



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

# **MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES DE BAÑO PARA PLAYA HUAYQUIQUE**

**Alejandro Andrés Osses Michillanca**

Diciembre 2020

# MEJORAMIENTO DE CONDICIONES DE BAÑO PARA PLAYA HUAYQUIQUE

Alejandro Andrés Osses Michillanca

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
PATRICIO WINCKLER GREZ Profesor guía	_____	_____
MAURICIO MOLINA PEREIRA Revisor	_____	_____
JORGE ROJAS ALCAÍNO Revisor	_____	_____

## DECLARACIÓN

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

---

Patricio Winckler Grez

Profesor guía

---

Alejandro Osses Michillanca

Alumno memorista

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, a mis padres Liliana y Alejandro, a mis hermanas Natalia, Daniela y Romina y a mis mascotas, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. A mis amigos de la universidad: Camilo, Amanda, Iván y Mariana que gracias a su compañía los días en la carrera se hicieron memorables

Agradecer a todo el personal de la Dirección de Obras Portuarias Iquique por los datos entregados y el cariño recibido por parte de todos ellos.

# TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	15
2.	OBJETIVOS.....	16
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3.	ALCANCES .....	17
4.	MARCO TEÓRICO.....	19
4.1.	HIDRODINÁMICA DE ROMPIENTE.....	19
4.1.1.	PROPAGACIÓN DE OLEAJE.....	19
4.1.2.	PROCESOS COSTEROS.....	22
4.2.	MORFOLOGÍA DE PLAYA.....	27
4.2.1.	SEDIMENTOLOGÍA .....	28
4.2.2.	EQUILIBRIO MORFODINÁMICO DE LA PLAYA.....	30
4.2.3.	APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS .....	37
4.3.	DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.....	40
4.3.1.	CORAZA.....	41
4.3.2.	FILTRO .....	44
4.3.3.	NÚCLEO.....	44
4.3.4.	PIE DE APOYO .....	44
5.	METODOLOGÍA.....	46
5.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	46
5.2	ESTUDIOS DE CONDICIONES NATURALES.....	47
5.1.1.	BATIMETRÍA .....	47
5.1.2.	ESTUDIO DE MAREA.....	48
5.1.3.	ESTUDIO DE OLEAJE.....	48
5.1.4.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	49
5.3	MODELO MORFODINÁMICO DE LA PLAYA .....	50
5.4	DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN .....	50
6.	RESULTADOS .....	51
6.1.	CONDICIONES NATURALES DEL SECTOR .....	51
6.1.1.	ESTUDIO BATIMÉTRICO .....	51
6.1.2.	ESTUDIO DE MAREA.....	52
6.1.3.	ESTUDIO DE OLEAJE.....	53
6.1.4.	ANÁLISIS MORFODINÁMICO DE LA PLAYA .....	64

6.1.5.	MORFODINÁMICA DE PLAYA.....	67
6.2.	DISEÑO DE OBRA DE PROTECCIÓN .....	91
6.2.1.	BASES DE DISEÑO.....	91
6.2.2.	PROPAGACIÓN AL PIE DE LA OBRA .....	91
6.2.3.	DISEÑO DE DIQUE EXENTO .....	92
6.2.4.	PERFILES .....	95
6.3.	PRESUPUESTO.....	99
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
9.	ANEXOS.....	105
	ANEXO I .....	105
	ANEXO II .....	107
	ANEXO III .....	113

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 4-1:	Coeficientes de desviación estándar para alturas significativas extremas. ....	22
Tabla 4-2:	Límites de intervalo de confianza para altura significativa extrema. ....	22
Tabla 4-1:	Ejemplo pesos retenidos de muestra HB4.....	29
Tabla 5-1:	Datos de estación de monitoreo Iquique.....	46
Tabla 5-2:	Cartas náuticas utilizadas.....	47
Tabla 5-3:	Niveles obtenidos con el análisis no armónico de marea.....	48
Tabla 6-1:	Características de malla de propagación.....	51
Tabla 6-2:	Niveles de marea.....	52
Tabla 6-3:	Niveles de marea meteorológica.....	52
Tabla 6-4:	Niveles de diseño.....	53
Tabla 6-5:	Coeficientes de agitación en el punto A.....	53
Tabla 6-6:	Coeficientes de agitación en el punto B.....	53
Tabla 6-7:	Coeficiente de agitación en el punto C.....	54
Tabla 6-8:	Direcciones [°] en el Nodo A.....	56
Tabla 6-9:	Direcciones [°] en el Nodo B.....	56
Tabla 6-10:	Direcciones [°] en el Nodo C.....	56
Tabla 6-11:	Tabla de incidencia Altura Significativa vs Periodo Medio.....	59
Tabla 6-12:	Tabla de incidencia Altura Significativa vs Dirección Peak.....	60
Tabla 6-13:	Tabla de incidencia Dirección Peak vs Periodo Medio.....	60
Tabla 6-14:	Alturas de oleaje de tormentas calculadas por POT.....	62
Tabla 6-15:	Periodos de retorno con su respectiva altura y bandas de confianza al 95%.....	64
Tabla 6-18:	Resultados análisis granulométrico.....	66
Tabla 6-19:	Diámetro de muestras de sedimento.....	67
Tabla 6-20:	Parámetros para Pope & Dean (1986).....	70

Tabla 6-21: Modelaciones en Mopla.....	82
Tabla 6-22: Altura de diseño máxima propagada.....	92
Tabla 6-23: Parámetros de diseño.....	93
Tabla 6-24: Peso y diámetro de los elementos de la coraza.....	93
Tabla 6-25: Peso elementos del pie de apoyo.....	93
Tabla 6-26: Caudal de sobrepaso calculado.....	95
Tabla 6-27: Presupuesto diques exentos.....	100
Tabla 9-1: Alturas de oleaje de tormentas calculadas por Máximos Anuales.....	224

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 3-1: Ubicación playa Huayquique.....	17
Figura 4-1: Diagrama de asomeramiento no lineal de oleaje.....	20
Figura 4-2: Diagrama de difracción para oleaje con dirección 60°.....	23
Figura 4-3: Refracción provocada por cambios en la profundidad.....	25
Figura 4-4: Diagrama de la Ley de Snell.....	25
Figura 4-5: Zonificación de la playa.....	27
Figura 4-6: Diámetros de sedimento y su clasificación.....	28
Figura 4-7: Ejemplo de curva granulométrica muestra HB4.....	29
Figura 4-8: Configuración superior Saliente. Configuración inferior Tómbolo.....	31
Figura 4-9: Pope & Dean (1986).....	31
Figura 4-10: Ploteo adimensional de proyectos de rompeolas en Estados Unidos dependiendo de su configuración.....	32
Figura 4-11: Forma del perfil de equilibrio a largo plazo, Dean (1977).....	33
Figura 4-12: Forma en planta de Equilibrio Estático. Playa encajada.....	35
Figura 4-13: Forma en planta de Equilibrio Estático. Tómbolos y Salientes.....	36
Figura 4-14: Programas internos SMC.....	37
Figura 4-15: Polígono de playa en equilibrio.....	38
Figura 4-16: Modelo de evolución de perfil de playa.....	39
Figura 4-17: Modelo de evolución de la planta de la playa.....	39
Figura 4-18: Dique en talud.....	40
Figura 4-19: Fórmula de Hudson (1974).....	42
Figura 4-20: Fórmula de Van de Meer (1988).....	43
Figura 4-21: Coeficiente de permeabilidad Van de Meer (1988).....	44
Figura 4-22: Ábaco de Markle (1989) para calcular $N_s$ .....	45
Figura 5-1: Diagrama de la metodología del proyecto.....	46
Figura 5-2: Sondaje realizado en playa Huayquique.....	47
Figura 5-3: Ubicación de nodos de estudio frente a playa Huayquique.....	48
Figura 5-4: Muestras de sedimentos en playa Huayquique.....	49
Figura 6-1: Mallas de propagación.....	51
Figura 6-2: Marea Meteorológica.....	52
Figura 6-3: Coeficiente de Agitación Nodo A.....	54
Figura 6-4: Coeficiente de Agitación Nodo B.....	55
Figura 6-5: Coeficiente de Agitación Nodo C.....	55
Figura 6-6: Cambio en las direcciones de propagación en el Nodo A.....	57
Figura 6-7: Rosa de dispersión radial nodo A.....	58

Figura 6-8: Rosa de direcciones acumuladas nodo A.....	58
Figura 6-9: Serie de tiempo y valores escogidos.....	61
Figura 6-10: Distribución de Weibull.....	63
Figura 6-11: Distribución de altura de ola significativa.....	63
Figura 6-12: Muestras tomadas en playa Huayquique.....	64
Figura 6-13: Curvas granulométricas playa Huayquique.....	65
Figura 6-14: Cambios estacionales en playa Huayquique.....	67
Figura 6-15: Acreción y erosión en playa Huayquique.....	68
Figura 6-16: Sistemas de circulación cercanos a la costa.....	69
Figura 6-17: Ploteo de diques en gráfico adimensional de Dean & Pope (1986).....	71
Figura 6-18: Perfil de Dean con diámetros $d_{50} = 0,2$ [mm], $0,3$ [mm] y $0,4$ [mm].....	72
Figura 6-19: Aplicación de formulación de Hsu y Evans (1989) – Dirección $236$ [°].....	73
Figura 6-20: Aplicación de formulación de Hsu y Evans (1989) - Dirección $241$ [°].....	74
Figura 6-21: Aplicación de formulación de Hsu y Evans (1989) - Dirección $247$ [°].....	75
Figura 6-22: Generación de salientes frente a cada dique - $T_p=14$ [s] / $Dir=241$ [°].....	76
Figura 6-23: Isolneas del factor de sobrerrelleno $R_a$ .....	77
Figura 6-24: Cálculo del area entre los perfiles original y de relleno.....	78
Figura 6-25: Parámetros definidos en Petra para el análisis a corto plazo.....	79
Figura 6-26: Evolución de perfil a corto plazo – Clima medio.....	80
Figura 6-27: Evolución de perfil a corto plazo - Clima extremo.....	81
Figura 6-28: Generación de malla en Mopla.....	81
Figura 6-29: Alturas de ola Caso Clima Medio.....	83
Figura 6-30: Corrientes Caso Clima Medio.....	84
Figura 6-31: Movimiento de sedimento inicial Caso Clima Medio.....	85
Figura 6-32: Topografía inicial vs final Caso Clima Medio.....	86
Figura 6-33: Altura de ola Caso Clima Extremo.....	87
Figura 6-34: Corrientes Caso Clima Extremo.....	88
Figura 6-35: Movimiento de sedimento inicial Caso Clima Extremo.....	89
Figura 6-36: Topografía inicial vs final Caso Clima Extremo.....	90
Figura 6-37: Variaciones en la altura de ola propagada hasta su rompiente.....	92
Figura 6-38: Transmisión de oleaje en la zona abrigada.....	94
Figura 6-39: Perfiles dique A.....	96
Figura 6-40: Perfiles dique B.....	97
Figura 6-41: Perfiles dique C.....	98
Figura 6-42: Planta del proyecto.....	99
Figura 9-1: Tipos de rotura de oleaje.....	105
Figura 9-2: Clasificación de sedimento, Udden-Wentworth (1922).....	106
Figura 9-3: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 4$ [s].....	113
Figura 9-4: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 6$ [s].....	113
Figura 9-5: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 8$ [s].....	114
Figura 9-6: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 10$ [s].....	114
Figura 9-7: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 12$ [s].....	115
Figura 9-8: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 14$ [s].....	115
Figura 9-9: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 16$ [s].....	116
Figura 9-10: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 18$ [s].....	116
Figura 9-11: Malla gruesa - Dir: NNW, $T_p: 20$ [s].....	117
Figura 9-12: Malla gruesa - Dir: NW, $T_p: 4$ [s].....	117

Figura 9-13: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 6 [s].	118
Figura 9-14: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 8 [s].	118
Figura 9-15: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 10 [s].	119
Figura 9-16: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 12 [s].	119
Figura 9-17: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 14 [s].	120
Figura 9-18: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 16 [s].	120
Figura 9-19: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 18 [s].	121
Figura 9-20: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 20 [s].	121
Figura 9-21: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 4 [s].	122
Figura 9-22: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 6 [s].	122
Figura 9-23: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 8 [s].	123
Figura 9-24: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 10 [s].	123
Figura 9-25: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 12 [s].	124
Figura 9-26: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 14 [s].	124
Figura 9-27: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 16 [s].	125
Figura 9-28: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 18 [s].	125
Figura 9-29: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 20 [s].	126
Figura 9-30: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 4 [s].	126
Figura 9-31: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 6 [s].	127
Figura 9-32: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 8 [s].	127
Figura 9-33: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 10 [s].	128
Figura 9-34: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 12 [s].	128
Figura 9-35: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 14 [s].	129
Figura 9-36: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 16 [s].	129
Figura 9-37: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 18 [s].	130
Figura 9-38: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 20 [s].	130
Figura 9-39: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 4 [s].	131
Figura 9-40: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 6 [s].	131
Figura 9-41: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 8 [s].	132
Figura 9-42: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 10 [s].	132
Figura 9-43: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 12 [s].	133
Figura 9-44: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 14 [s].	133
Figura 9-45: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 16 [s].	134
Figura 9-46: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 18 [s].	134
Figura 9-47: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 20 [s].	135
Figura 9-48: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 4 [s].	135
Figura 9-49: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 6 [s].	136
Figura 9-50: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 8 [s].	136
Figura 9-51: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 10 [s].	137
Figura 9-52: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 12 [s].	137
Figura 9-53: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 14 [s].	138
Figura 9-54: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 16 [s].	138
Figura 9-55: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 18 [s].	139
Figura 9-56: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 20 [s].	139
Figura 9-57: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 4 [s].	140
Figura 9-58: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 6 [s].	140
Figura 9-59: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 8 [s].	141

Figura 9-60: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 10 [s].....	141
Figura 9-61: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 12 [s].....	142
Figura 9-62: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 14 [s].....	142
Figura 9-63: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 16 [s].....	143
Figura 9-64: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 18 [s].....	143
Figura 9-65: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 20 [s].....	144
Figura 9-66: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 4 [s].....	144
Figura 9-67: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 6 [s].....	145
Figura 9-68: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 8 [s].....	145
Figura 9-69: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 10 [s].....	146
Figura 9-70: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 12 [s].....	146
Figura 9-71: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 14 [s].....	147
Figura 9-72: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 16 [s].....	147
Figura 9-73: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 18 [s].....	148
Figura 9-74: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 20 [s].....	148
Figura 9-75: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 4 [s].....	149
Figura 9-76: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 6 [s].....	149
Figura 9-77: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 8 [s].....	150
Figura 9-78: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 10 [s].....	150
Figura 9-79: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 12 [s].....	151
Figura 9-80: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 14 [s].....	151
Figura 9-81: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 16 [s].....	152
Figura 9-82: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 18 [s].....	152
Figura 9-83: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 20 [s].....	153
Figura 9-84: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 4 [s].....	153
Figura 9-85: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 6 [s].....	154
Figura 9-86: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 8 [s].....	154
Figura 9-87: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 10 [s].....	155
Figura 9-88: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 12 [s].....	155
Figura 9-89: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 14 [s].....	156
Figura 9-90: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 16 [s].....	156
Figura 9-91: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 18 [s].....	157
Figura 9-92: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 20 [s].....	157
Figura 9-93: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 4 [s].....	158
Figura 9-94: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 6 [s].....	158
Figura 9-95: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 8 [s].....	159
Figura 9-96: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 10 [s].....	159
Figura 9-97: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 12 [s].....	160
Figura 9-98: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 14 [s].....	160
Figura 9-99: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 16 [s].....	161
Figura 9-100: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 18 [s].....	161
Figura 9-101: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 20 [s].....	162
Figura 9-102: Malla mediana - Dir: W, Tp: 4 [s].....	162
Figura 9-103: Malla mediana - Dir: W, Tp: 6 [s].....	163
Figura 9-104: Malla mediana - Dir: W, Tp: 8 [s].....	163
Figura 9-105: Malla mediana - Dir: W, Tp: 10 [s].....	164
Figura 9-106: Malla mediana - Dir: W, Tp: 12 [s].....	164

Figura 9-107: Malla mediana - Dir: W, Tp: 14 [s].....	165
Figura 9-108: Malla mediana - Dir: W, Tp: 16 [s].....	165
Figura 9-109: Malla mediana - Dir: W, Tp: 18 [s].....	166
Figura 9-110: Malla mediana - Dir: W, Tp: 20 [s].....	166
Figura 9-111: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 4 [s].....	167
Figura 9-112: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 6 [s].....	167
Figura 9-113: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 8 [s].....	168
Figura 9-114: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 10 [s].....	168
Figura 9-115: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 12 [s].....	169
Figura 9-116: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 14 [s].....	169
Figura 9-117: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 16 [s].....	170
Figura 9-118: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 18 [s].....	170
Figura 9-119: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 20 [s].....	171
Figura 9-120: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 4 [s].....	171
Figura 9-121: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 6 [s].....	172
Figura 9-122: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 8 [s].....	172
Figura 9-123: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 10 [s].....	173
Figura 9-124: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 12 [s].....	173
Figura 9-125: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 14 [s].....	174
Figura 9-126: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 16 [s].....	174
Figura 9-127: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 18 [s].....	175
Figura 9-128: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 20 [s].....	175
Figura 9-129: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 4 [s].....	176
Figura 9-130: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 6 [s].....	176
Figura 9-131: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 8 [s].....	177
Figura 9-132: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 10 [s].....	177
Figura 9-133: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 12 [s].....	178
Figura 9-134: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 14 [s].....	178
Figura 9-135: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 16 [s].....	179
Figura 9-136: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 18 [s].....	179
Figura 9-137: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 20 [s].....	180
Figura 9-138: Malla mediana - Dir: S, Tp: 4 [s].....	180
Figura 9-139: Malla mediana - Dir: S, Tp: 6 [s].....	181
Figura 9-140: Malla mediana - Dir: S, Tp: 8 [s].....	181
Figura 9-141: Malla mediana - Dir: S, Tp: 10 [s].....	182
Figura 9-142: Malla mediana - Dir: S, Tp: 12 [s].....	182
Figura 9-143: Malla mediana - Dir: S, Tp: 14 [s].....	183
Figura 9-144: Malla mediana - Dir: S, Tp: 16 [s].....	183
Figura 9-145: Malla mediana - Dir: S, Tp: 18 [s].....	184
Figura 9-146: Malla mediana - Dir: S, Tp: 20 [s].....	184
Figura 9-147: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 4 [s].....	185
Figura 9-148: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 6 [s].....	185
Figura 9-149: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 8 [s].....	186
Figura 9-150: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 10 [s].....	186
Figura 9-151: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 12 [s].....	187
Figura 9-152: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 14 [s].....	187
Figura 9-153: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 16 [s].....	188

Figura 9-154: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 18 [s].....	188
Figura 9-155: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 20 [s].....	189
Figura 9-156: Malla fina - Dir: NW, Tp: 4 [s]. ....	189
Figura 9-157: Malla fina - Dir: NW, Tp: 6 [s]. ....	190
Figura 9-158: Malla fina - Dir: NW, Tp: 8 [s]. ....	190
Figura 9-159: Malla fina - Dir: NW, Tp: 10 [s]. ....	191
Figura 9-160: Malla fina - Dir: NW, Tp: 12 [s]. ....	191
Figura 9-161: Malla fina - Dir: NW, Tp: 14 [s]. ....	192
Figura 9-162: Malla fina - Dir: NW, Tp: 16 [s]. ....	192
Figura 9-163: Malla fina - Dir: NW, Tp: 18 [s]. ....	193
Figura 9-164: Malla fina - Dir: NW, Tp: 20 [s]. ....	193
Figura 9-165: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 4 [s]. ....	194
Figura 9-166: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 6 [s]. ....	194
Figura 9-167: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 8 [s]. ....	195
Figura 9-168: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 10 [s]. ....	195
Figura 9-169: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 12 [s]. ....	196
Figura 9-170: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 14 [s]. ....	196
Figura 9-171: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 16 [s]. ....	197
Figura 9-172: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 18 [s]. ....	197
Figura 9-173: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 20 [s]. ....	198
Figura 9-174: Malla fina - Dir: W, Tp: 4 [s]. ....	198
Figura 9-175: Malla fina - Dir: W, Tp: 6 [s]. ....	199
Figura 9-176: Malla fina - Dir: W, Tp: 8 [s]. ....	199
Figura 9-177: Malla fina - Dir: W, Tp: 10 [s]. ....	200
Figura 9-178: Malla fina - Dir: W, Tp: 12 [s]. ....	200
Figura 9-179: Malla fina - Dir: W, Tp: 14 [s]. ....	201
Figura 9-180: Malla fina - Dir: W, Tp: 16 [s]. ....	201
Figura 9-181: Malla fina - Dir: W, Tp: 18 [s]. ....	202
Figura 9-182: Malla fina - Dir: W, Tp: 20 [s]. ....	202
Figura 9-183: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 4 [s]. ....	203
Figura 9-184: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 6 [s]. ....	203
Figura 9-185: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 8 [s]. ....	204
Figura 9-186: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 10 [s]. ....	204
Figura 9-187: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 12 [s]. ....	205
Figura 9-188: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 14 [s]. ....	205
Figura 9-189: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 16 [s]. ....	206
Figura 9-190: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 18 [s]. ....	206
Figura 9-191: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 20 [s]. ....	207
Figura 9-192: Malla fina - Dir: SW, Tp: 4 [s]. ....	207
Figura 9-193: Malla fina - Dir: SW, Tp: 6 [s]. ....	208
Figura 9-194: Malla fina - Dir: SW, Tp: 8 [s]. ....	208
Figura 9-195: Malla fina - Dir: SW, Tp: 10 [s]. ....	209
Figura 9-196: Malla fina - Dir: SW, Tp: 12 [s]. ....	209
Figura 9-197: Malla fina - Dir: SW, Tp: 14 [s]. ....	210
Figura 9-198: Malla fina - Dir: SW, Tp: 16 [s]. ....	210
Figura 9-199: Malla fina - Dir: SW, Tp: 18 [s]. ....	211
Figura 9-200: Malla fina - Dir: SW, Tp: 20 [s]. ....	211

Figura 9-201: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 4 [s].	212
Figura 9-202: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 6 [s].	212
Figura 9-203: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 8 [s].	213
Figura 9-204: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 10 [s].	213
Figura 9-205: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 12 [s].	214
Figura 9-206: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 14 [s].	214
Figura 9-207: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 16 [s].	215
Figura 9-208: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 18 [s].	215
Figura 9-209: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 20 [s].	216
Figura 9-210: Malla fina - Dir: S, Tp: 4 [s].	216
Figura 9-211: Malla fina - Dir: S, Tp: 6 [s].	217
Figura 9-212: Malla fina - Dir: S, Tp: 8 [s].	217
Figura 9-213: Malla fina - Dir: S, Tp: 10 [s].	218
Figura 9-214: Malla fina - Dir: S, Tp: 12 [s].	218
Figura 9-215: Malla fina - Dir: S, Tp: 14 [s].	219
Figura 9-216: Malla fina - Dir: S, Tp: 16 [s].	219
Figura 9-217: Malla fina - Dir: S, Tp: 18 [s].	220
Figura 9-218: Malla fina - Dir: S, Tp: 20 [s].	220
Figura 9-219: Cambio en las direcciones de propagación en el nodo B.	221
Figura 9-220: Cambio en las direcciones de propagación en el nodo C.	221
Figura 9-221: Rosa de dispersión radial nodo B.	222
Figura 9-222: Rosa de dispersión radial nodo C.	222
Figura 9-223: Rosa de dispersiones acumuladas nodo B.	223
Figura 9-224: Malla de direcciones acumuladas nodo C.	223
Figura 9-225: Vida útil del proyecto.	225
Figura 9-226: Nivel de daño, Van der Meer (1988).	226
Figura 9-227: Caudal de sobrepaso admisible de acuerdo con el tipo de estructura.	226

## **RESUMEN**

Una de las principales actividades económicas de la Región de Tarapacá es el turismo; actividad que ha ido en aumento en los últimos años, especialmente en temporada de verano. De acuerdo con la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante DIRECTEMAR, en la Región de Tarapacá en la comuna de Iquique existen 28 playas, de las cuales solo 2 son aptas para el baño: playa Cavancha que se encuentra en la ciudad de Iquique y playa Chanavayita que se ubica a 55 km de la ciudad. Esta escasa disponibilidad de playas induce una alta ocupación en playa Cavancha. Playa Huayquique se encuentra a 5 km al sur de la ciudad de Iquique y es utilizada para actividades deportivas y de esparcimiento, pero no es apta para bañistas.

Los diques exentos son estructuras estabilizadoras que cambian la configuración de la playa mediante la transformación del oleaje en la zona de rompiente. A diferencia de las estructuras perpendiculares a la línea de costa, como un espigón, no bloquean el flujo continuo del transporte longitudinal de sedimentos, siempre y cuando no se genere un tómbolo, teniendo un impacto negativo menor en la playa y en playas cercanas.

En el presente trabajo se plantea mejorar playa Huayquique mediante la implementación de tres diques exentos que disipen la energía del oleaje en la zona abrigada. Para esto fue necesaria la caracterización del lugar de estudio mediante: análisis de clima medio, que permitió dar cuenta del oleaje reinante del sector, con un 68% de los datos de oleaje con alturas entre 0,8 [m] y 1,6 [m], un 62% de datos con periodos entre los 12 [s] y 16 [s] y una dirección predominante proveniente del WSW; Mediante el análisis de clima extremo se determinó una altura significativa de 3,78 [m] con periodo de retorno de 50 años, esta altura fue propagada mediante Goda (1985) hasta el pie de la estructura entregando una altura  $H_{1/3} = 4,35$  [m]; A través del análisis granulométrico se determinó que el sedimento de playa Huayquique corresponde a arena media, con una selección muy bien clasificada, siendo necesario un volumen de sobrerrelleno de 77.000 [m<sup>3</sup>].

Las obras de defensa poseen una extensión de 80 [m] cada una, una cota de coronamiento de 1 [m] sobre el NRS y ubicados a una profundidad de 4 [m], además de estar construidos enteramente de material de coraza con un peso de  $W_{50} = 4,7$  [Ton]. Estos diques de cresta baja y alta permeabilidad permitirán que exista un mayor flujo de energía hacia la zona abrigada, evitando que se acumule arena en el trasdós de la estructura. La transmisibilidad de los diques permite que la altura de la ola disminuya un 50% para alturas cercanas a oleaje extremo, y un 60% para alturas de clima medio. Finalmente, el proyecto posee un costo total aproximado de \$4.462.889.576.

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento está orientado al desarrollo de un proyecto capaz de modificar las condiciones de playa Huayquique, cuya condición dinámica actual hace que esta playa no sea apta para el baño. Mediante el programa SMC, desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (2000), (capítulo 4), se caracterizan las condiciones dinámicas de la playa a largo y corto plazo para distintas características de oleaje. En el mismo capítulo se presentan las configuraciones de línea esperada con la nueva configuración.

También se presenta la formulación utilizada para diseñar el dique exento de cresta baja, siendo este distinto a un dique convencional, ya que al ser de cresta baja la transmisión del oleaje es mayor, y ayuda a prevenir la formación de un tómbolo. En el capítulo 5 se muestra la metodología utilizada para llevar a cabo el proyecto.

El capítulo 6 comienza mostrando los resultados de los estudios de condiciones naturales en el sector que permiten conocer el ambiente energético de la playa. Estos estudios son necesarios para determinar el diseño estructural como operacional de la estructura. Finalmente, se modela la playa con la configuración de diques propuesta y se analizan los cambios morfodinámicos de la playa.

En el capítulo 7 se presentan recomendaciones y conclusiones del estudio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar una propuesta de proyecto en playa Huayquique que cambie las condiciones energéticas del oleaje en el sector, logrando que la playa sea apta para el baño.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las condiciones naturales del sector de estudio (oleaje, mareas, batimetría, granulometría de sedimentos).
- Diseñar una propuesta que disminuya la energía del oleaje en la zona abrigada y que transforme la morfología de la playa.
- Analizar los cambios morfodinámicos debido a la estructura y a ciertas condiciones de oleaje.
- Elaborar planos de perfil y en planta del diseño de la estructura.
- Entregar los costos estimativos del proyecto.

### 3. ALCANCES

El proyecto se ubica en playa Huayquique, mostrada en la Figura 3-1. La playa posee una extensión de aproximadamente 600 [m] de largo y se encuentra ubicada a 5 [km] al sur de Iquique, entre las coordenadas UTM 382.050 [m] y 7.757.370 [m], y las coordenadas 382.170 [m] y 7.756.640 [m].



**Figura 3-1: Ubicación playa Huayquique.**

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de Google Earth.

La línea de playa se considerará como el veril 0 del NRS de la topobatimetría entregada por la DOP más el NMM calculado a través del estudio de marea, por lo que en este proyecto se realizará a lo menos un análisis simplificado del perfil transversal de la playa.

Los datos de oleaje se obtuvieron gratuitamente del Atlas de Oleaje de Chile (Ref 1) de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso. De acuerdo con la página del Atlas: "La información estadística fue generada con el modelo Wavewatch III v.4.18, calibrado a partir de mediciones de altimetría satelital y de boyas".

Los datos de marea fueron descargados del sitio web Sea Level Station Monitoring, que provee datos del nivel del mar entregados por distintas estaciones alrededor del mundo. Los datos utilizados corresponden a los niveles de marea del puerto de Iquique del año 2017.

Se utilizó el programa SMC para determinar los perfiles de equilibrio de la playa a largo plazo. Debido a que el programa no considera la transmisibilidad del dique, el perfil en planta corresponde a una aproximación de la configuración de la línea de playa. El SMC es un programa creado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la

Universidad de Cantabria, y el manual fue descargado de la página del SMC (Ref 2), junto con el resto de documentos temáticos referentes al tema.

Mopla es un programa de modelación morfodinámica a corto plazo de la playa, por lo que el modelo es fiable hasta eventos de 72 horas. Además, posee limitaciones de mallado recomendables para minimizar errores, lo que provoca que los diques diseñados tiendan a ser deformados. Para que la deformación de los diques sea mínima, se orientaron las mallas de propagación de tal manera que los diques quedasen del norte al sur de la malla. Además, para simplificar el modelo se consideró una altura de 10 [m] para los diques, y así no ser confundidos con una barra de arena en modelaciones donde el dique se encontrará sumergido.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. HIDRODINÁMICA DE ROMPIENTE

Las condiciones naturales del oleaje en el sector son fundamentales para diseñar una estructura capaz de cumplir el objetivo de abrigar la playa. Para esto es necesario conocer algunos conceptos:

#### 4.1.1. PROPAGACIÓN DE OLAJE

Para diseñar cualquier estructura en la zona costera es necesario contar con oleaje propagado en la zona de estudio. Nicolau del Roure (2004) realizó una recopilación de cuatro métodos de propagación, los cuales fueron extraídos del Proyecto de Título de Matías Quezada (Ref 4).

#### PARÁMETROS DE RESUMEN

A través de parámetros de resumen extraídos de cada espectro de oleaje, altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ), periodo peak ( $T_p$ ) y dirección promedio de la energía (MWD) se propaga el oleaje de cada parámetro como un evento aislado.

#### CUASI-PURISTA

Este método de propagación fue utilizado para este proyecto, y consiste en propagar oleaje unitario ( $H_{m0} = 1$ [m]) junto con diversos periodos y direcciones. La altura unitaria permite conocer el coeficiente de agitación del lugar de estudio, con lo que posteriormente se puede realizar el estudio de oleaje tanto de clima medio como clima extremo en el punto de interés.

#### CUASI-PURISTA MODIFICADA

Este método funciona de la misma manera que el método cuasi-purista, con la diferencia que este método no utiliza solamente oleaje unitario si no que varias alturas para una transferencia espectral que caracterice de una mejor manera la zona de rompiente.

#### PURISTA

Se basa en la propagación del espectro de oleaje desde aguas profundas al punto de interés, transfiriendo cada ola con su periodo y dirección que fueron medidos. Esto es propagar el registro de oleaje completo.

#### MÉTODO DE PROPAGACIÓN GODA 1985

La ecuación propuesta por Goda (1985) presentada en Goda (2000) (Ref 4) ayuda a determinar una altura de oleaje en la zona de rompiente considerando solo asomeramiento. La Ecuación 4-1 permite calcular la altura de ola  $H_{1/3}$  para obras flexibles como lo es un dique en talud.

$$\text{Ecuación 4-1} \quad H_{\frac{1}{3}} = \begin{cases} K_s H'_0 & \text{si } \frac{h}{L_0} \geq 0,2 \\ \min[(\beta_0 H'_0 + \beta_1 h), \beta_{m\acute{a}x} H'_0, K_s H'_0] & \text{si } \frac{h}{L_0} < 0,2 \end{cases}$$

Donde:

$h$  = Profundidad al pie de la obra [m].

$L_0$  = Longitud de la ola en aguas profundas [m].

$H'_0$  = Altura de ola equivalente en aguas profundas [m].

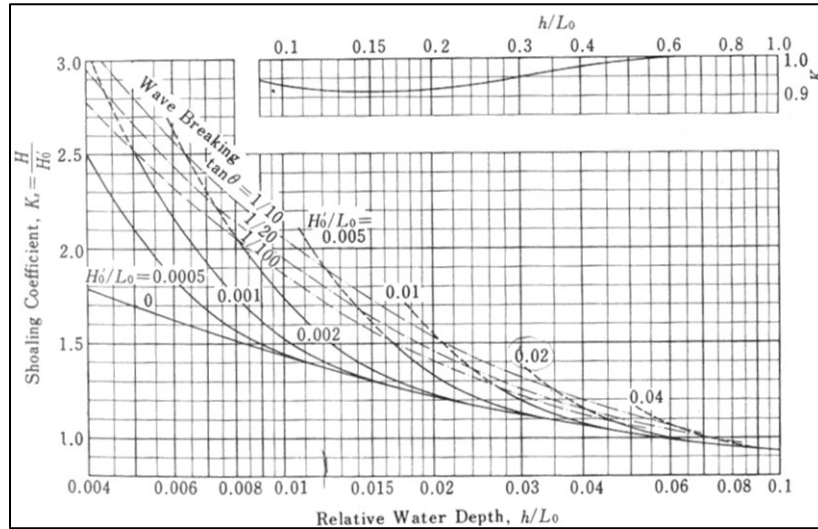
$\tan\theta$  = Pendiente de fondo [°]

Ecuación 4-2 
$$\beta_0 = 0,028 \left(\frac{H'_0}{L_0}\right)^{-0,38} e^{(2,4\tan\theta)}$$

Ecuación 4-3 
$$\beta_1 = 0,52e^{(4,2\tan\theta)}$$

Ecuación 4-4 
$$\beta_{m\acute{a}x} = \acute{m}ax \left[ 0,92; 0,32 \left(\frac{H'_0}{L_0}\right)^{-0,29} e^{(2,4\tan\theta)} \right]$$

Para obtener el valor del coeficiente de asomeramiento  $K_s$ , se utiliza el ábaco mostrado en la Figura 4-1:



**Figura 4-1: Diagrama de asomeramiento no lineal de oleaje.**  
Fuente: Random Seas and Design of Maritime Structures (Ref 4).

Este modelo presenta la limitación de que el periodo peak no puede ser superior a 16 [s] y la profundidad mínima que se puede alcanzar son 10 [pies] o 3.03 [m].

### MODELO SWAN

La ecuación de balance de energía del oleaje, propuesta por Holthuijsen (2007) permite describir el comportamiento de la propagación de oleaje desde aguas profundas a aguas someras.

Ecuación 4-5 
$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} \cdot E}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} \cdot E}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} \cdot E}{\partial \theta} = S$$

Donde:

$E$  = Energía de la componente de oleaje con frecuencia  $f$  y dirección  $\theta$ , en el punto espacial  $(x, y)$  en el tiempo  $t$ .

$C_{g,x}$  y  $C_{g,y}$  = Celeridad del oleaje en la dirección  $x$  e  $y$ .

$C_{\theta}$  = Velocidad de propagación en el espacio espectral.

$S$  = Término fuente de energía.

SWAN (Ref 5) es un modelo de tercera generación, que desarrolla la ecuación de balance de acción de la ola. Esta ecuación es igual a la ecuación de balance de oleaje mostrada anteriormente (Ecuación 4-5), pero se sustituye la densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$  por la densidad de acción  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ . Esta ecuación de balance de energías necesita ser modificada para poder incluir los efectos de transferencia de energía entre olas y corrientes como se muestra en la ecuación que presenta Hasselmann et al. (1973):

$$\text{Ecuación 4-6} \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x \cdot N}{\partial x} + \frac{\partial C_y \cdot N}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta \cdot N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_\sigma \cdot N}{\partial \sigma} = \frac{S}{\sigma}$$

Donde:

$\frac{\partial N}{\partial t}$  = Razón de cambio local en el tiempo de la densidad de acción.

$\frac{\partial C_x \cdot N}{\partial x}$  = Propagación de acción en el espacio con velocidad  $C_x$ .

$\frac{\partial C_y \cdot N}{\partial y}$  = Propagación de acción en el espacio con velocidad  $C_y$ .

$\frac{\partial C_\theta \cdot N}{\partial \theta}$  = Refracción inducida por variaciones de fondo y corrientes.

$\frac{\partial C_\sigma \cdot N}{\partial \sigma}$  = Variación de la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y corrientes.

$\frac{S}{\sigma}$  = Término fuente expresado como densidad de energía.

Este último término representa los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales ola a ola. Además, puede ser presentado como la superposición de diferentes términos energéticos:

$$\text{Ecuación 4-7} \quad S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$$

$S_{in}$  = Término debido a la transferencia de energía del viento a las olas.

$S_{ds}$  = Término debido al fenómeno White-capping.

$S_{nl}$  = Interacciones no lineales entre las olas.

## BANDAS DE CONFIANZA

El pronóstico de altura significativa extrema se realiza para varias distribuciones de probabilidad, y posee un error de estimación que puede aumentar o disminuir el valor determinado en el ajuste. Por ello se suelen utilizar bandas de confianza para distintos porcentajes de confiabilidad. El procedimiento de cálculo se realiza determinando la desviación estándar normalizada de acuerdo con la Ecuación 4-8.

$$\text{Ecuación 4-8} \quad \sigma_{\%} = \frac{1}{\sqrt{N}} [1,0 + a(Xr - c - \varepsilon \ln v)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$N$  = Número de datos de altura de ola.

$v$  =  $N/Nt$

- $Nt$  = Número de años de registro.  
 $Xr$  =  $(H - B)/A$ , Para Gumbel.  
 $Xr$  =  $[(H - B)/A]^k$ , Para Weibull.  
 $a$  =  $a_1 \exp[a_2 N^{-1,3} + \kappa \sqrt{-\ln v}]$

Goda (2000) propuso los coeficientes para determinar la desviación estándar empírica, mostrados en la Tabla 4-1. Para obtener las bandas de confianza de acuerdo con el porcentaje de confiabilidad se utilizó la Tabla 4-2.

**Tabla 4-1: Coeficientes de desviación estándar para alturas significativas extremas.**

Distribution	$a_1$	$a_2$	$\kappa$	$c$	$\alpha$
FT-I	0.64	9.0	0.93	0	1.33
Weibull ( $k = 0.75$ )	1.65	11.4	-0.63	0	1.15
Weibull ( $k = 1.0$ )	1.92	11.4	0	0.3	0.90
Weibull ( $k = 1.4$ )	2.05	11.4	0.69	0.4	0.72
Weibull ( $k = 2.0$ )	2.24	11.4	1.34	0.5	0.54

Fuente: *Random seas and design of maritime structures*. (Ref 4).

**Tabla 4-2: Límites de intervalo de confianza para altura significativa extrema.**

Confidence Level (%)	Confidence Interval Bounds Around $H_{sr}$	Probability of Exceeding Upper Bound (%)
80	$\pm 1.28\sigma_r$	10.0
85	$\pm 1.44\sigma_r$	7.5
90	$\pm 1.65\sigma_r$	5.0
95	$\pm 1.96\sigma_r$	2.5
99	$\pm 2.58\sigma_r$	0.5

Fuente: *Características Estadísticas del Oleaje*. (Ref 15).

#### 4.1.2. PROCESOS COSTEROS

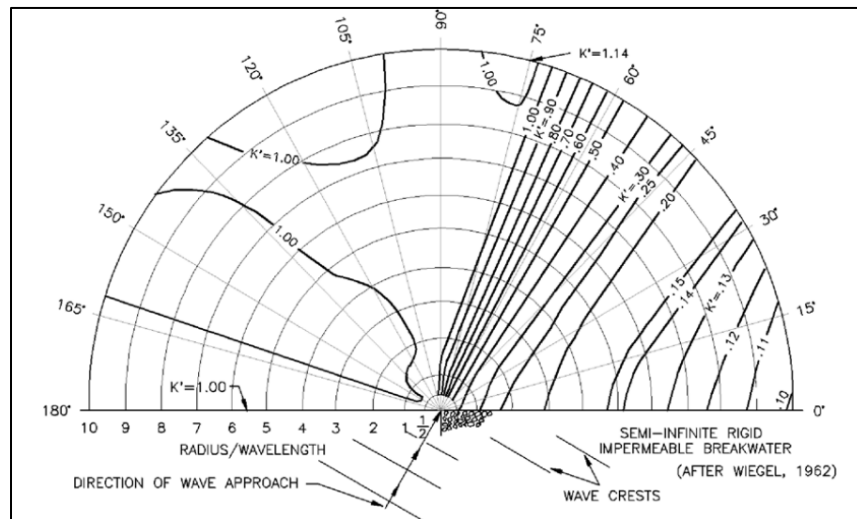
El oleaje proveniente de aguas profundas cambia a medida que se acerca a la costa, afectando parámetros como altura, periodo y dirección principalmente. Estos cambios son producidos por la diferencia de profundidad que experimenta la onda al viajar por el agua y una serie de fenómenos que hacen cambiar las características mecánicas de la ola. Fenómenos como la difracción, refracción, reflexión, shoaling, y rompimiento entre otros, son los más comunes que ocurren en inmediaciones de la costa.

#### DIFRACCIÓN

La difracción del oleaje es la transferencia de energía lateral, perpendicular a la dirección de propagación del oleaje. Este fenómeno ocurre principalmente cuando el oleaje se encuentra con un obstáculo (isla, muelle, rompeolas, etc). Los efectos de la difracción son

cambios considerables en la altura de ola y direcciones de propagación en las proximidades de la zona abrigada por el obstáculo.

Debido a la complejidad de este fenómeno, no existe una solución analítica del fenómeno, sino que se presenta como dato empírico por medio de los ábacos de Wiebel (1962) (Figura 4-2). Estos abacos muestran isolíneas que representan el coeficiente de difracción tras un obstáculo recto, semi-infinito, rígido e impermeable con profundidad constante, para evitar la interferencia de fenómenos como la refracción y el asomeramiento. Otra forma de calcular este fenómeno es a través de modelación numérica mediante ecuaciones no lineales.



**Figura 4-2: Diagrama de difracción para oleaje con dirección 60°.**  
Fuente: CEM 1110-2-1100 (2008).

La altura de ola incidente ( $H_i$ ) es alterada por el coeficiente de difracción  $K_d$ , para obtener la altura de ola difractada ( $H_d$ ), mostrada en la Ecuación 4-9.

**Ecuación 4-9**

$$H_d = K_d H_i$$

## TRANSMISIÓN

La transmisión es un fenómeno que ocurre en una estructura, causada por oleaje de sobrepaso y oleaje que penetra en la estructura, si es que la estructura es permeable. El coeficiente de transmisión  $K_T$ , permite caracterizar la transmisión del oleaje y se define como:

**Ecuación 4-10**

$$H_T = K_T H_i$$

Donde  $H_T$  es la altura de ola transmitida.

Van de Meer y d'Angremond (1991) propusieron una ecuación para determinar el coeficiente de transmisión en un rompeolas de cresta baja, sumergidos y tipo arrecife:

**Ecuación 4-11**

$$K_T = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b$$

$K_T$  máximo = 0,75 ,  $K_T$  mínimo = 0,075      estructura convencional.

$K_T$  máximo = 0,6 ,  $K_T$  mínimo = 0,15      estructura tipo arrecife.

Donde:

**Ecuación 4-12** 
$$a = 0,031 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,24$$

**Ecuación 4-13** 
$$b = \begin{cases} -5,42s_{op} + 0,0323 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,0017 \left( \frac{B}{D_{n50}} \right)^{1,84} + 0,51 \\ -2,6s_{op} - 0,05 \frac{H_i}{D_{n50}} + 0,85 \end{cases}$$

Siendo la primera ecuación de  $b$  para estructuras convencionales y sumergidas, y la segunda para estructuras tipo arrecife, donde:

$H_i$  = Altura de ola incidente.

$D_{n50}$  = Diámetro medio nominal.

$R_c$  = Francobordo.

$B$  = Ancho de la cresta del rompeolas.

$s_{op}$  = Peralte de la ola en aguas profundas correspondiente al periodo peak.

Al ser una formulación basada en experimentos de laboratorio, presenta las siguientes limitaciones:

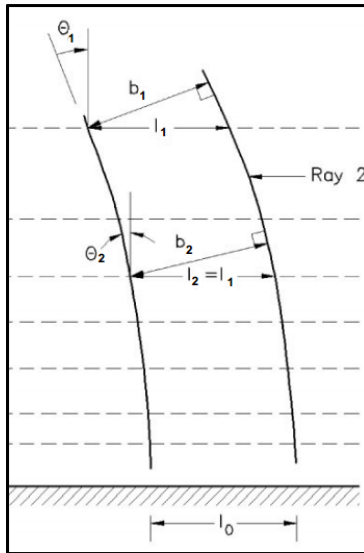
$$1 < \frac{H_s}{D_{n50}} < 6 \qquad 0,01 < s_{op} < 0,05 \qquad -2 < \frac{R_c}{D_{n50}} < 6$$

Estas limitaciones son límites físicos, ya que valores de  $H_s/D_{n50} > 6$  causarían inestabilidad a la estructura y un  $s_{op} > 0,05$  generará que la ola rompa por peralte. Los límites inferiores están dados por bajas alturas de ola con comparación con el diámetro de la roca y por muy bajo peralte (Ref 6).

## REFRACCIÓN Y ASOMERAMIENTO

Considerando el periodo de la onda constante, la celeridad de la onda varía si existen cambios en la profundidad o existe interacción con corrientes. Cuando existe un gradiente de celeridad de la onda a lo largo de un frente de oleaje, se genera un cambio en la dirección de propagación, a lo que se le llama refracción.

Para calcular la refracción sobre el oleaje producto de un cambio de profundidad se debe considerar una batimetría recta y paralela a la costa, como se observa en la Figura 4-3.



**Figura 4-3: Refracción provocada por cambios en la profundidad.**  
 Fuente: CEM 1110-2-1100 (2008).

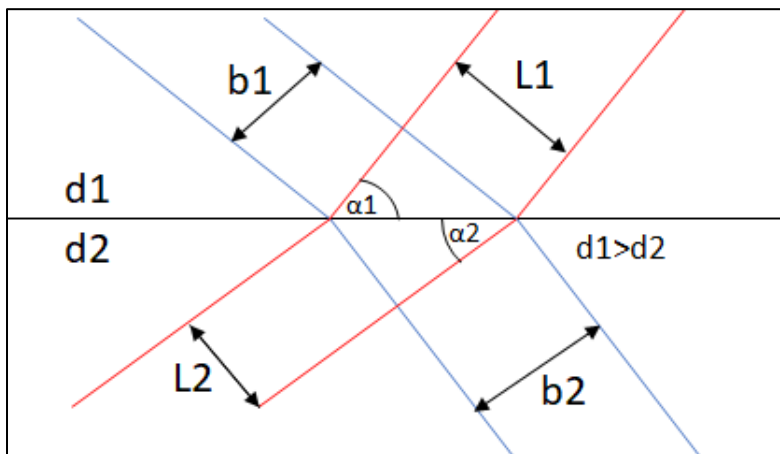
Si se considera un flujo de energía constante entre dos ortogonales se tiene que:

**Ecuación 4-14** 
$$\left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_1 b_1 = \left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_2 b_2 = cte$$

Donde se obtiene:

**Ecuación 4-15** 
$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$$

La raíz cuadrada del término  $b_1/b_2$  es el coeficiente de refracción y la raíz cuadrada de  $C_{g1}/C_{g2}$  es el coeficiente de asomeramiento. Para poder obtener los valores de  $b_1$  y  $b_2$ , se utiliza la Ley de Snell ilustrada en la Figura 4-4, con  $L$  la longitud de onda,  $d$  la profundidad y  $\alpha$  el ángulo entre el frente de oleaje y los veriles.



**Figura 4-4: Diagrama de la Ley de Snell.**  
 Fuente: Elaboración propia.

La Ley de Snell dice:

$$\text{Ecuación 4-16} \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\text{Ecuación 4-17} \quad \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{b_1}{b_2}$$

El shoaling o asomeramiento es un proceso que se produce a medida que el tren de olas se acerca a aguas someras, donde debido a una disminución en la profundidad se genera una disminución de su celeridad y longitud de onda, y un incremento en la altura de la ola. El coeficiente de shoaling, considerando que la propagación se inicia en aguas profundas, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 4-18} \quad K_S = \frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_{g1}}} = \frac{1}{\sqrt{2n \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}}$$

## REFLEXIÓN

La reflexión es un fenómeno que se genera cuando existe un cambio en la dirección del oleaje provocando que la onda cambie de sentido, generado por una estructura artificial o natural.

El coeficiente de reflexión es la relación entre la altura de ola reflejada y la altura de ola incidente, como se muestra en la Ecuación 4-19:

$$\text{Ecuación 4-19} \quad K_R = \frac{H_r}{H_i}$$

Donde  $H_r$  es la altura de ola reflejada.

## ROTURA

A medida que el oleaje va acercándose a bajas profundidades, la longitud de onda disminuye y aumenta su altura. Este peralte de la ola ( $H/L$ ) llega a un punto en que hace que la ola se vuelve inestable y rompa, liberando una gran cantidad de energía.

El criterio de rotura más conocido es el propuesto por McCowan (1891) que propone asumir que la rotura en playas con pendiente suave se puede comparar a la rotura de una onda solitaria.

$$\text{Ecuación 4-20} \quad \frac{H_b}{d_b} = 0,78$$

Para conocer el tipo de rotura que se genera, el parámetro de Iribarren ( $I_r$ ) es ampliamente utilizado. Este parámetro depende de la pendiente de la playa ( $\beta$ ), altura de ola ( $H_0$ ) y longitud de onda en aguas profundas ( $L_0$ ).

$$\text{Ecuación 4-21} \quad I_r = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

Dependiendo del valor del número de Iribarren, se definen 4 tipos de rotura (Figuras mostradas en el Anexo I):

- El número de Iribarren es menor a 0,4, la ola rompe en **Descrestamiento (Spilling)** disipando la energía en forma gradual, produciéndose la rotura desde la cresta de la ola.
- El número de Iribarren se encuentra entre 0,4 y 2,5, la ola rompe en **Voluta (Plunging)** disipando una gran cantidad de energía, donde la ola rompe lanzando la cresta hacia adelante.
- El número de Iribarren se encuentra entre 2,5 y 3, se produce **Colapso (Colapsing)** donde la ola comienza a desmoronarse desde la base.
- El número de Iribarren es mayor a 3, se produce **Oscilación (Surging)** donde la ola no rompe, pero se refleja en gran parte.

## 4.2. MORFOLOGÍA DE PLAYA

La playa se define como la acumulación de sedimento situado entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar, y la profundidad que corresponde a la zona donde el movimiento de sedimentos es prácticamente despreciable. Komar (1998) (Ref 18) define la Zona Litoral y la divide en distintas zonas mostradas en la Figura 4-5.

Por simplicidad, las playas se pueden definir mediante un perfil en planta y varios perfiles transversales, aunque cabe destacar que estos perfiles no son permanentes, y varían temporal y espacialmente dependiendo del clima de oleaje existente en la playa.

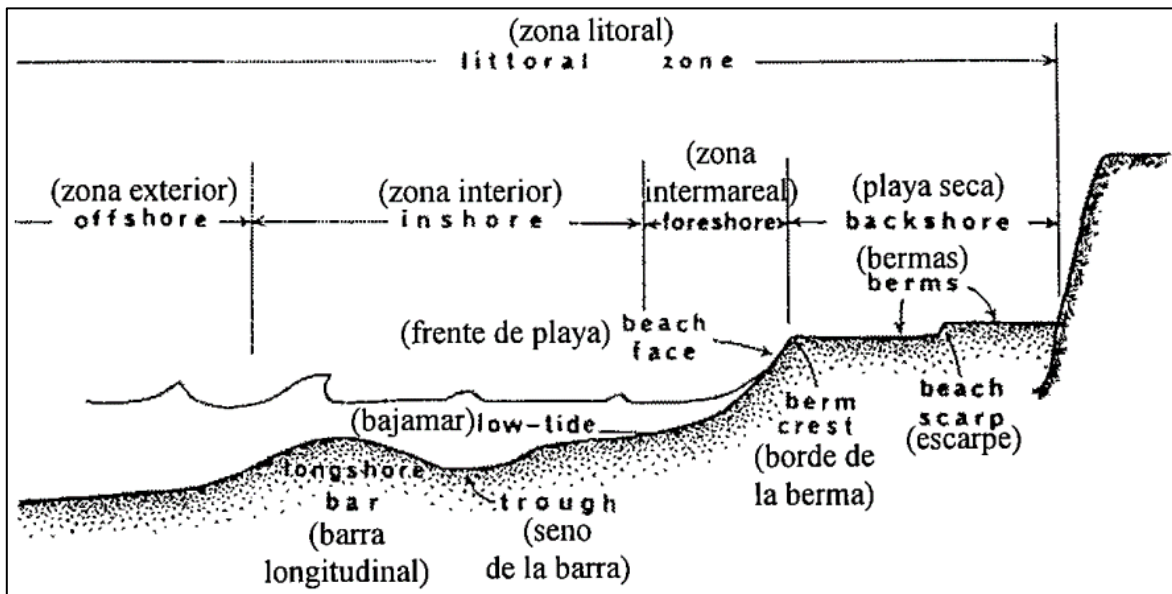


Figura 4-5: Zonificación de la playa.

Fuente: Documento de referencia "Procesos litorales" (Ref 7).

### 4.2.1. SEDIMENTOLOGÍA

La sedimentología es una rama de la geología que estudia el proceso de formación, transporte y deposición de material que se acumula en el ambiente y que forma rocas sedimentarias.

El sedimento se puede caracterizar físicamente por 3 categorías:

- Textura: Para distinguir el tipo de suelo, sea arena, arcilla o limo.
- Estructura: Donde se determina el tipo (aspecto o forma del grano), clase (tamaño de los granos) y categoría (grado de distinción de los granos) del sedimento.
- Composición: Para conocer la composición química y estructura mineralógica del sedimento.

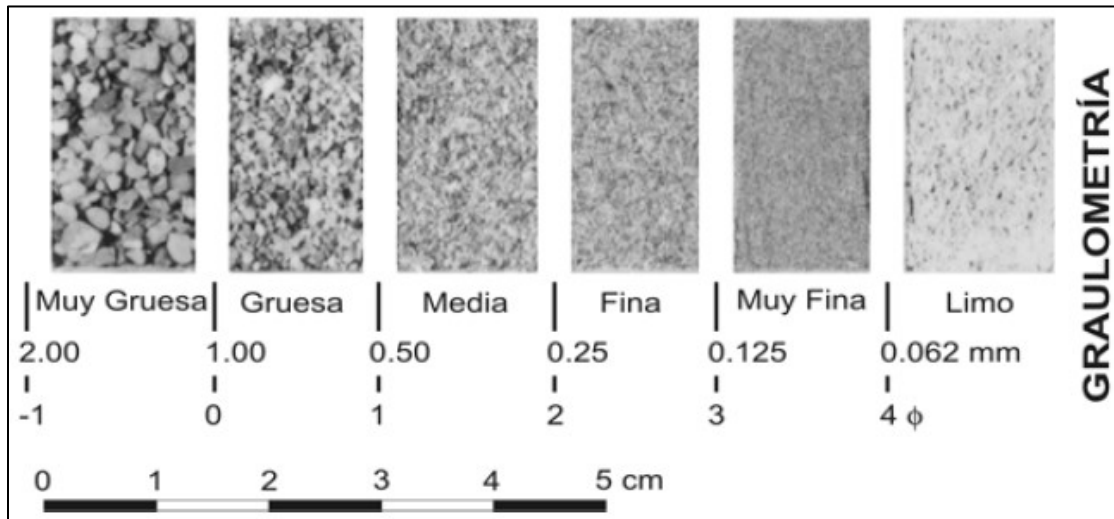
### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

En este análisis se calculan los porcentajes de excedencia del tamaño del sedimento. Se realiza con una muestra de sedimento tamizada, donde se pesan las fracciones de sedimento retenidas en cada tamiz.

Para clasificar cada tamiz respecto al diámetro y su unidad  $\phi$ , se utiliza la escala propuesta por Udden-Wentworth (1922), presentada en el Anexo I en la Figura 9-2. Esta clasificación utiliza la unidad  $\phi$ , la que relaciona el diámetro del sedimento con una potencia de 2 a la  $\phi$ , como se muestra a continuación:

**Ecuación 4-22** 
$$d = 2^{-\phi} \rightarrow \phi = -\log_2 d$$

El grano del sedimento es clasificado de acuerdo con el tamaño mediante la escala propuesta por Wentworth (1922), tanto para unidades  $\phi$  como para milímetros, como se ve en la Figura 4-6.



**Figura 4-6: Diámetros de sedimento y su clasificación**  
Fuente: Gangas, M. J. (2013). *Generalidades Sedimentos*. (Ref 8)

Para realizar un análisis granulométrico es necesario determinar los pesos retenidos por cada tamiz, como el ejemplo mostrado en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Ejemplo pesos retenidos de muestra HB4.

Nº Tamiz	Diámetro [mm]	Peso Retenido [grs]	% Peso Retenido	% Peso Pasante
Nº 5	4	0,18	0,18%	99,82%
Nº 10	2	0,22	0,22%	99,60%
Nº 16	1	0,05	0,05%	99,55%
Nº 40	0,5	7,37	7,37%	92,18%
Nº 60	0,25	82,2	82,20%	9,98%
Nº 115	0,125	7,66	7,66%	2,32%
Nº 250	0,063	0,89	0,89%	1,43%
	<b>Excedente</b>	0,05	0,05%	1,38%
	<b>Total</b>	98,62		

Fuente: Elaboración propia.

Con esta tabla se pueden obtener las curvas granulométricas de cada muestra, como se presenta en la Figura 4-7:

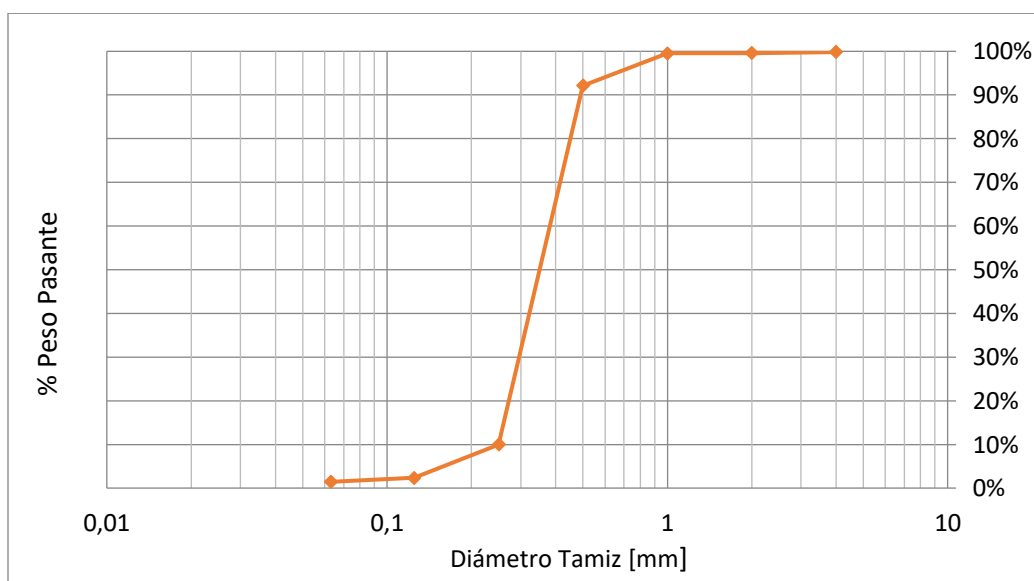


Figura 4-7: Ejemplo de curva granulométrica muestra HB4.

Fuente: Elaboración propia.

Con esta curva granulométrica es posible obtener los diámetros característicos para realizar el análisis estadístico. Donde:

$D_i$  = Diámetro del sedimento excedido por el  $i\%$  de la muestra.

### INDICADORES ESTADÍSTICOS

Los indicadores que se presentarán a continuación permiten clasificar de una manera general la muestra sedimentaria:

- Curtosis: Mide que tan puntiaguda es la distribución de diámetros de los sedimentos (concentración en torno al pico máximo de la muestra).

Ecuación 4-23

$$K = \frac{d_{95} - d_5}{2,44 \cdot (d_{75} - d_{25})}$$

- Asimetría: Mide la concentración de los datos en torno al valor medio y su desplazamiento hacia las colas.

**Ecuación 4-24**

$$SK = \frac{d_{16}+d_{84}-2d_{50}}{2(d_{84}-d_{16})} + \frac{d_5+d_{95}-2d_{50}}{2(d_{95}-d_5)}$$

- Desviación estándar: Indica el grado de clasificación de la muestra, que informa de la media de distancias de los datos de la muestra con respecto a su media aritmética.

**Ecuación 4-25**

$$\sigma_1 = \frac{d_{84}-d_{16}}{4} + \frac{d_{95}-d_5}{6,6}$$

- Tamaño promedio: Indica el tamaño promedio de la muestra.

**Ecuación 4-26**

$$M = \frac{d_{16}+d_{50}+d_{84}}{3}$$

#### 4.2.2. EQUILIBRIO MORFODINÁMICO DE LA PLAYA

La playa naturalmente responde a la acción de las dinámicas que la afectan, como oleaje, marea o viento, en distintas escalas temporales, tanto en el corto plazo (horas/días) como en el mediano-largo plazo (semanas/meses). Esta respuesta se ha intentado determinar mediante diversas formulaciones y modelos (Ref. 6), pero que solo nos permiten conocer con mayor seguridad los cambios en una escala temporal larga, producto de la aleatoriedad de las acciones dinámicas de la playa.

La mayoría de los modelos asumen que la playa se puede caracterizar mediante un perfil de equilibrio longitudinal (línea en planta) y varios perfiles transversales. Estos perfiles representan la forma final de la playa modelada en un laboratorio, donde es posible controlar las condiciones de oleaje incidente. Producto de los cambios constantes en el nivel del mar y el oleaje, no obstante, estos perfiles nunca podrían existir.

Cuando se modifica el entorno natural de un lugar mediante la implementación de una estructura, la línea de playa presenta cambios que la llevan a una nueva condición de equilibrio. La línea de playa resultante depende de una serie de factores que incluyen el transporte longitudinal, el clima de oleaje, la alimentación de sedimento de la playa y de la geometría del o los rompeolas. Existen 2 tipos de configuraciones de línea de playa que son formadas posterior a la construcción de un sistema de diques exentos (Ref. 7).

- **Saliente:** Permite el flujo de transporte longitudinal en una playa, además de crear un ambiente energético de oleaje bajo que permita el uso recreacional como zona de baño. El mismo oleaje y corrientes generadas en la zona abrigada previenen que la playa llegue hasta el dique. Es la configuración más deseada al momento de construir un dique exento, ya que al permitir un flujo de transporte longitudinal no afecta a la playa misma, ni a playas aledañas. Otra forma de generar esta condición es que el dique sea lo suficientemente permeable, a través de sobrepaso y transmisión de altura de ola.

- Tómbolo:** Si el dique está lo suficientemente cerca de la línea de costa, o existe poca transmisión de energía a través del dique, es posible que se forme un tómbolo atrás de la estructura. Ocurre cuando la línea de playa llega hasta el dique exento, bloqueando el transporte longitudinal de la playa, pero generando una gran área de recreación. Esta configuración, y la de saliente, se muestran en la Figura 4-8.

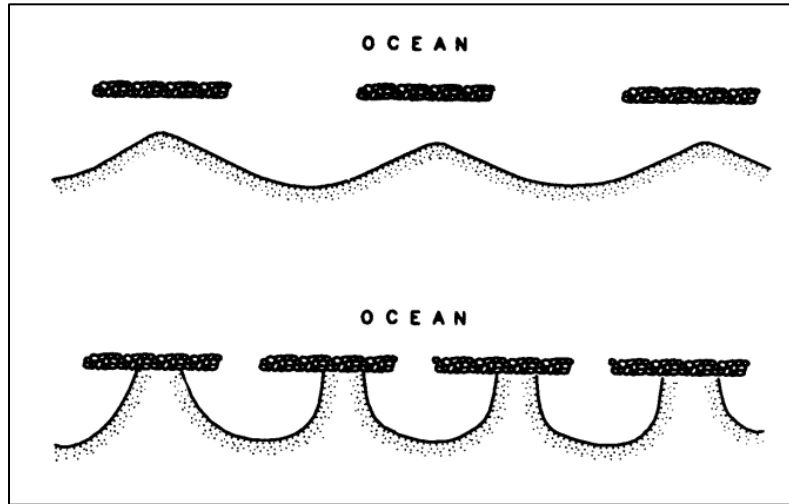


Figura 4-8: Configuración superior Saliente. Configuración inferior Tómbolo.  
Fuente: Engineering Design Guidance. (Ref 6).

## CLASIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA

Pope y Dean (1986) se basaron en datos de prototipos para definir 5 cambios de respuesta de playa: tómbolo permanente, tómbolos periódicos, saliente bien desarrollada, saliente suave y sin sinuosidad. Definieron 2 parámetros adimensionales para clasificar la playa: un parámetro en función de la proporción entre la longitud del dique ( $L_s$ ) y la longitud de la separación entre diques ( $L_g$ ), y el otro parámetro como la proporción entre la distancia de la línea de playa original hasta el dique ( $\bar{X}$ ) y la profundidad promedio de la estructura ( $d_s$ ) (Figura 4-9).

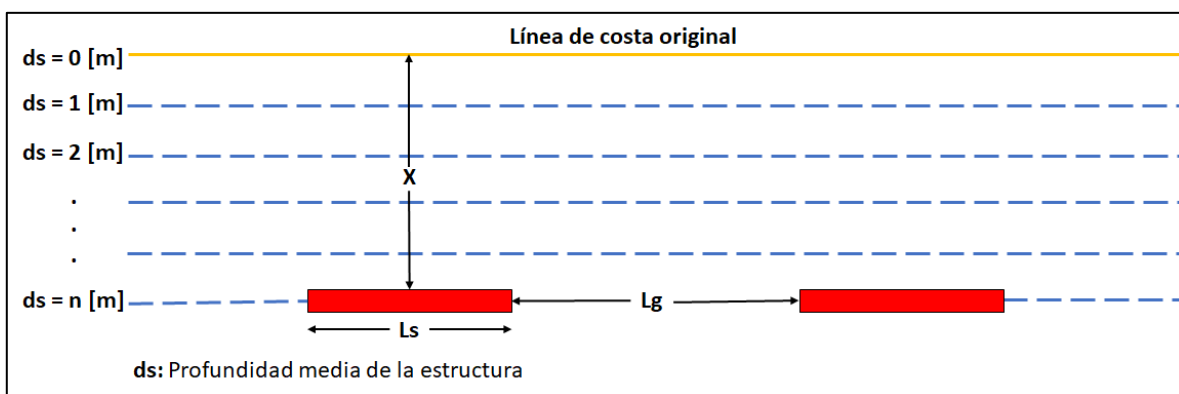


Figura 4-9: Pope & Dean (1986).  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-10 muestra los prototipos y su relación con los parámetros  $\bar{X}/d_s$  y  $L_s/L_g$ .

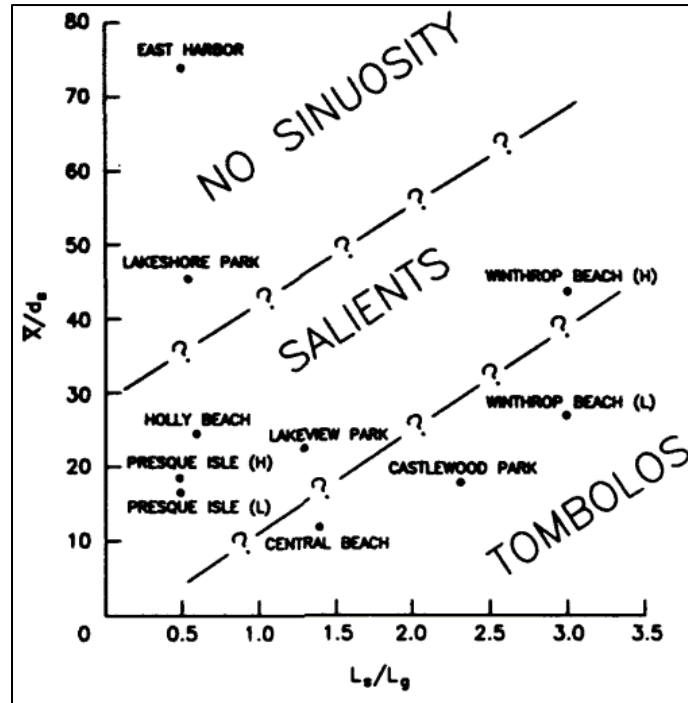


Figura 4-10: Ploteo adimensional de proyectos de rompeolas en Estados Unidos dependiendo de su configuración.

Fuente: Engineering Design Guidance (Ref 6).

### PERFIL TRANSVERSAL

Dentro de las formulaciones existentes para determinar el perfil transversal de equilibrio, la más utilizada es la propuesta por Dean (1977), que considera un perfil parabólico (Figura 4-11).

La “profundidad de cierre” actúa como el límite de profundidad del perfil de equilibrio y la distancia mar adentro en la que el perfil tendrá fluctuaciones de transporte de sedimentos despreciables. Birkemeier (1985) propuso  $h^*$  mostrada en la Ecuación 4-27 a partir de datos de mediciones de perfiles de playa.

**Ecuación 4-27** 
$$h^* = 1,75H_{S12} - 57,9 \left( \frac{H_{S12}^2}{gT_S^2} \right)$$

Donde:

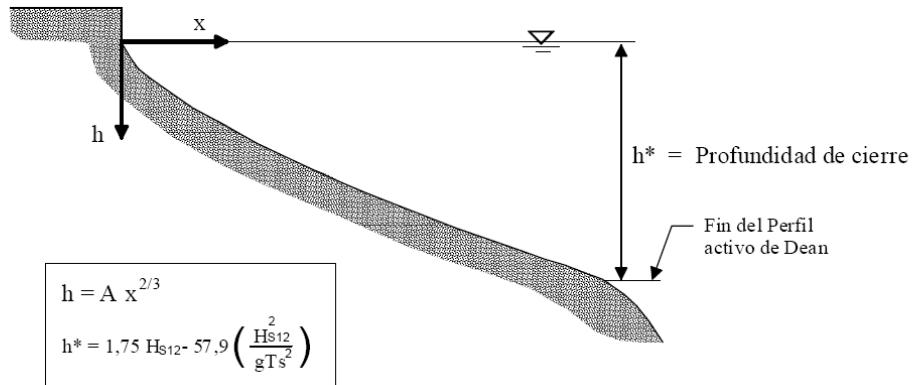
$H_{S12}$  = altura de ola significativa excedida 12 horas al año, medida a una profundidad  $h$ , tal que  $h^* < h < 2h^*$ .

$T_S$  = periodo peak.

Este valor propuesto por Birkemeier (1985) representa una estadística media anual de la playa y no una condición extrema.

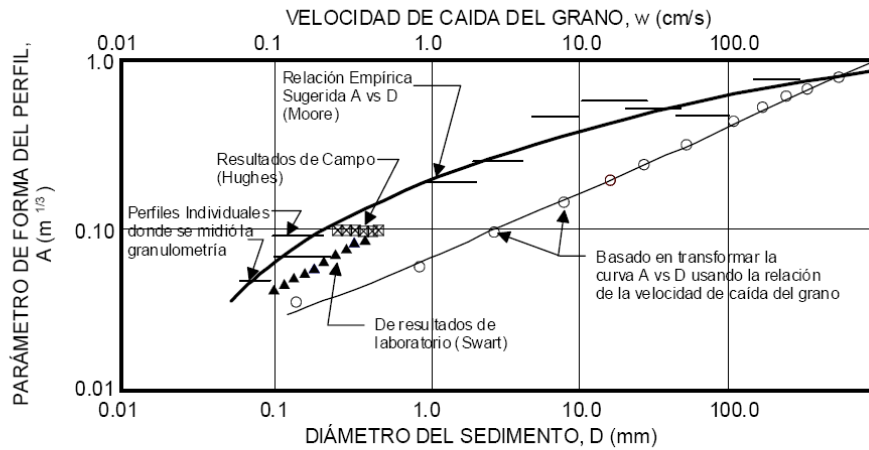
La expresión parabólica del perfil de equilibrio ( $h = Ax^{2/3}$ ) fue inicialmente obtenida por vía empírica a partir de ajustes de playas naturales, Bruun (1954). Posteriormente, Dean (1977) mostró que dicha expresión es consistente con la hipótesis de que la disipación de energía por unidad de volumen en la zona de rompientes es constante. El perfil de equilibrio no establece cual es el límite del mismo mar adentro, siendo usual adoptar por tal límite, la profundidad de cierre,  $h^*$ , obtenida por Birkemeier (1985).

PERFIL DE EQUILIBRIO, Dean (1977)



$A$  = Parámetro de forma (ver Figura siguiente)  
 $H_{S12}$  = Altura de ola significativa superada 12 horas al año  
 $T_s$  = Periodo significativo del oleaje

Moore (1982) encontró una relación empírica entre el tamaño del grano,  $D_{50}$  y el parámetro de forma  $A$ . Esta relación ha sido posteriormente modificada por Dean (1987) expresándola en términos de la velocidad de caída de grano,  $w$ . Es aconsejable, no obstante, verificar las relaciones  $A - w$  en casos reales con datos de playas próximas.



$$A \text{ (m}^{1/3}\text{)} = K w^{0,44} \text{ (m/s)}$$

Valor propuesto por Dean (1987):  $K=0,51$   
 Media Perfil emergido Mar Cantábrico:  $K=0,65$   
 Media Perfil sumergido Mar Cantábrico:  $K=0,55$

De manera aproximada, y para arenas de densidad  $\rho_s = 2,65 \text{ tn/m}^3$ , la velocidad de caída del grano puede obtenerse como:

$$w \text{ (m/s)} = 1,1 \cdot 10^6 D^2 \text{ (m)} \quad D < 0,1 \text{ mm}$$

$$w \text{ (m/s)} = 273 D^{1,1} \text{ (m)} \quad 0,1 < D < 1 \text{ mm}$$

$$w \text{ (m/s)} = 4,36 D^{0,5} \text{ (m)} \quad D > 1 \text{ mm}$$

$D$  = Diámetro del sedimento

Figura 4-11: Forma del perfil de equilibrio a largo plazo, Dean (1977).  
 Fuente: Documento Temático "Regeneración de playas". (Ref 9).

## PERFIL LONGITUDINAL

De acuerdo con las condiciones energéticas medias del oleaje la playa cambiará su forma en planta. Sin embargo, estos cambios no serán inmediatos, producto que los cambios dinámicos del oleaje ocurren a una velocidad mayor a los cambios que sufre la forma en planta de la playa.

En presencia de un dique se desarrolla una zona con condiciones energéticas menores producto de la difracción, que alteran el diseño de la playa como se observa en la Figura 4-12 y Figura 4-13. Hsu y Evans (1989) (Ecuación 4-28) propusieron un modelo parabólico que divide la zona de interés en 3 regiones. En la primera región el oleaje no se ve alterado por la estructura y por lo tanto la playa en equilibrio será paralela a los frentes de oleaje. Esta zona de influencia de la difracción y la zona inalterada (punto Po) se determina mediante la distancia en número de longitudes de onda (Y/L) que se genera entre el punto donde comienza la difracción y la prolongación de la línea de costa que pasa por Po, medida perpendicular a los frentes de oleaje. Conociendo la distancia Y/L, se puede obtener el ángulo  $\alpha_{\min}$  que forma la normal a los frentes que pasan por el punto de control y la línea que une el punto de control y el punto Po. Con esto se obtienen los valores de b y coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$  y  $C_2$  con los que se dibuja la parábola.

**Ecuación 4-28**

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta} + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2$$

Esta expresión es válida incluso si la playa no se encuentra completa, o sea donde solo exista parte de las regiones 2 y 3. En este caso se prolonga ficticiamente la línea de costa hasta el punto Po y se utilizan las mismas expresiones de  $\alpha_{\min}$ . Como se observa de la formulación propuesta por Hsu y Evans (1989) es que la forma en planta no depende de la granulometría de la arena ni de la altura de ola incidente, si no que depende de la dirección de los frentes de oleaje y de la distancia adimensional entre el punto de control y la línea de costa (Y/L).

Producto de que la forma en planta de la playa no responde de manera inmediata a los cambios de dirección del oleaje, esta tiende a ubicarse en una posición de equilibrio generada por las condiciones medias de energía del oleaje en el punto de interés. Es por esto por lo que se suele utilizar el flujo medio anual de energía ( $\vec{F}_p$ ) en el punto de control definida en la Ecuación 4-29.

**Ecuación 4-29**

$$\vec{F}_p = \sum_{i=1}^N \frac{E_i C_{gi}}{\sum_{j=1}^N E_j C_{gj}} Dir_i$$

Donde:

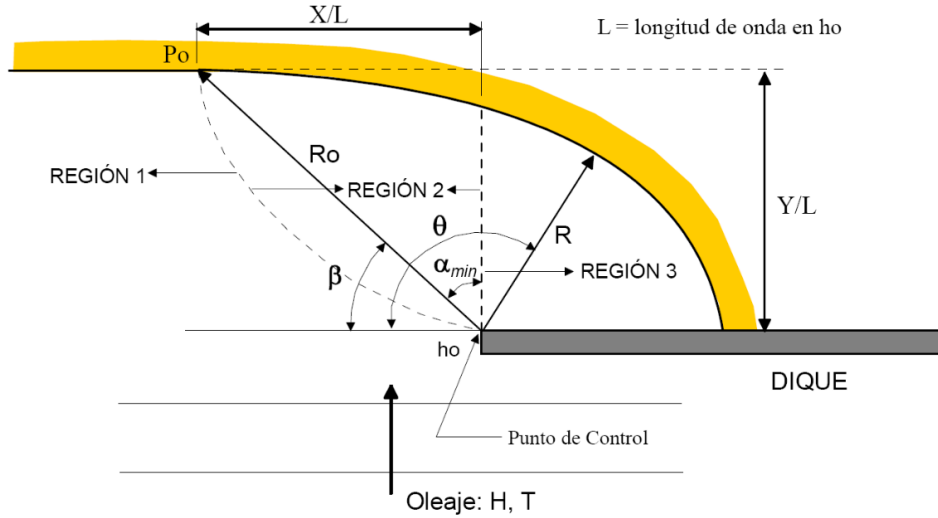
$E$  = Energía del grupo de onda.

$C_g$  = Celeridad de grupo.

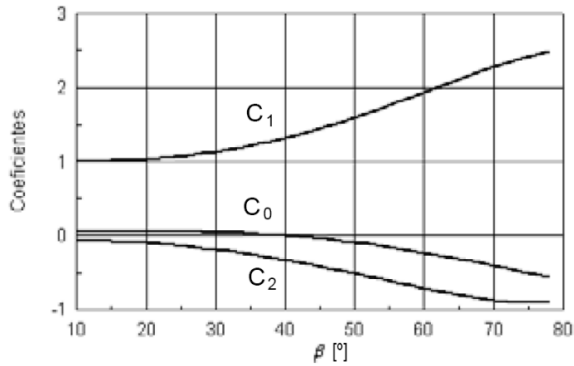
$Dir_i$  = Dirección del oleaje en el punto de interés.

$N$  = Oleajes registrados en un año.

La forma en planta de equilibrio estático de una playa encajada puede ser representada por la expresión parabólica de Hsu y Evans (1989). En las Figuras y Tablas adjuntas se definen los parámetros necesarios de dicha formulación:

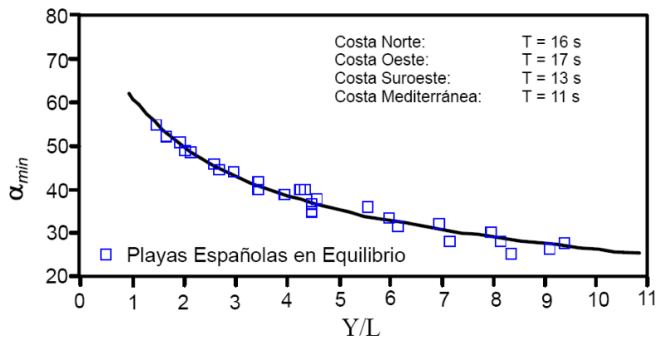


$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta} + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2$$



$\beta^\circ$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
20	0.054	1.040	-0.094
22	0.054	1.053	-0.109
24	0.054	1.069	-0.125
26	0.052	1.088	-0.144
28	0.050	1.110	-0.164
30	0.046	1.136	-0.186
32	0.041	1.166	-0.210
34	0.034	1.199	-0.237
36	0.026	1.236	-0.265
38	0.015	1.277	-0.296
40	0.003	1.322	-0.328
42	-0.011	1.370	-0.362
44	-0.027	1.422	-0.398
46	-0.045	1.478	-0.435
48	-0.066	1.537	-0.473
50	-0.088	1.598	-0.512
52	-0.112	1.662	-0.552
54	-0.138	1.729	-0.592
56	-0.166	1.797	-0.632
58	-0.196	1.866	-0.671
60	-0.227	1.936	-0.710
62	-0.260	2.006	-0.746
64	-0.295	2.076	-0.781
66	-0.331	2.145	-0.813
68	-0.368	2.212	-0.842
70	-0.405	2.276	-0.867
72	-0.444	2.336	-0.888
74	-0.483	2.393	-0.903
76	-0.522	2.444	-0.912
78	-0.561	2.489	-0.915
80	-0.600	2.526	-0.910

El uso de dicha expresión para el diseño de playas puede ser realizado por medio de la metodología desarrollada por González (1995). Esta metodología propone que el ángulo,  $\beta = 90^\circ - \alpha_{min}$ , está determinado por la distancia, (Y/L), entre la playa y el punto de control, pudiendo obtenerse los valores de  $\beta_{min}$  de la Figura adjunta:



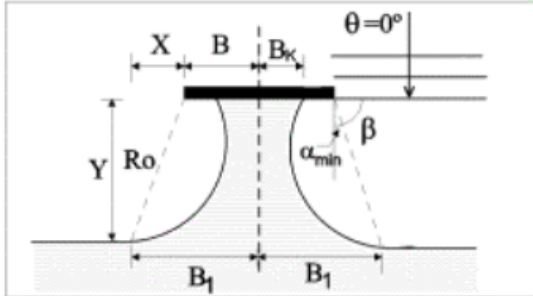
La dirección del oleaje que se ha de utilizar en la metodología, corresponde con el del flujo medio de energía que alcanza el punto de control, independientemente que la playa sea completa (llegue hasta Po) o no.

**Figura 4-12: Forma en planta de Equilibrio Estático. Playa encajada.**  
Fuente: Documento Temático "Regeneración de Playas". (Ref 9).

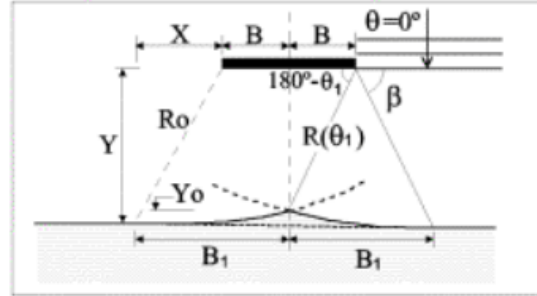
**PLAYAS EN EQUILIBRIO ESTÁTICO (FORMA EN PLANTA)**

Gráficas para la determinación de la forma en planta de un Tómbolo o de un Hemitómbolo con un saliente o doble saliente.  $L$  es la longitud de onda del oleaje incidente, cuyas crestas son paralelas a la costa. El resto de los parámetros se identifican en las figuras.

**TÓMBOLO**



**HEMITÓMBOLO - Un saliente**



**HEMITÓMBOLO - Doble saliente (DS)**

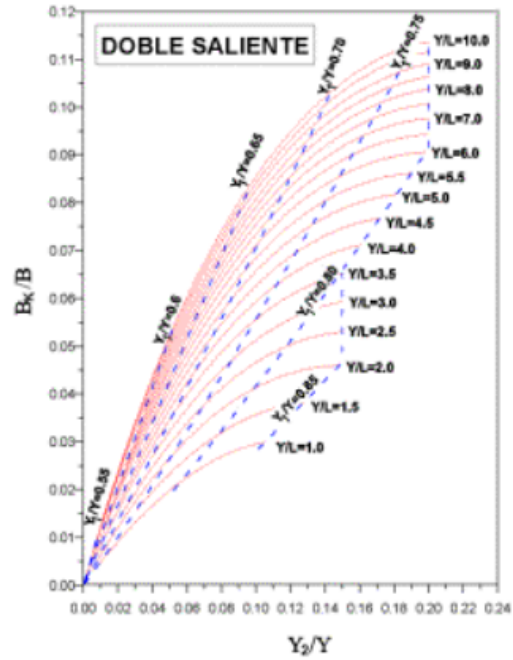
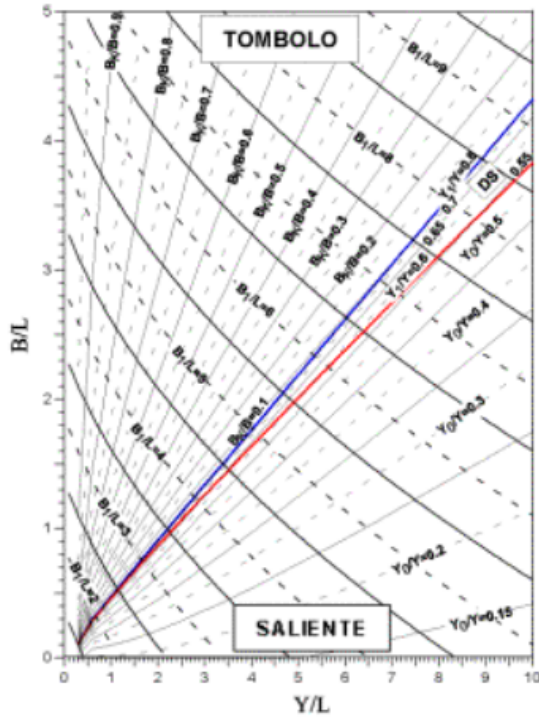
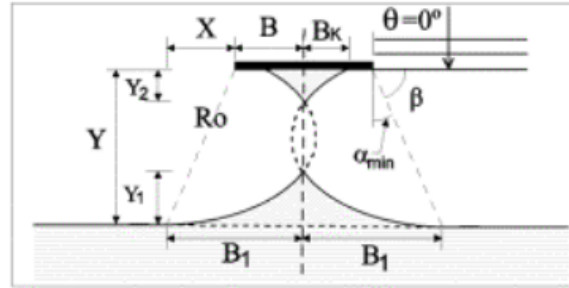
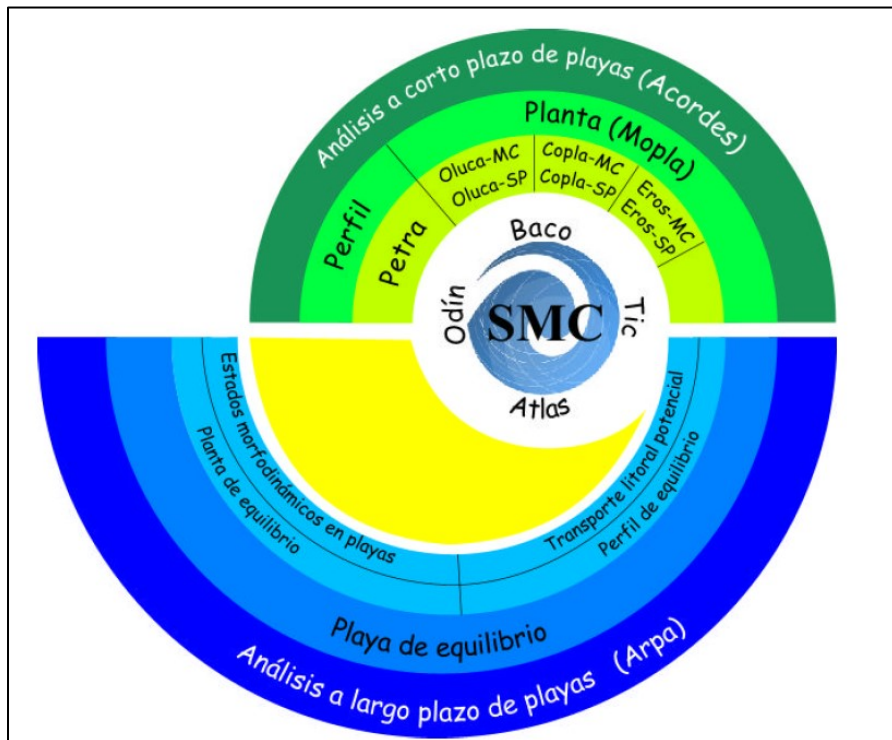


Figura 4-13: Forma en planta de Equilibrio Estático. Tómbolos y Salientes.  
Referencia: Documento Temático "Regeneración de Playas". (Ref 9).

### 4.2.3. APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

Los cambios morfológicos de la playa serán modelados con el software SMC. Este software fue desarrollado entre 1995 y 2002 por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria en colaboración con la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar. De acuerdo con la página<sup>1</sup> del SMC “es un conjunto de metodologías y modelos numéricos que permiten estudiar los procesos costeros y sus efectos en la costa debidos a eventos naturales o actuaciones humanas en la costa”.



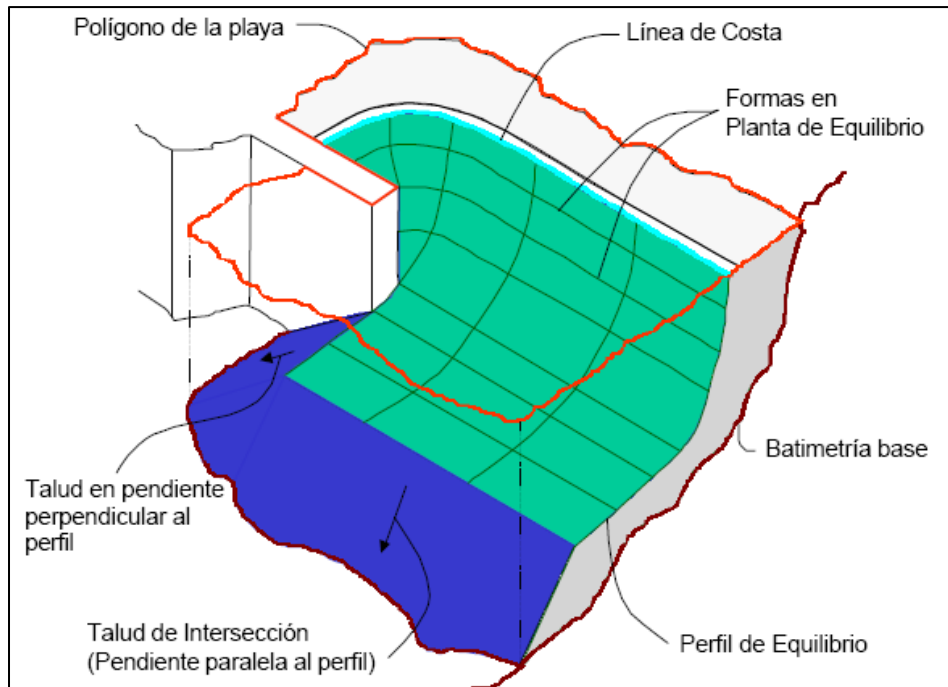
**Figura 4-14: Programas internos SMC**

Fuente: <http://smc.ihcantabria.es/SMC25/programas/>

El SMC está compuesto de aplicaciones que modelan distintos procesos costeros (Figura 4-14). Dentro de estos se encuentra el Análisis a largo plazo de playas (Arpa), que permite analizar una sección de la costa en escalas temporales y espaciales a largo plazo para obtener la playa de equilibrio.

