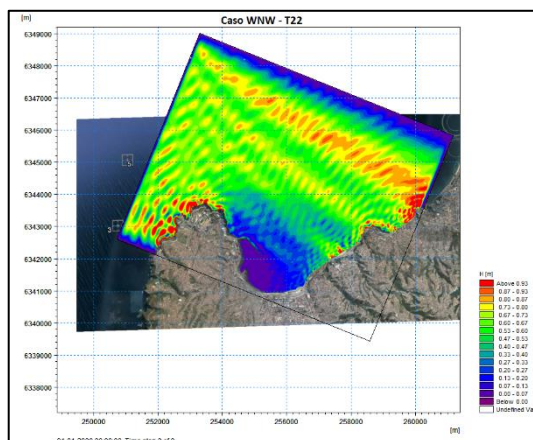


Figura 145: Modelos de mike21 EMS - Caso WNW, T=22[s].

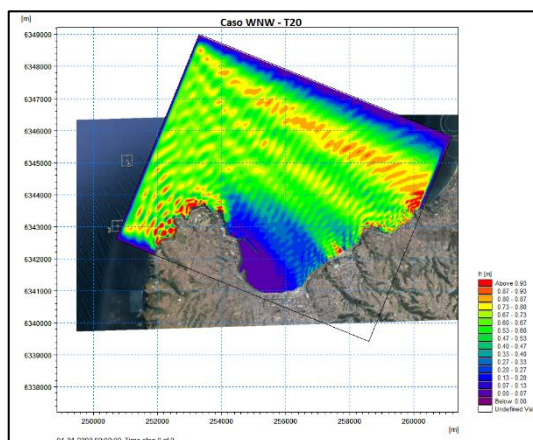


Figura 146: Modelos de mike21 EMS - Caso WNW, T=20[s].

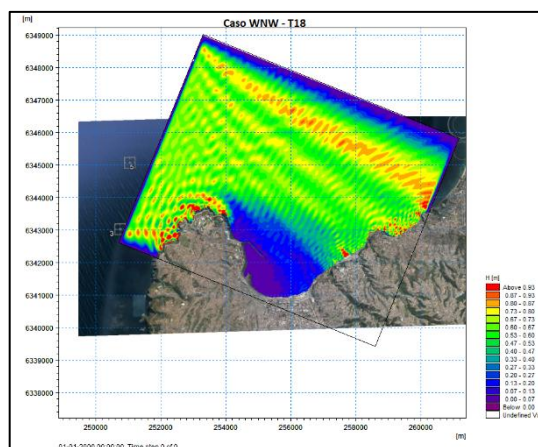


Figura 147: Modelos de mike21 EMS - Caso WNW, T=18[s].

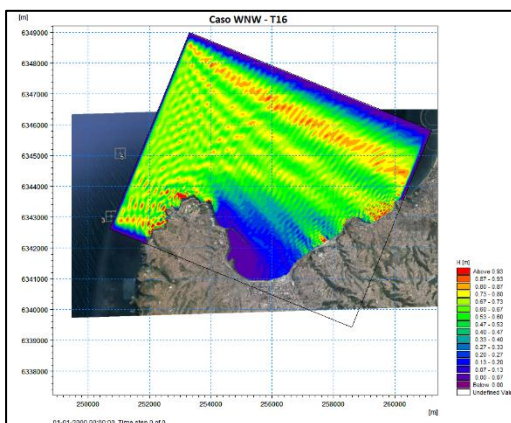


Figura 148: Modelos de mike21 EMS - Caso WNW, T=16[s].

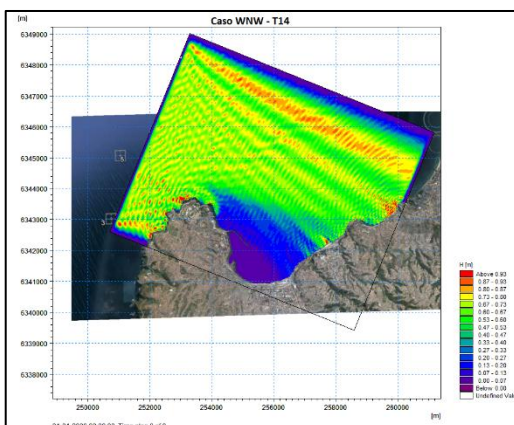


Figura 149: Modelos de mike21 EMS - Caso WNW, T=14[s].

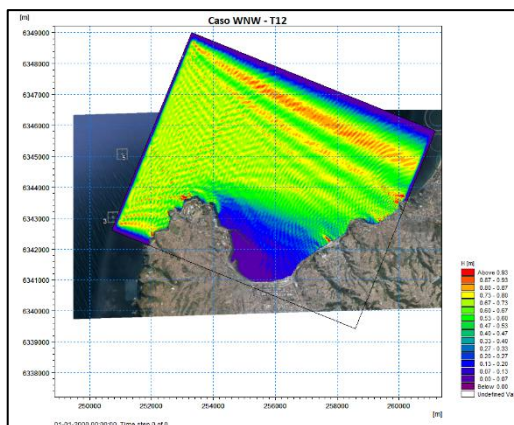


Figura 150: Modelos de mike21 EMS - Caso WNW, T=12[s].

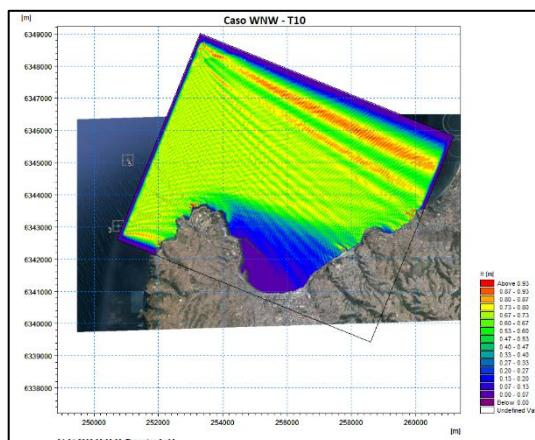


Figura 151: Modelos de mike21 EMS - Caso WNW, T=10[s].

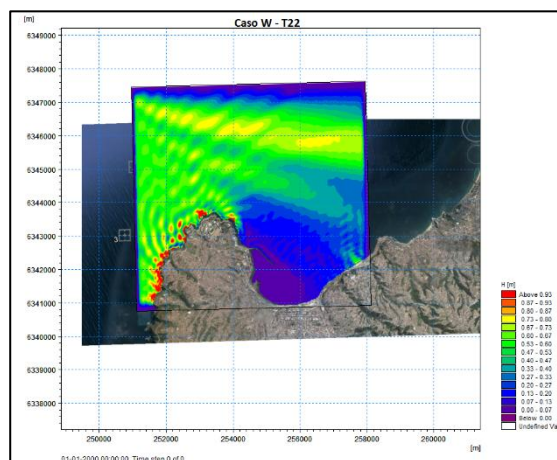


Figura 152: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=22[s].

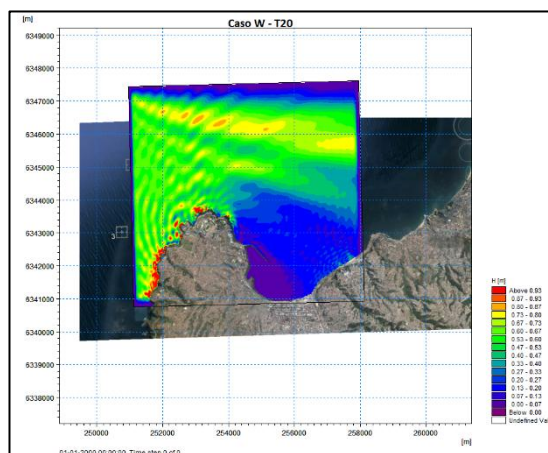


Figura 153: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=20[s].

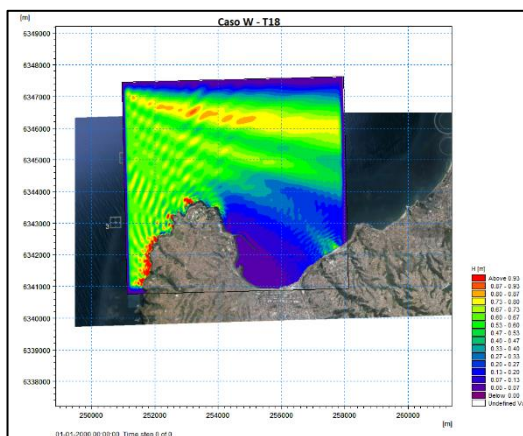


Figura 154: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=18[s].

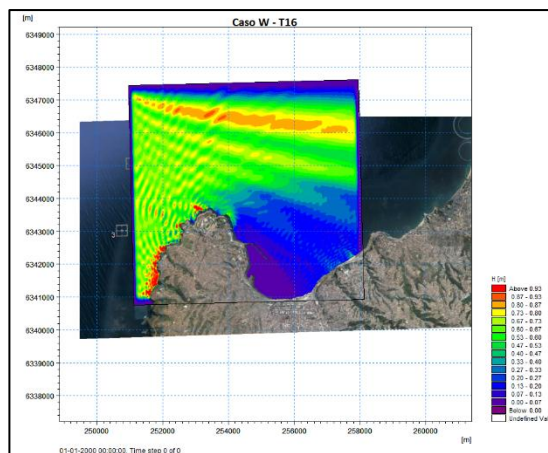


Figura 155: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=16[s].

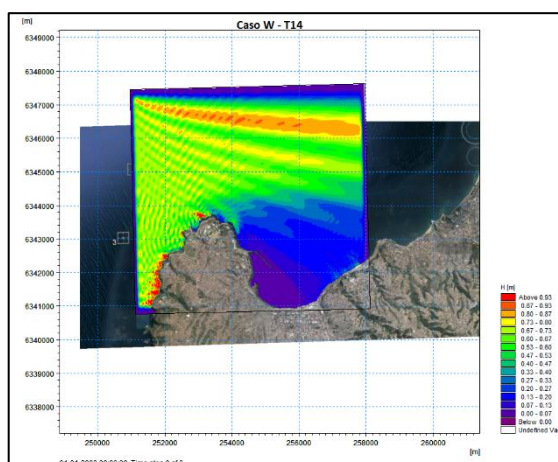


Figura 156: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=14[s].

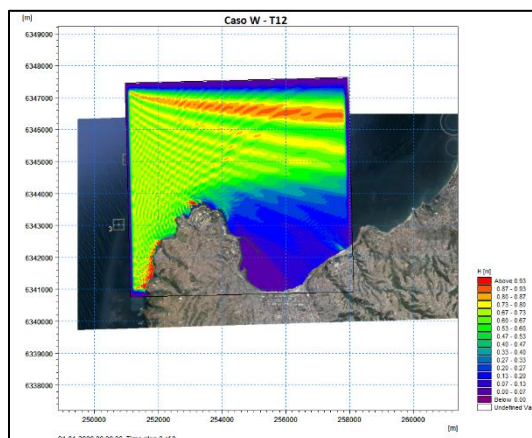


Figura 157: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=12[s].

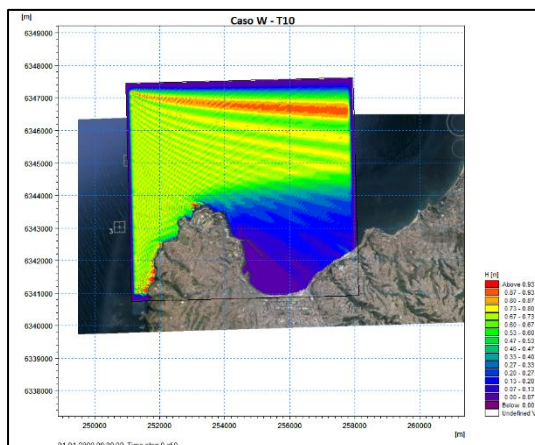


Figura 158: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=10[s].

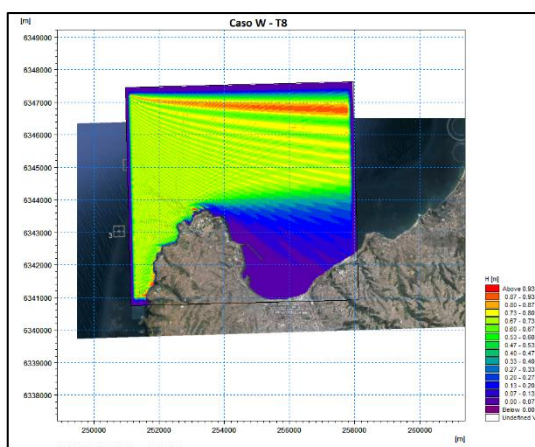


Figura 159: Modelos de mike21 EMS - Caso W, T=8[s].