La forma en planta de la playa se conforma de una serie de curvas paralelas generadas a partir de un mismo punto de control que corresponde al extremo de la estructura que provoca el efecto de difracción. La línea de color azul mostrado en planta representa la línea de costa, que posee una elevación (Figura 4-15).

<sup>1</sup> <http://smc.ihcantabria.es/>



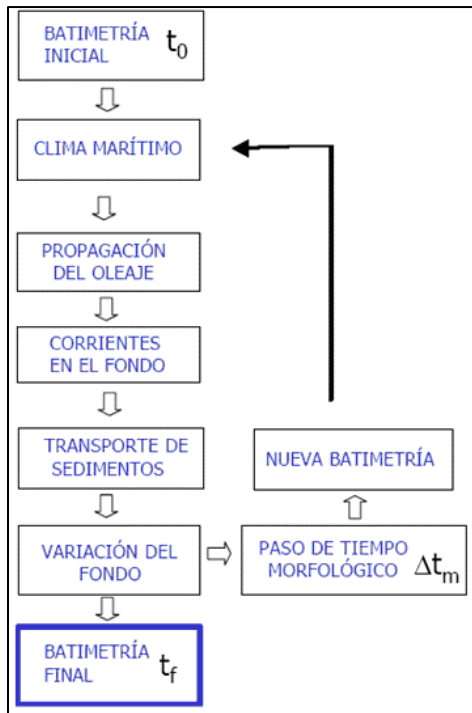
**Figura 4-15: Polígono de playa en equilibrio.**  
Fuente: Manual de usuario SMC.

El análisis a corto plazo de playas (Acordes) permite analizar sistemas costeros en una escala temporal y espacial a corto plazo. Este módulo recurre a PETRA y MOPLA para analizar los perfiles transversales y longitudinales de la playa ante algún evento de temporal, que pueda provocar un retroceso o avance de la línea de costa.

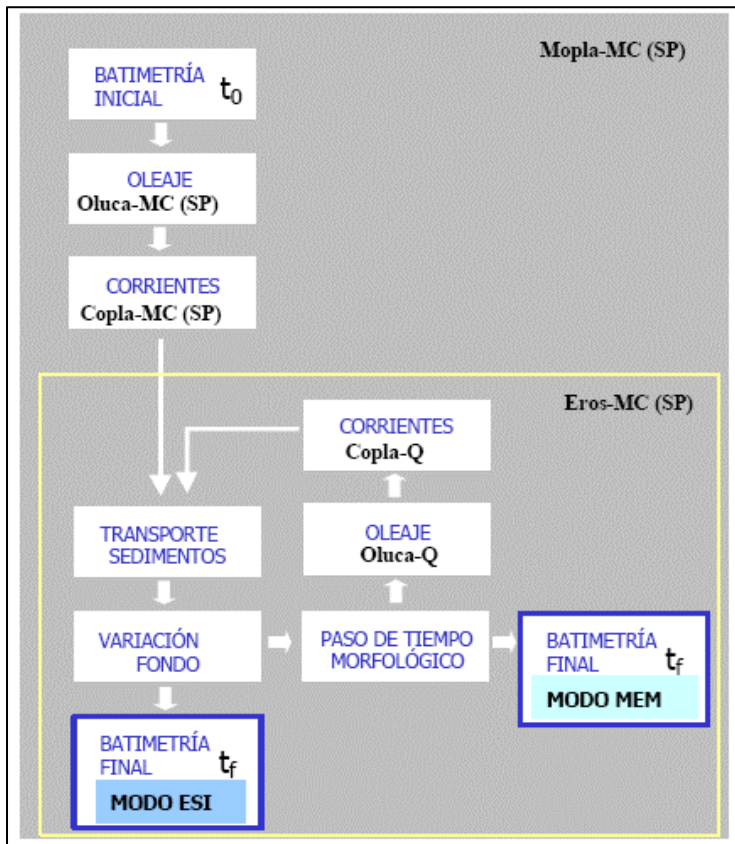
El análisis del perfil a corto plazo de playas (PETRA) busca conocer la respuesta del perfil transversal, a partir de una batimetría inicial, las características del sedimento y del clima de oleaje mar adentro (oleaje y marea). Posteriormente, el programa calcula las hidrodinámicas inducidas por el oleaje (propagación de oleaje y corrientes en el fondo), para obtener los transportes de sedimentos. El programa entrega una batimetría final modelada al completarse la duración del evento que se desea simular. En la Figura 4-16 se observan los módulos empleados por el modelo.

El programa que se utilizará para modelar el efecto del rompeolas en la playa es el MOPLA, “Morfodinámica de playas”, que permite modelar la propagación del oleaje desde profundidades indefinidas hasta la línea de costa; además calcula las corrientes inducidas en la zona de rompiente y simula la evolución morfodinámica de la playa. MOPLA incluye además los siguientes modelos, mostrados en la Figura 4-17:

- **Oluca:** Modelo parabólico de propagación de oleaje.
- **Copla:** Modelo de corrientes en playas inducidas por la rotura del oleaje espectral.
- **Eros:** Modelo de erosión – sedimentación y evolución de la batimetría en playas.



**Figura 4-16: Modelo de evolución de perfil de playa.**  
 Fuente: Documento Temático “Regeneración de playas”. (Ref 9).



**Figura 4-17: Modelo de evolución de la planta de la playa.**  
 Fuente: Documento Temático “Regeneración de playas”. (Ref 9).

Los modelos que componen el MOPLA se basan en modelos teóricos que definen el programa. En el Anexo II se citarán las hipótesis en las que se basa el programa de acuerdo con el Manual MOPLA 3.0 (Ref 10). Este manual puede ser encontrado en la Zona descargas de la página web del Sistema de Modelado Costero<sup>2</sup>.

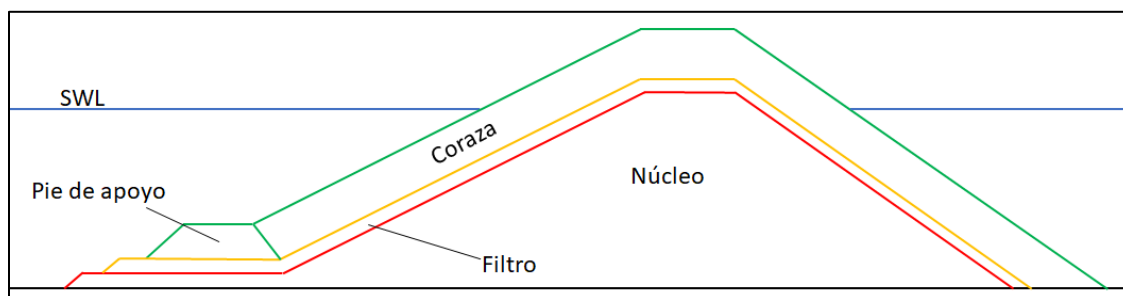
### 4.3. DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA

Una obra de protección costera es una estructura diseñada para disipar la energía del oleaje. Su configuración determina la forma en que esta energía se disipa o refleja, existiendo varios tipos de obras de protección costera. Los más comunes son estructuras con rompeolas en talud y pared vertical, diques flotantes, tablestacas, entre otros.

Para clasificar estas obras se recurre al Documento de Referencia (Ref 7) que toma en cuenta los siguientes criterios:

- Efecto de la estructura en el oleaje: Según su comportamiento energético, siendo estas estructuras reflejantes, disipativas, transmisoras o mixtas.
- Deformabilidad de la estructura de protección, dependiendo si son obras “blandas” como playas o “duras” como estructuras. Dentro de las obras duras existen las estructuras “flexibles” o “rígidas”, dependiendo de la deformación admisible de la obra.
- Posición de la estructura con respecto a la línea de costa: Obras que forman la línea de costa, obras perpendiculares a la línea de costa (Dique espigón), y obras paralelas a la línea de costa, pero separadas de esta a una determinada distancia (Dique exento).

El dique en talud es una de las configuraciones más utilizadas como obra de protección costera. Este se construye a base de material de cantera considerando diferentes capas. Si el dique es construido solamente con elementos grandes, este puede provocar una transmisión indeseada de oleaje y sedimentos. Además, como en las canteras es difícil conseguir roca de gran tamaño, los diques en talud suelen estar compuestos de un “núcleo” de material fino, seguido de capas de “filtro” que evitan que el material del núcleo sea lavado hacia afuera del dique, y una “coraza” de roca o elementos prefabricados de hormigón (Figura 4-18). En la parte inferior de la coraza, a veces, es necesario un pie de apoyo para mejorar la estabilidad del dique y evitar una socavación del fondo. La sigla SWL representa el still water level o nivel de agua quieta.



**Figura 4-18: Dique en talud.**

Fuente: Elaboración propia.

<sup>2</sup> [http://smc.ihcantabria.es/SMC25/descargas-smc2\\_5-espana/](http://smc.ihcantabria.es/SMC25/descargas-smc2_5-espana/)

### 4.3.1. CORAZA

Como la coraza es el elemento de la estructura que debe resistir la fuerza del oleaje, es que el diseño del dique en talud se centra en el cálculo del peso de los elementos que la componen la coraza, ya sea roca o de hormigón.

En la Figura 4-19 y Figura 4-20, se describen las formulaciones de Hudson (1974) y Van der Meer (1988) respectivamente, para calcular el peso de los elementos de la coraza para estructuras sin sobrepaso.

Van der Meer (1991) sugirió que sus ecuaciones (Figura 4-20) pueden ser usadas con un  $D_{n50}$  que debe ser multiplicado por un factor de reducción  $f_i$  para diseñar diques de cresta baja como los utilizados en este proyecto. El factor de reducción es el mostrado en la Ecuación 4-30:

$$\text{Ecuación 4-30} \quad f_i = \left( 1,25 - 4,8 \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}} \right)^{-1}$$

Donde:

$R_c$  = Francobordo.

$s_{op}$  =  $H_s/L_{op}$ .

$L_{op}$  = Longitud de onda en aguas profundas correspondiente al periodo peak.

Los límites de la Ecuación 4-30 están dados por la siguiente expresión:

$$0 < \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}} < 0,052$$

Por lo general los pesos máximos y mínimos de los elementos de la coraza se limitan a:

$$M_{max} = 1,25M_{50} \quad M_{min} = 0,75M_{50}$$

**Table VI-5-22**  
**Rock, Two-Layer Armored Non-Overtopped Slopes (Hudson 1974)**

Irregular, head-on waves

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad \text{or} \quad M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)^3 \cot \alpha} \quad (\text{VI-5-67})$$

where  $H$  Characteristic wave height ( $H_s$  or  $H_{1/10}$ )  
 $D_{n50}$  Equivalent cube length of median rock  
 $M_{50}$  Medium mass of rocks,  $M_{50} = \rho_s D_{n50}^3$   
 $\rho_s$  Mass density of rocks  
 $\rho_w$  Mass density of water  
 $\Delta$   $(\rho_s/\rho_w) - 1$   
 $\alpha$  Slope angle  
 $K_D$  Stability coefficient

*K<sub>D</sub>-values by SPM 1977, H = H<sub>s</sub>, for slope angles 1.5 ≤ cot α ≤ 3.0. (Based entirely on regular wave tests.)*

Stone shape	Placement	Damage, $D^4$			
		0-5%		5-10%	10-15%
		Breaking waves <sup>1</sup>	Nonbreaking waves <sup>2</sup>	Nonbreaking waves	Nonbreaking waves
Smooth, rounded	Random	2.1	2.4	3.0	3.6
Rough angular	Random	3.5	4.0	4.9	6.6
Rough angular	Special <sup>3</sup>	4.8	5.5		

*K<sub>D</sub>-values by SPM 1984, H = H<sub>1/10</sub>.*

Stone shape	Placement	Damage, $D^4 = 0-5\%$	
		Breaking waves <sup>1</sup>	Nonbreaking waves <sup>2</sup>
Smooth rounded	Random	1.2	2.4
Rough angular	Random	2.0	4.0
Rough angular	Special <sup>3</sup>	5.8	7.0

- <sup>1</sup> Breaking waves means depth-limited waves, i.e., wave breaking takes place in front of the armor slope. (Critical case for shallow-water structures.)
- <sup>2</sup> No depth-limited wave breaking takes place in front of the armor slope.
- <sup>3</sup> Special placement with long axis of stone placed perpendicular to the slope face.
- <sup>4</sup>  $D$  is defined according to SPM 1984 as follows: The percent damage is based on the volume of armor units displaced from the breakwater zone of active armor unit removal for a specific wave height. This zone extends from the middle of the breakwater crest down the seaward face to a depth equivalent to the wave height causing zero damage below still-water level.

*Shore Protection Manual (1977)* versus When considering that  $H_{1/10} = 1.27H_s$  for Rayleigh distributed wave heights (non-depth-limited waves) it is seen that the recommendations of *Shore Protection Manual (1984)*: *Shore Protection Manual (1984)* introduce a considerable safety factor compared to the practice based on *Shore Protection Manual (1977)*.

Uncertainty of the formula: The coefficient of variation of Eq VI-5-67 is estimated to be 18% by van der Meer (1988). Melby and Mlaker (1997) reported a coefficient of variation for  $K_D$  of 25% for stone and 20% for Dolosse.

**Figura 4-19: Fórmula de Hudson (1974).**  
Fuente: CEM (Ref 11).

**Table VI-5-23**  
**Rock, Two-Layer Armored Non-Overtopped Slopes (van der Meer 1988)**

Irregular, head-on waves

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 \cdot S^{0.2} P^{0.18} N_z^{-0.1} \xi_m^{-0.5} \quad \text{Plunging waves : } \xi_m < \xi_{mc} \quad (\text{VI-5-68})$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 \cdot S^{0.2} P^{-0.13} N_z^{-0.1} (\cot \alpha)^{0.5} \xi_m^P \quad \text{Surging waves : } \xi_m > \xi_{mc} \quad (\text{VI-5-69})$$

$$\xi_m = s_m^{-0.5} \tan \alpha \quad \xi_{mc} = \left( 6.2 P^{0.31} (\tan \alpha)^{0.5} \right)^{1/(P+0.5)}$$

where	$H_s$	Significant wave height in front of breakwater
	$D_{n50}$	Equivalent cube length of median rock
	$\rho_s$	Mass density of rocks
	$\rho_w$	Mass density of water
	$\Delta$	$(\rho_s/\rho_w) - 1$
	$S$	Relative eroded area (see Table VI-5-21 for nominal values)
	$P$	Notional permeability (see Figure VI-5-11)
	$N_z$	Number of waves
	$\alpha$	Slope angle
	$s_m$	Wave steepness, $s_m = H_s/L_{om}$
	$L_{om}$	Deepwater wavelength corresponding to mean wave period

Validity:

- 1) Equations VI-5-68 and VI-5-69 are valid for non-depth-limited waves. For depth-limited waves  $H_s$  is replaced by  $H_{2\%}/1.4$ .
- 2) For  $\cot \alpha \geq 4.0$  only Eq VI-5-68 should be used.
- 3)  $N_z \leq 7, 500$  after which number equilibrium damage is more or less reached.
- 4)  $0.1 \leq P \leq 0.6$  ,  $0.005 \leq s_m \leq 0.06$  ,  $2.0 \text{ tonne}/m^3 \leq \rho \leq 3.1 \text{ tonne}/m^3$
- 5) For the 8 tests run with depth-limited waves, breaking conditions were limited to spilling breakers which are not as damaging as plunging breakers. Therefore, Eqs VI-5-68 and VI-5-69 may not be conservative in some breaking wave conditions.

Uncertainty of the formula: The coefficient of variation on the factor 6.2 in Eq VI-5-68 and on the factor 1.0 in Eq VI-5-69 are estimated to be 6.5% and 8%, respectively.

Test program: See Table VI-5-4.

**Figura 4-20: Fórmula de Van de Meer (1988).**  
Fuente: CEM (Ref 11).

### 4.3.2. FILTRO

El filtro es el elemento estructural que protege las capas subyacentes de material de la erosión provocada por el clima de oleaje. El filtro puede conformarse por una o más capas de material granulado, capas de geotextil industrial, o una mezcla de ambos.

En el diseño de los diques utilizados en este proyecto, no se considera la implementación de un filtro, ya que se busca una alta permeabilidad estructural.

### 4.3.3. NÚCLEO

El núcleo estructural se conforma por lo general de material granular fino o rechazo de cantera. Abarca la mayoría del volumen dentro del dique y sus valores dependen del peso de la coraza que posea la estructura.

Debido a que la estructura diseñada en este proyecto es un dique homogéneo, producto de la alta permeabilidad que se busca para la estructura, no es necesario la implementación de núcleo en la estructura.

En la Figura 4-21 se muestran los distintos valores de permeabilidad de acuerdo con la configuración del dique y al peso de los elementos de la coraza.

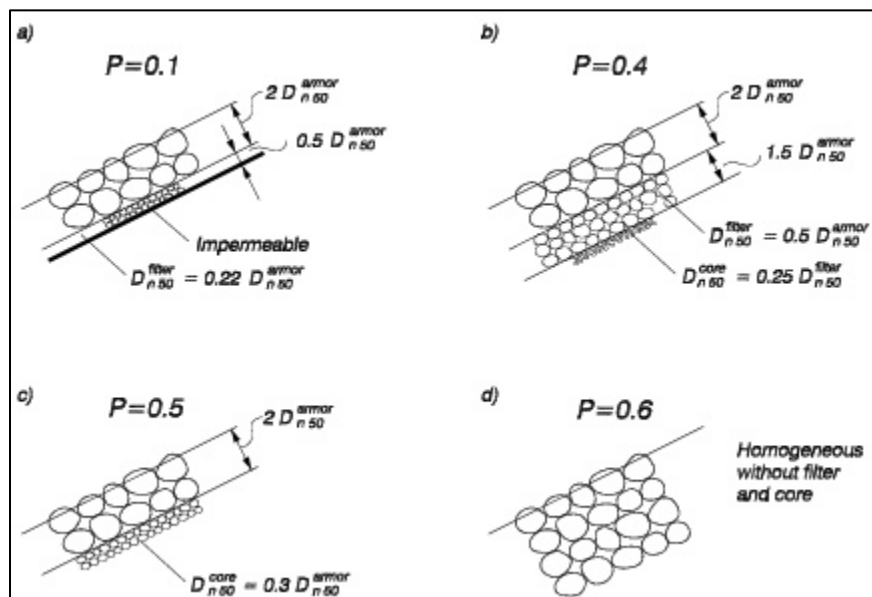


Figura 4-21: Coeficiente de permeabilidad Van de Meer (1988).

Fuente: CEM. (Ref 11).

### 4.3.4. PIE DE APOYO

Otro elemento estructural importante de un dique en talud es el pie de apoyo, ya que es un elemento que da soporte a la coraza en caso de que el dique se encuentre en profundidades relativamente bajas, además de evitar la socavación al pie de la estructura.

### FÓRMULA DE MARKLE (1989)

Markle utiliza un ábaco (Figura 4-22) que depende de la relación entre la profundidad al pie de la obra y la profundidad hasta la cresta del pie de apoyo; y el tipo de obra para calcular

el número de estabilidad  $N_s$ . Las curvas son el valor límite mínimo de  $N_s$  asociado a una estabilidad aceptable del pie de apoyo.

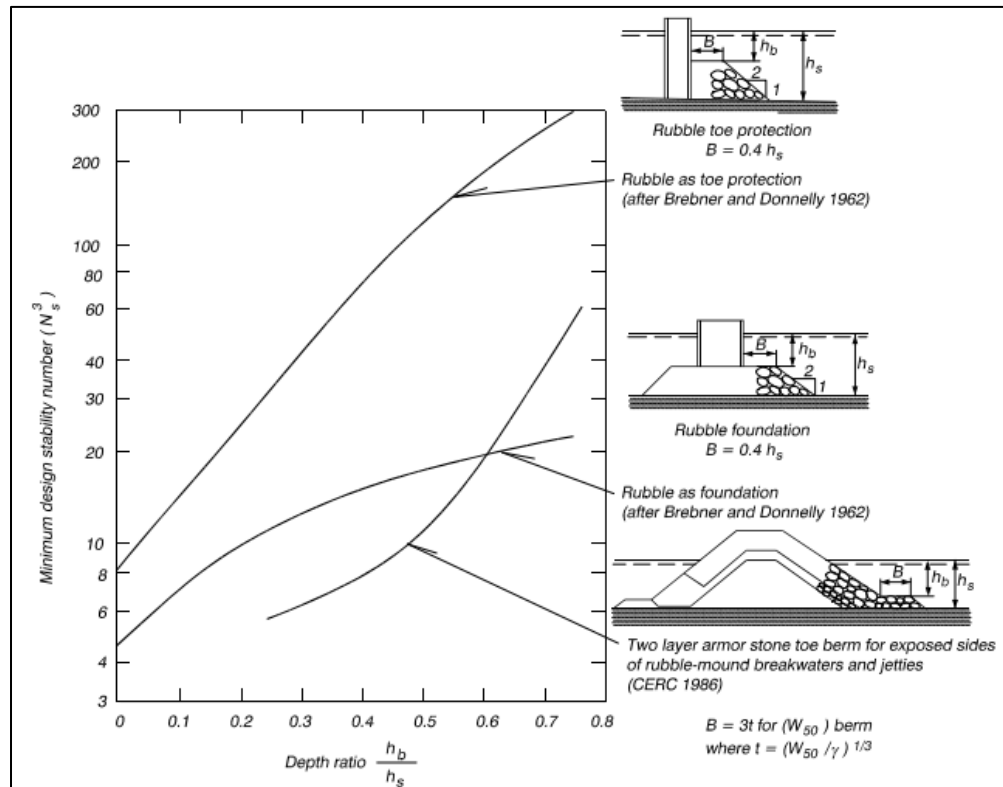


Figura 4-22: Ábaco de Markle (1989) para calcular  $N_s$ .

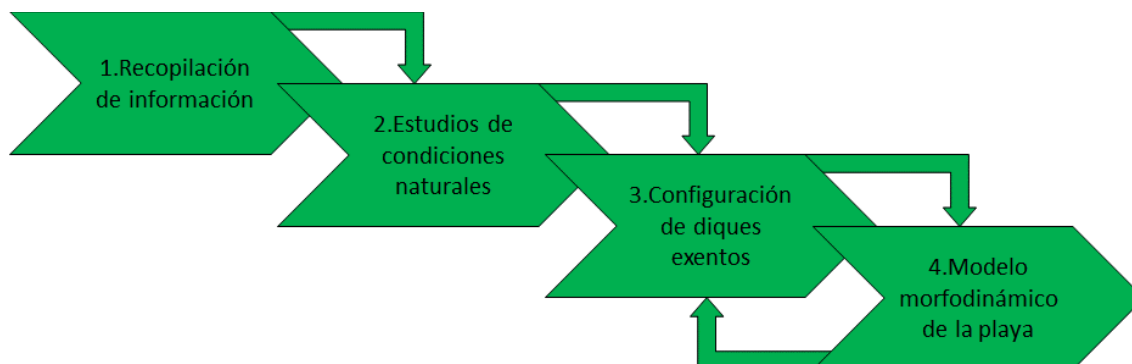
Fuente: CEM. (Ref 11).

Donde:

- $N_s = H / (\Delta D_{n50})$   
 $H$  = Altura de ola frente al rompeolas.  
 $\Delta = (\rho_s / \rho_w) - 1$   
 $\rho_s$  = Densidad de masa del elemento.  
 $\rho_w$  = Densidad de masa del agua.  
 $D_{n50}$  = Longitud equivalente de cubo de roca media.

## 5. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para realizar el diseño de los diques exentos y mejorar la playa de Huayquique se presenta en la Figura 5-1.



**Figura 5-1: Diagrama de la metodología del proyecto.**

Fuente: Elaboración propia.

Para aplicar la metodología se realizaron una serie de etapas:

1. Se obtuvieron datos característicos de la zona, además de recopilar información bibliográfica.
2. Se realizaron los estudios de batimetría, oleaje, marea y sedimento de playa Huayquique.
3. Se propusieron 3 configuraciones geométricas de diques exentos frente a la playa. Este pre-diseño fue cambiando a medida que se trabajaba en la etapa siguiente.
4. Al aplicar el modelo con el software SMC 3.0, se estimaron los cambios que presentaría la costa posterior a la construcción de los 3 diques exentos.
5. Se repitieron los pasos 3 y 4 hasta conseguir la configuración de playa deseada. Este método recursivo se repitió hasta conseguir una configuración de línea de playa del tipo Saliente.

### 5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Los datos topobatemétricos y de sedimentos fueron solicitados a la Dirección de Obras Portuarias de Tarapacá. Los datos para el análisis de la marea se obtuvieron de la página web de la Sea Level Station Monitoring Facility<sup>3</sup>, del mareógrafo correspondiente a Iquique. La ubicación del nodo se presenta en la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1: Datos de estación de monitoreo Iquique.**

Código	Latitud	Longitud
iqui2	20°12'16.48"S	70° 8'52.19"O

Fuente: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>.

<sup>3</sup> <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>

Los datos de oleaje se descargaron del Atlas de Oleaje de Chile de la Universidad de Valparaíso (Ref 1), los cuales presentan estadísticas de 36 años de datos de oleaje comprendidos entre 1980 y 2015.

## 5.2 ESTUDIOS DE CONDICIONES NATURALES

### 5.1.1. BATIMETRÍA

Para la caracterización de la batimetría se utilizaron las cartas náuticas del SHOA presentadas en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Cartas náuticas utilizadas.

Carta N°	Nombre	Escala
1100	Rada de Arica a Bahía de Iquique	1:200.000
1200	Bahía de Iquique a Puerto Tocopilla	1:200.000

Fuente: Elaboración propia.

Además, se trabajó con una batimetría proporcionada por la Dirección de Obras Portuarias de Tarapacá (Ref 12). Esta batimetría fue medida el día 8 de diciembre de 2016, mediante un bote pesquero con motor fuera de borda, una antena GPS y un transductor ecosonda de simple frecuencia modelo Echologger EU400 de registro digital gráfico. La toma de datos se efectuó con líneas de sondaje perpendiculares y paralelas a la costa, hasta la zona de rompiente (Figura 5-2).

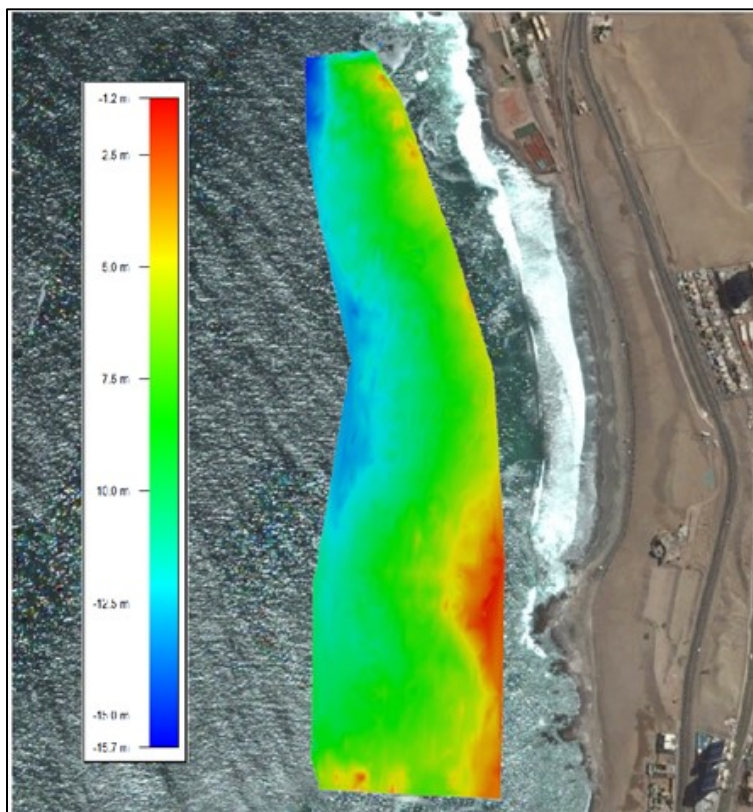


Figura 5-2: Sondaje realizado en playa Huayquique.

Fuente: Informe Etapa 2 "Mejoramiento Playa de Huayquique". (Ref 12).

### 5.1.2. ESTUDIO DE MAREA

Este estudio fue realizado de acuerdo con la publicación 3202 “Instrucciones Oceanográficas N°2” (Ref 13). Con este análisis se obtuvieron los niveles mostrados en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Niveles obtenidos con el análisis no armónico de marea.

Nivel
Pleamar Más Alta
Promedio Pleamares Más Alta
Promedio Pleamar
Nivel Medio de la Marea
Promedio Bajamar
Promedio Bajamares Más Bajas
Bajamar Más Baja

Fuente: Elaboración propia.

Además del análisis no armónico, se realizó un análisis armónico de la marea por medio del script T\_TIDE en Matlab, para obtener los niveles de marea mencionados en la Tabla 5-3 y además obtener la marea meteorológica por medio del residuo de los datos analizados.

Estos niveles fueron necesarios para obtener las profundidades al pie de la estructura y así diseñar los elementos de protección.

### 5.1.3. ESTUDIO DE OLEAJE

#### PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Para propagar el oleaje hasta un punto cercano a la costa, se utilizó el Software SWAN, mediante un método cuasi-purista (apartado 4.1.1). Se creó una matriz de propagación con 8 direcciones y 9 periodos, generando 72 coeficientes de agitación en el lugar de interés, en 3 puntos frente a la playa (Figura 5-3), todos con una profundidad de 25 [m]. Dichas propagaciones se pueden observar en el ANEXO III.

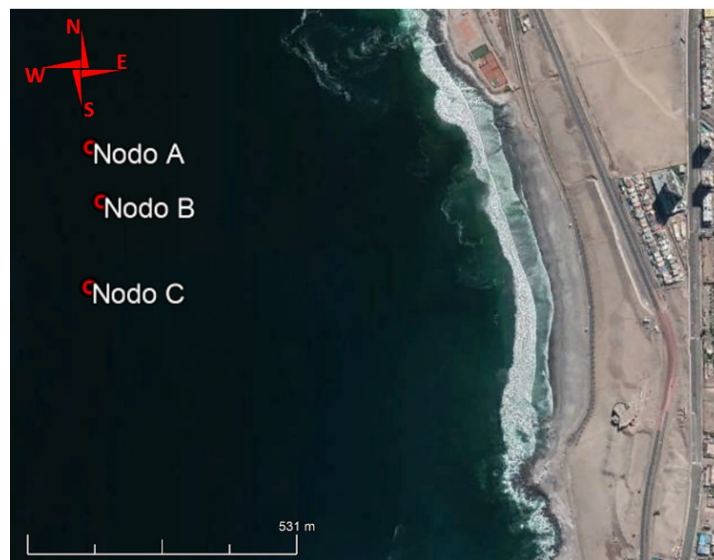


Figura 5-3: Ubicación de nodos de estudio frente a playa Huayquique.

Fuente: Elaboración propia a través de Google Earth.

Para obtener las condiciones de oleaje extremo en el lugar, se filtraron los datos de oleaje de acuerdo a las direcciones y periodos de la matriz de propagación, y se multiplicó cada altura significativa por su coeficiente de agitación correspondiente. Una vez realizado el análisis de clima extremo se obtiene la altura de diseño.

### **ANÁLISIS DE CLIMA MEDIO Y EXTREMO**

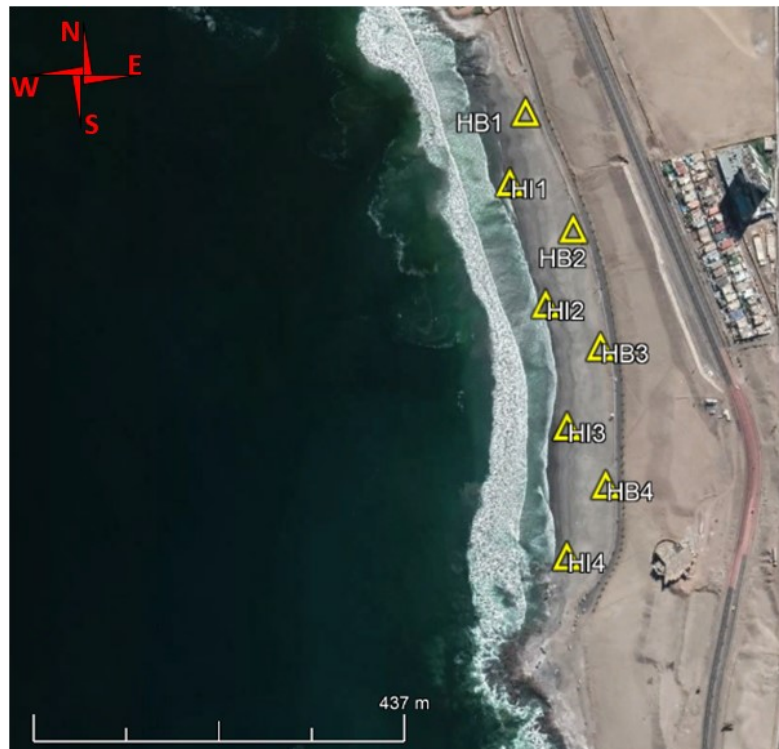
El estudio de oleaje se realizó de acuerdo con lo estipulado por la publicación 3201 "Instrucciones Oceanográficas N°1" (Ref 14).

En este estudio se realizaron análisis de clima medio y clima extremo. Estos análisis fueron necesarios para caracterizar las condiciones de la playa bajo condiciones reinantes y dominantes. Además de conocer como el oleaje afecta la playa, este estudio fue relevante para determinar el oleaje de diseño necesario para el diseño de los elementos de protección costera, tales como la coraza, pie de apoyo, entre otros.

#### **5.1.4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Para este análisis se cuenta con 10 puntos de muestras de arena tomadas en la zona de berma e intermareal de la playa, las que fueron llevados a laboratorio y tamizados. 8 de estos puntos fueron utilizados para este proyecto y se muestran en la Figura 5-4. Estas muestras se analizaron en el laboratorio especializado y acreditado AGQ Labs., utilizándose la escala de Wentworth (1922).

Con los datos de peso pasante se realizó un análisis granulométrico para cada muestra, y así se obtuvo una caracterización sedimentaria de la playa.



**Figura 5-4: Muestras de sedimentos en playa Huayquique.**

Fuente: Elaboración propia en base Google Earth.

### **5.3 MODELO MORFODINÁMICO DE LA PLAYA**

Los cambios morfológicos a largo plazo producidos por las dinámicas del oleaje fueron modelados mediante el software SMC. Con esta información se pudo analizar de qué forma la playa cambiará su configuración, y el efecto que tendrá sobre las olas en la zona abrigada.

Los cambios a corto plazo se modelaron con programas internos del SMC, los cuales son el Petra (Modelo de Evolución de Perfil Transversal) y el Mopla (Morfodinámica de Playas)

### **5.4 DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN**

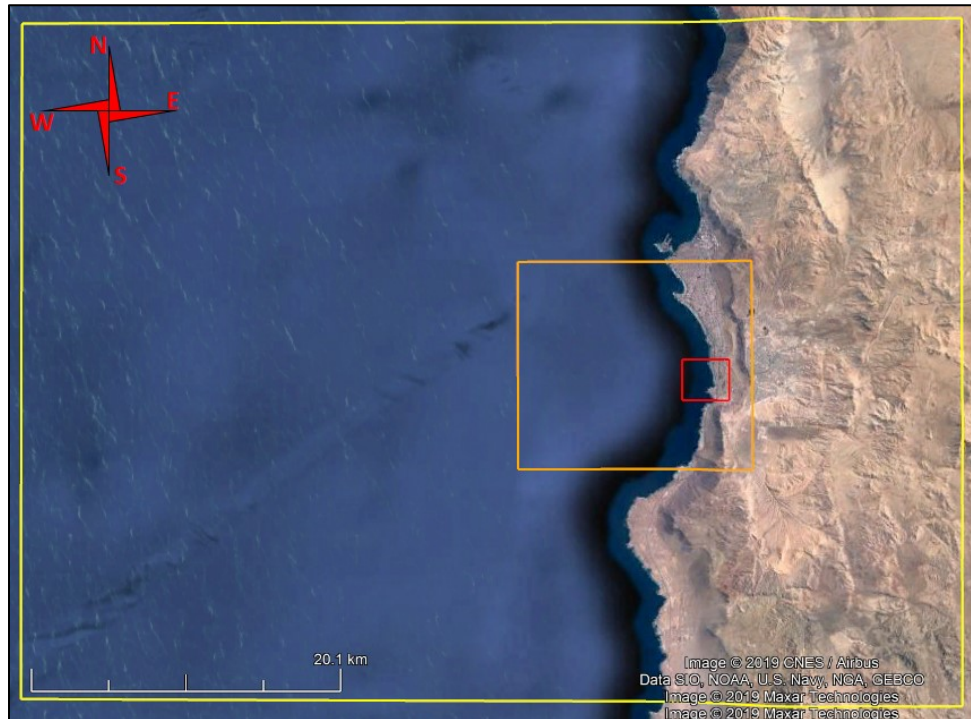
El diseño de la obra de protección está definido por formulaciones mostradas en Chasten, M. A. et al, (1993) (Ref 6) y en el CEM (2006) (Ref 11), utilizando la formulación propuesta por Van der Meer (1988) y su modificación de 1991 para diques con sobrepaso, pero no sumergidos, donde el diámetro del elemento se multiplica por un factor de reducción.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. CONDICIONES NATURALES DEL SECTOR

#### 6.1.1. ESTUDIO BATIMÉTRICO

La generación de la malla batimétrica fue necesaria tanto para realizar la propagación de oleaje al sector y el análisis morfológico de la playa. Para la propagación de oleaje la malla batimétrica fue digitalizada mediante los softwares Global Mapper, Surfer y Matlab, utilizando las mallas mostradas en la Figura 6-1. Se creó una malla gruesa (color amarillo) y dos mallas anidadas, una malla intermedia (color naranja) y una malla fina (color rojo). De esta última malla se obtuvieron los coeficientes de agitación cercanos al lugar de estudio para realizar los estudios de oleaje.



**Figura 6-1: Mallas de propagación.**

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Las dimensiones de las mallas definidas en el programa SWAN se muestran en la Tabla 6-1:

**Tabla 6-1: Características de malla de propagación.**

Malla	Origen malla [UTM]		Espaciamiento [m]		Extensión de la malla [m]		Número de nodos	
	X	Y	X	Y	Lx	Ly	X	Y
<b>Gruesa</b>	338200	7736100	100	100	59400	43400	595	435
<b>Intermedia</b>	369600	7751000	50	50	14800	13200	297	265
<b>Fina</b>	380000	7755400	25	25	300	2600	121	105

Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.2. ESTUDIO DE MAREA.

Los resultados del estudio de mareas se ven resumidos en la Tabla 6-2. Estos resultados fueron obtenidos mediante el análisis no armónico de la marea.

Tabla 6-2: Niveles de marea.

Nivel	[m]
Altura plea máxima	+1,55
Altura media pleas más altas	+1,29
Altura media pleamar	+1,17
Nivel medio del mar	+0,80
Altura media bajamar	+0,42
Altura media bajas más bajas	+0,38
Altura baja mínima	+0,13

Fuente: Elaboración propia.

Además de obtener los niveles de marea por medio de las constituyentes, se calculó la marea meteorológica mediante el análisis del residuo de los datos. Los valores de la marea meteorológica oscilan entre 0,20 [m] y -0,19 [m] con respecto al nivel medio del mar y se presentan en la Figura 6-2. A modo conservador se consideraron solo el 1% de las desnivelaciones más altas y bajas.

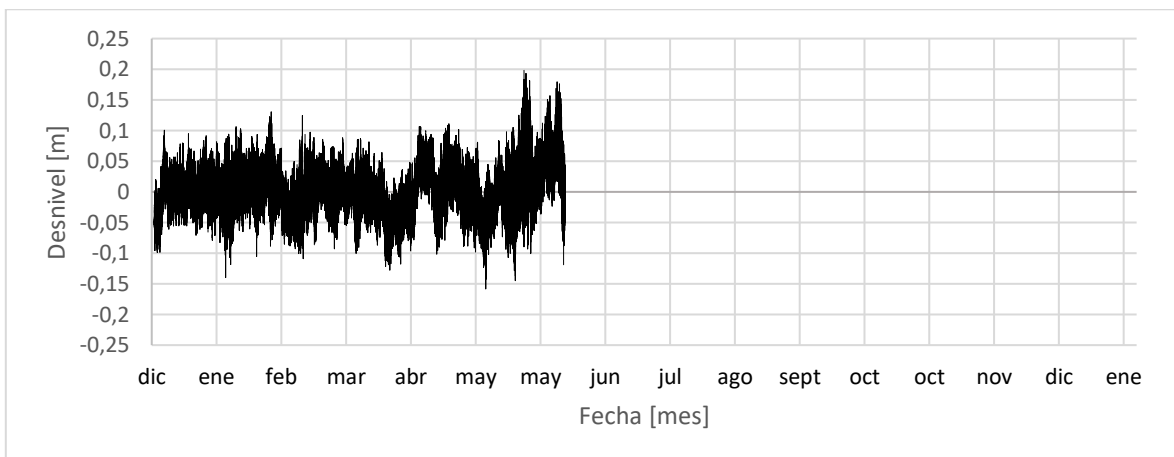


Figura 6-2: Marea Meteorológica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-3: Niveles de marea meteorológica.

Nivel	[m]
Promedio 1% valores más altos	+0,1
Promedio 25% valores más altos	+0,04
Promedio 25% valores más bajos	-0,04
Promedio 1% valores más bajos	-0,09

Fuente: Elaboración propia.

### NIVELES DE DISEÑO

Los niveles de diseño se calcularon como la suma de los valores de marea astronómica y meteorológica en 3 condiciones distintas mostradas en la Tabla 6-4. Para los niveles de diseño **Z1** y **Z2** se consideran como componentes astronómicas al valor de la pleamar máxima y al promedio de pleamares más altas respectivamente. Con estos niveles se obtuvieron las alturas de ola al pie de la obra, necesarias para determinar el peso de los

elementos de la coraza. El nivel de diseño **Z3** considera el nivel de baja mínima ya que fue necesario para el diseño de los elementos al pie de la obra.

Tabla 6-4: Niveles de diseño.

Componente	Z1 [m]	Z2 [m]	Z3 [m]
Astronómica	+1,55	+1,29	+0,13
Meteorológica	+0,10	+0,10	-0,09
Nivel de diseño	+1,65	+1,39	+0,04

Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.3. ESTUDIO DE OLEAJE

#### PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Mediante la propagación del oleaje fue posible obtener los coeficientes de agitación en los puntos A, B y C, mostrados en la Tabla 6-5, Tabla 6-6 y Tabla 6-7 respectivamente.

Los coeficientes de agitación son la relación entre la altura de ola en el sitio de interés y la altura de ola en aguas profundas. Permiten transformar los datos de altura de ola en aguas profundas hacia el lugar de estudio.

Ecuación 6-1

$$K_a = \frac{H_{m0 \text{ sitio de interés}}}{H_{m0 \text{ aguas profundas}}}$$

Tabla 6-5: Coeficientes de agitación en el punto A.

		Periodos [°]								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Direcciones	NNW	0,84	0,65	0,55	0,50	0,51	0,52	0,52	0,49	0,41
	NW	1,16	0,97	0,89	0,82	0,78	0,75	0,74	0,73	0,64
	WNW	1,17	0,99	0,95	0,91	0,89	0,89	0,89	0,88	0,78
	W	1,19	1,01	0,97	0,95	0,95	0,95	0,98	0,95	0,83
	WSW	1,17	0,99	0,95	0,91	0,88	0,86	0,84	0,80	0,69
	SW	1,14	0,95	0,87	0,79	0,73	0,68	0,64	0,59	0,50
	SSW	0,62	0,49	0,44	0,42	0,42	0,45	0,49	0,51	0,45
	S	0,07	0,07	0,08	0,12	0,17	0,23	0,28	0,33	0,33

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-6: Coeficientes de agitación en el punto B.

		Periodos [°]								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Direcciones	NNW	0,86	0,68	0,59	0,53	0,51	0,52	0,53	0,50	0,43
	NW	1,16	0,98	0,90	0,83	0,79	0,78	0,77	0,76	0,67
	WNW	1,17	0,99	0,95	0,92	0,91	0,91	0,92	0,90	0,79
	W	1,19	1,01	0,97	0,95	0,95	0,94	0,96	0,94	0,82
	WSW	1,17	0,99	0,95	0,90	0,87	0,85	0,83	0,79	0,68
	SW	1,13	0,94	0,85	0,77	0,70	0,65	0,61	0,56	0,48
	SSW	0,58	0,47	0,42	0,39	0,40	0,44	0,47	0,48	0,43
	S	0,06	0,06	0,08	0,12	0,16	0,22	0,27	0,32	0,31

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-7: Coeficiente de agitación en el punto C.

		Periodos [°]								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Direcciones	NNW	0,88	0,69	0,60	0,54	0,52	0,53	0,55	0,52	0,45
	NW	1,16	0,98	0,91	0,84	0,80	0,79	0,79	0,78	0,69
	WNW	1,17	0,99	0,95	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,77
	W	1,19	1,01	0,96	0,92	0,90	0,88	0,89	0,86	0,75
	WSW	1,17	0,99	0,93	0,88	0,83	0,80	0,77	0,72	0,62
	SW	1,12	0,93	0,83	0,74	0,68	0,64	0,59	0,54	0,46
	SSW	0,55	0,44	0,38	0,37	0,38	0,43	0,47	0,48	0,43
	S	0,05	0,06	0,07	0,10	0,15	0,21	0,27	0,32	0,31

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Tabla 6-5 se realizó la Figura 6-3 indicando los cambios en el coeficiente de agitación dependiendo del periodo y la dirección. Los mayores coeficientes se observan de oleajes provenientes entre el NW y SW con coeficientes máximos provenientes de la dirección W, mientras que los coeficientes más bajos se observan de direcciones NNW, SSW y S. En la Figura 6-4 y Figura 6-5 se presentan los cambios en los coeficientes de agitación de los nodos B y C respectivamente.

Por otra parte, los mayores coeficientes se generan a periodos más bajos, a excepción de la dirección S, cuyos coeficientes aumentan a medida que aumenta el periodo. En periodos comprendidos entre los 6 [s] y 18 [s], los coeficientes de agitación no dependen del periodo si no de la dirección de donde provienen. Para periodos mayores a 18 [s] los coeficientes disminuyen a su valor mínimo menos en la dirección S. Esto último podría deberse a que esta dirección es la que presenta la mayor difracción producto del sector de Punta Gruesa, que se encuentra al sur de la playa de Huayquique.

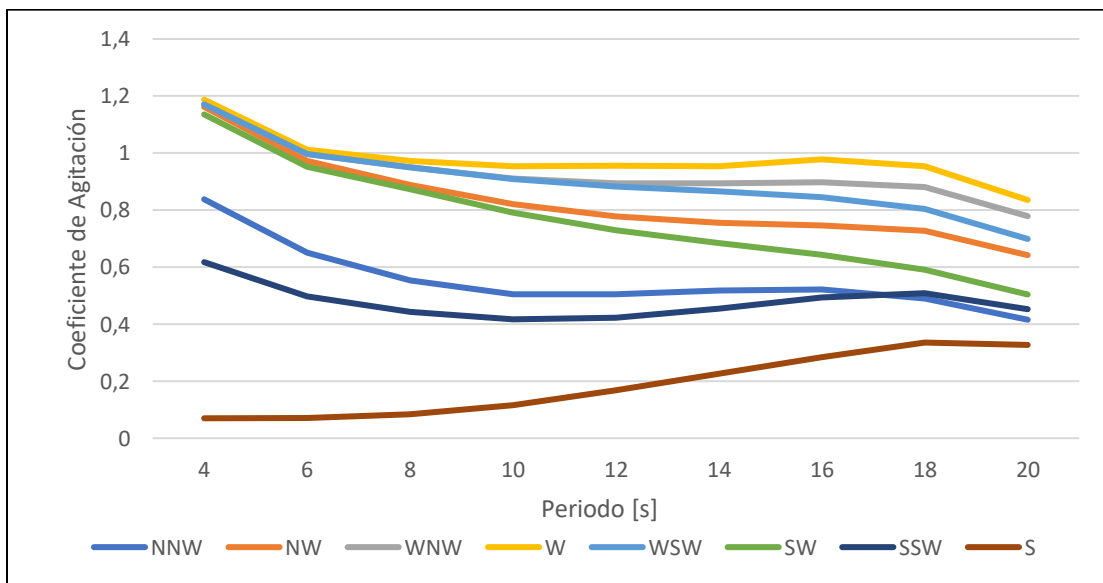
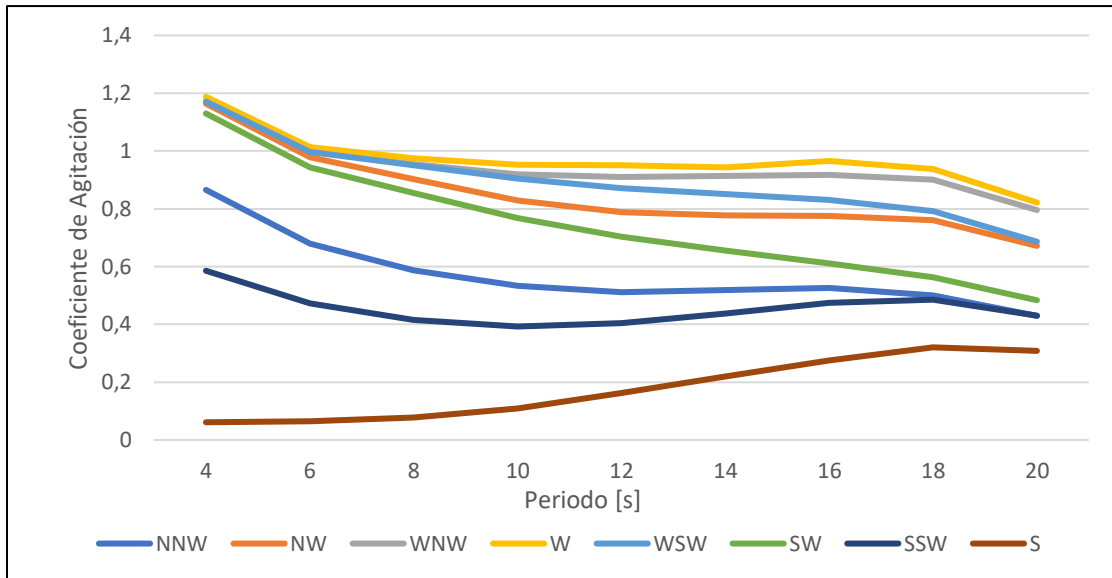


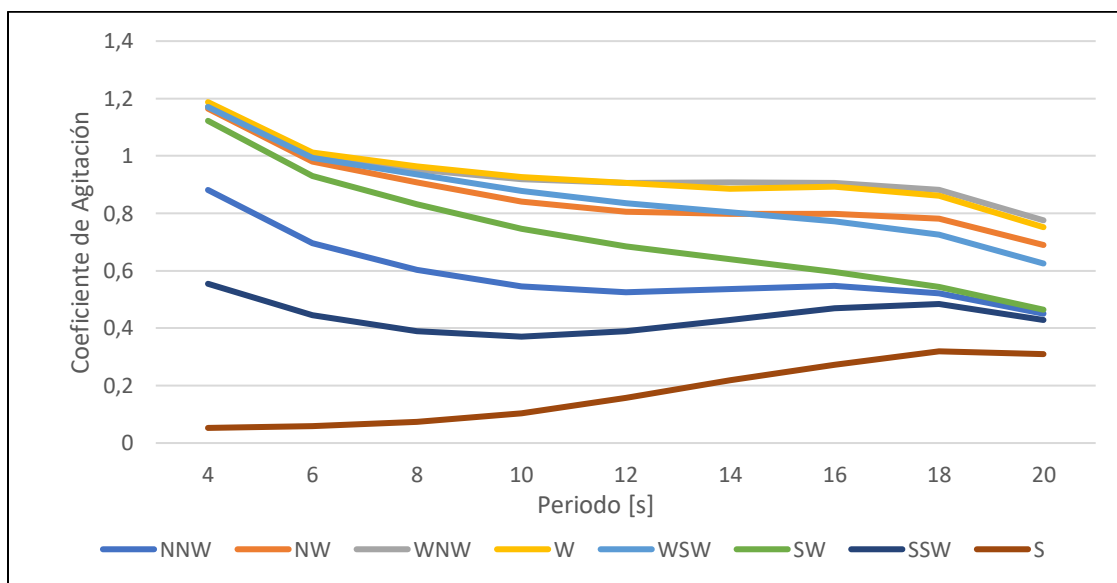
Figura 6-3: Coeficiente de Agitación Nodo A.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6-4: Coeficiente de Agitación Nodo B.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6-5: Coeficiente de Agitación Nodo C.**

Fuente: Elaboración propia.

Los cambios en la dirección de propagación en los nodos A, B y C se presentan en la Tabla 6-8, Tabla 6-9 y Tabla 6-10 respectivamente. Estos cambios en las direcciones, al igual que con los coeficientes de agitación, reemplazaron a las direcciones iniciales de propagación en aguas profundas para realizar los análisis de clima medio y extremo en el lugar de estudio. Se observa que las direcciones del segundo cuadrante disminuyen a medida que aumenta el periodo, mientras que las direcciones provenientes del tercer cuadrante aumentan si el periodo también lo hace.

**Tabla 6-8: Direcciones [°] en el Nodo A.**

		Periodos [s]								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Direcciones	NNW	329,659	327,623	323,056	316,416	309,327	303,675	299,846	297,613	296,86
	NW	314,611	313,582	310,311	305,673	301,036	296,835	293,465	291,139	290,252
	WNW	292,447	292,196	290,703	288,359	285,828	283,553	281,683	280,358	279,805
	W	269,987	270,044	270,297	270,692	271,087	271,49	271,865	272,206	272,385
	WSW	247,506	247,676	248,628	250,231	252,026	253,591	254,929	255,886	256,237
	SW	226,262	227,044	229,624	233,522	237,486	241,008	243,809	245,773	246,378
	SSW	214,709	215,957	219,489	225,285	231,724	237,329	241,294	243,666	244,549
	S	209,977	211,429	217,76	227,136	234,166	238,937	242,192	244,38	245,461

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-9: Direcciones [°] en el Nodo B.**

		Periodos [s]								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Direcciones	NNW	330,197	328,329	323,978	317,713	311,159	305,482	301,438	298,955	297,955
	NW	314,69	313,821	310,85	306,352	301,729	297,519	294,16	291,835	290,904
	WNW	292,447	292,23	290,844	288,62	286,161	283,903	282,004	280,683	280,128
	W	269,987	270,042	270,292	270,666	271,033	271,411	271,761	272,083	272,248
	WSW	247,506	247,681	248,679	250,373	252,244	253,839	255,153	256,07	256,399
	SW	226,431	227,277	229,967	233,924	237,926	241,451	244,265	246,32	247,024
	SSW	215,38	216,619	220,292	226,342	232,992	238,567	242,38	244,62	245,444
	S	210,67	212,466	219,167	228,746	235,61	240,154	243,242	245,322	246,331

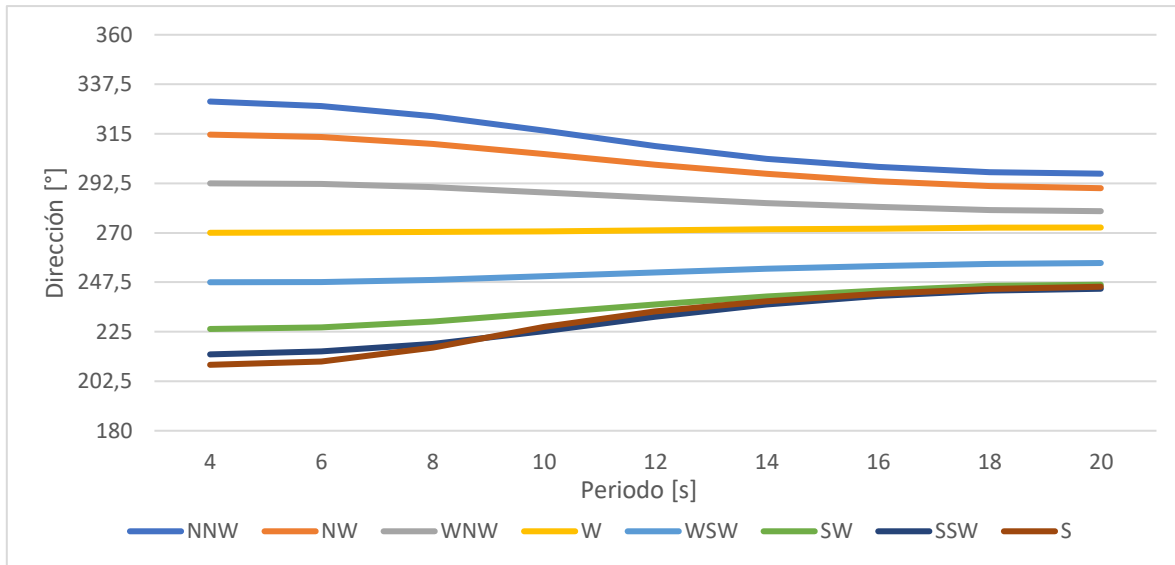
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-10: Direcciones [°] en el Nodo C.**

		Periodos [s]								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Direcciones	NNW	330,502	328,699	324,409	318,223	311,655	305,872	301,759	299,177	298,05
	NW	314,725	313,902	310,963	306,457	301,813	297,606	294,237	291,898	290,955
	WNW	292,448	292,245	290,933	288,815	286,449	284,275	282,449	281,178	280,659
	W	270,014	270,022	270,06	270,102	270,075	270,051	270,258	270,479	270,603
	WSW	247,506	247,676	248,628	250,231	252,026	253,591	254,929	255,886	256,237
	SW	226,262	227,044	229,624	233,522	237,486	241,008	243,809	245,773	246,378
	SSW	214,709	215,957	219,489	225,285	231,724	237,329	241,294	243,666	244,549
	S	209,977	211,429	217,76	227,136	234,166	238,937	242,192	244,38	245,461

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-6 se observan los cambios provocados por el periodo y la dirección en aguas profundas a partir de la Tabla 6-8. Se observa asimismo que con periodos bajos la dirección no cambia, pero a medida que aumenta el periodo de la ola, las direcciones se acotan entre las direcciones WNW y WSW.



**Figura 6-6: Cambio en las direcciones de propagación en el Nodo A.**  
Fuente: Elaboración propia.

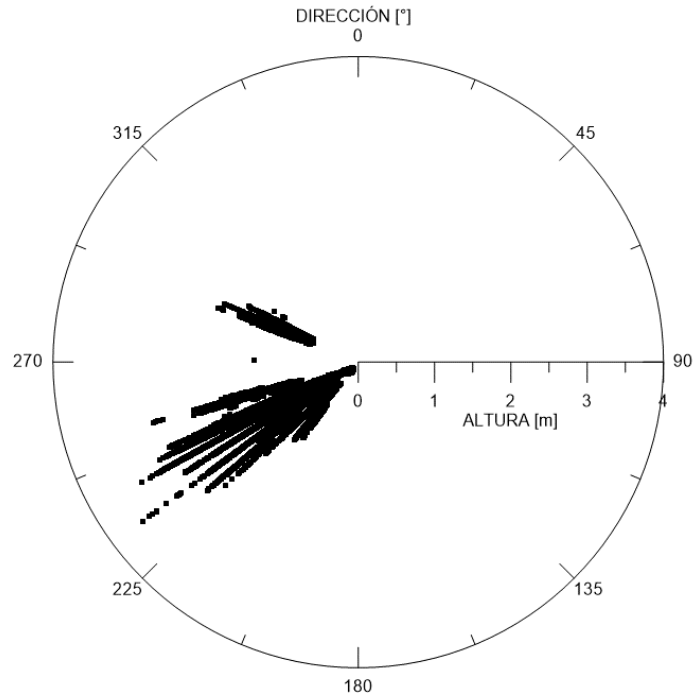
### ANÁLISIS DE CLIMA OPERACIONAL

Para analizar el clima de oleaje operacional en playa Huayquique se realizaron tablas de incidencia, rosas de dirección acumulada y rosas de dispersión radial en los 3 nodos de análisis de la playa. Para realizar este análisis, se multiplicó cada altura significativa de oleaje en aguas profundas por su coeficiente de agitación correspondiente y se reemplazó cada dirección proveniente de aguas profundas por la dirección propagada frente a playa Huayquique. Las rosas presentadas en la Figura 6-7 y Figura 6-8 muestran las direcciones en el nodo A, mientras que las rosas de los nodos B y C se muestran en el ANEXO III.

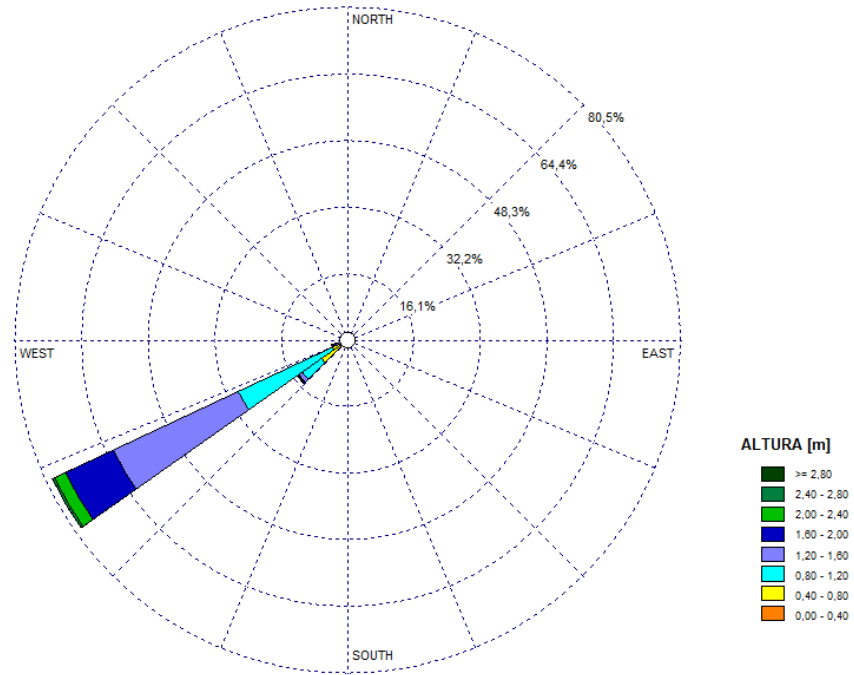
La rosa de dispersión radial (Figura 6-7) representa todas las alturas de olas y direcciones en el nodo A, donde se observan alturas máximas y direcciones predominantes del tercer cuadrante, principalmente de la dirección WSW. Se aprecian direcciones provenientes del WNW, pero son pocas en comparación al conjunto de datos.

La segunda rosa (Figura 6-8) presenta las direcciones acumuladas en el nodo A, mostrando una clara dominancia de direcciones entre WSW y SW con un 99% de los datos entre estas direcciones. No se observan los datos provenientes del segundo cuadrante producto de que estas direcciones corresponden solo al 1% del total de datos.

Para la realización de las rosas se utilizaron 2 programas. Para la rosa de dispersión radial se usó Surfer 13. Mientras que para la rosa de direcciones acumuladas se utilizó WRPlot.



**Figura 6-7: Rosa de dispersión radial nodo A.**  
Fuente: Elaboración propia en base al software Surfer 13.



**Figura 6-8: Rosa de direcciones acumuladas nodo A.**  
Fuente: Elaboración propia en base al software WRPlot Freeware 8.0.2.

De la Tabla 6-11 a la Tabla 6-13 se muestran las tablas de incidencia en el nodo A. Donde **A (%)** corresponde a la frecuencia relativa de cada rango de los parámetros estadísticos.

**Tabla 6-11: Tabla de incidencia Altura Significativa vs Periodo Medio.**

		Altura [m]																	Total	A (%)	
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	1.6-1.8	1.8-2	2-2.2	2.2-2.4	2.4-2.6	2.6-2.8	2.8-3	3-3.2	3.2-3.4			3.4-3.6
Periodo [s]	4-6	3	0	0	9	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0%
	6-8	6	1	4	80	115	58	21	22	21	34	21	10	0	0	0	0	0	0	393	0%
	8-10	26	13	315	636	386	176	176	124	70	48	64	52	22	0	6	1	1	1	2117	2%
	10-12	36	53	1243	3282	2259	1997	1279	651	289	151	38	16	14	4	0	0	2	1	11315	11%
	12-14	8	188	1506	6342	8641	11143	11465	6982	3006	1181	454	126	50	9	1	0	0	0	51102	49%
	14-16	0	34	320	1347	2485	3997	4869	4868	3178	1829	783	385	200	59	20	3	1	0	24378	23%
	16-18	0	30	129	892	2055	2884	3019	2311	1521	954	644	352	130	41	5	0	0	0	14967	14%
	18-20	0	0	40	173	277	151	85	26	17	11	7	0	0	0	0	0	0	0	787	1%
	20-22	0	0	6	30	32	14	13	5	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	105	0%
	22-24	0	0	1	5	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0%
	<b>Total</b>	<b>79</b>	<b>319</b>	<b>3564</b>	<b>12796</b>	<b>16252</b>	<b>20424</b>	<b>20928</b>	<b>14989</b>	<b>8107</b>	<b>4210</b>	<b>2011</b>	<b>941</b>	<b>416</b>	<b>113</b>	<b>32</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>105191</b>	
<b>A (%)</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>12%</b>	<b>15%</b>	<b>19%</b>	<b>20%</b>	<b>14%</b>	<b>8%</b>	<b>4%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>		

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-12: Tabla de incidencia Altura Significativa vs Dirección Peak.**

		Altura [m]																	Total	A (%)	
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	1.6-1.8	1.8-2	2-2.2	2.2-2.4	2.4-2.6	2.6-2.8	2.8-3	3-3.2	3.2-3.4			3.4-3.6
Dirección [°]	SSW	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0%
	SW	70	182	2531	7366	3845	1134	599	369	176	133	104	77	29	2	6	1	3	2	16629	16%
	WSW	0	137	1033	5406	12151	18803	19929	14485	7908	4069	1907	864	387	111	26	3	1	0	87220	83%
	W	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0%
	NNW	0	0	0	24	256	487	398	135	23	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1331	1%
	Total	79	319	3564	12796	16252	20424	20928	14989	8107	4210	2011	941	416	113	32	4	4	2	105191	
A (%)	0%	0%	3%	12%	15%	19%	20%	14%	8%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-13: Tabla de incidencia Dirección Peak vs Periodo Medio.**

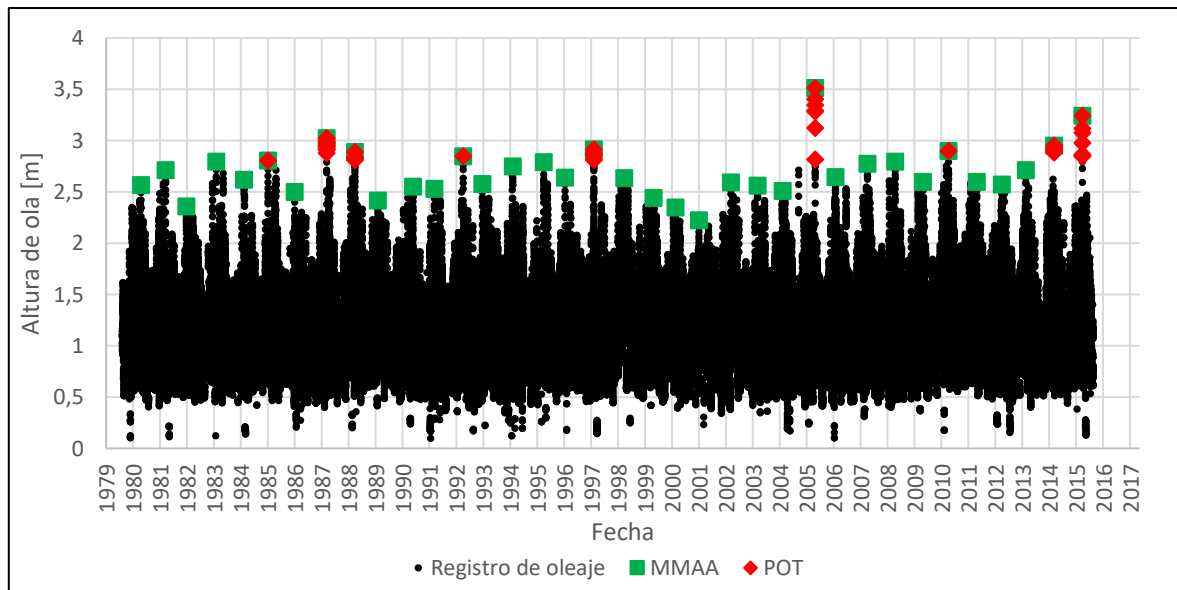
		Periodo [s]										Total	A (%)
		4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24		
Dirección [°]	SSW	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0%
	SW	13	385	2113	6973	7145	0	0	0	0	0	16629	16%
	WSW	0	2	4	4338	43861	24024	14201	696	85	9	87220	83%
	W	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0%
	NNW	0	0	0	2	96	354	766	91	20	2	1331	1%
	Total	16	393	2117	11315	51102	24378	14967	787	105	11	105191	
A (%)	0%	0%	2%	11%	49%	23%	14%	1%	0%	0%			

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la mayoría del oleaje en el sector va desde los 0,8 [m] a los 1,6 [m] con un 68% de los datos, encontrándose que el 49% de los datos tiene valores entre los 1 [m] y 1,4 [m] de altura significativa. El periodo predominante con un 49% de los datos va entre los 12 [s] y los 14 [s], seguido de periodos entre 14 [s] y 16 [s] con un 23% de los datos. La dirección de propagación predominante, con un total de 82% de los datos va desde los 236.25 [°] a los 247.5 [°], lo que coincide con la dirección del flujo medio de energía calculado más adelante en el apartado 6.3.2, que tiene un valor de 241 [°]. Estos datos se utilizaron para analizar el efecto de la transmisión bajo situaciones de oleaje medio, como se verá en el apartado 6.2.3.

### ANÁLISIS DE CLIMA EXTREMO

El análisis de clima extremo fue realizado con el criterio de máximos sobre un umbral (Peak Over Threshold, POT) debido a que este método mostró ser más conservador que el de Máximos Anuales mostrado en el Anexo III. Para la selección de tormentas se consideró un rango mínimo de 3 días entre cada tormenta para cumplir una condición de independencia. En la Figura 6-9 se muestran el total de datos de oleaje y ambos criterios de selección de tormentas, Peak Over Threshold y Máximos Anuales.



**Figura 6-9: Serie de tiempo y valores escogidos.**

Fuente: Elaboración propia.

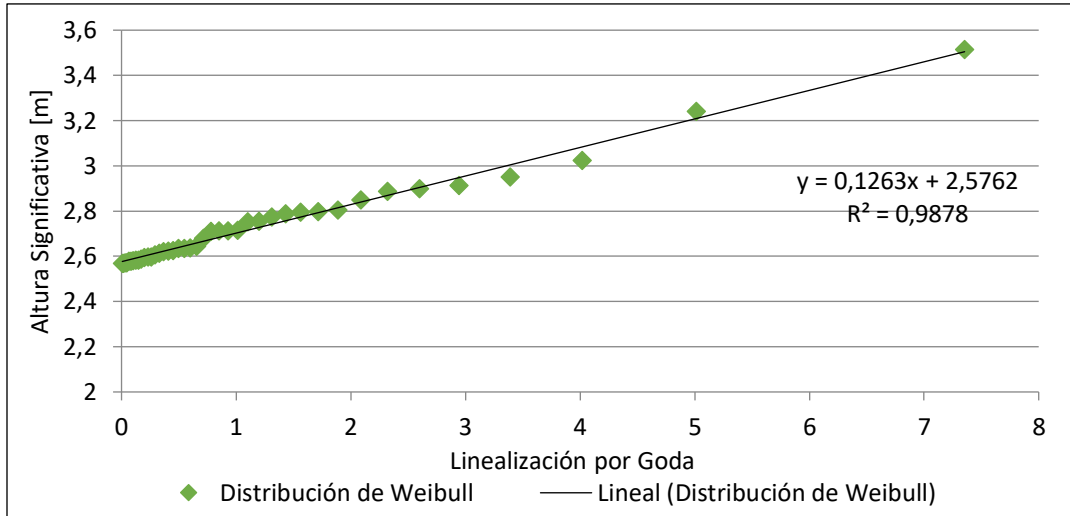
Las tormentas escogidas fueron 42 para un total de 36 años de datos y son presentadas en la Tabla 6-14. El parámetro de dirección corresponde a la dirección peak que se obtuvo de los datos del Atlas de Oleaje en el que aparecen solo 7 direcciones peak, y al momento de la elección de eventos extremos solo 1 dirección parecen ser la predominante (218 [°]) y 2 direcciones con menor frecuencia (248 [°] y 233 [°]).

**Tabla 6-14: Alturas de oleaje de tormentas calculadas por POT**

Fecha	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2005-09-11	3,51	9,24	218
2015-08-09	3,24	14,87	218
1987-07-26	3,02	14,87	218
2014-07-24	2,95	9,24	218
1997-06-22	2,91	14,87	218
2010-08-19	2,90	16,36	218
1988-08-14	2,89	14,87	218
1992-08-23	2,85	16,36	218
1985-05-26	2,81	16,36	218
2008-08-27	2,80	14,87	248
1983-06-23	2,80	14,87	218
1995-08-15	2,79	14,87	218
2007-08-16	2,78	14,87	218
2010-07-25	2,75	14,87	218
1994-06-19	2,75	16,36	218
1981-08-03	2,71	16,36	218
2005-01-31	2,71	10,16	218
2013-07-04	2,71	16,36	233
1985-09-11	2,71	14,87	218
1983-09-28	2,68	11,18	218
2006-06-09	2,64	14,87	233
1996-05-29	2,64	16,36	233
1988-07-18	2,64	14,87	233
1998-08-13	2,63	14,87	218
1987-09-10	2,63	14,87	218
2014-07-03	2,62	18,00	218
1984-07-06	2,62	13,52	218
1998-09-27	2,61	14,87	218
2008-06-09	2,61	14,87	218
2011-09-04	2,60	14,87	233
2009-09-08	2,60	8,40	218
2002-07-27	2,59	14,87	218
2011-06-20	2,59	14,87	218
2009-07-07	2,58	14,87	218
1981-07-10	2,58	14,87	218
1983-05-04	2,58	14,87	218
1995-10-08	2,58	14,87	218
1993-05-08	2,58	16,36	218
2012-08-14	2,57	16,36	218
2010-06-15	2,57	14,87	218
2011-08-11	2,57	16,36	233
2011-08-03	2,57	8,40	218

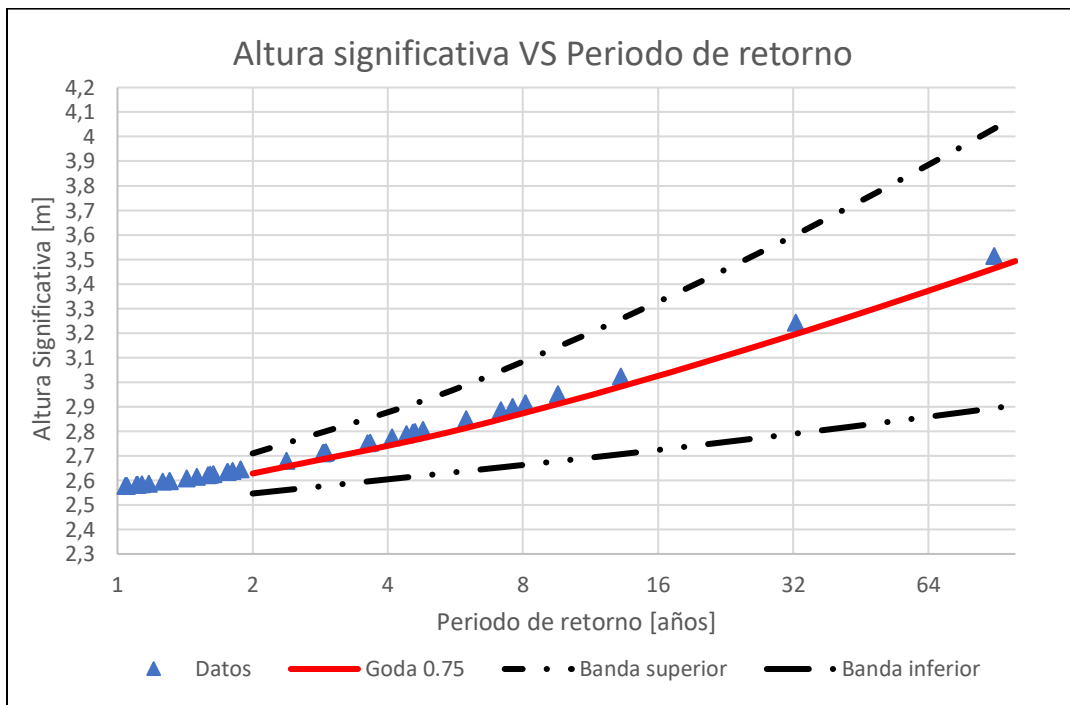
Fuente: Elaboración propia.

Mediante las distribuciones de probabilidad de Weibull y Gumbel, con probabilidades de ploteo de Goda y Gringorten respectivamente, se realizaron los análisis para obtener la función de distribución que mejor se ajuste a los datos. La función con el mejor coeficiente de determinación ( $R^2$ ) corresponde a la distribución de Weibull, con una probabilidad de ploteo de Goda y parámetro de forma  $K = 0.75$  que se muestran en la Figura 6-10.



**Figura 6-10: Distribución de Weibull.**  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-11 se muestra la distribución de probabilidad que posee el mejor ajuste y las bandas de confianza. Se observa que las alturas de periodo de retorno no superan los 3 [m], excepto utilizando las bandas de confianza. Debido a que se busca ser conservador, se elige la altura de periodo de retorno con una banda de confianza del 95% superior.



**Figura 6-11: Distribución de altura de ola significativa.**  
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6-15 entrega las alturas de ola significativa para distintos periodos de retorno ( $T_r$ ), y su respectivo límite superior e inferior con confianza del 95%.

Tabla 6-15: Periodos de retorno con su respectiva altura y bandas de confianza al 95%.

Periodos de retorno [años]	Hs [m]	Hs banda superior [m]	Hs banda inferior [m]
5	2,78	2,94	2,62
10	2,92	3,16	2,68
20	3,08	3,41	2,74
50	3,31	3,78	2,83
75	3,41	3,95	2,88
100	3,49	4,08	2,91

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.1.4. ANÁLISIS MORFODINÁMICO DE LA PLAYA

En la Figura 6-12 se presentan las ubicaciones de las 8 muestras tomadas entre la zona de berma y la zona intermareal a lo largo de playa Huayquique. Se realizó un análisis granulométrico a las 8 muestras tomadas en el lugar.

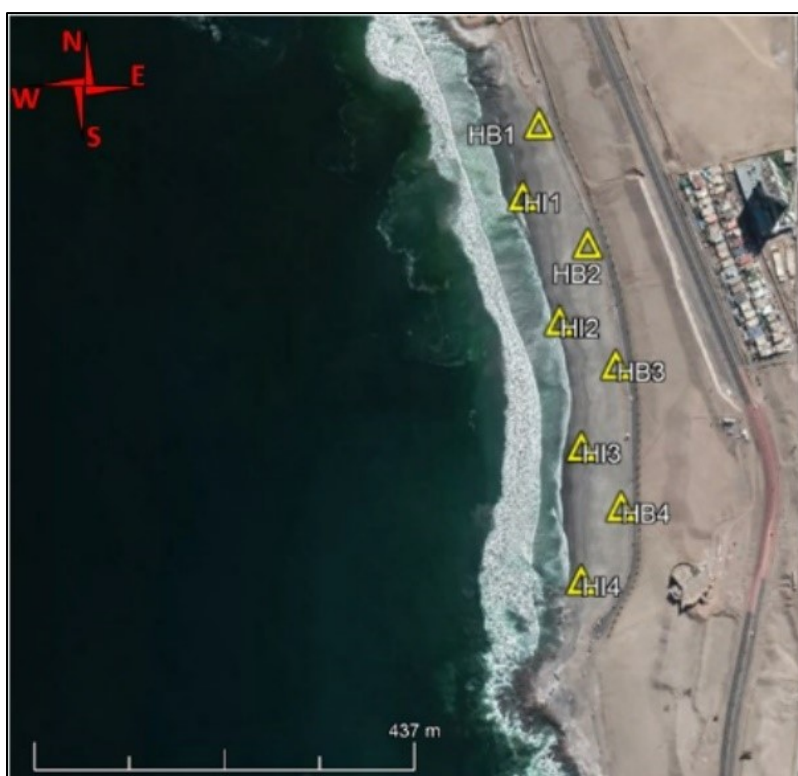
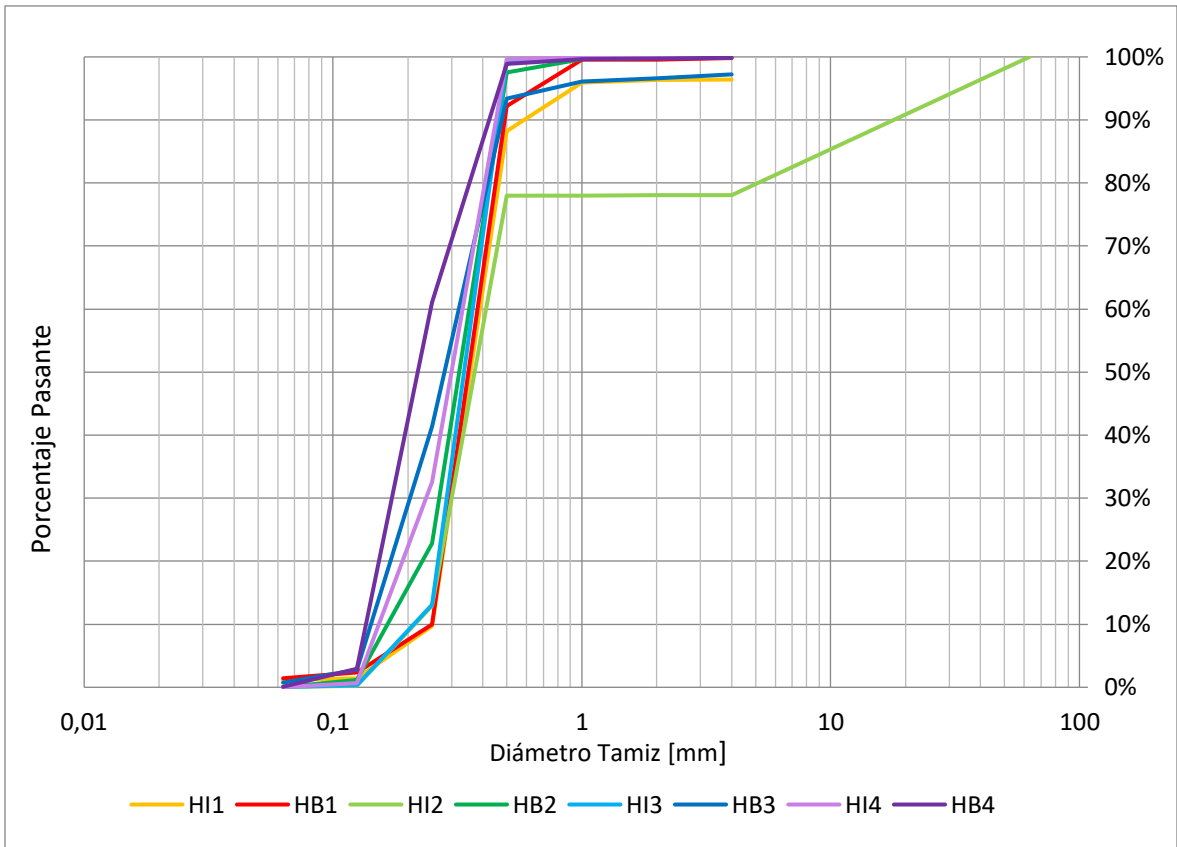


Figura 6-12: Muestras tomadas en playa Huayquique.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-13 se observa que a excepción de la muestra HI2, las curvas se comportan de manera similar con diámetros predominantes entre los 0,25 [mm] y 0,5 [mm].



**Figura 6-13: Curvas granulométricas playa Huayquique.**

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la Tabla 6-16. Se observa que la mayoría de las muestras se clasifican como arena media, con una selección muy bien clasificada. El nivel de asimetría se observa desde simétrica (igual cantidad de gruesos y finos) a positiva (moderada-alta presencia de finos). La curtosis referida a la forma de distribución de las partículas se presentó desde extremadamente leptocúrtica a platicúrtica, siendo esta última como la que más se repite.

La predominancia de material mediano a lo largo de playa Huayquique ayuda a tener una alta comodidad para el ocupante, lo que conlleva a una alta intensidad de uso de la playa. De acuerdo con GIOC (2002), en playas de tipo turístico se define que la playa se encuentra:

- Saturada: para superficie útil menor que 5 m<sup>2</sup>/persona.
- Uso alto: para superficie útil en el rango 7 – 15 m<sup>2</sup>/persona.
- Uso bajo: para superficie útil mayores que 20 m<sup>2</sup>/persona.

La muestra HI2, muestra la desviación estándar más alta, además del diámetro medio mayor. Esto se debe a que, como se mostró en la curva granulométrica de la Figura 4-13, existe un 22% de la muestra que quedó retenida entre los tamices de 4 [mm] y 63 [mm].

**Tabla 6-16: Resultados análisis granulométrico**

Muestra	Clasificación	Curtosis		Asimetría		Desviación Estándar		Diámetro medio [mm]
		Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	
<b>HB1</b>	Arena media	1,11	Mesocúrtica	0,01	Simétrica	0,11	Muy bien Clasificada	0,37
<b>HI1</b>	Arena media	1,96	Muy leptocúrtica	0,24	Moderado exceso de Finos	0,17	Muy bien Clasificada	0,38
<b>HB2</b>	Arena media	0,84	Platicúrtica	-0,09	Simétrica	0,44	Bien Clasificada	0,34
<b>HI2</b>	Arena media	105,3	Extremadamente Leptocúrtica	0,99	Alto exceso de Finos	0,21	Muy Bien Clasificada	6,87
<b>HB3</b>	Arena media	1,28	Leptocúrtica	0,33	Alto exceso de Finos	0,17	Muy Bien Clasificada	0,31
<b>HI3</b>	Arena media	0,89	Platicúrtica	-0,09	Simétrica	0,09	Muy Bien Clasificada	0,36
<b>HB4</b>	Arena fina	0,83	Platicúrtica	0,43	Alto exceso de Finos	0,11	Muy Bien Clasificada	0,26
<b>HI4</b>	Arena media	0,74	Platicúrtica	-0,02	Simétrica	0,12	Muy Bien Clasificada	0,31

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis fue necesario para la obtención del  $d_{50}$  y  $d_{90}$  (Tabla 6-17), parámetros de sedimento que deben ser definidos en el programa Mopla. Se observa que los diámetros de sedimento son mayores en la zona intermareal que en la zona de la berma, con arena más fina en la zona sur y más gruesa en la zona norte de la playa. Los  $d_{50}$  varían entre los 0,23 [mm] y 0,39 [mm], y los  $d_{90}$  entre 0,44 [mm] y 36,10 [mm].

**Tabla 6-17: Diámetro de muestras de sedimento.**

Muestra	$d_{50}$	$d_{90}$
HB1	0,37	0,49
HI1	0,38	0,62
HB2	0,34	0,47
HI2	0,39	36,10
HB3	0,29	0,48
HI3	0,36	0,47
HB4	0,23	0,44
HI4	0,32	0,46

Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.5. MORFODINÁMICA DE PLAYA

Para conocer el comportamiento de la playa, se realizó un análisis estacional con imágenes satelitales obtenidas del software Google Earth. En la Figura 6-14 se muestran los cambios desde la primavera del 2018 al invierno del 2019.



**Figura 6-14: Cambios estacionales en playa Huayquique.**

Fuente: Elaboración propia.

De la imagen anterior se observa que la erosión se produce de manera pareja a lo largo de la playa, haciendo retroceder toda la línea de costa. Esto puede dar cuenta de la dirección principal del oleaje, que tiende a ser perpendicular a los veriles de la costa y de la homogeneidad de los diámetros de sedimento.

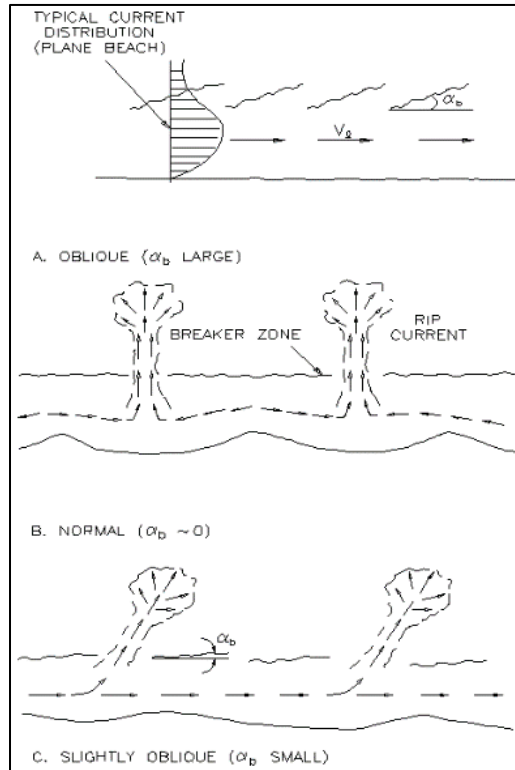
Para apreciar de mejor manera los cambios generados en la playa, se buscó dentro del archivo de imágenes de Google Earth los perfiles en planta que pudieran representar de

mejor manera el avance y retroceso que puede sufrir la playa. En la Figura 6-15 se muestran los cambios que se generaron entre el verano y el otoño del año 2018.



**Figura 6-15: Acreción y erosión en playa Huayquique.**  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6-15 reafirma la idea de un retroceso uniforme de la línea de playa producto de una dirección normal a los veriles de la costa, debido a que se observan pequeñas salientes provocadas por las corrientes de retorno que actúan en la playa (Figura 6-16). También se observa que la zona de rompiente se mantiene a la misma distancia.



**Figura 6-16: Sistemas de circulación cercanos a la costa.**  
Fuente: CEM. (Ref 7).

### PROPUESTA DE PROYECTO

La propuesta de proyecto se determinó en base a consideraciones de diseño mostradas en Chasten, M. A. et al, (1993) (Ref 6) entregando un resumen para la guía de diseño de estructuras exentas. Dentro de las consideraciones a tomar, se encuentran las siguientes:

- Formación de tómbolo o saliente: Para este proyecto se propone la formación de una planta de equilibrio en forma de saliente. Esta configuración en planta permite que continúe el transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la playa, además de generar una zona de baja altura de ola en el trasdós de la estructura. Al evitar la formación de tómbolos se previene que bañistas puedan acceder a la estructura, que pueden generar situaciones de peligro.
- Estructura única o sistema de diques: Debido a la larga extensión de la playa que se desea proteger y que la configuración en planta deseada es una saliente, y se desea evitar la formación de tómbolos, es que se escoge un sistema de diques exentos.
- Espaciamiento entre diques: Un sistema de diques exentos con un amplio espaciamiento entre diques permite que ingrese una mayor cantidad de energía a la zona protegida, evitando la formación de tómbolos.

- Forma de la estructura: Un dique homogéneo de cresta baja permite que exista un mayor flujo de energía (por transmisión y sobrepaso) hacia la zona protegida, además de aumentar la estabilidad de la estructura.
- Orientación de la estructura: Se consideran diques paralelos a los veriles de la playa, ya que una estructura paralela a los frentes de oleaje protegerá una mayor extensión de playa y disminuirán la socavación al pie de la estructura.

Finalmente se considera la construcción de 3 diques exentos homogéneos construidos enteramente de material de coraza, los 3 con una extensión de 80 [m], una separación entre diques de 120 [m], a una profundidad aproximada de -4 [m] bajo el NRS y construidos paralelos a los veriles de la playa, de cresta baja con cota de coronamiento de +1 [m] sobre el NRS.

### ANÁLISIS A LARGO PLAZO

El diseño geométrico de los diques se realizó con los parámetros mostrados en la Tabla 6-18 (Pope & Dean, 1986).

**Tabla 6-18: Parámetros para Pope & Dean (1986).**

	Dique 1	Dique 2	Dique 3
<b>Ls [m]</b>	80	80	80
<b>X [m]</b>	85	80	80
<b>ds [m]</b>	3,5	3,5	3,5
<b>Lg [m]</b>	120	120	120
<b>Ls/Lg</b>	0,7	0,7	0,7
<b>X/ds</b>	24,3	22,9	22,9

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 6-17, se utiliza  $\bar{X}/d_s$  y  $L_s/L_g$  para plotear los 3 diques del proyecto. En color verde se encuentra el dique 1, y en azul los diques 2 y 3. Se aprecia que es bastante probable la creación de una saliente frente a los tres diques, además de presentar similitudes adimensionales con proyectos reales en Estados Unidos, como Holly Beach y Presque Isle. La formación de un tómbolo frente a las estructuras se trata de evitar producto que puede provocar situaciones de peligro para los ocupantes de la playa.

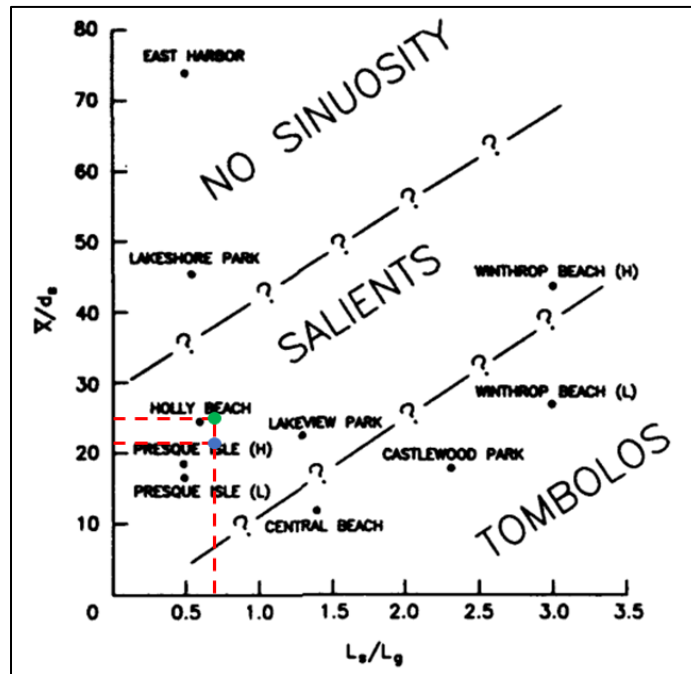


Figura 6-17: Ploteo de diques en gráfico adimensional de Dean & Pope (1986).  
Fuente: Elaboración propia.

El programa SMC fue utilizado para caracterizar los cambios morfodinámicos de la playa a largo plazo, determinando los perfiles de equilibrio en planta y en elevación.

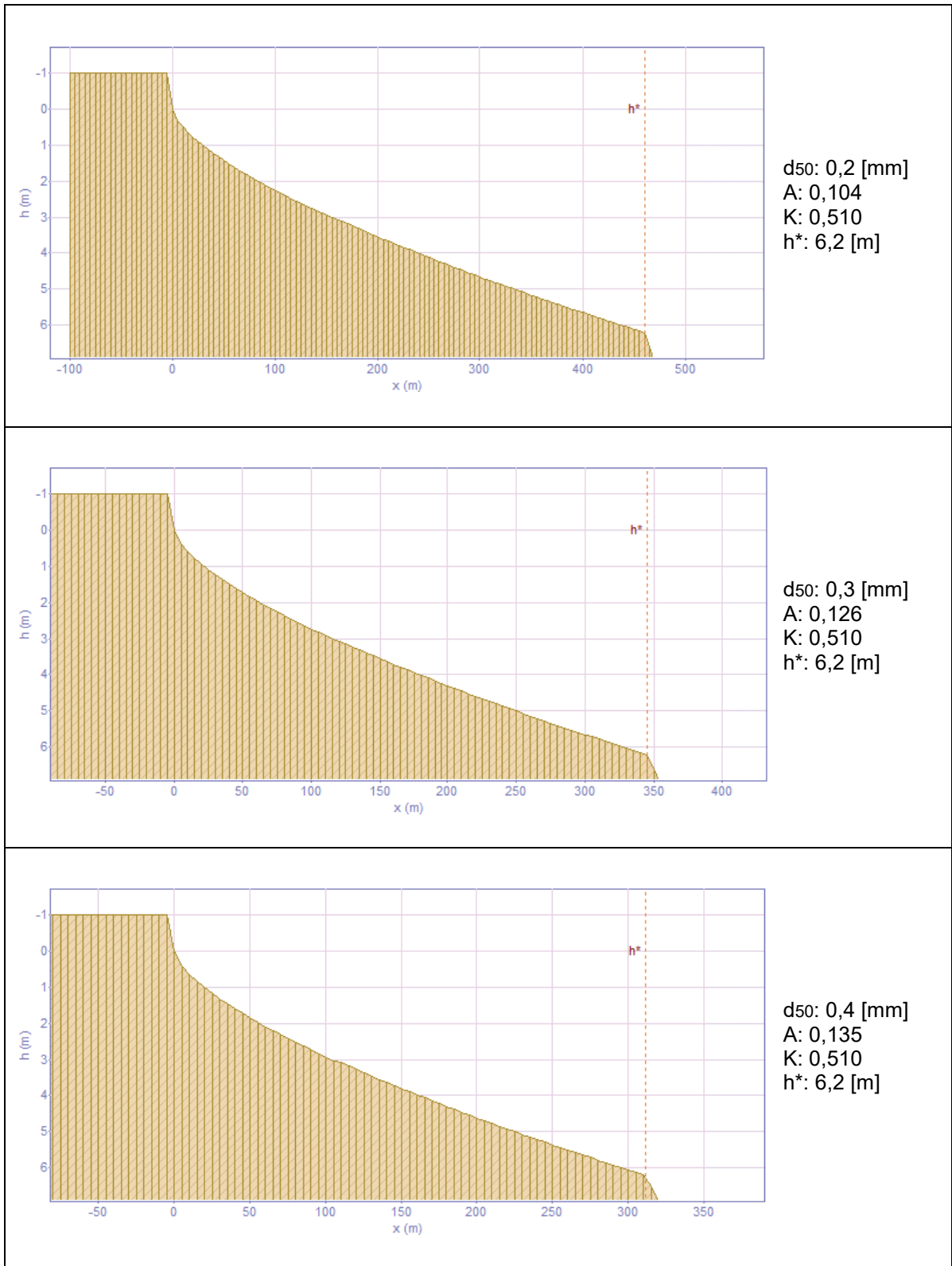
#### PERFIL DE EQUILIBRIO EN ELEVACIÓN.

La profundidad de cierre se determinó a partir de la Ecuación 4-27, propuesta por Birkemeier (1985).

Para encontrar  $H_{S12}$  se determinaron las alturas de ola significativa de cada año y se realizó un promedio de estas, obteniendo un  $H_{S12} = 2,65$  [m]. Esta altura de ola se encuentra en el Nodo A que se ubica a una profundidad de 20 [m] (Figura 5-3), pero Dean (1977) indica que las características del oleaje deben ser evaluadas a una profundidad comprendida entre  $h^* < h < 2h^*$ . Es por esto que se debió propagar el oleaje a un punto ubicado a -7 [m] NRS.

Utilizando la metodología de Goda (2000) para propagar el oleaje, considerando solamente efectos de asomeramiento, se calculó un coeficiente de asomeramiento  $K_d = 1,4$  y se obtuvo un nuevo  $H_{S12/-7NRS} = 3,71$  [m].

En la Figura 6-18 se presentan los perfiles de Dean (1977) para diámetros  $d_{50}$  mínimo (0,2 [mm]), intermedio (0,3 [mm]) y máximo (0,4 [mm]). Se observa que, a mayor diámetro del sedimento, mayor es la pendiente de la playa y viceversa (a medida que el diámetro del sedimento es mejor, la pendiente de la playa se torna más suave).



**Figura 6-18: Perfil de Dean con diámetros  $d_{50} = 0,2$  [mm],  $0,3$  [mm] y  $0,4$  [mm].**  
Fuente: Elaboración propia.

### PERFIL DE EQUILIBRIO EN PLANTA

El perfil en planta fue realizado a partir del software SMC en su módulo de largo plazo, analizando 9 casos con distinto periodo y dirección. Las direcciones modeladas corresponden a la dirección del flujo medio de energía anual, dirección normal a la costa y dirección WSW.

En la Figura 6-19, Figura 6-20 y Figura 6-21 se presentan los distintos casos, representando a cada dique con formas de color azul, los frentes de ola en color gris y la línea de costa transformada en color celeste.

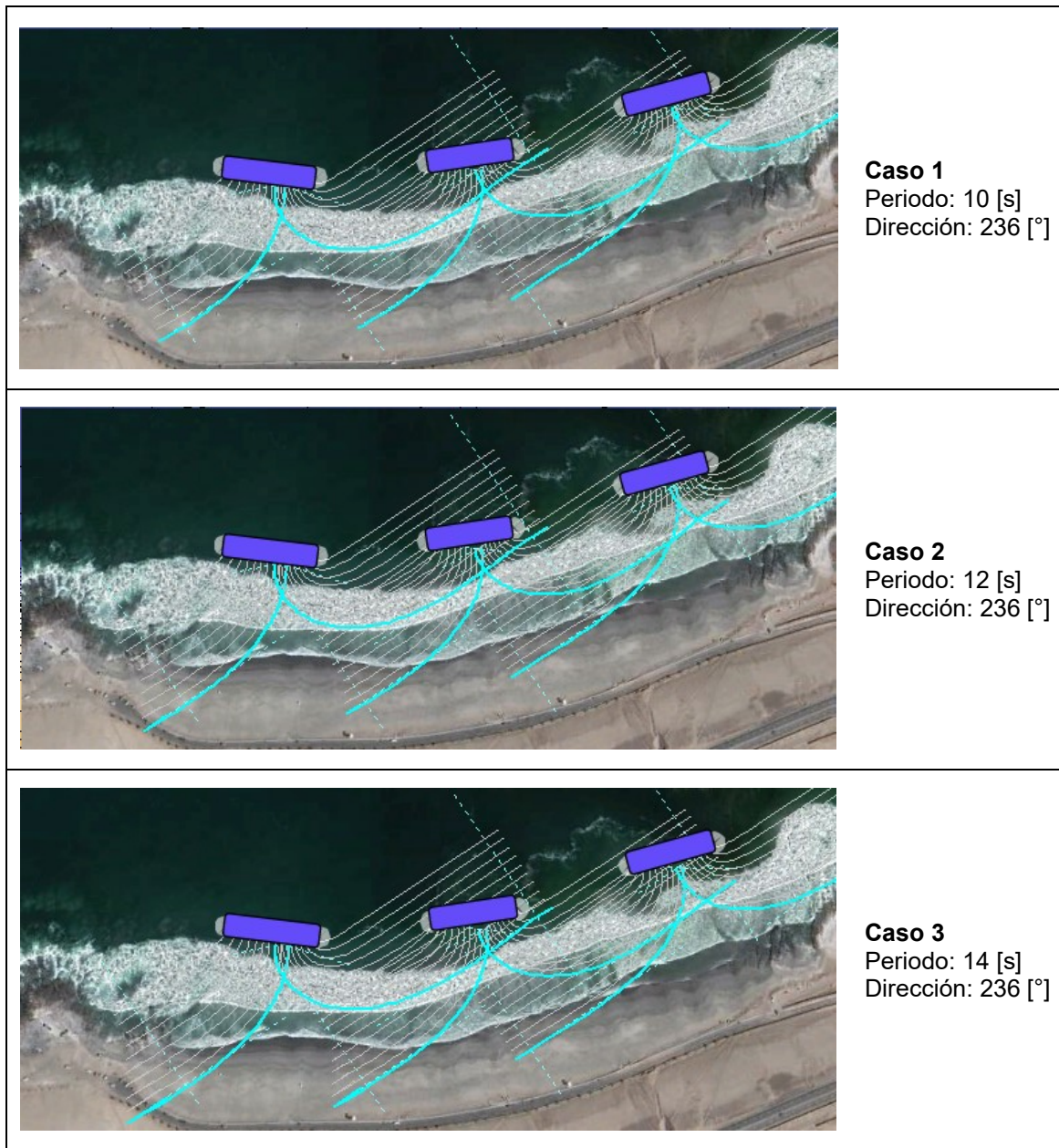
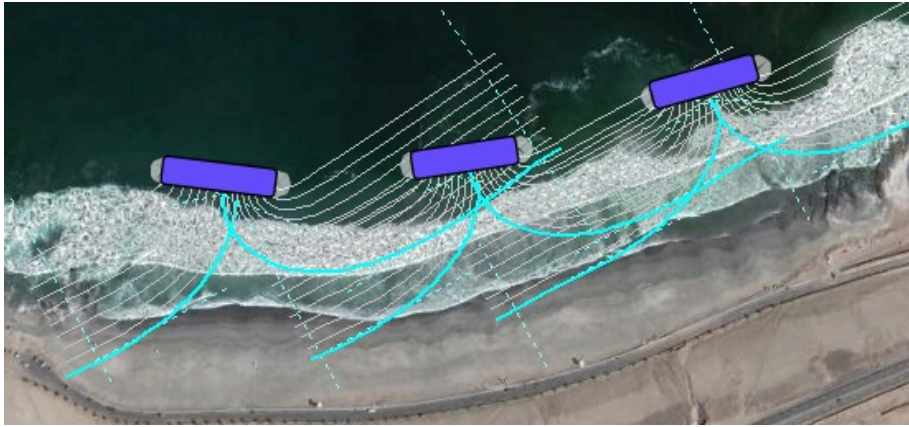


Figura 6-19: Aplicación de formulación de Hsu y Evans (1989) – Dirección 236 [°]

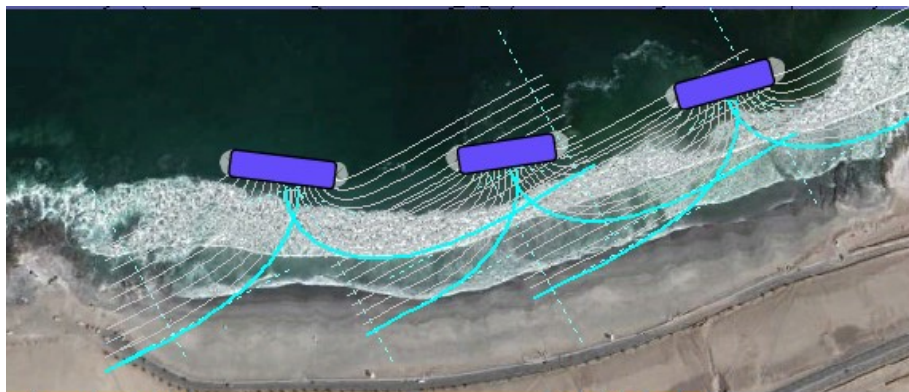
Fuente: Elaboración propia.



**Caso 4**  
 Periodo: 10 [s]  
 Dirección: 241 [°]

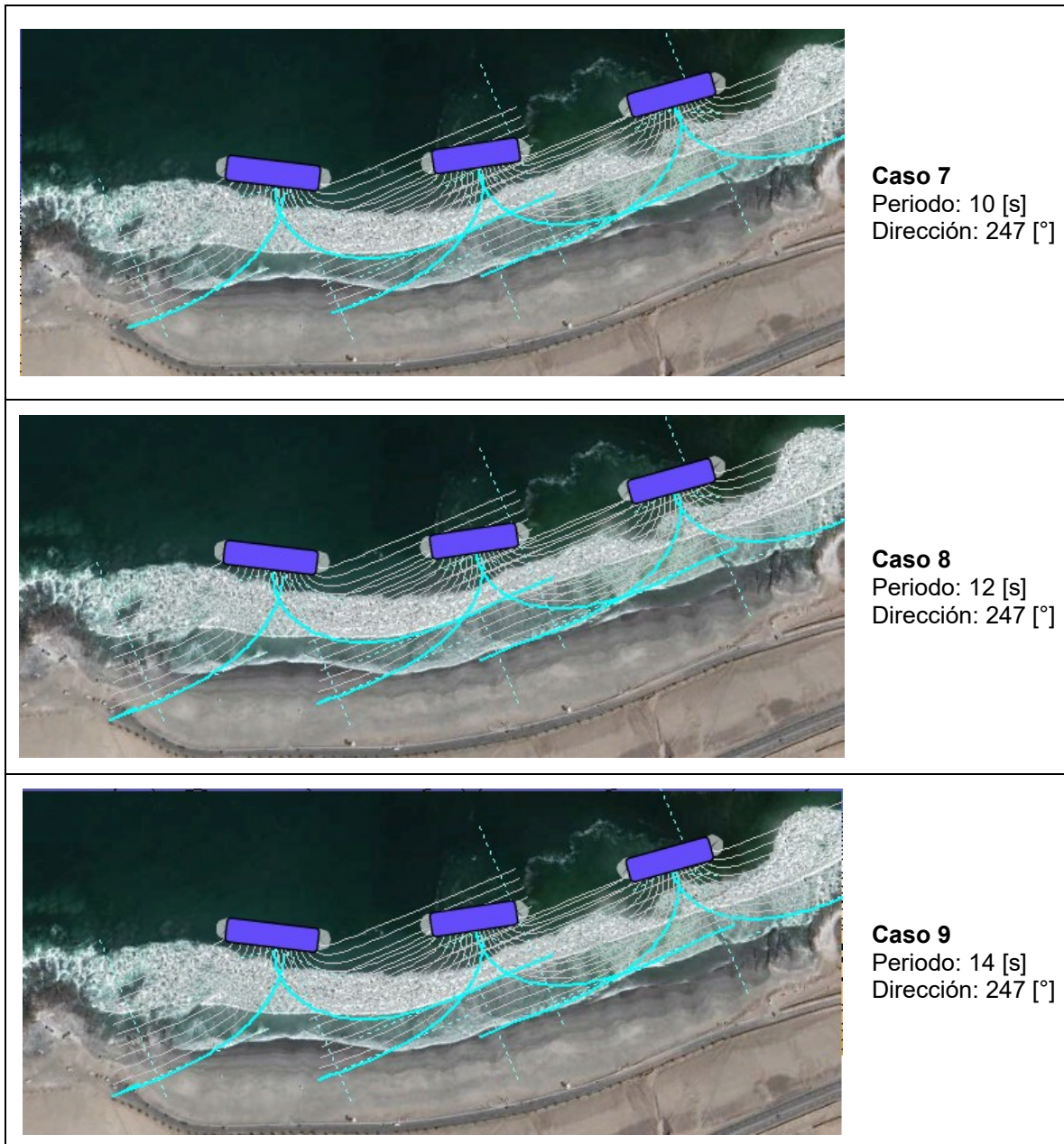


**Caso 5**  
 Periodo: 12 [s]  
 Dirección: 241 [°]



**Caso 6**  
 Periodo: 14 [s]  
 Dirección: 241 [°]

Figura 6-20: Aplicación de formulación de Hsu y Evans (1989) - Dirección 241 [°].  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6-21: Aplicación de formulación de Hsu y Evans (1989) - Dirección 247 [°].**  
 Fuente: Elaboración propia.

A partir de los distintos casos se puede afirmar que:

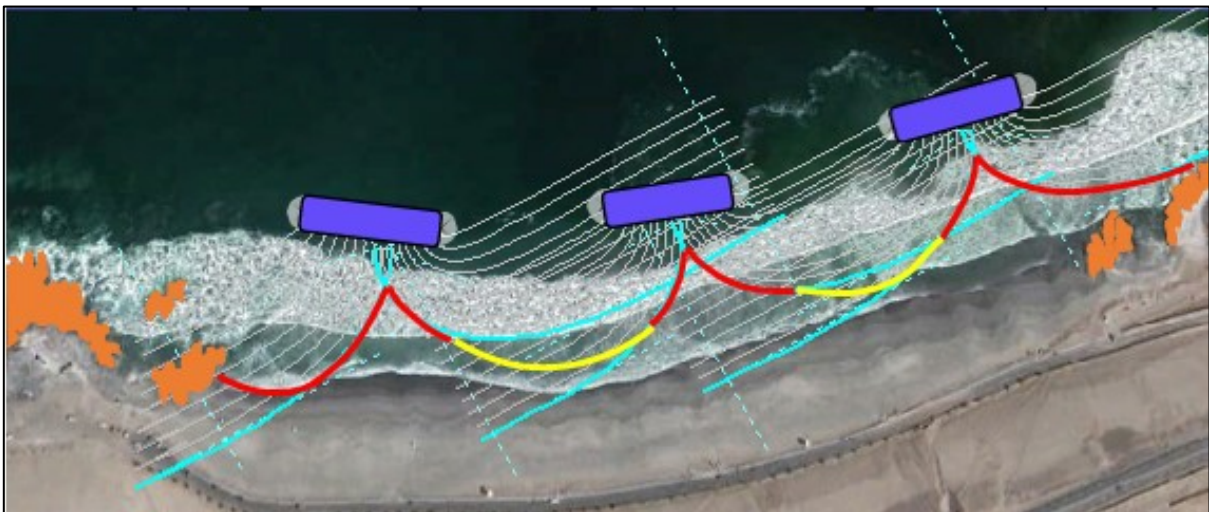
La dirección del oleaje genera que la línea de costa se torne perpendicular a la dirección incidente, siendo la variable principal que altera la línea de la costa; a excepción de los lugares en los que se produce difracción.

Los cambios en el periodo del oleaje no afectan mayormente la línea de costa; solamente se observa que a medida que el periodo es más grande, la línea de la playa retrocede un poco más.

La configuración geométrica de los diques, al igual que la dirección del oleaje, son factores que condicionan la forma de la playa. Si los diques tuviesen una mayor extensión, o si se encontrasen a una profundidad menor, generarían uno o más tómbolos en la playa, situación que es indeseable producto de que puede permitir el acceso de personas a la estructura, y generar situaciones de peligro para los ocupantes de la playa. Estas situaciones de peligro se pueden ocasionar por la transmisión de energía que ocurre en la estructura producto de su baja cota de coronamiento y alta permeabilidad.

Del análisis de cambios estacionales que se realizó al comienzo del apartado 6.1.5, se puede observar que en el Norte y Sur de la playa existen roqueríos que actúan como límites naturales del sedimento, generando que la playa se encuentre encajada.

En la Figura 6-22 se dibujaron las rocas (color naranja) y las salientes que se generan frente a cada dique (color rojo) para el **Caso 6**, que es el caso con la dirección del flujo medio de energía anual y el periodo medio con mayor ocurrencia de acuerdo a las tablas de incidencia (Tabla 6-11 y Tabla 6-13). La línea de costa frente a cada separación entre diques fue dibujada en amarillo debido a la incertidumbre que esta provoca, ya que frente a dichas separaciones esta puede retroceder o avanzar dependiendo de la energía del oleaje que penetra hacia la costa. Esta concentración de energía se transformará en erosión en la zona, pero como la transferencia de oleaje a través de la estructura es importante, la erosión frente a las separaciones puede que no sea tan elevada.



**Figura 6-22: Generación de salientes frente a cada dique -  $T_p=14$  [s] /  $Dir=241$  [°].**

Fuente: Elaboración propia.

La línea de costa dibujada fue incorporada en el plano del proyecto para realizar los análisis a corto plazo de los cambios morfodinámicos de la playa.

### **CÁLCULO DE VOLUMEN DE ARENA.**

Antes de estimar el volumen de sobrerrelleno necesario para que la playa mantenga su forma en planta, primero se debe considerar el factor de sobrerrelleno  $R_A$  que indica el volumen requerido para generar una unidad estable de material. Los valores mayores a 1,0 indican que será necesaria más de una unidad de material para generar una unidad de material de relleno.

El factor de sobrerrelleno se determinó a partir de la Ecuación 6-2 y Ecuación 6-3, valores que se plotearon en Figura 6-23. Los valores escogidos para representar la playa fueron los del perfil HI3 mostrado en la Tabla 6-17.

Ecuación 6-2. 
$$\frac{\sigma_{\varphi b}}{\sigma_{\varphi n}} = \frac{\left[ \left( \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} \right) + \left( \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6} \right) \right]_b}{\left[ \left( \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} \right) + \left( \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6} \right) \right]_n}$$

Ecuación 6-3. 
$$\frac{M_{\varphi b} - M_{\varphi n}}{\sigma_{\varphi n}} = \frac{\left( \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \right)_b - \left( \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \right)_n}{\left[ \left( \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} \right) + \left( \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6} \right) \right]_n}$$

Donde:

- $\sigma_{\varphi b}$  = Desviación estándar del material de relleno.
- $\sigma_{\varphi n}$  = Desviación estándar del material nativo.
- $M_{\varphi n}$  = Diámetro medio del material nativo.
- $M_{\varphi b}$  = Diámetro medio del material de relleno.

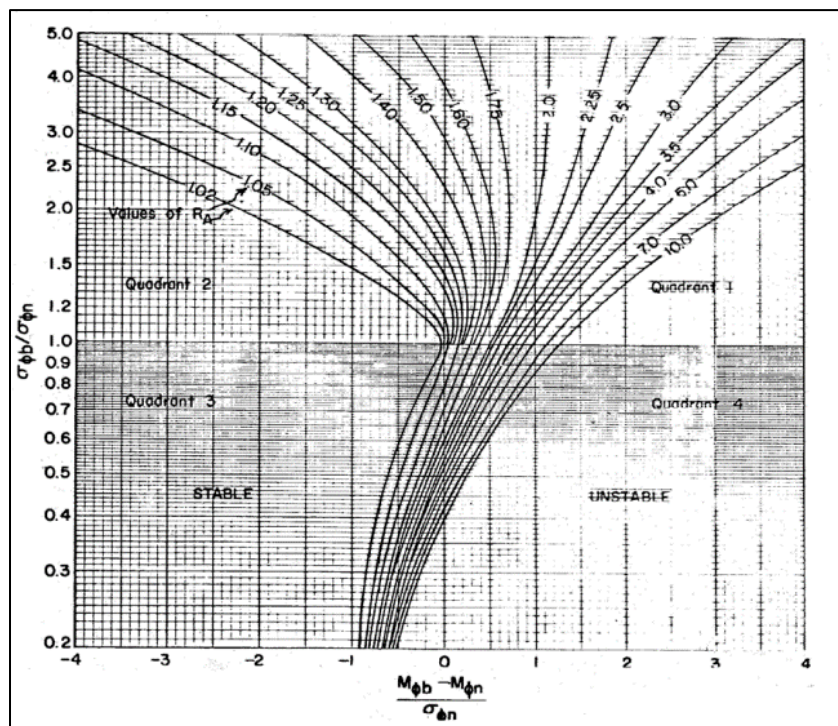


Figura 6-23: Isocurvas del factor de sobrerrelleno Ra. Fuente: CEM. (Ref 7).

A continuación, se presentan los resultados de  $\varphi_{i\%}$  para el perfil 3:

- $\varphi_{95} = 0,49$
- $\varphi_{84} = 0,46$
- $\varphi_{50} = 0,36$
- $\varphi_{16} = 0,26$
- $\varphi_5 = 0,17$

Obteniendo los siguientes valores:

$$\frac{\sigma_{\varphi b}}{\sigma_{\varphi n}} = 1,34 \quad \frac{M_{\varphi b} - M_{\varphi n}}{\sigma_{\varphi n}} = 0,18$$

Utilizando la Figura 6-23 se obtiene un factor de sobrerrelleno  $R_A = 1,4$

A través del programa SMC se realizaron 18 perfiles, 3 por cada polígono de playa. En la edición del perfil, existe la opción de calcular el área que existe entre el perfil original y el perfil de la playa de equilibrio, como se muestra en la Figura 6-24. Posteriormente se consideró cada área por un ancho de 30 [m] para obtener un volumen aproximado.

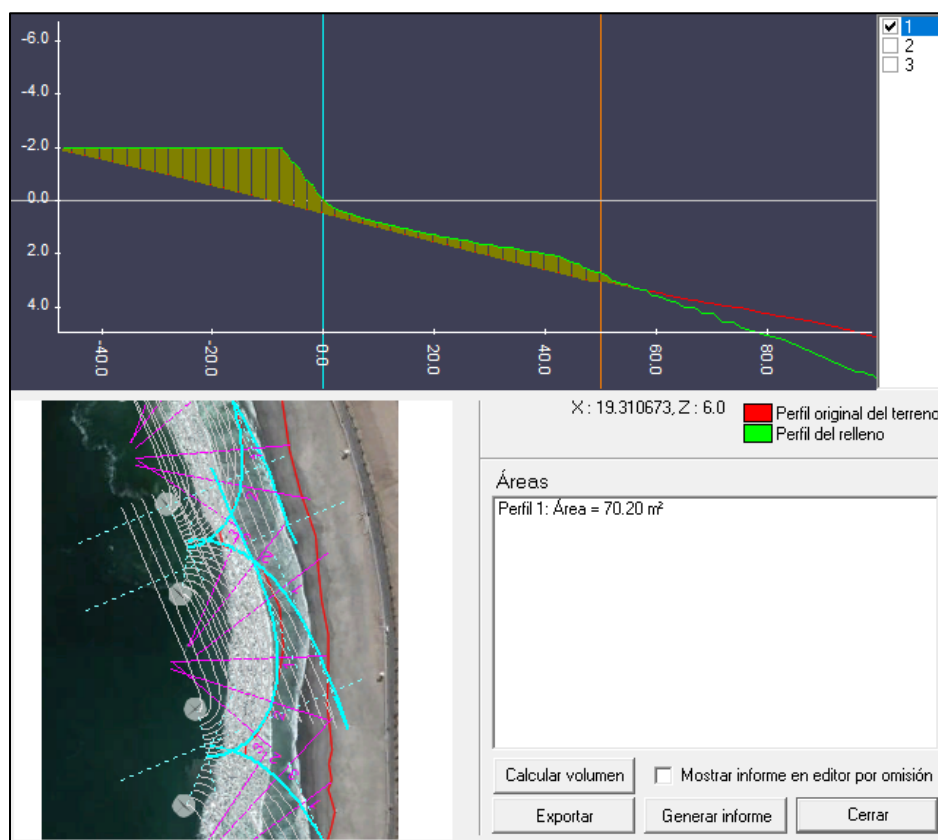


Figura 6-24: Cálculo del área entre los perfiles original y de relleno.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen estimado de relleno corresponde a 55.500 [m³], por lo tanto, el volumen total considerando el factor de sobrerrelleno es de 77.700 [m³].

En la región de Antofagasta, a 350 [km] aproximadamente de playa Huayquique, se encuentra una zona de empréstito que abarca una superficie de 93,164 [ha] del que se puede extraer material. Se ubica en las coordenadas UTM 7.404.716,4 [m] y 377.728 [m].

## ANÁLISIS A CORTO PLAZO

Este análisis es necesario para conocer el comportamiento de la playa ante un evento extremo, entregando información para un corto periodo de tiempo. Se analizó el comportamiento a corto plazo para el perfil y para la planta de playa Huayquique.

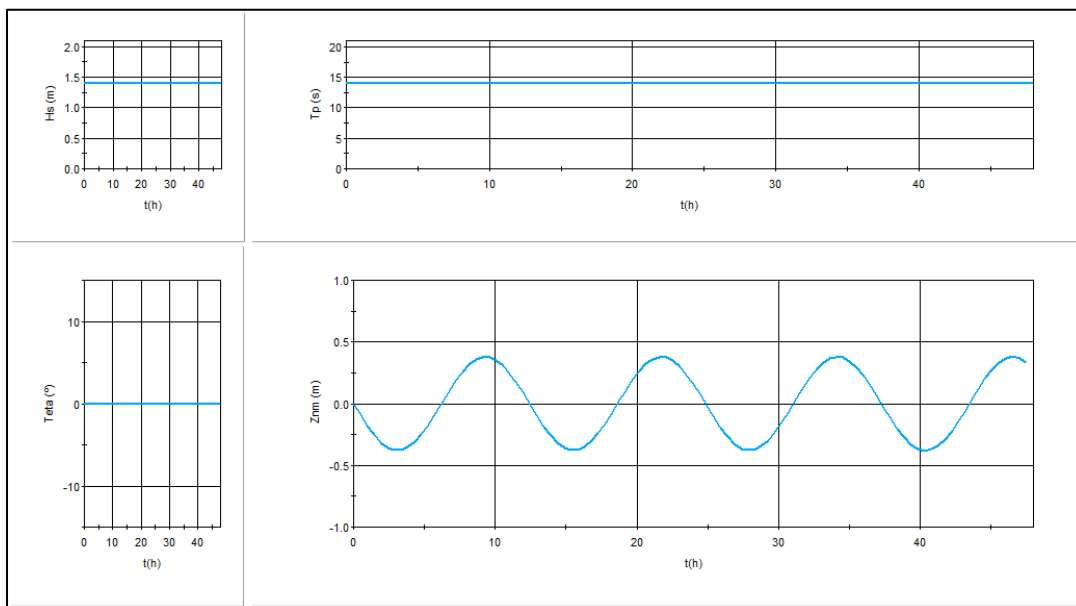
Para el **análisis del perfil** se utilizó el software Petra, en el que se definieron los siguientes parámetros de entrada:

### Perfiles

Se ingresaron los perfiles de Dean (1977) correspondientes a los diámetros  $d_{50} = 0,2$  [mm],  $0,3$  [mm] y  $0,4$  [mm], mostrados en la Figura 6-18.

### Temporales

De acuerdo con el análisis de clima medio mostrado en la sección 6.1.3, se definió una altura de ola significativa  $H_s = 1,4$  [m], periodo peak  $T_p = 14$  [s], una duración de 48 horas, y una incidencia ortogonal a la playa, considerando  $Teta = 0^\circ$ . El nivel medio del mar definido fue de  $0,8$  [m] NRS de acuerdo con la sección 6.1.2, además de una carrera de marea igual a  $0,76$  [m]. En la Figura 6-25 se presentan los parámetros hidrodinámicos definidos en el análisis. Además de un caso de temporal con una altura de ola significativa  $H_s = 3,03$  [m], periodo peak  $T_p = 14$  [s] y una duración de 48 horas.



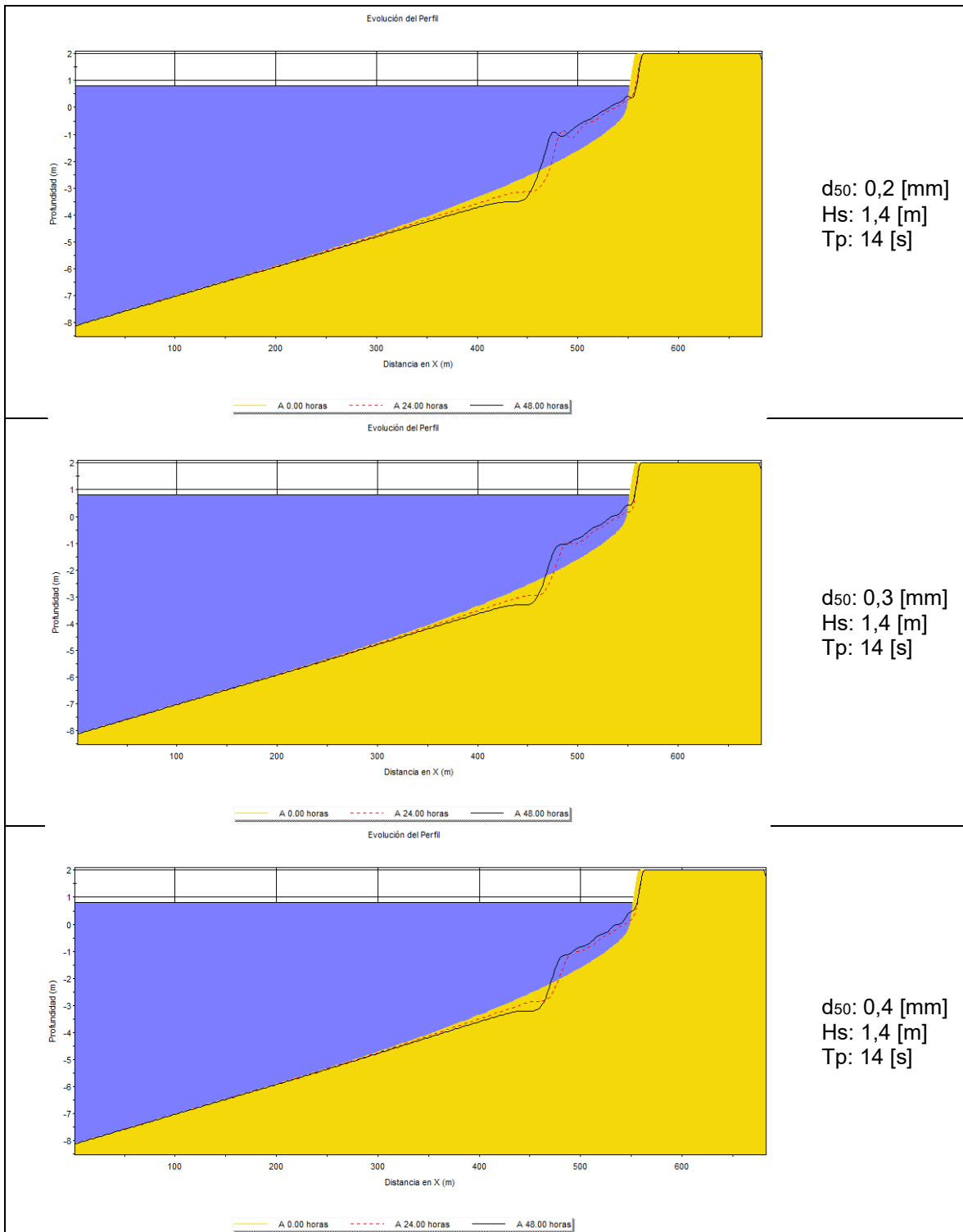
**Figura 6-25: Parámetros definidos en Petra para el análisis a corto plazo.**

Fuente: Elaboración propia.

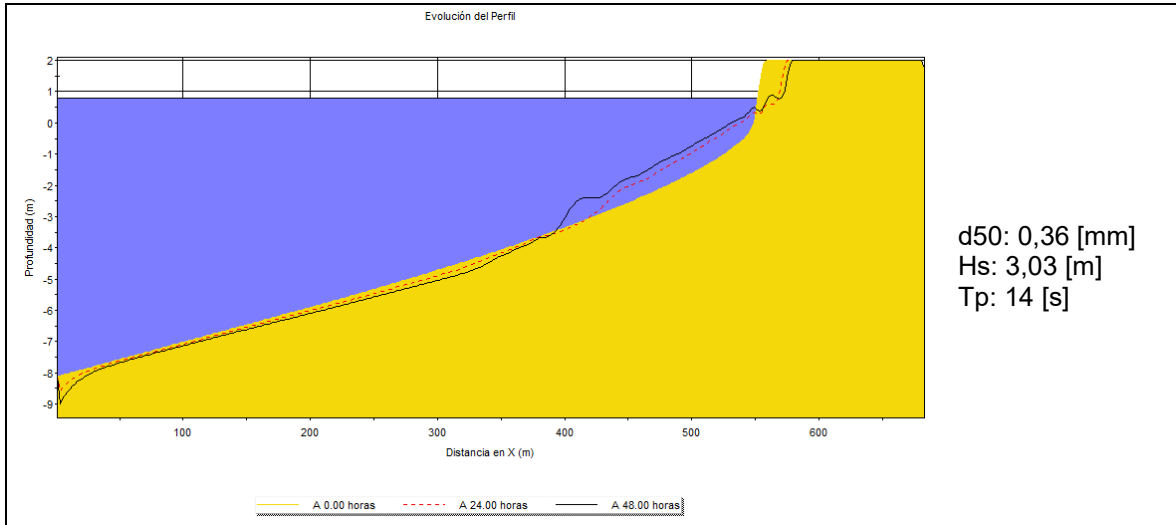
### Resultados

En la Figura 6-26 se muestran los cambios generados en los perfiles de equilibrio, producto de la acción del oleaje luego de 48 horas de evento. Se puede afirmar que los perfiles con diámetro menor son los que sufren mayores cambios producto de un mismo evento, pero a pesar de esto, los 3 perfiles presentan un comportamiento similar. Con un leve retroceso de la línea de costa y una erosión generada a unos  $150$  [m] de la línea de costa, este sedimento se acumula dentro de los primeros  $100$  [m] sumergidos del perfil.

En el evento de tormenta mostrado en la Figura 6-27 se observa que la erosión del frente de la playa es mucho mayor, y la sedimentación de arena en el fondo marino se hace más extensa, acumulándose dentro de los primeros 200 [m] bajo el nivel del agua; posterior a esta distancia se observa que existe erosión en todo el perfil.

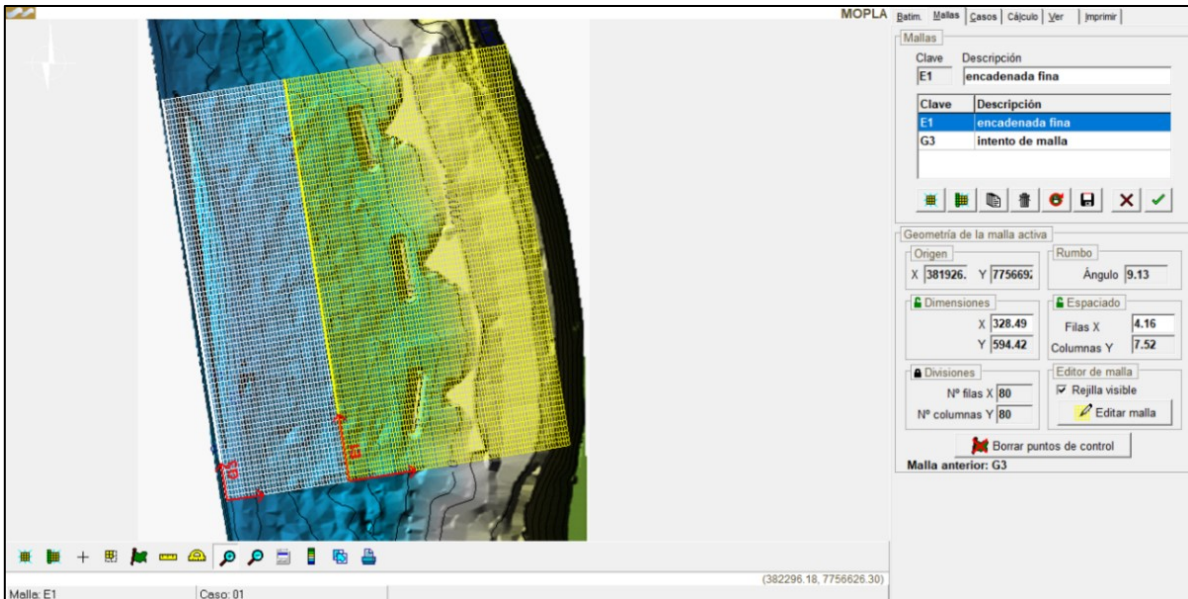


**Figura 6-26: Evolución de perfil a corto plazo – Clima medio.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6-27: Evolución de perfil a corto plazo - Clima extremo.**  
Fuente: Elaboración propia.

Para el **análisis de la planta** se utilizó el software Mopla, definiéndose una batimetría de estudio mostrada en la Figura 6-28.



**Figura 6-28: Generación de malla en Mopla.**  
Fuente: Elaboración propia.

Se modelaron 2 casos para conocer el comportamiento de los procesos costeros en playa Huayquique como el oleaje, corrientes y cambios en el fondo del mar; ambos casos con el mismo diámetro de sedimento y periodo peak. Las condiciones de oleaje propagado se obtuvieron del estudio presentado en el apartado 6.1.3, escogiendo una condición de clima medio y una de clima extremo. Los casos son presentados en la Tabla 6-19.

**Tabla 6-19: Modelaciones en Mopla.**

Caso	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°]	ZMarea [m]	d50 [mm]	Descripción
<b>Mopla 1</b>	1,40	14	241	+0,80	0,30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oleaje medio</li> <li>• Nivel medio del mar</li> </ul>
<b>Mopla 2</b>	3,03	14	217,5	+1,17	0,30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oleaje extremo</li> <li>• Nivel medio de la pleamar</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Para modelar morfodinámicamente la playa en conjunto con los diques exentos, fue necesario idealizar el rompeolas considerando que poseen una altura de 10 [m]. Esto se debe a que el programa no distingue entre una barra de arena y un dique de cresta baja hecho de roca. Debido a esto, se presentaron leves deformaciones en los contornos de los diques, provocando que los gráficos de la Figura 6-31 y Figura 6-35 muestren valores elevados de sedimentación y acreción.

En total se generaron 2 mallas de propagación: 1 regular y 1 encadenada a la malla regular de propagación. La malla regular propaga el oleaje antes de llegar al rompeolas, y la malla encadenada propaga el oleaje hasta la orilla de la playa; es por esta razón que la malla encadenada considera la acción conjunta de los 3 diques para conocer su comportamiento.

Los resultados obtenidos de la malla encadenada consideran altura de la ola, vectores de oleaje y corrientes, y variación morfodinámica de la playa posterior a 48 horas.

### **CASO CLIMA MEDIO**

Se observa que las alturas de ola presentan una concentración de energía en las separaciones entre diques y una ola difractada con alturas menores a 0,5 [m] en la zona abrigada del dique (Figura 6-29). Las mayores corrientes generadas ocurren frente a las separaciones entre los diques, presentando las mayores magnitudes con dirección perpendicular a la costa que cambian a una dirección paralela hacia el norte y sur de la playa (Figura 6-30). Este comportamiento en las corrientes ocurre en ambas separaciones de los diques, mientras que en el extremo sur de la playa la corriente presenta una dirección paralela y hacia el norte de la playa. En las zonas abrigadas de cada dique se observa que las corrientes no son relevantes.

Los cambios en la topografía mostrados en la Figura 6-32 dan cuenta de un retroceso general de los veriles hacia mar adentro, con una erosión notable en profundidades bajas de las zonas desprotegidas de la playa, y al sur de cada dique. Además, presenta una sedimentación inicial en las zonas de separación de los diques como se ve en la Figura 6-31.

### **CASO CLIMA EXTREMO**

A partir de la Figura 6-33 se vuelve a observar un incremento en la altura significativa en la separación entre diques, producto de la concentración de energía en la zona. Las corrientes presentan el mismo comportamiento que el caso de clima medio, pero con mayores magnitudes, notándose una predominancia por una dirección paralela a la costa, en dirección Norte de la playa (Figura 6-34). Se observa que la sedimentación inicial (Figura 6-35) se produce en lugares aledaños a los diques, con una erosión en las zonas más bajas de la playa. Finalmente, en la Figura 6-36 se muestra un retroceso de los veriles y una erosión en los extremos de cada dique, en especial en la separación que existe entre los diques 2 y 3.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique.

Gráfico: Altura de ola

**Caso monocromático: E101**

**E1:** encadenada fina  
**01:** oleaje medio

Características de la simulación

OLUCA-MC	COPLA-MC	MOPLA-MC
Periodo T: 14 s Altura H: 1.4 m Dirección: 19.7° (S61.2W) Marea NM: 0.8 m		

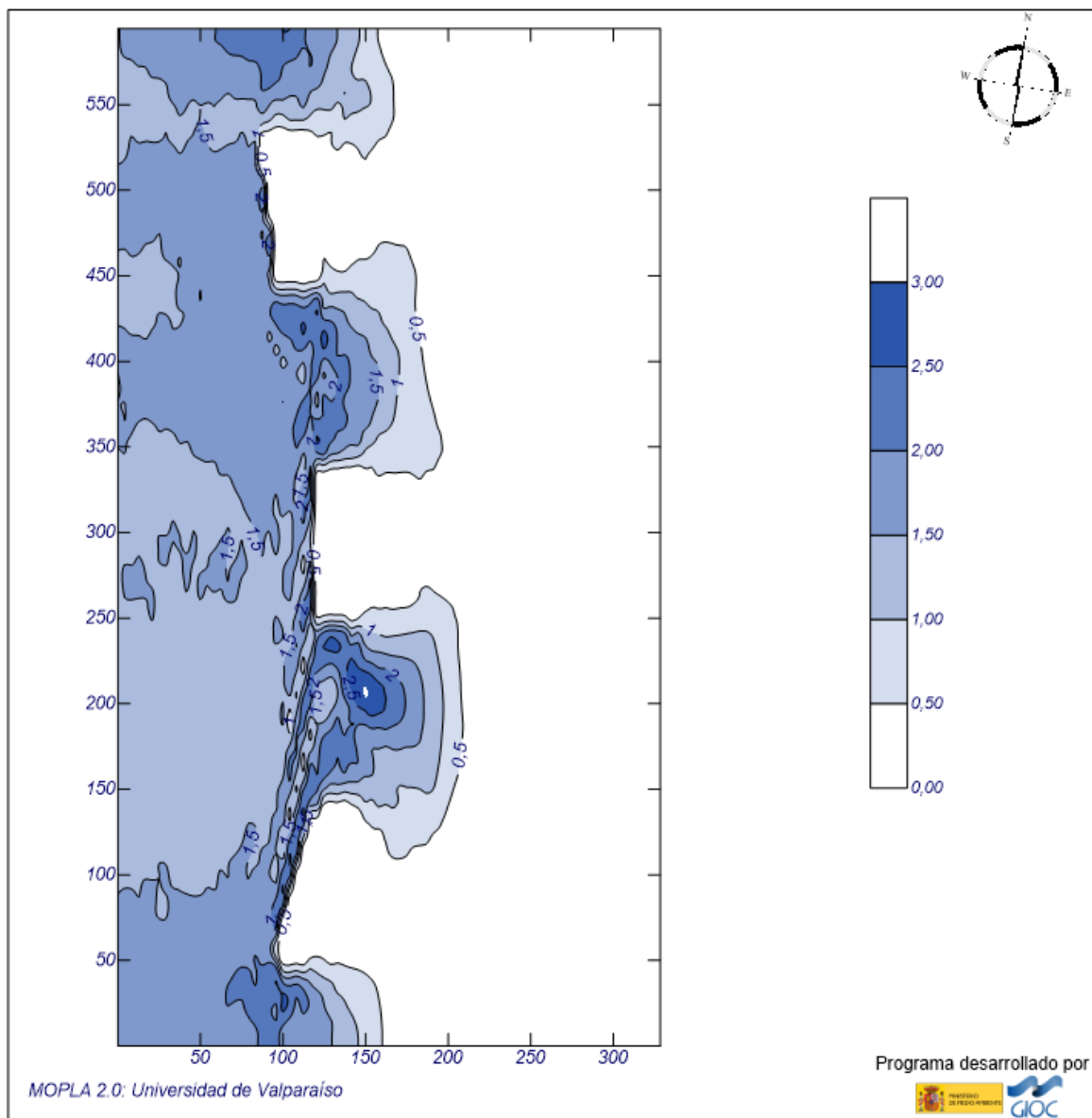


Figura 6-29: Alturas de ola Caso Clima Medio.  
Fuente: Elaboración propia.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique

Gráfico: Gráfico combinado de corrientes y topografía

**Caso monocromático: E101**

**E1:** encadenada fina  
**O1:** oleaje medio

Características de la simulación

**OLUCA-MC**

Periodo T: 14 s  
Altura H: 1.4 m  
Dirección: 0° (S80.9W)  
Marea NM: 0.8 m

**COPLA-MC**

Chezy C: 10 m<sup>-1/3</sup>  
Viscosidad de remolino  $\nu$ : 2 m<sup>2</sup>/s

**MOPLA-MC**

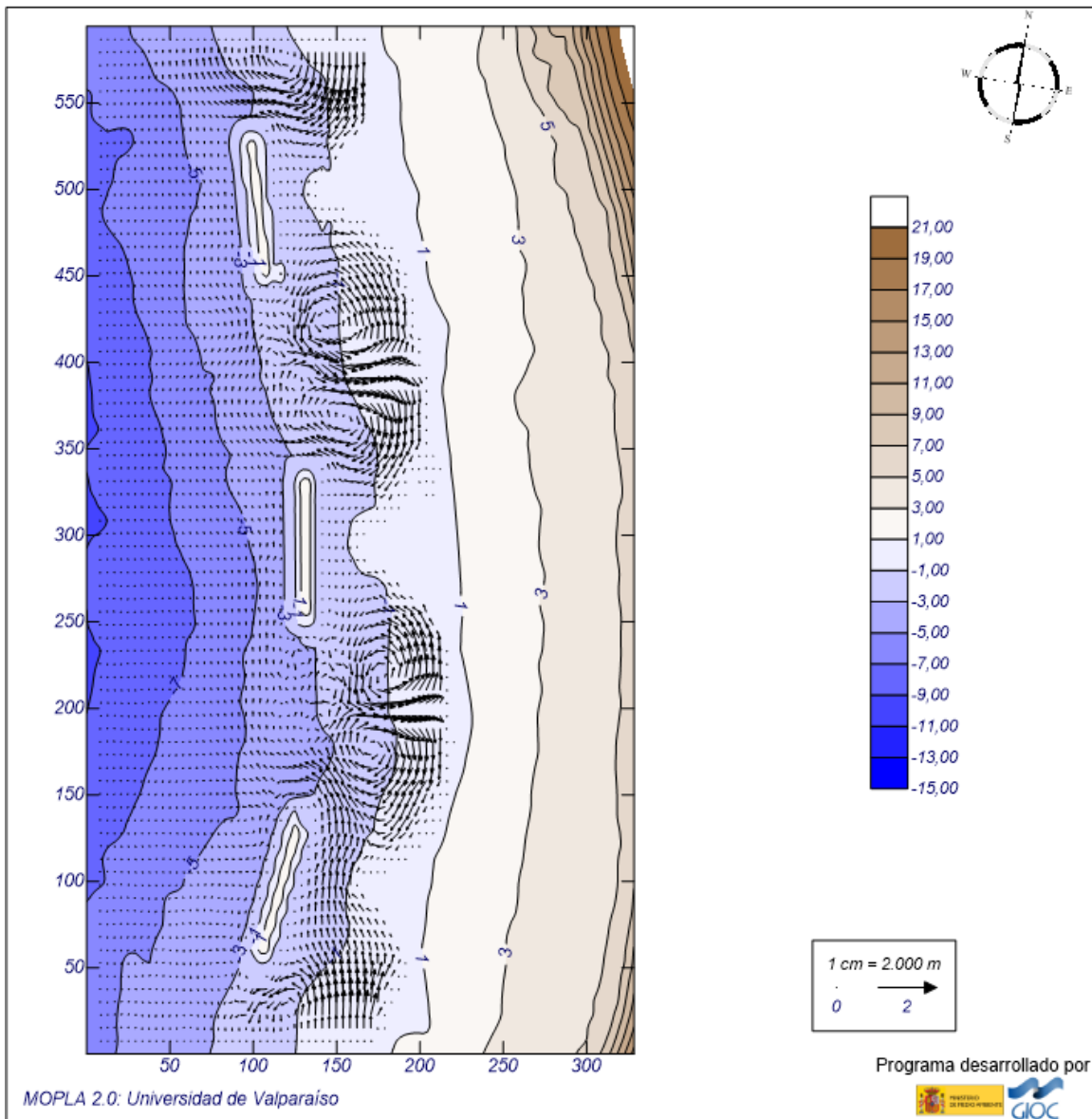


Figura 6-30: Corrientes Caso Clima Medio.  
Fuente: Elaboración propia.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique.

Gráfico: Topografía inicial + variación inicial de la topografía

**Caso monocromático: E101**

**E1:** encadenada fina  
**O1:** oleaje medio

Características de la simulación

OLUCA-MC	COPLA-MC	MOPLA-MC
Periodo T: 14 s Altura H: 1.4 m Dirección: 19.7° (S61.2W) Marea NM: 0.8 m	Chezy C: 10 m <sup>-1/3</sup> s Viscosidad de remolino $\nu$ : 2 m <sup>2</sup> /s	D <sub>50</sub> : 0.30 mm Duración: 48.0 h Formulación: Soulsby

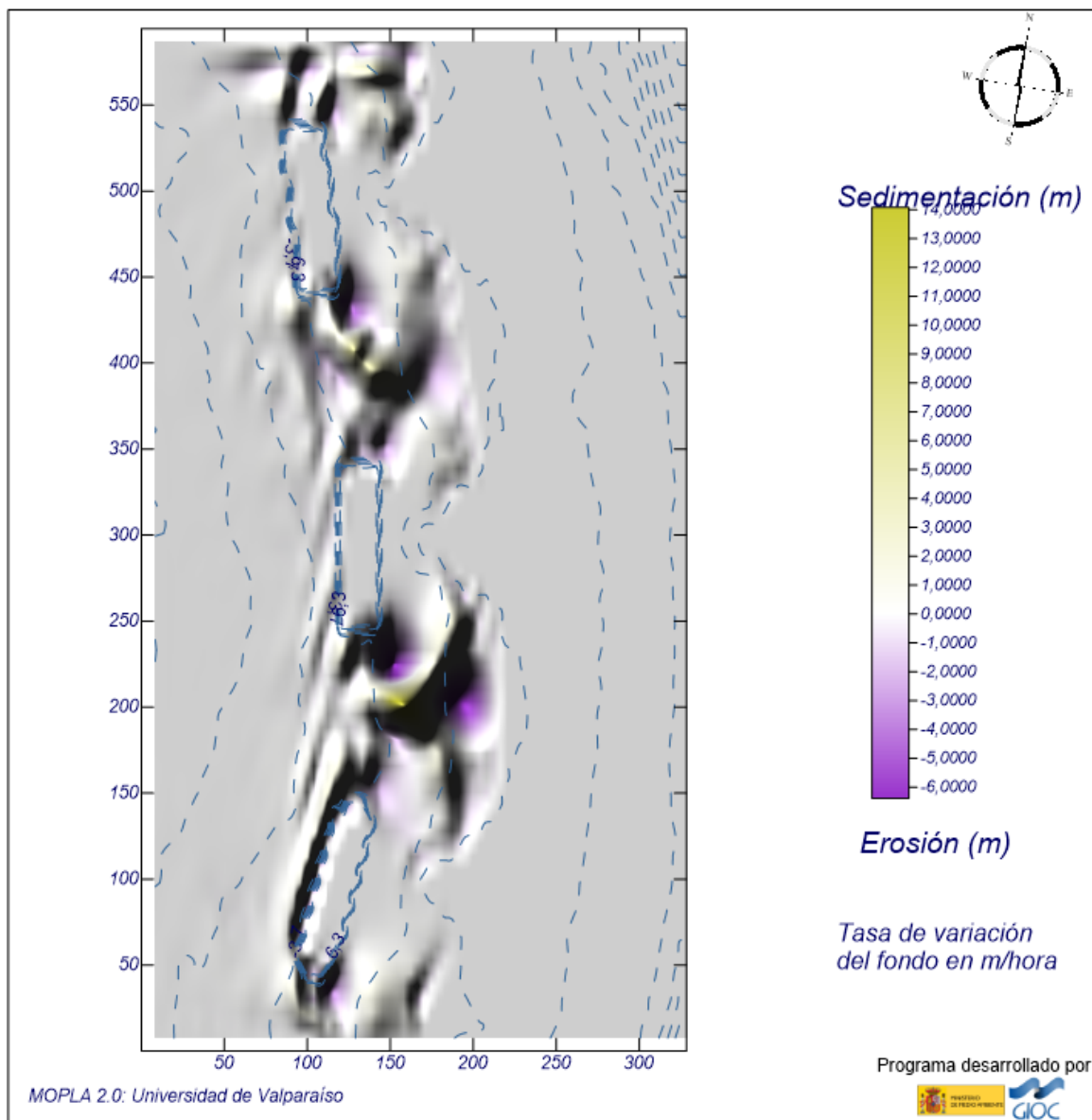


Figura 6-31: Movimiento de sedimento inicial Caso Clima Medio.  
Fuente: Elaboración propia.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique

Gráfico: Topografías inicial y final

**Caso monocromático: E101**

**E1:** encadenada fina  
**O1:** oleaje medio

Características de la simulación

OLUCA-MC	COPLA-MC	MOPLA-MC
----------	----------	----------

Período T: 14 s Altura H: 1.4 m Dirección: 0° (S80.9W) Marea NM: 0.8 m	Chezy C: 10 m <sup>1/2</sup> /s Viscosidad de remolino $\nu$ : 2 m <sup>2</sup> /s	D <sub>50</sub> : 0.30 mm Duración: 48.0 h Formulación: Soulsby
---	---	---

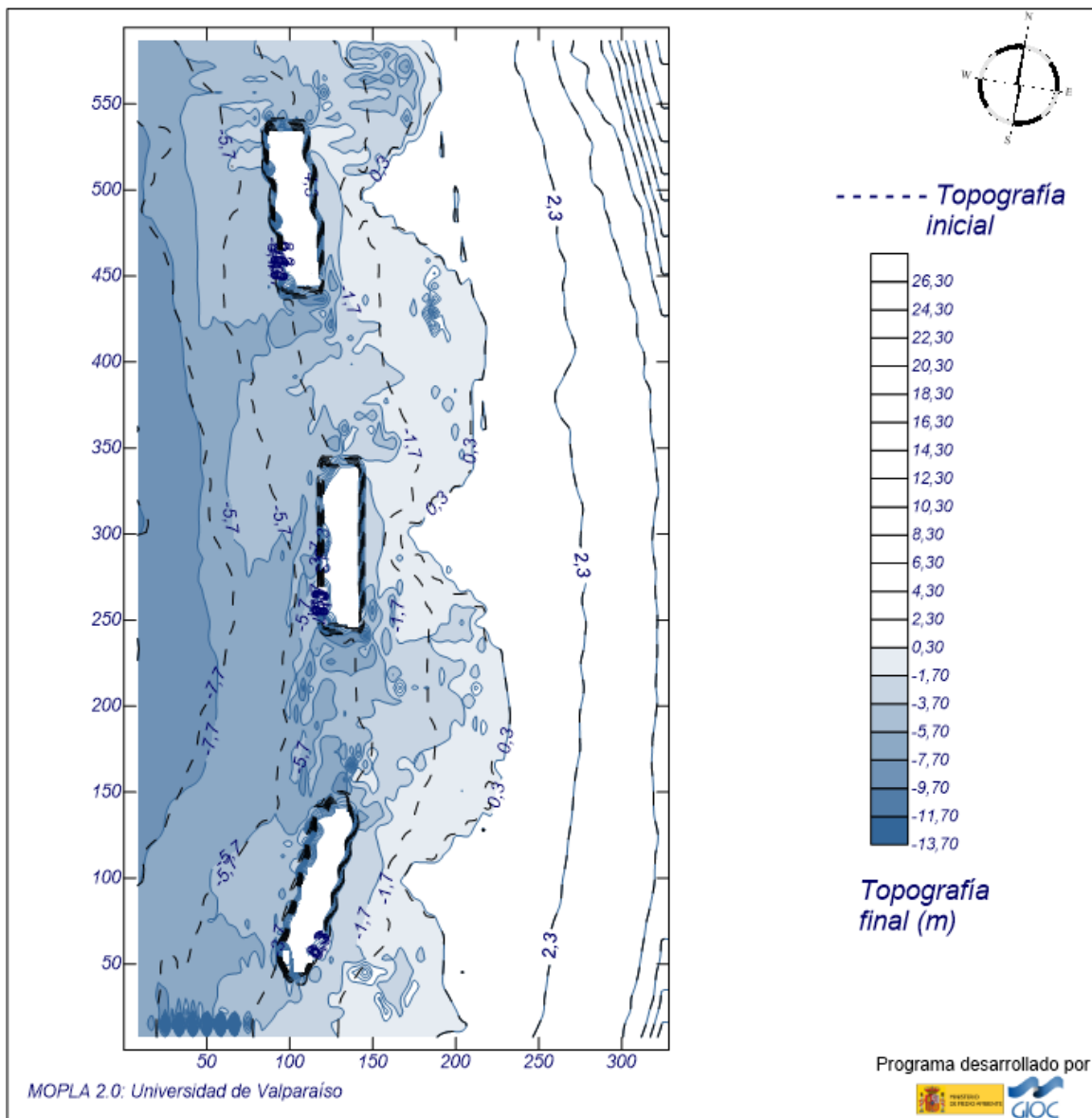


Figura 6-32: Topografía inicial vs final Caso Clima Medio.

Fuente: Elaboración propia.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique.

Gráfico: Altura de ola

**Caso monocromático: E102**

**E1:** encadenada fina  
**02:** Clima extremo

Características de la simulación

OLUCA-MC	COPLA-MC	MOPLA-MC
Periodo T: 14 s Altura H: 3.03 m Dirección: 43.4° (S37.5W) Marea NM: 1.17 m		

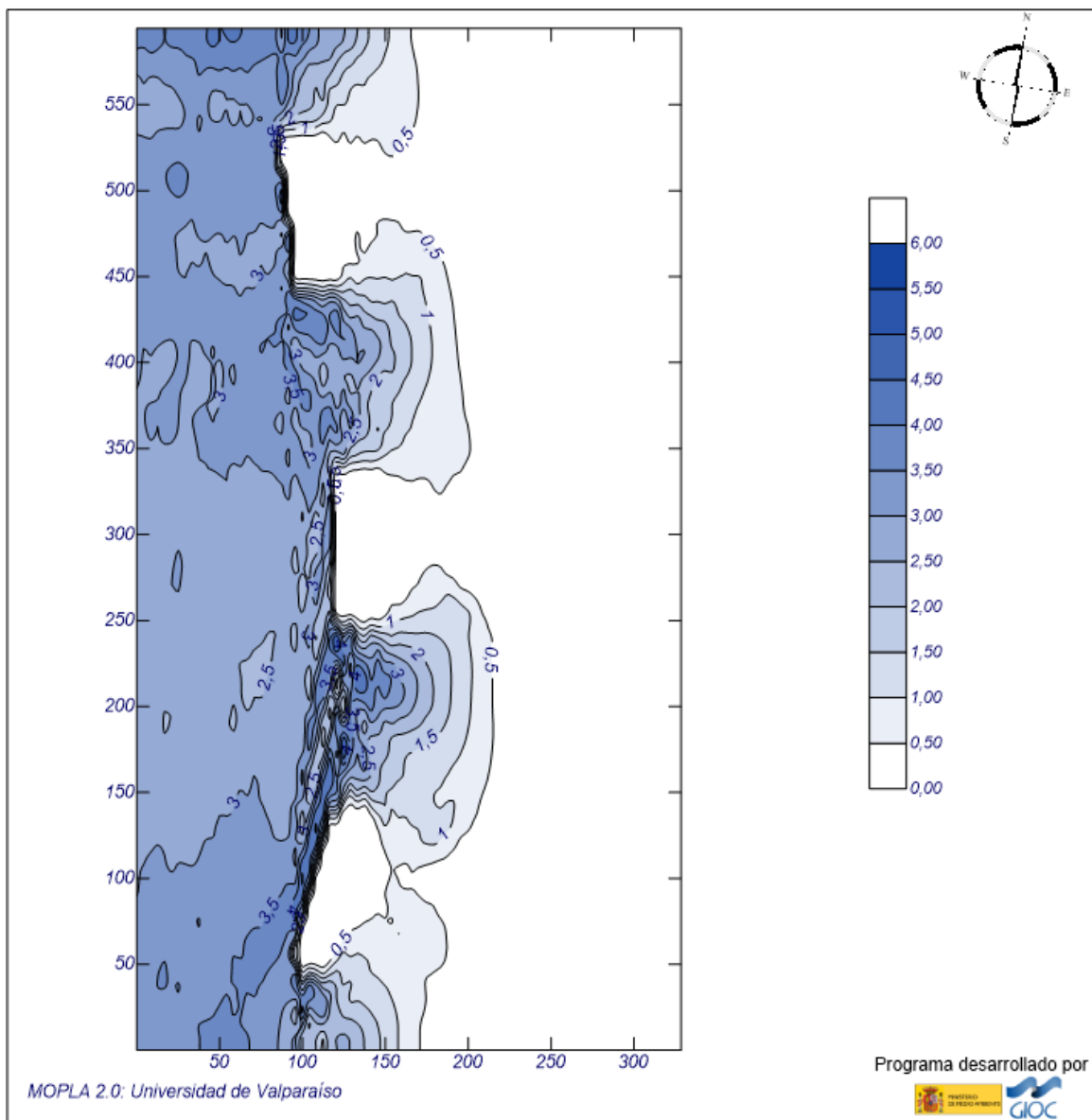


Figura 6-33: Altura de ola Caso Clima Extremo.  
Fuente: Elaboración propia.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique.

Gráfico: Gráfico combinado de corrientes y topografía

**Caso monocromático: E102**

**E1:** encadenada fina  
**02:** Clima extremo

Características de la simulación

OLUCA-MC	COPLA-MC	MOPLA-MC
Periodo T: 14 s Altura H: 3.03 m Dirección: 43.4° (S37.5W) Marea NM: 1.17 m	Chezy C: 10 m <sup>1/2</sup> /s Viscosidad de remolino $\nu$ : 2 m <sup>2</sup> /s	

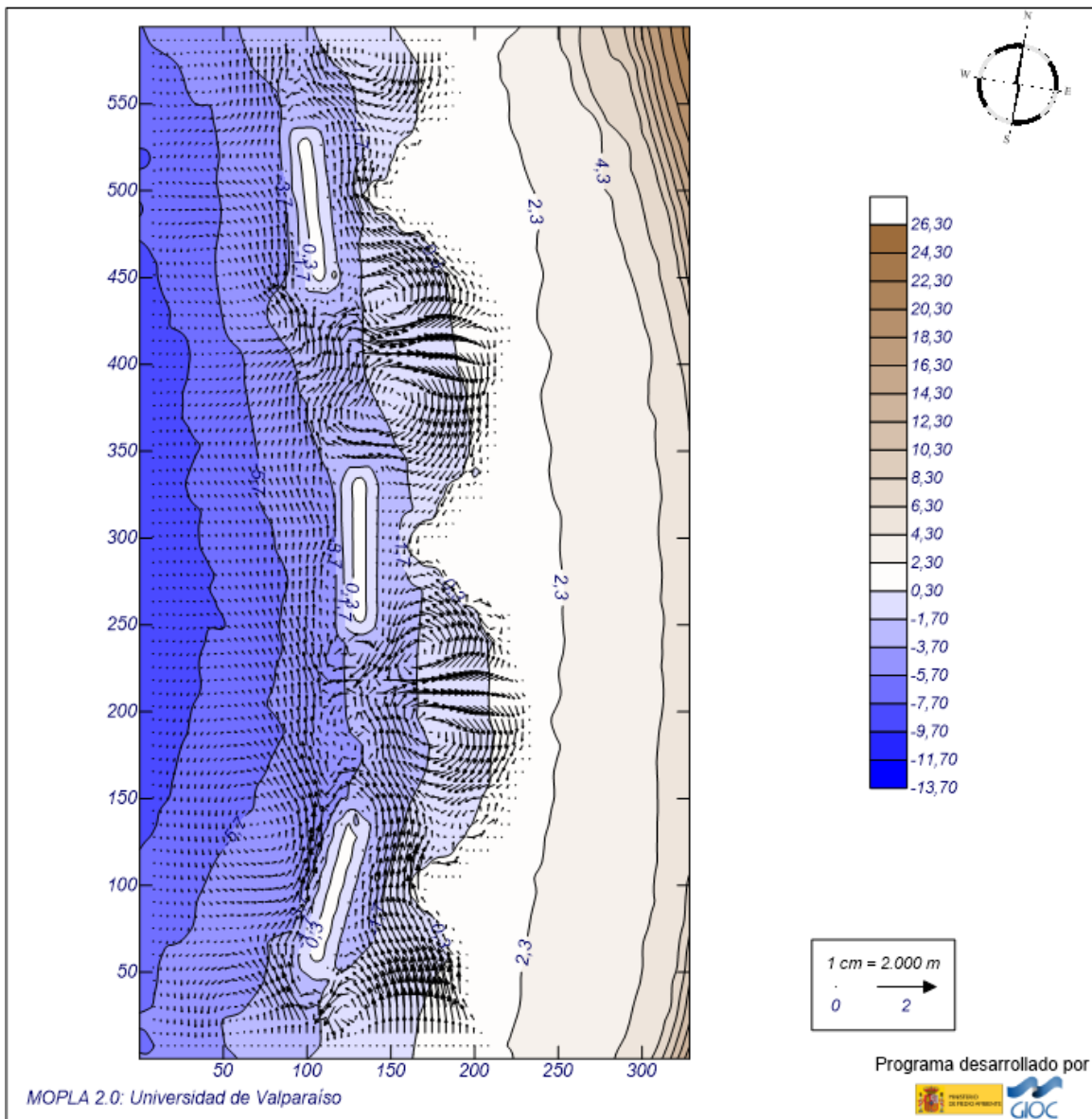


Figura 6-34: Corrientes Caso Clima Extremo.  
Fuente: Elaboración propia.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique.

Gráfico: Topografía inicial + variación inicial de la topografía

**Caso monocromático: E102**

**E1:** encadenada fina  
**02:** Clima extremo

Características de la simulación

OLUCA-MC	COPLA-MC	MOPLA-MC
Periodo T: 14 s Altura H: 3.03 m Dirección: 43.4 ° (S37.5W) Marea NM: 1.17 m	Chezy C: 10 m <sup>-1/3</sup> s Viscosidad de remolino $\nu$ : 2 m <sup>2</sup> /s	D <sub>50</sub> : 0.30 mm Duración: 24.0 h Formulación: Soulsby

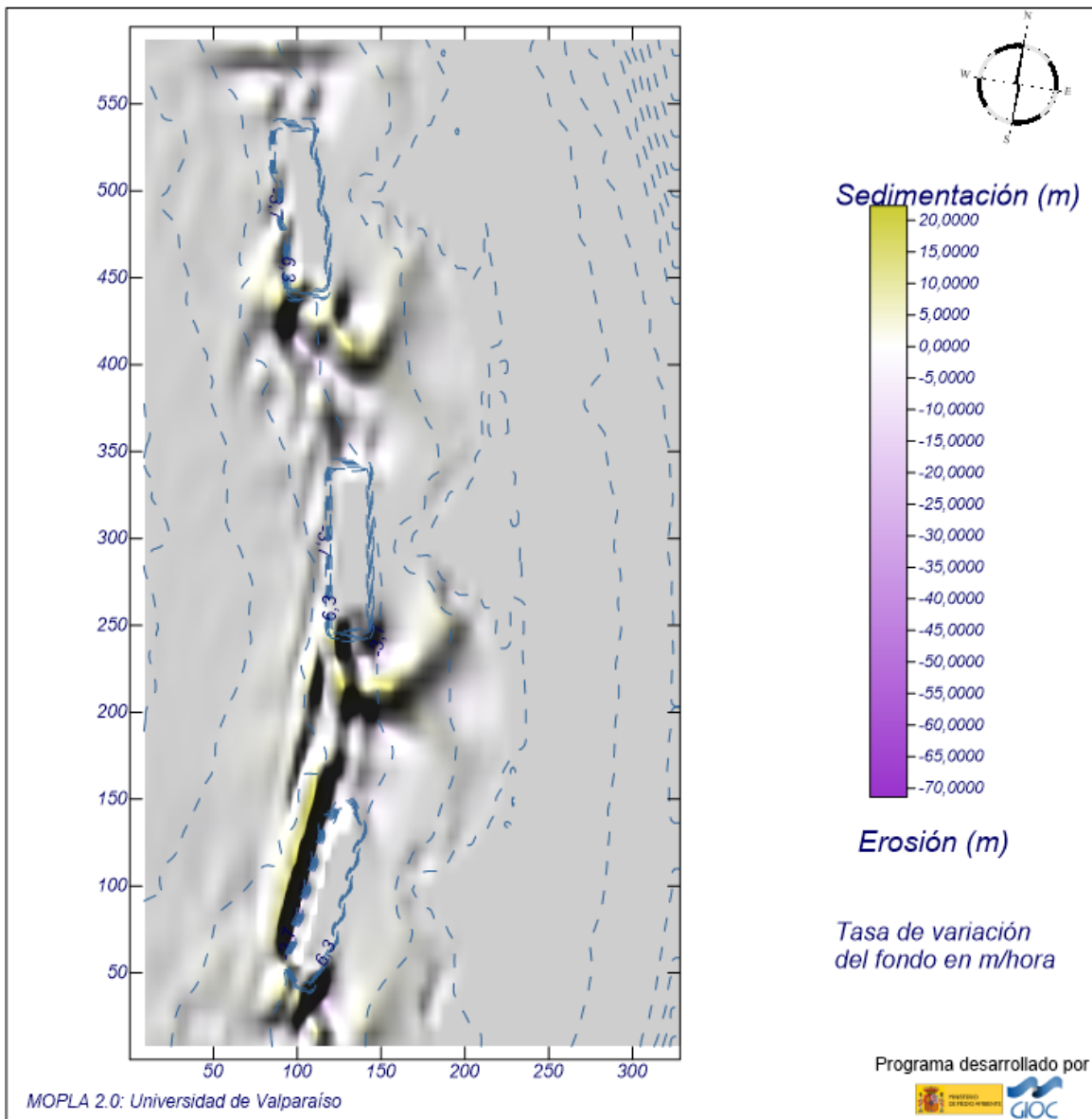


Figura 6-35: Movimiento de sedimento inicial Caso Clima Extremo.  
Fuente: Elaboración propia.

# Proyecto: Mejoramiento Huayquique.

Gráfico: Topografías inicial y final

**Caso monocromático: E102**

**E1:** encadenada fina  
**02:** oleaje extremo

Características de la simulación

OLUCA-MC	COPLA-MC	MOPLA-MC
Periodo T: 14 s Altura H: 3.03 m Dirección: 43.4 ° (S37.5W) Marea NM: 1.17 m	Chezy C: 10 m <sup>2</sup> /s Viscosidad de remolino $\nu$ : 2 m <sup>2</sup> /s	D <sub>50</sub> : 0.30 mm Duración: 48.0 h Formulación: Soulsby

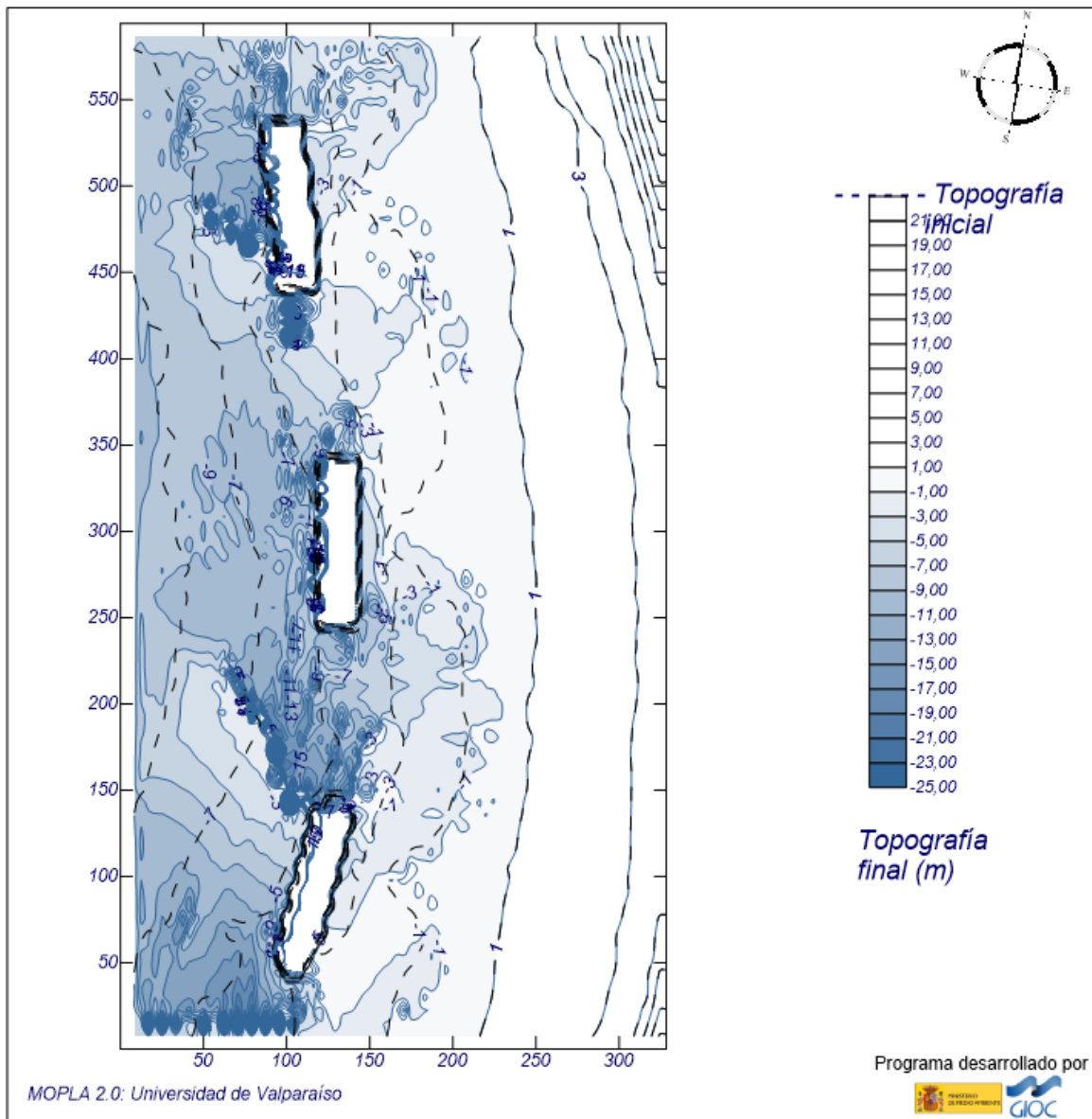


Figura 6-36: Topografía inicial vs final Caso Clima Extremo.  
Fuente: Elaboración propia.

## 6.2. DISEÑO DE OBRA DE PROTECCIÓN

### 6.2.1. BASES DE DISEÑO

#### VIDA ÚTIL

De acuerdo con la Figura 9-225 presentada en el Anexo III, es posible determinar la vida útil de la estructura dependiendo del tipo de obra y del nivel de seguridad requerido (ROM 1990) (Ref 16). Al ser una infraestructura de carácter general (no ligada a la explotación de una instalación industrial o yacimiento) y tener un nivel de seguridad Nivel 1 (obra de defensa y regeneración de costas), la vida útil mínima para la obra es de  $L_f = 25$  años.

#### RIESGO

El riesgo se determina considerando el riesgo de pérdida de vidas humanas y la repercusión económica en caso de inutilización de la obra (Ref 16). Al ser una obra exenta a la playa, la probabilidad de pérdida de vidas humanas es reducida, y los diques en talud, al ser obras flexibles, permiten el riesgo de iniciación de averías y tienen una repercusión económica media-baja, considerando así un riesgo  $R = 0,4$ .

#### PERIODO DE RETORNO

El periodo de retorno se calcula según la Ecuación 6-4 y es necesario para diseñar los elementos de la estructura.

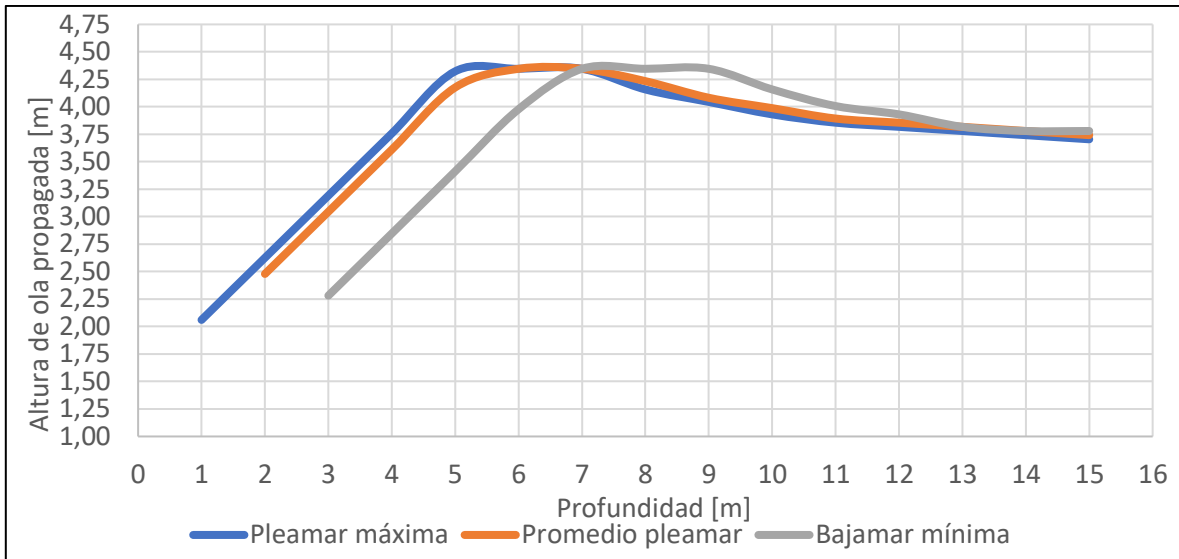
Ecuación 6-4

$$T_f = -\frac{L_f}{\ln(1-R)}$$

Considerando una vida útil de 25 años y un riesgo del 40%, se obtiene un periodo de retorno de  $48,9 \approx 50$  años. Con este periodo de retorno se obtiene una altura de periodo de retorno igual a **3,78 [m]**, considerando la banda de confianza superior a modo conservador.

### 6.2.2. PROPAGACIÓN AL PIE DE LA OBRA

La propagación al pie de la obra se realizó mediante la formulación de Goda (apartado 4.1.1). En la Figura 6-37 se presenta la altura significativa de diseño propagada para los 3 niveles de diseño propuestos; se observa que las mayores alturas se generan entre los 5 [m] y 6 [m] de profundidad. Además de presentar la profundidad de rotura calculada por el criterio de McCowan (1891), que depende del nivel de diseño. A medida que el nivel del mar es más bajo, la ola rompe a una mayor profundidad.



**Figura 6-37: Variaciones en la altura de ola propagada hasta su rompiente.**  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6-20 se muestran los niveles de diseño y las profundidades en las que se produce la altura significativa máxima propagada frente a los diques.

**Tabla 6-20: Altura de diseño máxima propagada.**

Nivel de diseño	Nivel del mar [m]	Profundidad al NRS [m]	Profundidad total [m]	Periodo [s]	Ho' [m]	H1/3 [m]
Z1	1,65	5	6,65	13	3,78	4,35
Z2	1,39	5	6,39			
Z3	0,04	6	6,04			

Fuente: Elaboración propia.

Los diques exentos se ubicarán entre los 3 [m] y 5 [m] de profundidad, coincidiendo con las profundidades a las que se registran las mayores alturas. Al considerar una propagación de oleaje con un Nivel de Diseño Mínimo Z3, la rotura del oleaje se produce a una profundidad mayor y la altura significativa máxima se da a los 6 [m] de profundidad, pero alcanza un valor igual a los otros dos niveles de diseño, Z1 y Z2. El diseño de la coraza se realizará con una altura de ola propagada al pie de **4,35 [m]**, al ser la altura más alta generada en los rangos de profundidad de los diques.

### 6.2.3. DISEÑO DE DIQUE EXENTO

La configuración del dique exento se realizó de manera que parte de la energía del oleaje pueda ser transmitida a la zona abrigada. Esto se hizo para evitar que la configuración de la playa pase a ser un Tombolo (apartado 4.3), debido a que esta configuración de playa permite el acceso de las personas a las estructuras, lo que puede generar situaciones potencialmente peligrosas.

#### DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño de los elementos de protección se realizó mediante la formulación mostrada en el apartado 4.3.1. calculando el peso de los elementos de la coraza por Van de Meer (1988) y (1991).

Los parámetros utilizados para el cálculo y el peso de los elementos de la coraza se presentarán en la Tabla 6-21 y los resultados de Van der Meer (1991) en la Tabla 6-22.

**Tabla 6-21: Parámetros de diseño.**

<b>Altura frente al rompeolas [m]</b>	<b>4,35</b>
Periodo peak [s]	13
Peralte de la ola	0,016
Permeabilidad, P	0,6
Densidad de la roca, $\rho_r$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2.680
Densidad agua de mar, $\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.025
Pendiente de la estructura (tan $\alpha$ )	0,5
Nivel de daño S	4
Parámetro de Iribarren	3,89
Parámetro de Iribarren Crítico	3,32
Número de olas, $N_z$	7.200

Fuente: Elaboración propia.

Considerando el Parámetro de Iribarren, la rotura del oleaje al ser mayor a 3.3 se clasifica como **Oscilación**, además de cumplirse la condición planteada por Van der Meer (1988) de  $\xi m > \xi m_c$ .

**Tabla 6-22: Peso y diámetro de los elementos de la coraza.**

Coraza	Rotura	Ns	Dn50 [m]	Dn50 Modificado [m]	W50 [ton]
	Voluta	1,55	1,73	1,44	8,0
Oscilación	1,84	1,45	1,21	4,7	

Fuente: Elaboración propia.

Escogiendo una permeabilidad de 0,6, se considera una estructura homogénea hecha solamente de coraza para la construcción del dique. De acuerdo con Van der Meer (1988), en una estructura con núcleo impermeable, el flujo de agua se concentra en la coraza de la estructura, generando grandes fuerzas sobre las rocas y disminuyendo su estabilidad; por otro lado, las estructuras homogéneas permiten que el agua se filtre a través del dique, disminuyendo las fuerzas actuantes y aumentando la estabilidad de la pendiente.

El cálculo de los elementos del pie de apoyo se realizó en base a lo propuesto por Markle (1989), considerando una altura significativa de diseño igual a la utilizada para calcular el peso de los elementos de la coraza. El peso de la roca para el pie de apoyo se presenta a continuación en la Tabla 6-23.