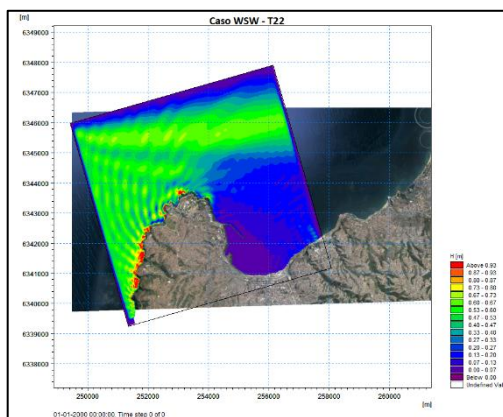


Figura 160: Modelos de mike21 EMS - Caso WSW, T=22[s].

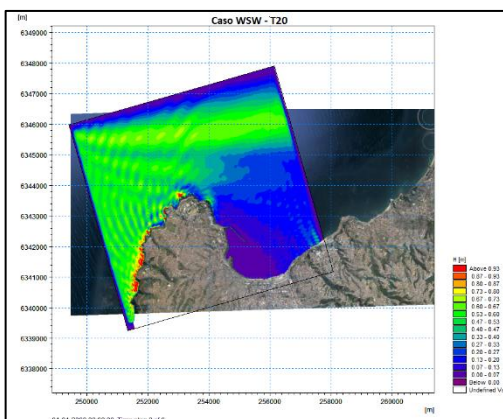


Figura 161: Modelos de mike21 EMS - Caso WSW, T=20[s].

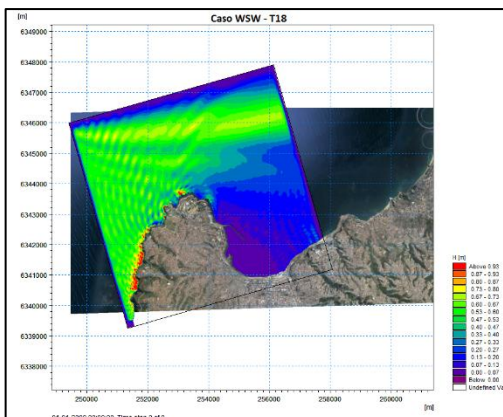


Figura 162: Modelos de mike21 EMS - Caso WSW, T=18[s].

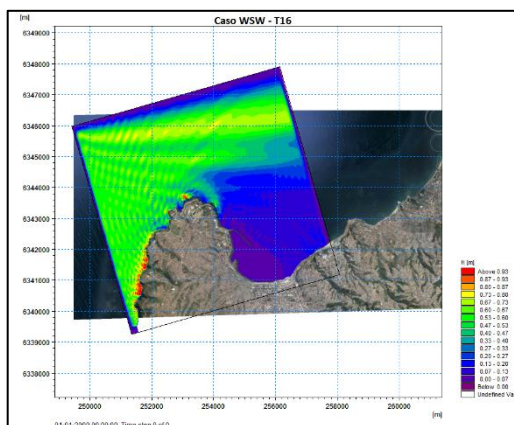


Figura 163: Modelos de mike21 EMS - Caso WSW, T=16[s].

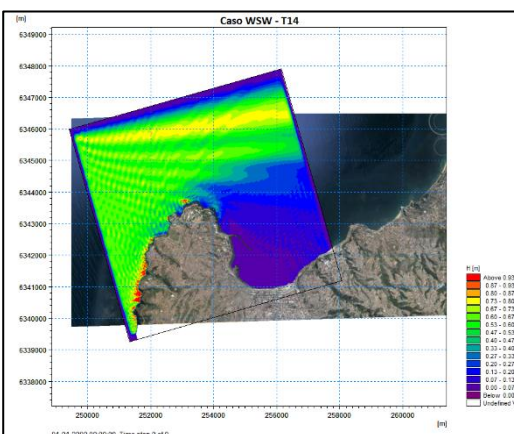


Figura 164: Modelos de mike21 EMS - Caso WSW, T=14[s].

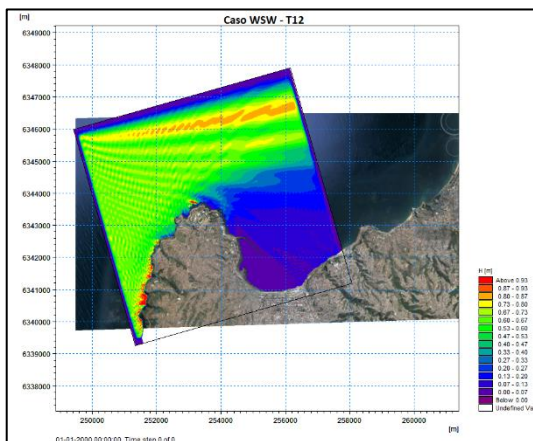


Figura 165: Modelos de mike21 EMS – Caso WSW, T=12[s].

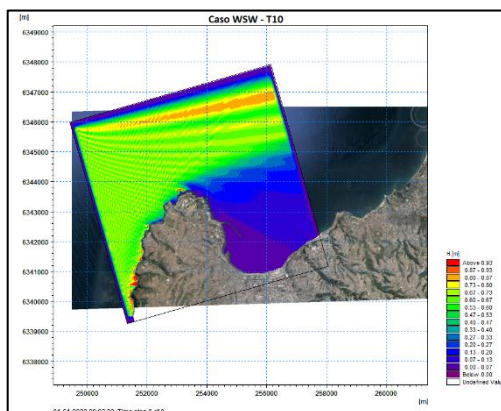


Figura 166: Modelos de mike21 EMS - Caso WSW, T=10[s].

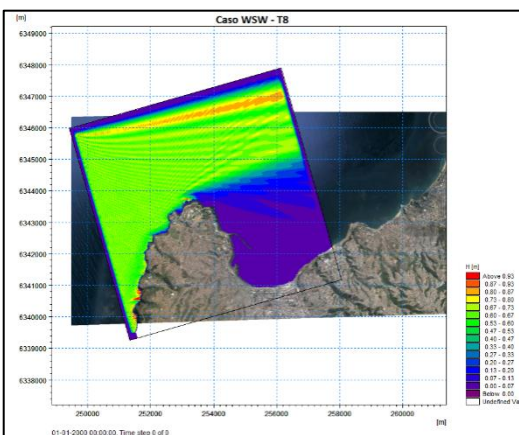


Figura 167: Modelos de mike21 EMS - Caso WSW, T=8[s].

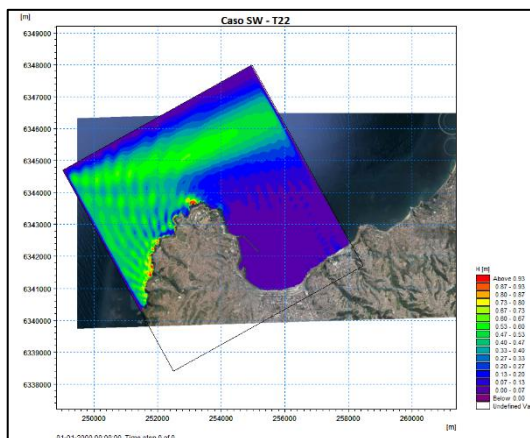


Figura 168: Modelos de mike21 EMS – Caso SW, T=22[s].

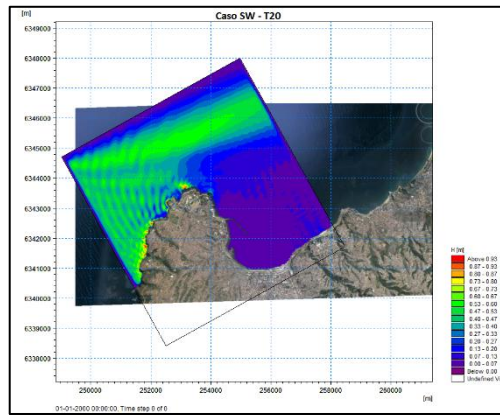


Figura 169: Modelos de mike21 EMS - Caso SW, T=20[s].

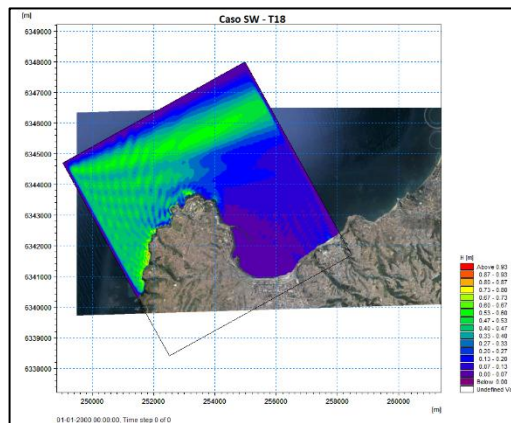


Figura 170: Modelos de mike21 EMS - Caso SW, T=18[s].

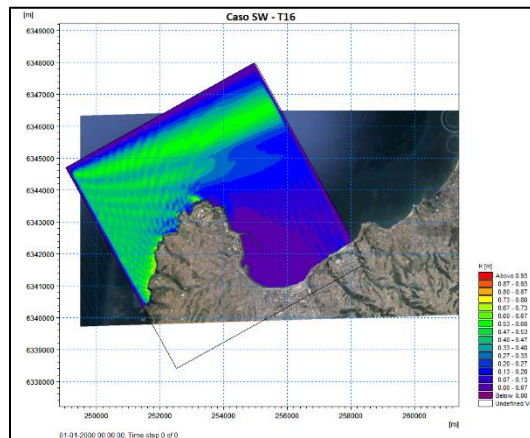


Figura 171: Modelos de mike21 EMS - Caso SW, T=16[s].

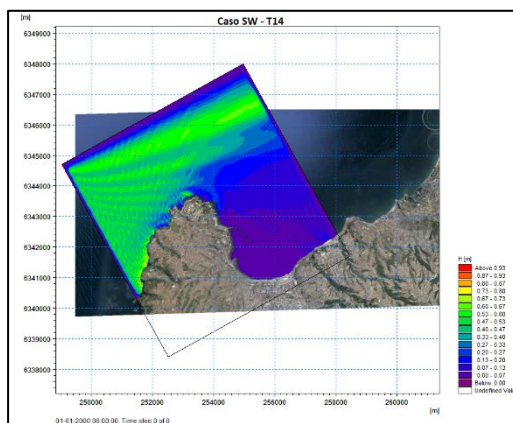


Figura 172: Modelos de mike21 EMS - Caso SW, T=14[s].

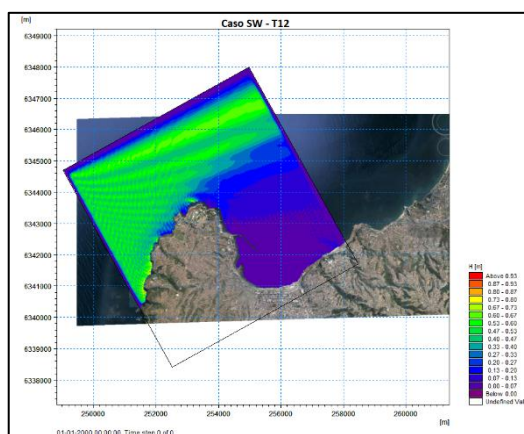


Figura 173: Modelos de mike21 EMS - Caso SW, T=12[s].

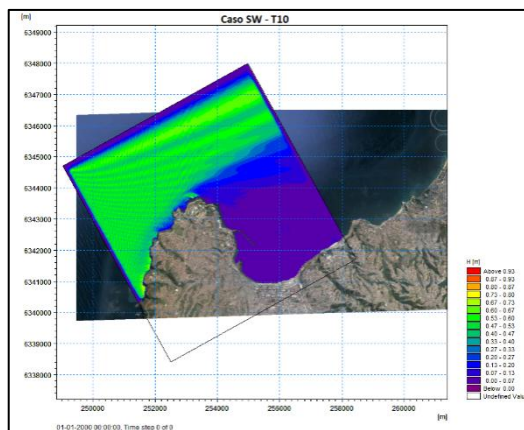


Figura 174: Modelos de mike21 EMS - Caso SW, T=10[s].

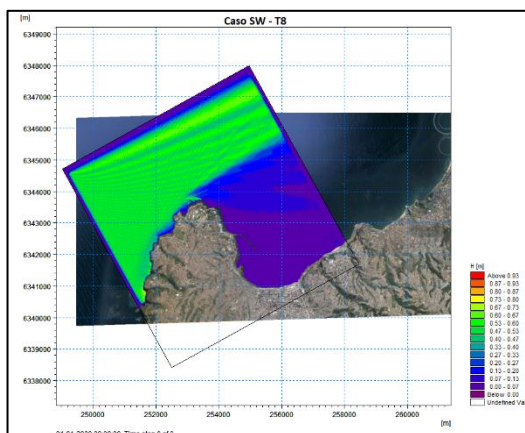


Figura 175: Modelos de mike21 EMS - Caso SW, T=8[s].