**Tabla 6-23: Peso elementos del pie de apoyo.**

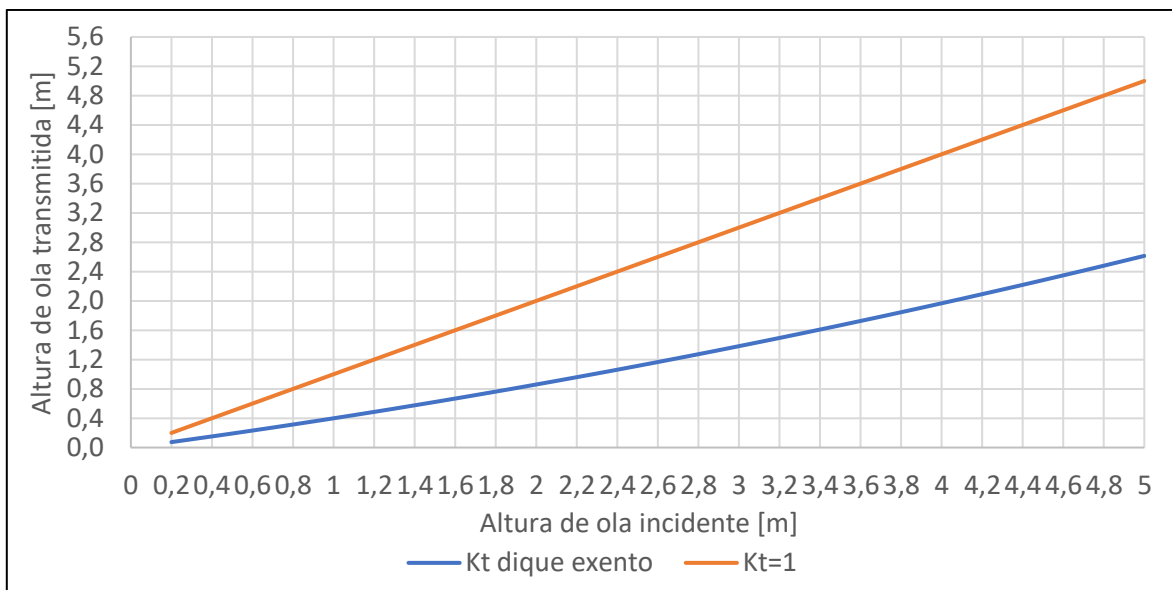
<b>Dn50 [m]</b>	<b>1,09</b>
<b>W50 [ton]</b>	<b>3,48</b>

Fuente: Elaboración propia.

Como el peso de los elementos del pie de apoyo es menor a los de la coraza, a modo conservador y para evitar realizar transiciones, se utilizará el mismo peso para toda la estructura, es decir 4,7 [ton].

## DISEÑO HIDRÁULICO - TRANSMISIÓN

La configuración en planta buscada posterior a la construcción de los diques es una saliente. Para que esto suceda es necesario que exista una transmisión importante del oleaje. En el apartado 4.1.1 se muestra la formulación que se utilizó para determinar el coeficiente de transmisión. En la Figura 6-38 se muestra la transmisión del oleaje hacia la zona abrigada.



**Figura 6-38: Transmisión de oleaje en la zona abrigada.**

Fuente: Elaboración propia.

En esta transmisión de oleaje se tomó en cuenta tanto la transferencia de oleaje por sobrepaso, como la transferencia por penetración en la estructura. La transferencia por penetración se consideró mediante una porosidad de la estructura de  $P=0,6$ , y la transferencia por sobrepaso se produjo debido a que se considera un dique de cresta baja. Se observa que el coeficiente de transmisión disminuye entre un 41% y un 52% a las alturas significativas entre 1 [m] y 4 [m] respectivamente. Las alturas de clima medio predominante, que van de 0,6 [m] a 1,8 [m] disminuyen en un 60% aproximadamente y no superan el metro de altura tras el dique, Mientras que para alturas cercanas a la ola de diseño la altura disminuye en un 50%.

### DISEÑO HIDRÁULICO - SOBREPASO

El caudal de sobrepaso admisible se determina mediante la Figura 9-227 en el Anexo III. Como no se considera tránsito de peatones o vehículos tras la estructura, el sobrepaso se considera solamente para Structural Safety (Seguridad Estructural) en la columna de Embankment / Seawalls (Terraplén / Rompeolas). Ya que estos diques exentos son estructuras homogéneas hechas de coraza o “fully protected” como aparece en la Figura 9-227, se considera un caudal máximo admisible de 50 [l/s/m], pero a modo conservador se estima un caudal máximo admisible de 20 [l/s/m] como si la pendiente trasera del dique no estuviera protegida.

El caudal de sobrepaso estimado se calculó para 2 periodos de retorno de acuerdo con las formulaciones del EurOtop (2007) (Ref 17); uno con un periodo de retorno de 2 años y otro de 50 años para analizar el sobrepaso de clima medio y clima extremo respectivamente. Para el cálculo se consideró el promedio de las pleamares, nivel medio del mar y promedio de las bajamares, como se muestra en la Tabla 6-24.

**Tabla 6-24: Caudal de sobrepaso calculado.**

Hs [m]	Tr [años]	Dique	$\beta$ [°]	$\Gamma\beta$	$\gamma f$	Rc [m]	Caudal calculado [l/s/m]	Caudal admisible [l/s/m]
2,75	2	1	12	0,9993	0,4	-0,17	4,268	20
						0,20	1,779	
						0,58	0,724	
		2	20	0,9988		-0,17	4,269	
						0,20	1,779	
						0,58	0,724	
		3	34	0,9980		-0,17	4,271	
						0,20	1,778	
						0,58	0,723	
4,35	50	1	12	0,9993	0,4	-0,17	7,324	20
						0,20	4,212	
						0,58	2,386	
		2	20	0,9988		-0,17	7,113	
						0,20	4,359	
						0,58	2,637	
		3	34	0,9980		-0,17	7,327	
						0,20	4,210	
						0,58	2,384	

Fuente: Elaboración propia.

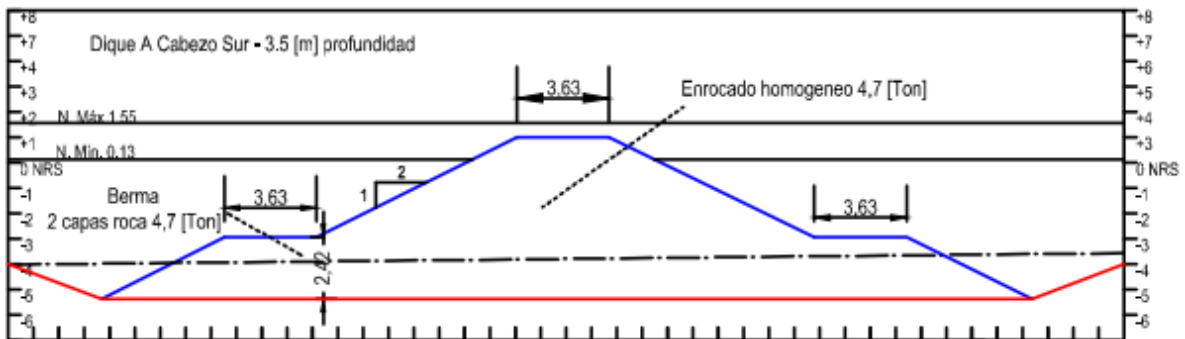
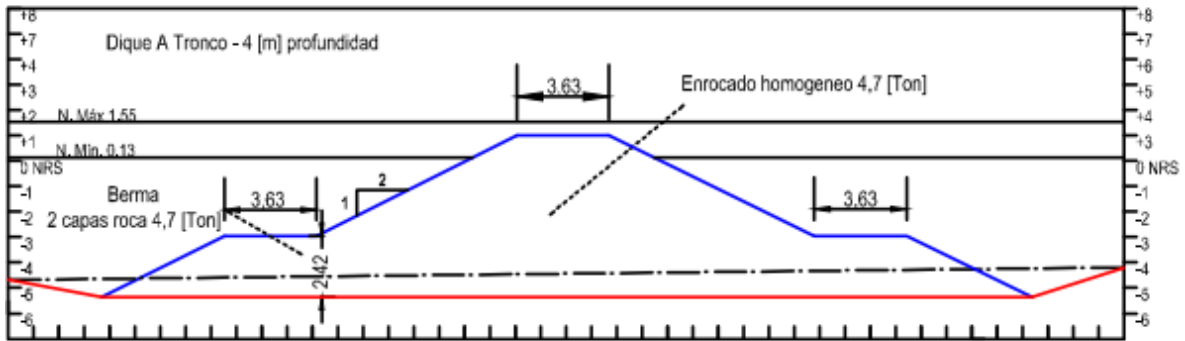
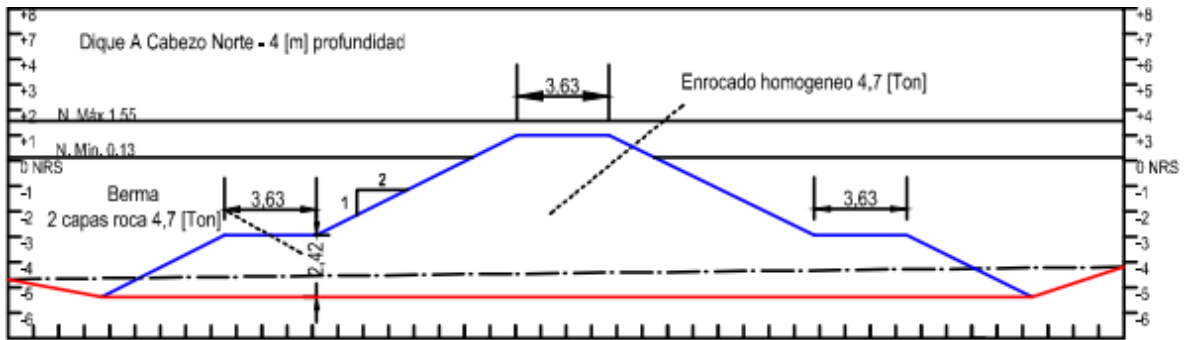
Se observa que el ángulo de incidencia del oleaje no influye mayormente en el caudal de sobrepaso calculado, pero sí el francobordo (Rc). Se presentan los valores más altos de sobrepaso en el nivel del promedio de las pleamares, cuando el dique se encuentra sumergido, pero aun así cumple con el caudal de sobrepaso admisible.

#### 6.2.4. PERFILES

Los perfiles presentados a continuación fueron creados con el software de diseño Autocad 2016.

Los primeros 9 perfiles mostrados son de tipo transversal y muestran 3 secciones de cada dique; una del tronco y dos de cada cabezo (Norte y Sur). El último perfil presentado es del tipo planta, y muestra la configuración general de los diques en la playa.

La línea punteada que aparece en cada perfil corresponde al nivel de terreno original, mientras que la línea de color rojo corresponde al nivel de terreno nuevo posterior a las obras de excavación.



**Figura 6-39: Perfiles dique A.**  
Fuente: Elaboración propia.

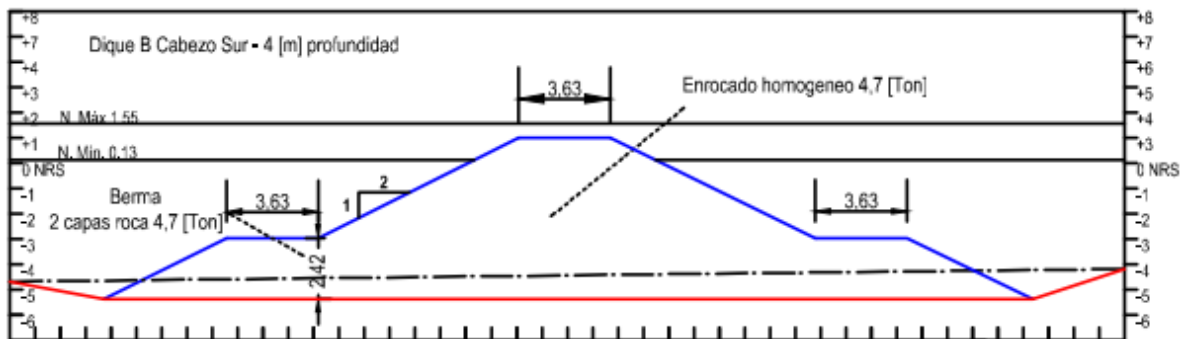
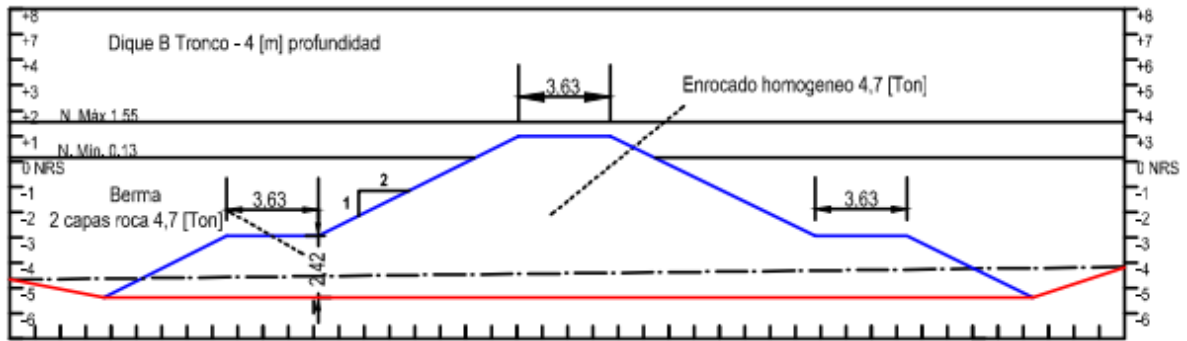
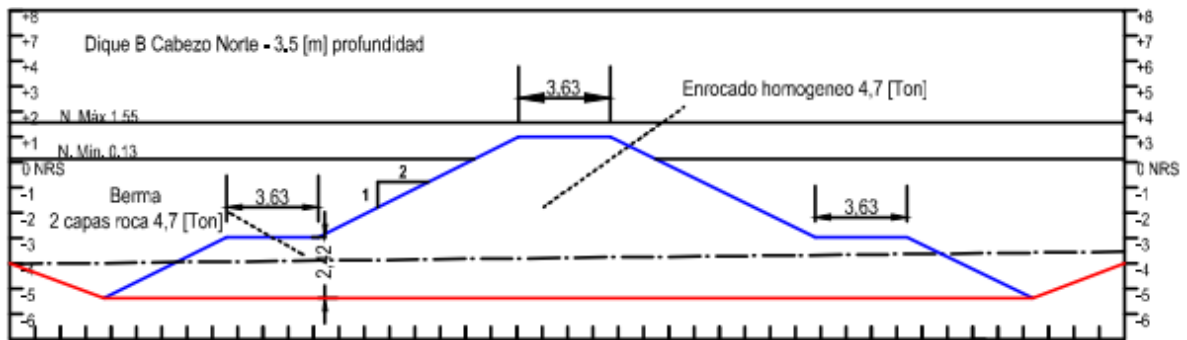


Figura 6-40: Perfiles dique B.  
Fuente: Elaboración propia.

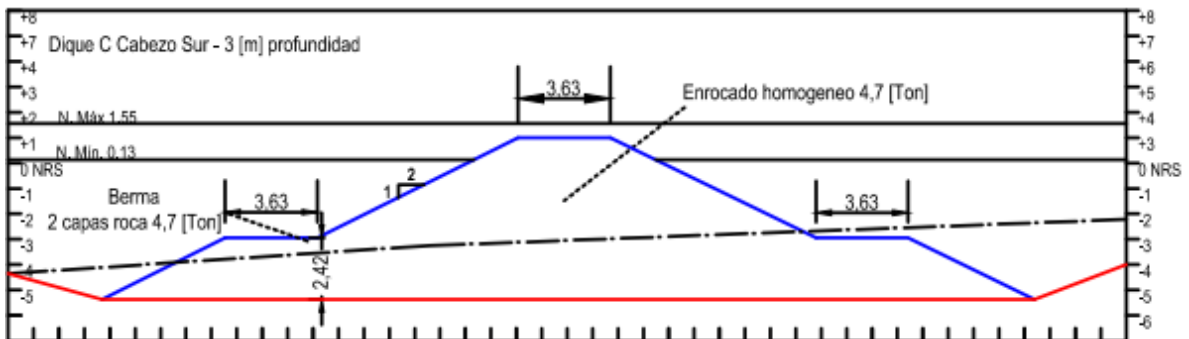
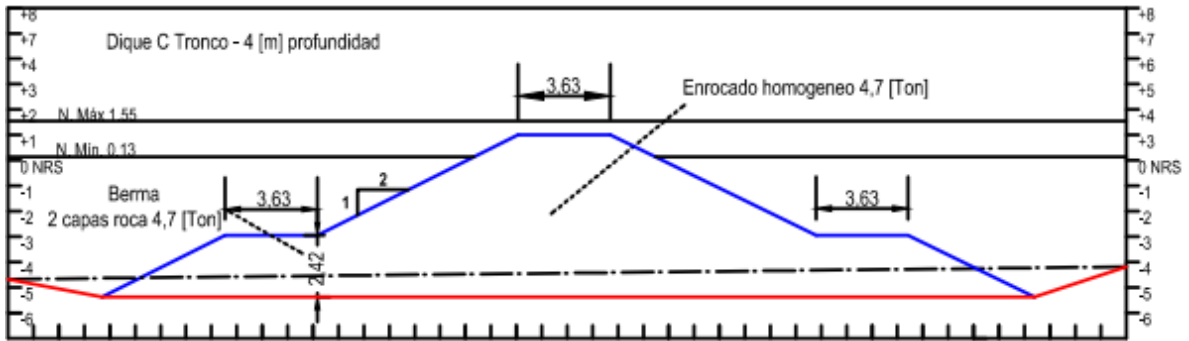
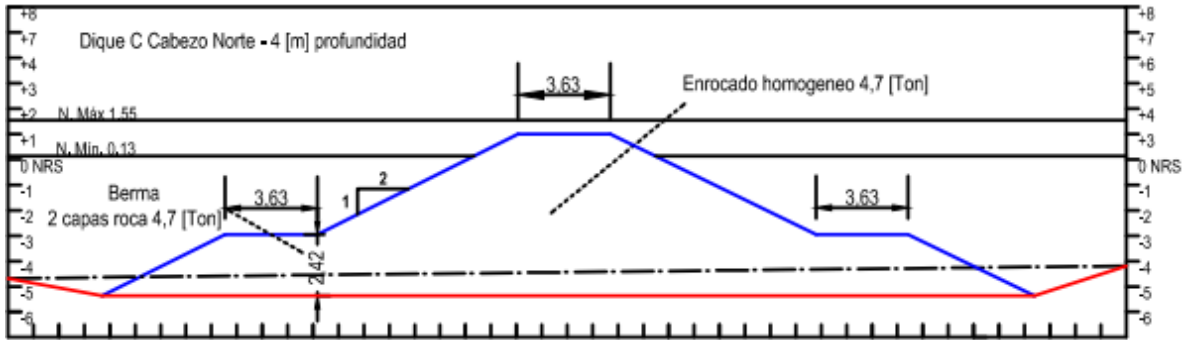
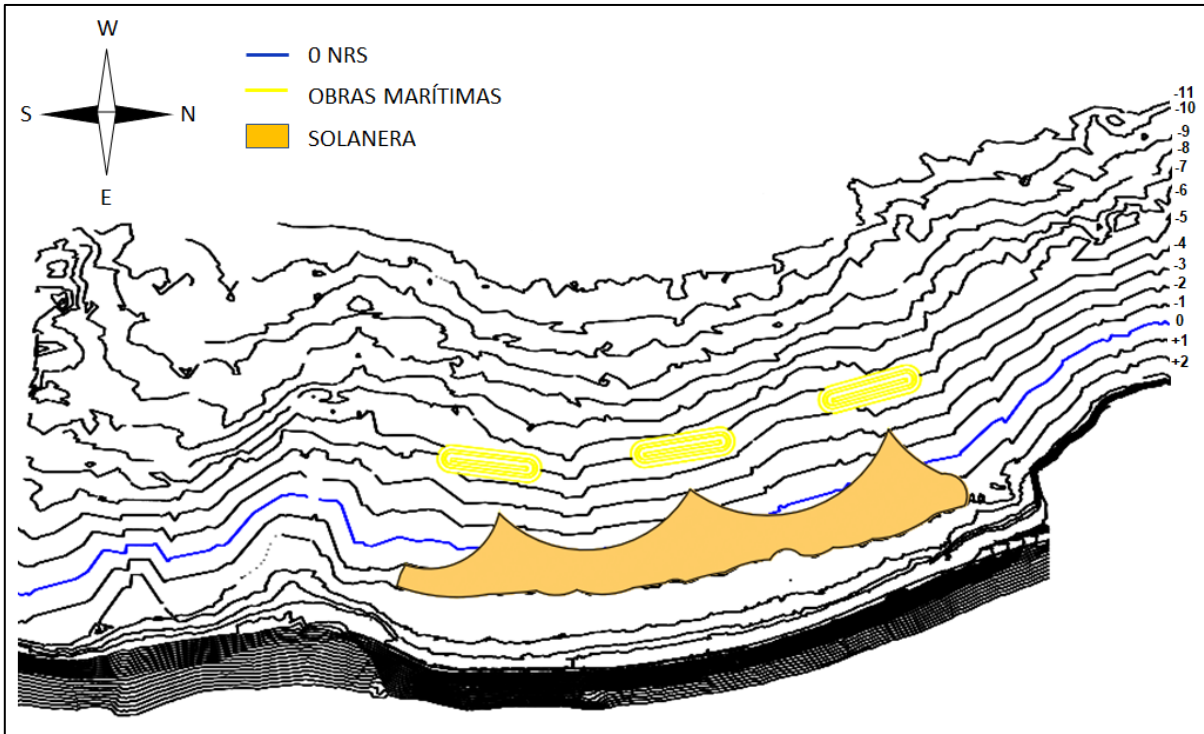


Figura 6-41: Perfiles dique C.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6-42: Planta del proyecto.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 6.3. PRESUPUESTO

El presupuesto realizado para este proyecto (Tabla 6-25) se basa en los precios unitarios considerados en la elaboración del proyecto Construcción Rompeolas para Habilitar Playa Brava para el Baño, Iquique (2013) realizado por la empresa Baird.

Estos valores son estimativos y necesitan la verificación de proveedores y contratistas del sector actualmente.

**Tabla 6-25: Presupuesto diques exentos.**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (CLP)	Total (CLP)
<b>1</b>	<b>Instalación de faenas</b>				
1.1	Explanada de acopio	GL	1	\$ 50.000.000	\$ 50.000.000
1.2	Movilización de grúas	GL	1	\$ 75.000.000	\$ 75.000.000
1.3	Estructuras provisorias	GL	1	\$ 300.000.000	\$ 300.000.000
1.4	Obras de excavación	m³	10825,8	\$ 18.662	\$ 202.031.080
<b>2</b>	<b>Suministro de material en obra</b>				
2.1	Suministro de coraza	m³	44225,1	\$ 23.302	\$ 1.030.533.280
2.2	Suministro de arena	m³	77.684,3	\$ 6.670	\$ 518.154.281
<b>3</b>	<b>Construcción de rompeolas</b>				
3.1	Colocación de coraza	m³	44225,1	\$ 13.619	\$ 602.301.637

	<b>Costo total estimado</b>	<b>\$ 2.778.020.278</b>
Gastos Generales	25%	\$ 694.505.069
Utilidades	10%	\$ 277.802.028
	<b>Subtotal</b>	<b>\$ 3.750.327.375</b>
IVA	19%	\$ 712.562.201
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 4.462.889.576</b>

Fuente: Elaboración propia.

Notas Se realizan 3 rompeolas. Se termina uno antes de comenzar el próximo.  
Se construye un muelle provisorio por rompeolas. Luego se traslada a su próxima posición.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones que se desarrollan a continuación se basan en los objetivos planteados.

1. Para los niveles de diseño se consideraron los valores de la marea astronómica calculados con análisis no armónico, y los valores de la marea meteorológica con el residuo del análisis armónico; ambos realizados con un año de datos (2017).

La altura de diseño se determinó propagando con el Software SWAN mediante un método de transferencia espectral cuasi purista, propagando una altura unitaria hasta un punto frente a la costa, donde fueron calculados los coeficientes de agitación en el sector, necesarios para realizar los análisis de clima medio y clima extremo del oleaje. Se observa que el clima operacional presenta una dirección predominante del tercer cuadrante entre el WSW y el SW, con una dirección del flujo medio de energía frente a playa Huayquique de 241 [°], alturas significativas predominantes entre los 0,6 [m] y 1,6 [m], y periodos entre los 10 [s] y 18 [s].

2. Ya que la configuración en planta de la playa buscada es una saliente y no un tómbolo, se decidió por la implementación de un dique exento de cresta baja que permita un mayor flujo de energía hacia la zona abrigada, e impida que la playa se conecte con el dique. Esto último para garantizar seguridad para los bañistas, ya que se busca evitar situaciones de peligro para personas que quieran llegar a la estructura.
3. Del análisis granulométrico se determinó que la mayoría de la playa presenta arena media, muy bien clasificada y con diámetros medios entre 0,26 [mm] y 0,38 [mm], con excepción de la muestra HI2 que presenta un diámetro medio de 6.86 [mm] producto de un 22% de peso retenido en el Tamiz N° 5. Este análisis da cuenta de la importancia del proceso de toma de muestras, en especial en zonas sumergidas e intermareales donde los granos más finos se encuentran en suspensión o se encuentran en movimiento en la zona de rompiente, generando que los granos obtenidos como muestra posean diámetros mayores.
4. Se consideró la formulación propuesta por Dean & Pope (1986) para determinar qué configuración de playa se puede generar producto de la geometría de los diques. El diseño geométrico propuesto de los diques determinó que la formación en la línea de playa sería de una saliente.

Con el estudio de evolución morfológico de la playa se observaron cambios estacionales, la formación de pequeñas salientes, y un avance y retroceso general de toda la línea de costa producto de la dirección perpendicular del oleaje que afecta la playa.

Del análisis a largo plazo de la morfología de la playa hecho con el programa SMC se puede afirmar que la formación en planta en equilibrio tendría una saliente frente a cada dique exento. Los cambios que esta podría sufrir dependerán del clima de oleaje, sobre todo de la dirección, pero gracias a la configuración geométrica de los diques, es poco probable que la playa adopte la forma de un tómbolo.

Con respecto al análisis a corto plazo de la playa:

Se genera una corriente entre los diques en sentido antihorario hacia el norte y sentido horario hacia el sur de ese sector, que disminuye notablemente hacia las zonas abrigadas de la playa. La altura significativa aumenta entre los diques, pero disminuye rápidamente producto de la difracción en la zona abrigada tras estos.

Producto de que el programa deforma levemente los contornos de los diques exentos, los valores de acreción y socavación calculados por el Mopla fueron elevados, pero los gráficos ayudan a mostrar las zonas donde estos fenómenos ocurrirán. Las zonas con mayor erosión son las que se encuentran desprotegidas ante la acción del oleaje. Esta erosión se genera en la línea de costa y forma una barra natural, que constituye un mecanismo de defensa natural de la playa ante eventos de temporal. El retroceso de la línea de costa producto del evento de temporal es de aproximadamente 30 [m], pero el ancho de la playa extendida es de alrededor de 80 [m], por lo que no existiría erosión que supere la mitad del ancho de la línea de costa. Mientras que la acumulación de sedimentos se produce desde los 0 [m] a -3 [m] NRS, los diques se encuentran a una profundidad entre los -3 [m] a -5 [m] de profundidad, por lo que ayudarían a retener sedimento en estas profundidades.

5. El diseño de los elementos del enrocado se determinó mediante Van der Meer (1991), una modificación de Van de Meer (1988) que en vez de considerar al dique impermeable y sin sobrepaso. Se utiliza para diseñar diques de cresta baja (son estructuras con mayor estabilidad producto de que al existir sobrepaso una gran cantidad de energía del oleaje pasa sobre el dique). Además, el dique se considera permeable, siendo una estructura homogénea. El peso de los elementos de la coraza es de 4,7 [ton], con un rango entre un 75% y 125%. Los elementos del pie de apoyo poseen un peso cercano a los elementos de la coraza debido a la poca profundidad a la que se encuentran los diques, con un peso de 3,48 [ton] se considerará solamente el peso de la coraza para la construcción del pie de apoyo.
6. El diseño hidráulico de las estructuras dependió principalmente de la cota de coronamiento de la estructura, considerando 1 [m] sobre el NRS. El caudal de sobrepaso calculado de 7 [l/s/m] resultó ser bastante menor a los 50 [l/s/m] de caudal admisible para una estructura que no se encuentre protegida en la pendiente posterior.

Mediante las fórmulas de Van de Meer y d'Angremond (1991) se determinó el coeficiente de transferencia. Bajo las condiciones de oleaje reinante, en un 90% de los datos de oleaje, que va desde 0,4 [m] a 1,8 [m] aproximadamente, las alturas disminuyen en un 60% la altura de ola incidente tras el dique. Para una condición de oleaje extremo, las alturas pueden disminuir hasta un 50% de su valor inicial. Esta transferencia de oleaje es importante para ayudar a evitar que la playa se conecte con la estructura.

7. Para la elaboración de los planos se consideró una vista en planta y en elevación transversal. El plano en planta entrega la configuración de los 3 diques con respecto a

la topobatimetría del lugar, mientras que, el plano en elevación transversal tiene el fin de entregar la configuración de las condiciones constructivas del enrocado.

Se contempla la generación de un área de solana de aproximadamente 600 [m] de largo y de ancho 50 [m] en las zonas desprotegidas y 80 [m] en las zonas abrigadas, con un área de aproximadamente 31.200 [m<sup>2</sup>]. Considerando una cota de arena media de 2 [m] respecto al NRS, es necesario alrededor de 77.700 [m<sup>3</sup>] de arena de relleno.

Se realizarán las siguientes recomendaciones orientadas a considerar si se desea mejorar el diseño del proyecto propuesto en este documento.

1. Para mejorar el análisis granulométrico de la playa se recomienda un aumento en la cantidad de muestras tomadas, incluyendo muestras sumergidas en distintos puntos de la playa. De esta manera se posee una mejor caracterización sedimentaria del lugar, en especial en la zona donde se genera el movimiento de las partículas.
2. Tener datos de niveles de la playa en estaciones de acreción y erosión de la playa, para analizar la evolución morfodinámica de la playa, y modelar la línea de costa durante estas estaciones.
3. Si se desea asegurar la formación de una saliente bien desarrollada sin la necesidad de que exista una gran transmisión de energía hacia la zona abrigada, es recomendable construir el dique a una mayor profundidad, lo que incrementaría la cantidad de materiales a utilizar, y así también el costo de la obra.

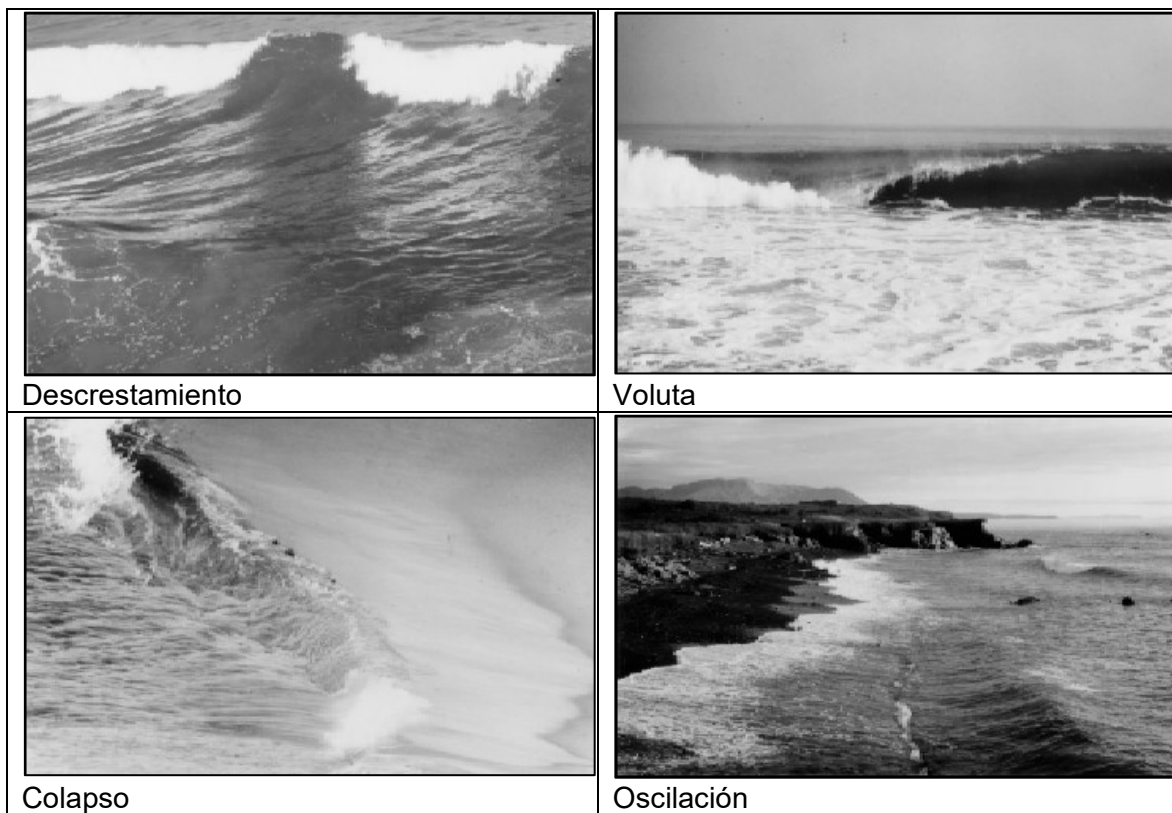
## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ref 1 Universidad de Valparaíso. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. <https://oleaje.uv.cl/>.
- Ref 2 Universidad de Cantabria. (2002). SMC España. <http://smc.ihcantabria.es/SMC25/>.
- Ref 3 Quezada, M. (2007). *Estudio de erosión costera y regeneración de espacios litorales. Una aplicación en playa el Papagayo, Quintero*.
- Ref 4 Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*. World scientific.
- Ref 5 SWAN 41.31 (1993) [Software]. Delft University of Technology.
- Ref 6 Chasten, M. A., Rosati, J. D., McCormick, J. W., & Randall, R. E. (1993). *Engineering design guidance for detached breakwaters as shoreline stabilization structures* (No. CERC-93-19). COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER VICKSBURG MS.
- Ref 7 UNICAN. (2000). *Procesos litorales*. Documento de referencia.
- Ref 8 Gangas, M. J. (2013). *Generalidades Sedimentos*. [Diapositivas en PowerPoint]
- Ref 9 GIOC (2002). *Documento temático Regeneración de playas*. Universidad de Cantabria.
- Ref 10 Universidad de Cantabria (2015). *Manual del usuario Mopla 3.0*.
- Ref 11 USACE, U. A. (2006) *Coastal Engineering Manual*.
- Ref 12 DOP-GHD. (2017). *Mejoramiento Playa de Huayquique. Informe Etapa 2*.
- Ref 13 SHOA pub. 3202, S. H. (1999). *Método oficial para el cálculo de los valores no armónicos de la marea*.
- Ref 14 SHOA pub. 3201, S. H. (2005). *Instrucciones oceanográficas N°1*.
- Ref 15 Quezada, M. (2012). *Características Estadísticas del Oleaje*. [Diapositivas en PowerPoint].
- Ref 16 ROM 0.2, R. d. (1990). *Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias*.
- Ref 17 EurOtop. (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*.
- Ref 18 Komar, P. D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall.

## 9. ANEXOS

### ANEXO I

En este anexo son presentadas las imágenes citadas en el MARCO TEÓRICO.



**Figura 9-1: Tipos de rotura de oleaje.**

Fuente: CEM Part II-4-2.

NOMBRE	TAMAÑO [mm]		UNIDADES $\phi$
<b>BLOQUES</b>			
MUY GRANDE	4096	@ 2048	-11
GRANDE	2048	@ 1024	-10
MEDIANO	1024	@ 512	-9
PEQUEÑO	512	@ 256	-8
<b>BOLONES</b>			
GRANDE	256	@ 128	-7
PEQUEÑO	128	@ 64	-6
<b>GRAVAS</b>			
MUY GRUESA	64	@ 32	-5
GRUESA	32	@ 16	-4
MEDIANA	16	@ 8	-3
FINA	8	@ 4	-2
MUY FINA	4	@ 2	-1
<b>ARENAS</b>			
MUY GRUESA	2	@ 1	0
GRUESA	1	@ 0.5	1
MEDIANA	0.5	@ 0.25	2
FINA	0.25	@ 0.125	3
MUY FINA	0.125	@ 0.062	4
<b>LIMOS</b>			
GRUESO	0.062	@ 0.031	5
MEDIANO	0.031	@ 0.016	6
FINO	0.016	@ 0.008	7
MUY FINO	0.008	@ 0.004	8
<b>ARCILLAS</b>			
GRUESA	0.004	@ 0.002	9
MEDIANA	0.002	@ 0.001	10
FINA	0.001	@ 0.0005	11
MUY FINA	0.0005	@ 0.00024	12

Figura 9-2: Clasificación de sedimento, Udden-Wentworth (1922).

Fuente: Elaboración propia en base al CEM.

## ANEXO II

Este anexo presenta las hipótesis en las que se basa el programa Mopla, y son citadas textuales del Manual del usuario Mopla 3.0:

### **Hipótesis del modelo parabólico de “Propagación de ondas” (OLUCA-MC/SP)**

#### 1 Fluido

- No viscoso.
- Incompresible.
- Densidad constante.

#### 2 Flujo

- Irrotacional.
- Estacionario.

#### 3 Dinámicas

- Presión constante en la superficie libre.
- No se considera la acción del viento.
- No se considera la acción de la aceleración de Coriolis.

#### 4 Contornos

- Fondo con pendiente suave:

El desarrollo matemático de las ecuaciones del modelo, se plantean con la hipótesis de que las variaciones del fondo con las coordenadas horizontales son pequeñas en comparación con la longitud de onda. Para el modelo linear, Berkhoff (1982) realizó una comparación entre un modelo numérico exacto y el de la ecuación de pendiente suave para ondas propagándose sobre una playa. Encontró que hasta pendientes del fondo de 1:3 el modelo de la pendiente suave es exacto y que para pendientes mayores predice adecuadamente las tendencias.

#### 5 Propagación

- No linealidad débil:  
Dependencia débil de la ecuación de la dispersión con la amplitud de la onda (monocromático) o la altura de olas significativa (espectral); modelo no lineal Stokes-Hedge.
- Aproximación parabólica:  
Las ondas se propagan en una dirección principal (x), con lo cual se desprecian términos  $\left(\frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x^2}\right)$ . La solución es tanto mas aproximada cuanto menor variación hay respecto a la dirección x.

A continuación se presentan algunas de las principales limitaciones de la aplicación del modelo:

- **Limitaciones por propagación**

- 1 Las pendientes del fondo deben ser menores que 1:3 ( $18^\circ$ ), para garantizar la condición de pendiente suave. Ver figura 3.1.
- 2 El ángulo de propagación en la primera fila ( $x=0$ ) de la malla, debe estar dentro del rango  $\pm 55^\circ$ , con respecto al eje de propagación principal, eje x. (Ver figura 3.2).
- 3 Se debe tener especial cuidado para que la zona de estudio no se encuentre dentro de ángulos de propagación mayores a  $\pm 55^\circ$  con respecto al eje x, dado que los errores comienzan a ser importantes para esos ángulos. (Ver figura 3.2). Orientar en lo posible, el eje x de la malla en la dirección principal de propagación del oleaje. (Ver figura 3.3).
- 4 El modelo ha sido diseñado principalmente para ser aplicado en zonas costeras y playas, donde los fenómenos de propagación dominantes son la refracción, asomeramiento, difracción y rotura en playas. No es aplicable en casos donde la reflexión es un fenómeno importante, como es el caso de resonancia y agitación en puertos. (Ver figura 3.2).

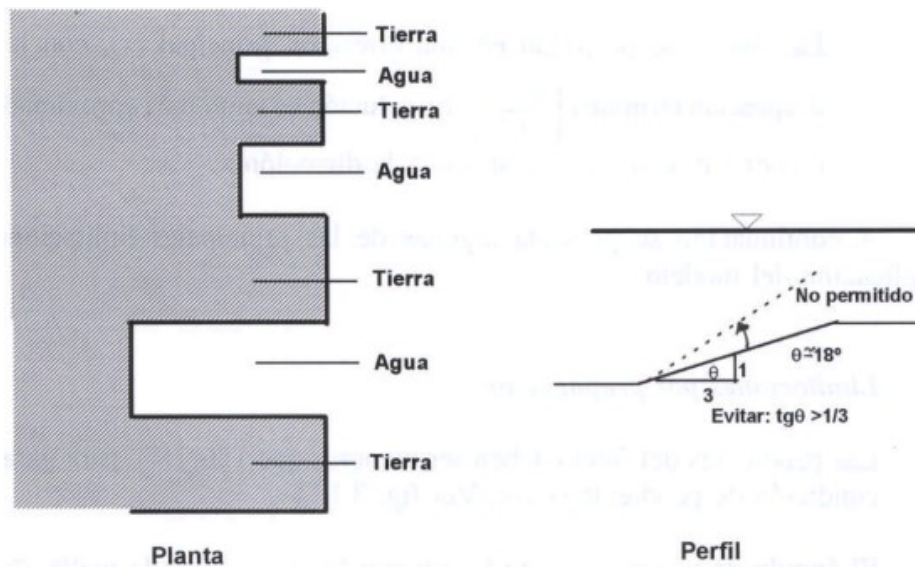


Figura 3.1. Esquema de contornos que se deben de evitar.

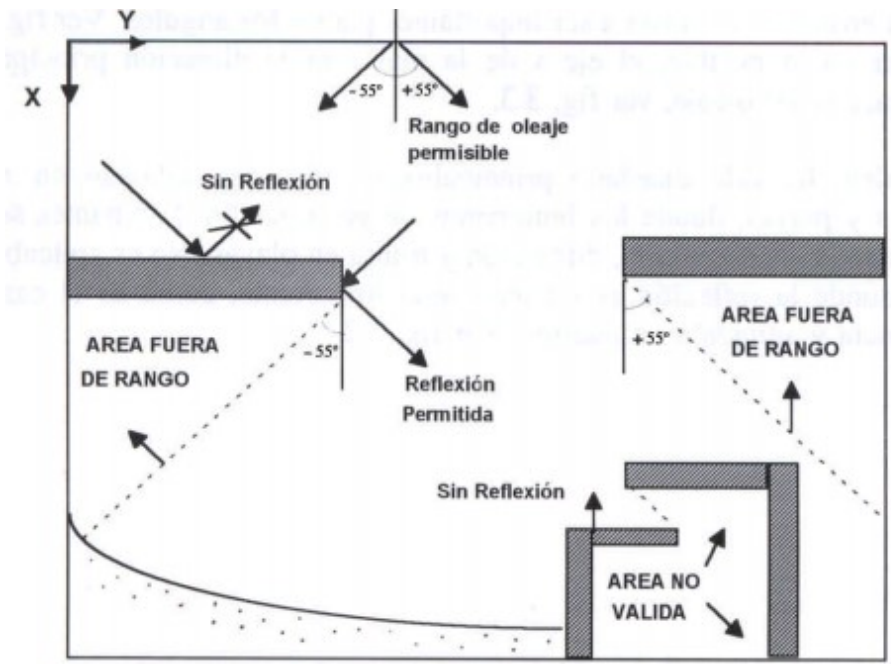


Figura 3.2. Zonas válidas de propagación y límite de ángulos

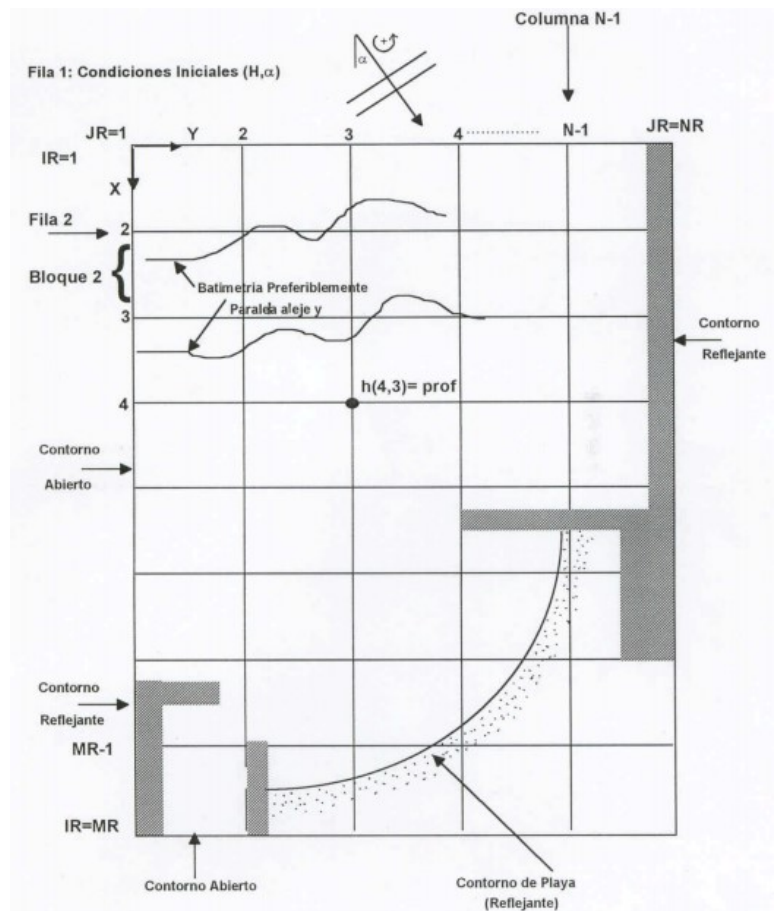


Figura 3.3. Esquema general de la malla y contornos

- **Limitaciones por contornos y condiciones iniciales**

- 1 Evitar cambios bruscos de profundidad en la batimetría (pendientes mayores a 1:3), principalmente en la zona de estudio
- 2 En la primera fila en ( $x=0$ ) se definen las condiciones iniciales del oleaje. En esta primera fila se asume el oleaje incidente igual para todos los puntos (amplitud, período y dirección), en la medida de lo posible se debe tratar que las profundidades en dicha fila no presenten variaciones muy fuertes.
- 3 Como en todos los modelos numéricos, es necesario imponer unas condiciones de contorno laterales, estas condiciones nunca son perfectas e involucran ruidos numéricos en el sistema. El modelo Mopla impone unas condiciones de contorno laterales reflejantes o abiertas aplicando la ley de Snell, por tal motivo, se debe intentar mantener el efecto de los contornos laterales, lo más alejado posible de la zona de estudio y dentro de lo posible, intentar que la batimetría en dichos contornos sea lo más paralela al eje ( $y$ ), (ver figura 3.3).
- 4 Evitar los contornos laterales que alternan agua-tierra-agua, porque pueden generar ruidos numéricos en la ejecución, (ver figura 3.1)
- 5 Debido a limitaciones del modelo numérico en los contornos, el modelo propaga las ondas en profundidades mayores a 0.30 m. Intentar modelar ensayos de laboratorio con profundidades menores a ésta, da lugar a errores numéricos
- 6 Por efectos del modelo numérico, internamente el programa limita las batimétricas en tierra a (-7.0 m).
- 7 Existen limitaciones en los tamaños máximos y mínimos de los elementos ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) en las mallas del dominio de cálculo. Se debe tener especial cuidado en las cercanías de diques exteriores, en grandes profundidades ( $h > 20$  m), donde existe un tamaño mínimo de malla relacionado también con el período del oleaje y la profundidad (ver detalles en el apartado 3.10 del manual de referencia del Oluca-SP).

- **Limitaciones por contornos y condiciones iniciales**

A continuación se presenta una tabla con el dimensionamiento máximo de las matrices de las columnas en el eje  $x$  y el eje  $y$  de la malla de referencia, y el número de subdivisiones totales en el eje  $y$ :

Tipo de modelo	Código de propagación	Nodos de la malla $x, y^*$		Subdivisiones $x^{**}$	Subdivisiones $y^{***}$	Número de frecuencias	Número de direcciones
		$x$	$y$				
Espectral	Oluca-sp	500	500	60	3500	20	20
Monocromático	Oluca-rd	500	500	60	5000	1	1

\* Ver nomenclatura de los nodos de la malla y subdivisiones en las figuras 3.1 y 3.2 de los manuales de referencia

- \*\* Número máximo de subdivisiones en un bloque en el eje x, ver figuras 3.2 y 3.3 de los manuales de referencia
- \*\*\* Número máximo de subdivisiones a lo largo de todo el eje y, si el espacio entre subdivisiones en la zona de estudio es por ejemplo 5 m; las dimensiones máximas de la malla en el eje y, son para el modelo espectral de 17.5 km y para el modelo monocromático de 25 km.

### **Hipótesis del modelo bidimensional de “Corrientes en playas” (COPLA-MC/SP)**

#### 6 Fluido

- Fluido homogéneo
- Incompresible
- Densidad constante

#### 7 Flujo

- La variación del fondo del mar con respecto a la horizontal es lenta (aceleraciones verticales muy pequeñas), lo que implica que las principales características del sistema de corrientes en playas estén contenidos en la variación horizontal de las propiedades integradas en la profundidad, por lo que la velocidad de corriente (U, V) es independiente de la profundidad
- Los movimientos asociados a las corrientes de playa son permanentes, permitiendo esto promediarlas ecuaciones que los representan en el tiempo (período del oleaje), lo cual significa que para períodos de tiempo mayores al del período del oleaje las variaciones temporales son despreciables. Cada tren de ondas incidente crea su propio sistema circulatorio de corrientes.
- Los efectos de viscosidad molecular son débiles, excepto en contornos, en consecuencia, se puede admitir que el movimiento oscilatorio es esencialmente irrotacional, Longuet-Higgins y Stewart (1962).
- Las fluctuaciones turbulentas debidas al oleaje son despreciables.
- Las corrientes son suficientemente débiles como para considerarse su interacción con el tren de ondas.

#### 8 Dinámicas

- Presión constante en la superficie libre
- No se considera la acción del viento
- No se considera la acción de la aceleración de Coriolis

#### 9 Contornos

Dado que los modelos Copla-(MC/SP) se ejecutan a partir de los resultados del modelos Oluca-(MC/SP), este emplea como contornos los mismo definidos en la malla de propagación

## 10 Limitaciones por dimensionamiento del código del programa de corrientes

Dado que el Copla se encuentra ligado al Oluca; este último define las dimensiones máximas de las mallas. Existiendo versiones con dimensiones de nodos de malla semejantes a los descritos anteriormente.

En el capítulo 6 de este manual se presenta una metodología paso a paso para aplicar el Mopla en un proyecto, donde se tiene en cuenta algunas de estas hipótesis, que limitan la aplicación del modelo en ciertos casos.

### **Hipótesis del modelo de “Evolución morfológica de una playa” (EROS-MC/SP)**

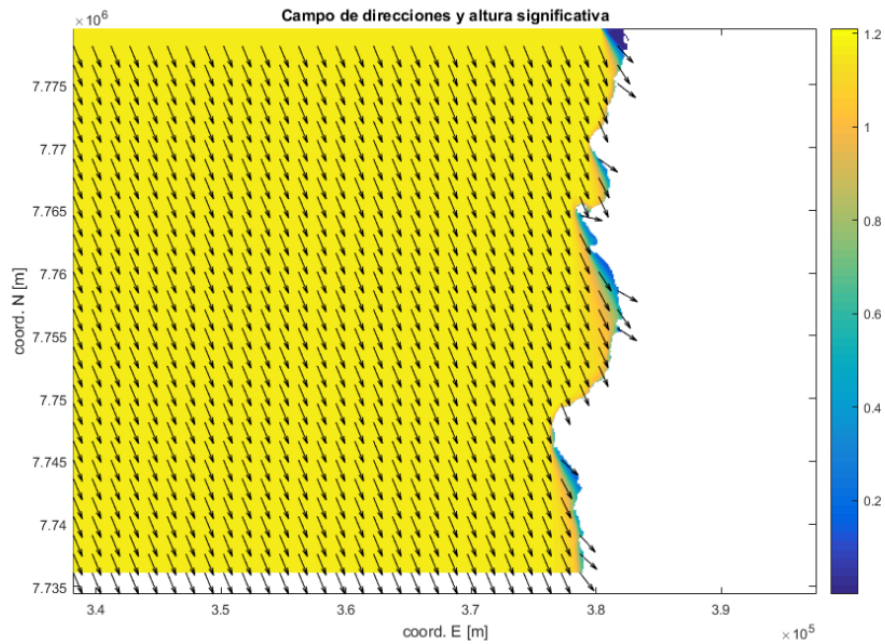
Este modelo evalúa el transporte de sedimentos a partir de formulaciones del oleaje-corriente.

Las hipótesis de cada una de estas formulaciones se recogen en el manual de referencia del Eros-(MC/SP). No obstante, se recuerda al usuario que este es un modelo de “Análisis a corto plazo” cuyos tiempos máximos de simulación no deben superar las 72 horas.

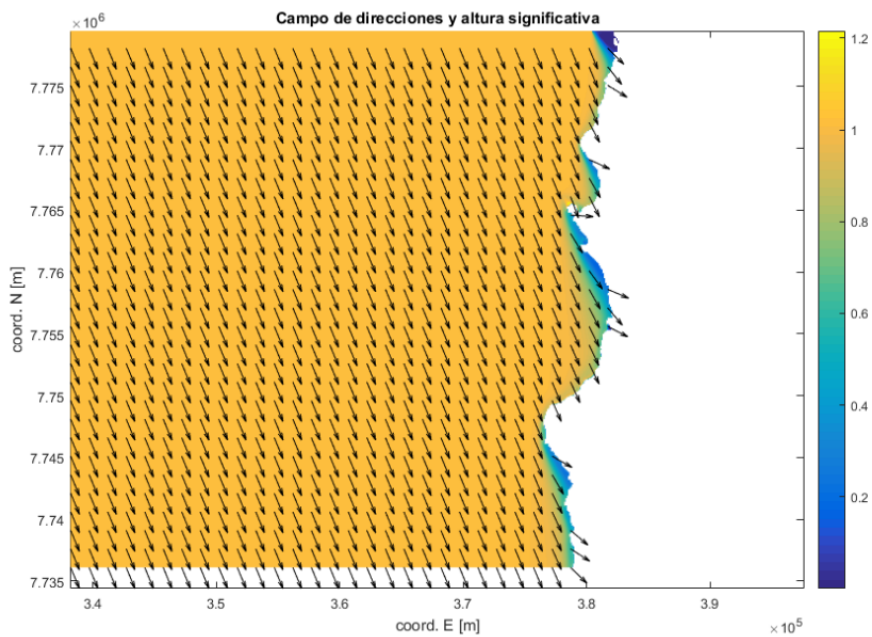
## ANEXO III

En este anexo se presentan las figuras y gráficos citados en los RESULTADOS, correspondientes a la propagación de oleaje, oleaje de clima extremo, diseño del elemento de protección y al análisis granulométrico realizado.

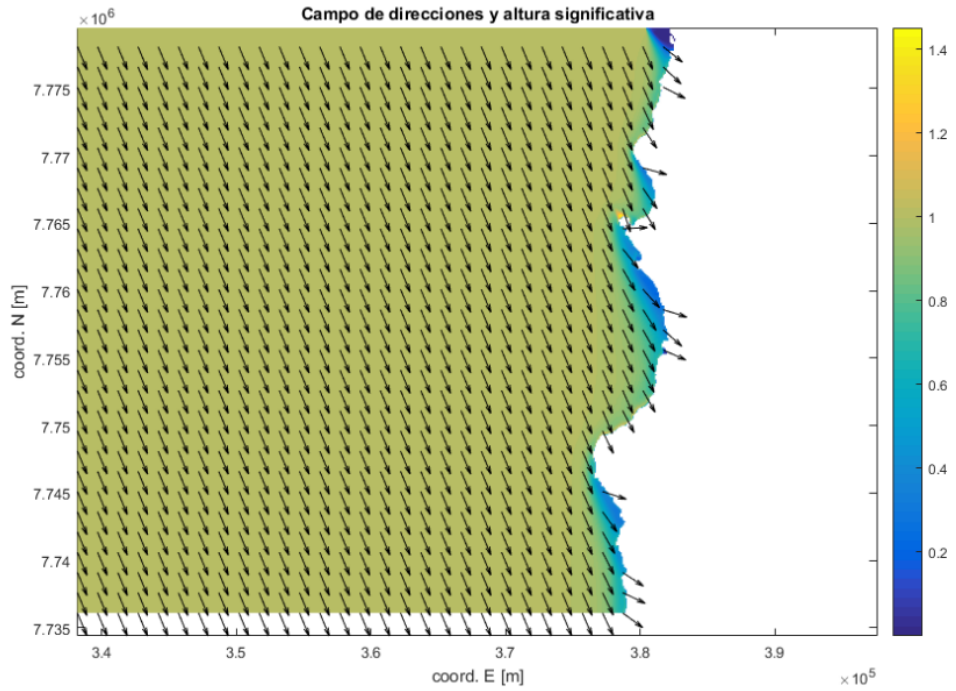
### MALLA GRUESA.



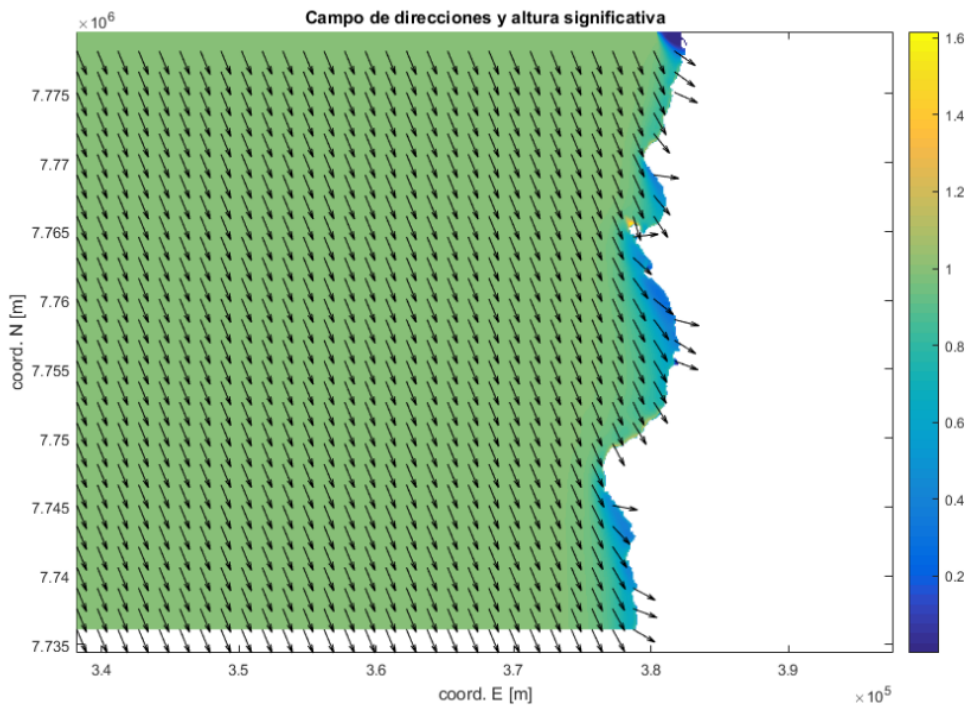
**Figura 9-3: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 4 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



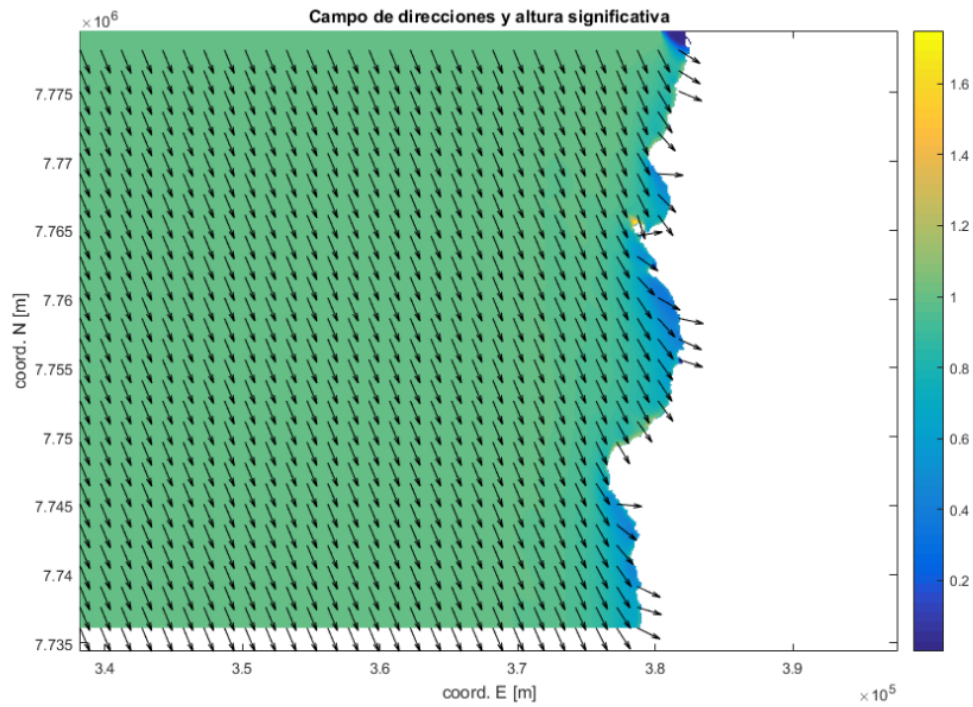
**Figura 9-4: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 6 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



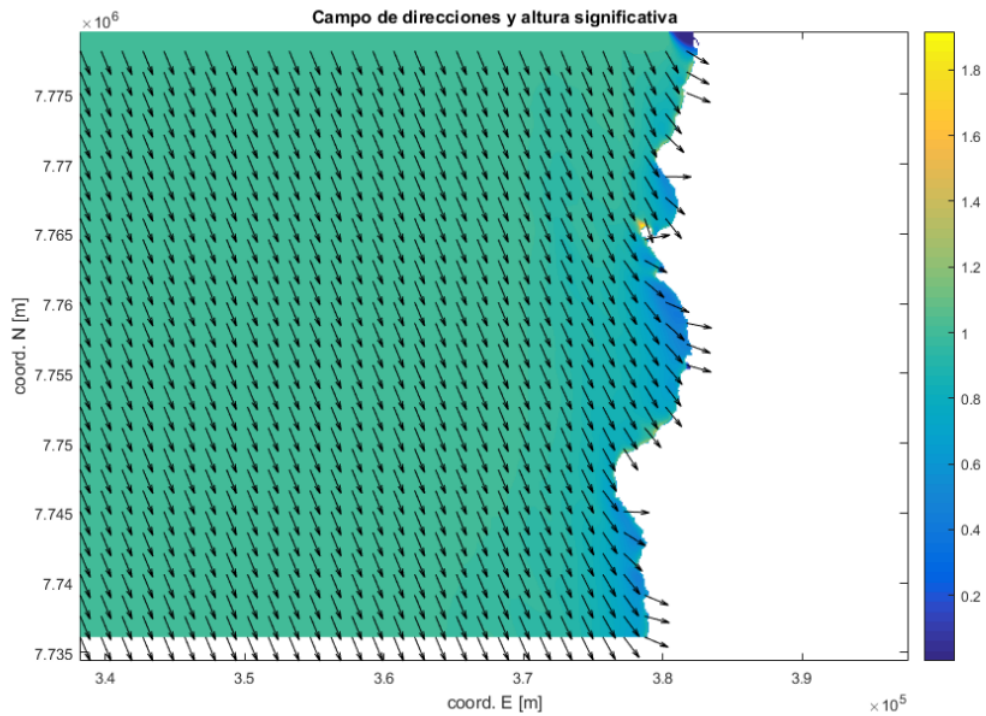
**Figura 9-5: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 8 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



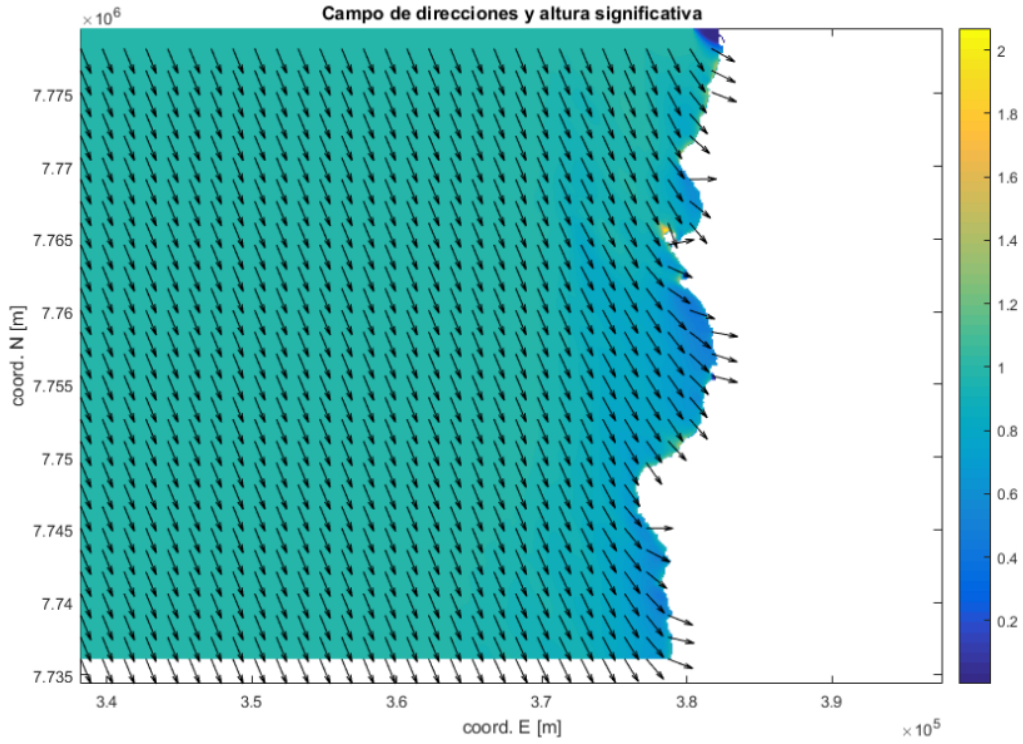
**Figura 9-6: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



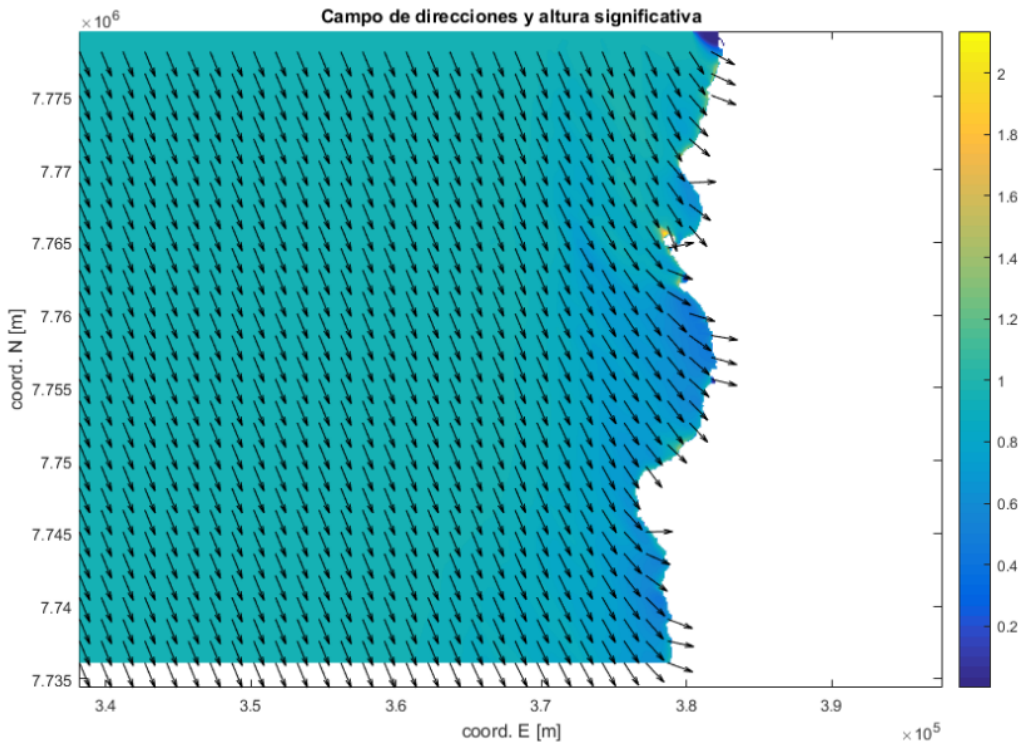
**Figura 9-7: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



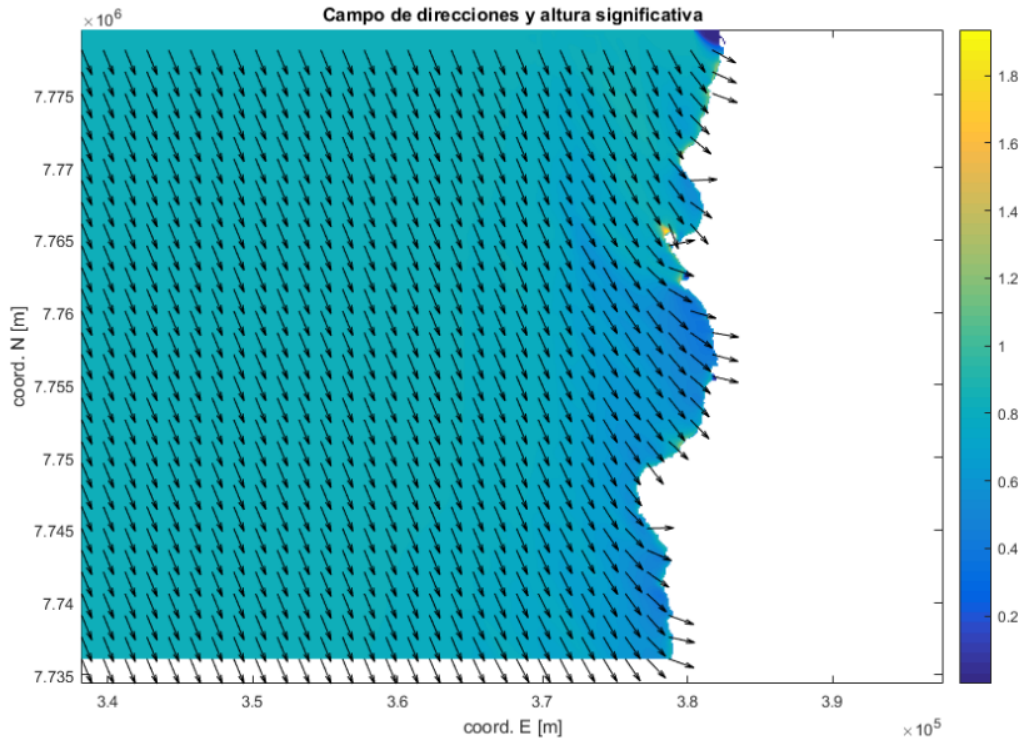
**Figura 9-8: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



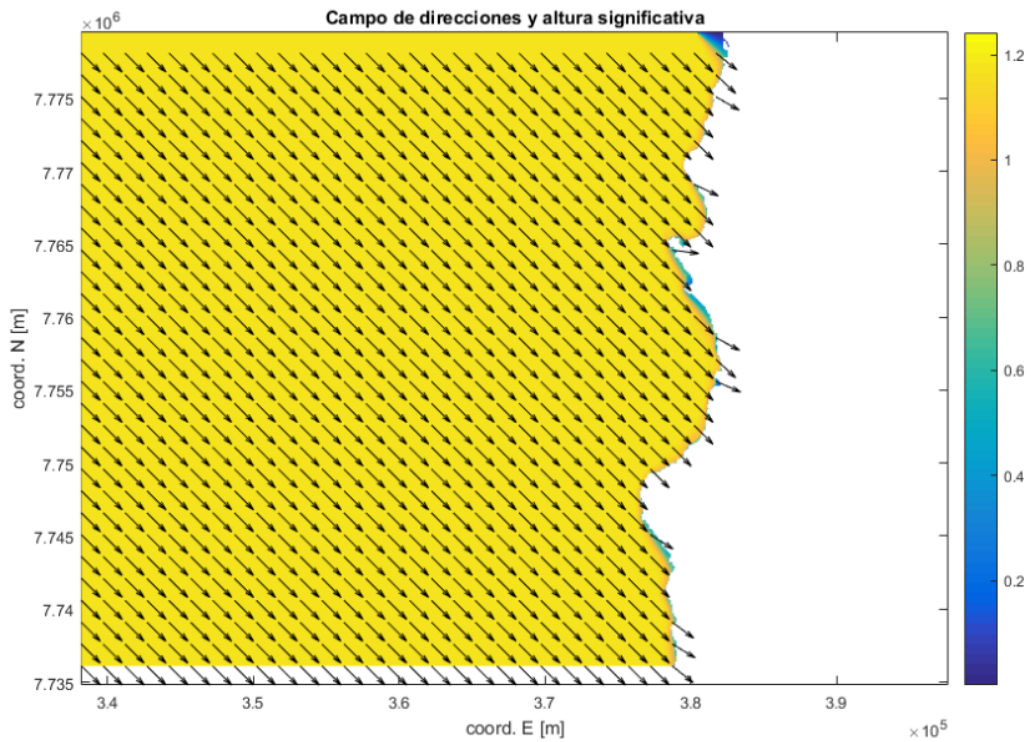
**Figura 9-9: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



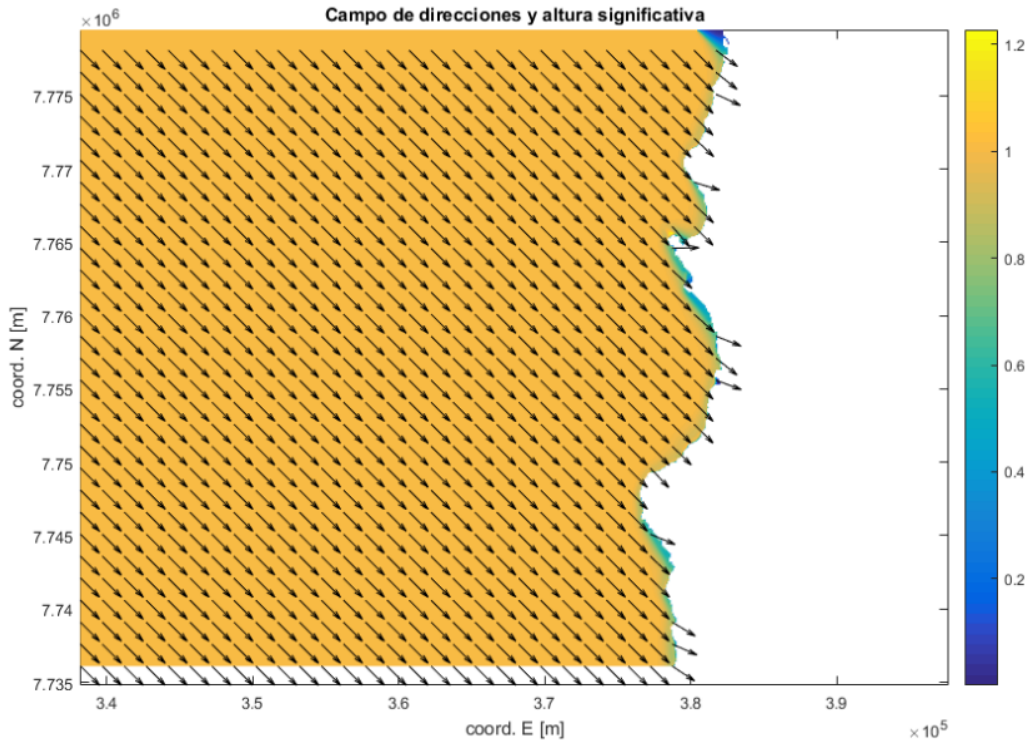
**Figura 9-10: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



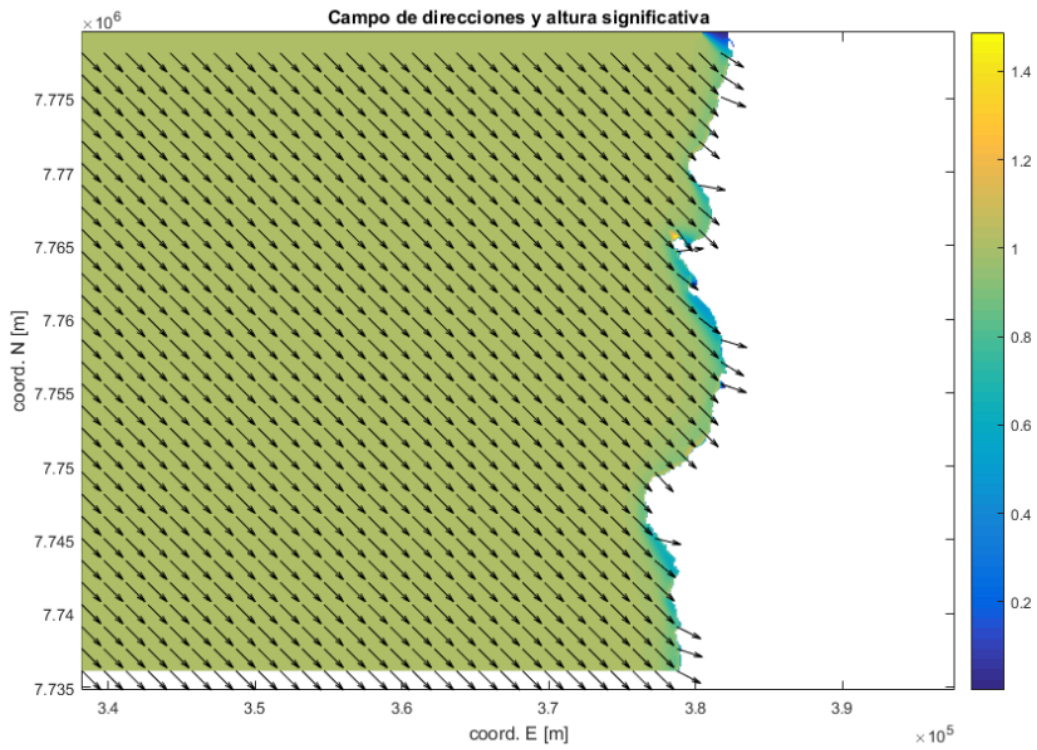
**Figura 9-11: Malla gruesa - Dir: NNW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



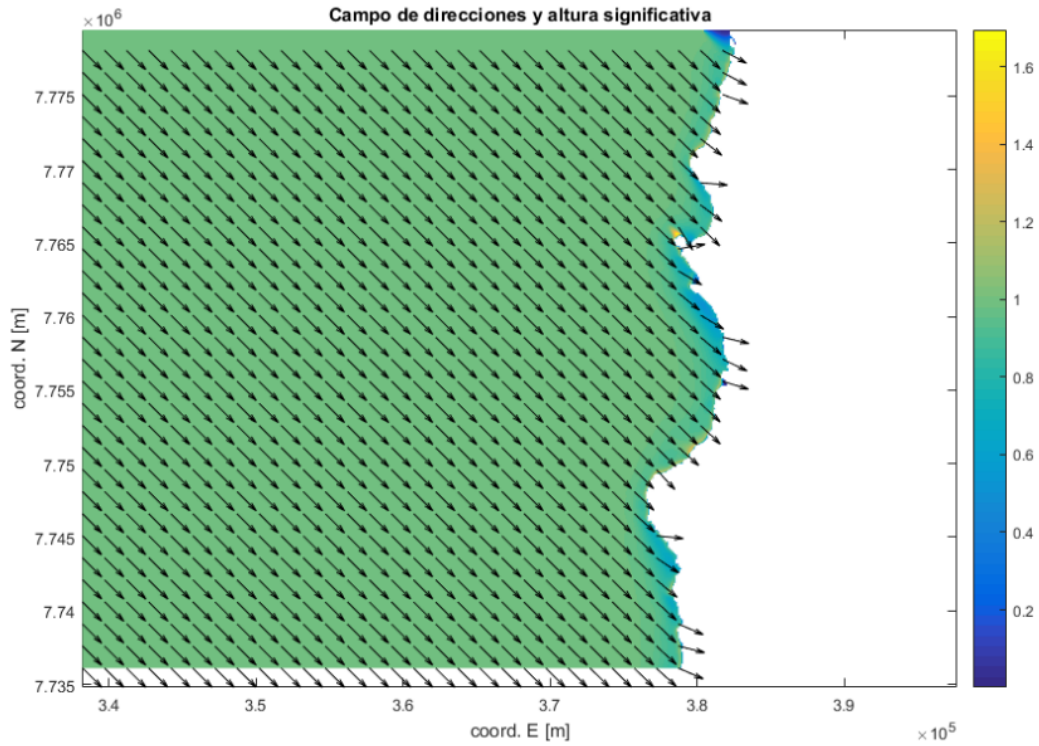
**Figura 9-12: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



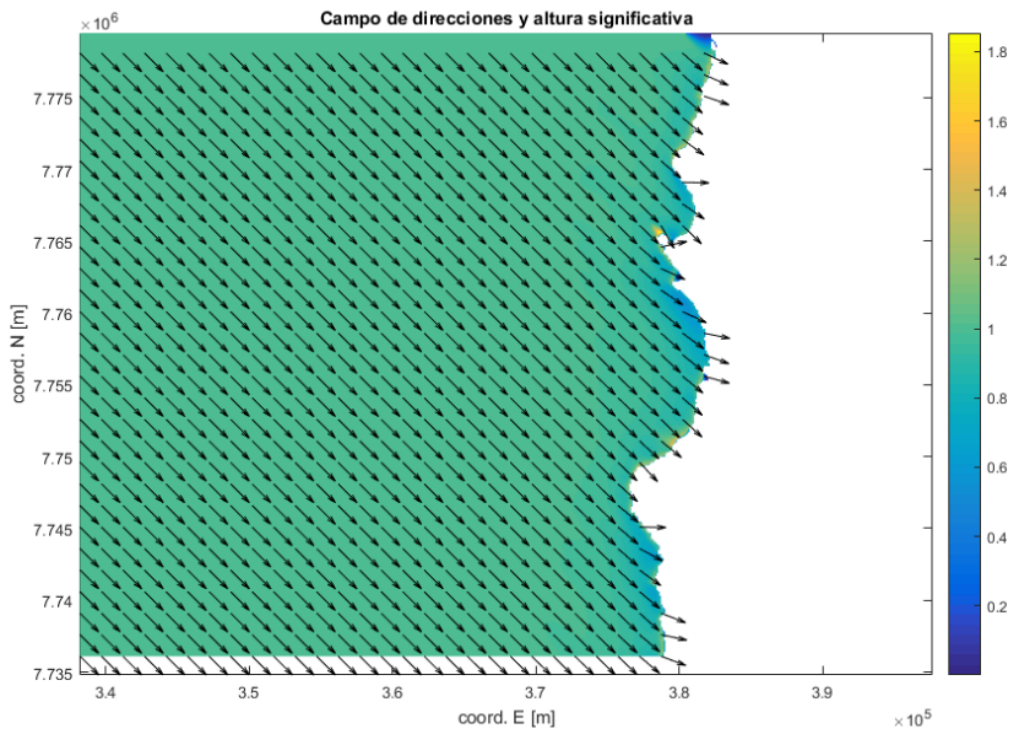
**Figura 9-13: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



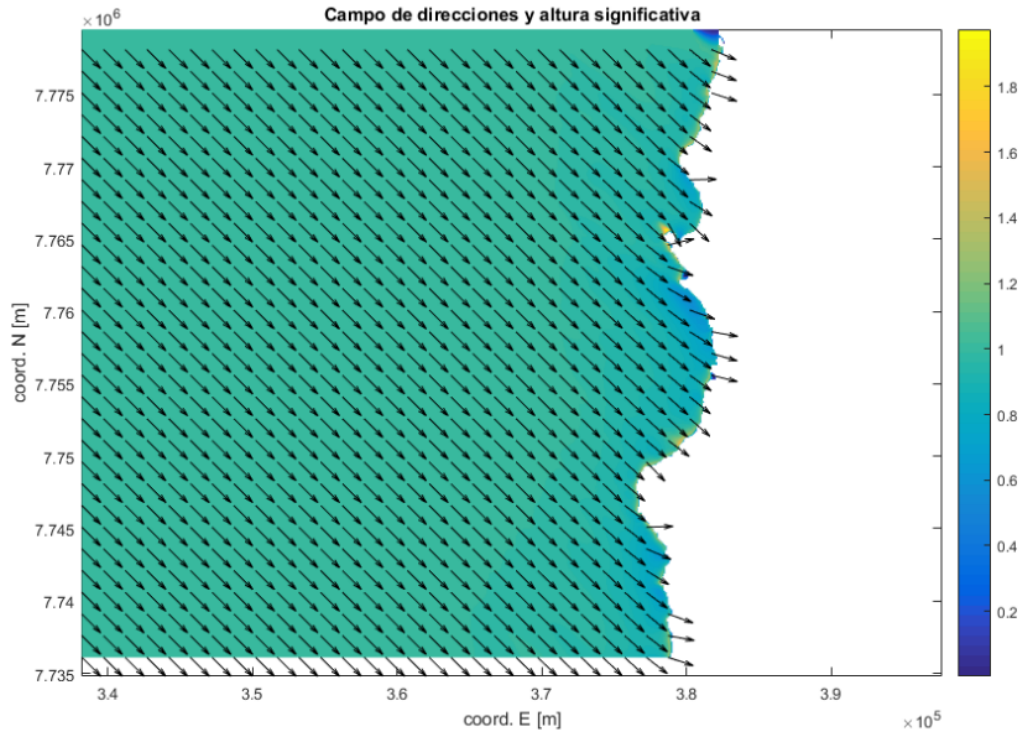
**Figura 9-14: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



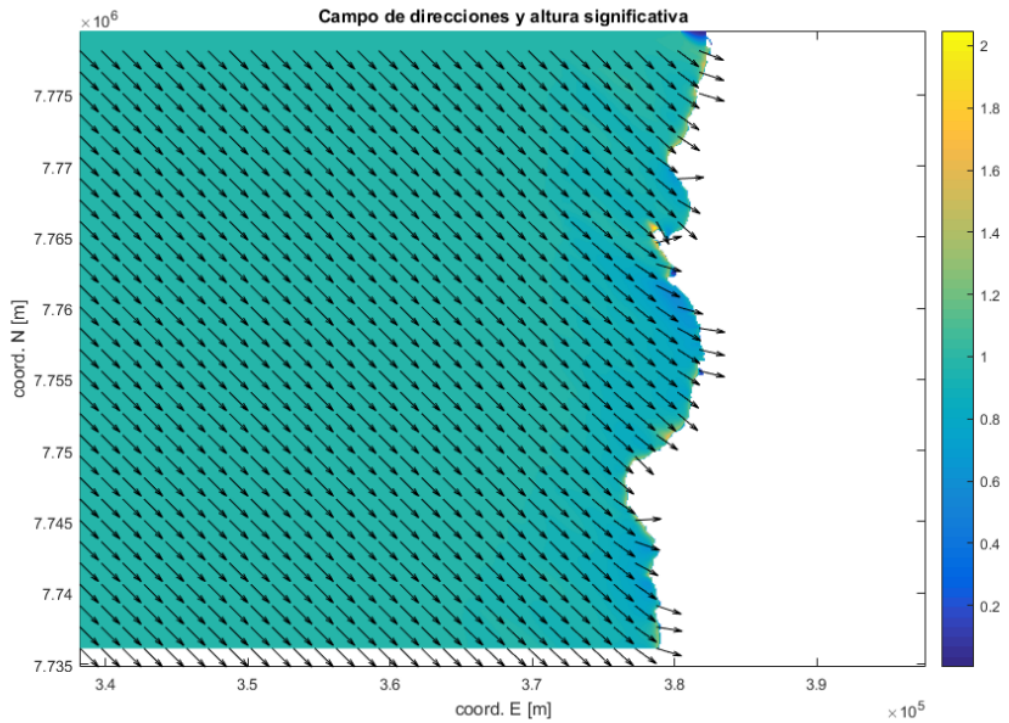
**Figura 9-15: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



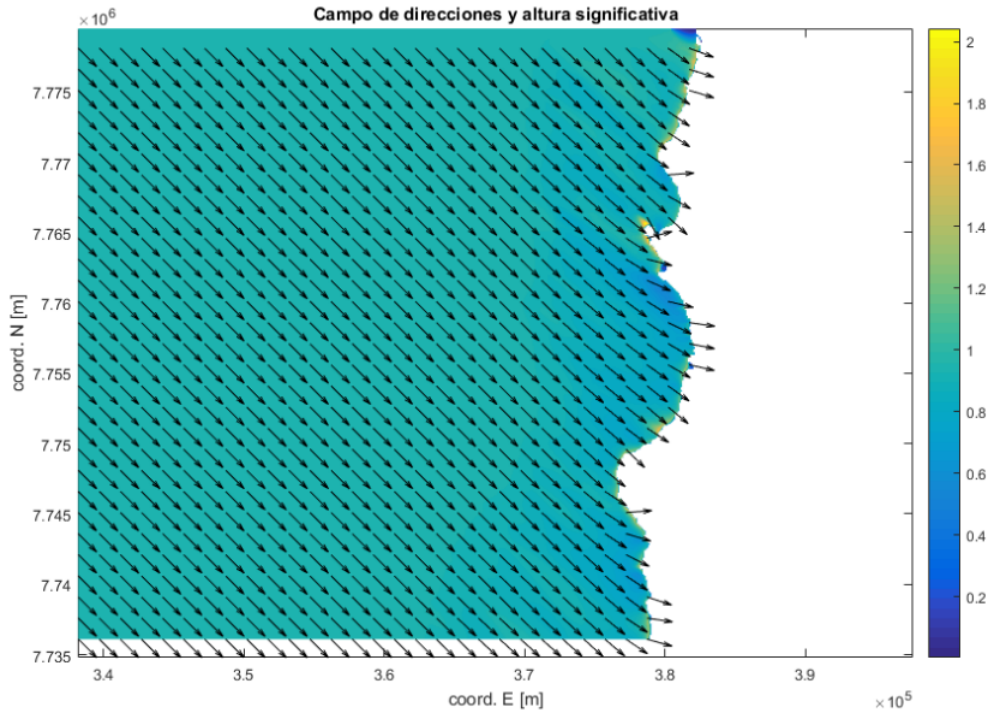
**Figura 9-16: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



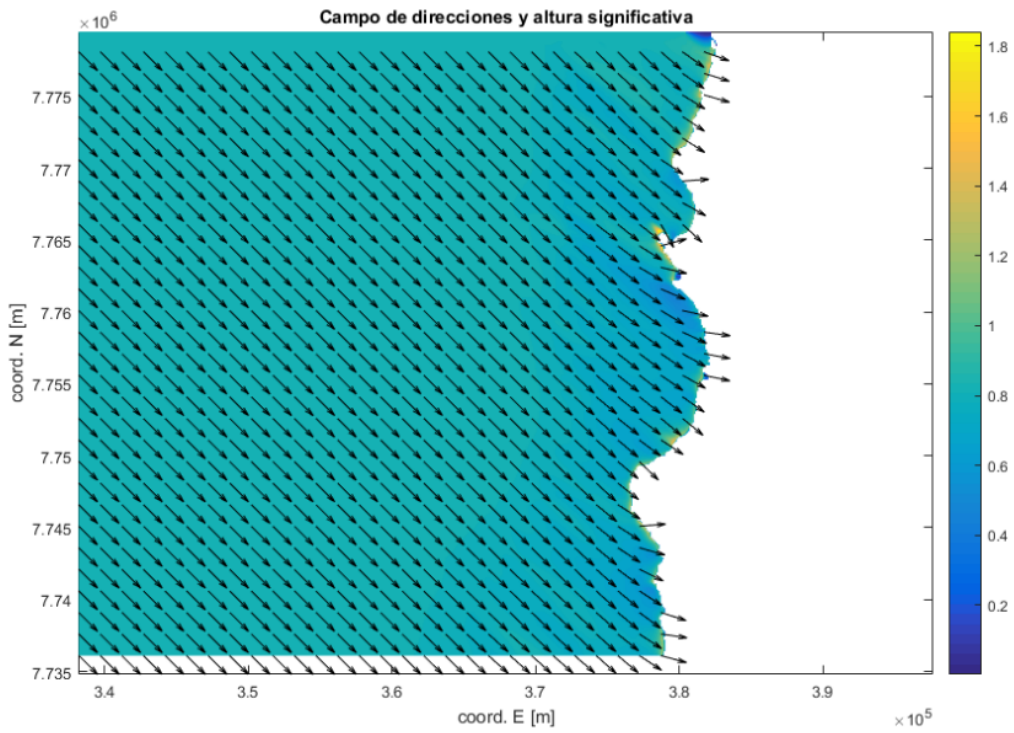
**Figura 9-17: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



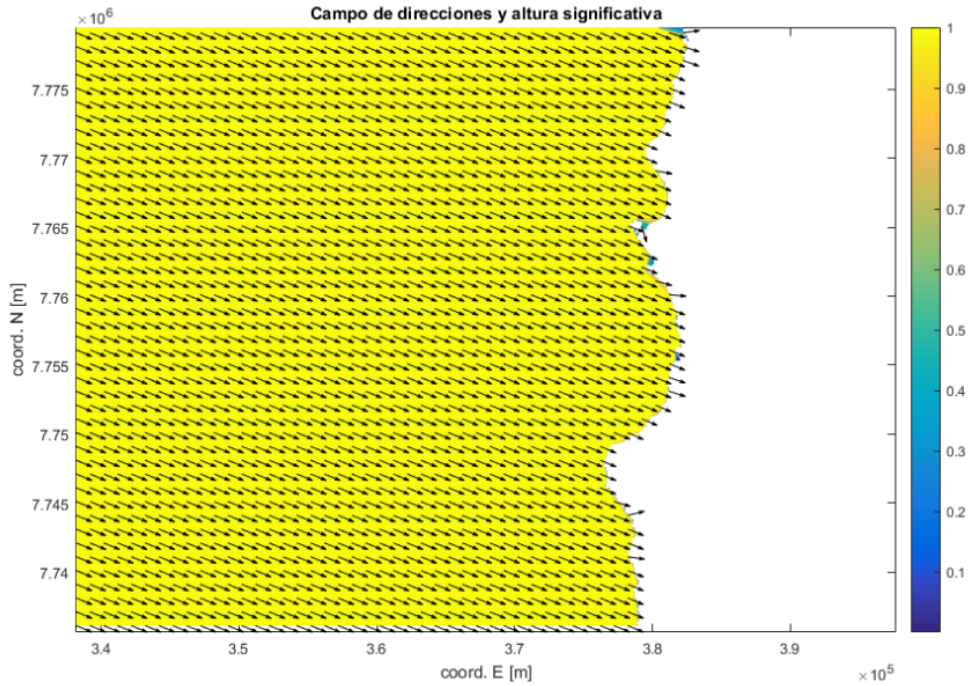
**Figura 9-18: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



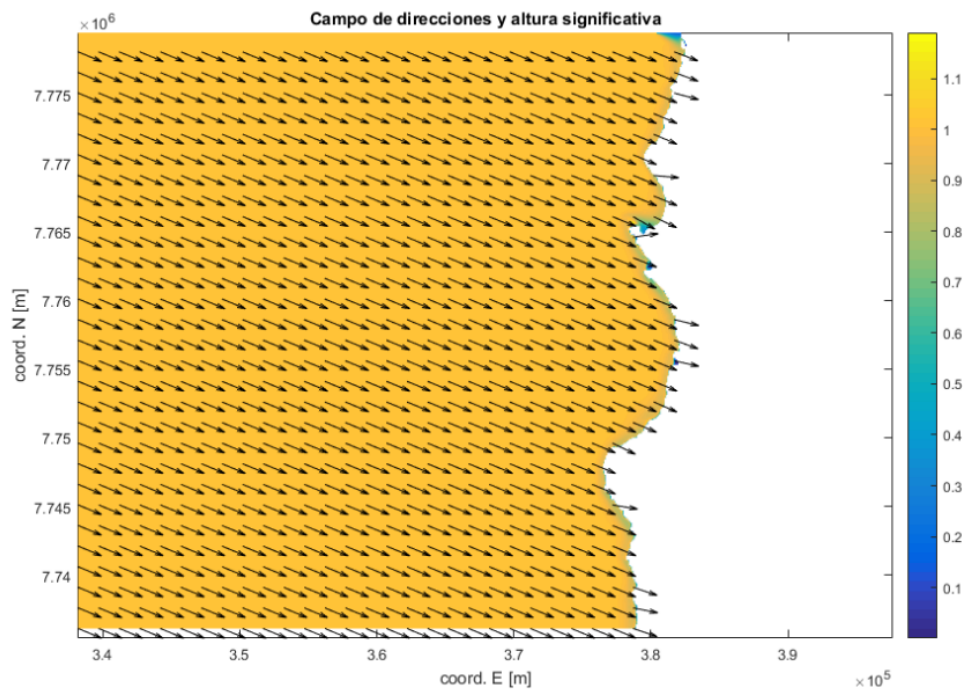
**Figura 9-19: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



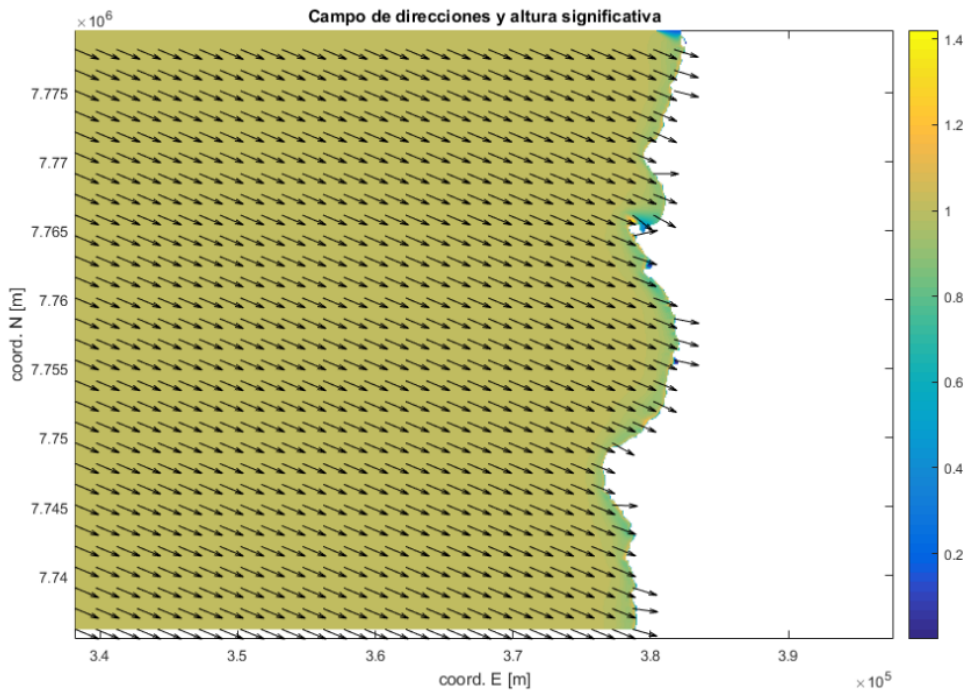
**Figura 9-20: Malla gruesa - Dir: NW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



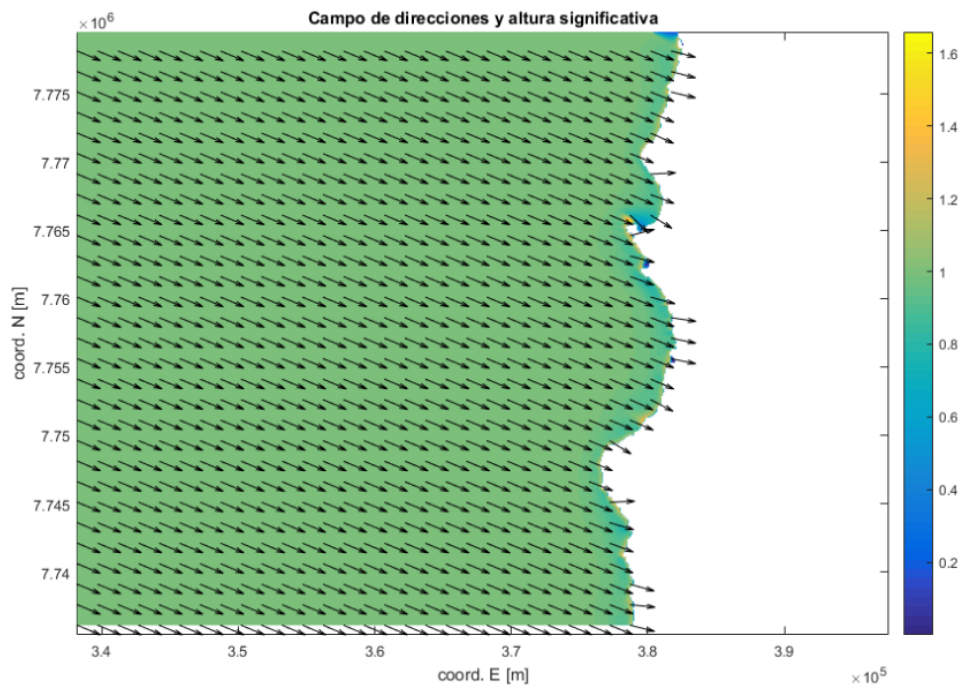
**Figura 9-21: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



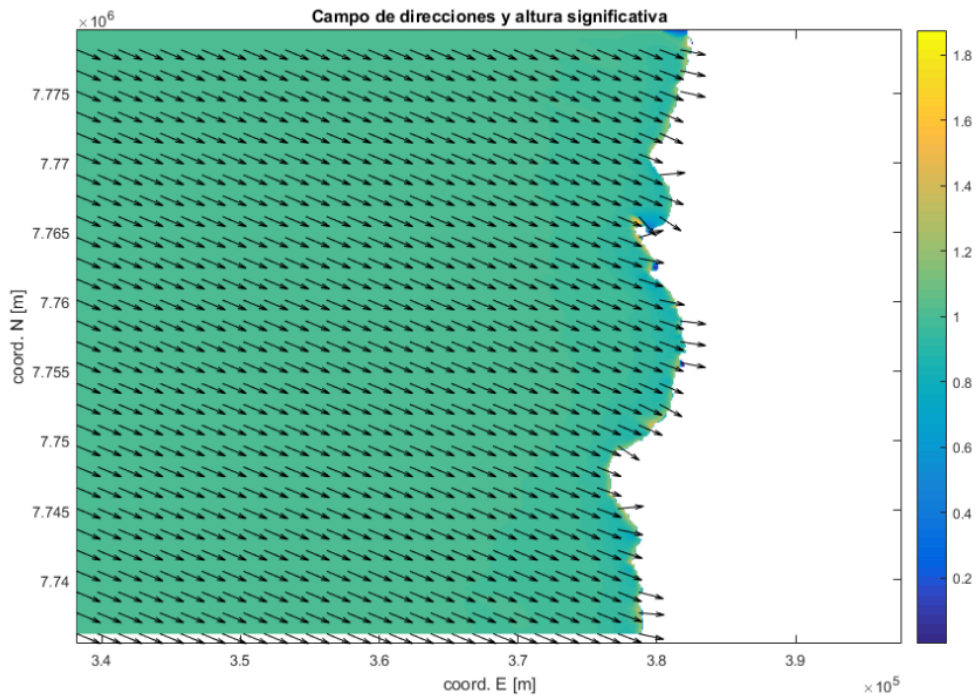
**Figura 9-22: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



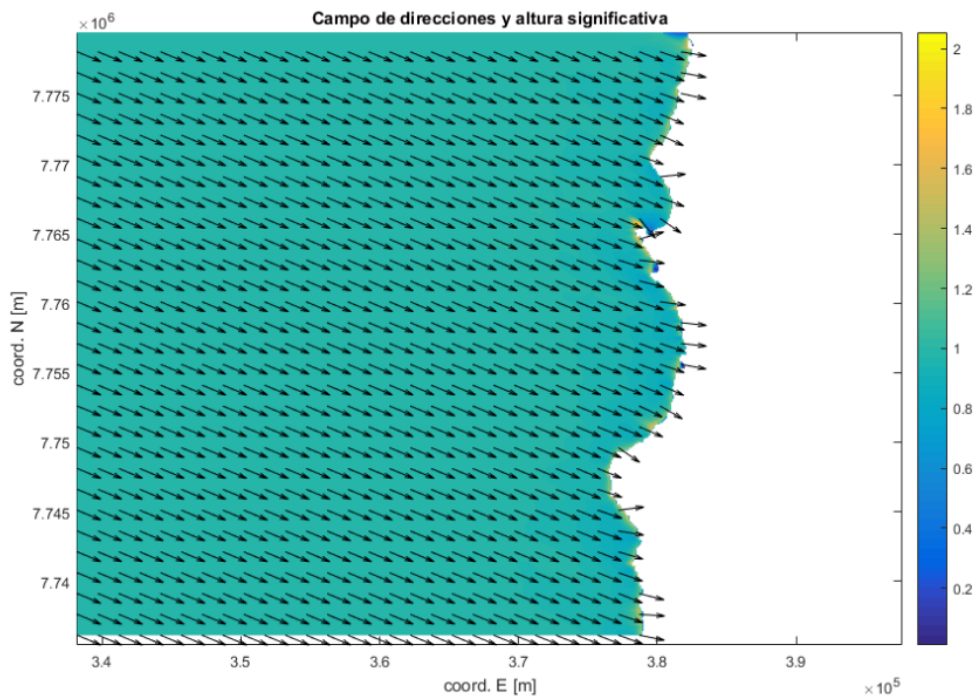
**Figura 9-23: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



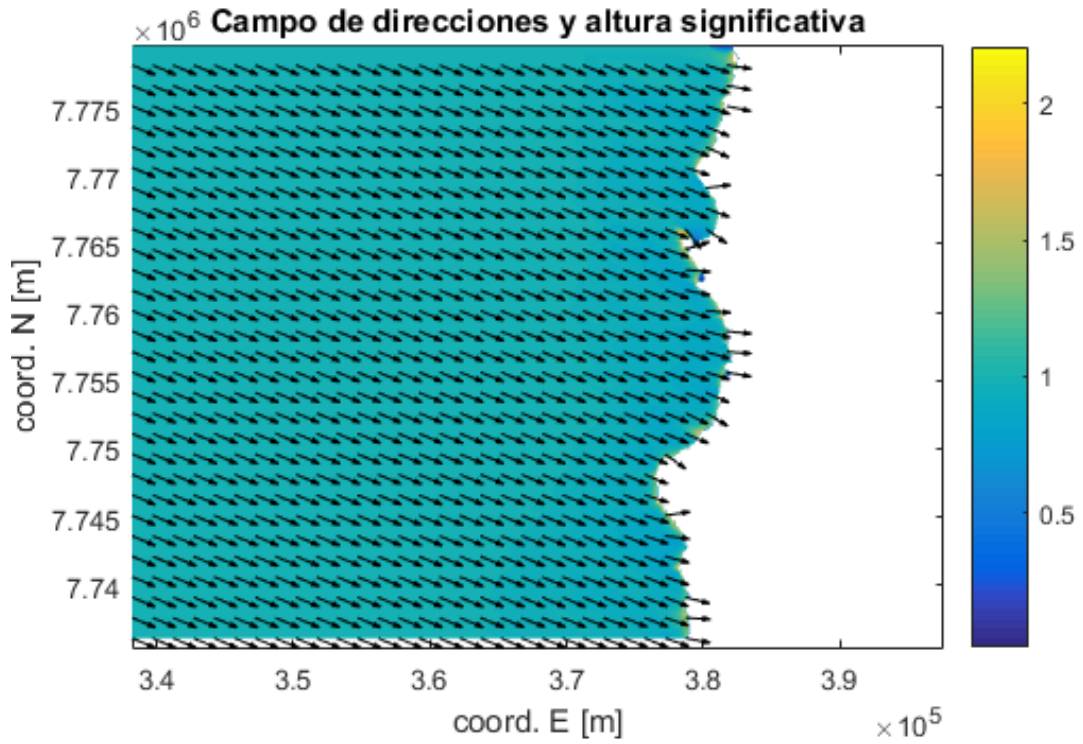
**Figura 9-24: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



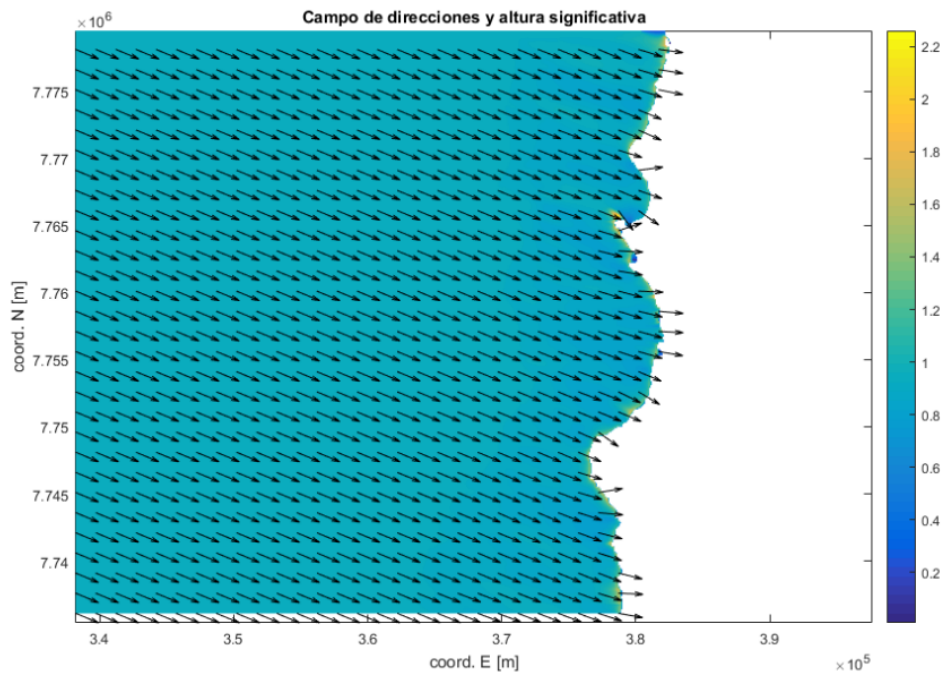
**Figura 9-25: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



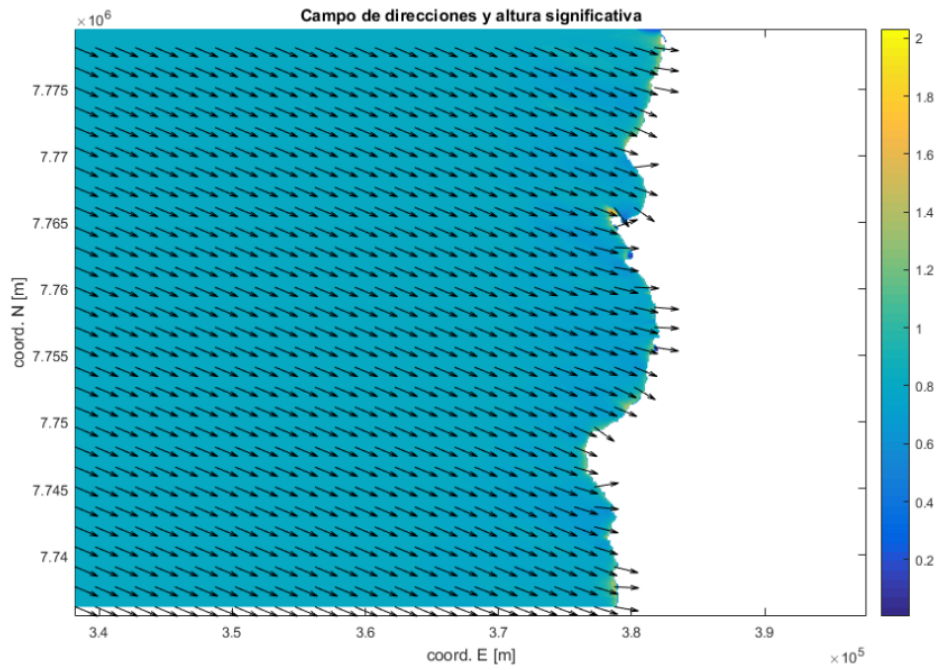
**Figura 9-26: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



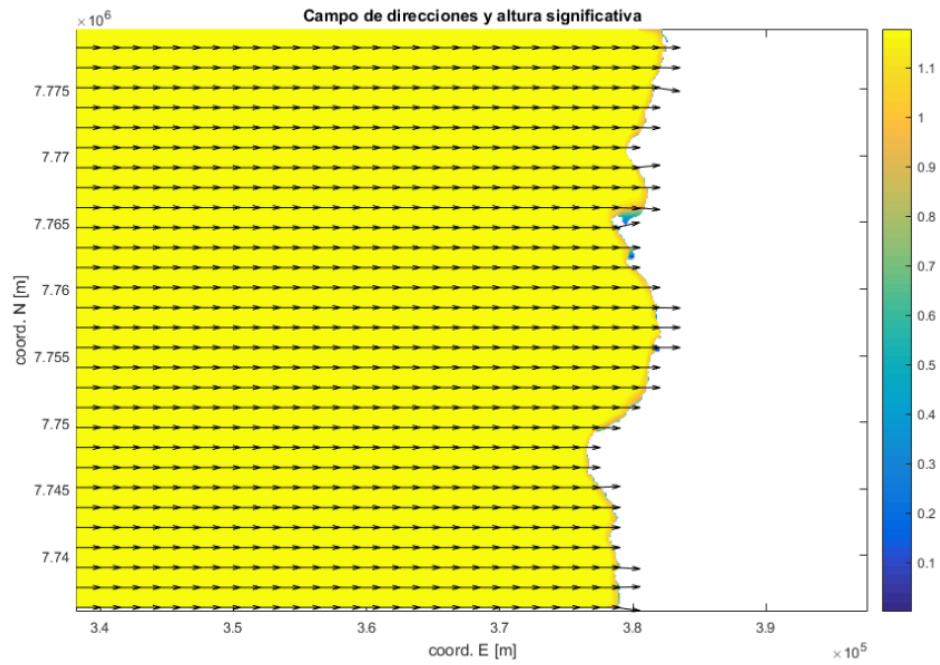
**Figura 9-27: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



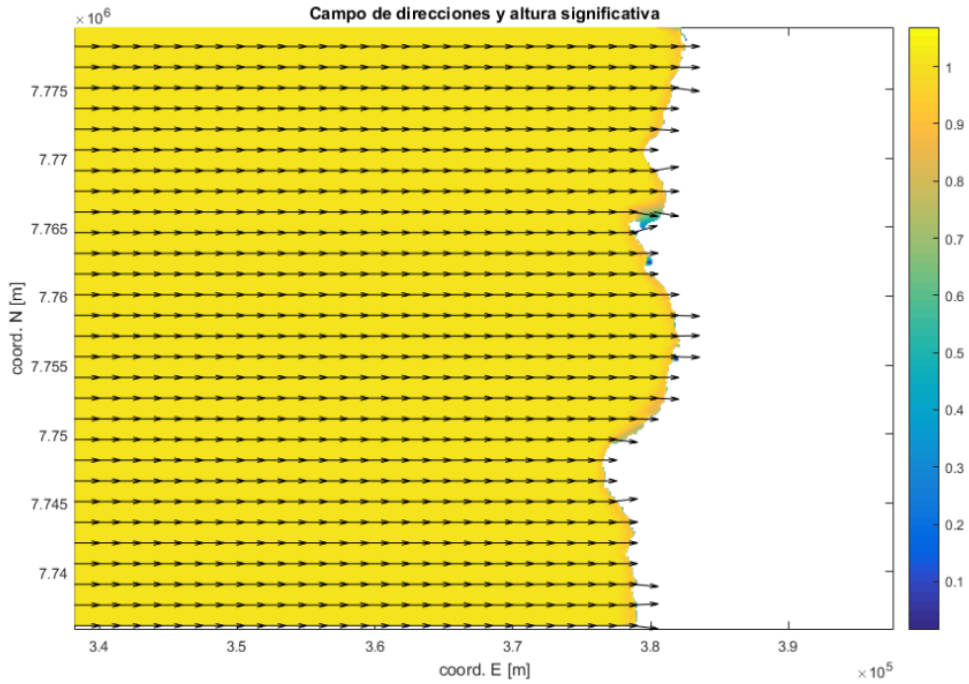
**Figura 9-28: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



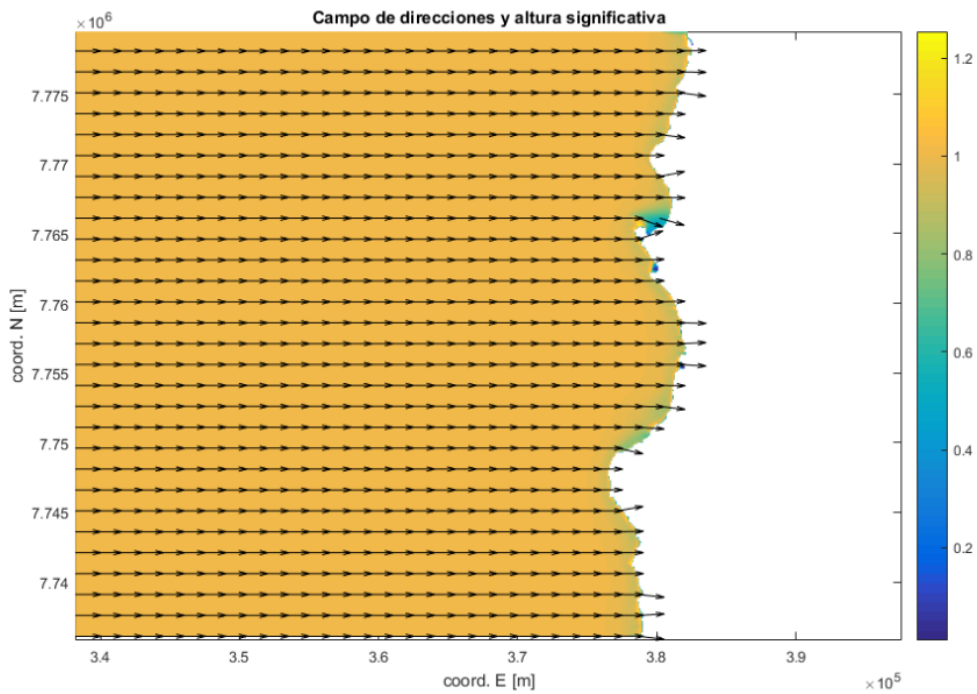
**Figura 9-29: Malla gruesa - Dir: WNW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



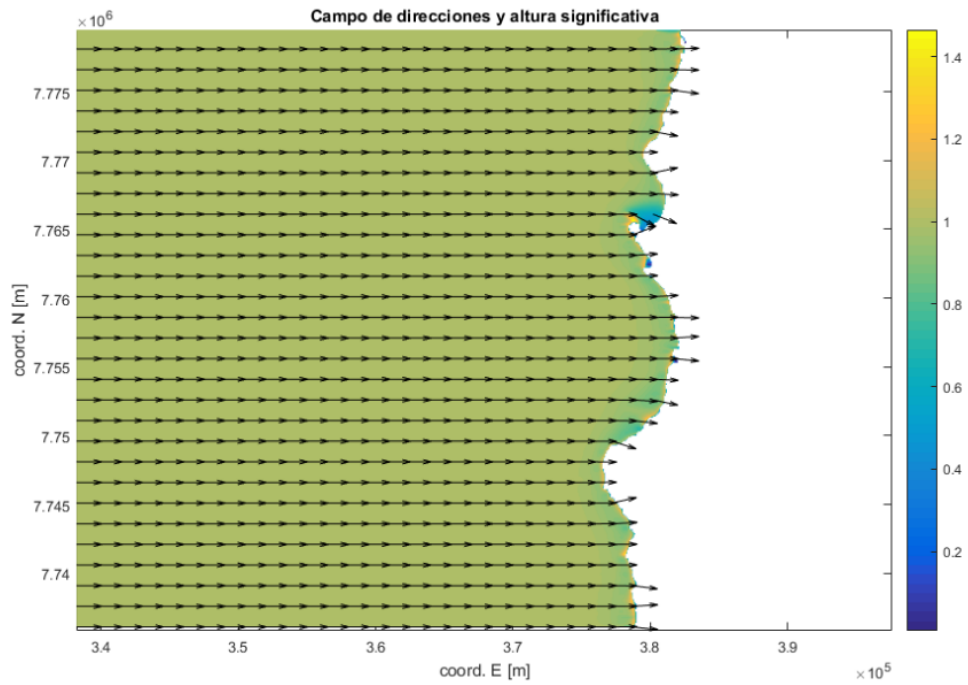
**Figura 9-30: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



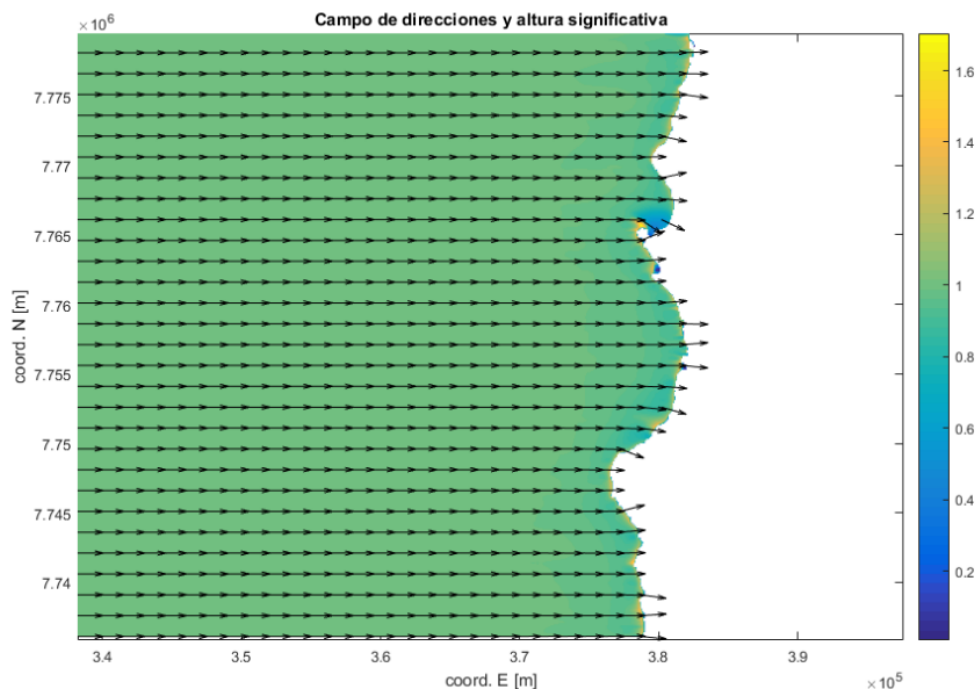
**Figura 9-31: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



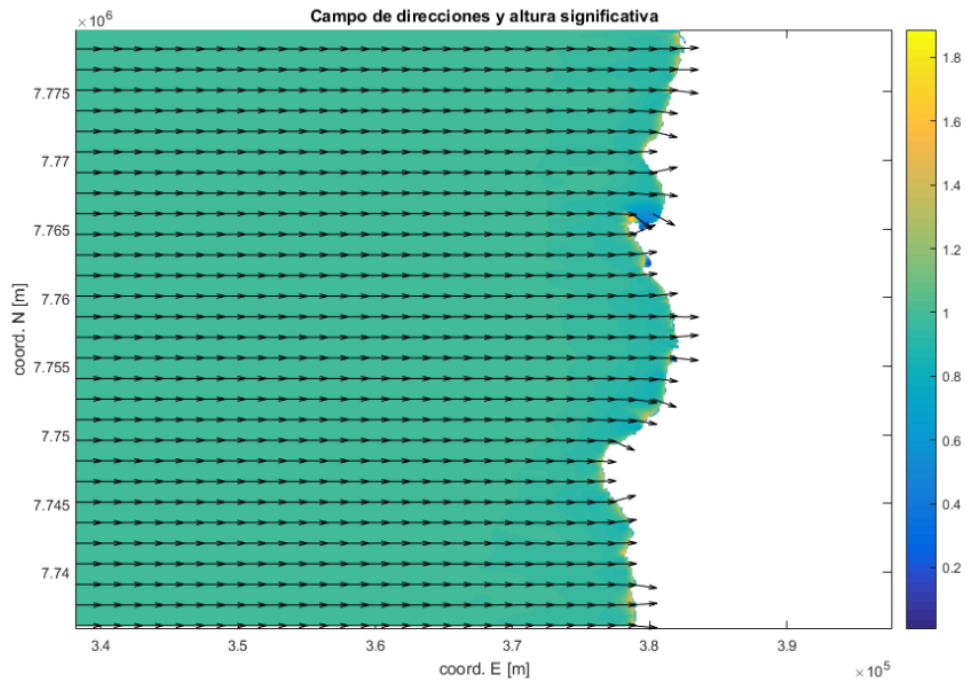
**Figura 9-32: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



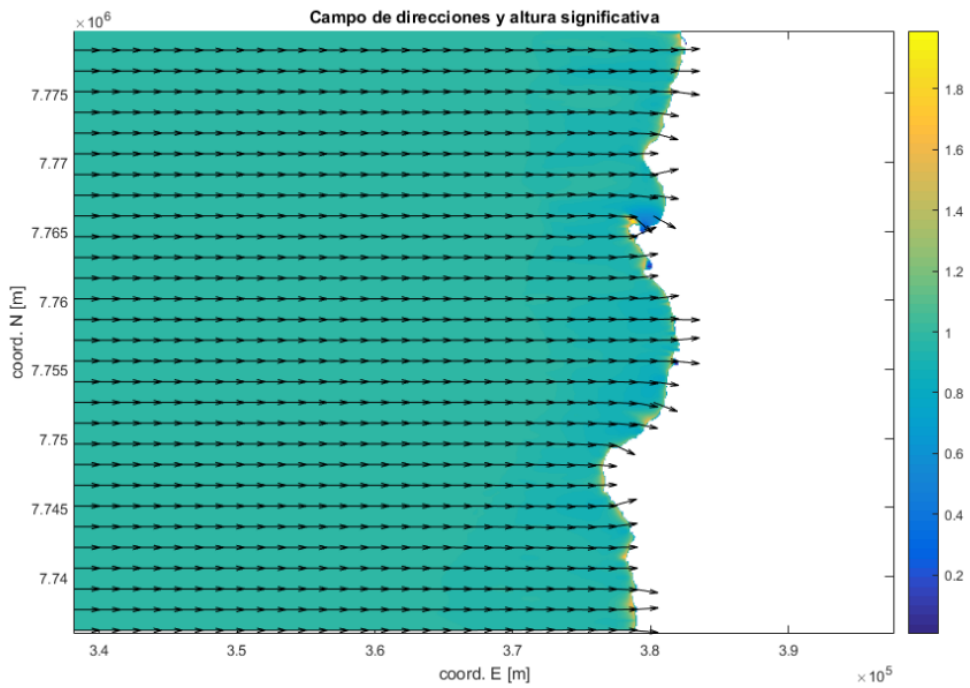
**Figura 9-33: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



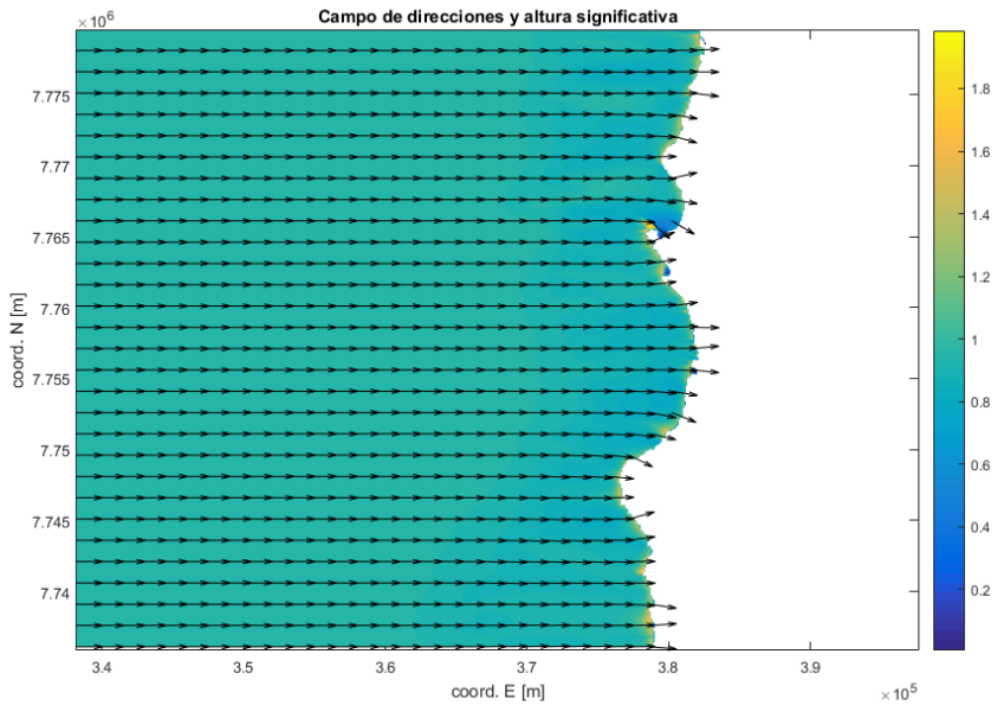
**Figura 9-34: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



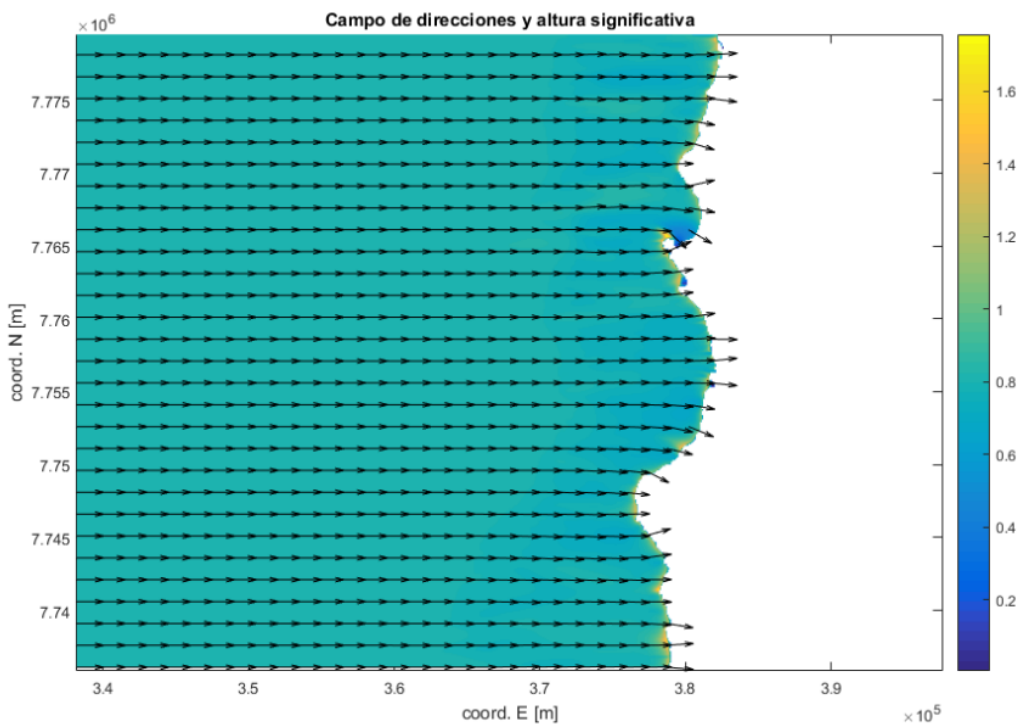
**Figura 9-35: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



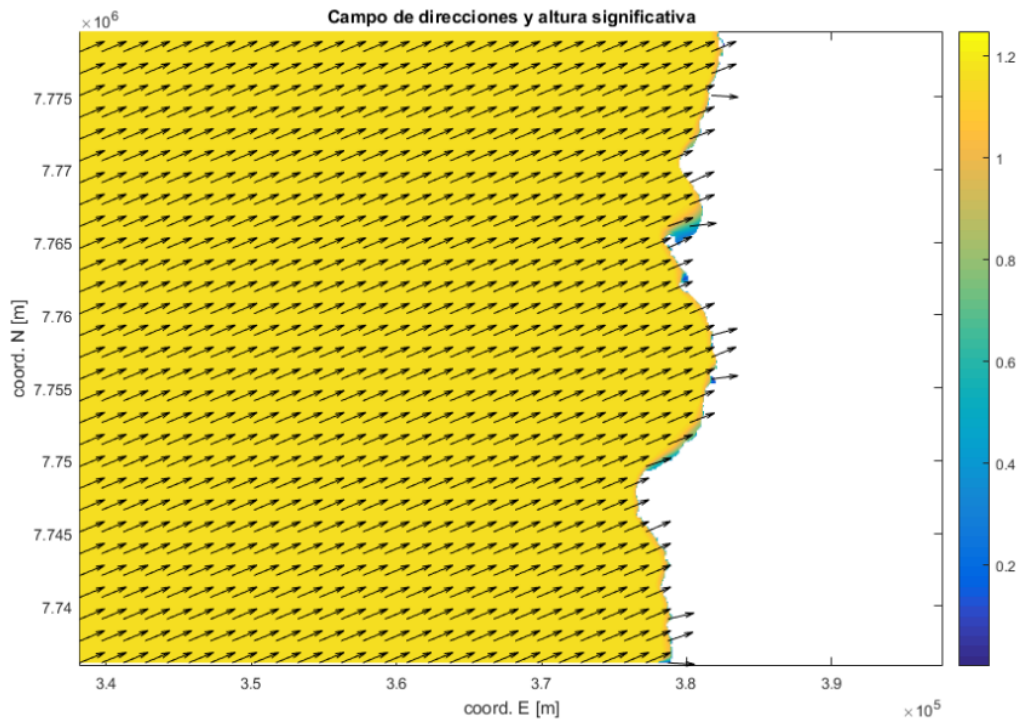
**Figura 9-36: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



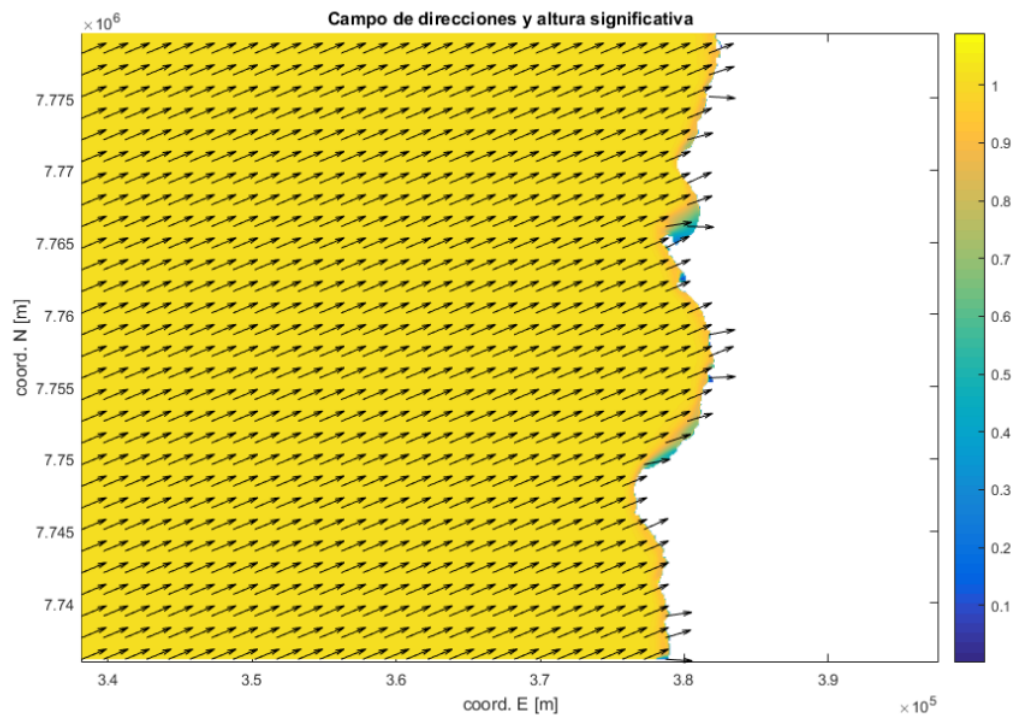
**Figura 9-37: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



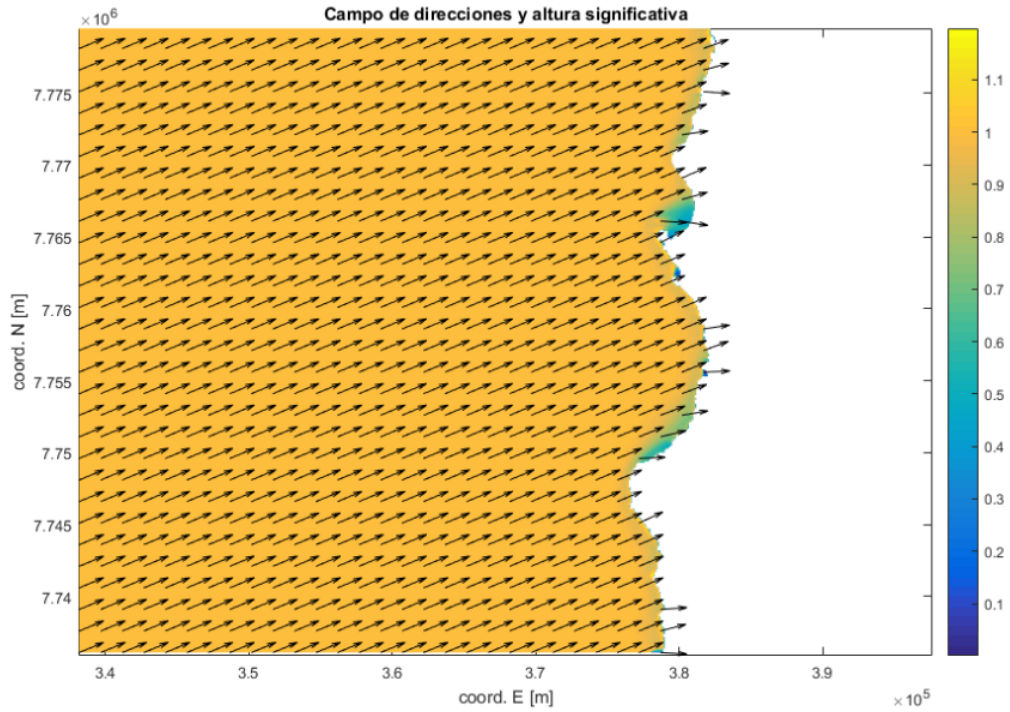
**Figura 9-38: Malla gruesa - Dir: W, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



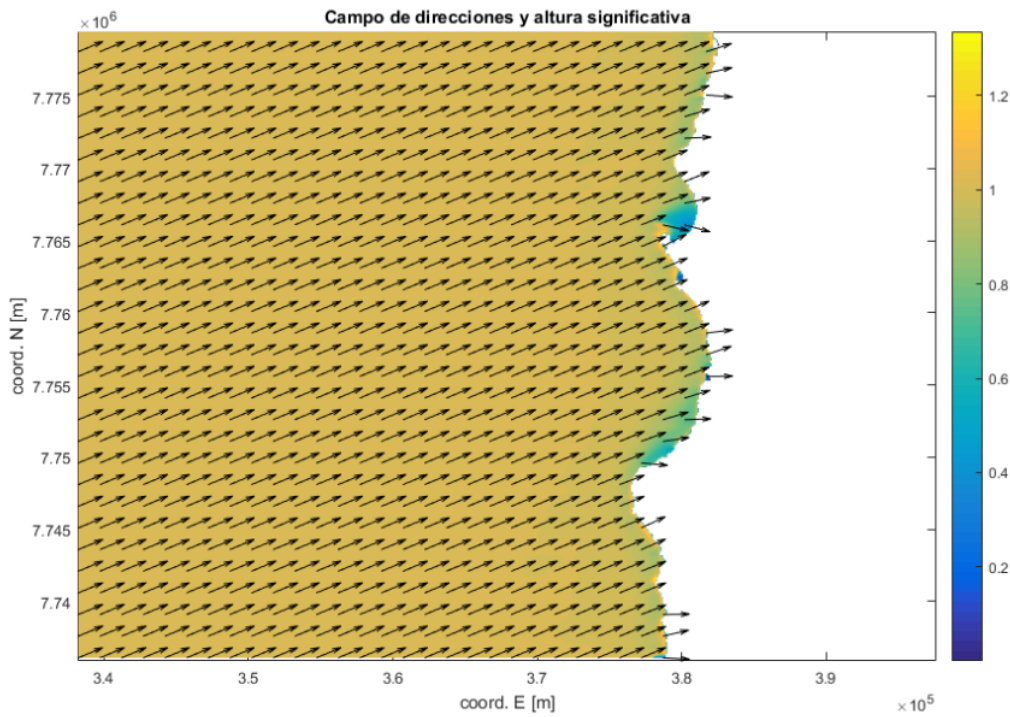
**Figura 9-39: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



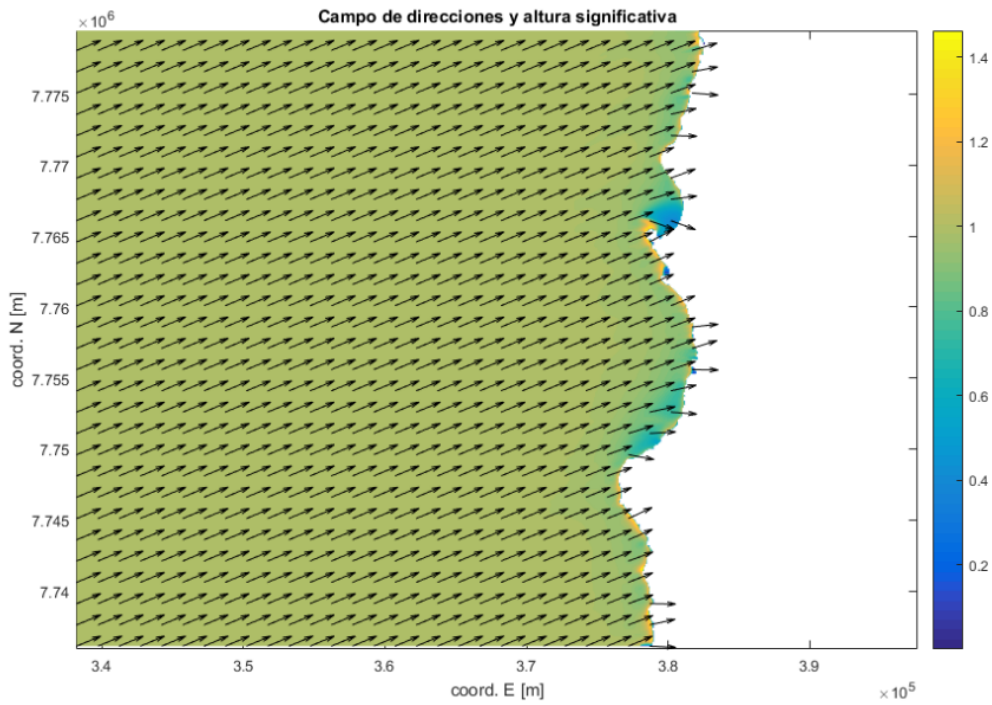
**Figura 9-40: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



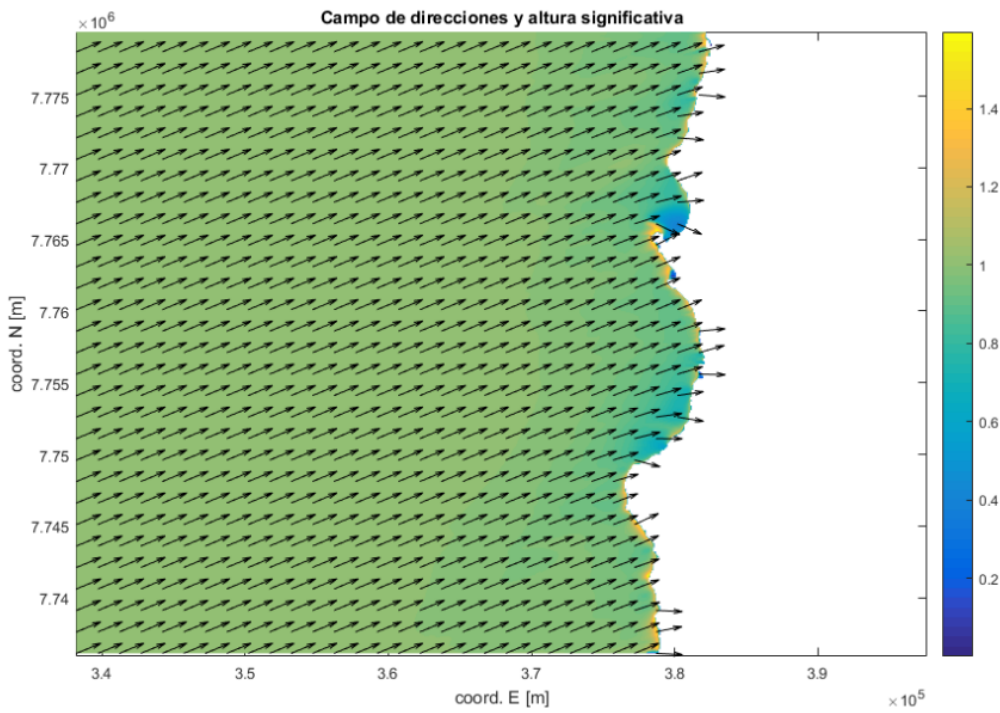
**Figura 9-41: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



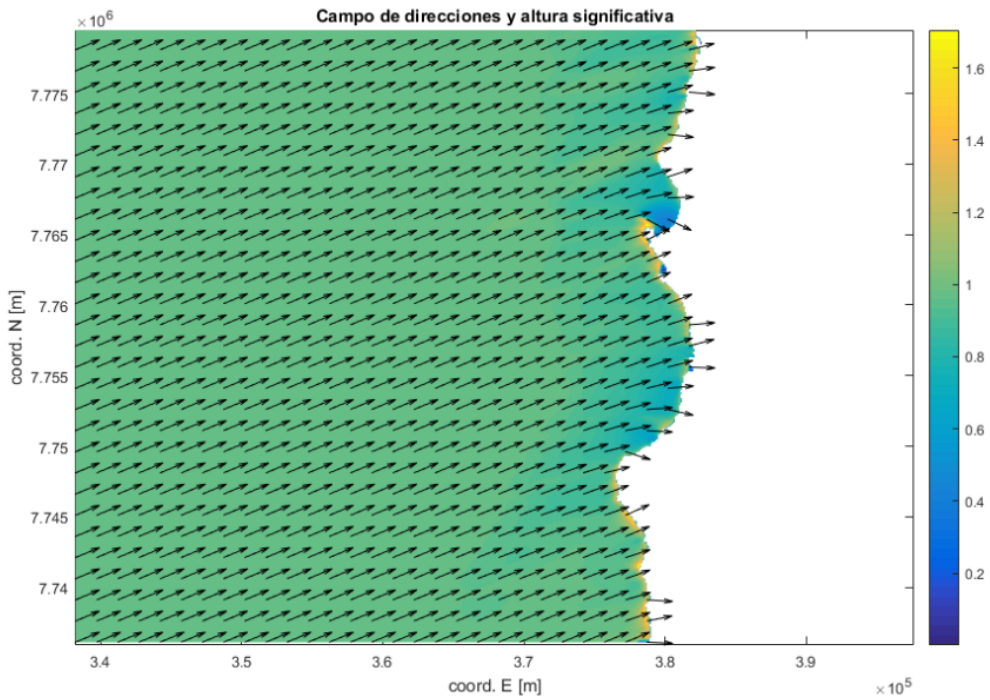
**Figura 9-42: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



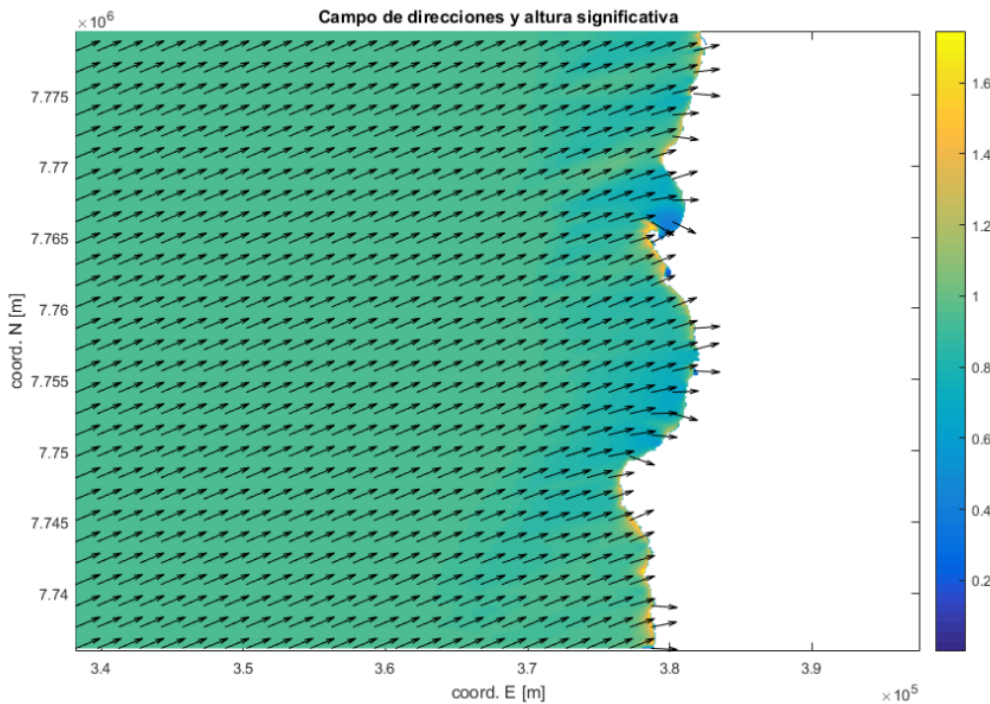
**Figura 9-43: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



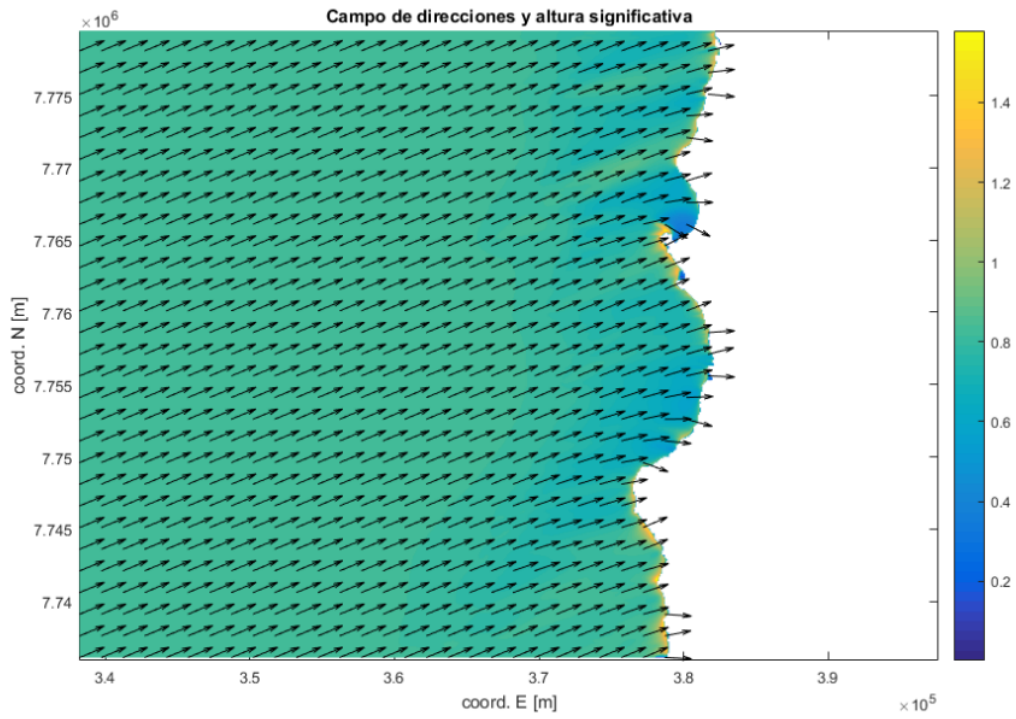
**Figura 9-44: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



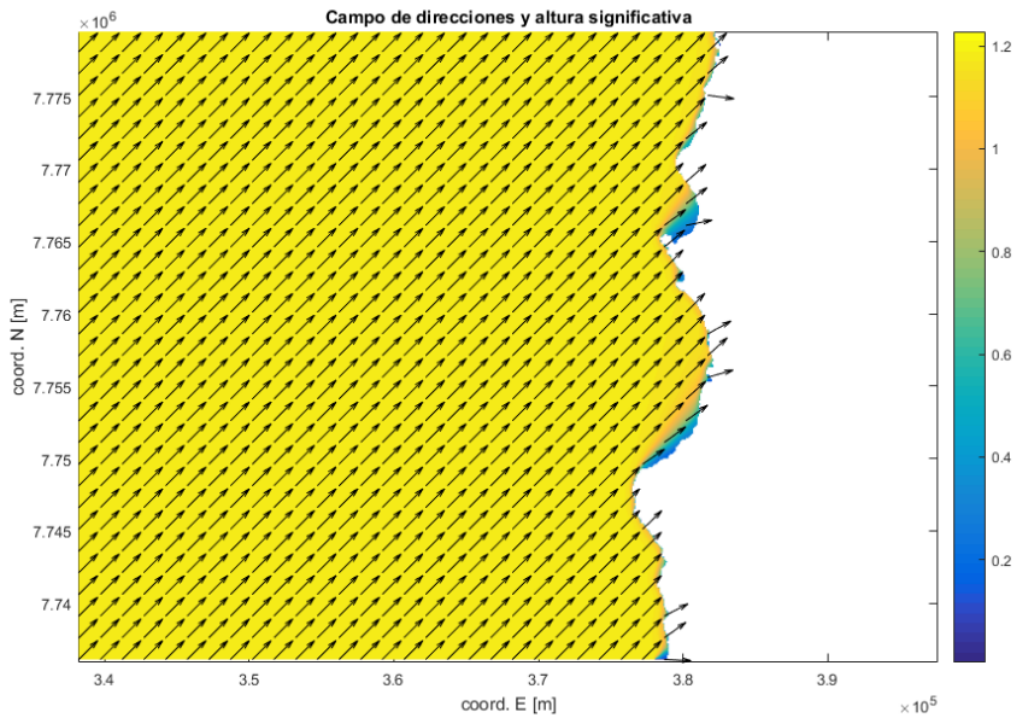
**Figura 9-45: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



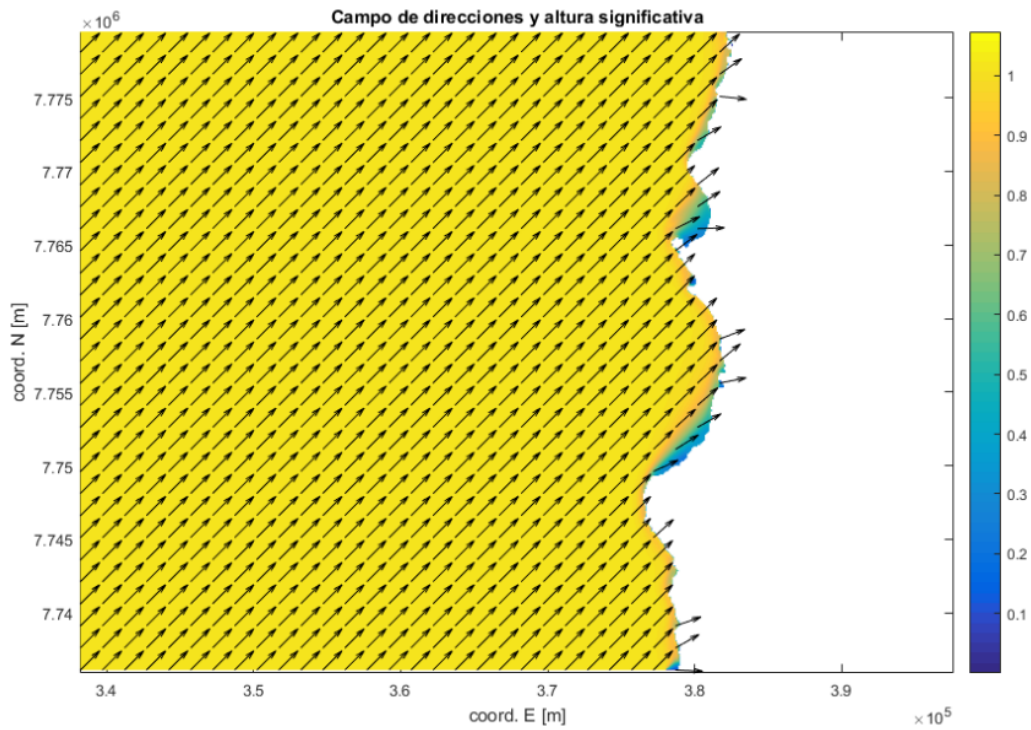
**Figura 9-46: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



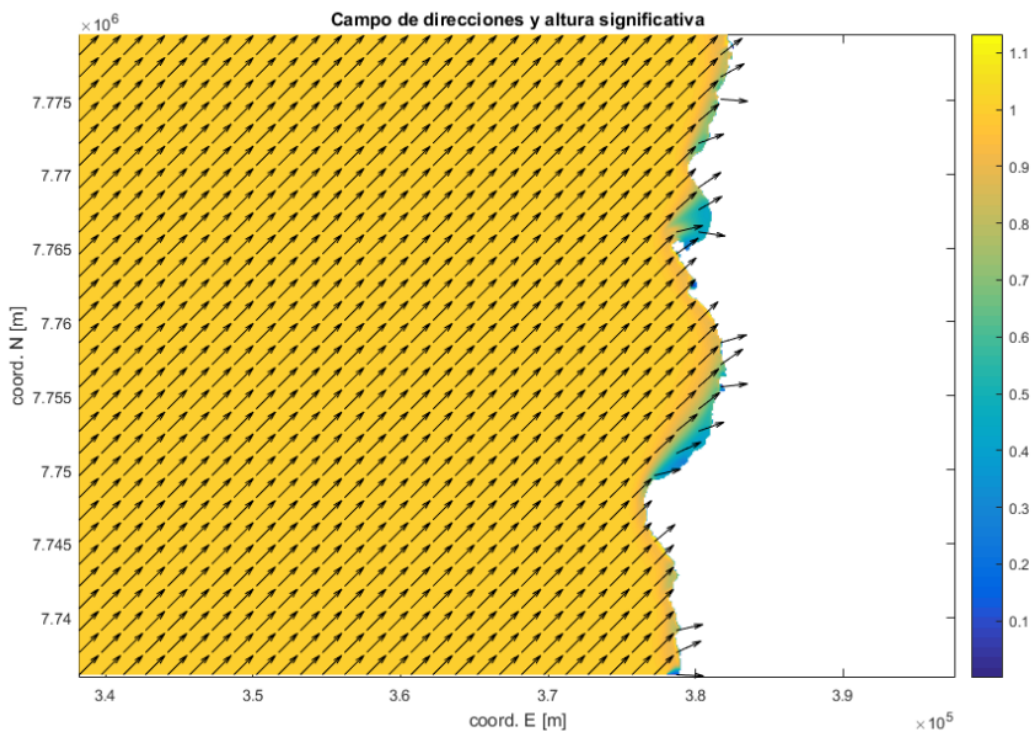
**Figura 9-47: Malla gruesa - Dir: WSW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



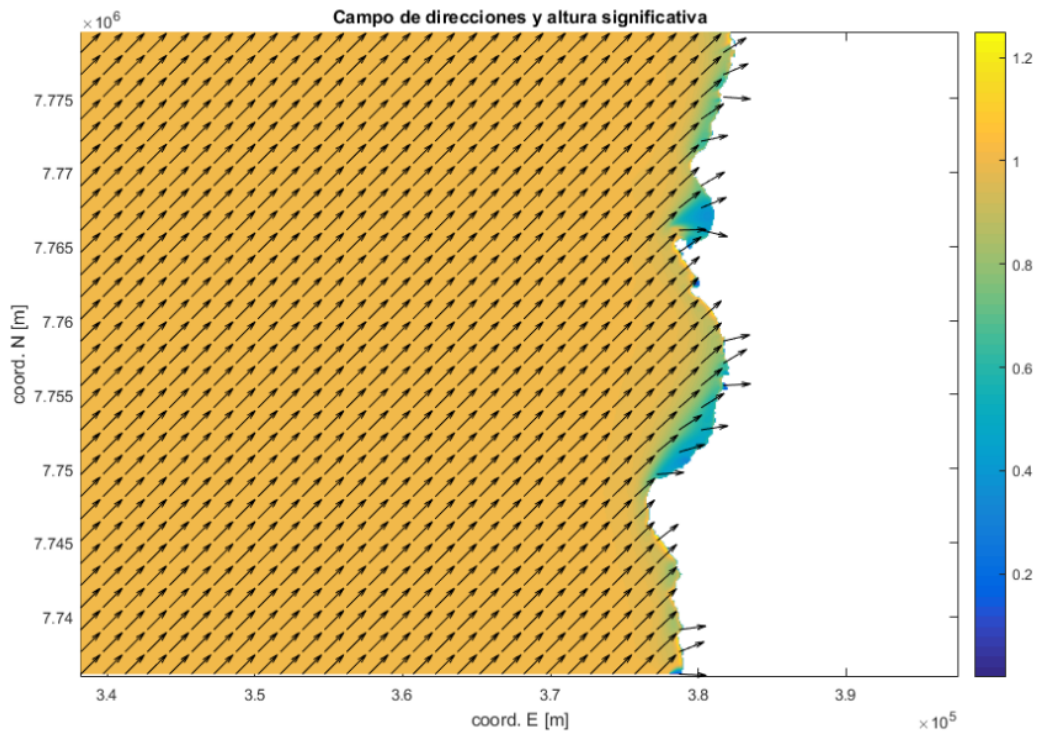
**Figura 9-48: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



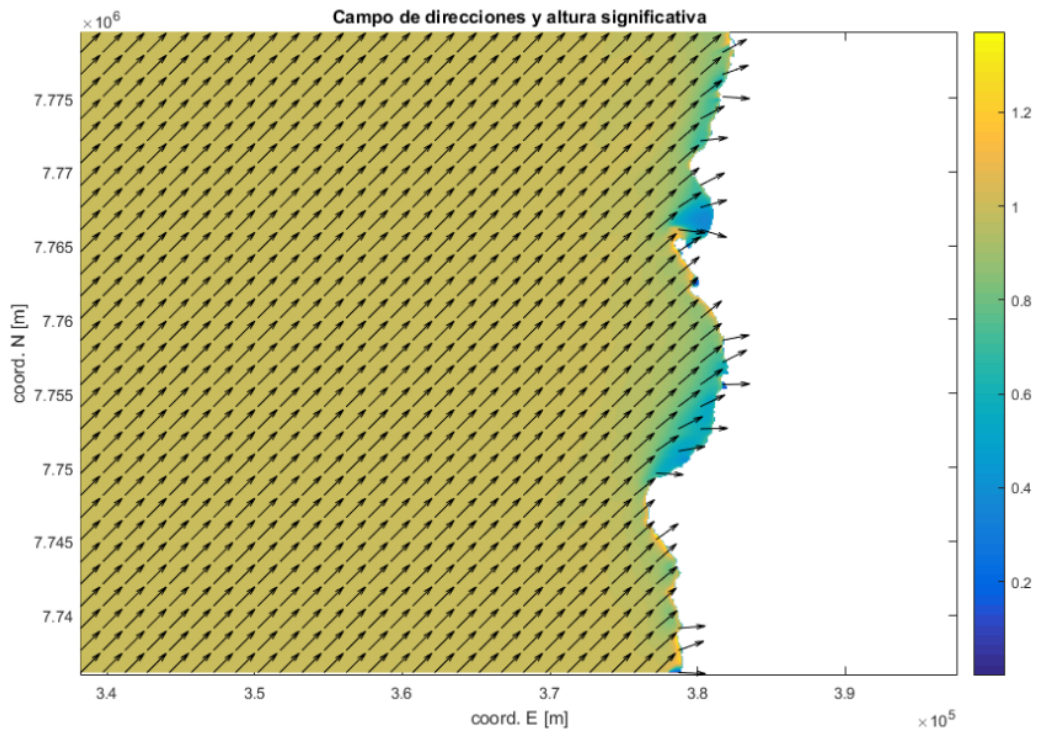
**Figura 9-49: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



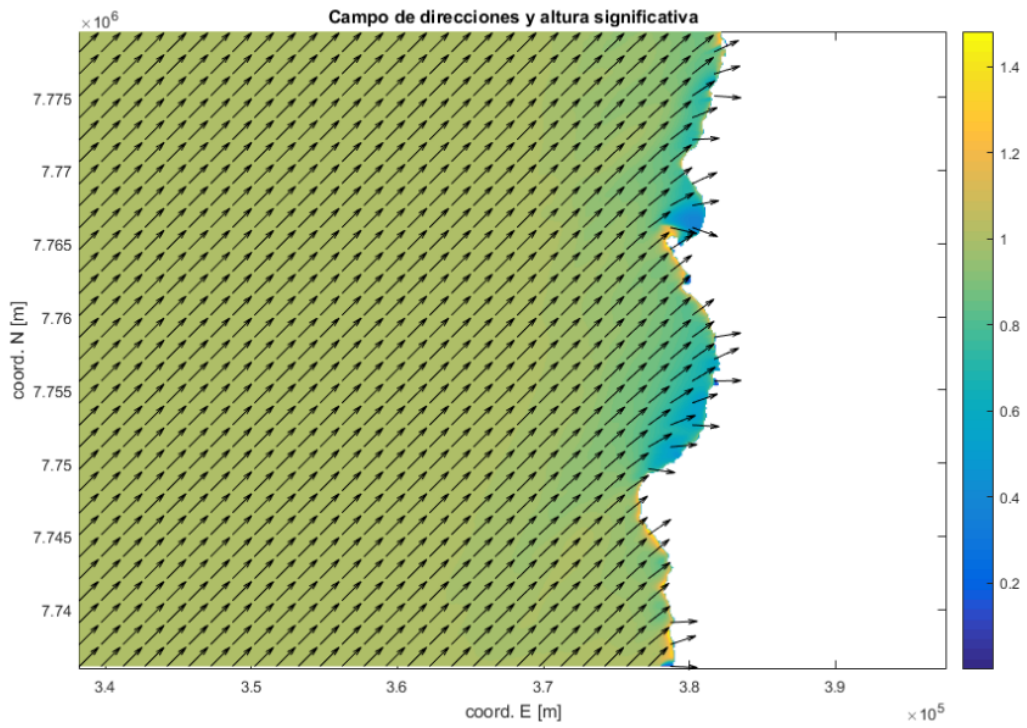
**Figura 9-50: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



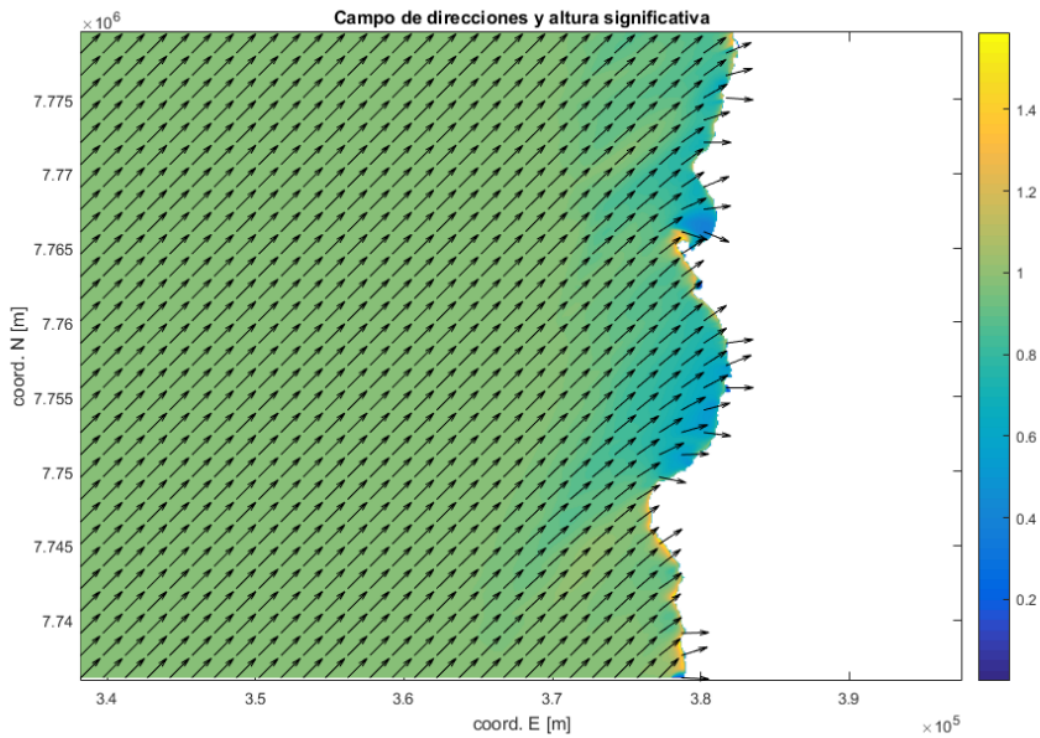
**Figura 9-51: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



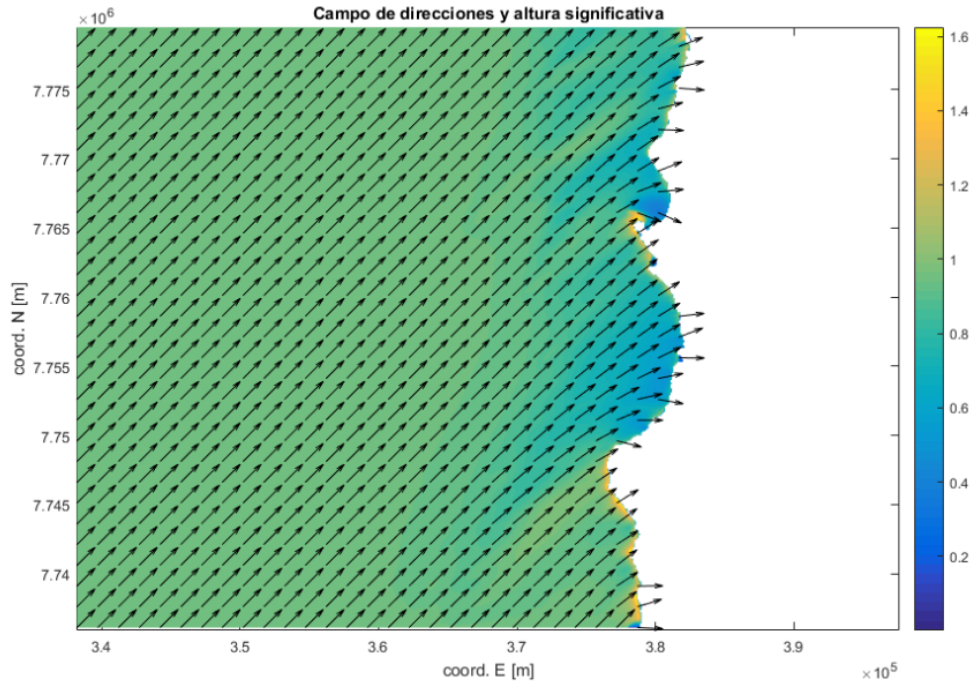
**Figura 9-52: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 12 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



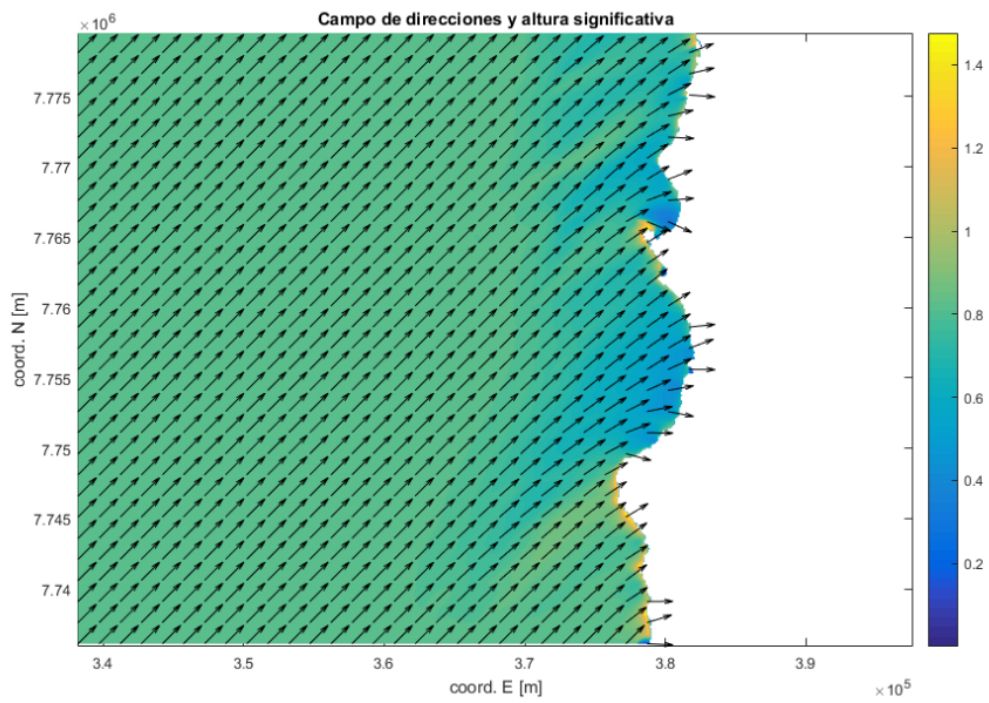
**Figura 9-53: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



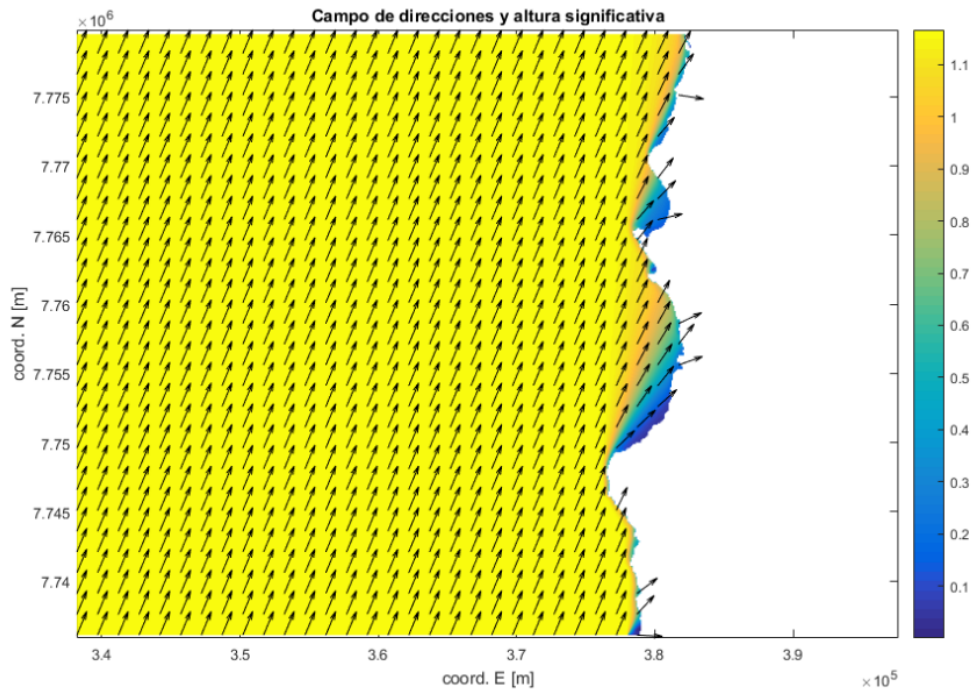
**Figura 9-54: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



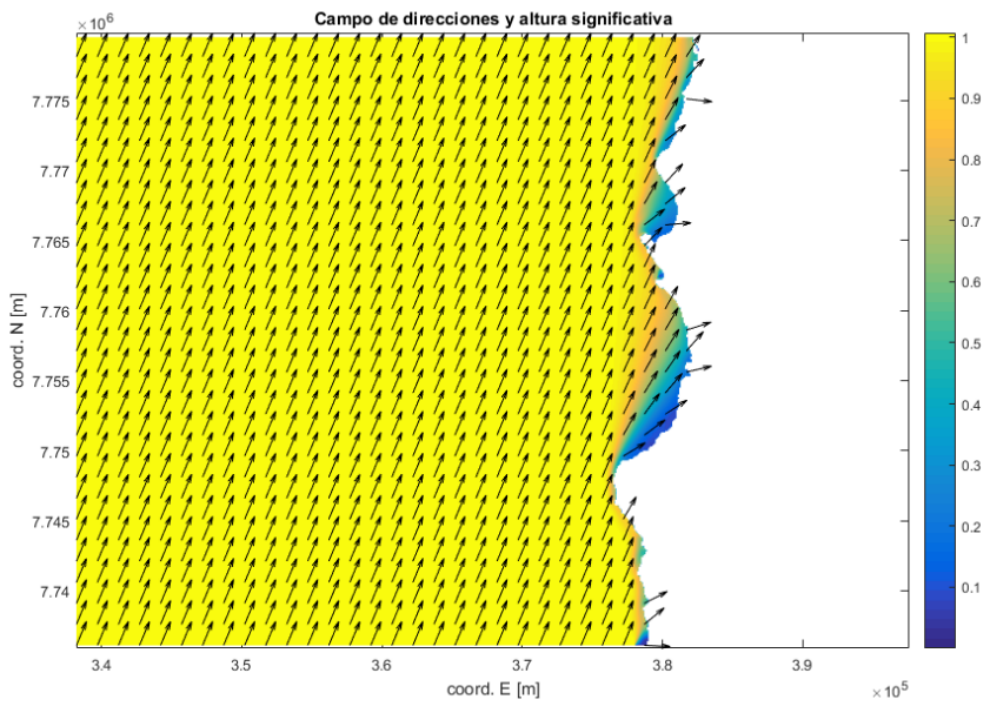
**Figura 9-55: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



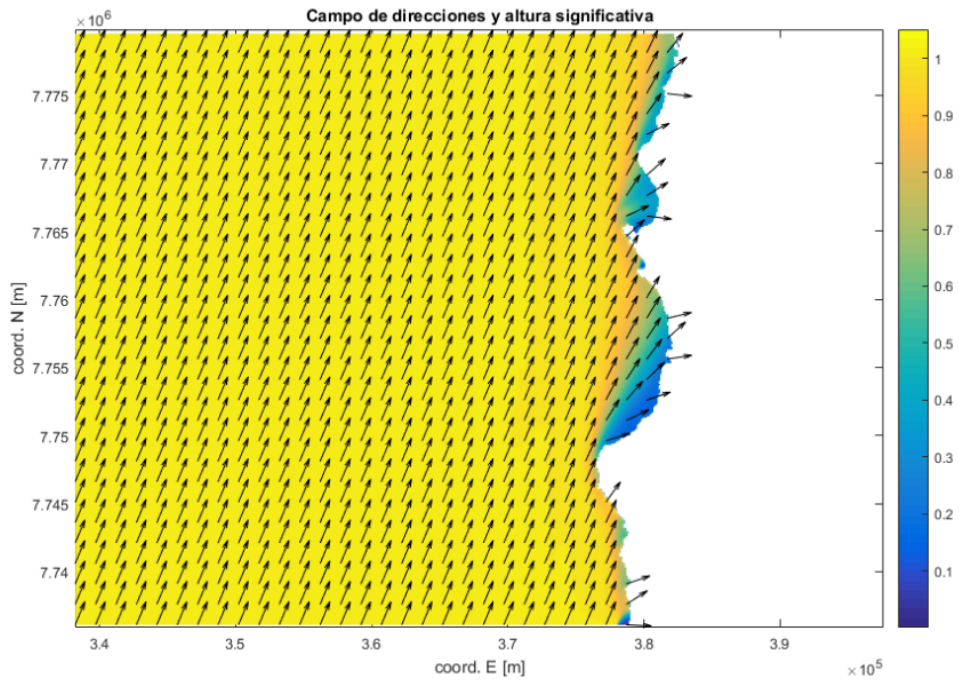
**Figura 9-56: Malla gruesa - Dir: SW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



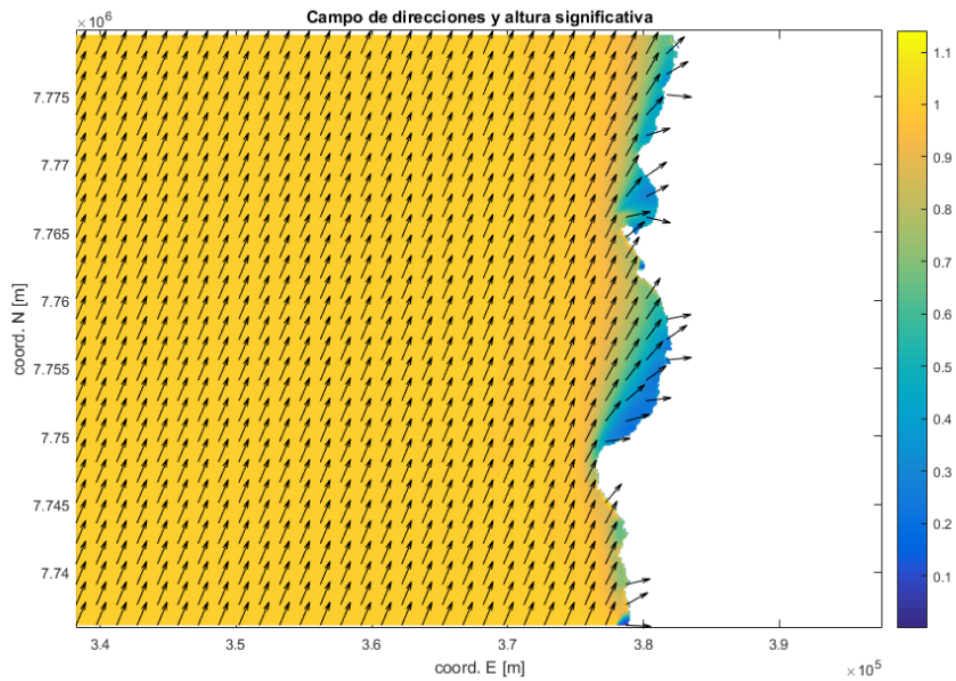
**Figura 9-57: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