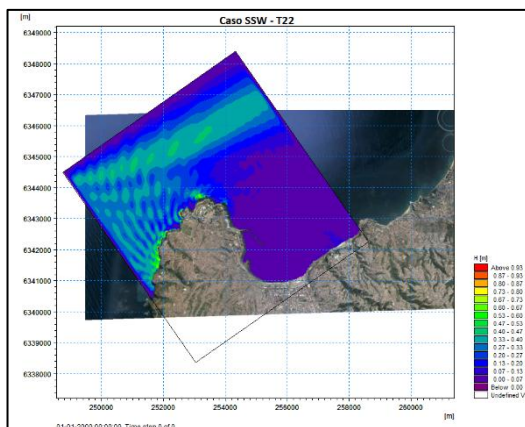


Figura 176: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=22[s].

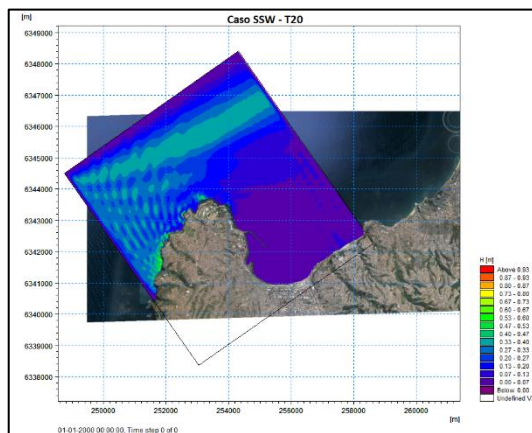


Figura 177: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=20[s].

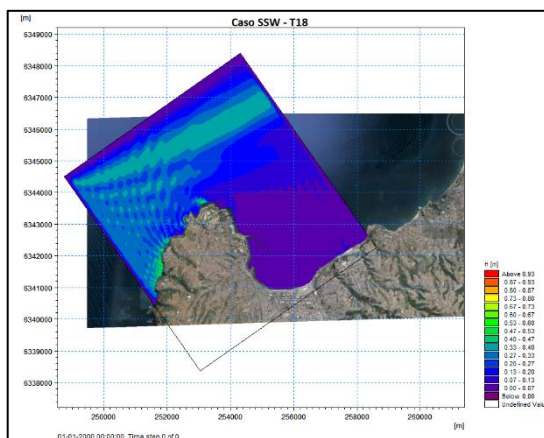


Figura 178: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=18[s].

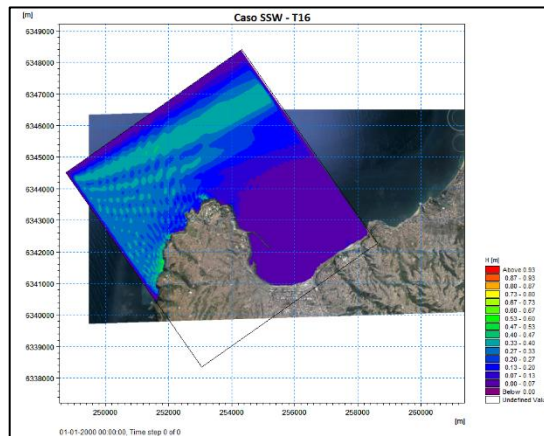


Figura 179: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=16[s].

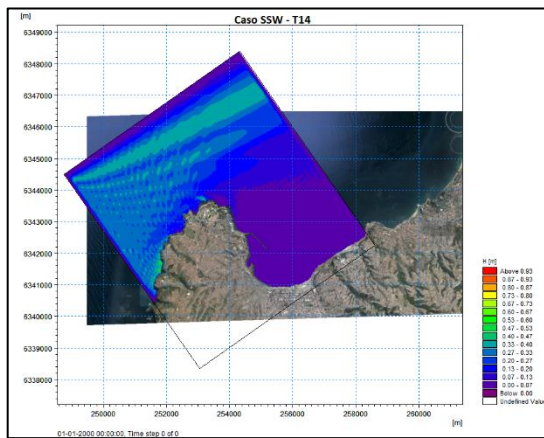


Figura 180: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=14[s].

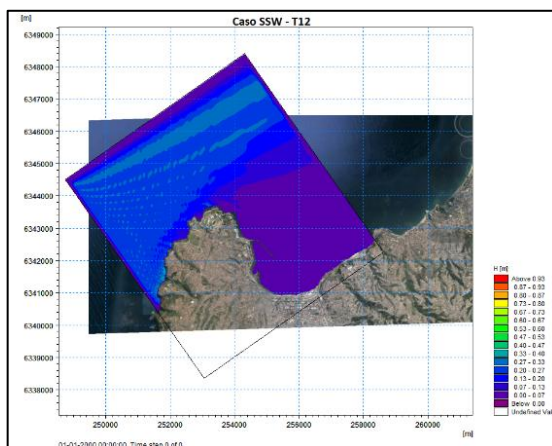


Figura 181: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=12[s].

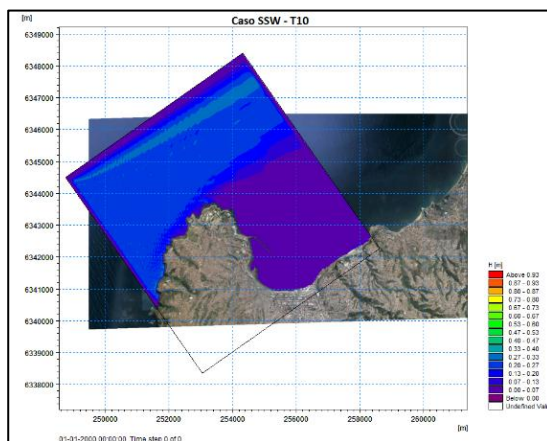


Figura 182: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=10[s].

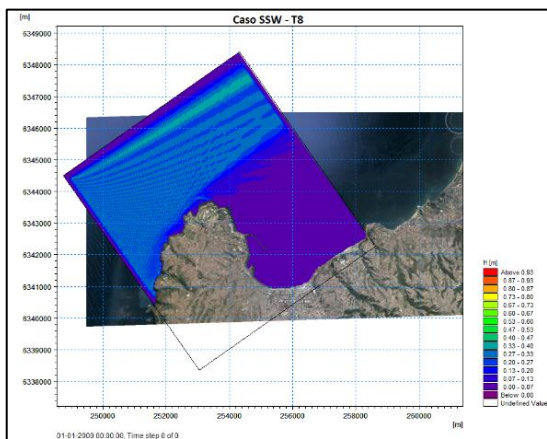


Figura 183: Modelos de mike21 EMS - Caso SSW, T=8[s].

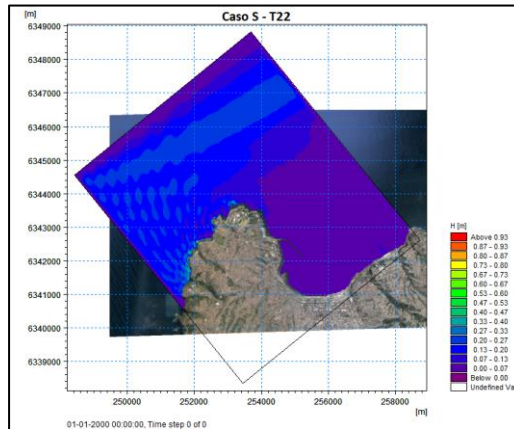


Figura 184: Modelos de mike21 EMS - Caso S, T=22[s].

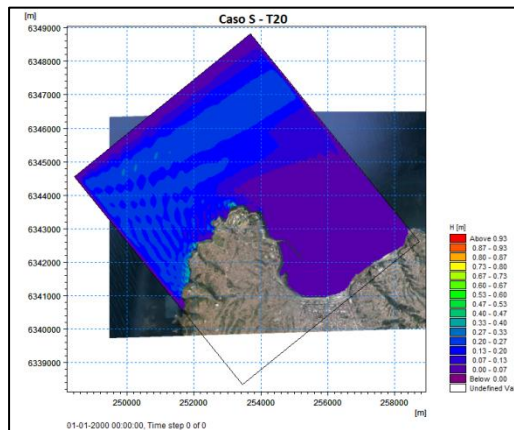


Figura 185: Modelos de mike21 EMS - Caso S, T=20[s].

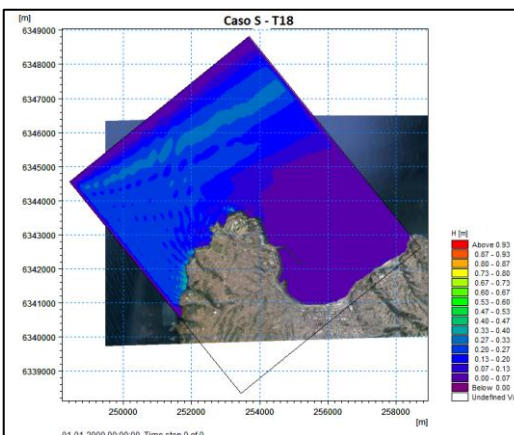


Figura 186: Modelos de mike21 EMS - Caso S, T=18[s].

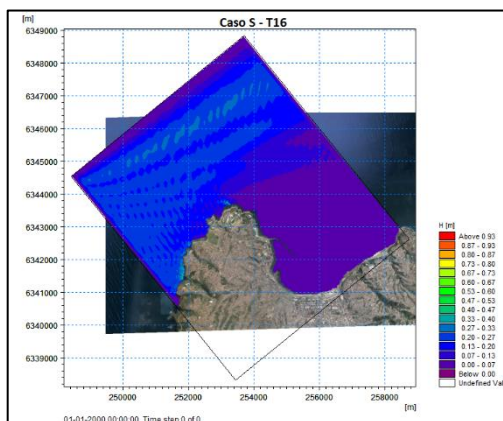


Figura 187: Modelos de mike21 EMS - Caso S, T=16[s].

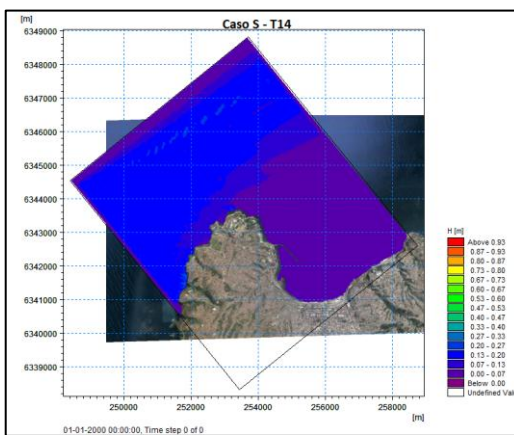


Figura 188: Modelos de mike21 EMS - Caso S, T=14[s].

## 8.2.4 RESULTADOS DE MODELOS PMS EN VALPARAÍSO

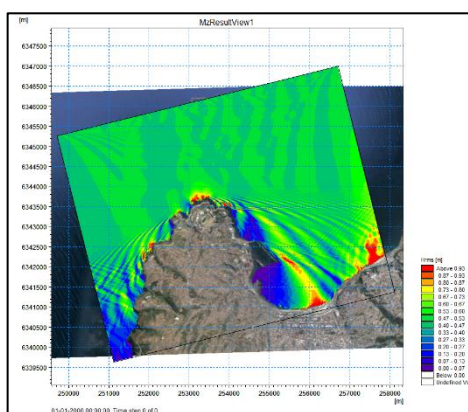


Figura 189: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=22[s].

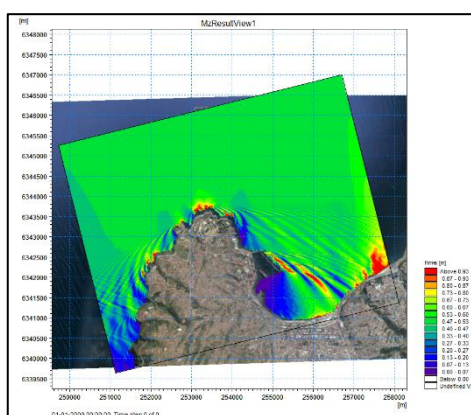


Figura 190: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=20[s].

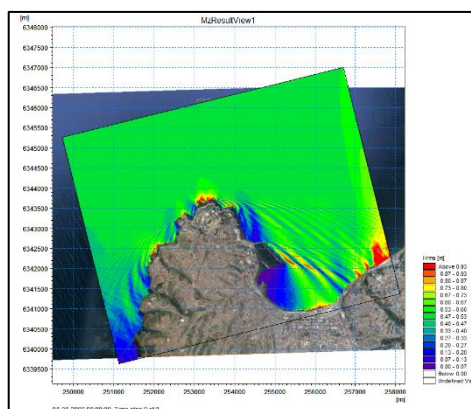


Figura 191: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=18[s].

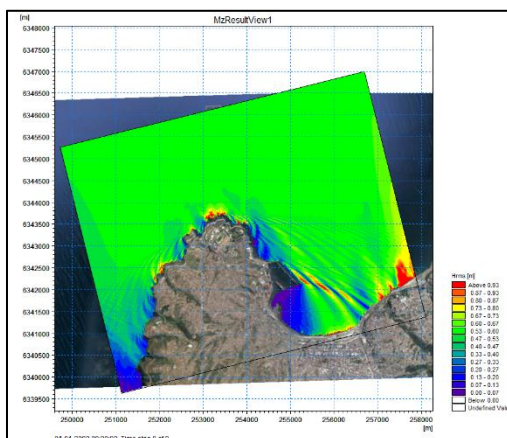


Figura 192: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=16[s].