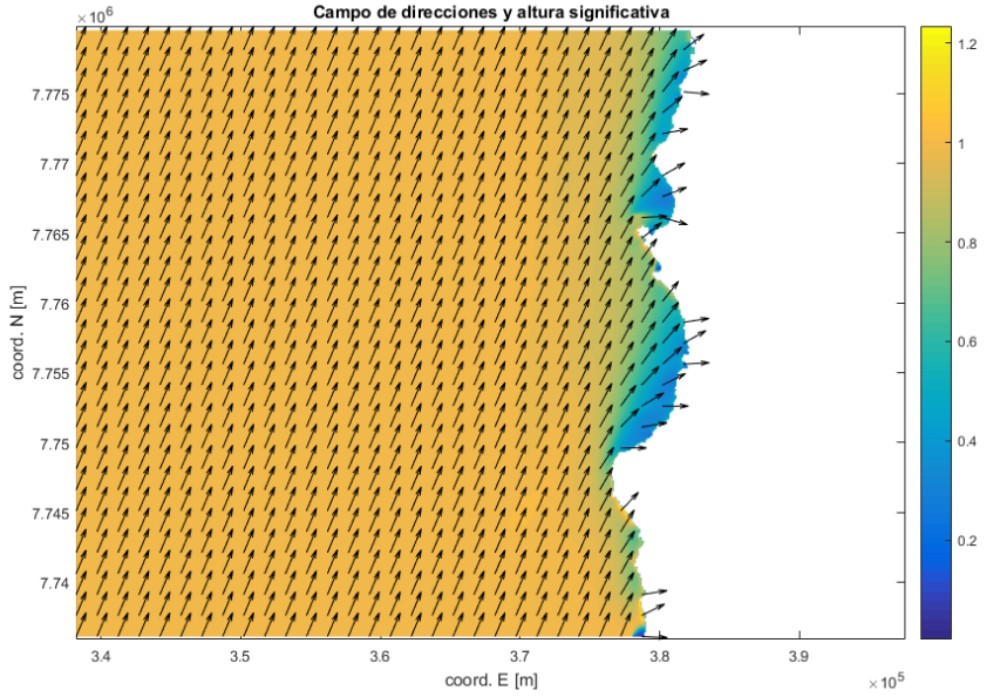
**Figura 9-58: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



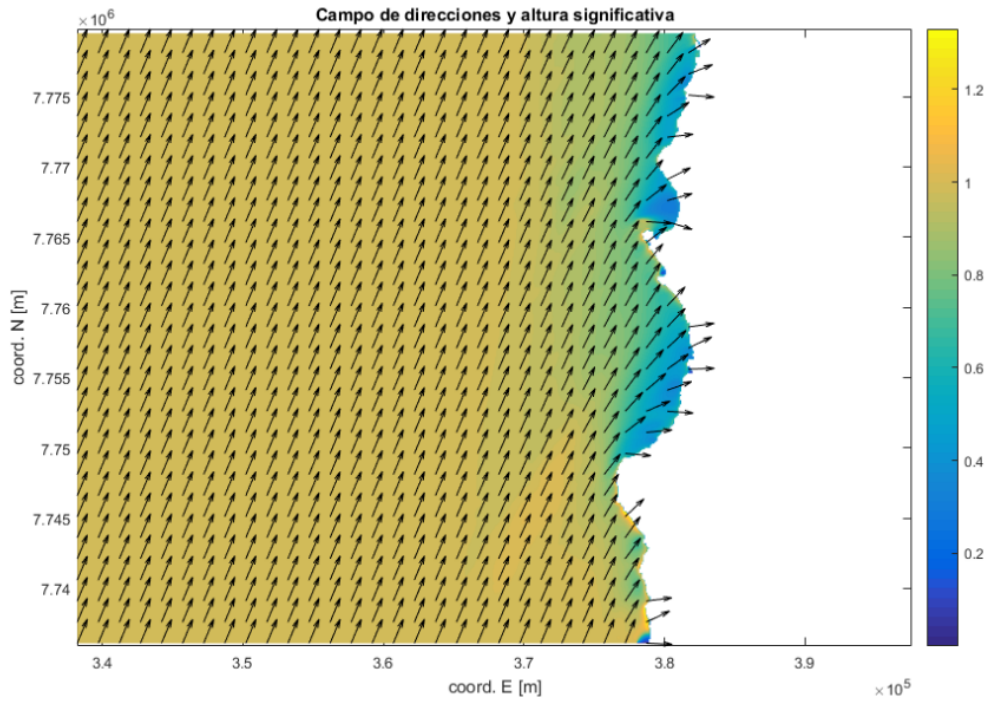
**Figura 9-59: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 8 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



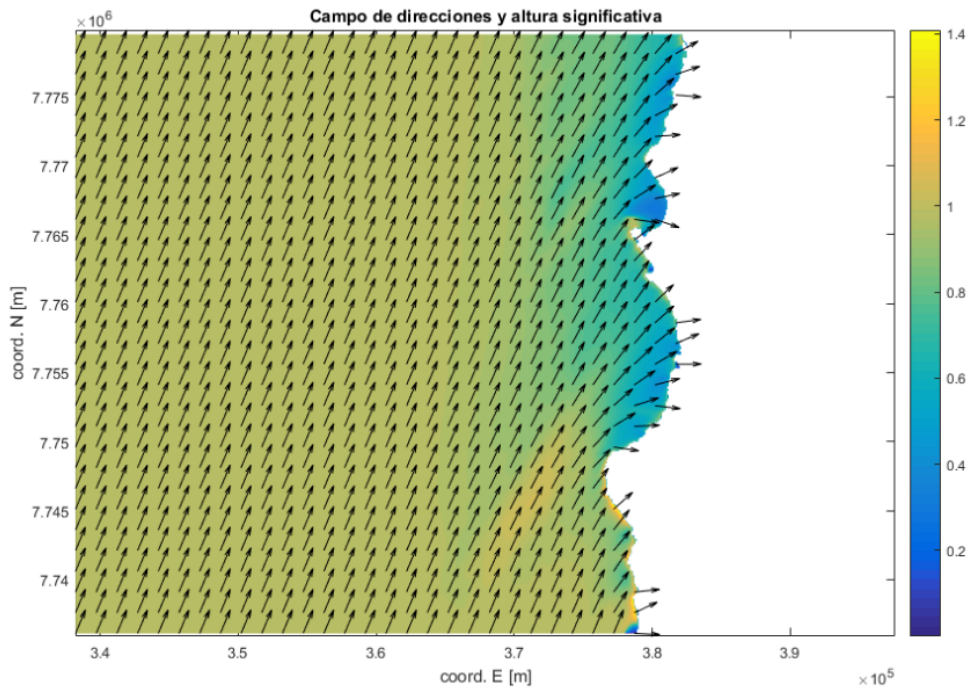
**Figura 9-60: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



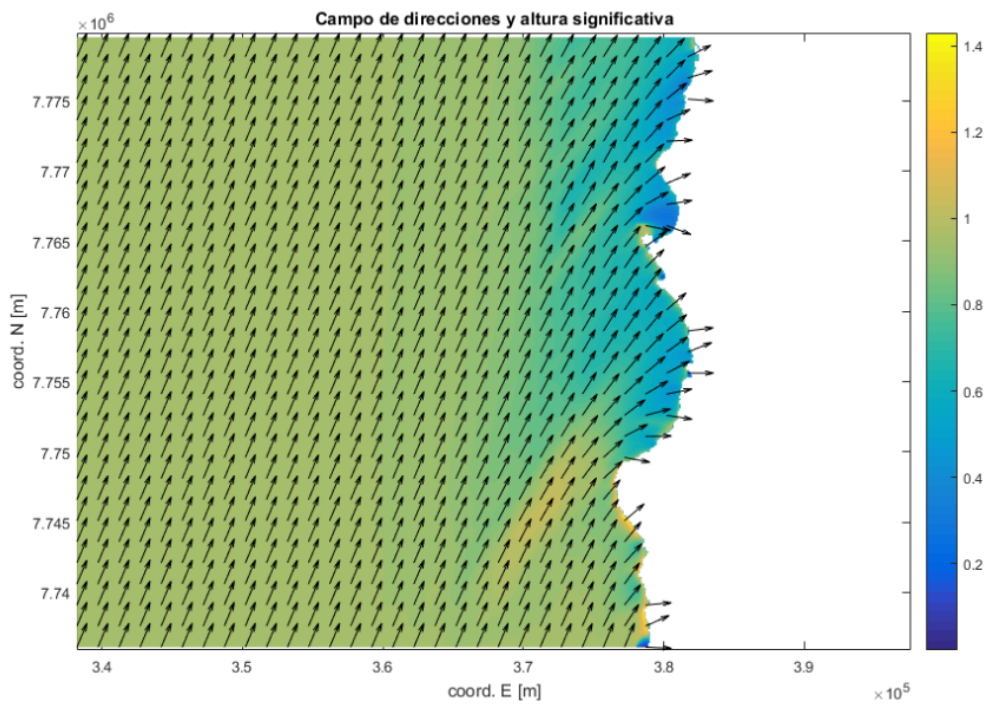
**Figura 9-61: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



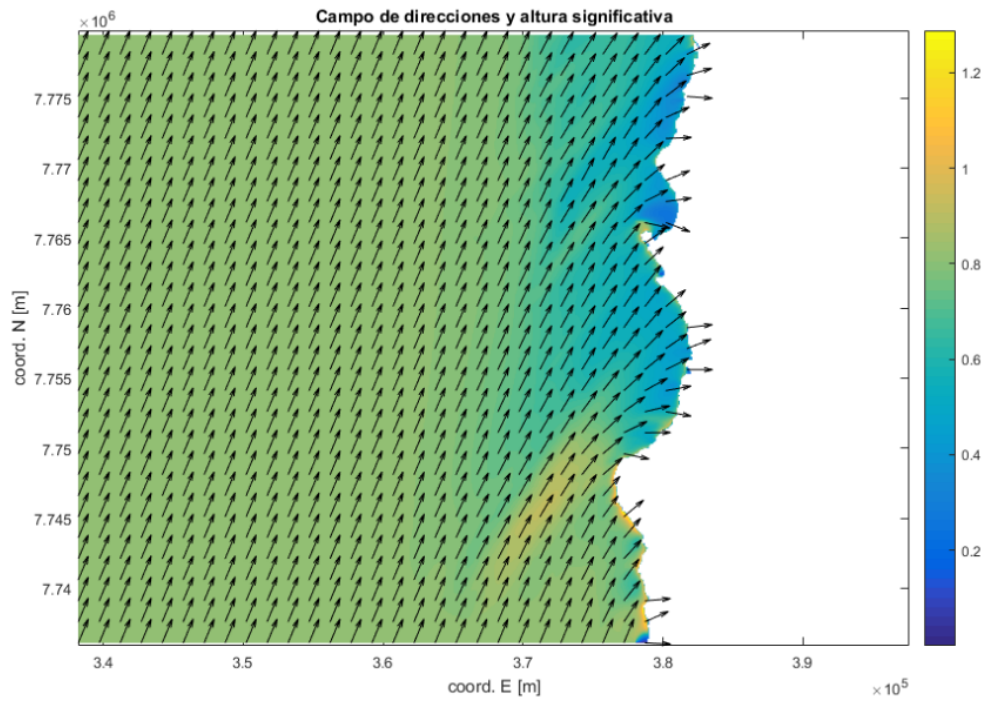
**Figura 9-62: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



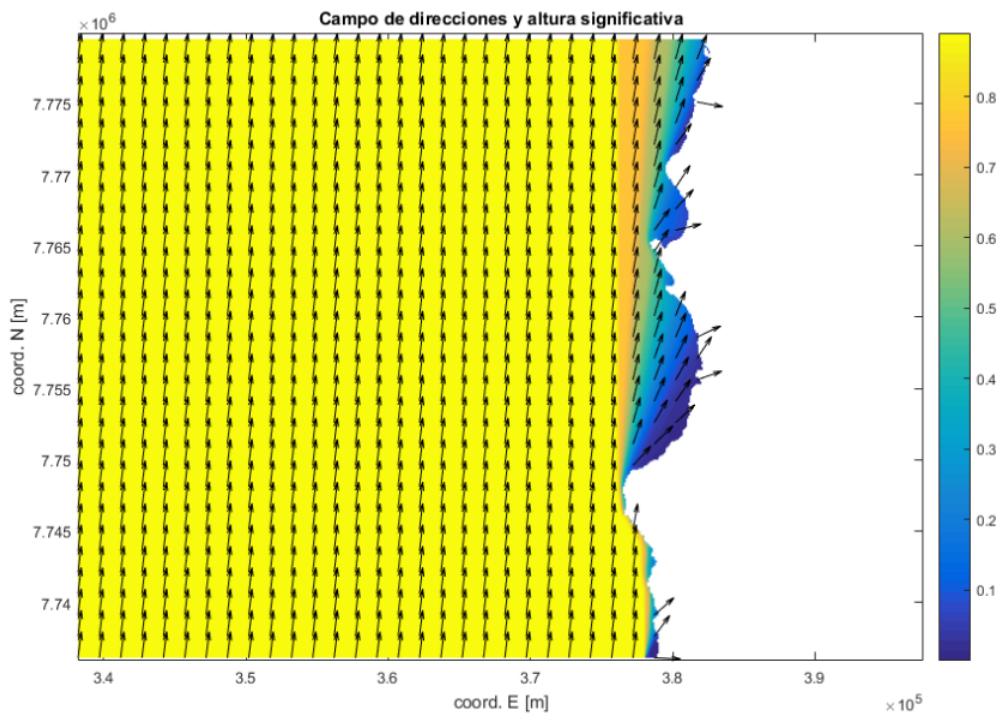
**Figura 9-63: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



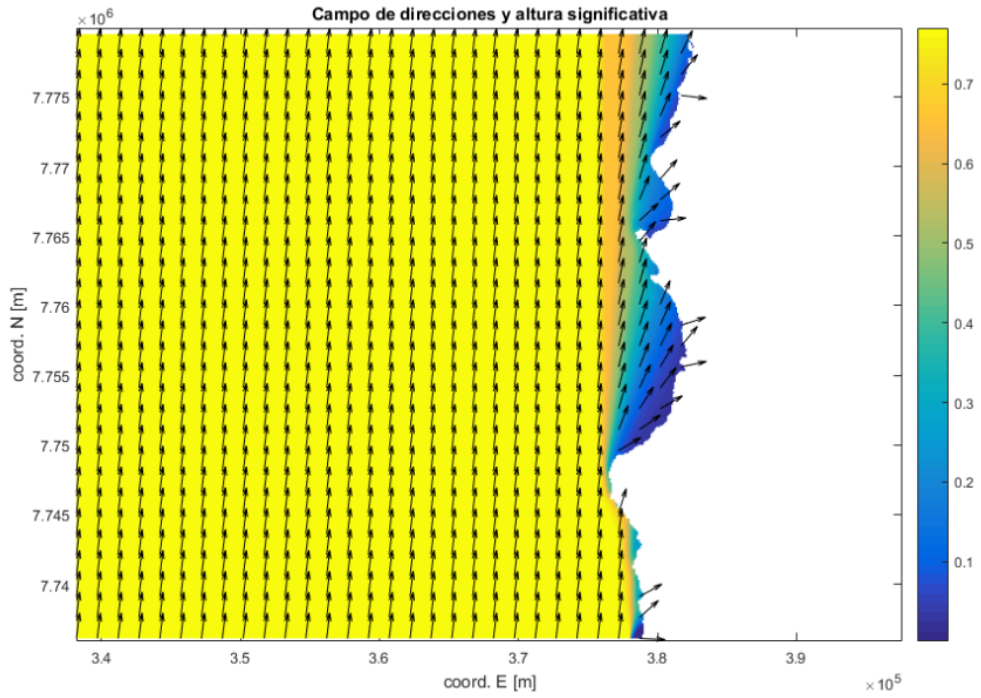
**Figura 9-64: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



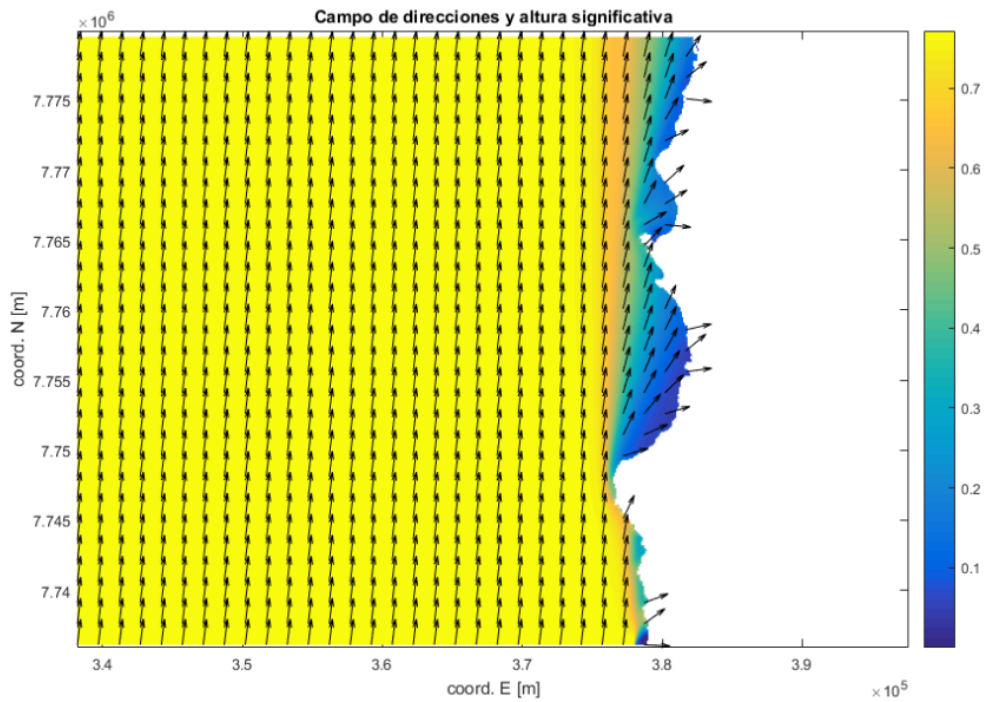
**Figura 9-65: Malla gruesa - Dir: SSW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



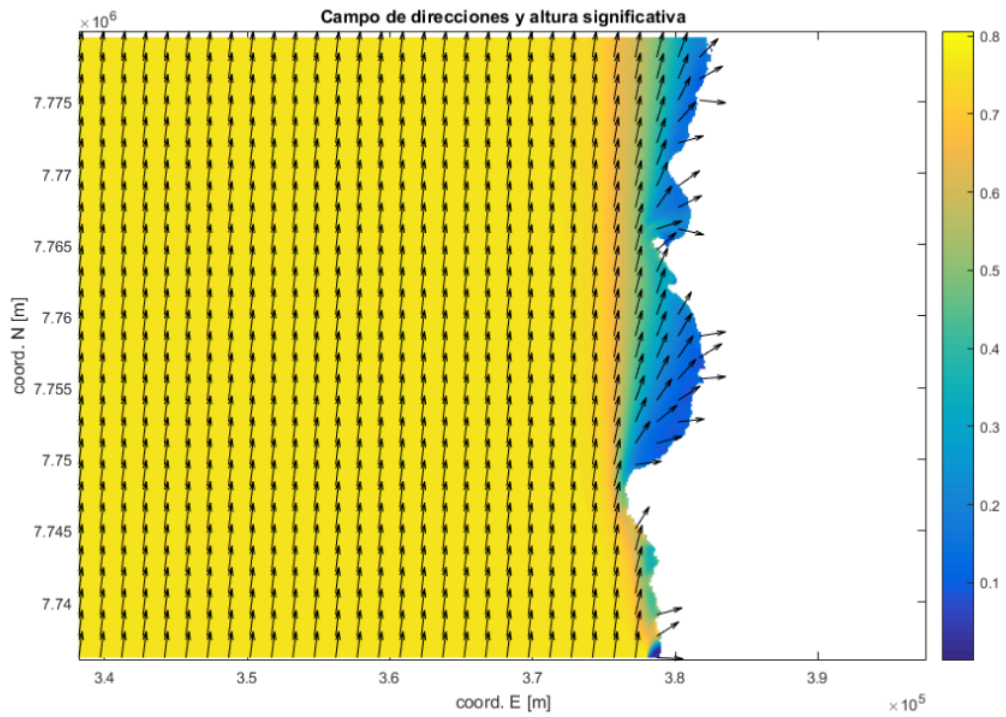
**Figura 9-66: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



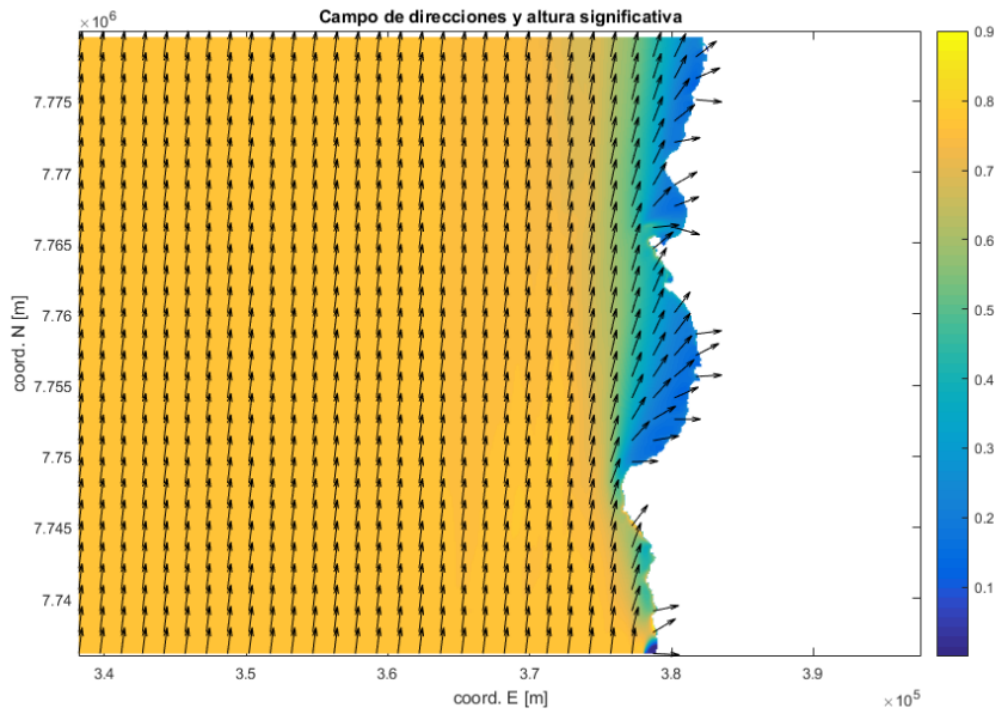
**Figura 9-67: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



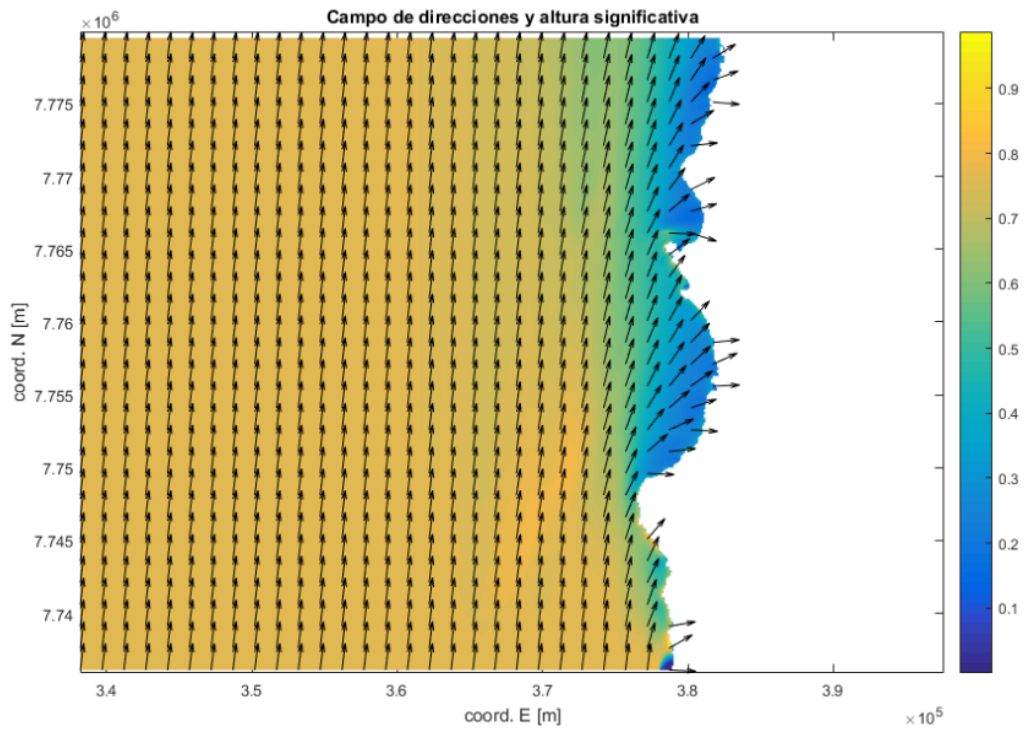
**Figura 9-68: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



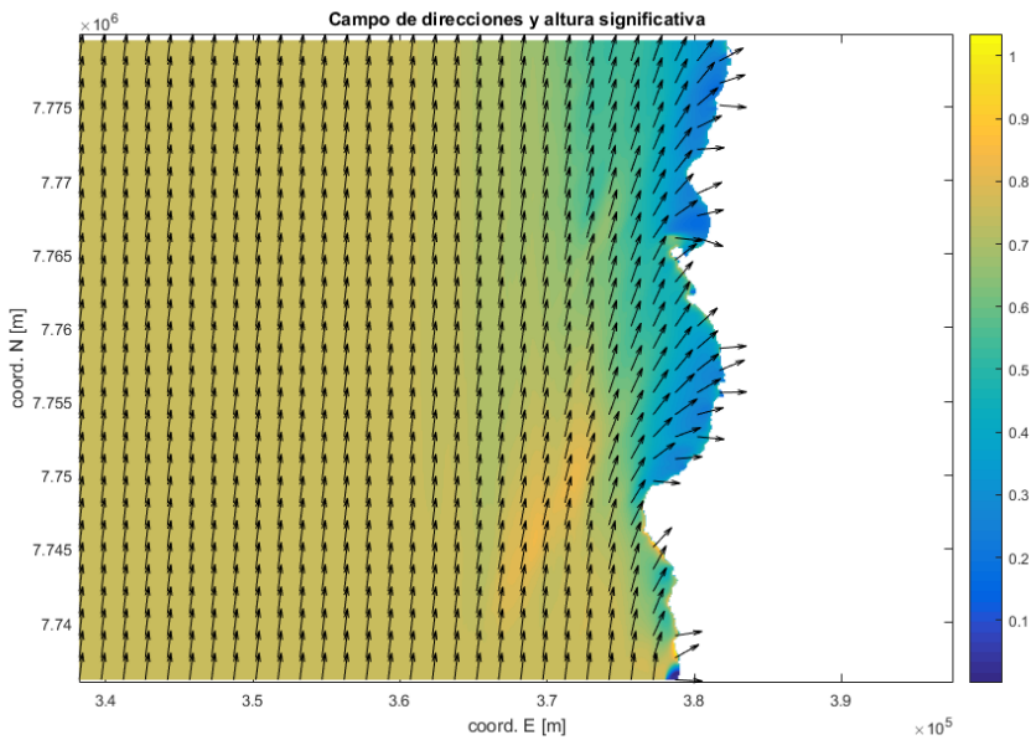
**Figura 9-69: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



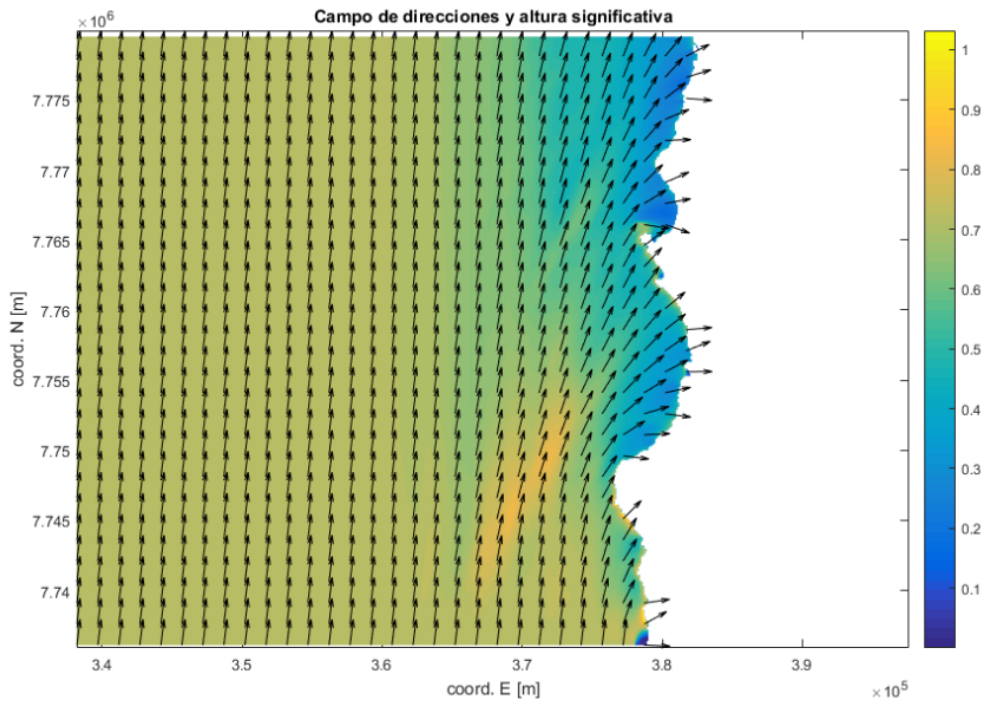
**Figura 9-70: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



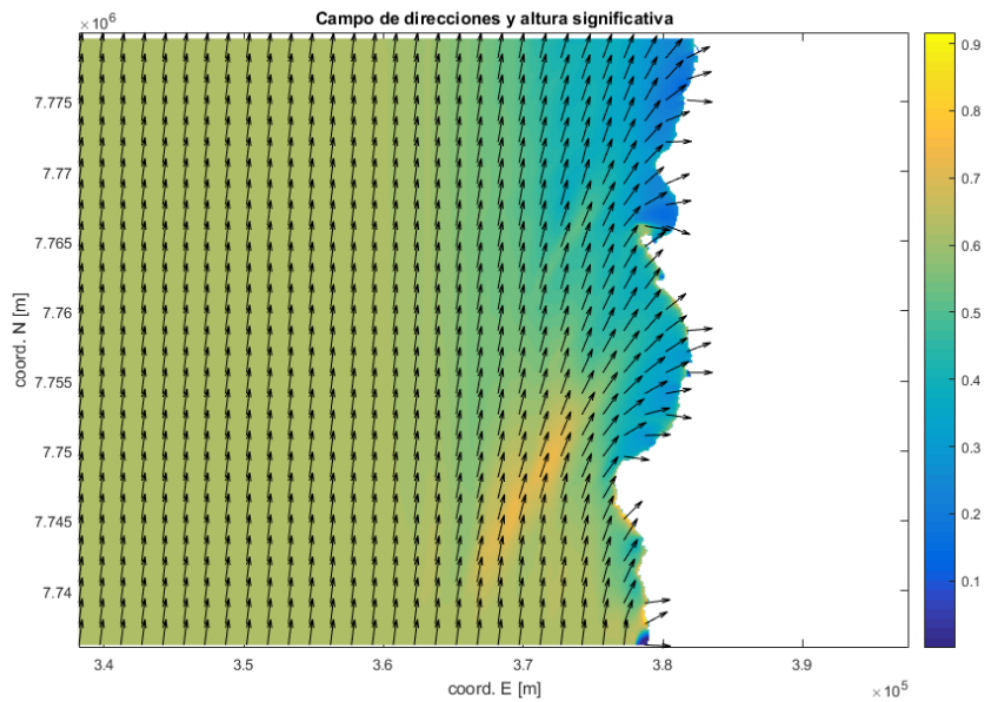
**Figura 9-71: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-72: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-73: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-74: Malla gruesa - Dir: S, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.

## MALLA MEDIANA.

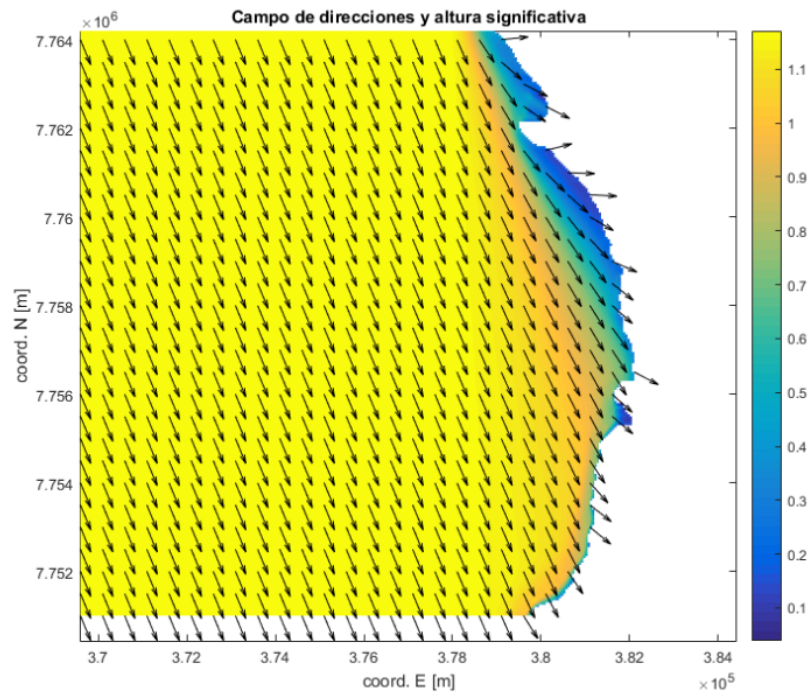


Figura 9-75: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 4 [s].  
Fuente: Elaboración propia.

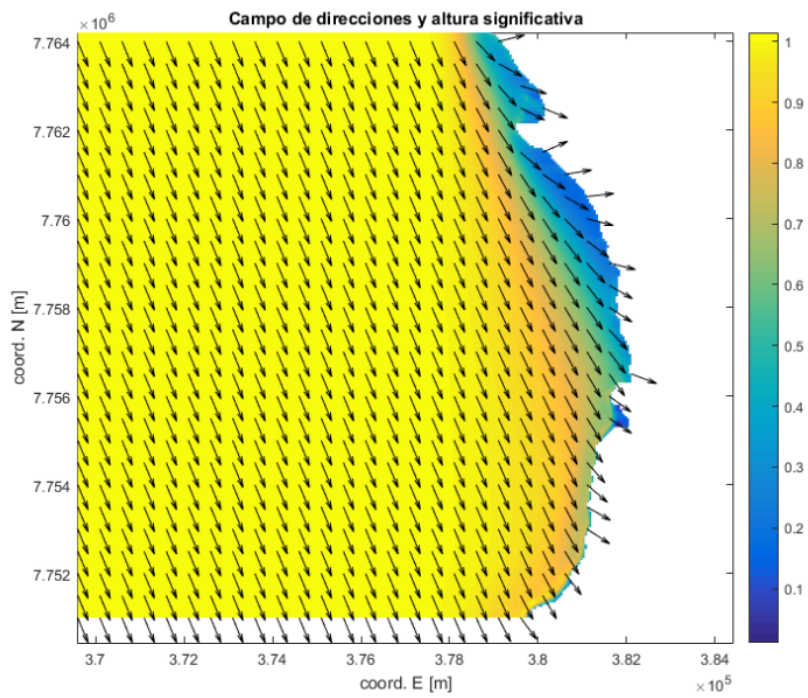
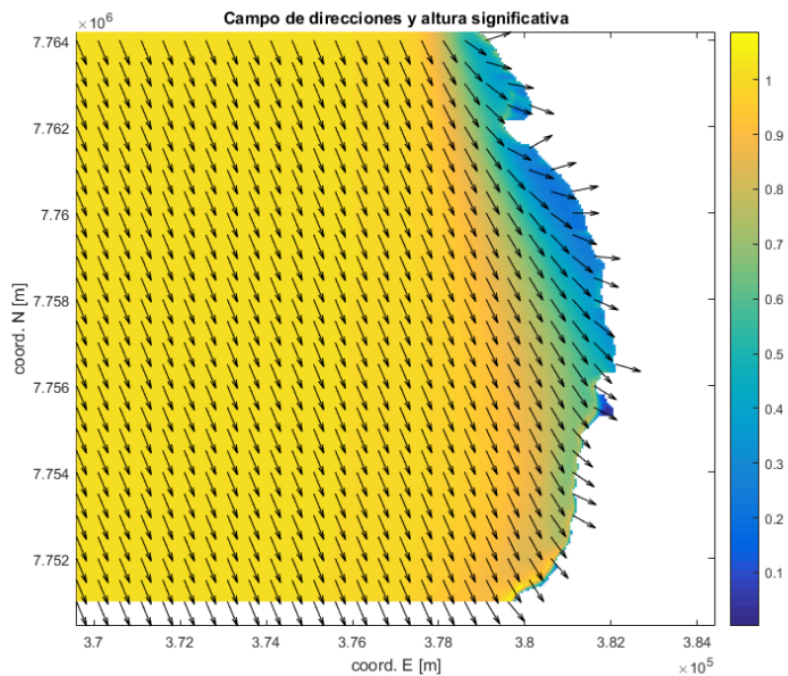
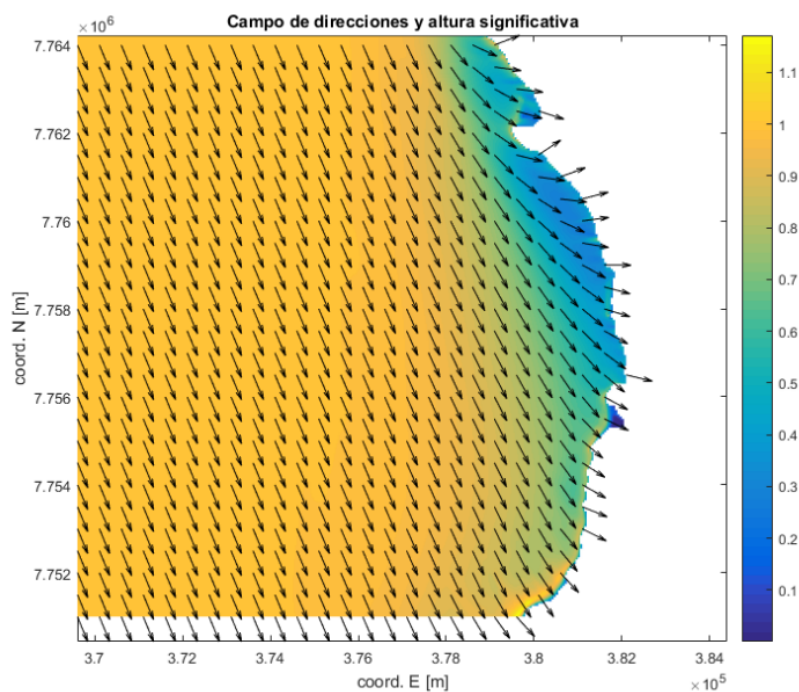


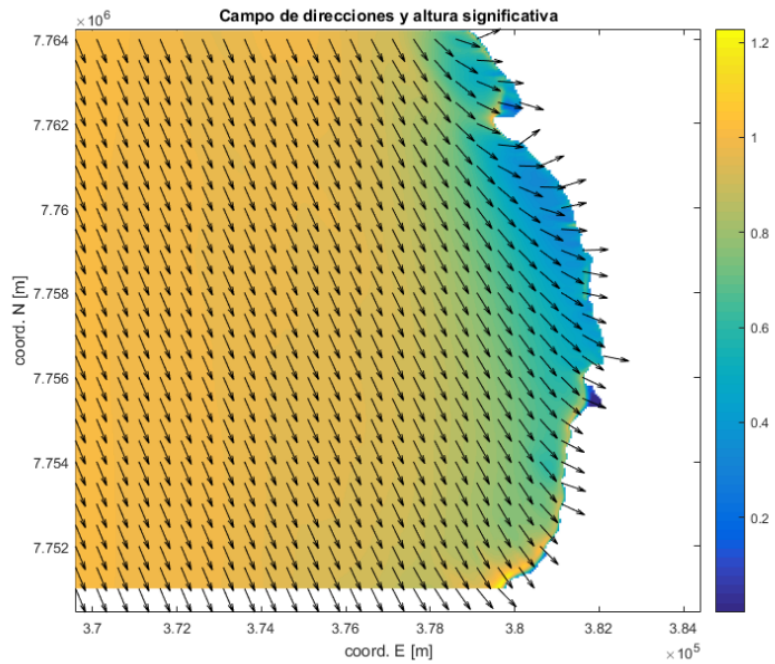
Figura 9-76: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 6 [s].  
Fuente: Elaboración propia.



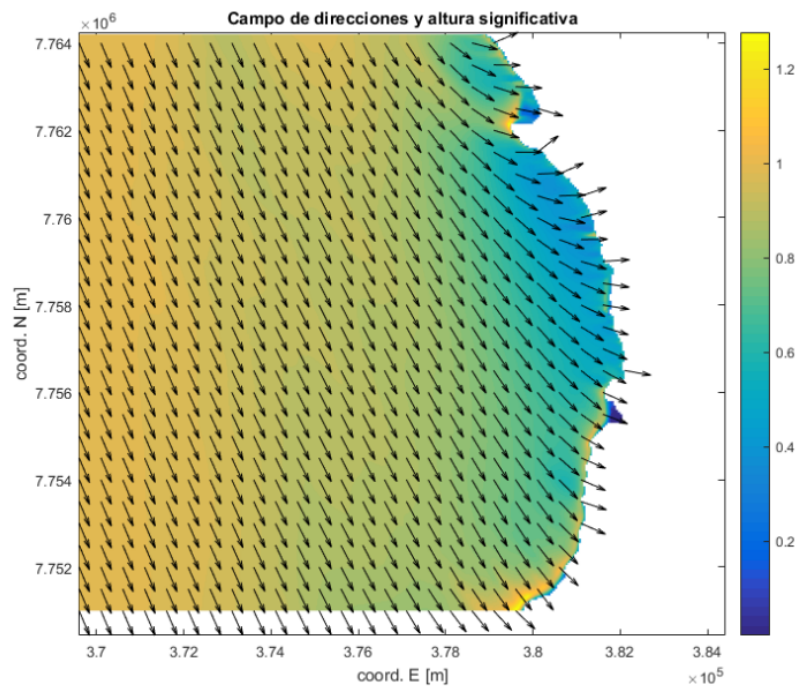
**Figura 9-77: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 8 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



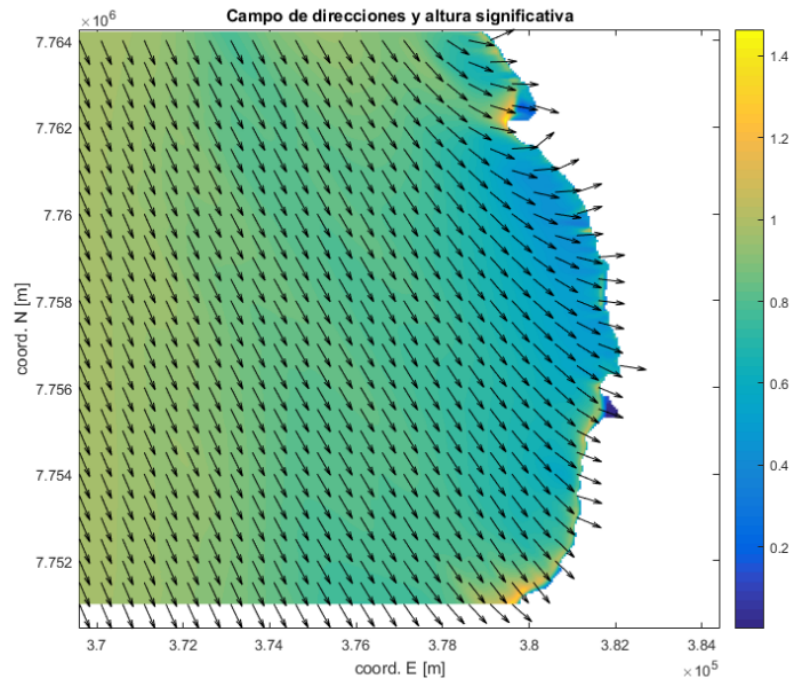
**Figura 9-78: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



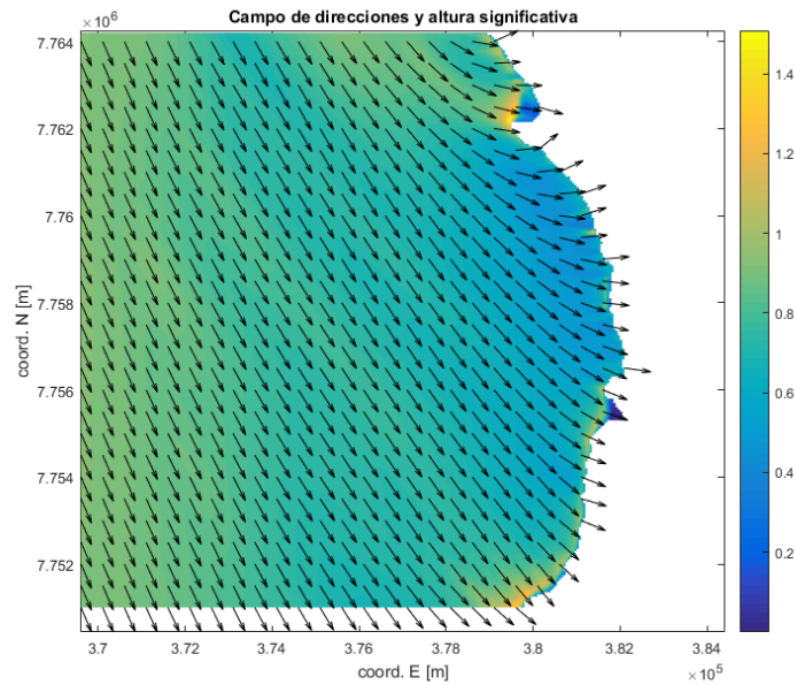
**Figura 9-79: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



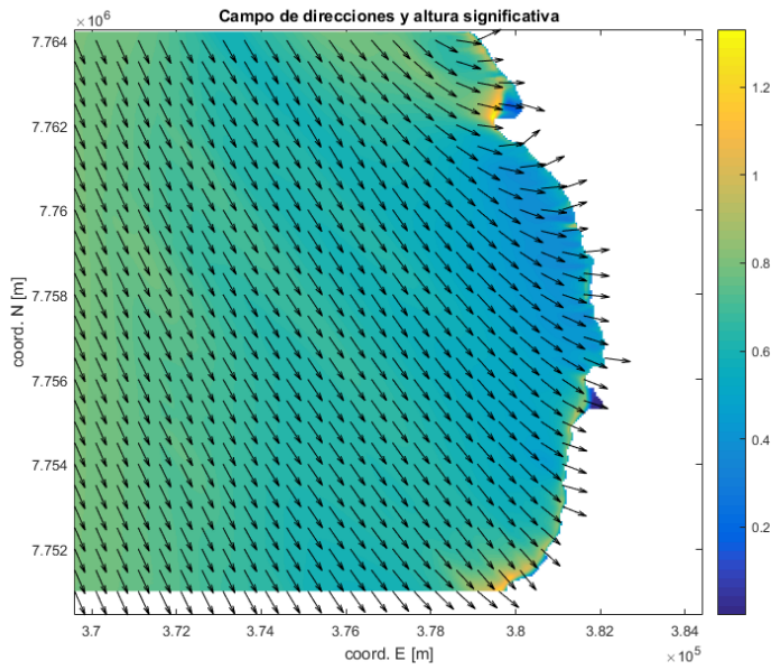
**Figura 9-80: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



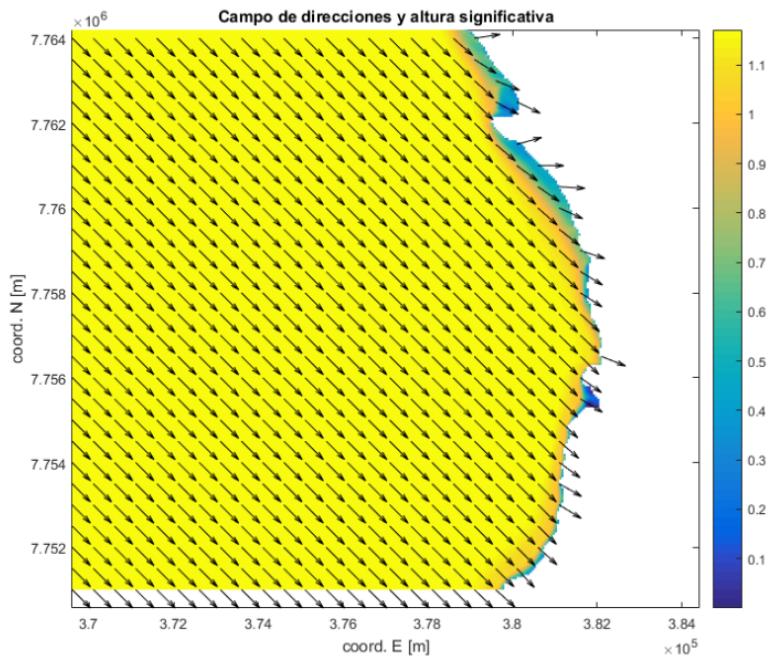
**Figura 9-81: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



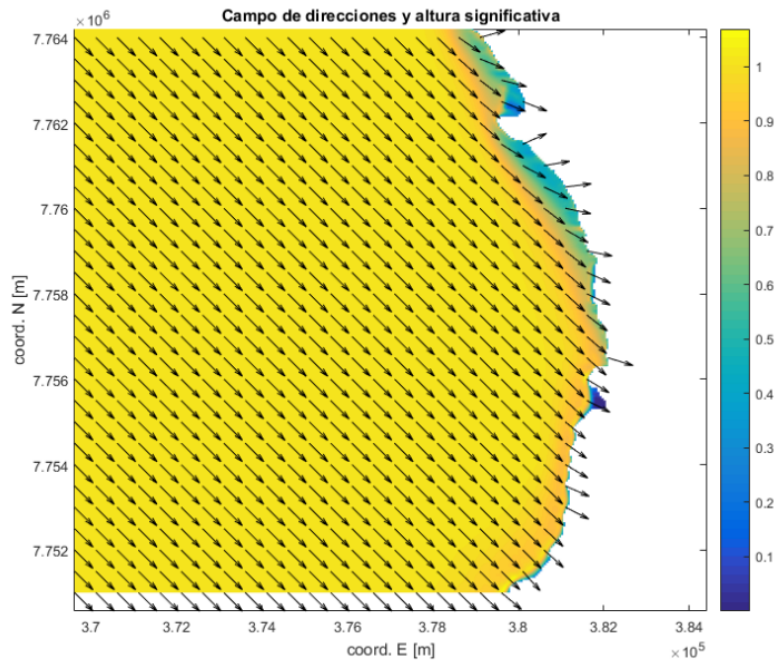
**Figura 9-82: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



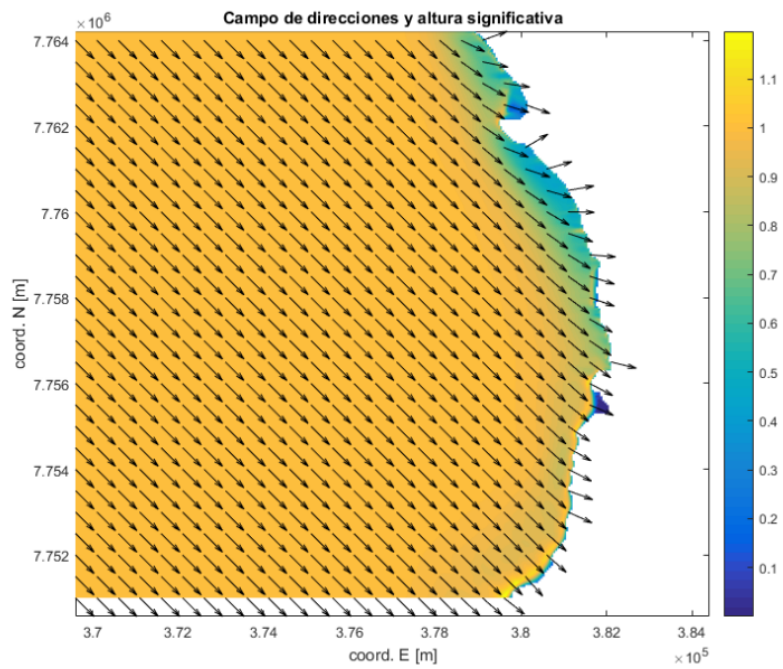
**Figura 9-83: Malla mediana - Dir: NNW, Tp: 20 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



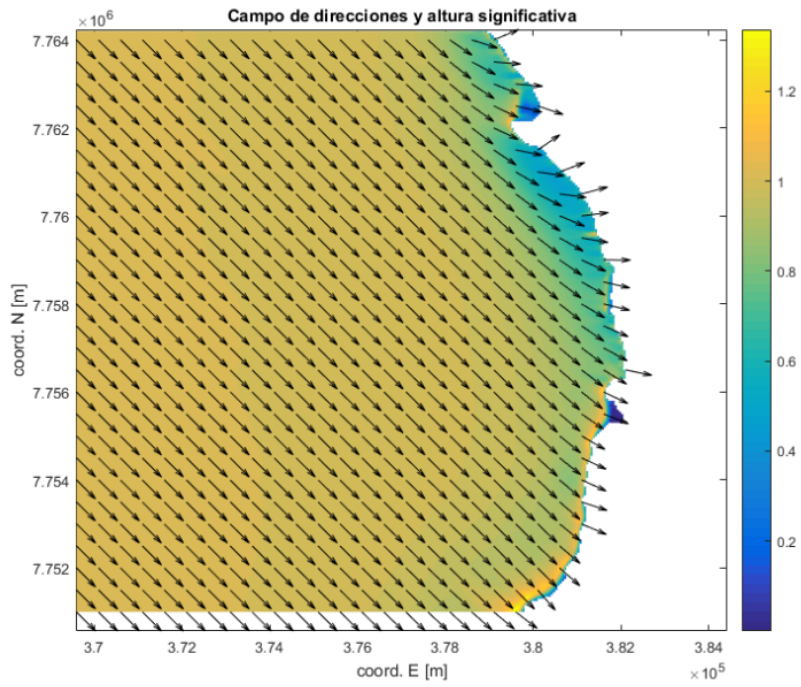
**Figura 9-84: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 4 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



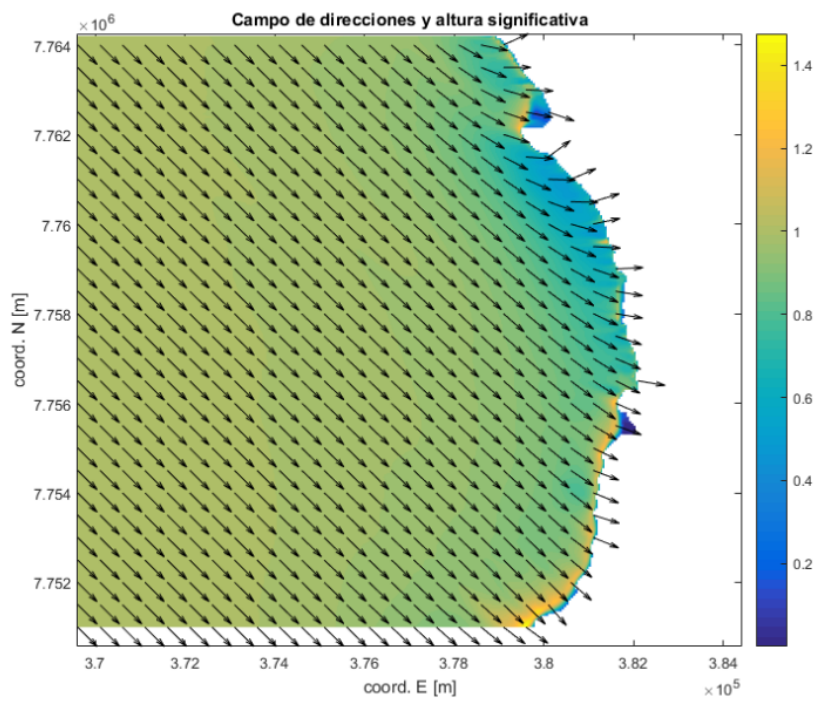
**Figura 9-85: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



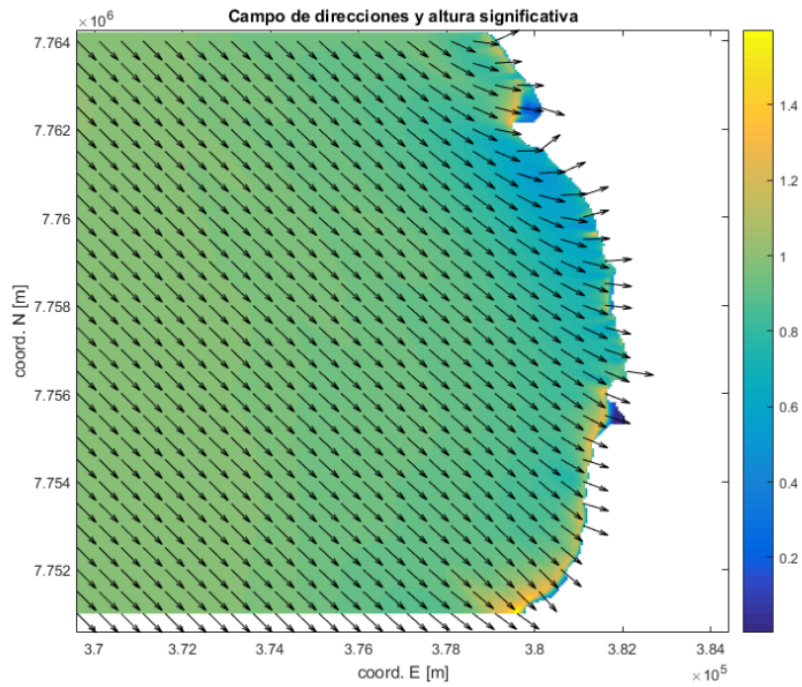
**Figura 9-86: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



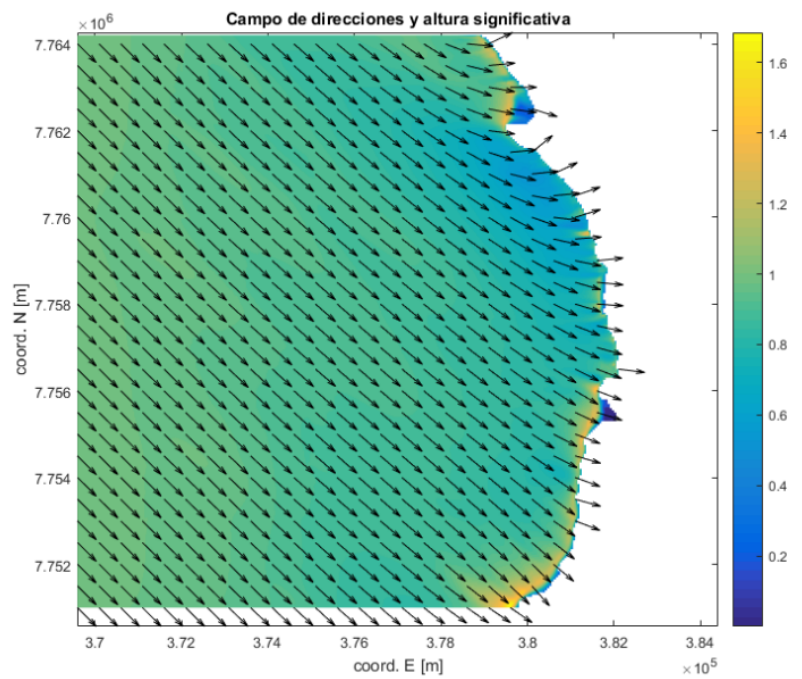
**Figura 9-87: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



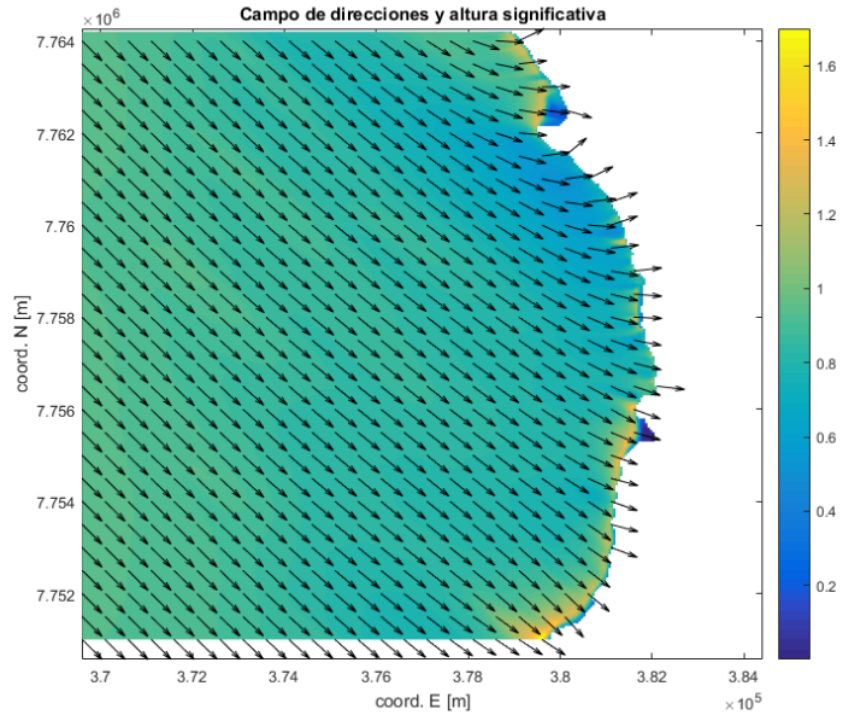
**Figura 9-88: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



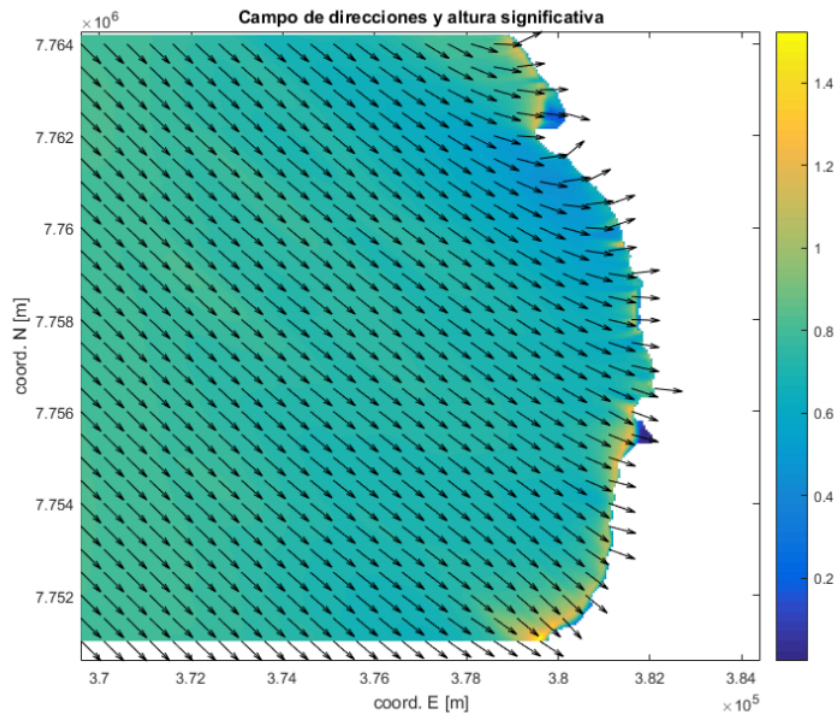
**Figura 9-89: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



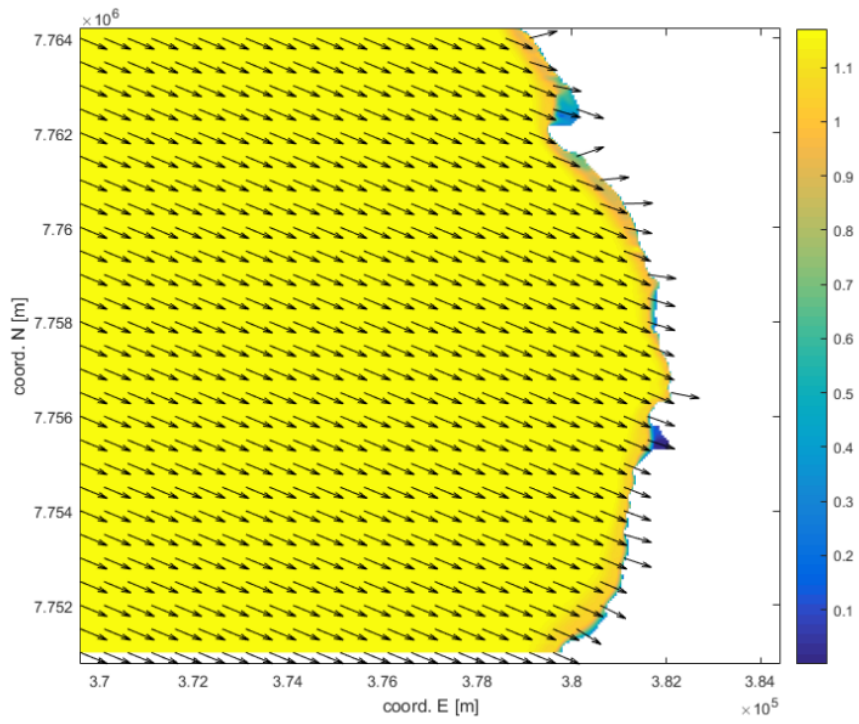
**Figura 9-90: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



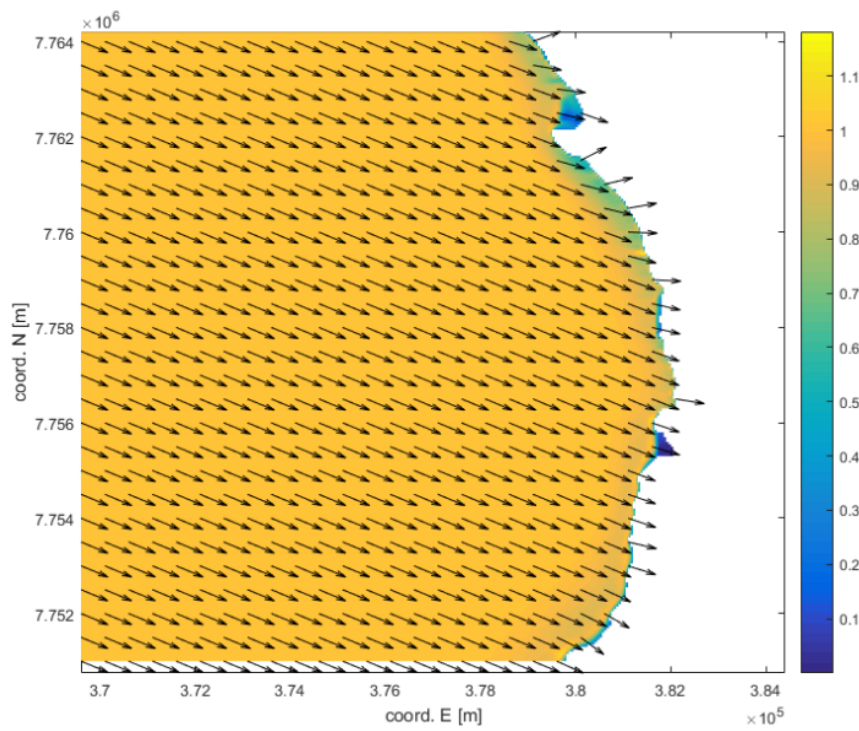
**Figura 9-91: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



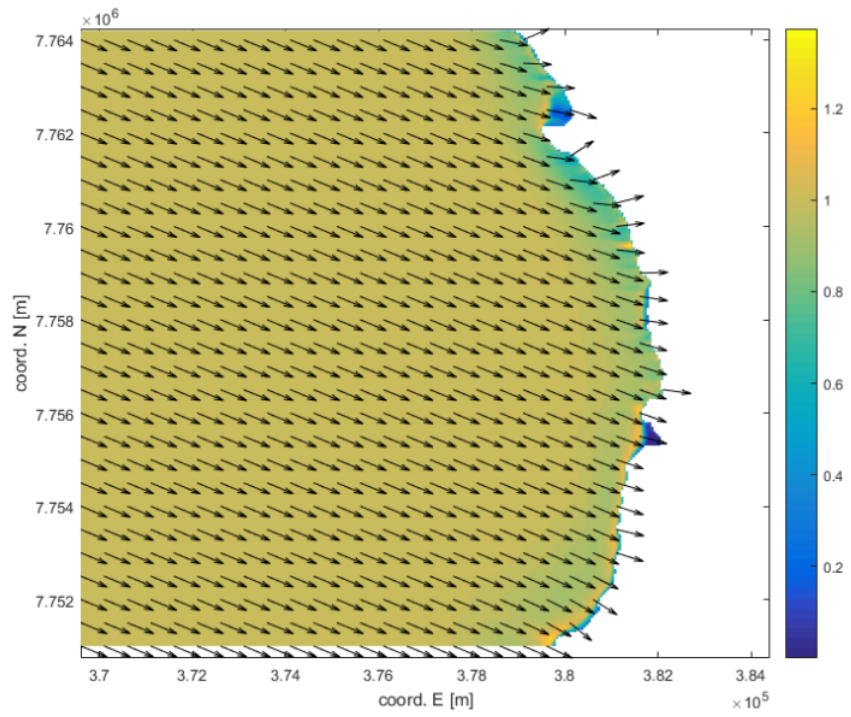
**Figura 9-92: Malla mediana - Dir: NW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



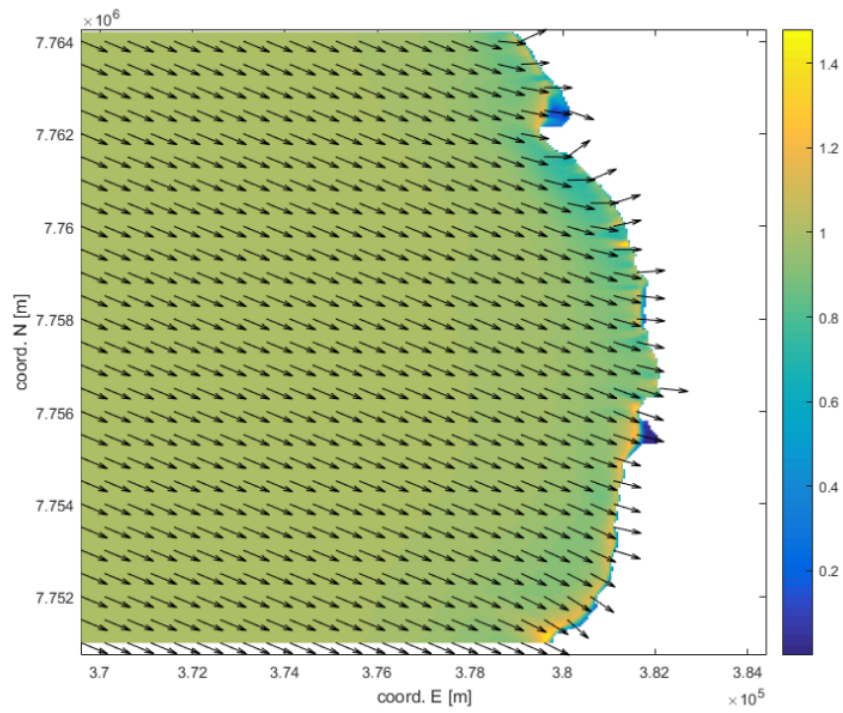
**Figura 9-93: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



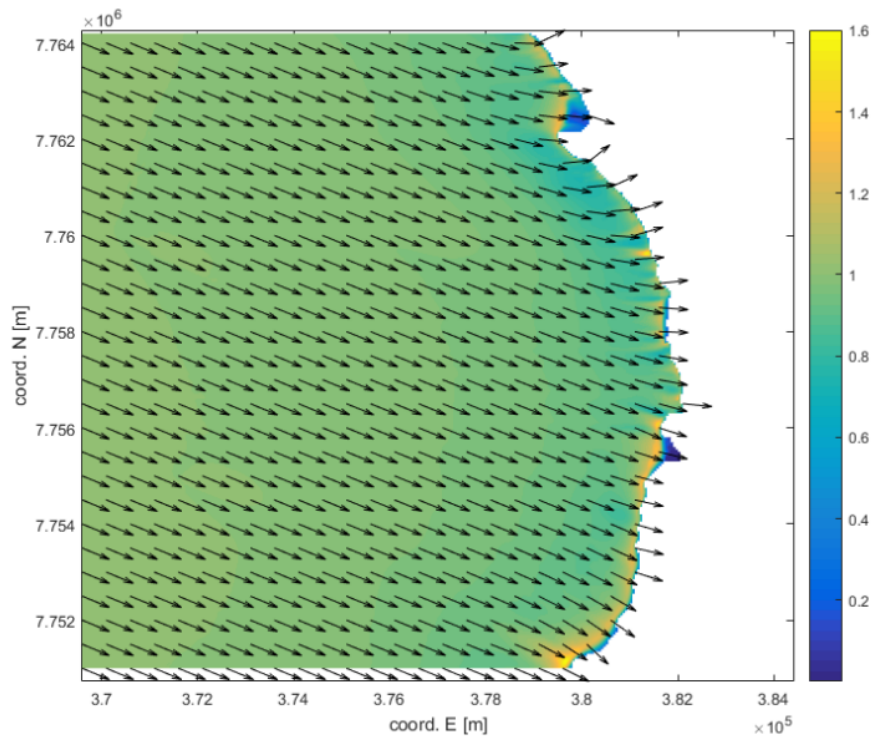
**Figura 9-94: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



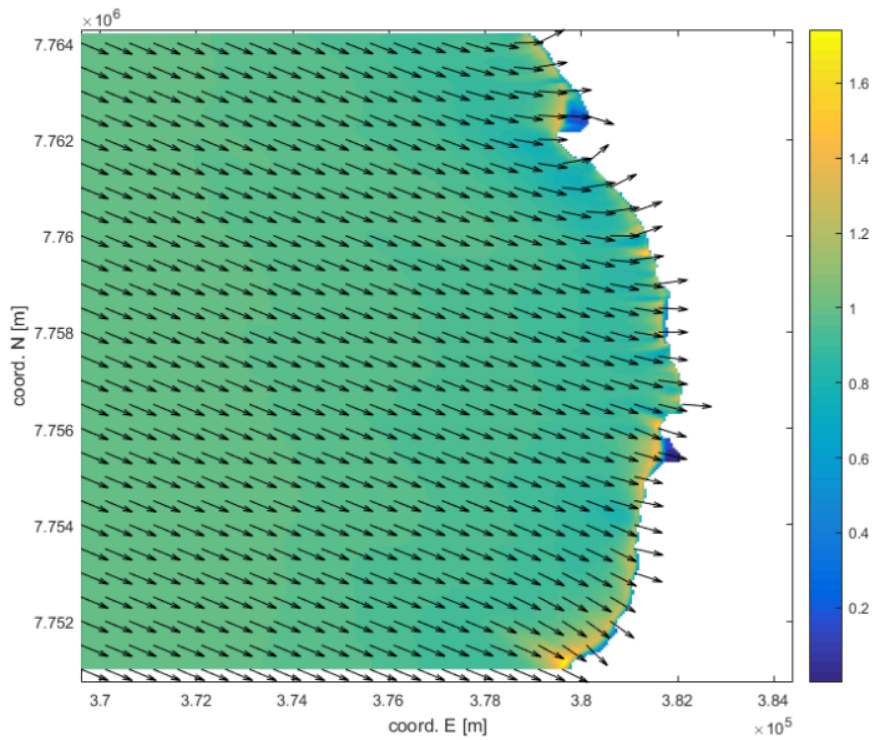
**Figura 9-95: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



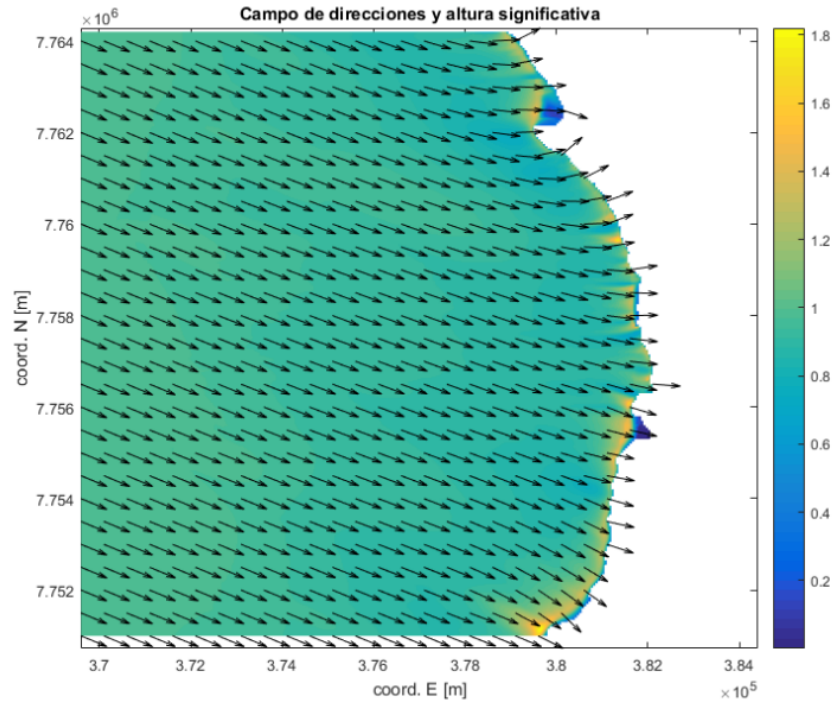
**Figura 9-96: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



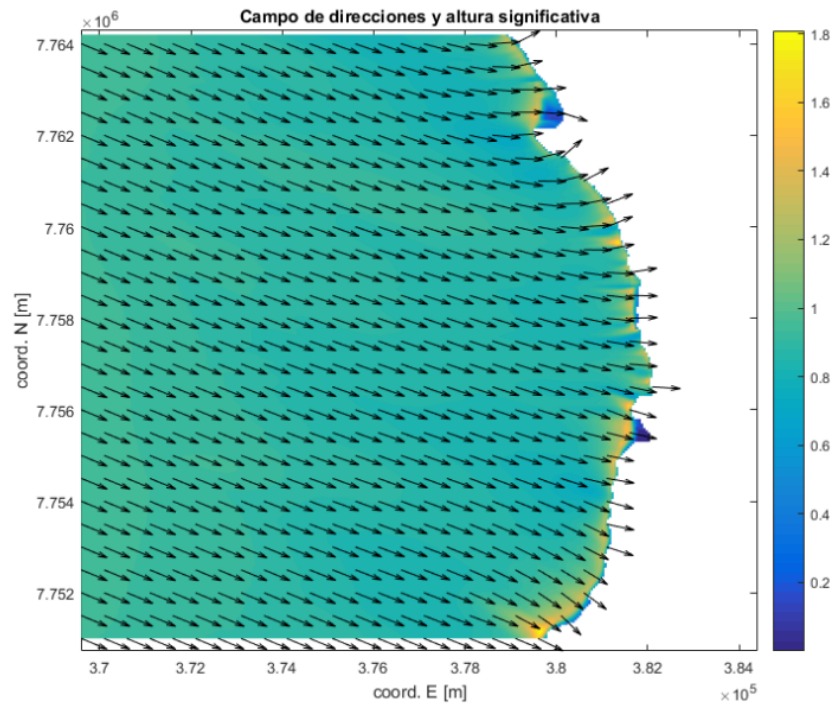
**Figura 9-97: Malla mediana - Dir: WNW, Tp:12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



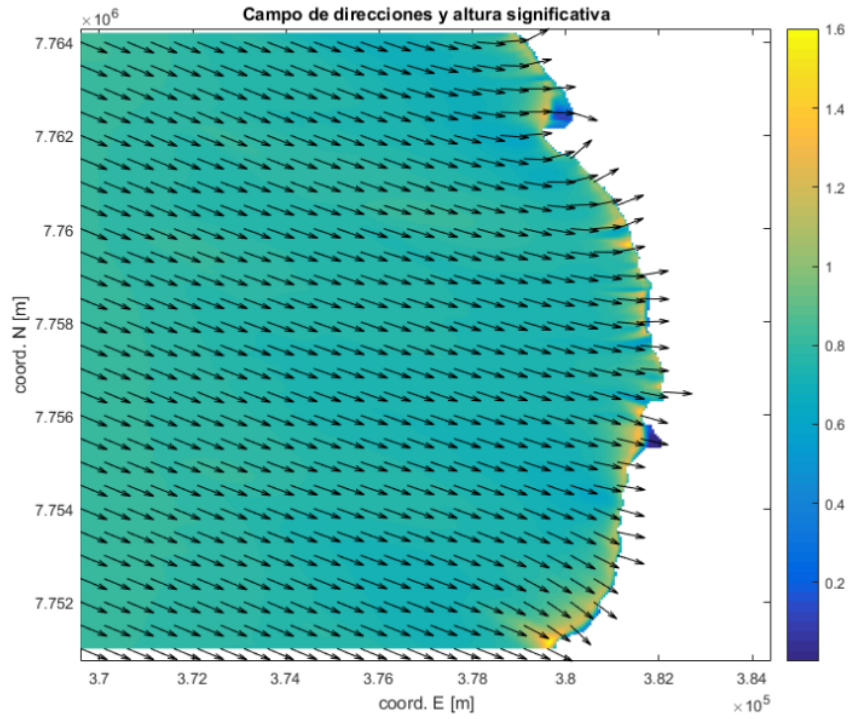
**Figura 9-98: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



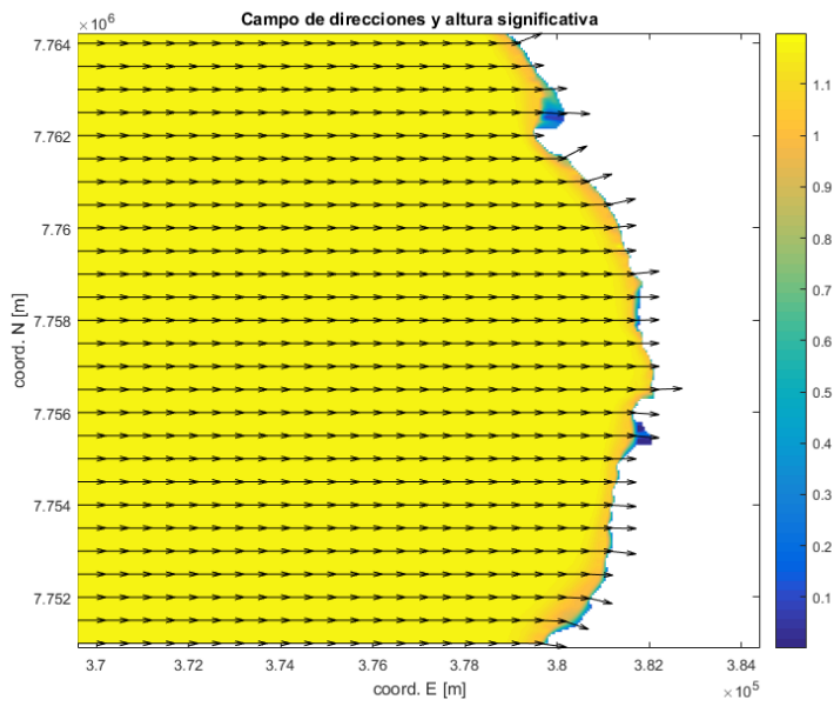
**Figura 9-99: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



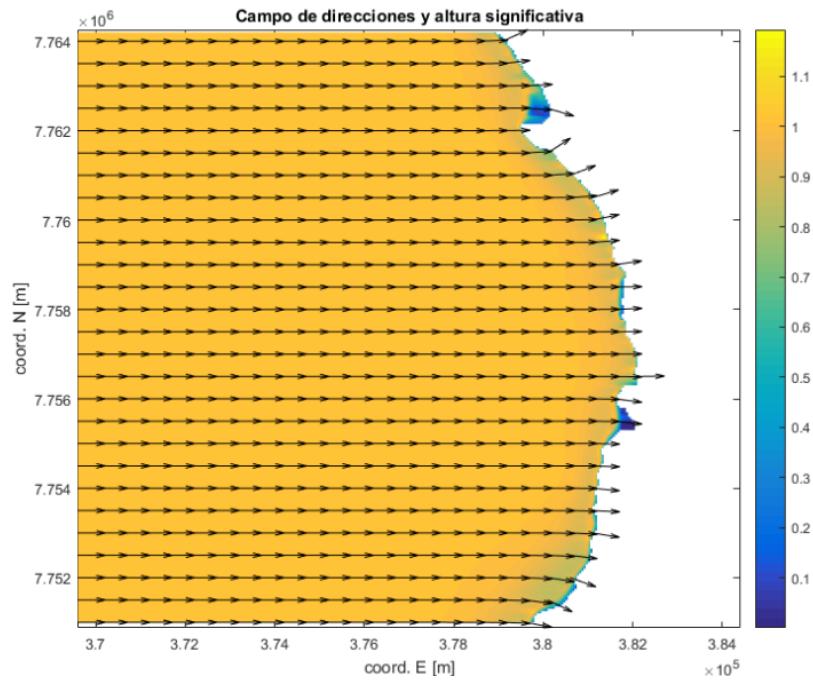
**Figura 9-100: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



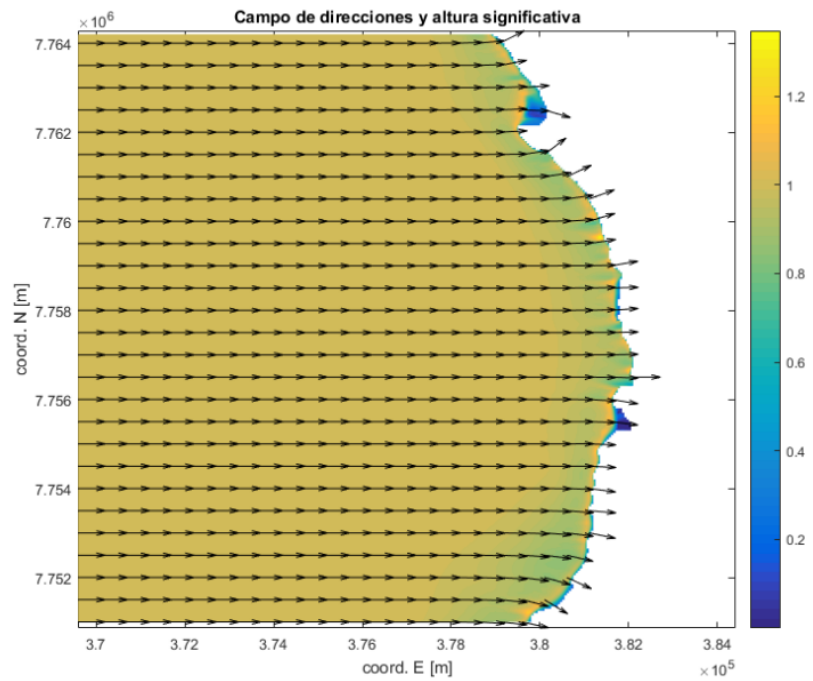
**Figura 9-101: Malla mediana - Dir: WNW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



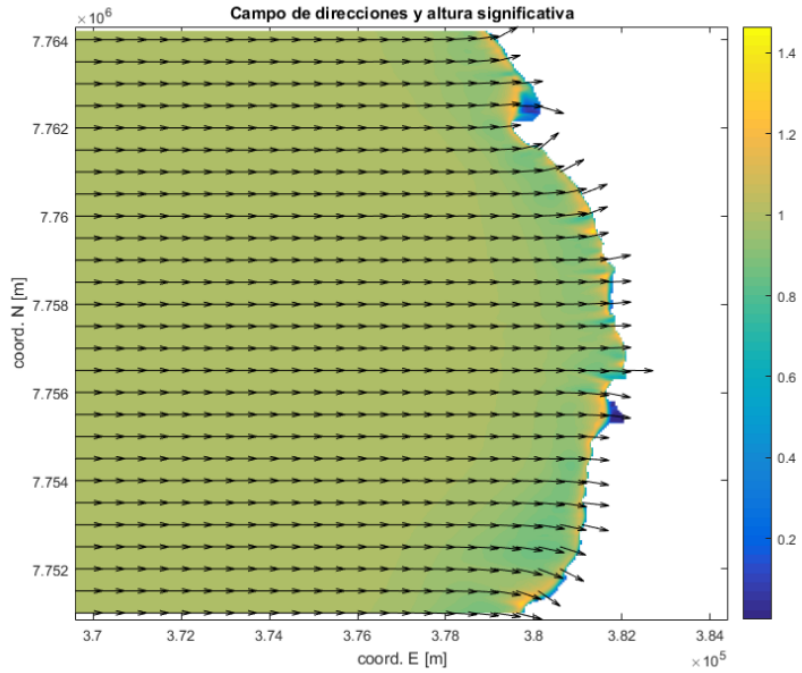
**Figura 9-102: Malla mediana - Dir: W, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



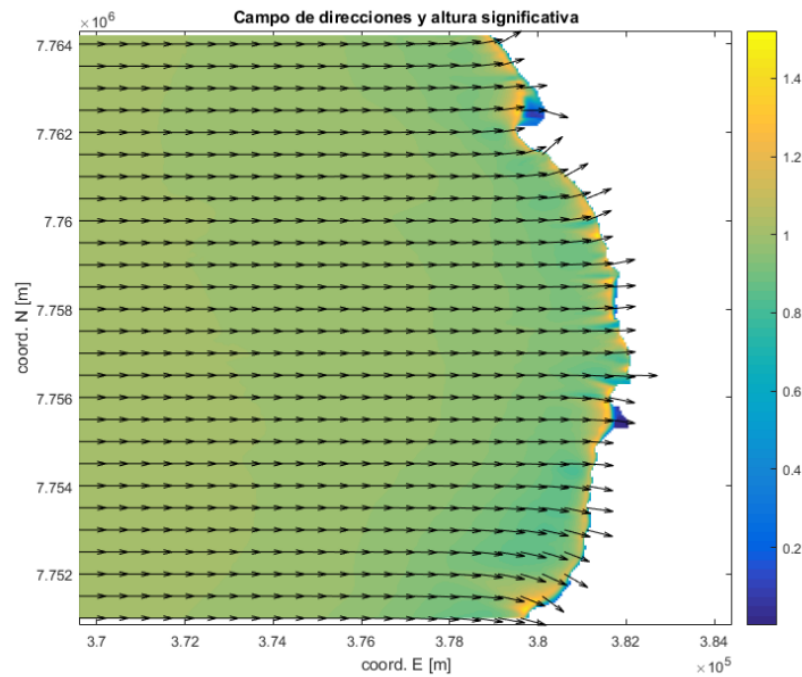
**Figura 9-103: Malla mediana - Dir: W, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



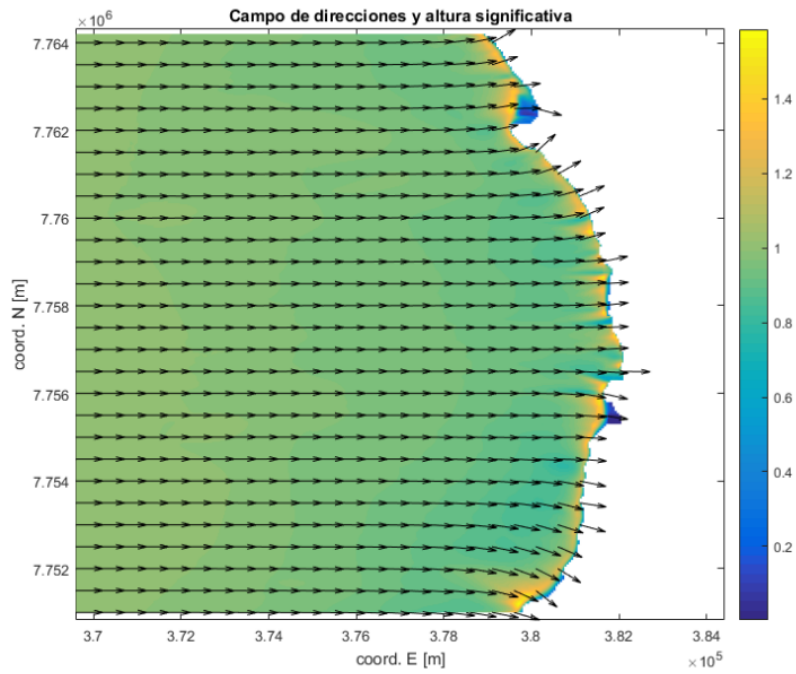
**Figura 9-104: Malla mediana - Dir: W, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