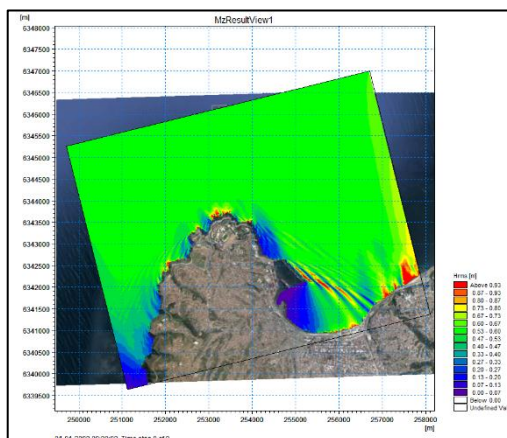


Figura 193: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=14[s].

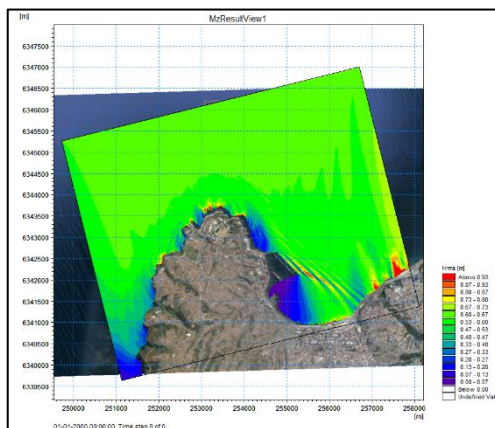


Figura 194: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=12[s].

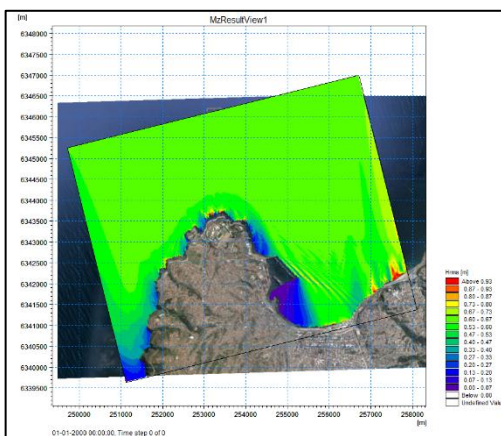


Figura 195: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=10[s].

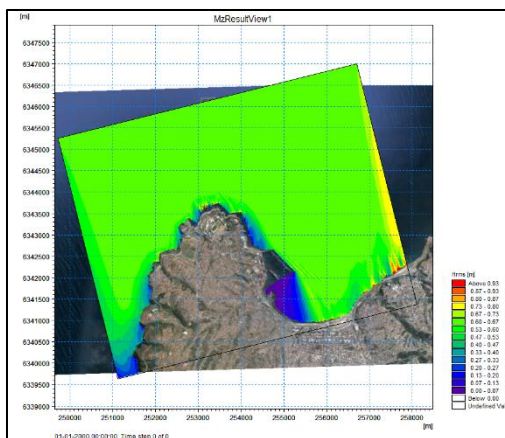


Figura 196: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=8[s].

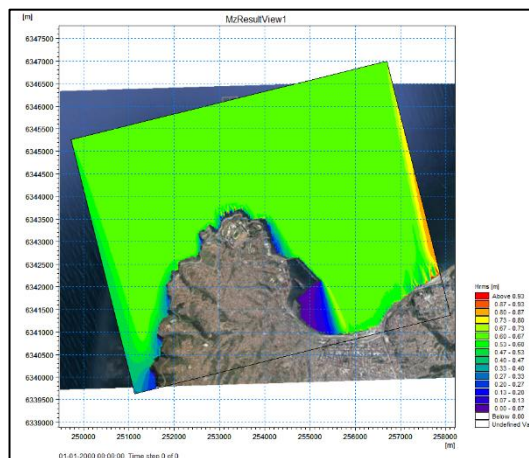


Figura 197: Modelos de mike21 PMS - Caso N, T=6[s].

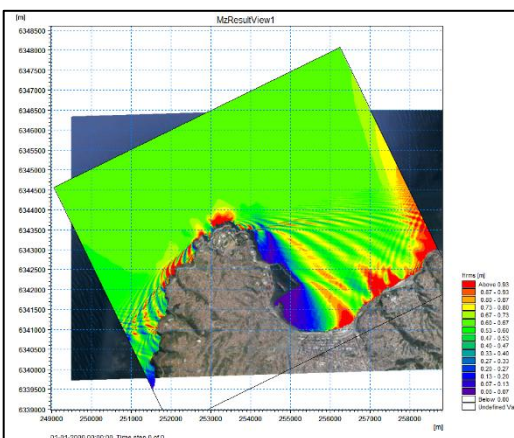


Figura 198: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=22[s].

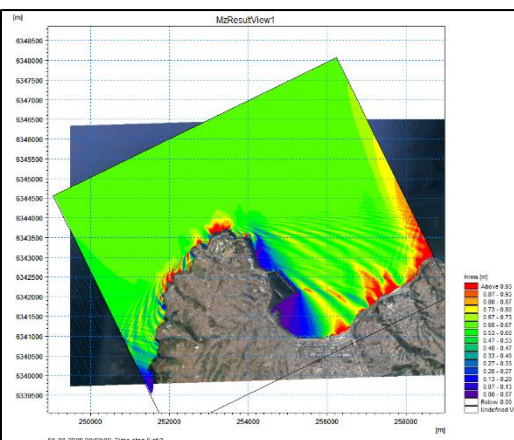


Figura 199: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=20[s].

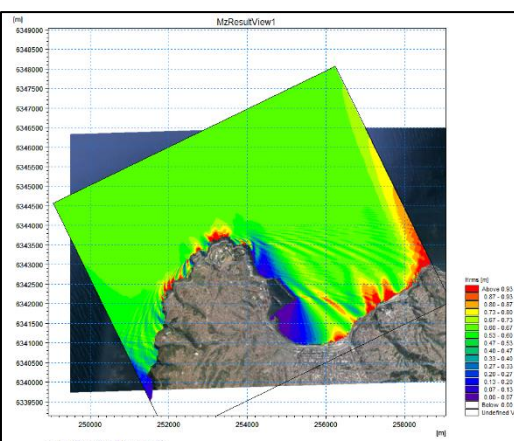


Figura 200: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=18[s].

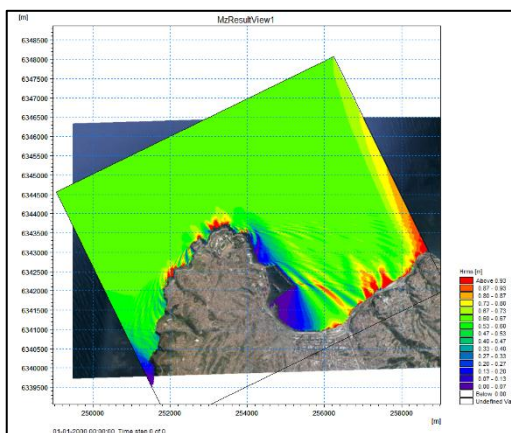


Figura 201: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=16[s].

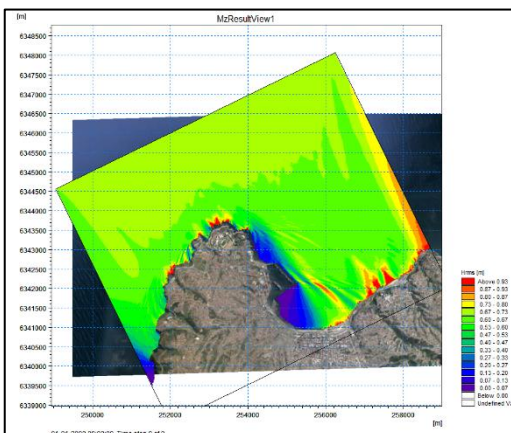


Figura 202: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=14[s].

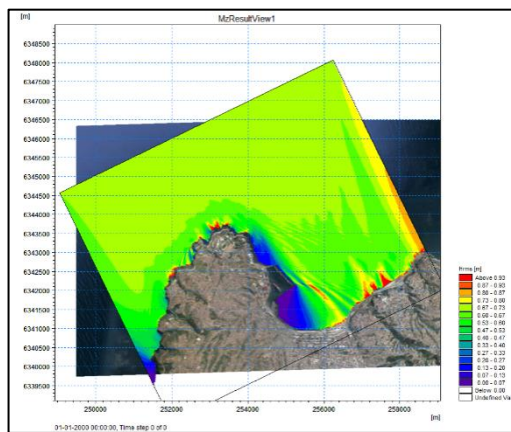


Figura 203: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=12[s].

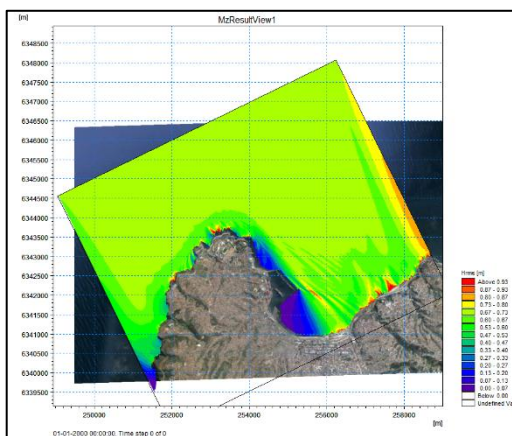


Figura 204: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW T=10[s].

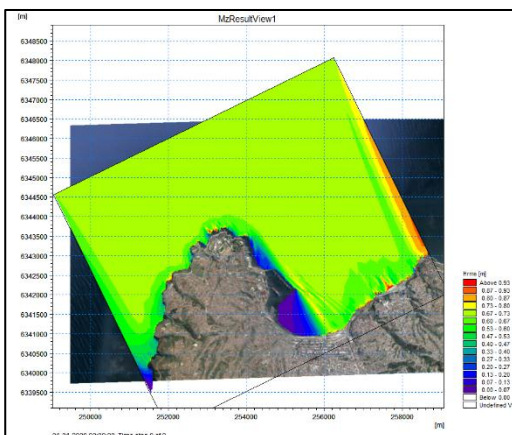


Figura 205: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=8[s].

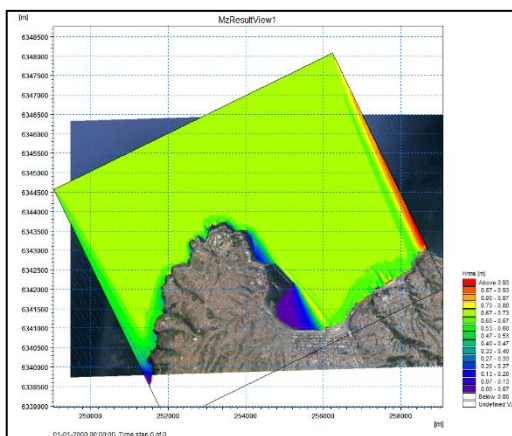


Figura 206: Modelos de mike21 PMS - Caso NNW, T=6[s].

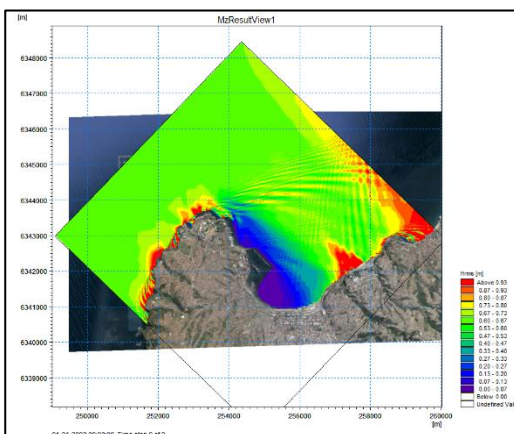


Figura 207: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=22[s].

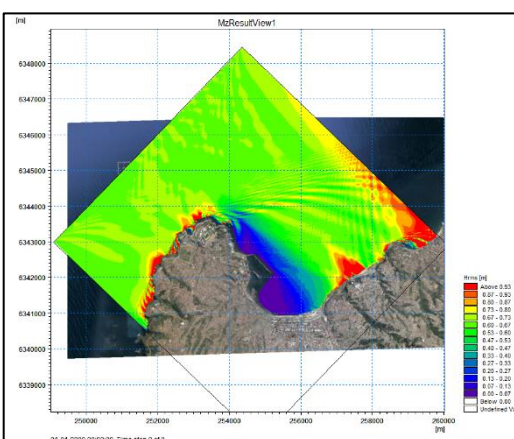


Figura 208: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=20[s].

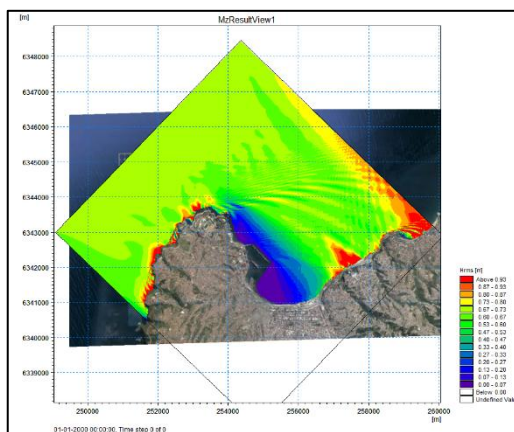


Figura 209: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=18[s].

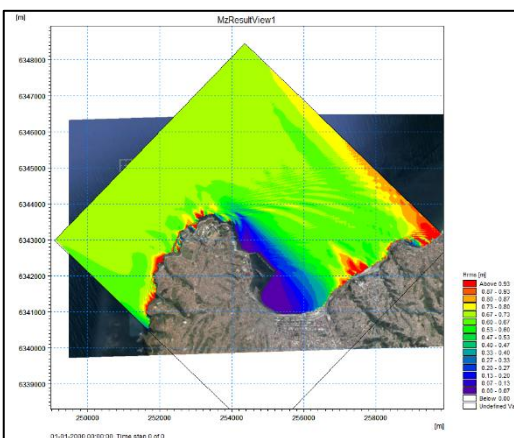


Figura 210: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=16[s].

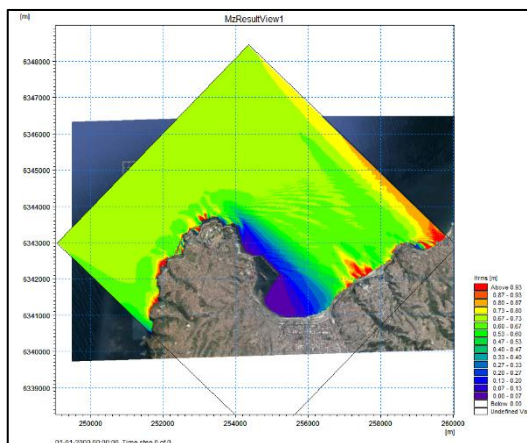


Figura 211: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=14[s].

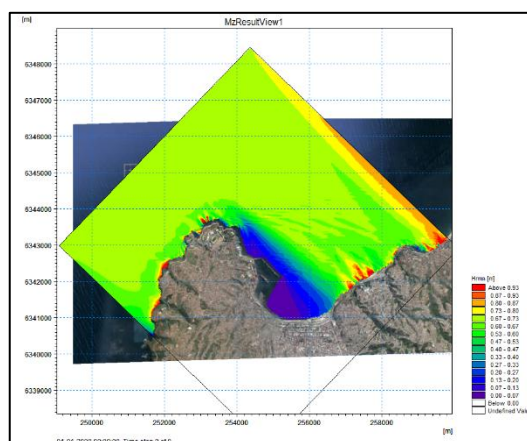


Figura 212: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=12[s].

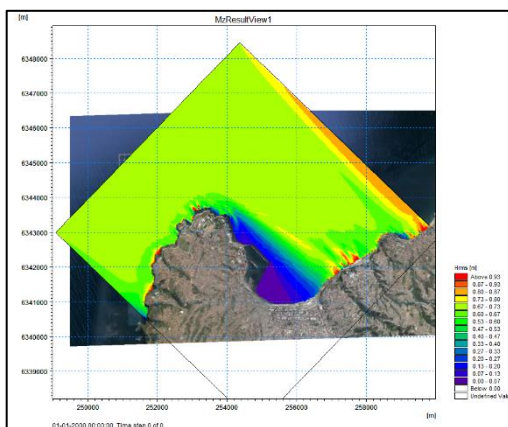


Figura 213: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=10[s].

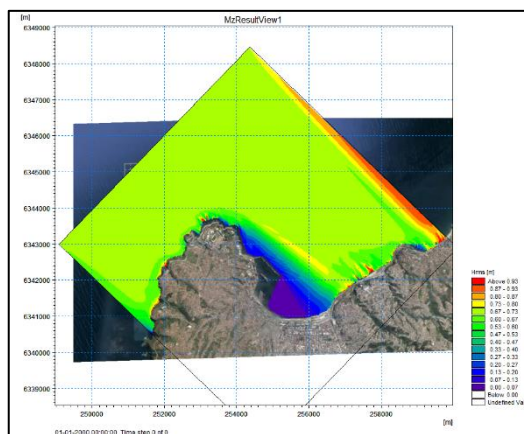


Figura 214: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=8[s].

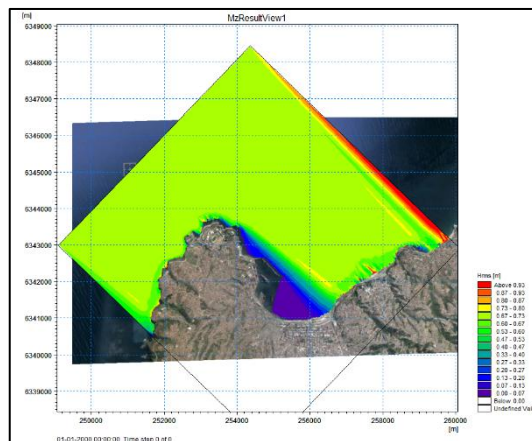


Figura 215: Modelos de mike21 PMS - Caso NW T=6[s].

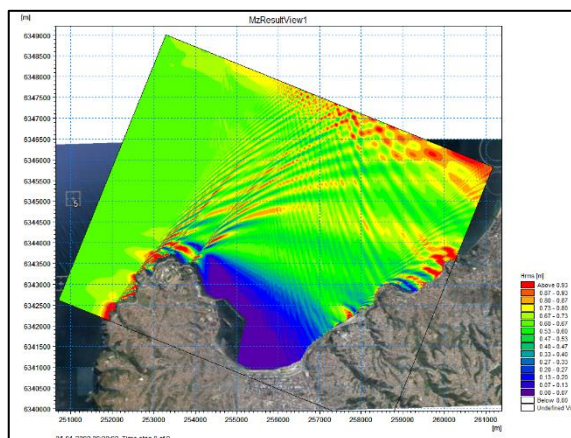


Figura 216: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=22[s].

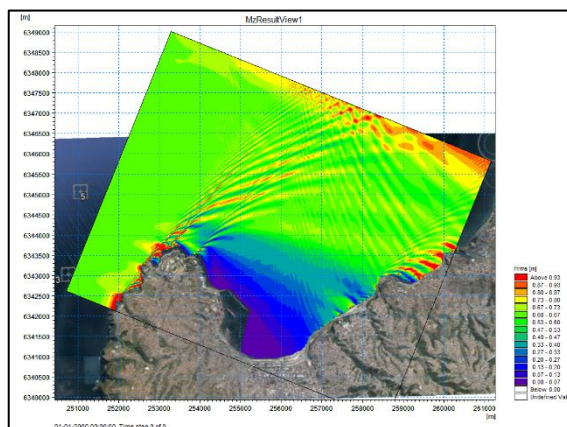


Figura 217: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=20[s].

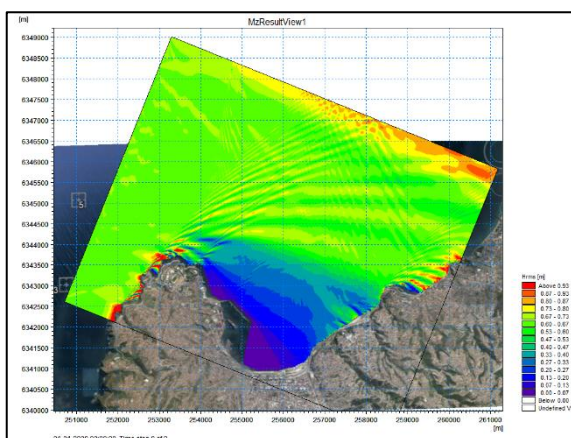


Figura 218: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=18[s].

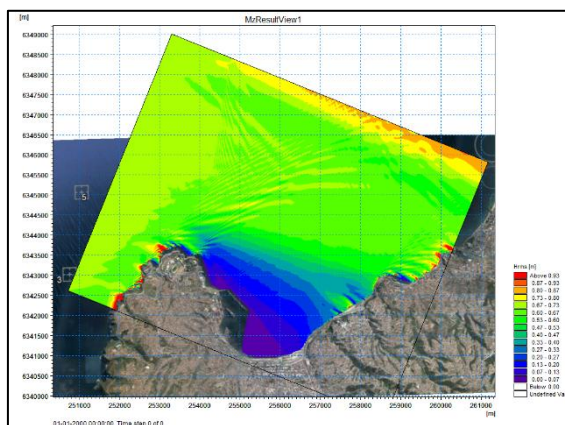


Figura 219: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=16[s].

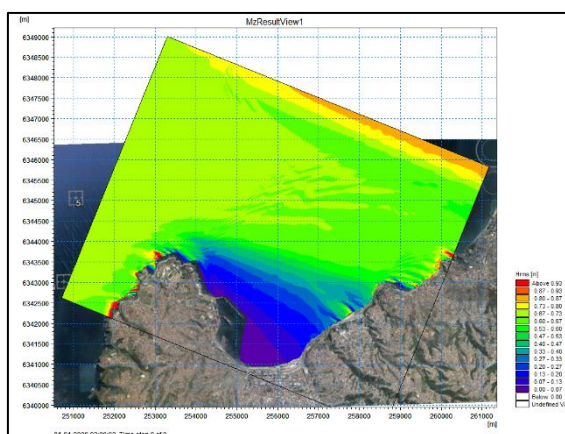


Figura 220: Modelos de mike21 PMS – Caso WNW T=14[s].

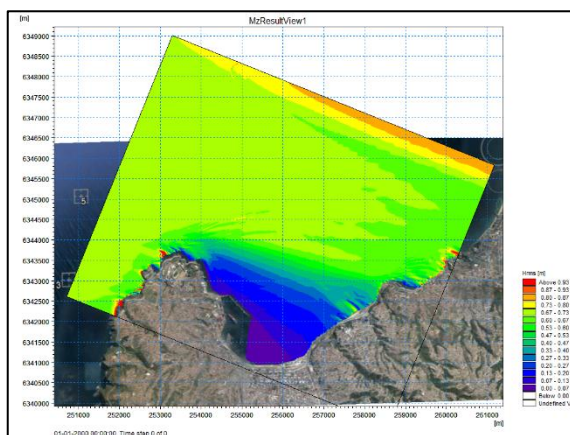


Figura 221: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=12[s].

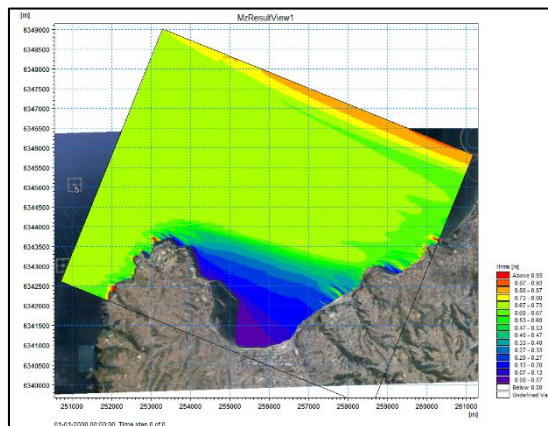


Figura 222: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=10[s].

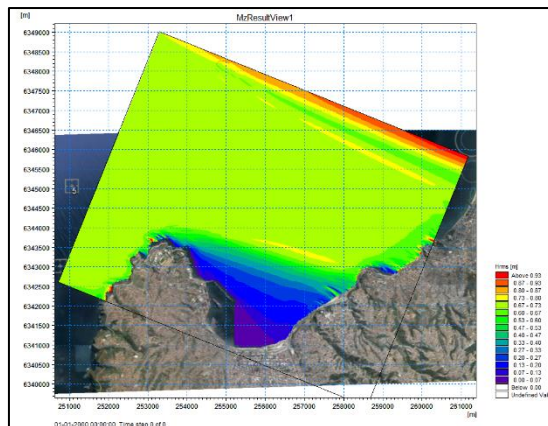


Figura 223: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=8[s].

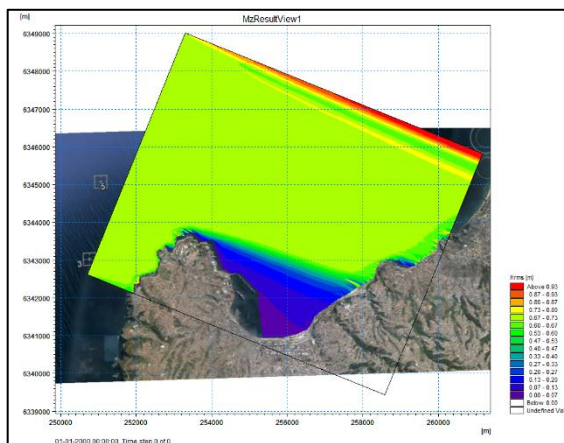


Figura 224: Modelos de mike21 PMS - Caso WNW T=6[s].