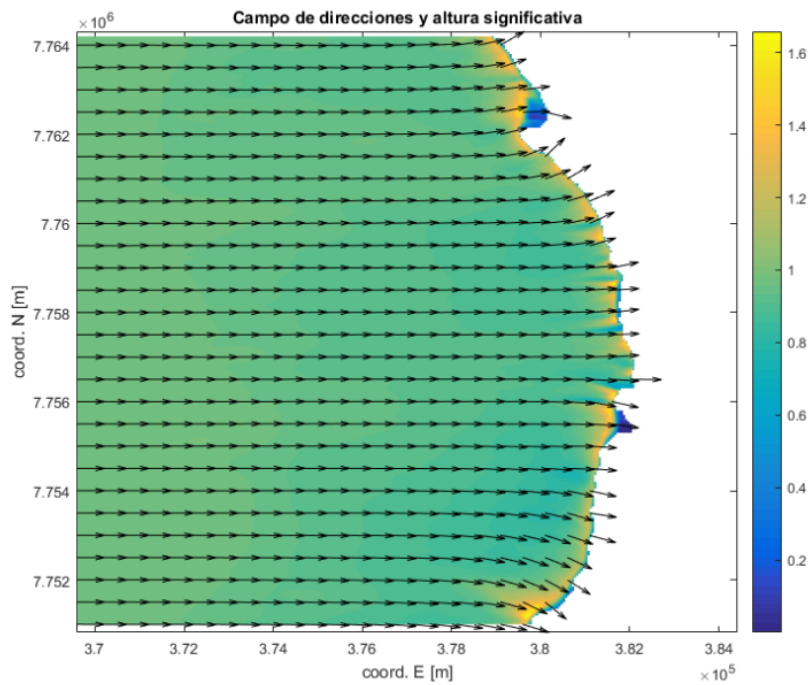
**Figura 9-105: Malla mediana - Dir: W, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



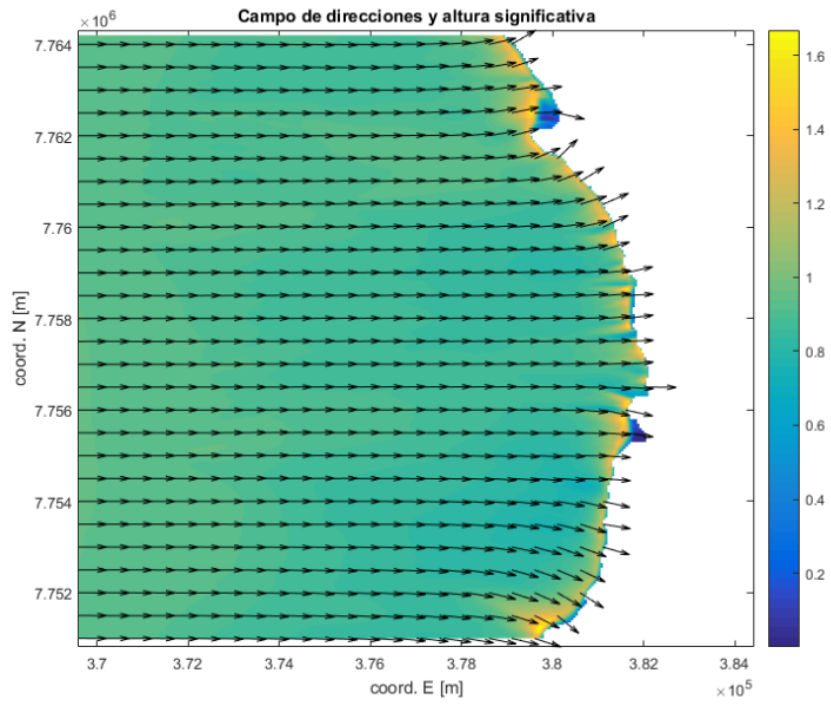
**Figura 9-106: Malla mediana - Dir: W, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



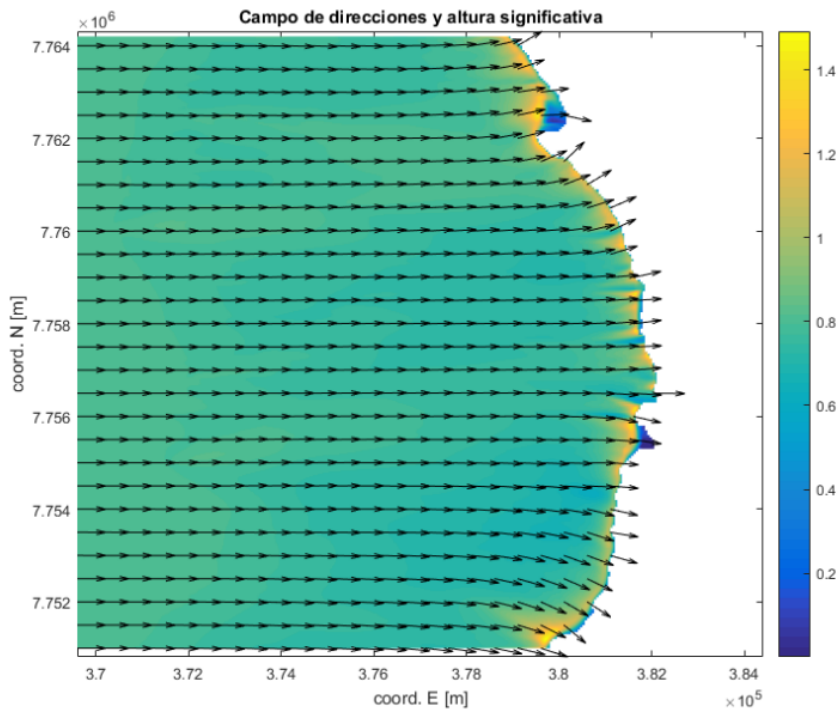
**Figura 9-107: Malla mediana - Dir: W, Tp: 14 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



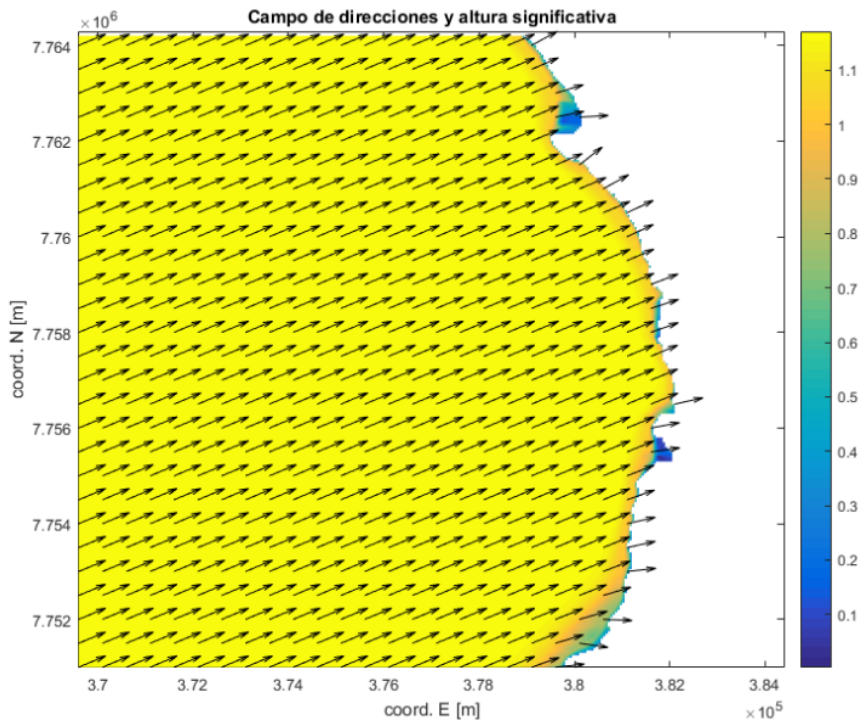
**Figura 9-108: Malla mediana - Dir: W, Tp: 16 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



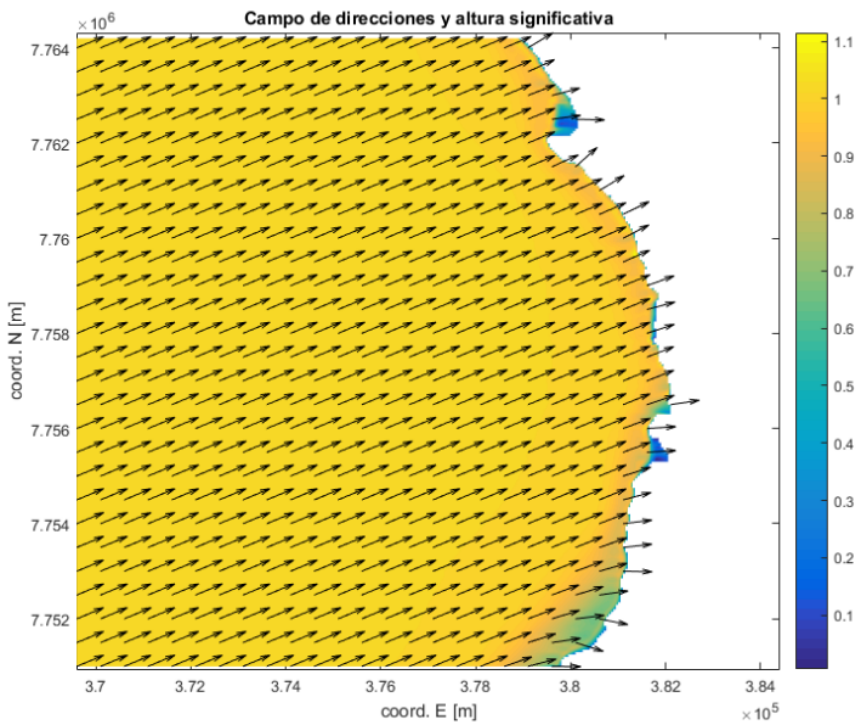
**Figura 9-109: Malla mediana - Dir: W, Tp: 18 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



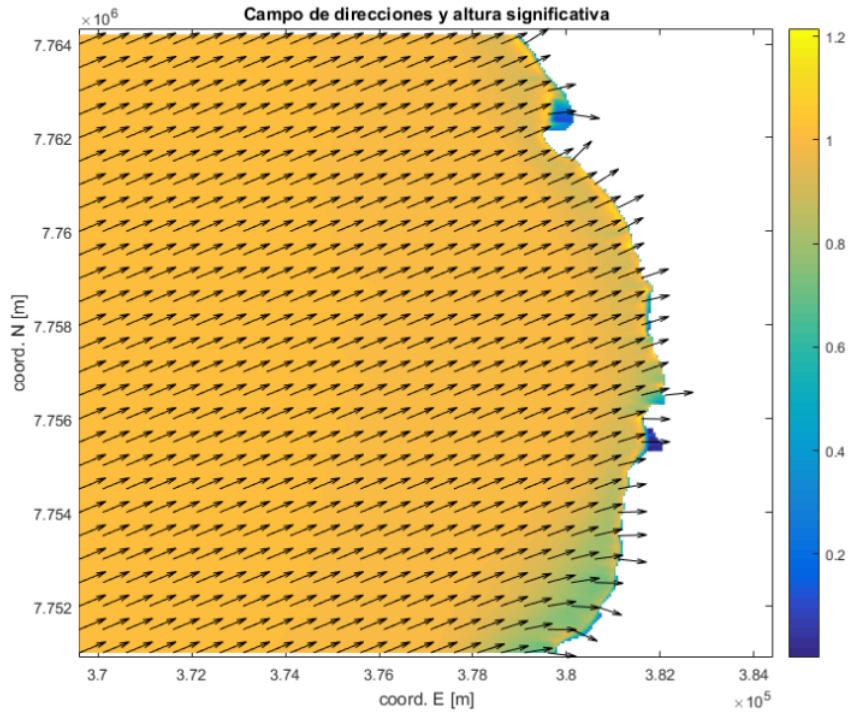
**Figura 9-110: Malla mediana - Dir: W, Tp: 20 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



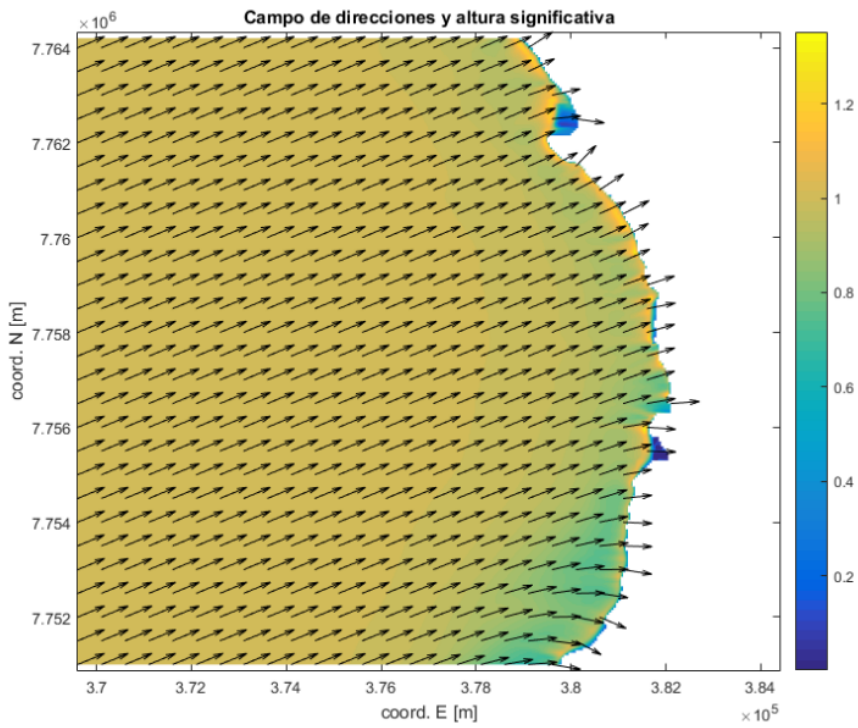
**Figura 9-111: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



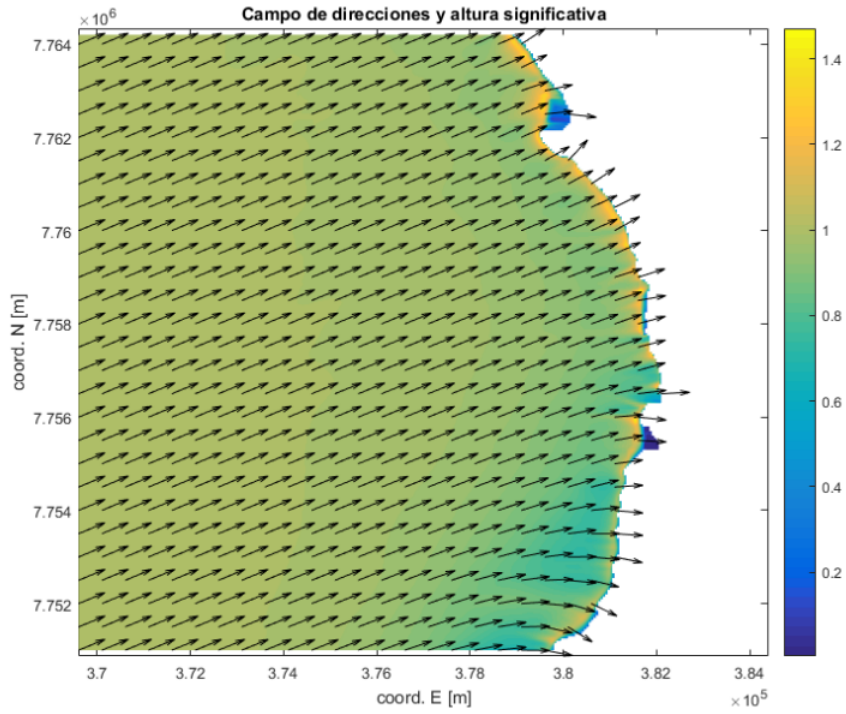
**Figura 9-112: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



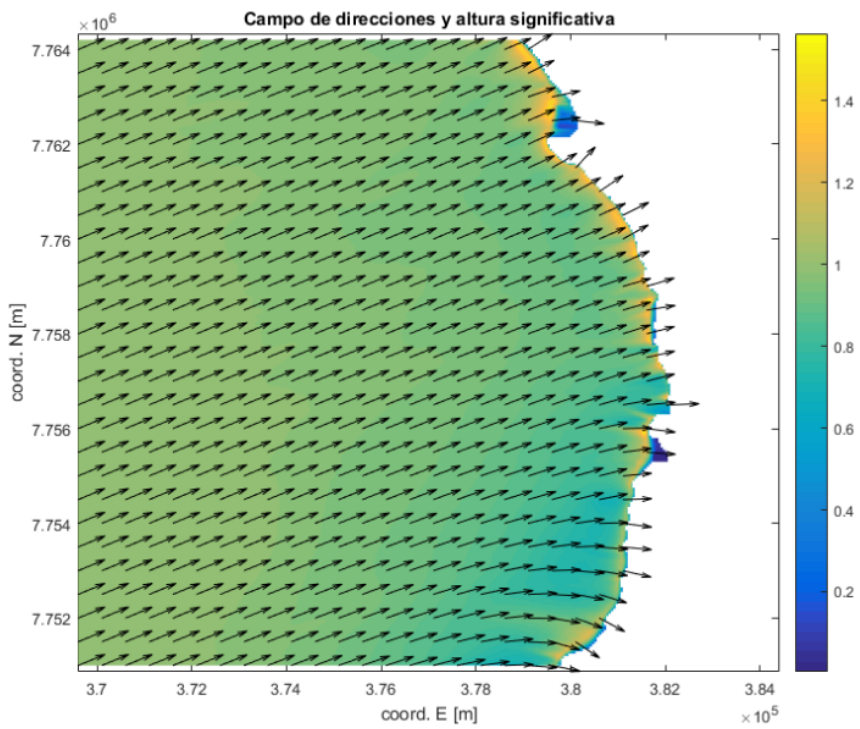
**Figura 9-113: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



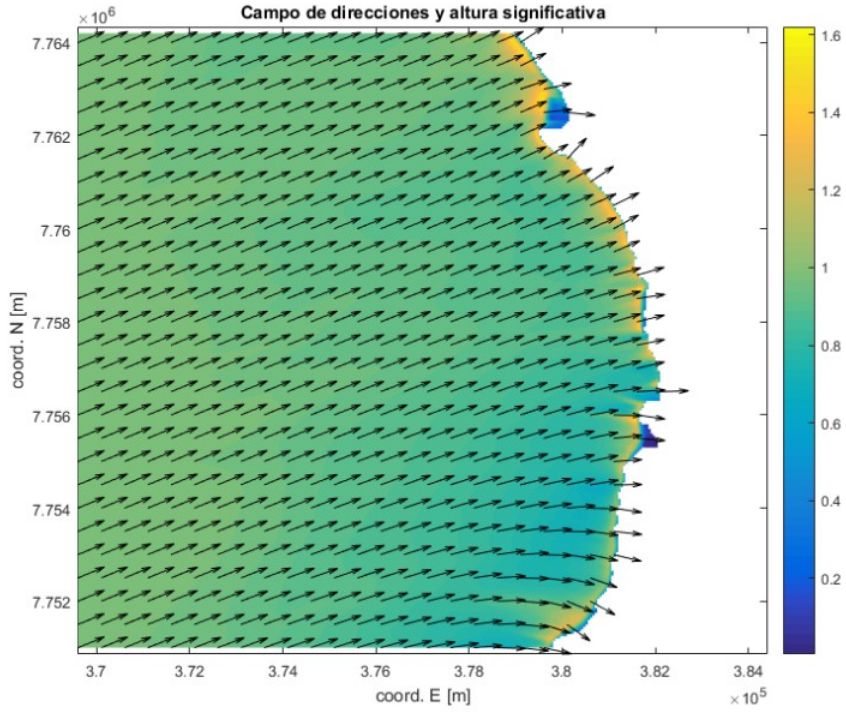
**Figura 9-114: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



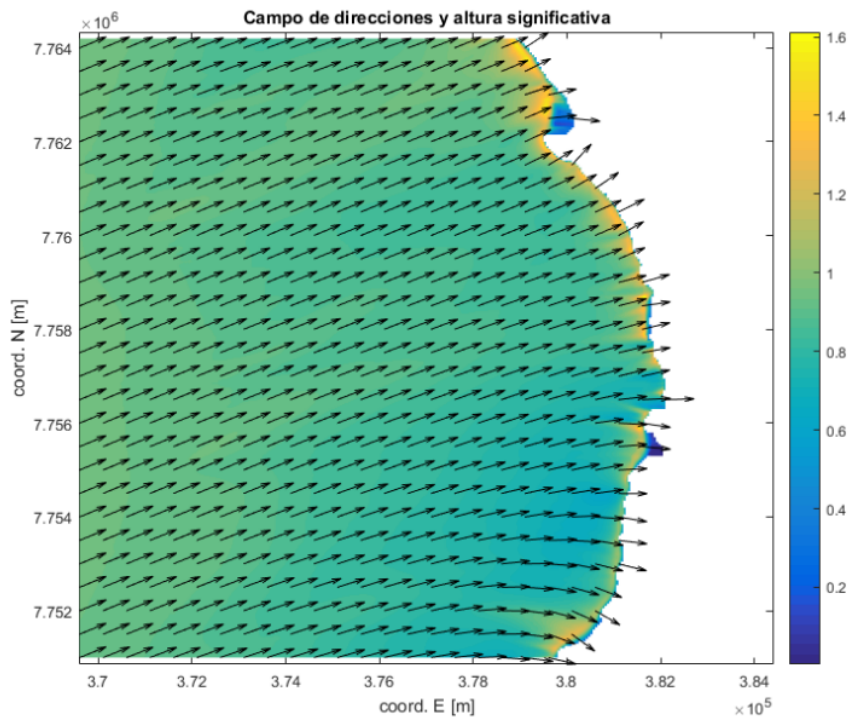
**Figura 9-115: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



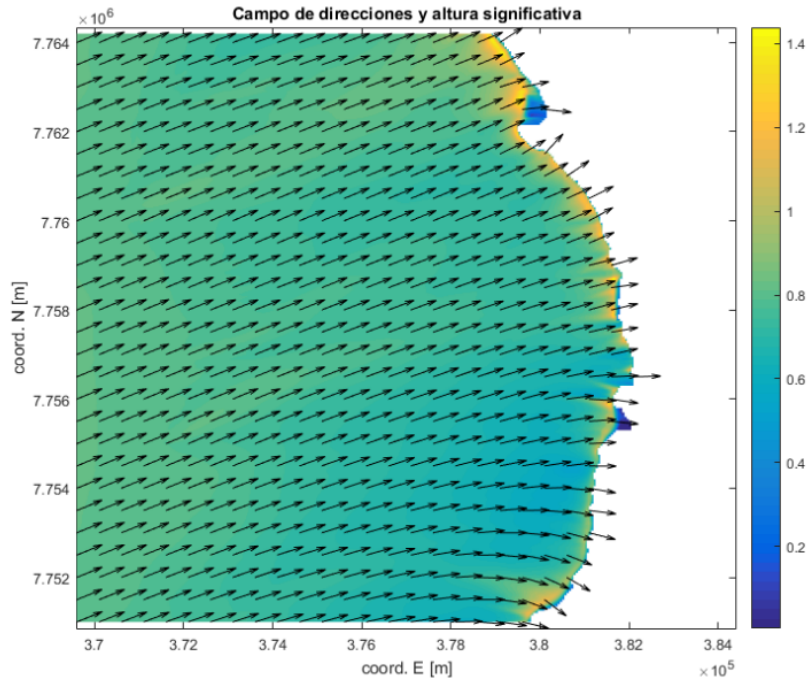
**Figura 9-116: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



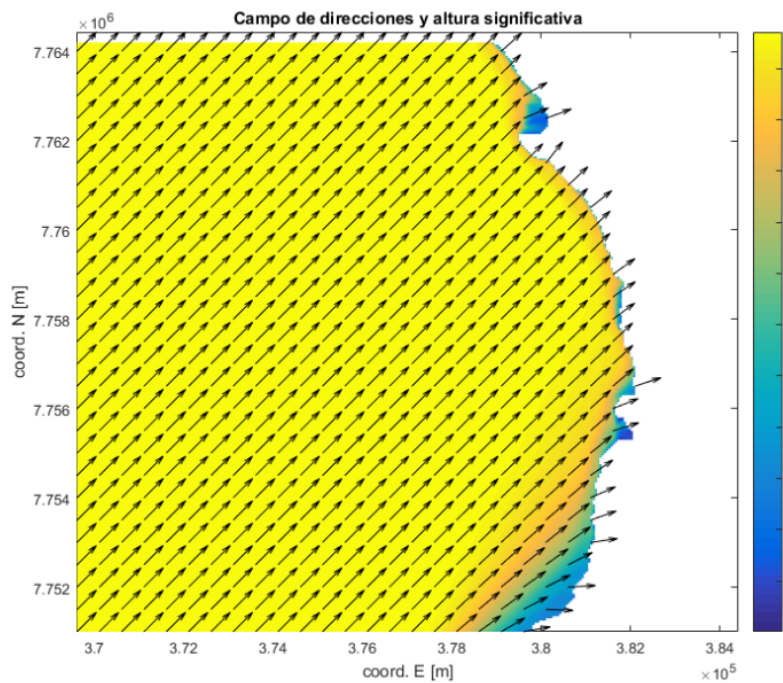
**Figura 9-117: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



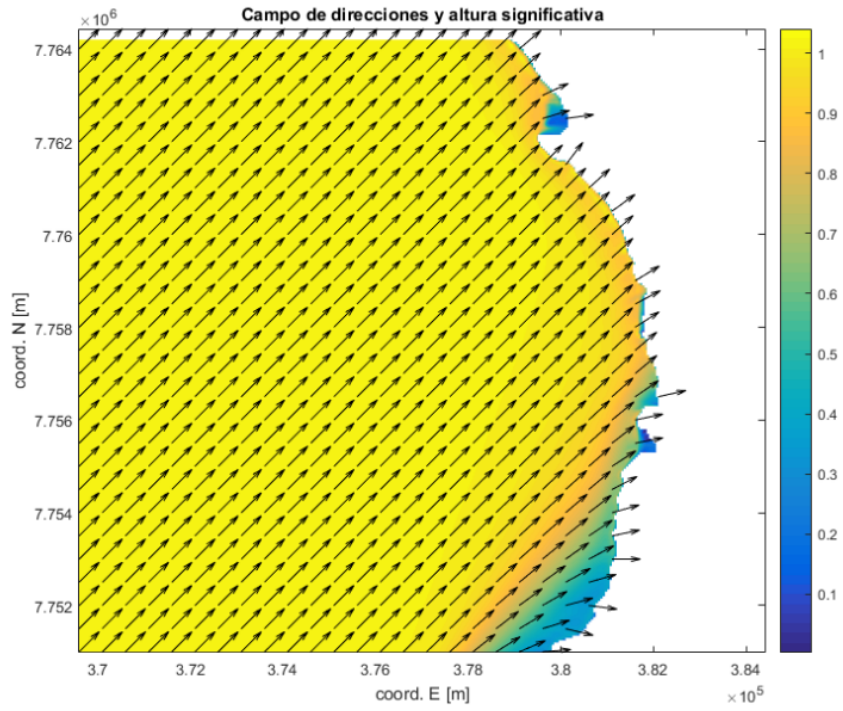
**Figura 9-118: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



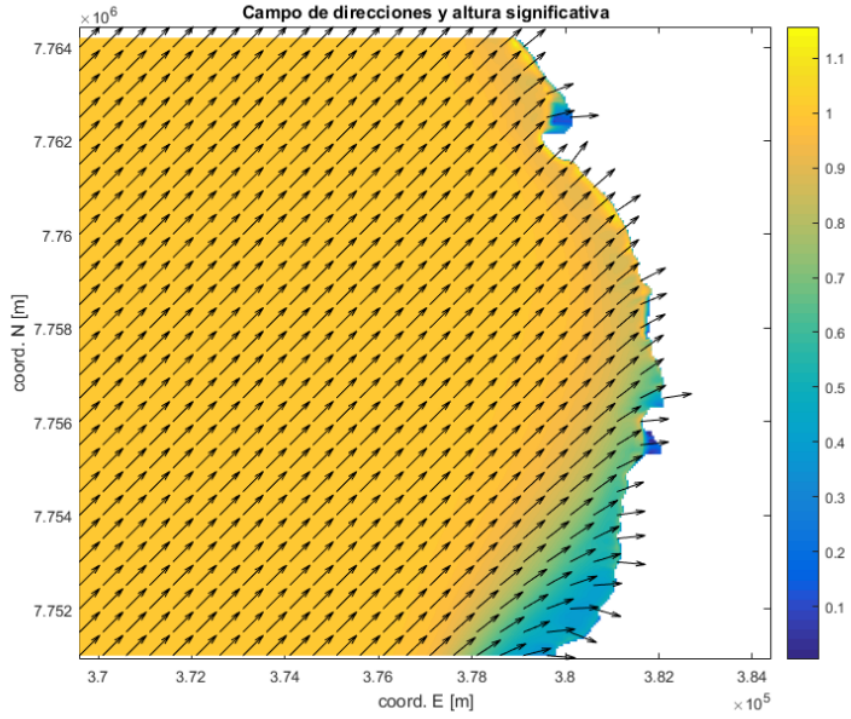
**Figura 9-119: Malla mediana - Dir: WSW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



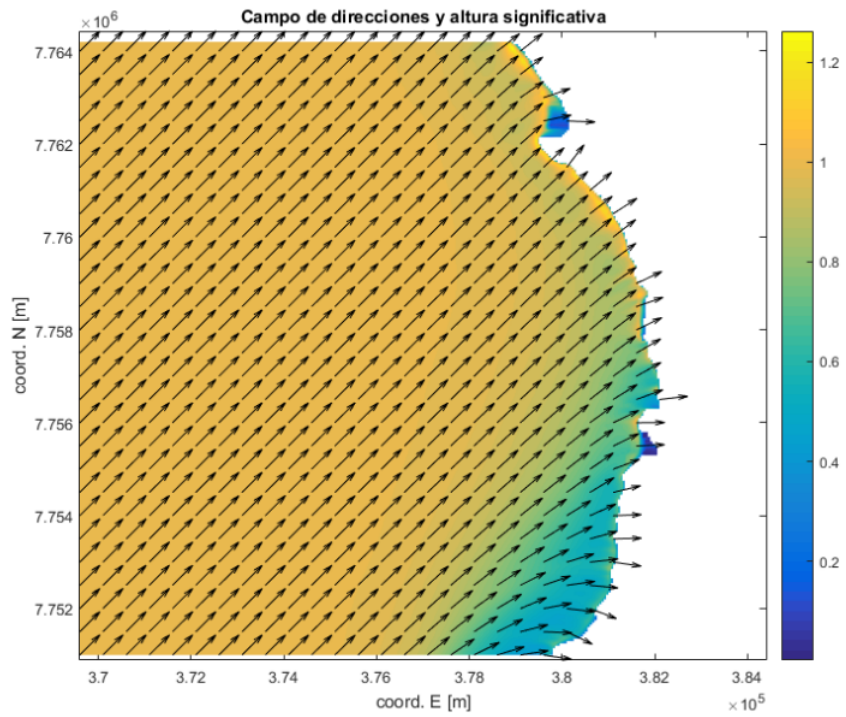
**Figura 9-120: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



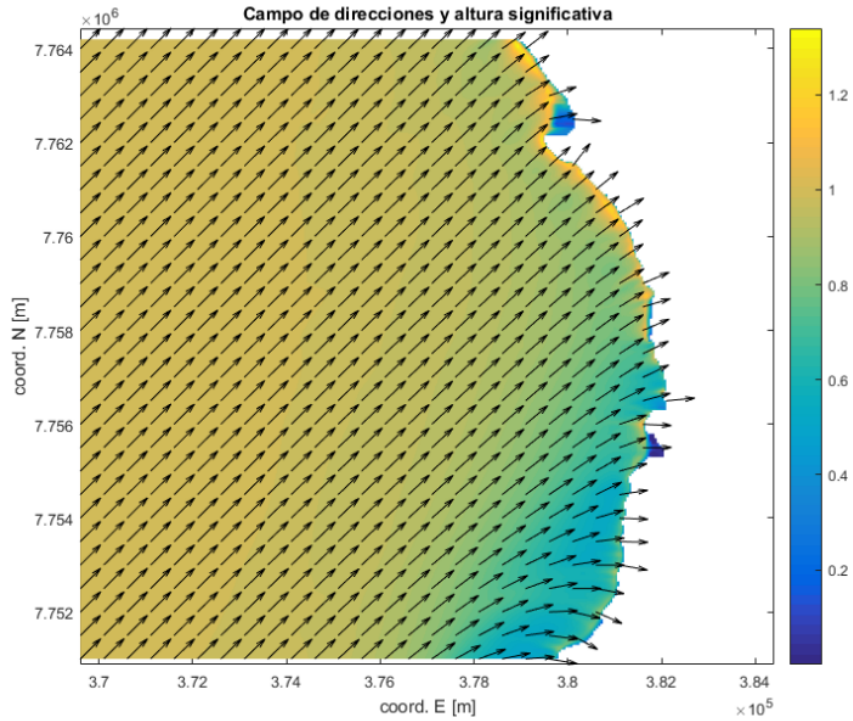
**Figura 9-121: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



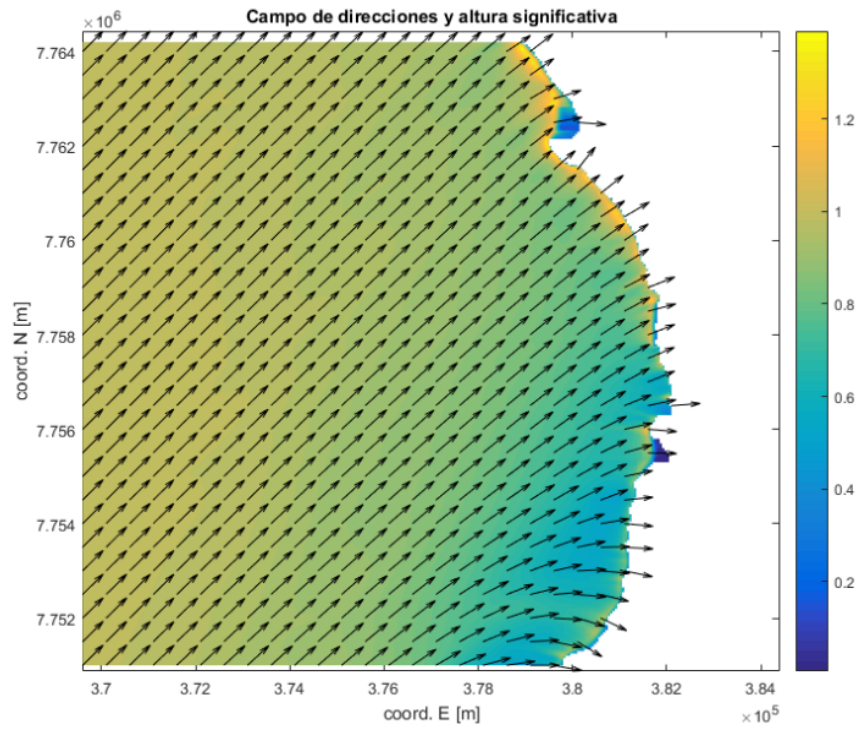
**Figura 9-122: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



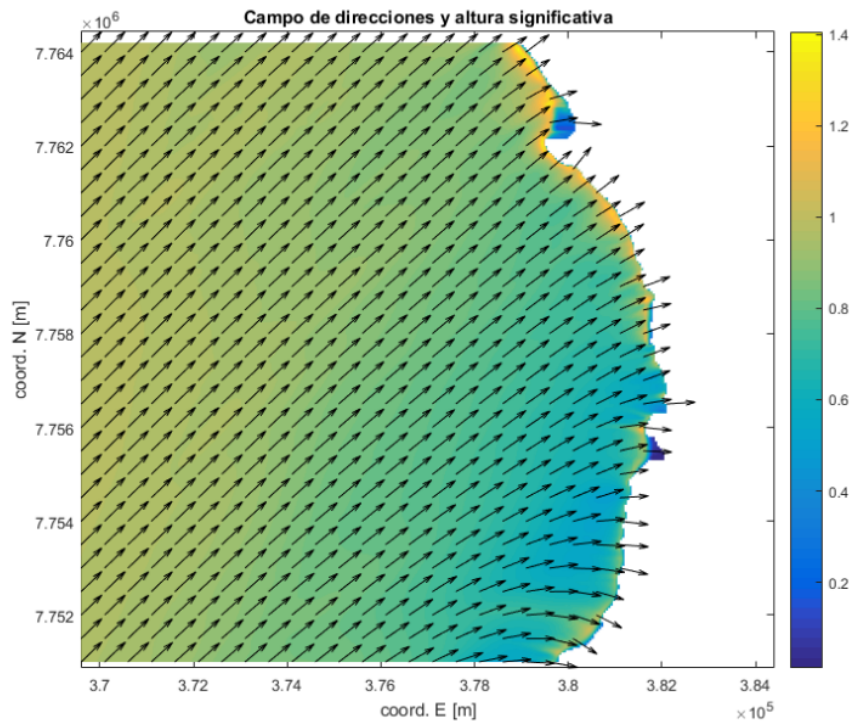
**Figura 9-123: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



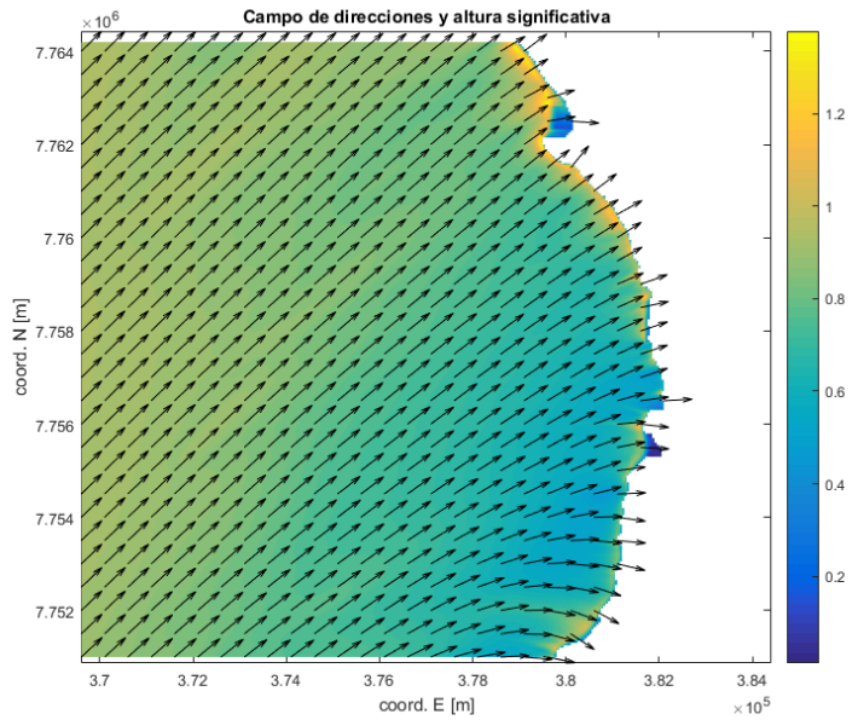
**Figura 9-124: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



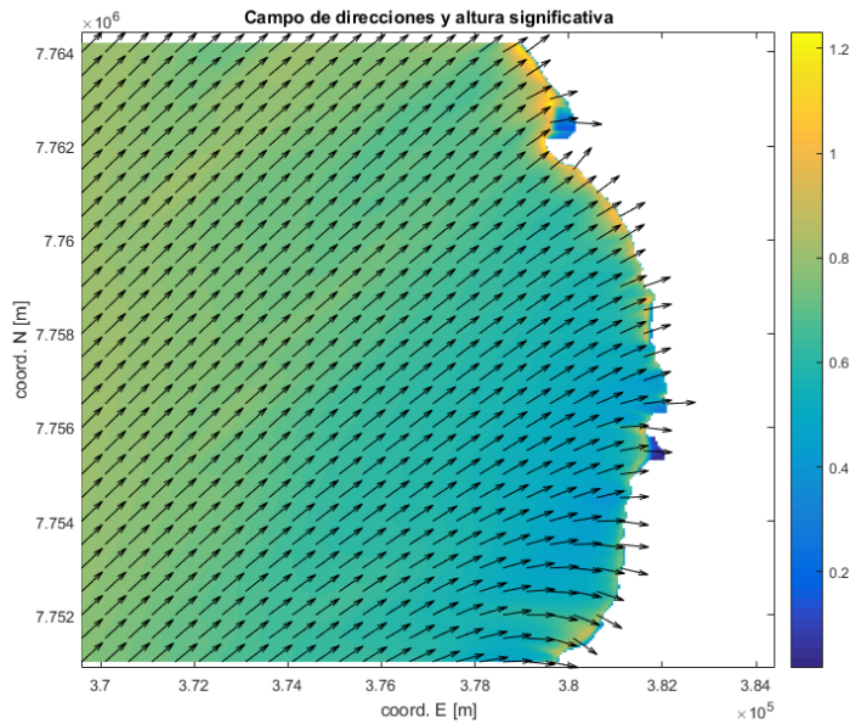
**Figura 9-125: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



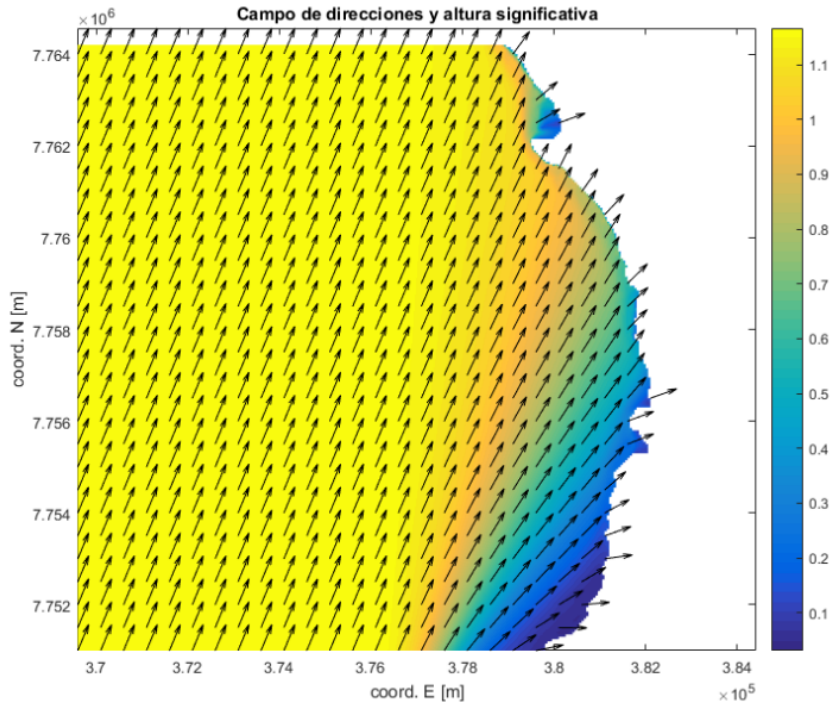
**Figura 9-126: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



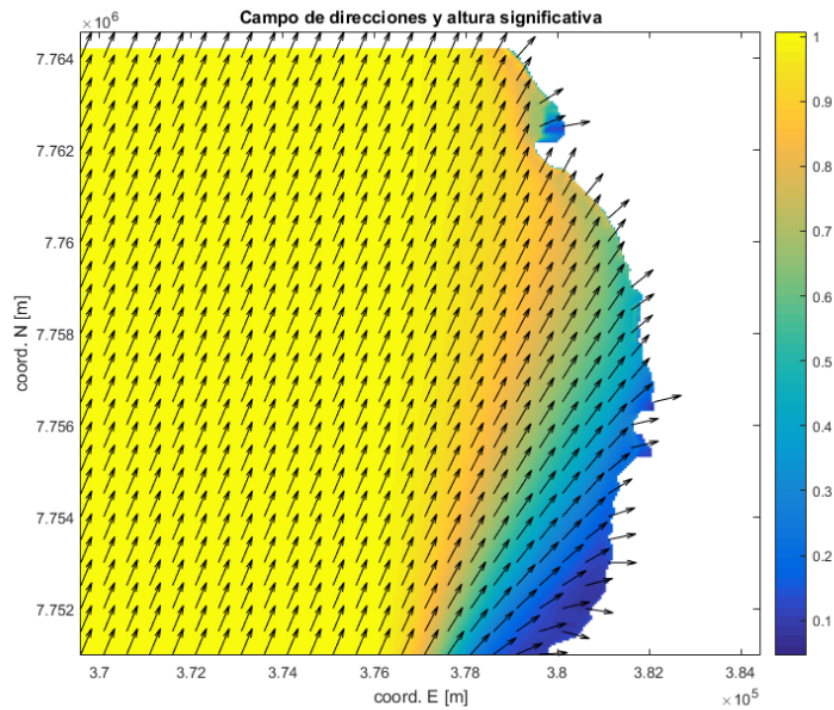
**Figura 9-127: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 18 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



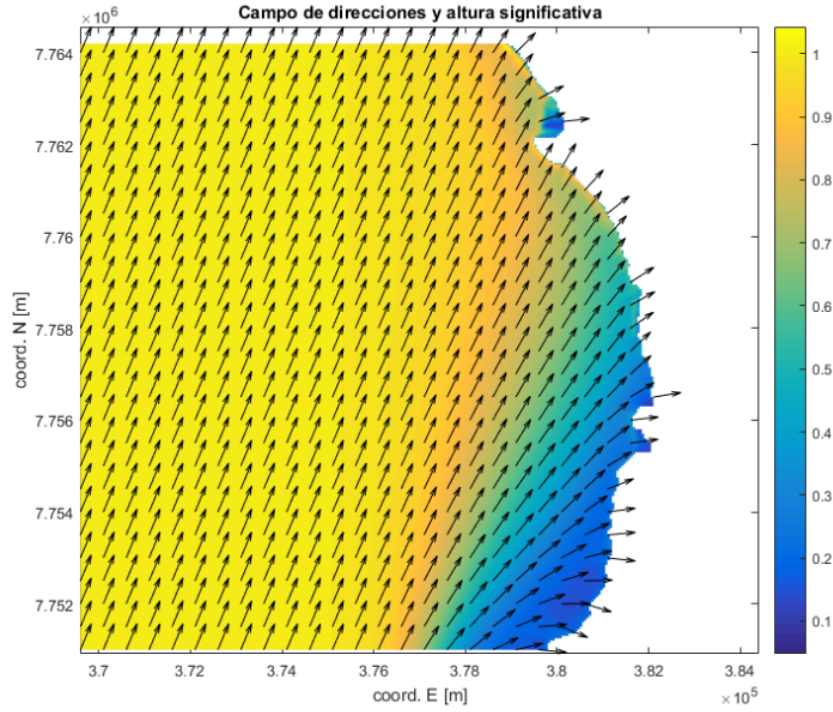
**Figura 9-128: Malla mediana - Dir: SW, Tp: 20 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



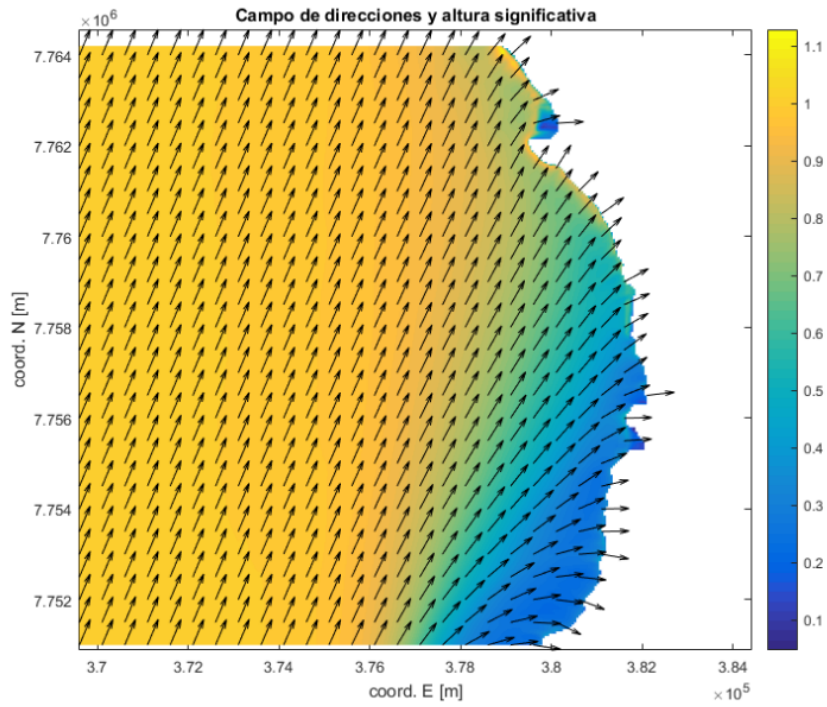
**Figura 9-129: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



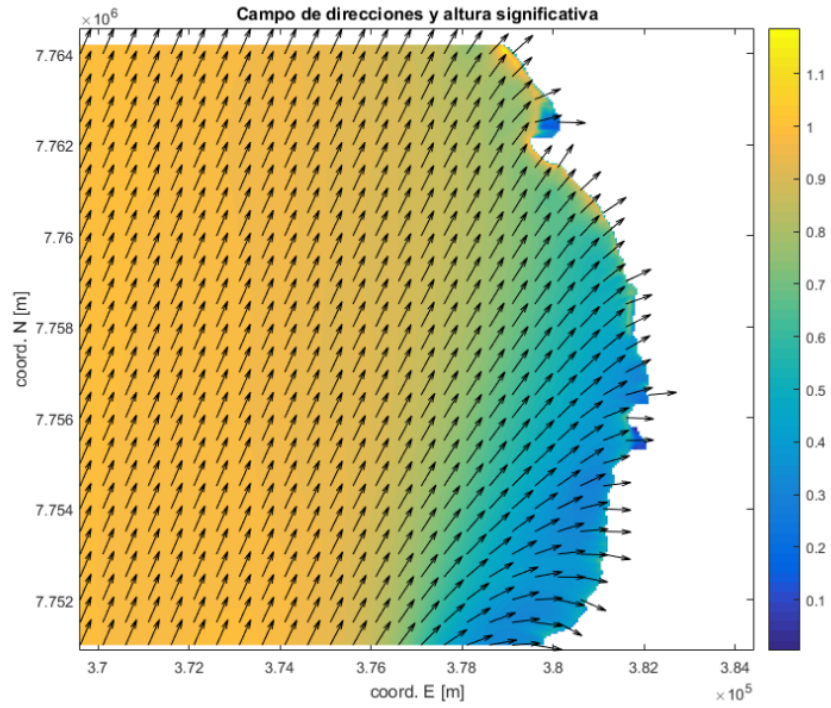
**Figura 9-130: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



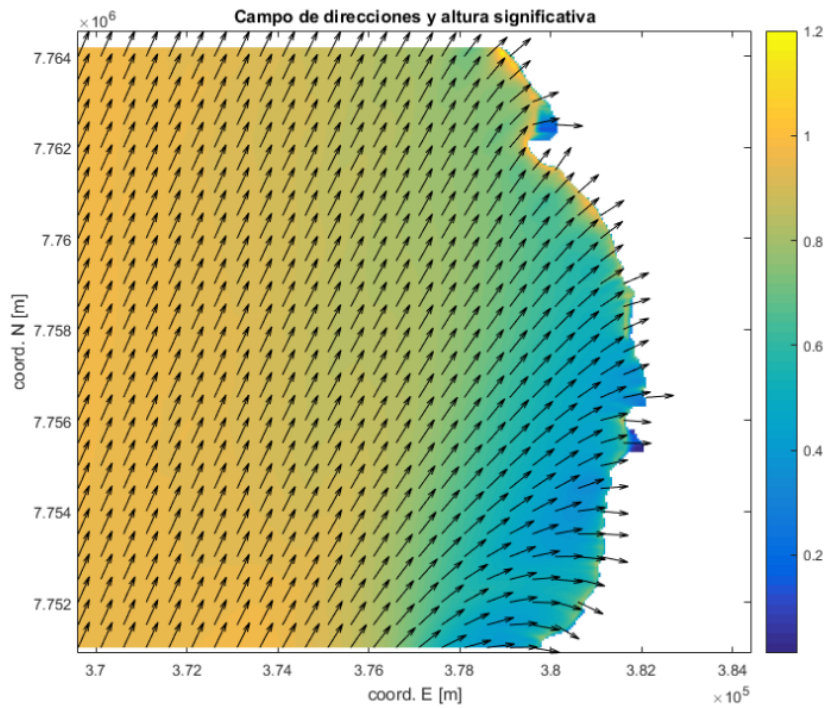
**Figura 9-131: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



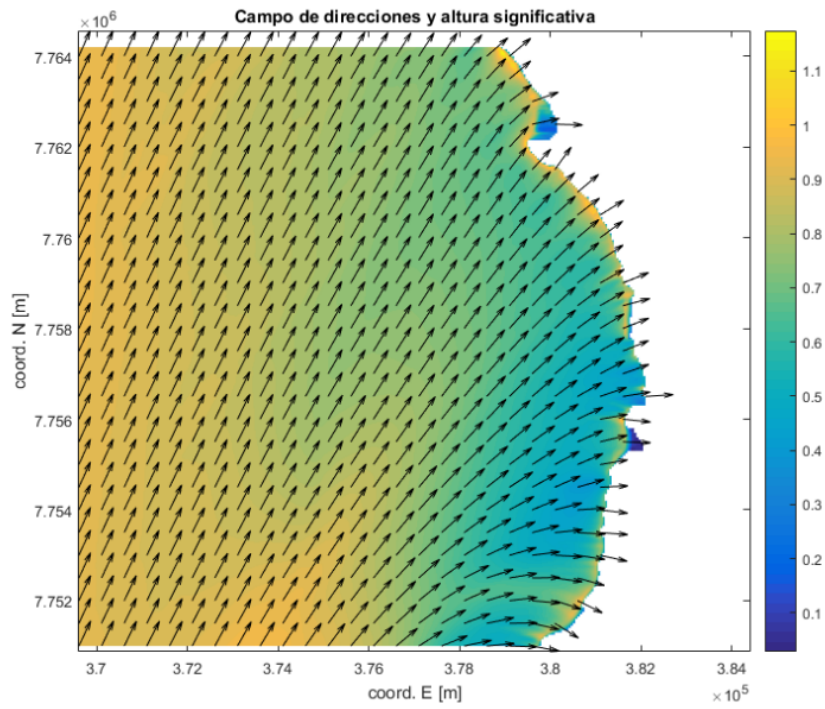
**Figura 9-132: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



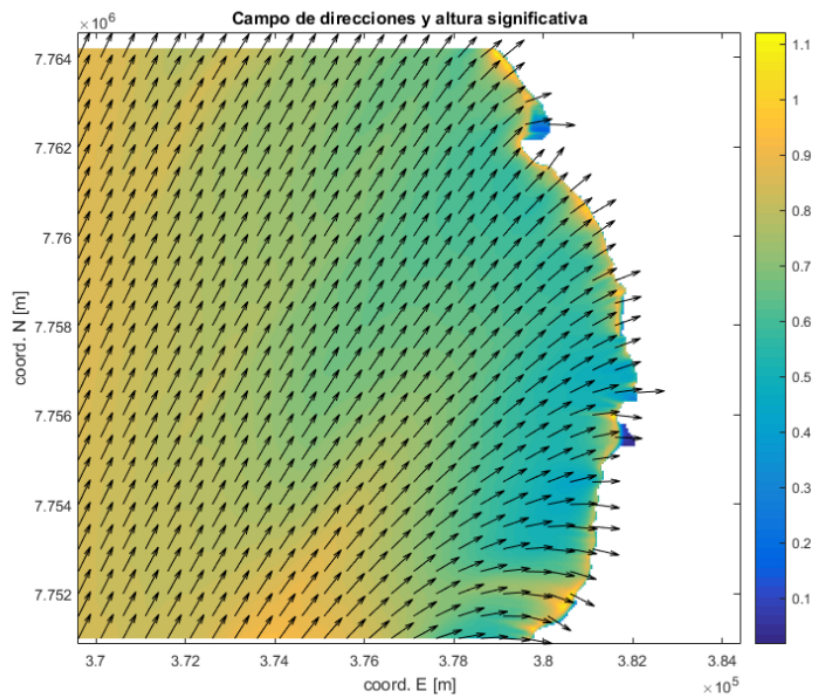
**Figura 9-133: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



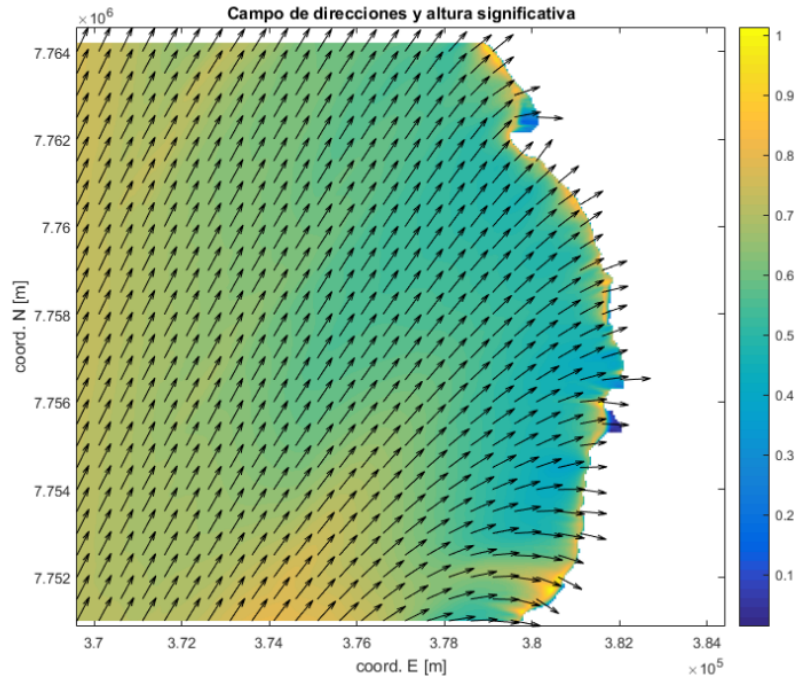
**Figura 9-134: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



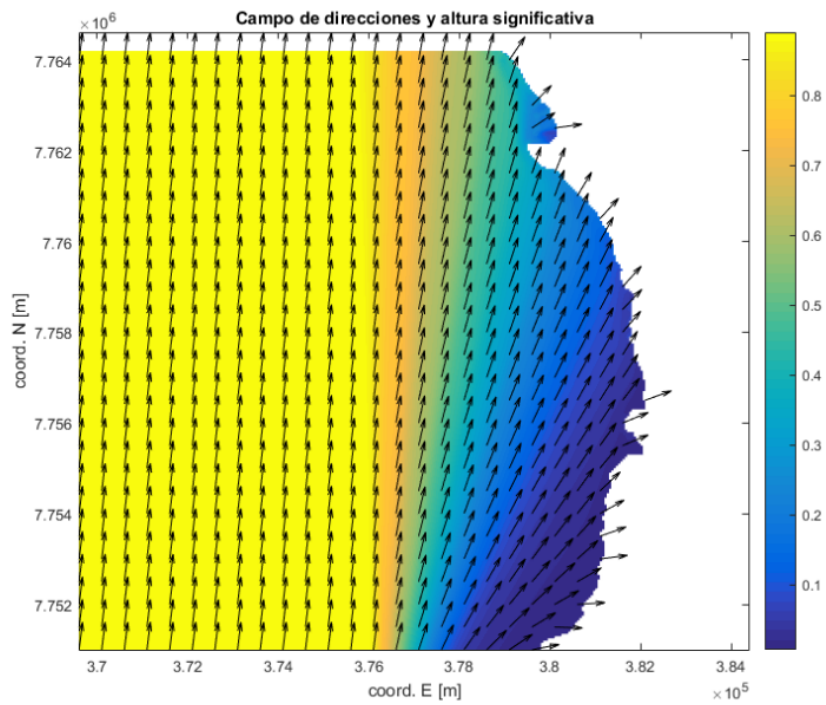
**Figura 9-135: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 16 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



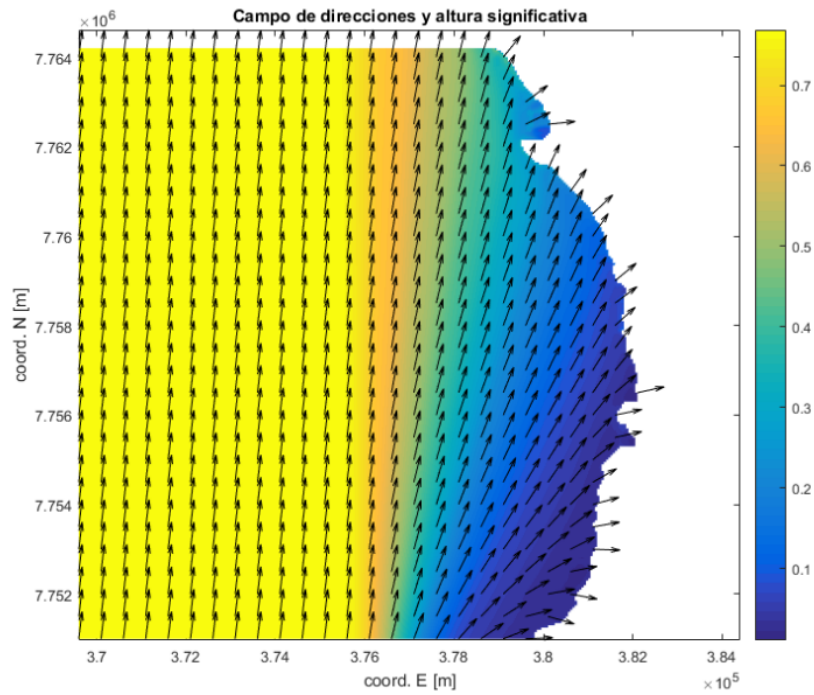
**Figura 9-136: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 18 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



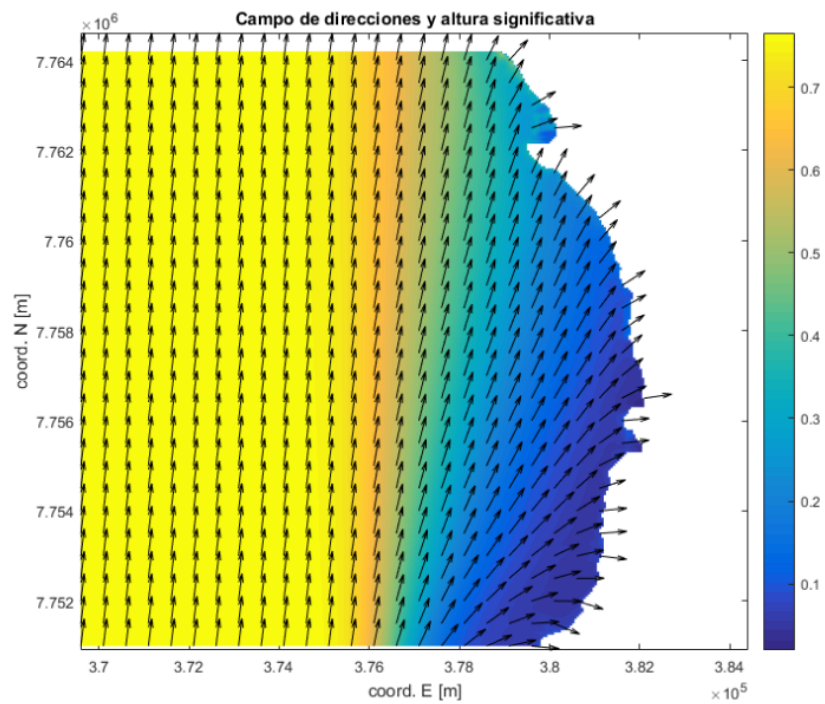
**Figura 9-137: Malla mediana - Dir: SSW, Tp: 20 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



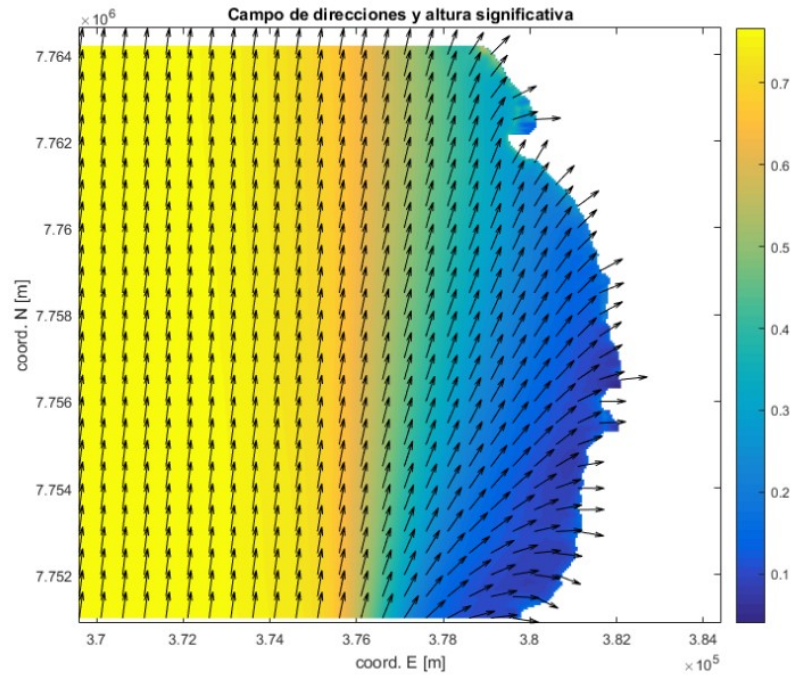
**Figura 9-138: Malla mediana - Dir: S, Tp: 4 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



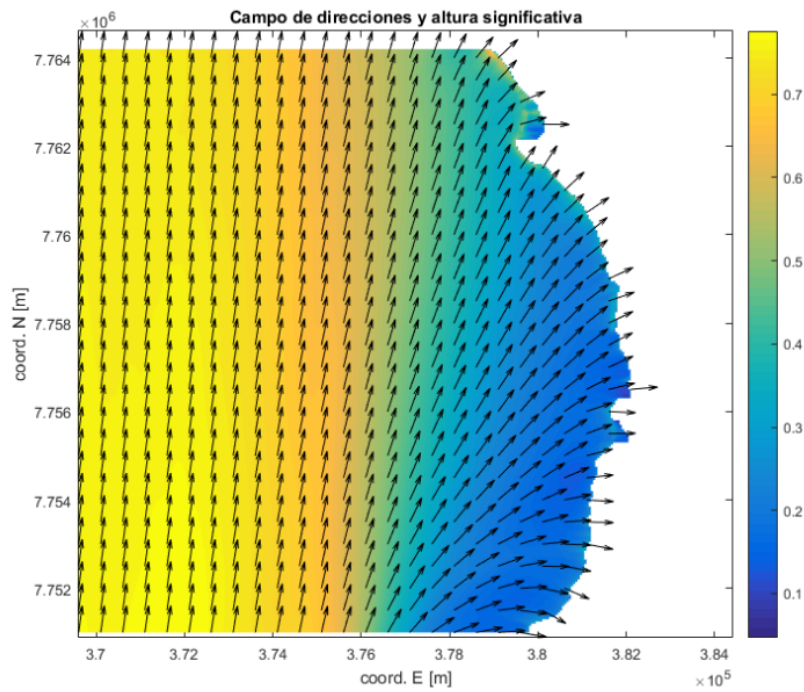
**Figura 9-139: Malla mediana - Dir: S, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



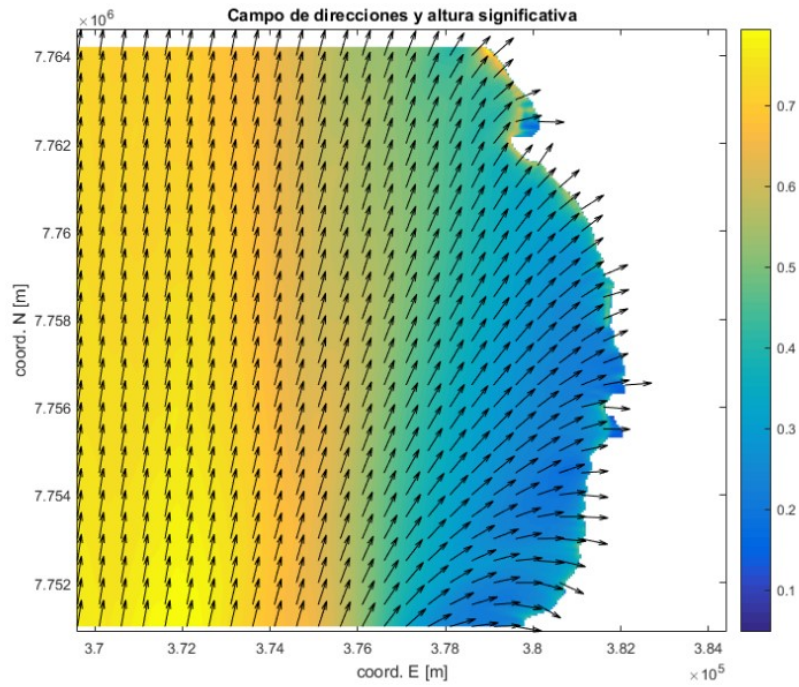
**Figura 9-140: Malla mediana - Dir: S, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



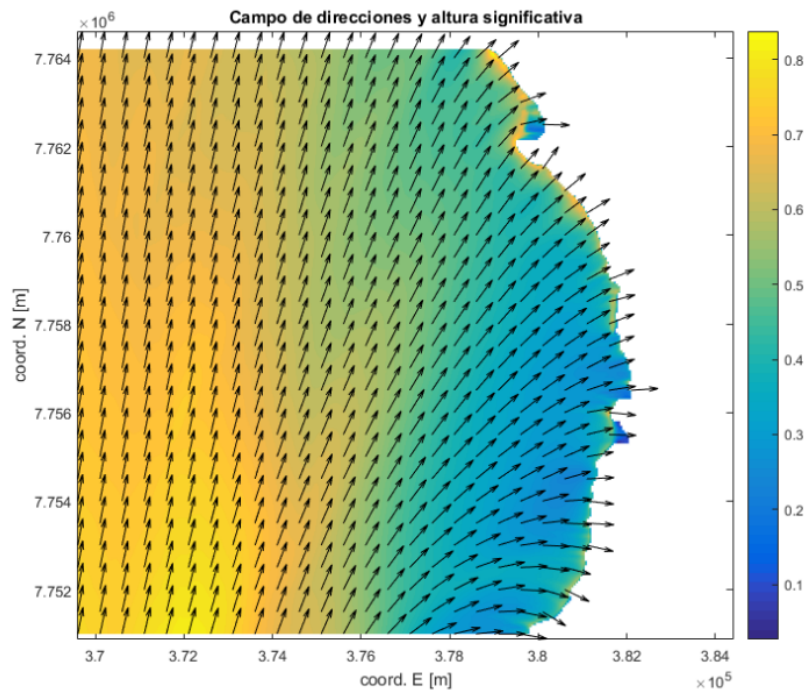
**Figura 9-141: Malla mediana - Dir: S, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



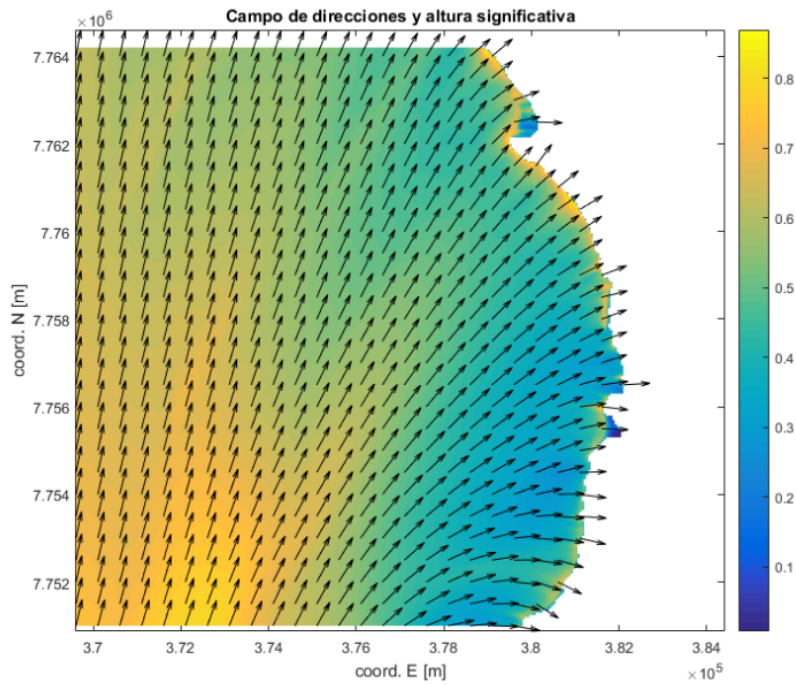
**Figura 9-142: Malla mediana - Dir: S, Tp: 12 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



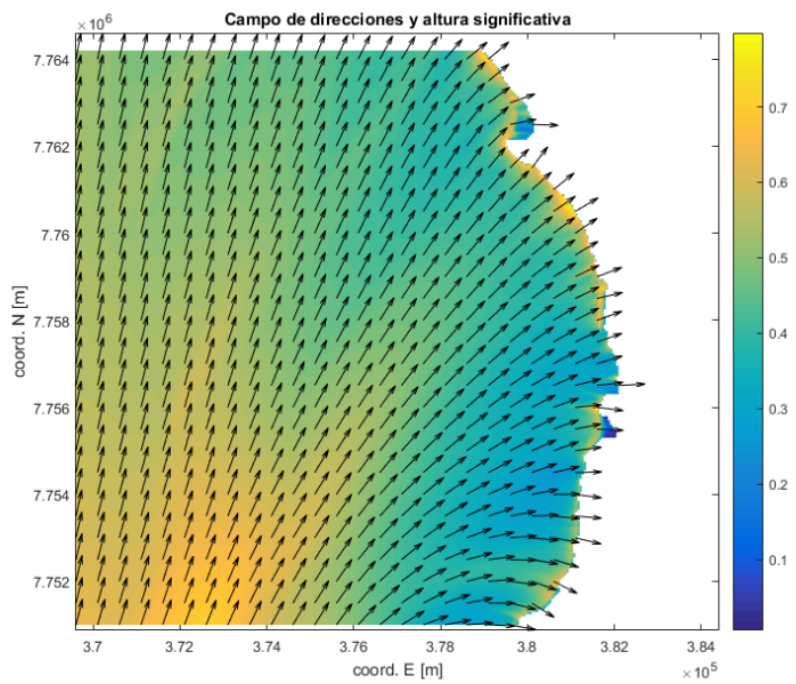
**Figura 9-143: Malla mediana - Dir: S, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-144: Malla mediana - Dir: S, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-145: Malla mediana - Dir: S, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-146: Malla mediana - Dir: S, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.

## MALLA FINA.

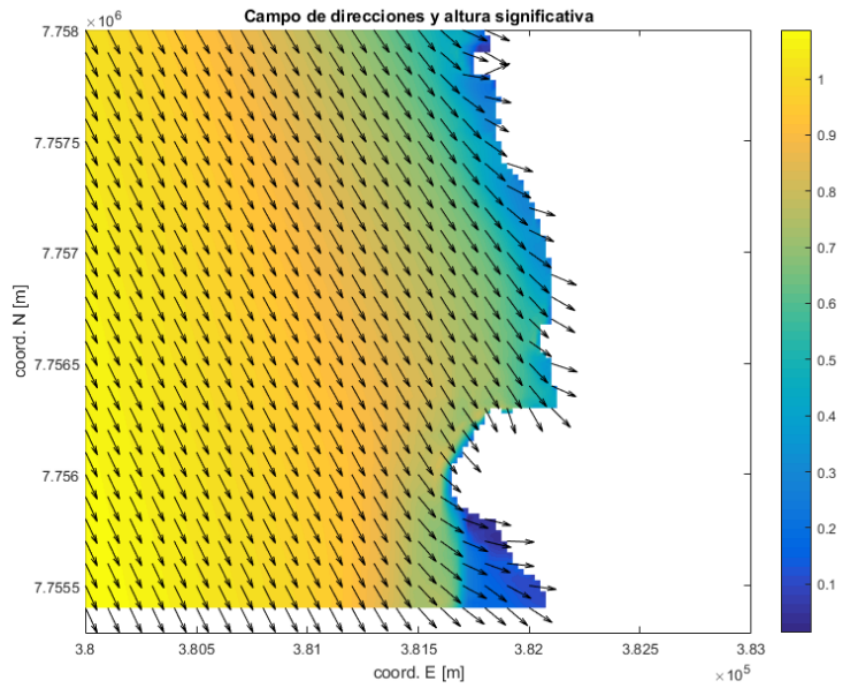


Figura 9-147: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 4 [s].  
Fuente: Elaboración propia.

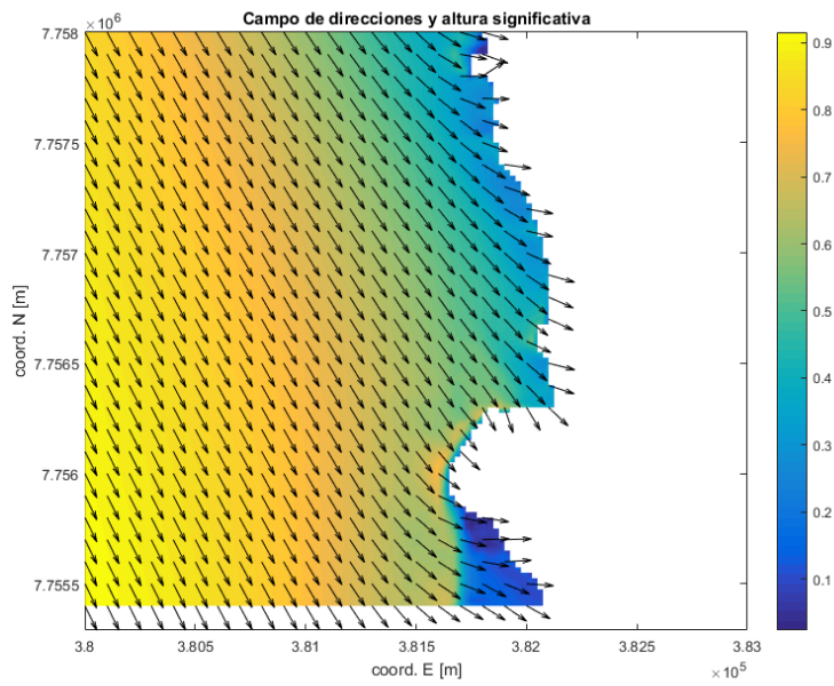
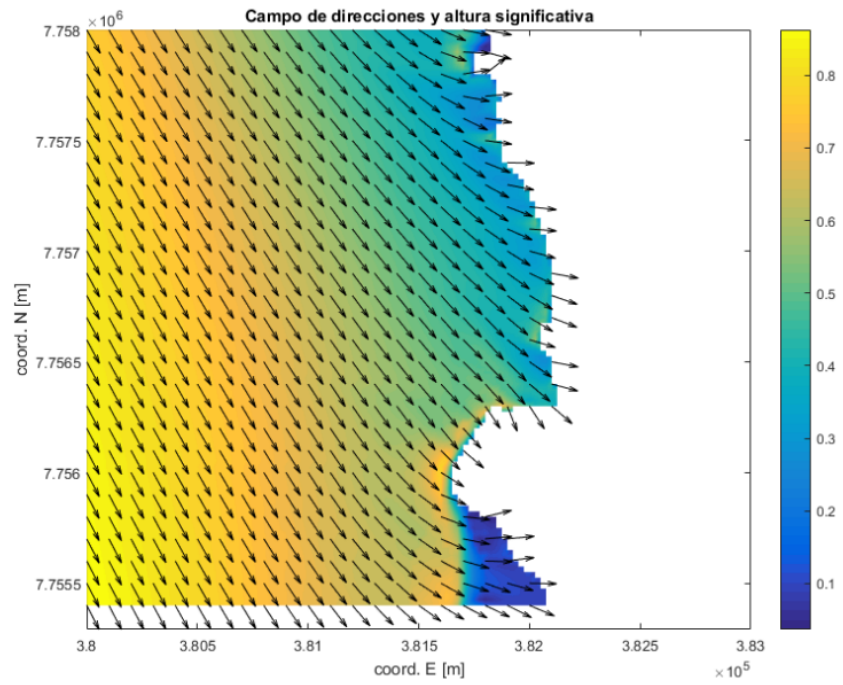
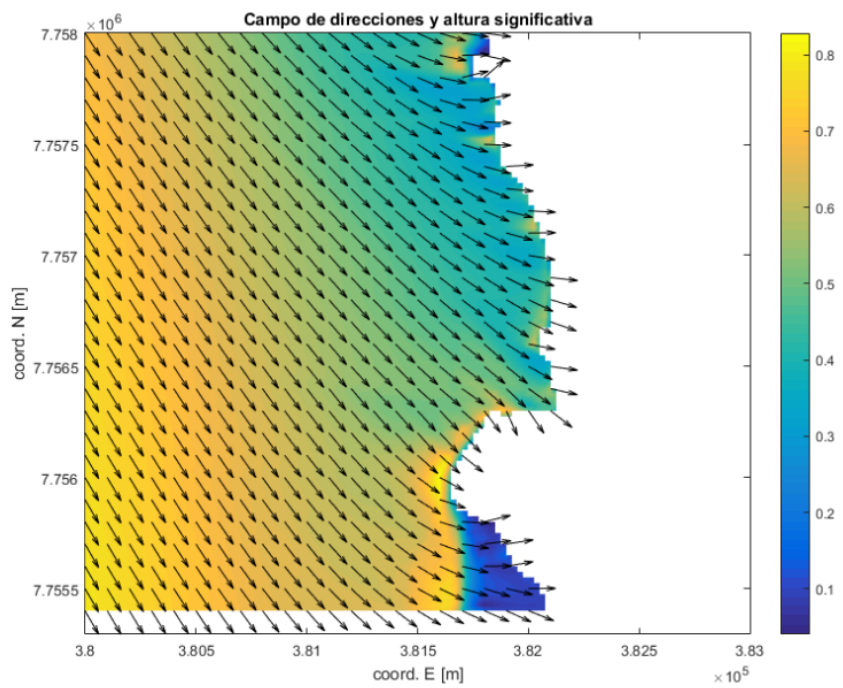


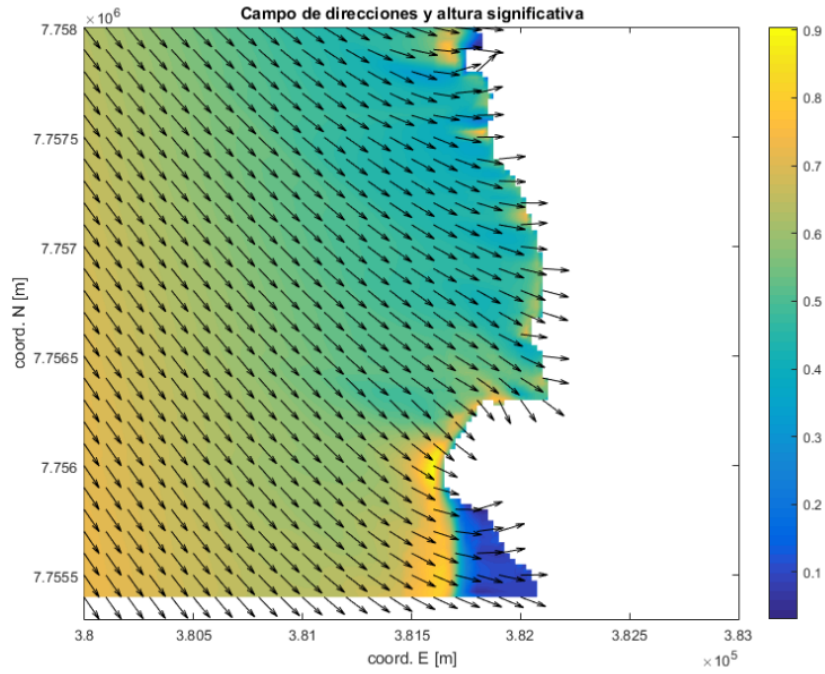
Figura 9-148: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 6 [s].  
Fuente: Elaboración propia.