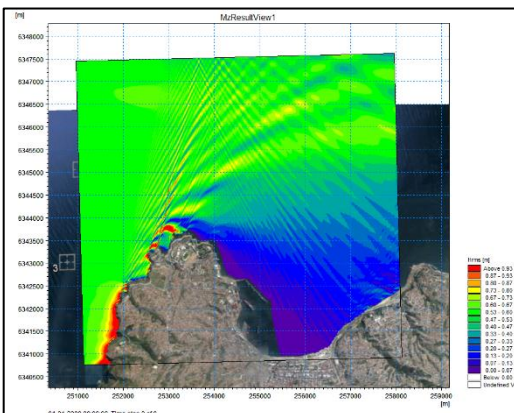


Figura 225: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=22[s].

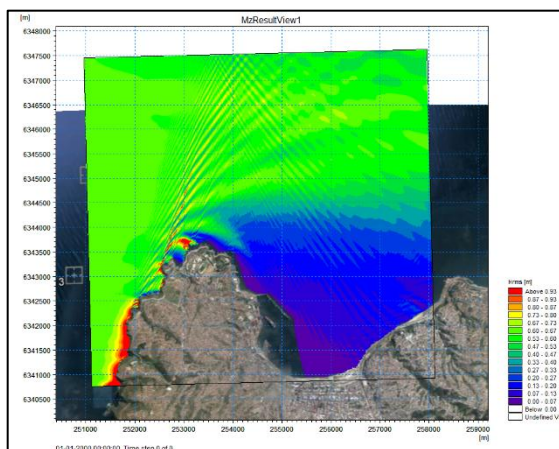


Figura 226: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=20[s].

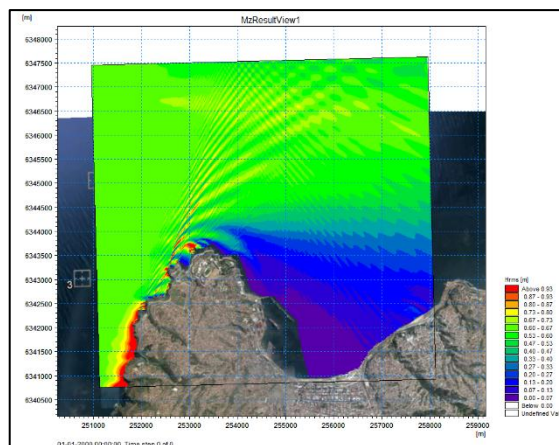


Figura 227: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=18[s].

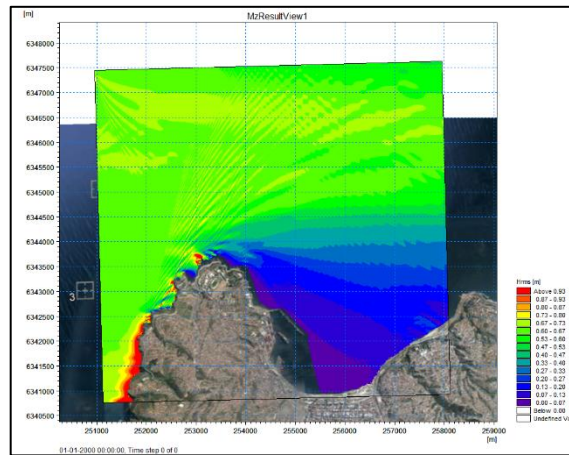


Figura 228: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=16[s].

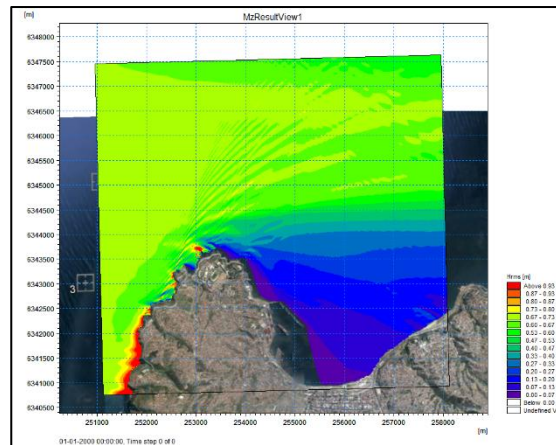


Figura 229: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=14[s].

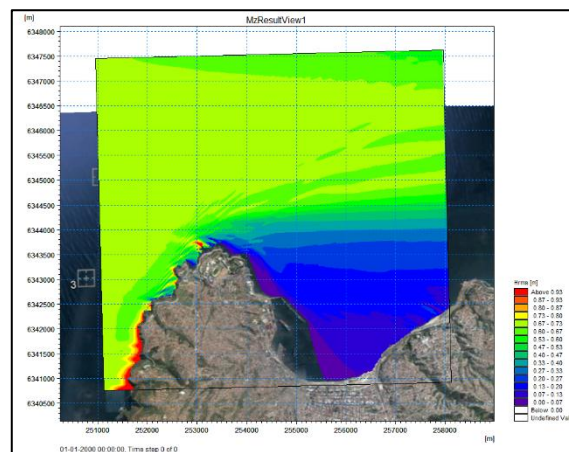


Figura 230: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=12[s].

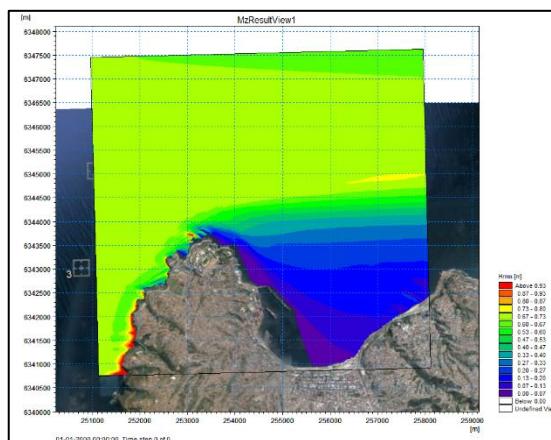


Figura 231: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=10[s].

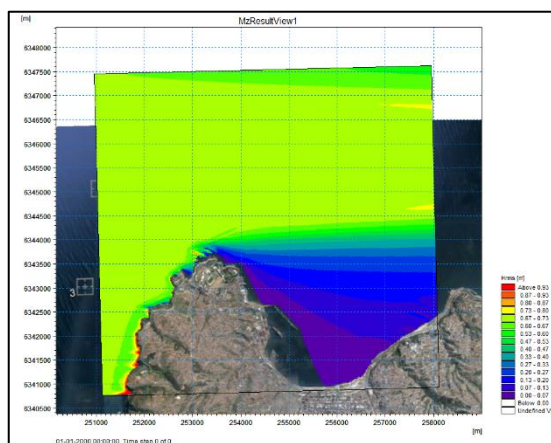


Figura 232: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=8[s].

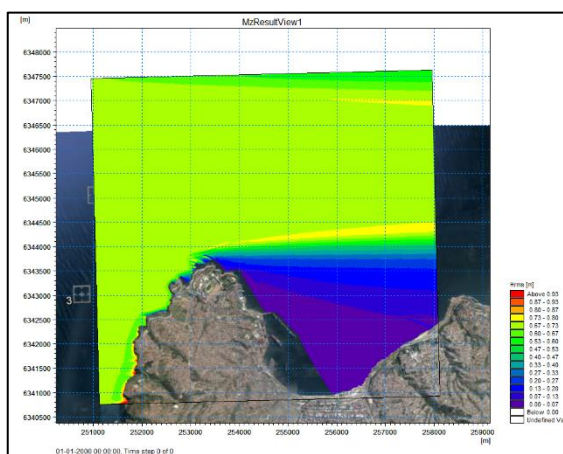


Figura 233: Modelos de mike21 PMS - Caso W T=6[s].

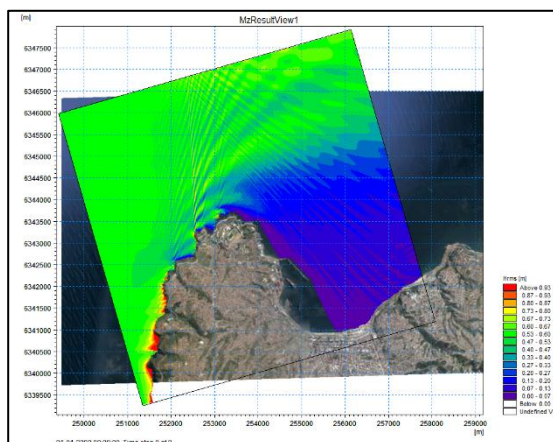


Figura 234: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=22[s].

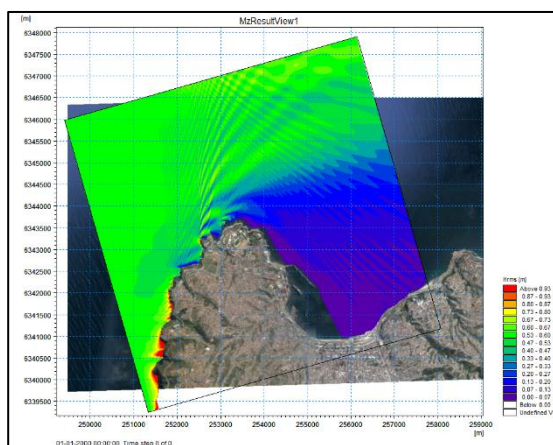


Figura 235: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=20[s].

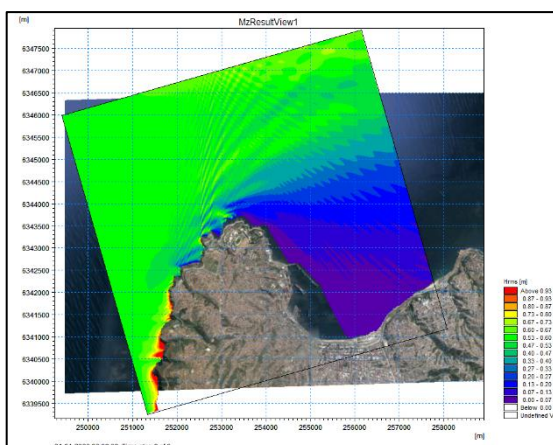


Figura 236: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=18[s].

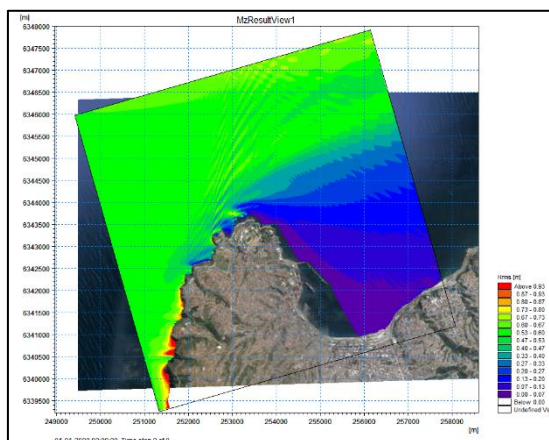


Figura 237: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=16[s].

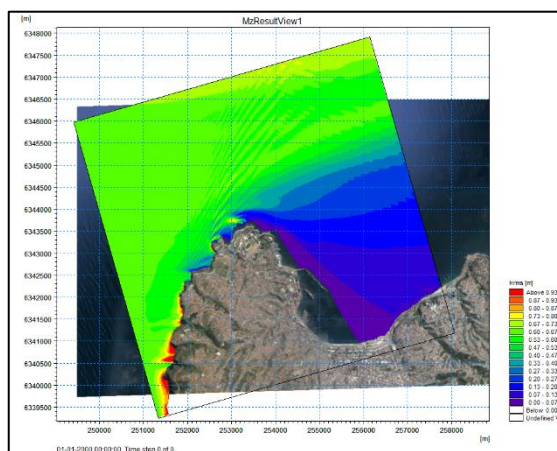


Figura 238: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=14[s].

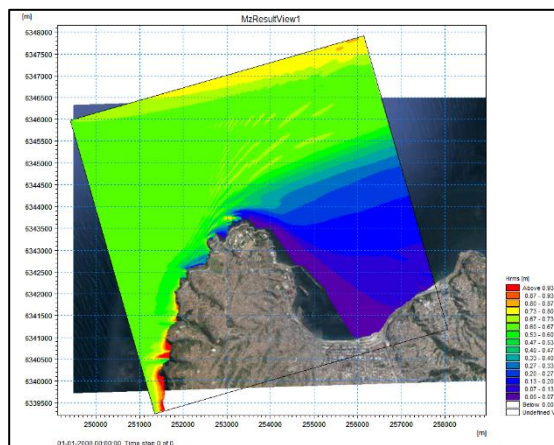


Figura 239: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=12[s].

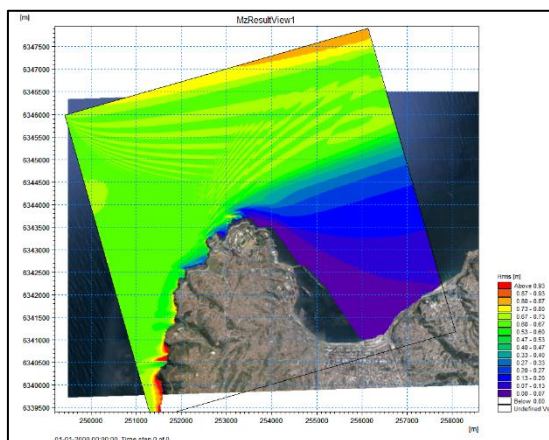


Figura 240: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=10[s].

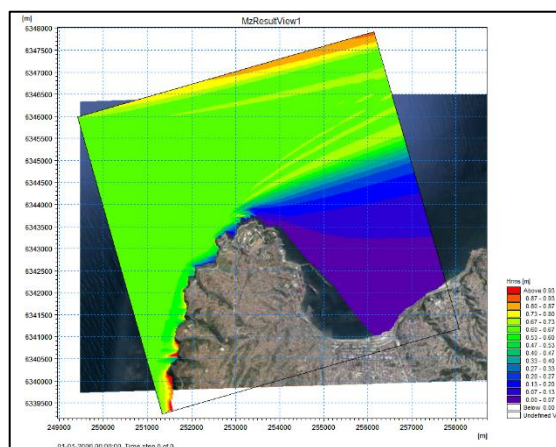


Figura 241: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=8[s].

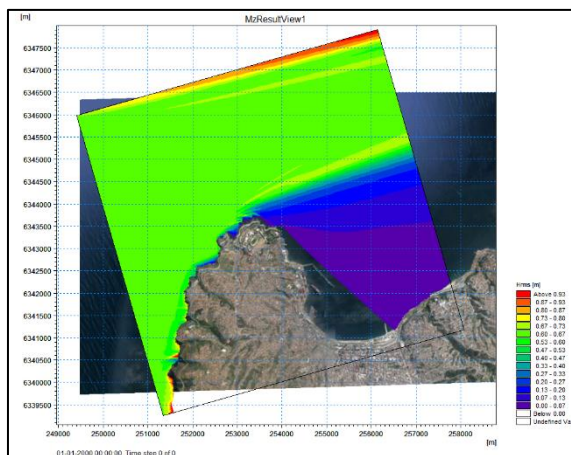


Figura 242: Modelos de mike21 PMS - Caso WSW T=6[s].

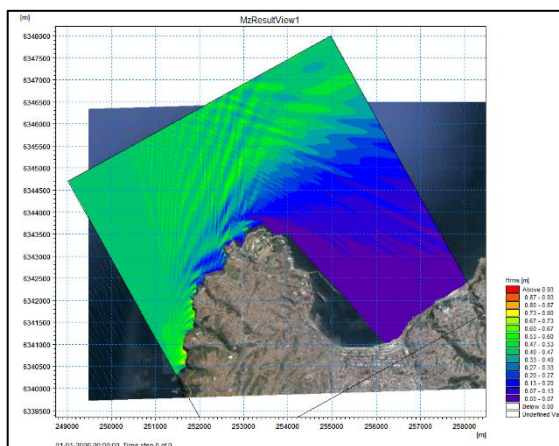


Figura 243: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=22[s].

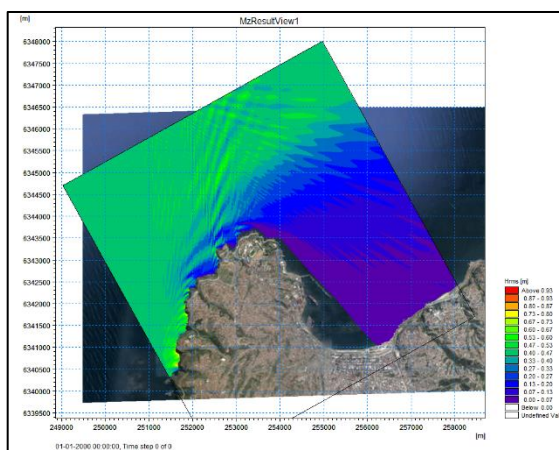


Figura 244: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=20[s].

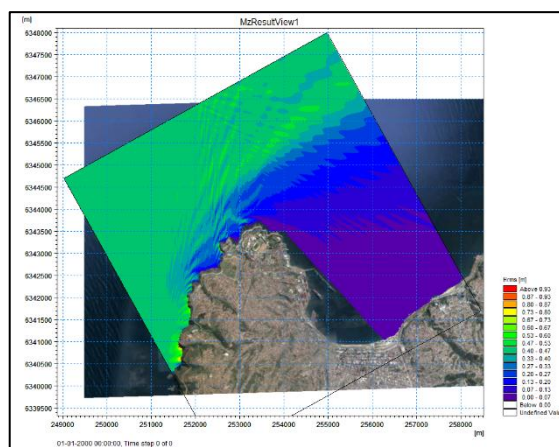


Figura 245: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=18[s].

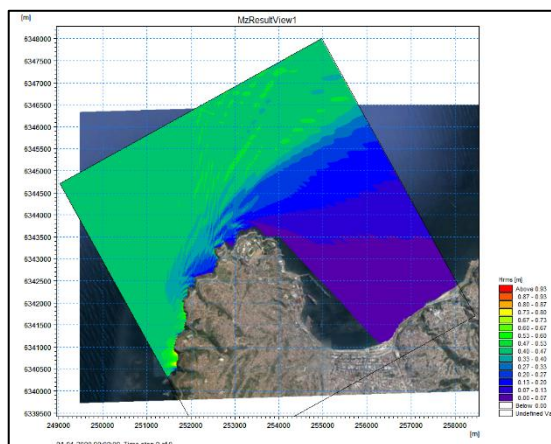


Figura 246: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=16[s].

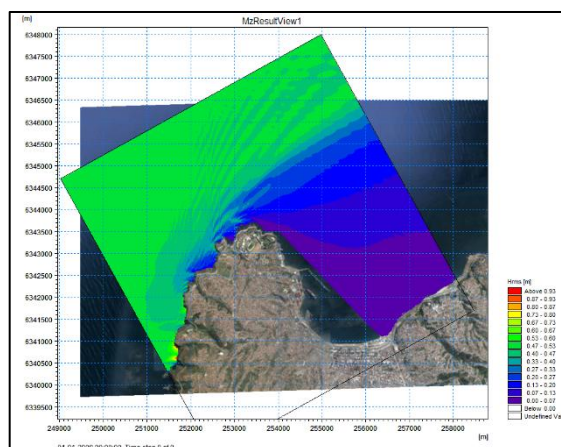


Figura 247: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=14[s].

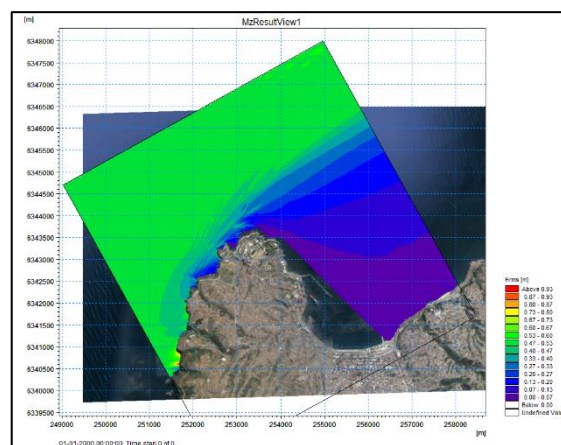


Figura 248: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=12[s].

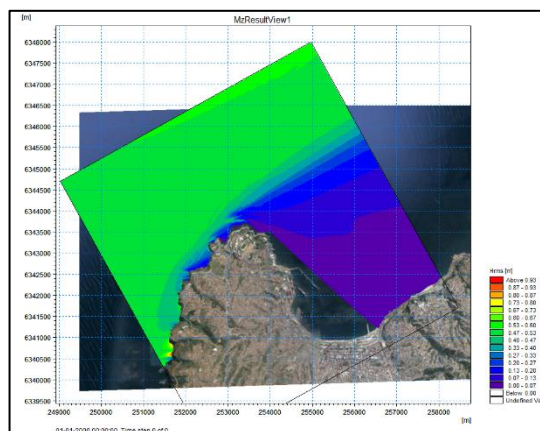


Figura 249: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=10[s].

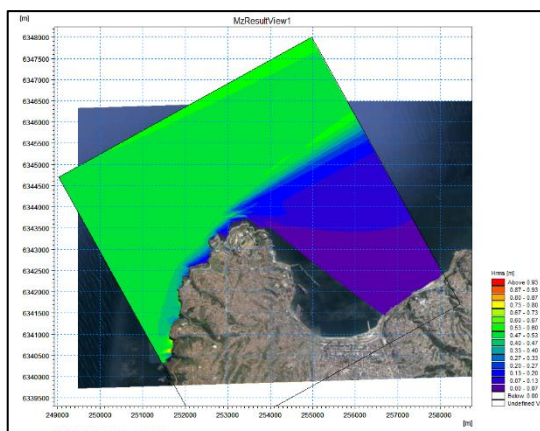


Figura 250: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=8[s].

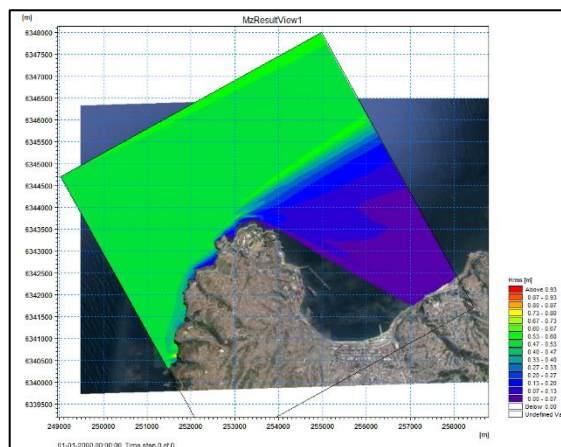


Figura 251: Modelos de mike21 PMS - Caso SW T=6[s].

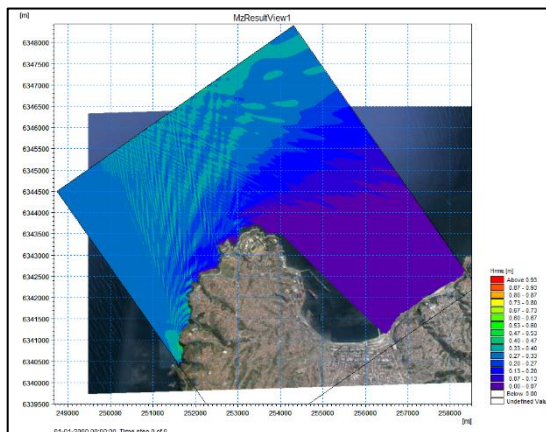


Figura 252: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=22[s].

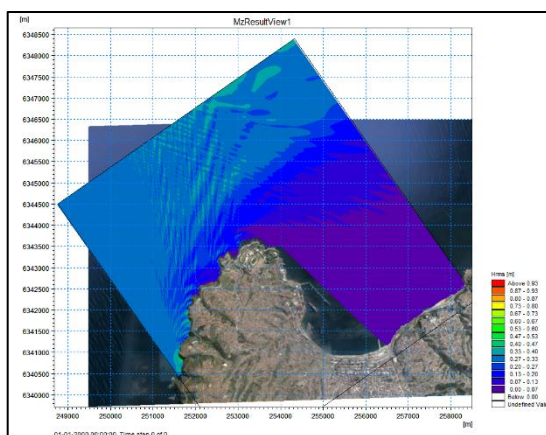


Figura 253: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=20[s].

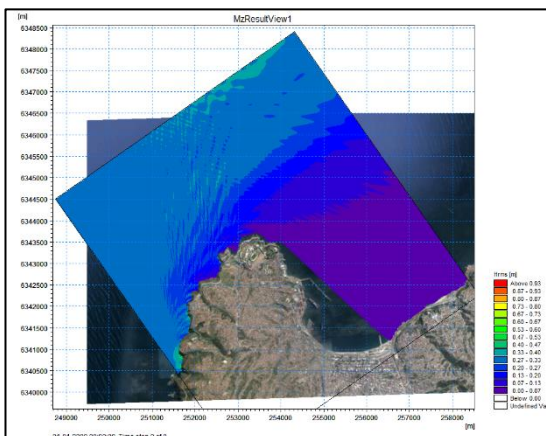


Figura 254: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=18[s].

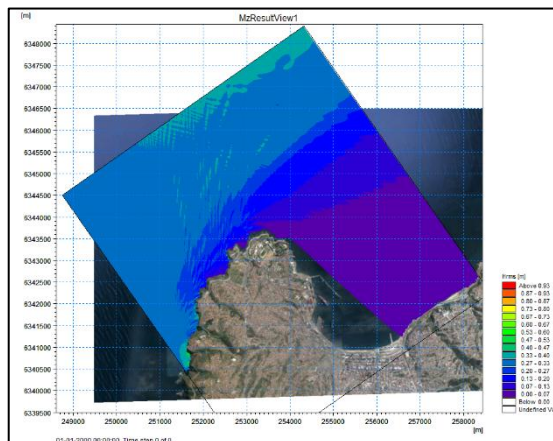


Figura 255: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=16[s].

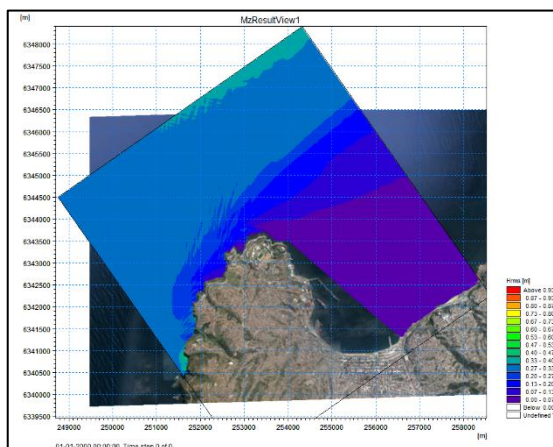


Figura 256: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=14[s].

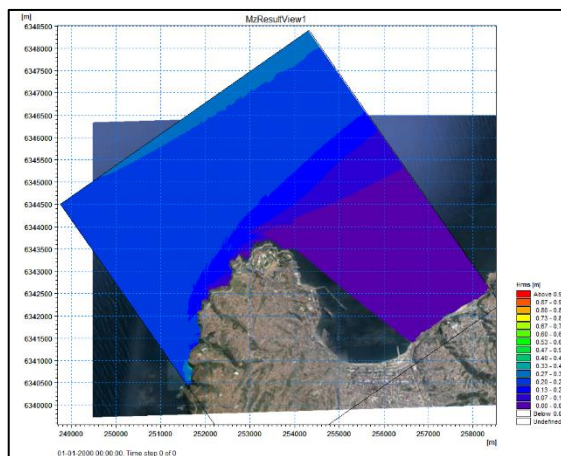


Figura 257: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=12[s].

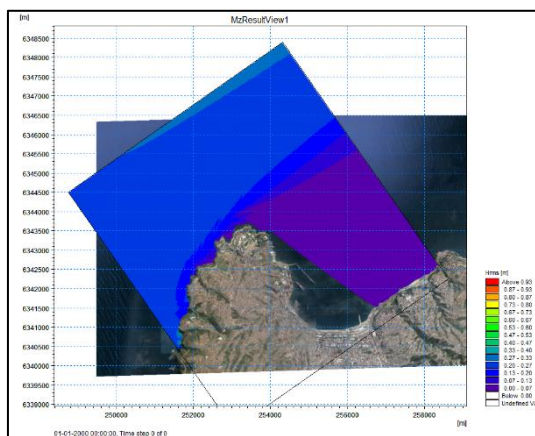


Figura 258: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=10[s].

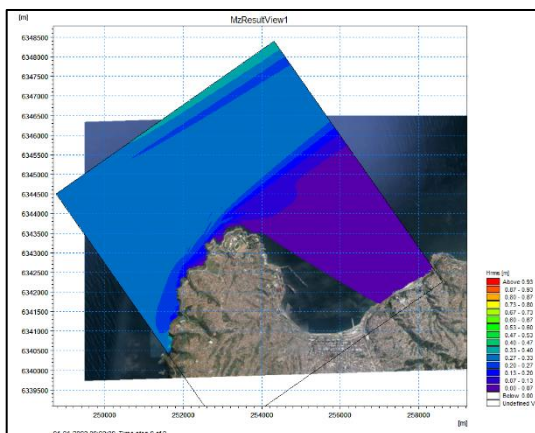


Figura 259: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=8[s].

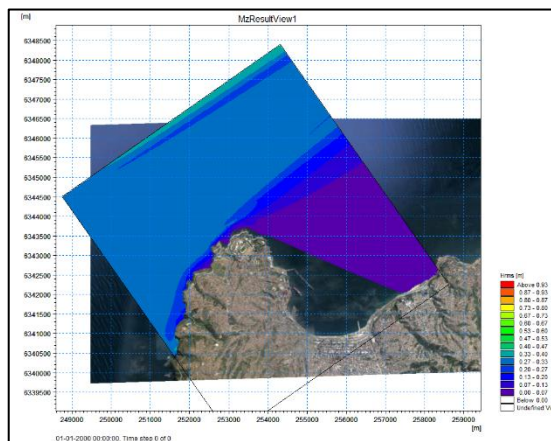


Figura 260: Modelos de mike21 PMS - Caso SSW T=6[s].

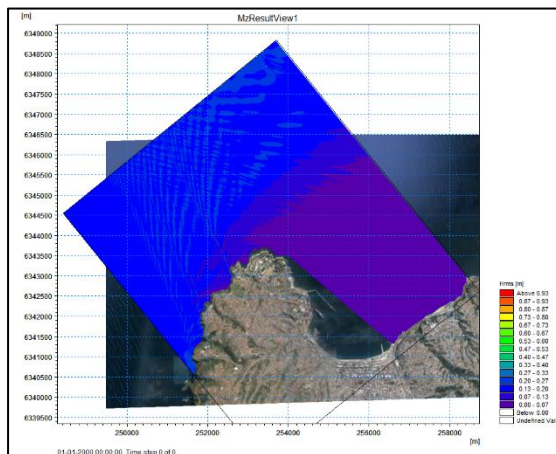


Figura 261: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=22[s].

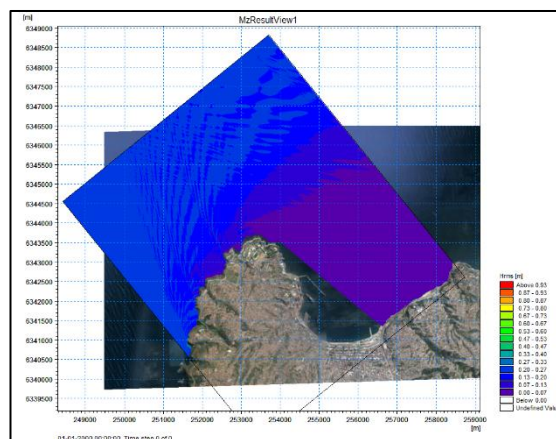


Figura 262: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=20[s].

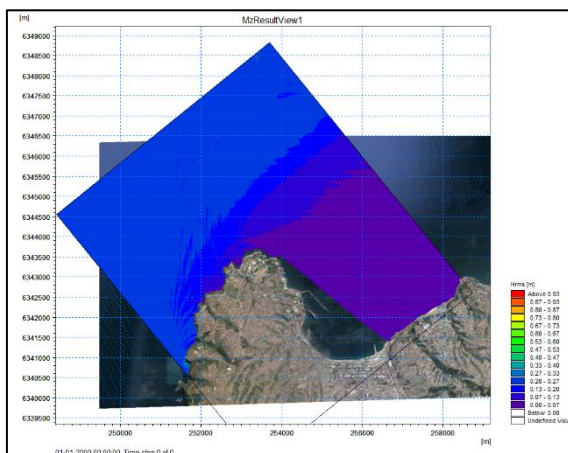


Figura 263: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=18[s].

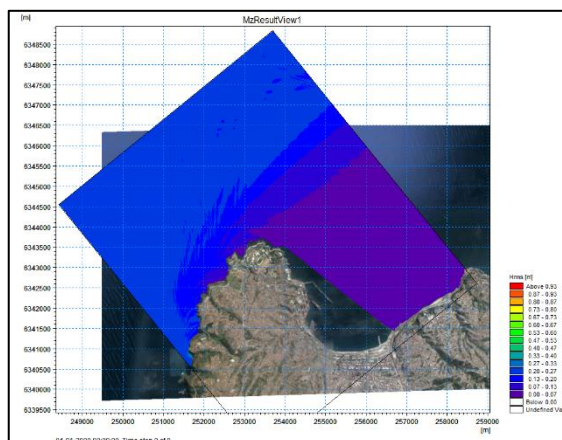


Figura 264: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=16[s].

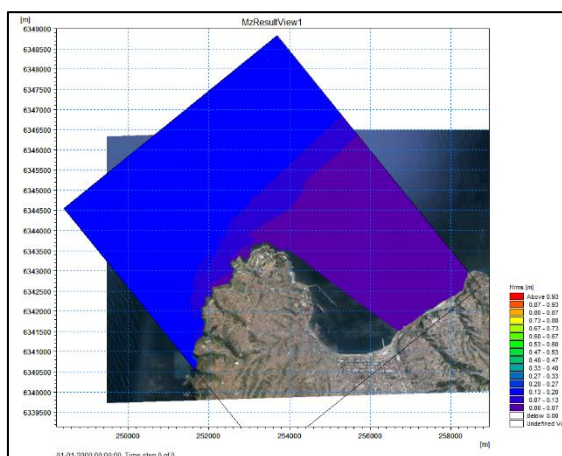


Figura 265: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=14[s].

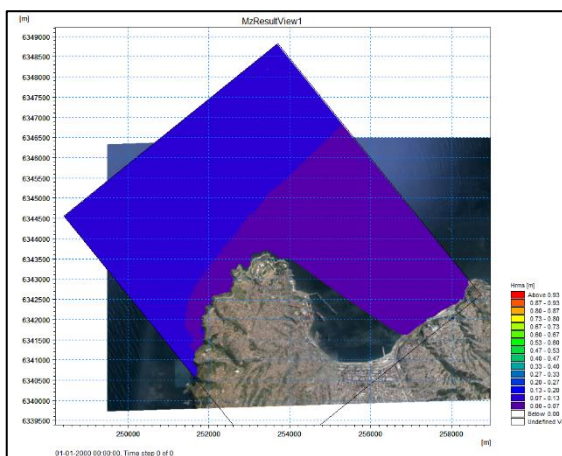


Figura 266: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=12[s].

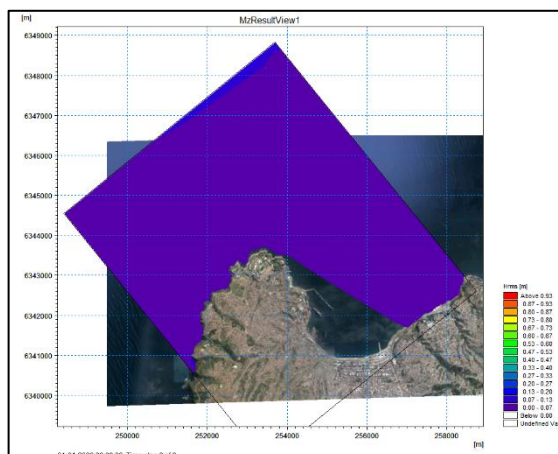


Figura 267: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=10[s].

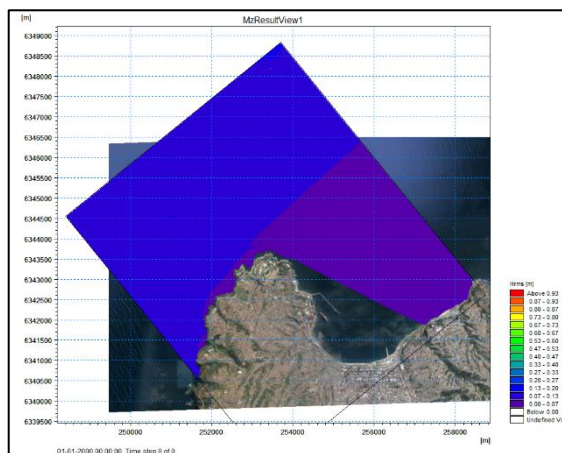


Figura 268: Modelos de mike21 PMS - Caso S T=8[s].

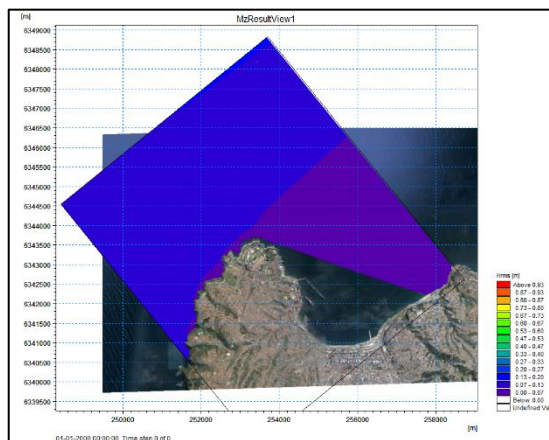


Figura 269: Modelos de mike21 PMS – Caso S T=6[s].