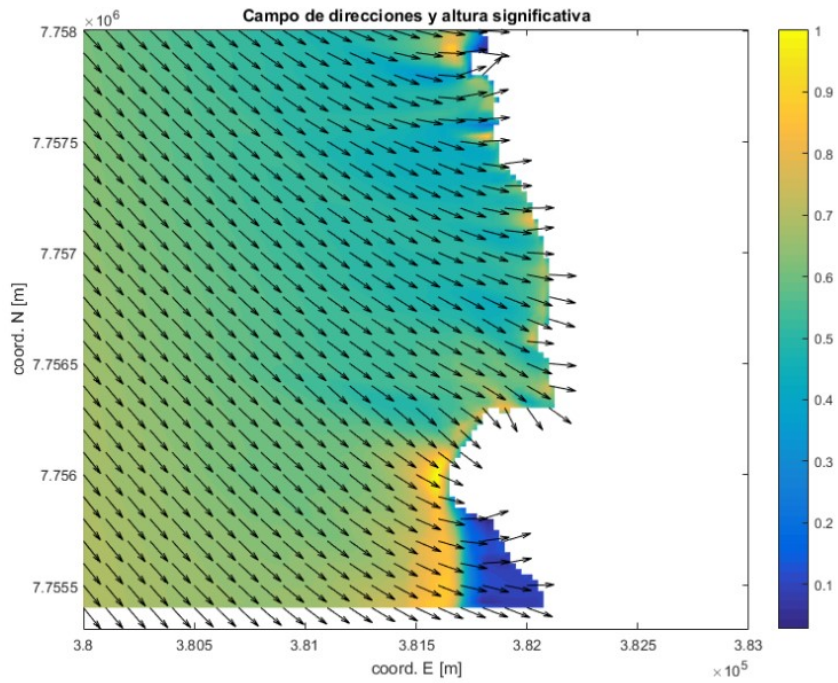
**Figura 9-149: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



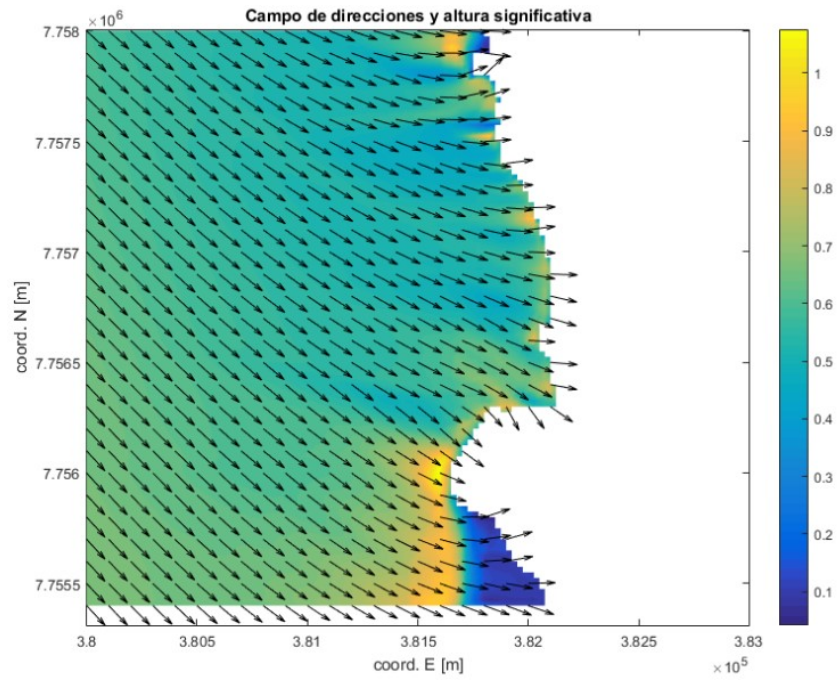
**Figura 9-150: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



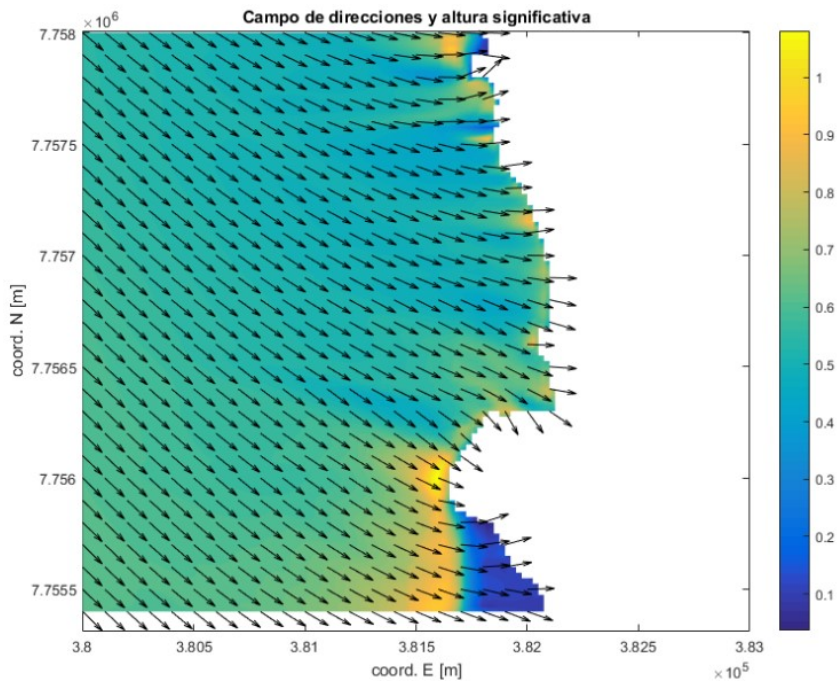
**Figura 9-151: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 12 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



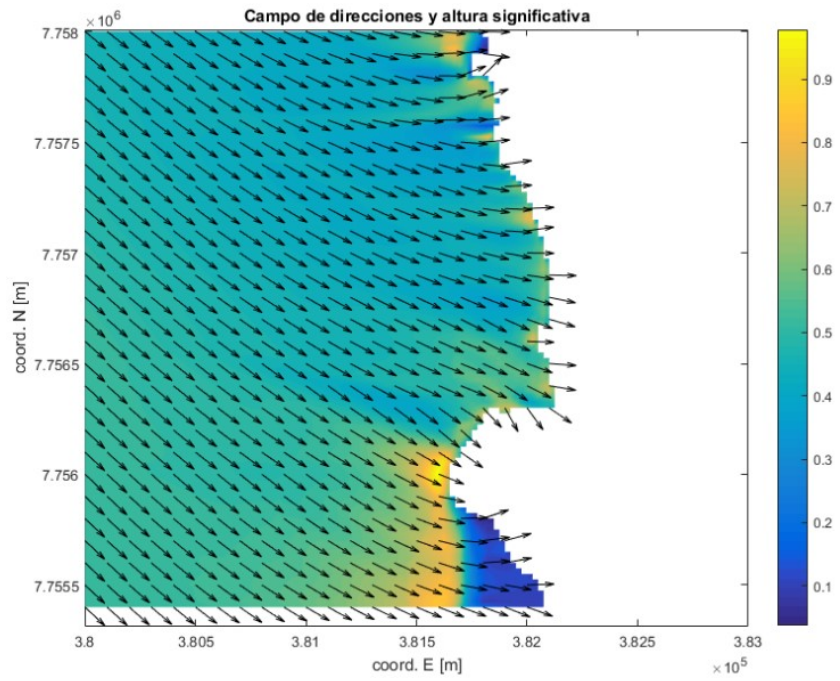
**Figura 9-152: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 14 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



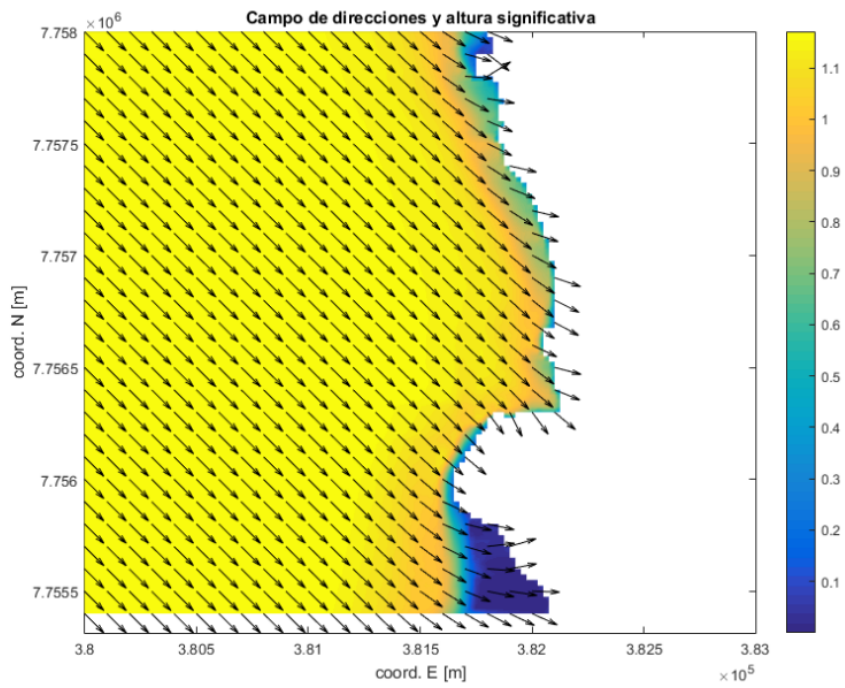
**Figura 9-153: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



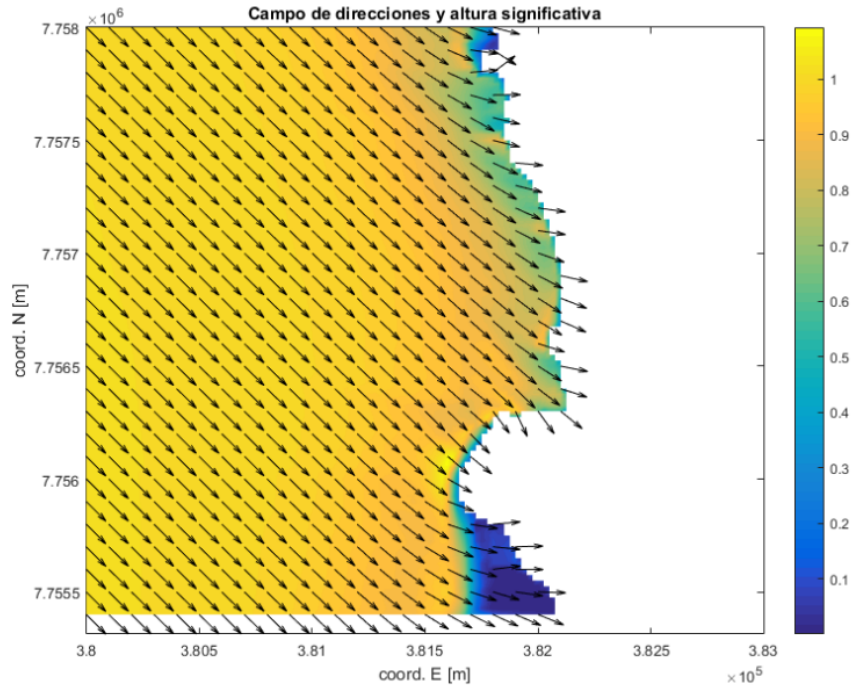
**Figura 9-154: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



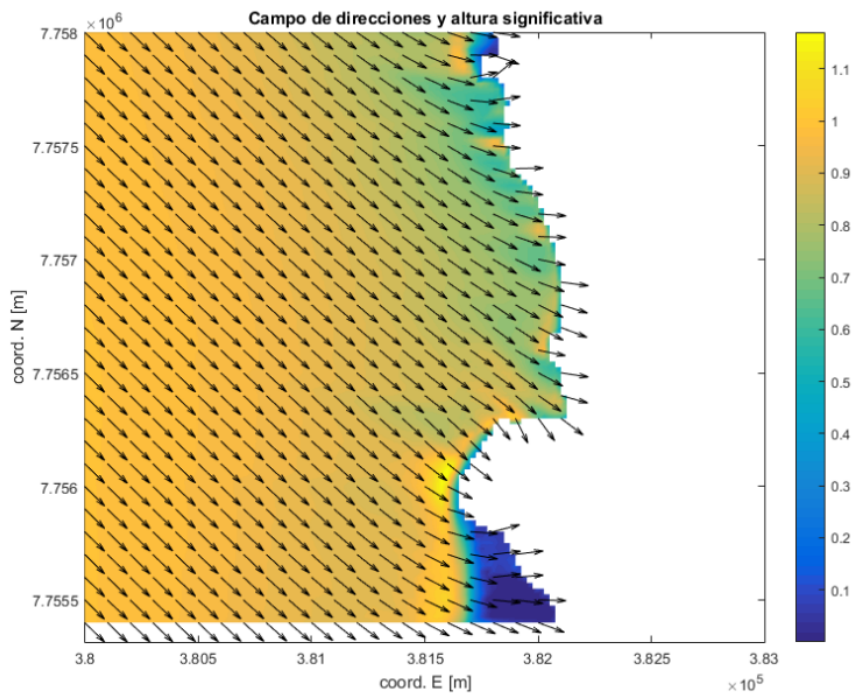
**Figura 9-155: Malla fina - Dir: NNW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



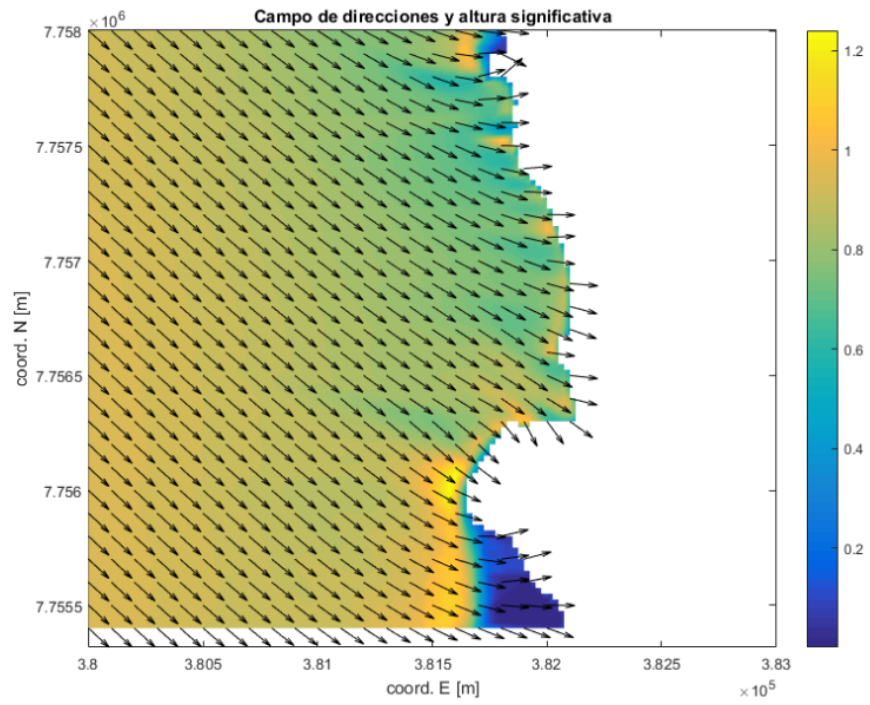
**Figura 9-156: Malla fina - Dir: NW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



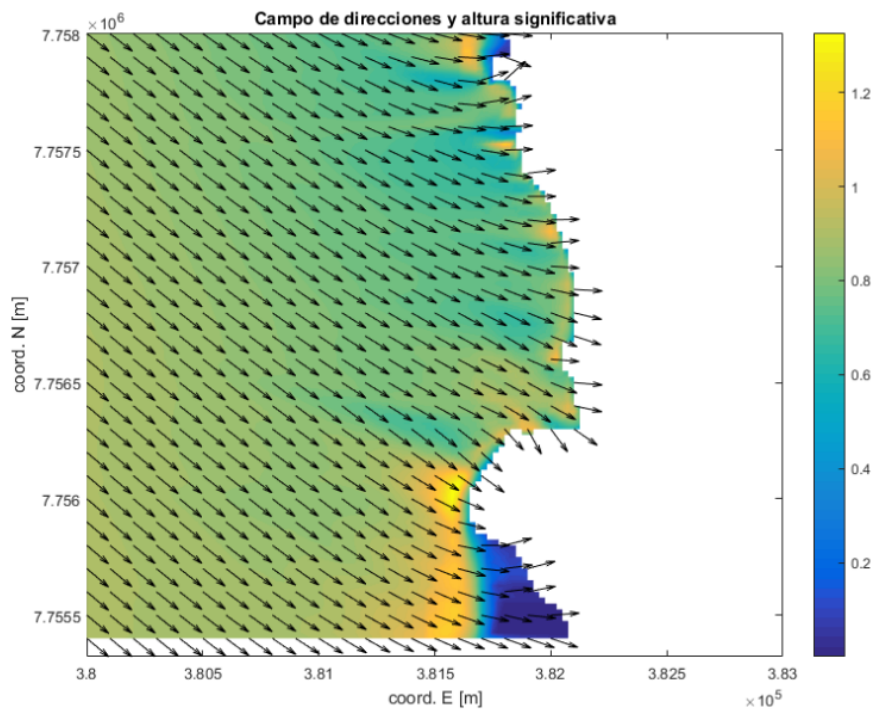
**Figura 9-157: Malla fina - Dir: NW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



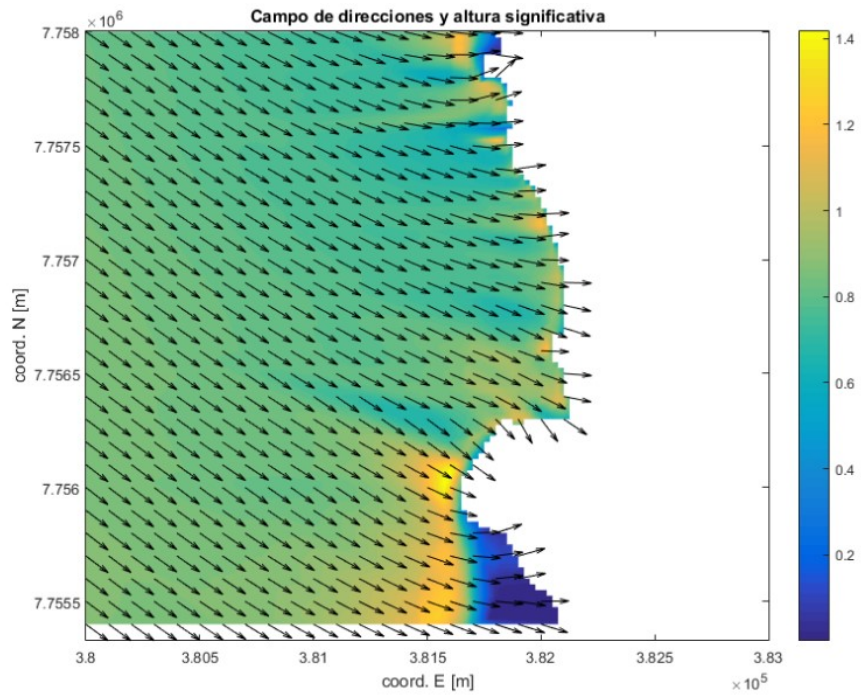
**Figura 9-158: Malla fina - Dir: NW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



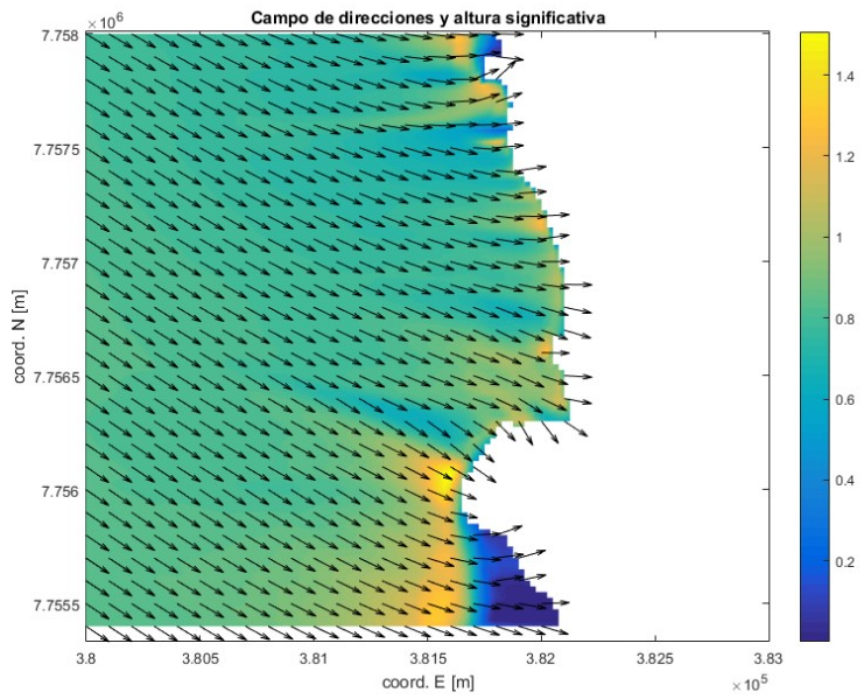
**Figura 9-159: Malla fina - Dir: NW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



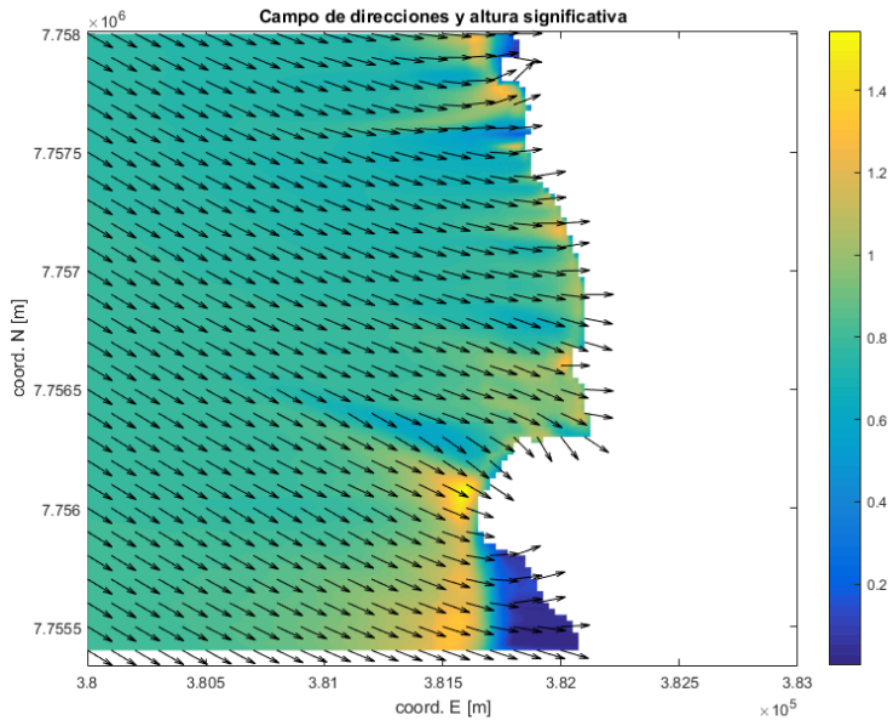
**Figura 9-160: Malla fina - Dir: NW, Tp: 12 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



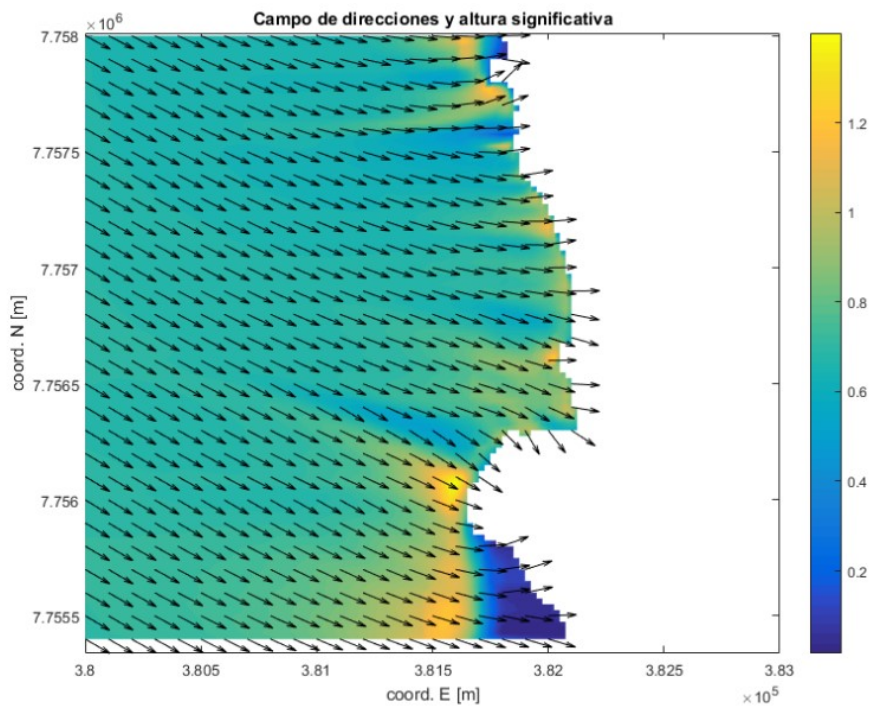
**Figura 9-161: Malla fina - Dir: NW, Tp: 14 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



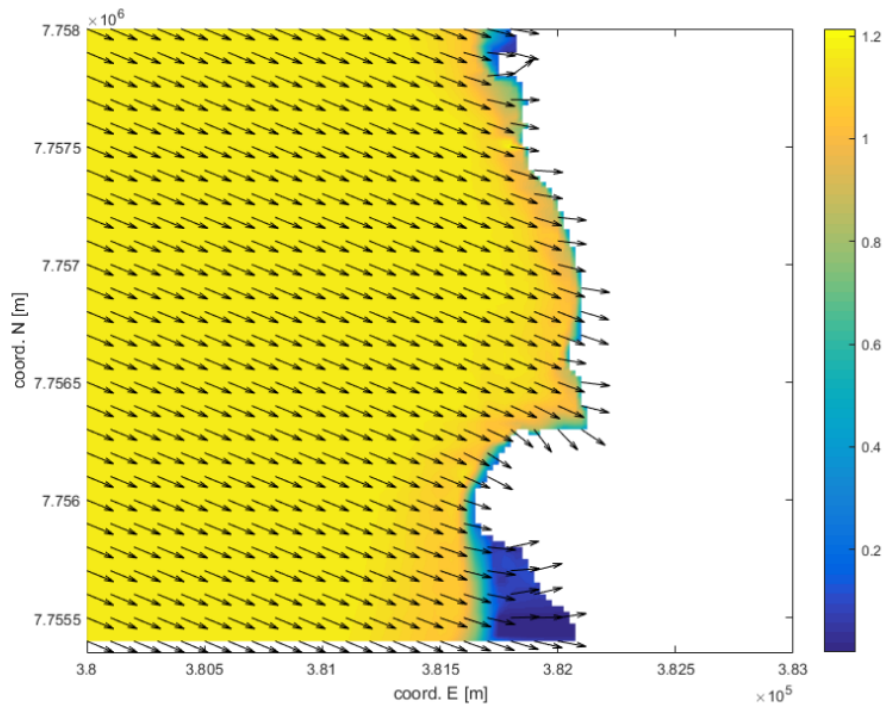
**Figura 9-162: Malla fina - Dir: NW, Tp: 16 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



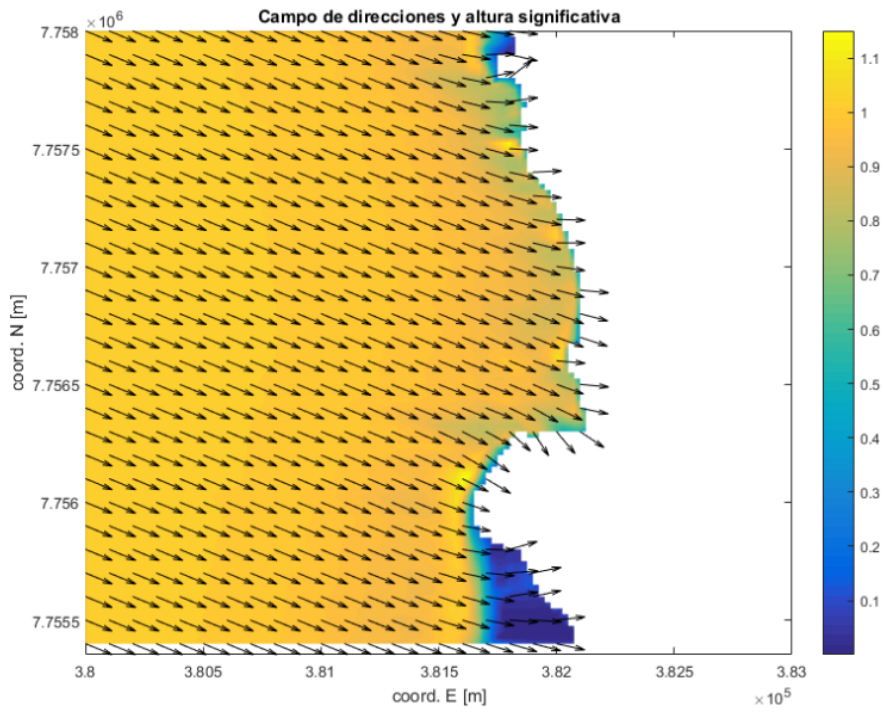
**Figura 9-163: Malla fina - Dir: NW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



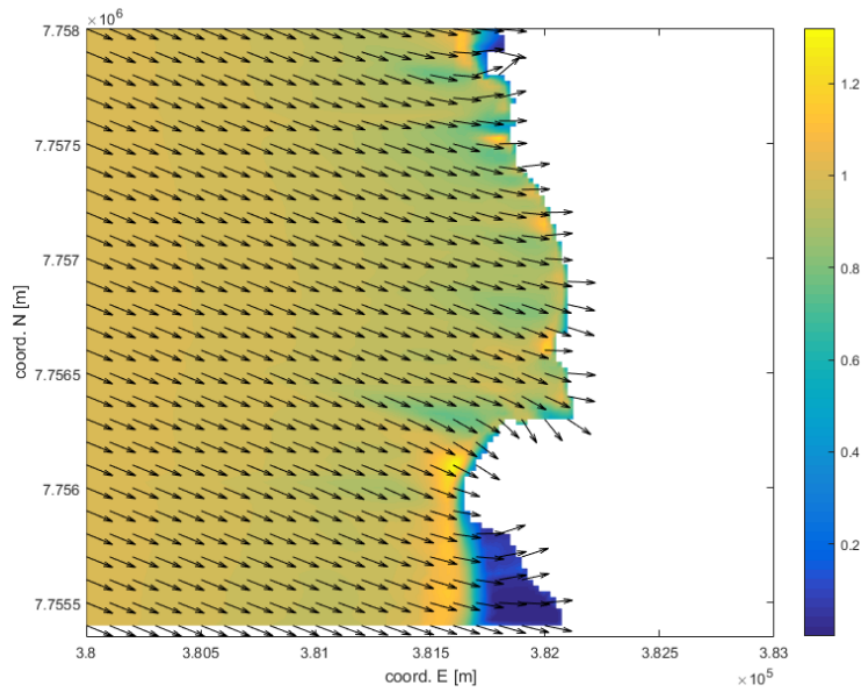
**Figura 9-164: Malla fina - Dir: NW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



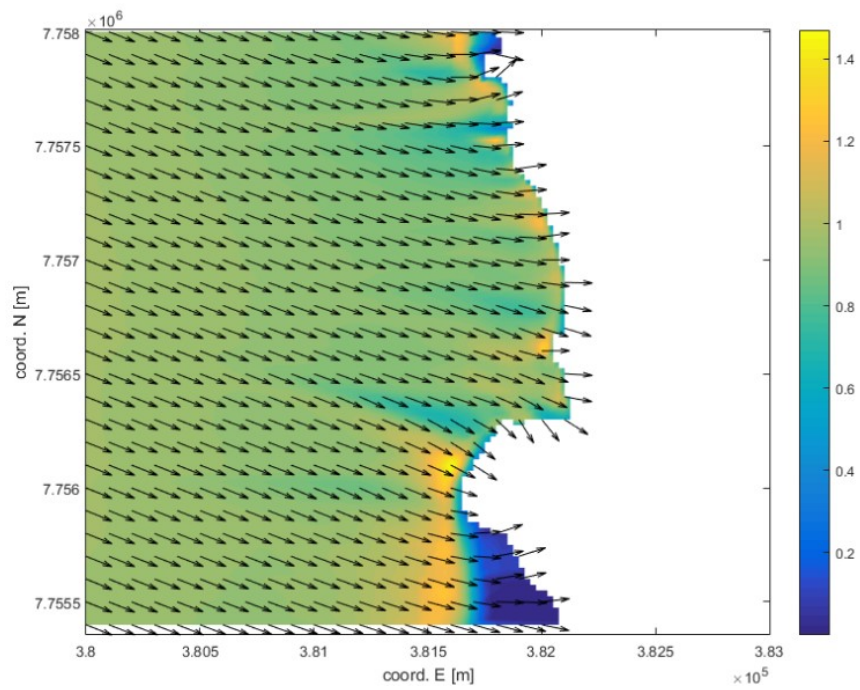
**Figura 9-165: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



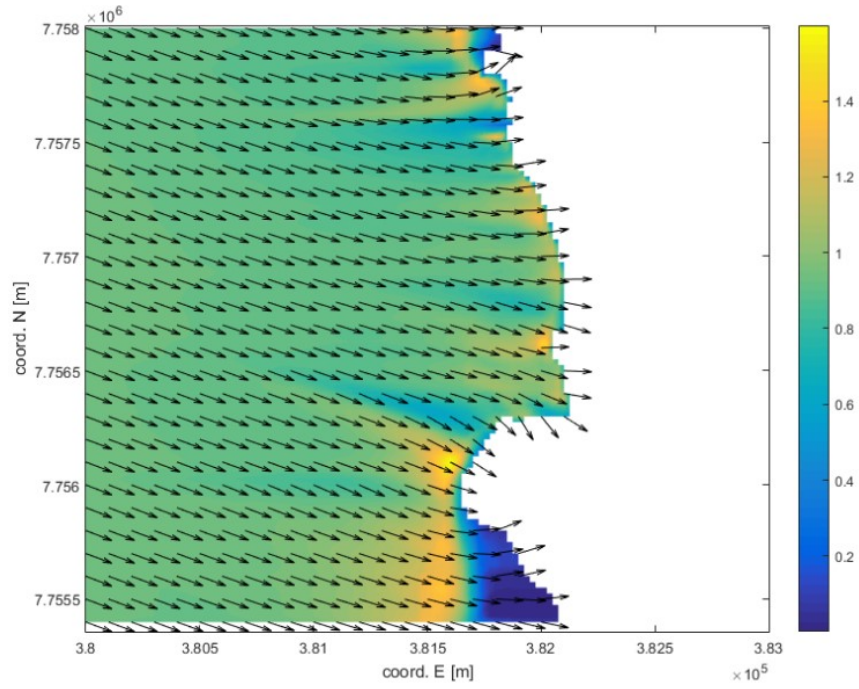
**Figura 9-166: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



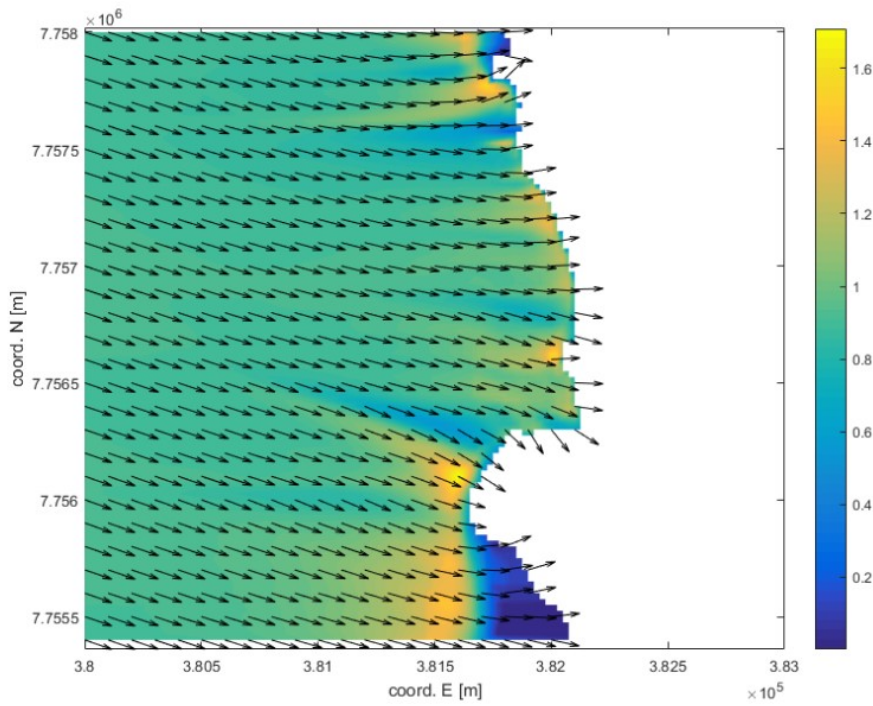
**Figura 9-167: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



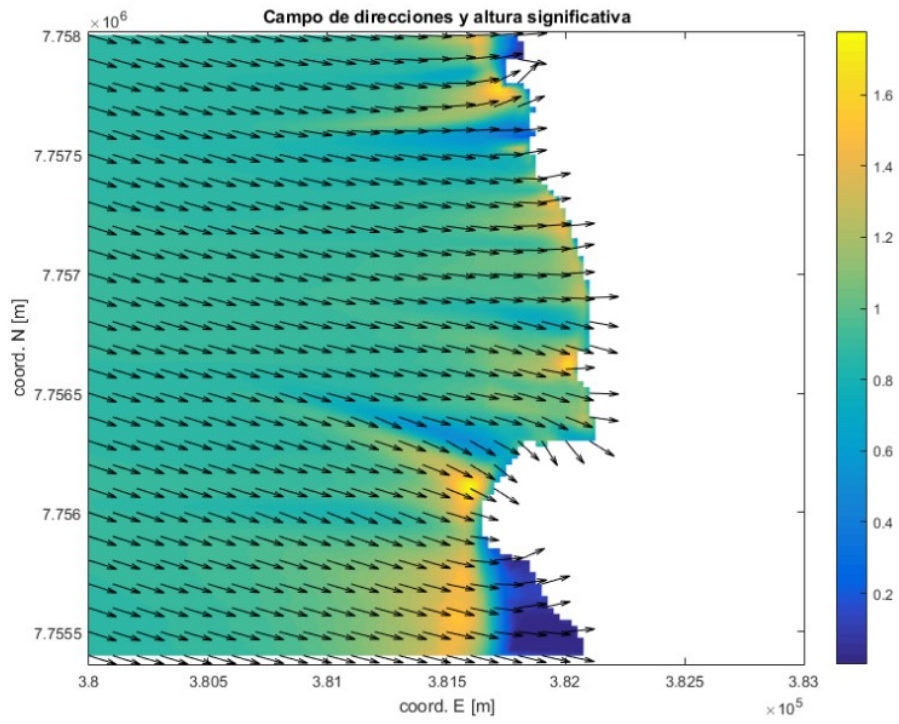
**Figura 9-168: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



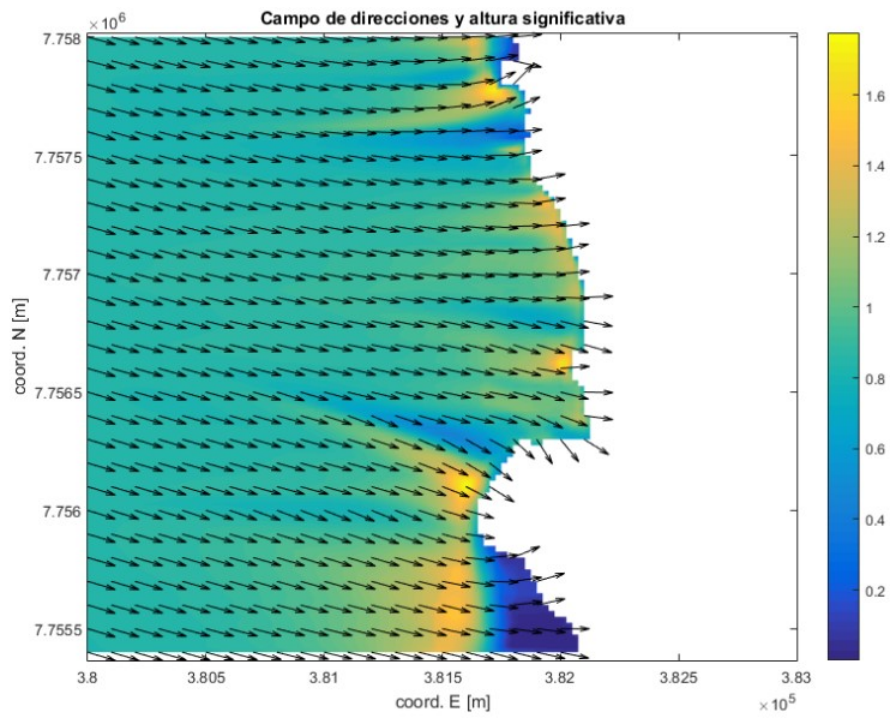
**Figura 9-169: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



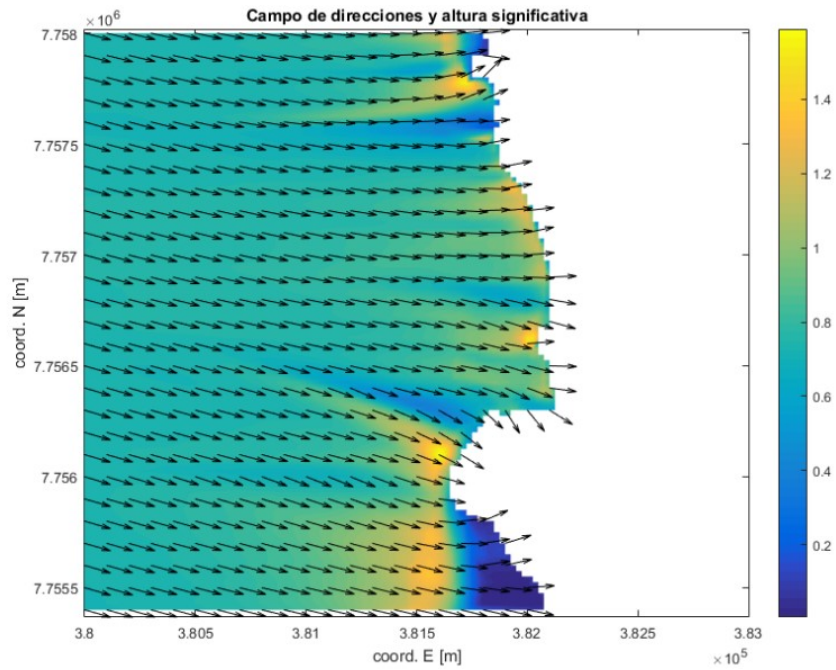
**Figura 9-170: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



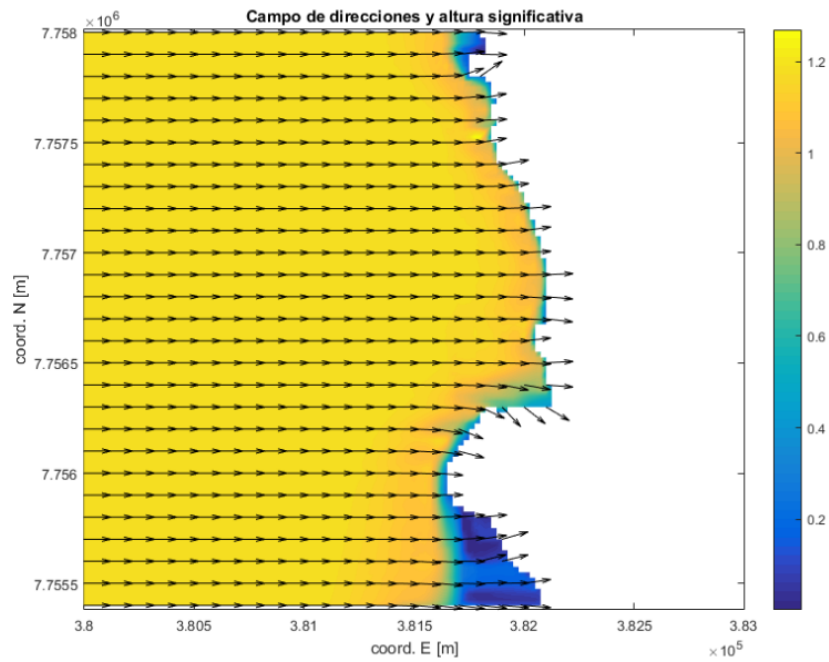
**Figura 9-171: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



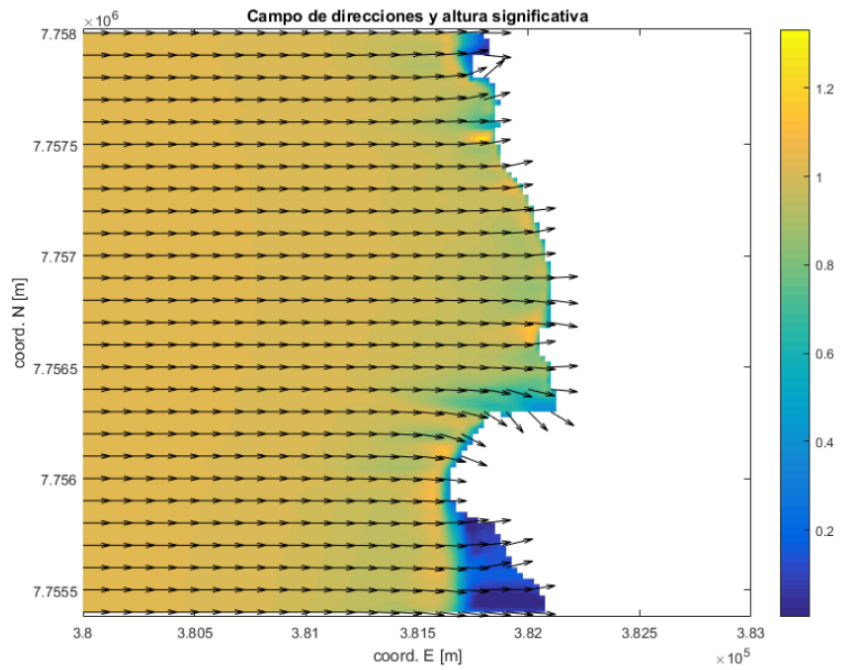
**Figura 9-172: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



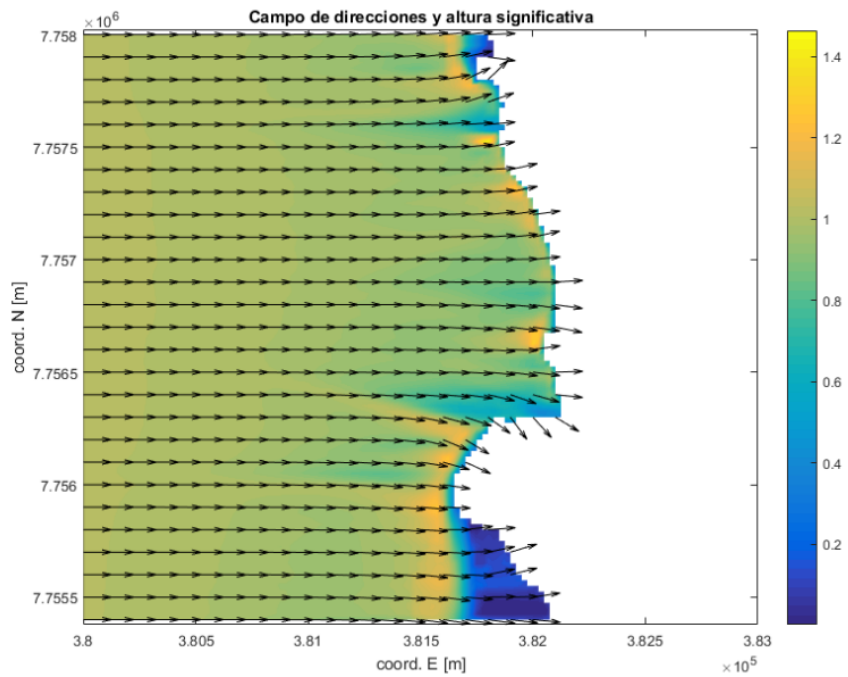
**Figura 9-173: Malla fina - Dir: WNW, Tp: 20 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



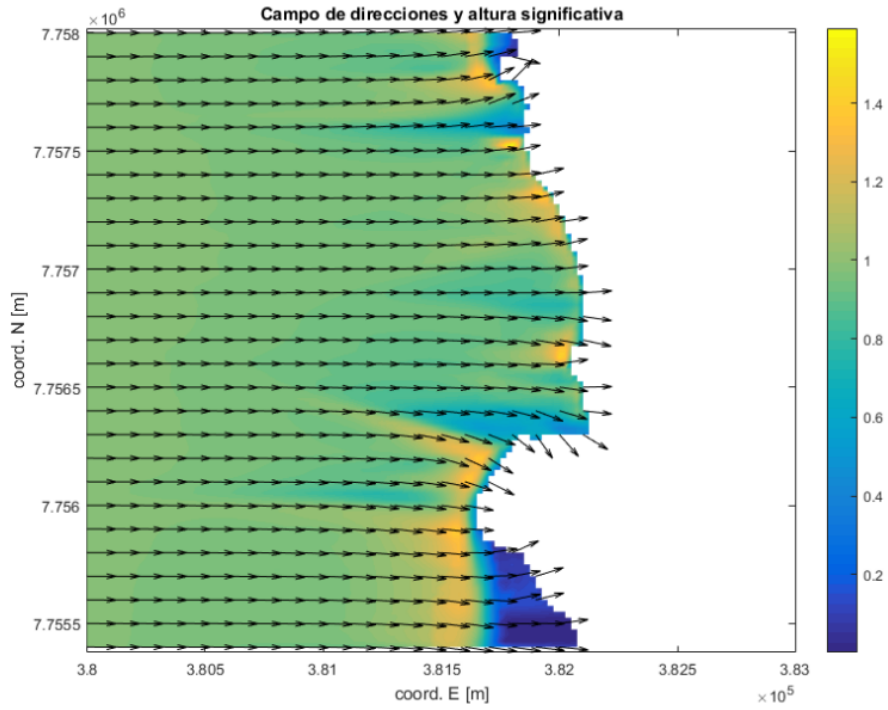
**Figura 9-174: Malla fina - Dir: W, Tp: 4 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



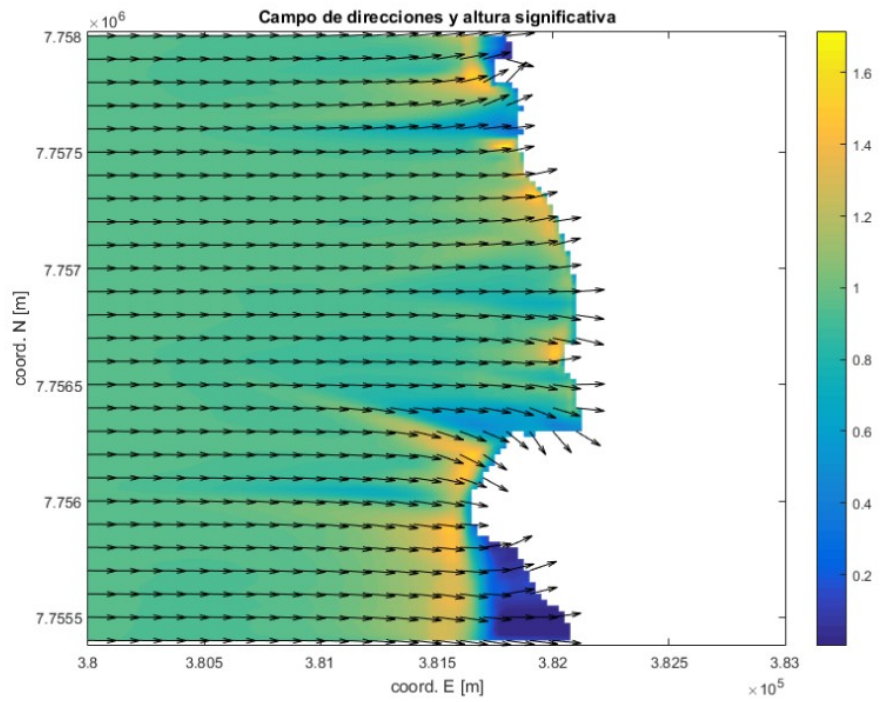
**Figura 9-175: Malla fina - Dir: W, Tp: 6 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



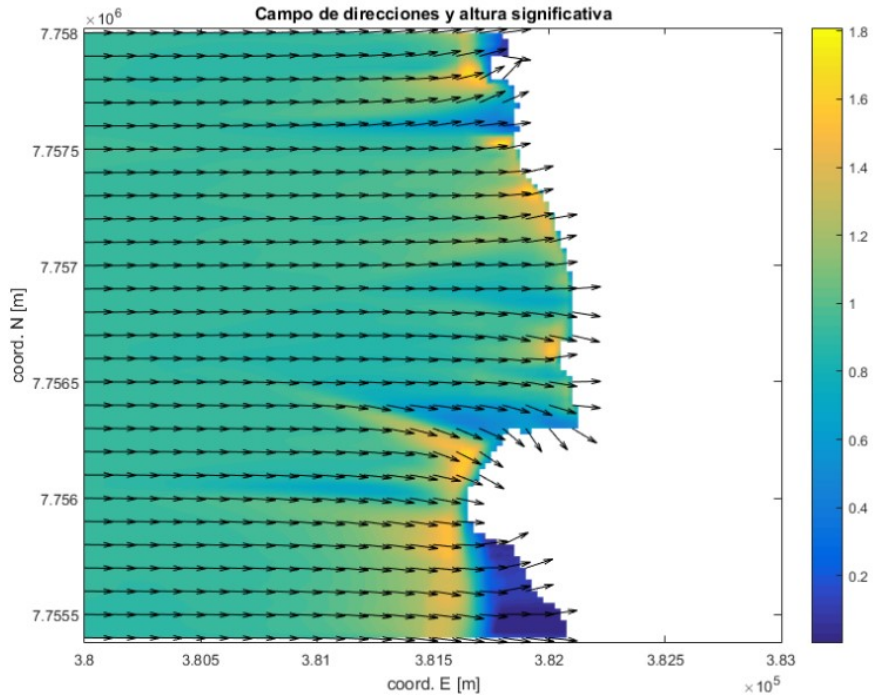
**Figura 9-176: Malla fina - Dir: W, Tp: 8 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



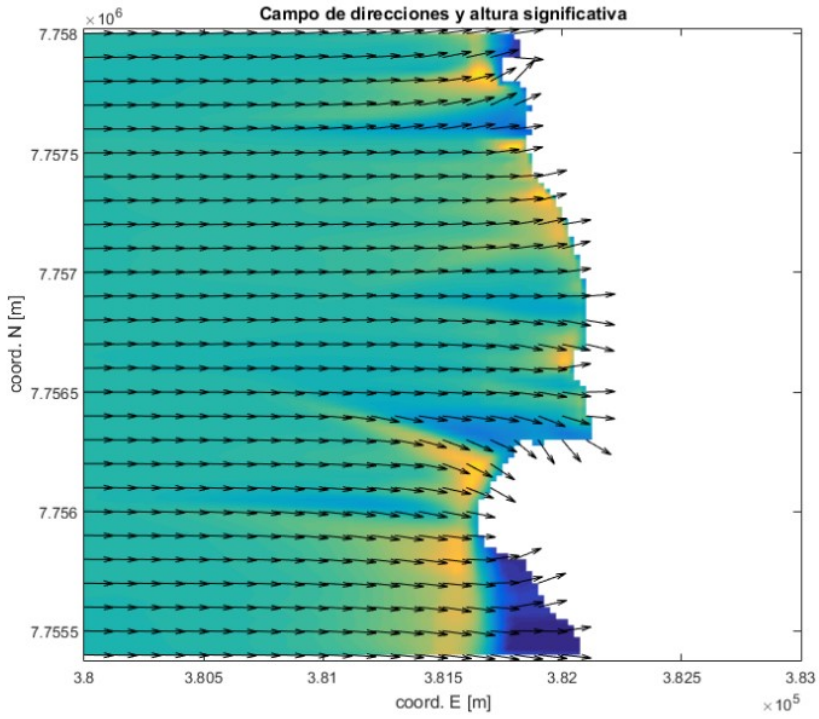
**Figura 9-177: Malla fina - Dir: W, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



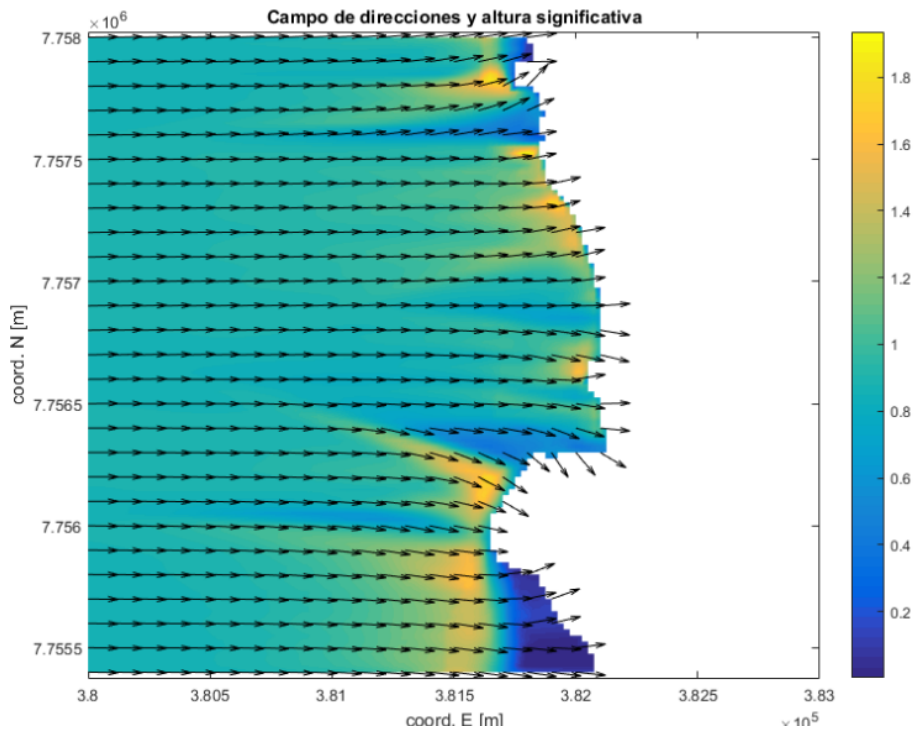
**Figura 9-178: Malla fina - Dir: W, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



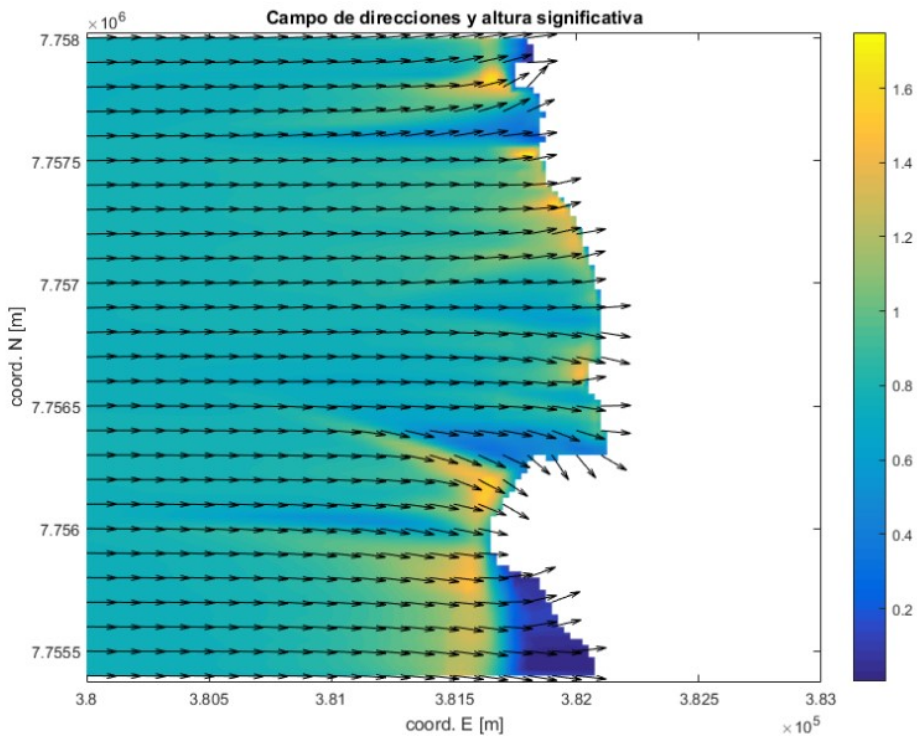
**Figura 9-179: Malla fina - Dir: W, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



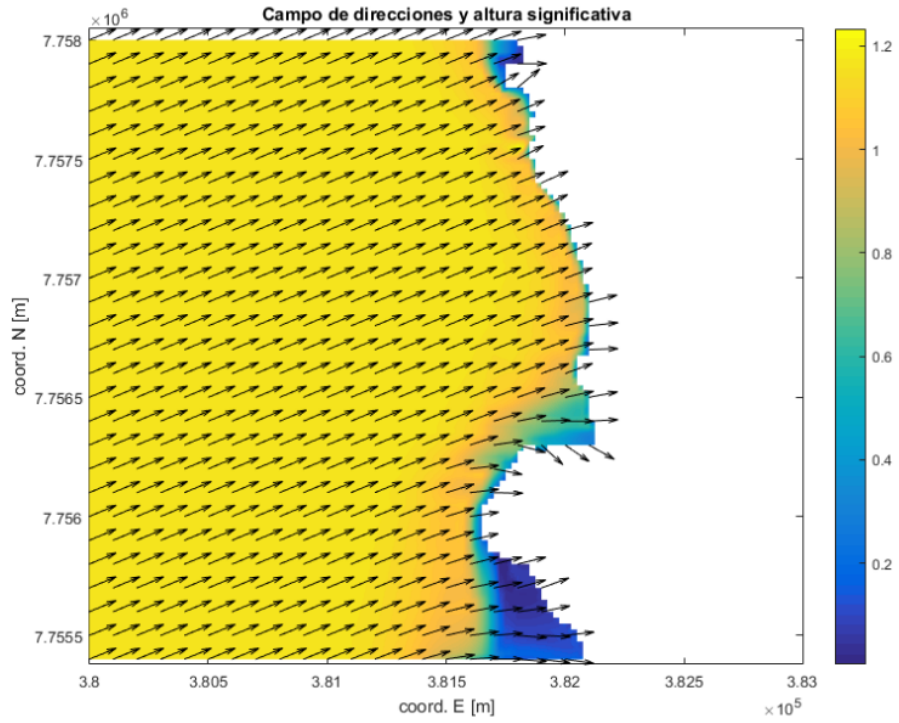
**Figura 9-180: Malla fina - Dir: W, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



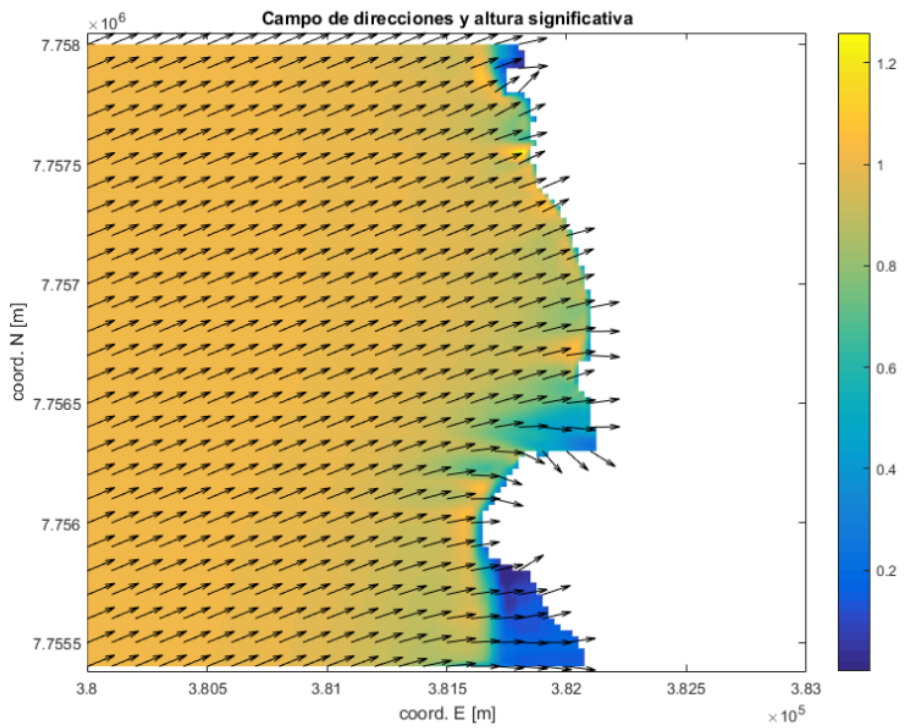
**Figura 9-181: Malla fina - Dir: W, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



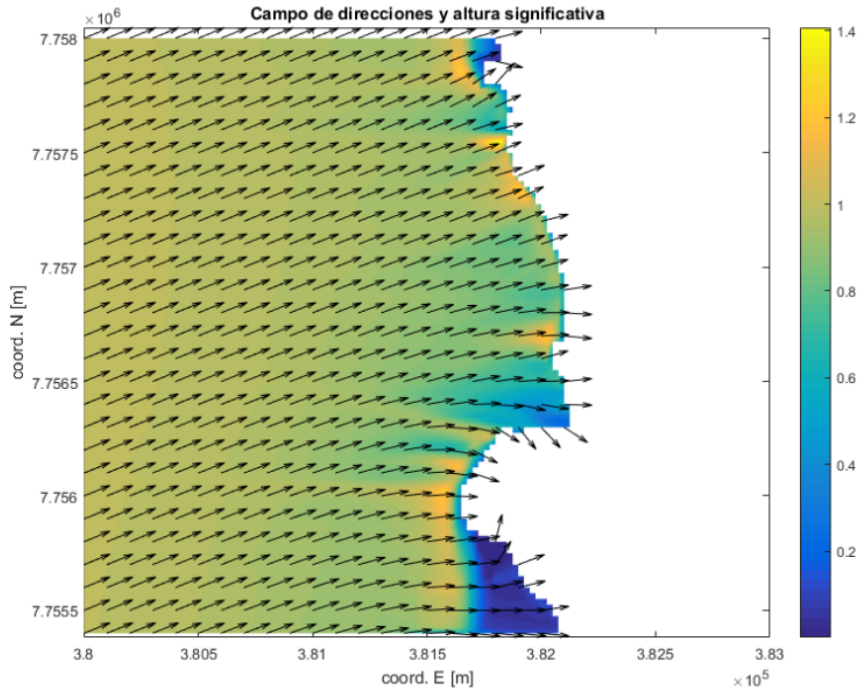
**Figura 9-182: Malla fina - Dir: W, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



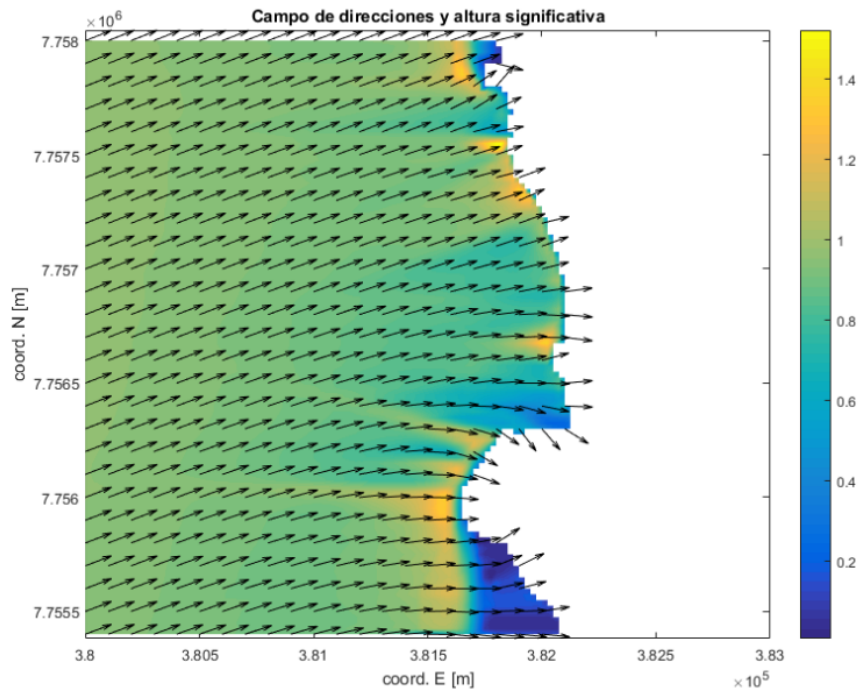
**Figura 9-183: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



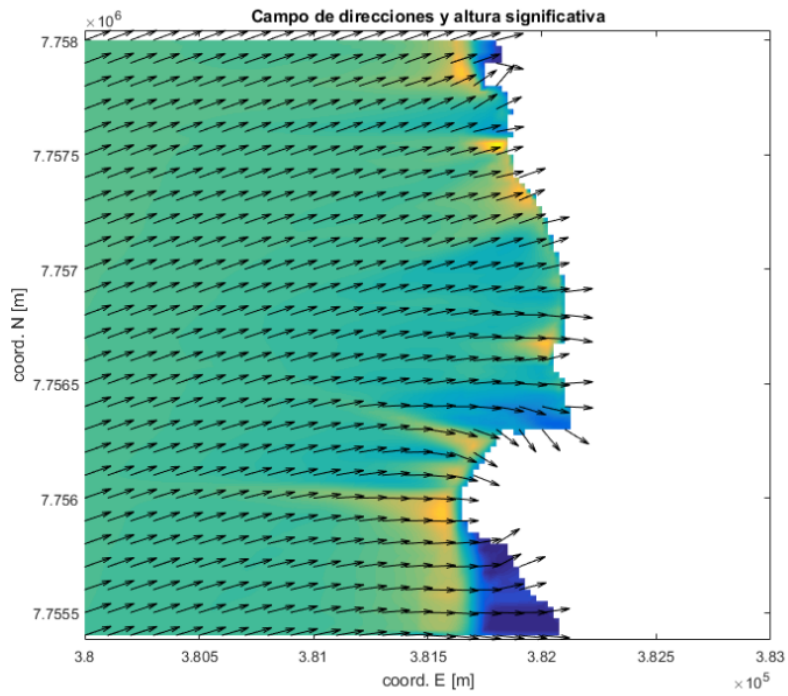
**Figura 9-184: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



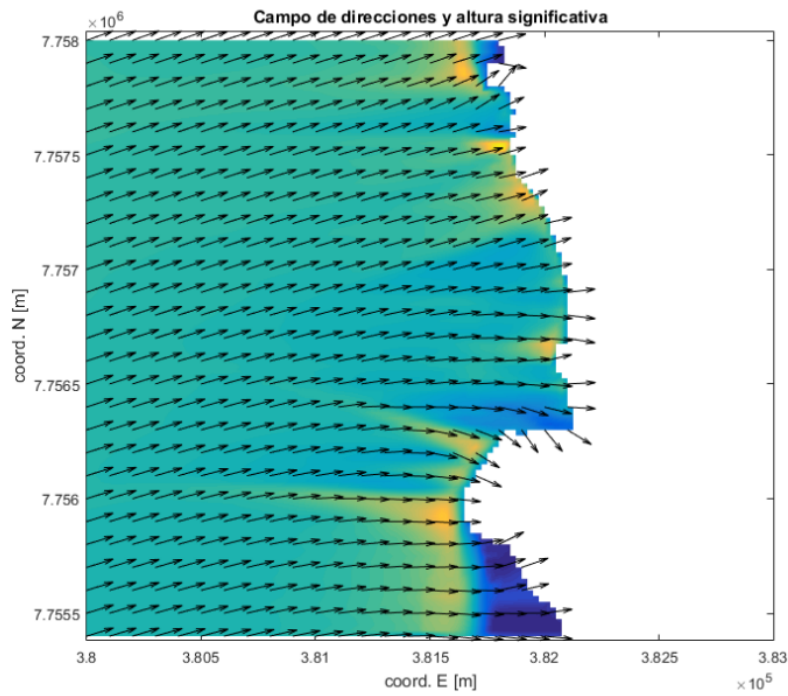
**Figura 9-185: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 8 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-186: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-187: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-188: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.

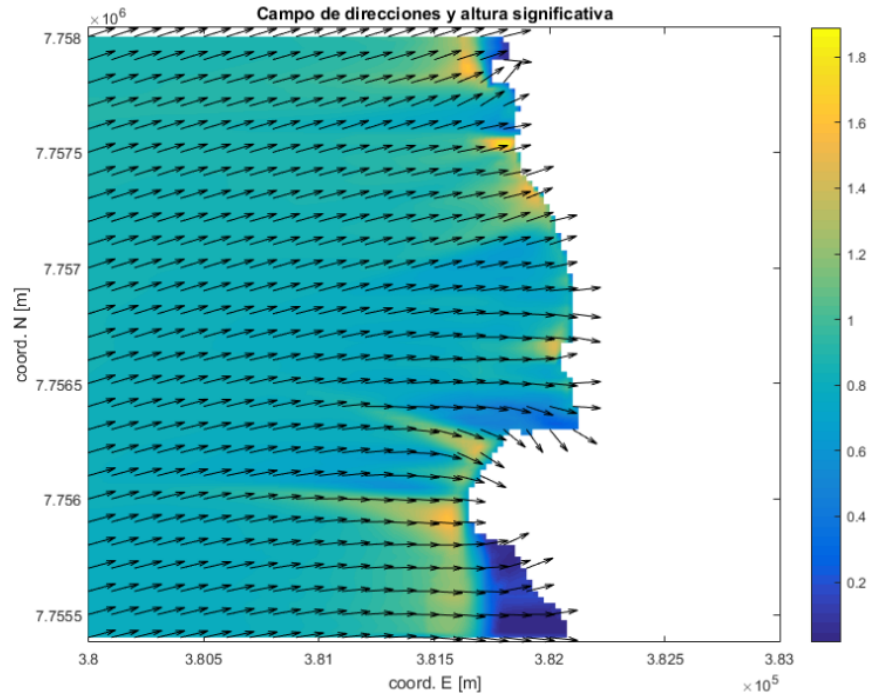


Figura 9-189: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 16 [s].  
WSW TP 16

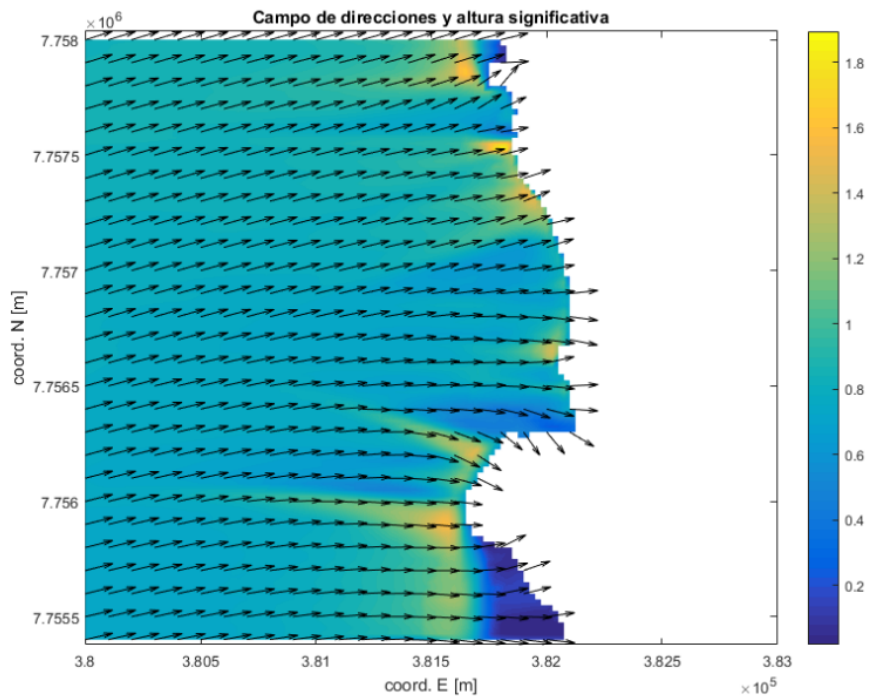
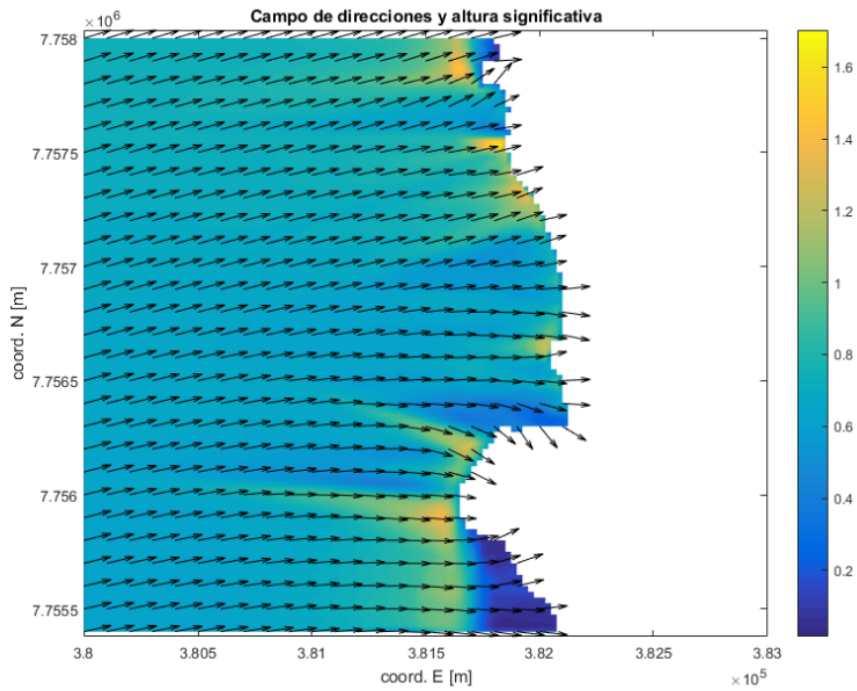
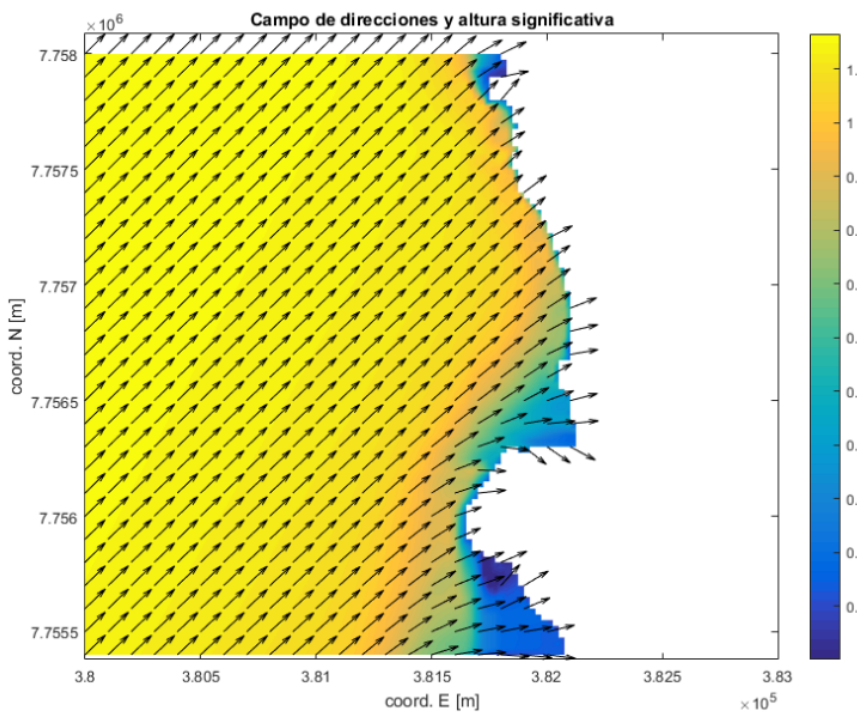


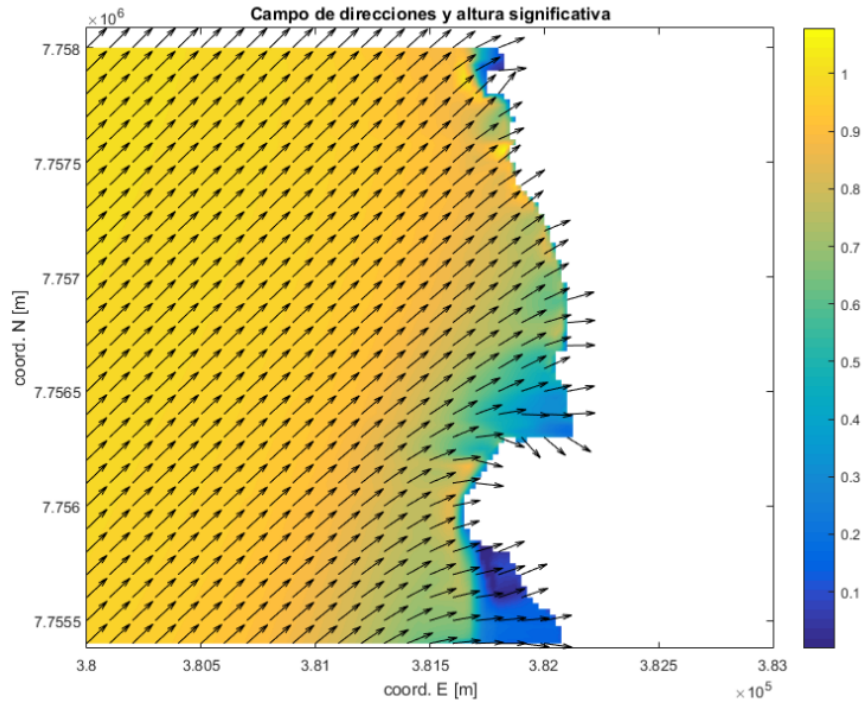
Figura 9-190: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 18 [s].  
Fuente: Elaboración propia.



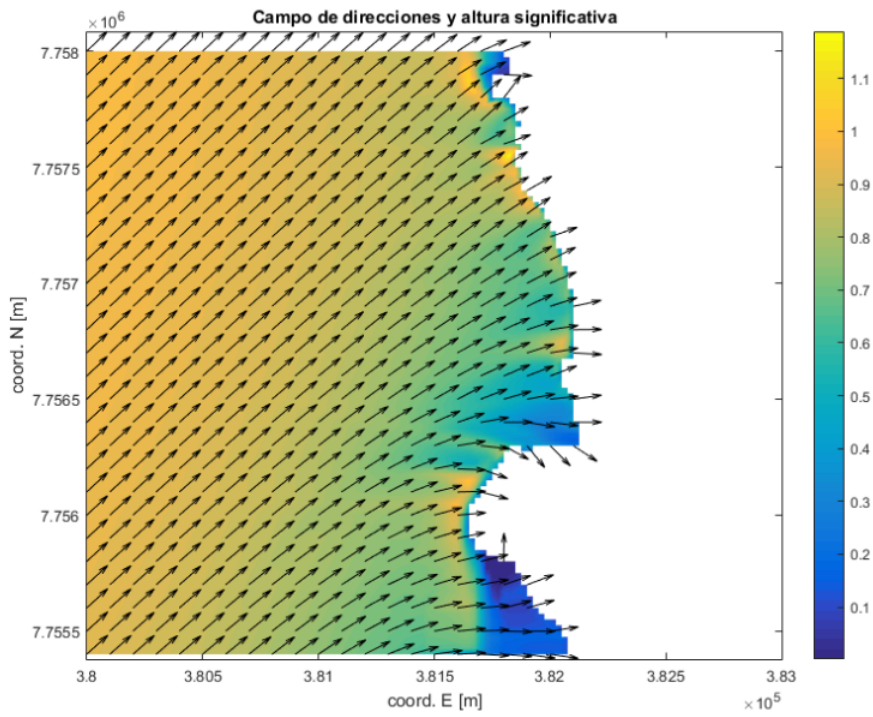
**Figura 9-191: Malla fina - Dir: WSW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



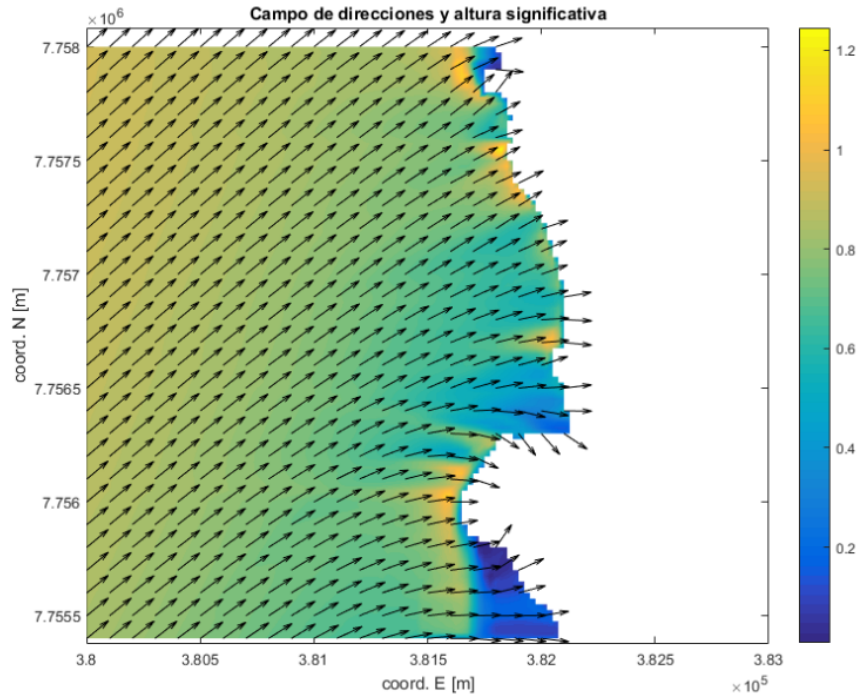
**Figura 9-192: Malla fina - Dir: SW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



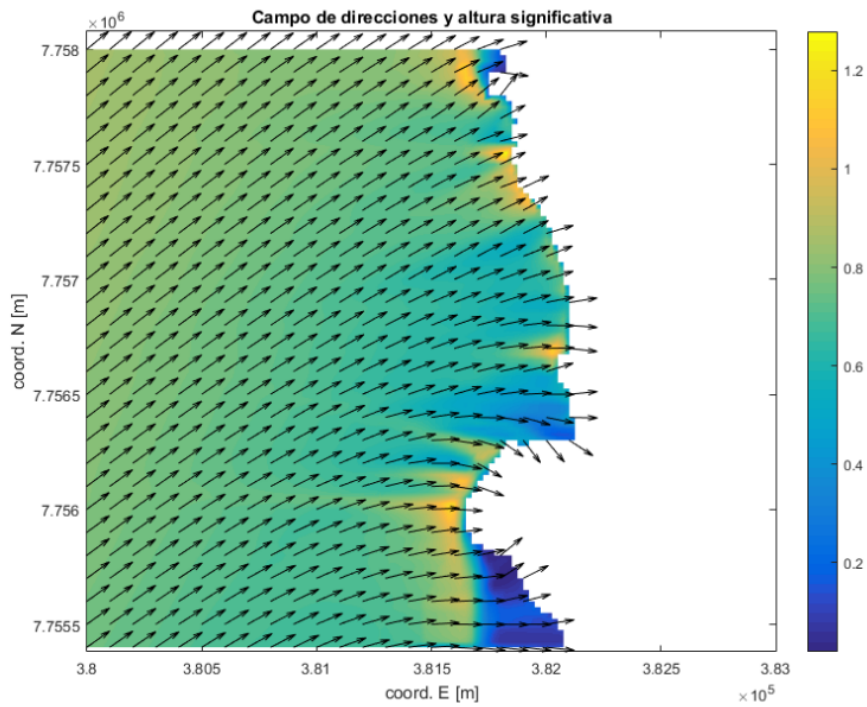
**Figura 9-193: Malla fina - Dir: SW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



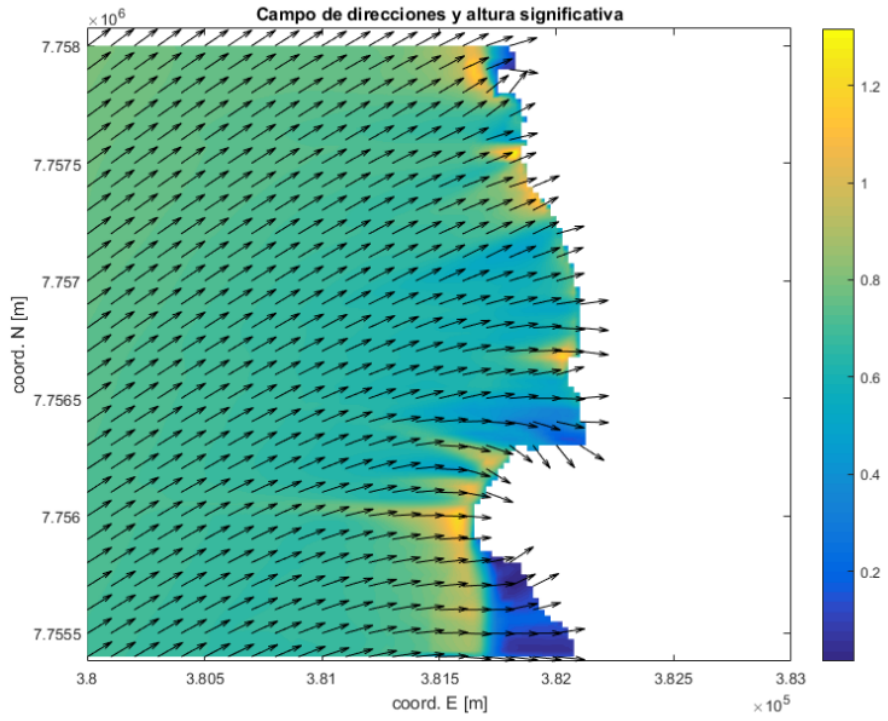
**Figura 9-194: Malla fina - Dir: SW, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



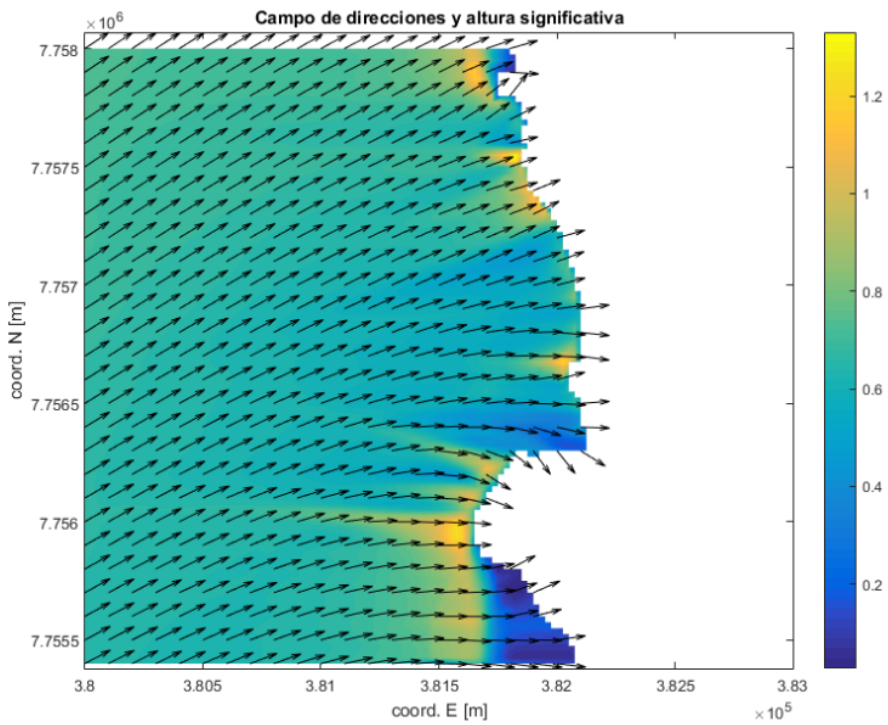
**Figura 9-195: Malla fina - Dir: SW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



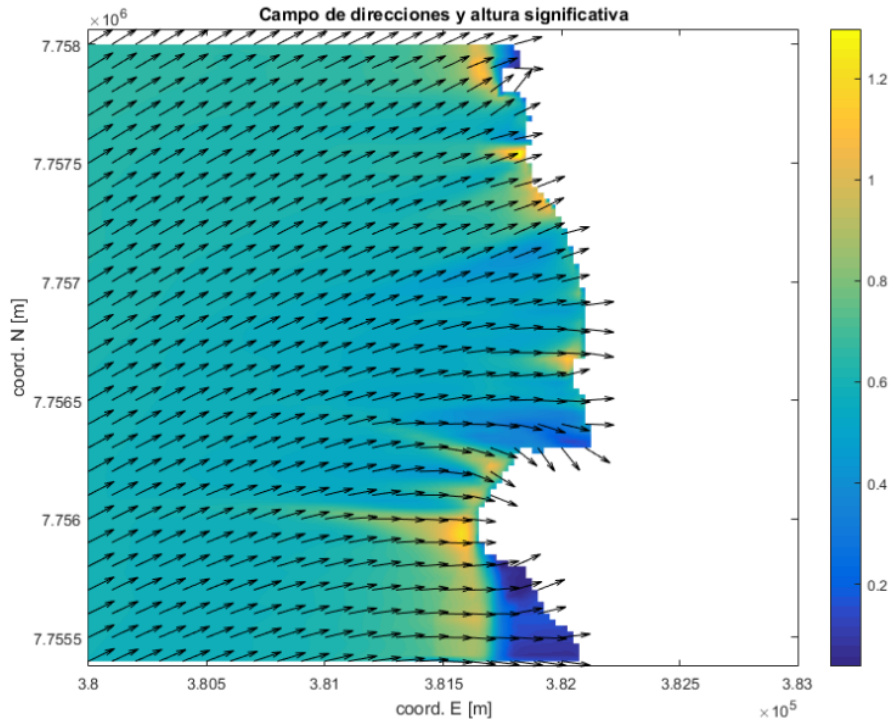
**Figura 9-196: Malla fina - Dir: SW, Tp: 12 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



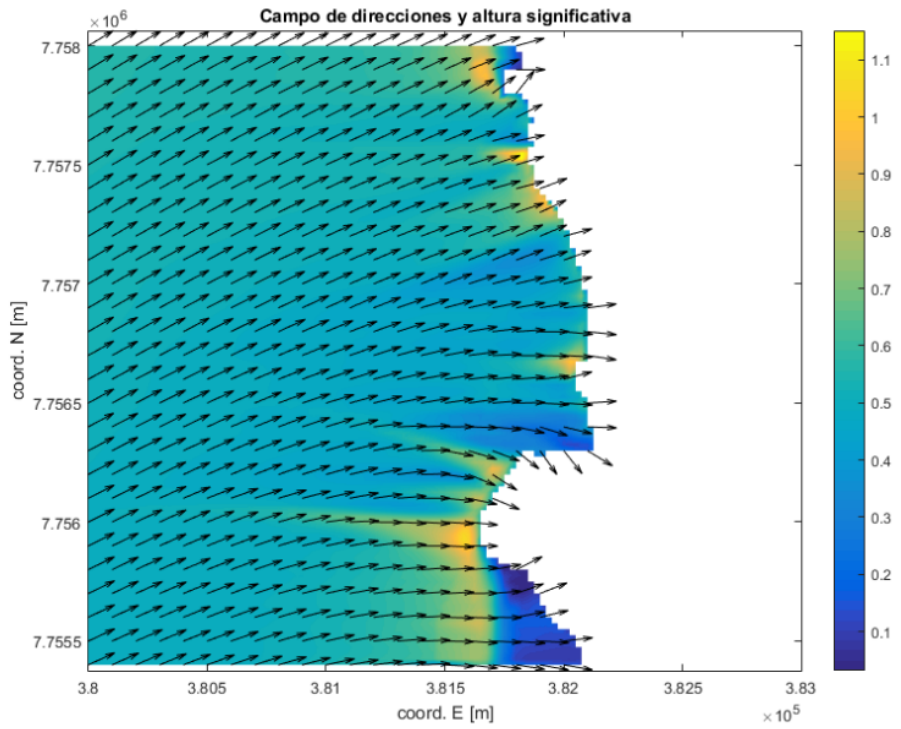
**Figura 9-197: Malla fina - Dir: SW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



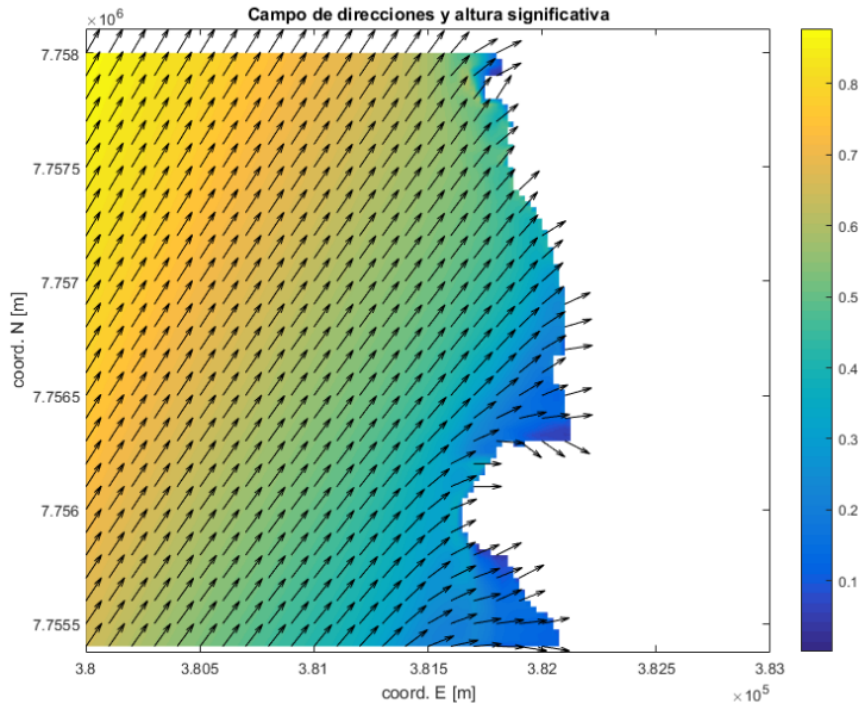
**Figura 9-198: Malla fina - Dir: SW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



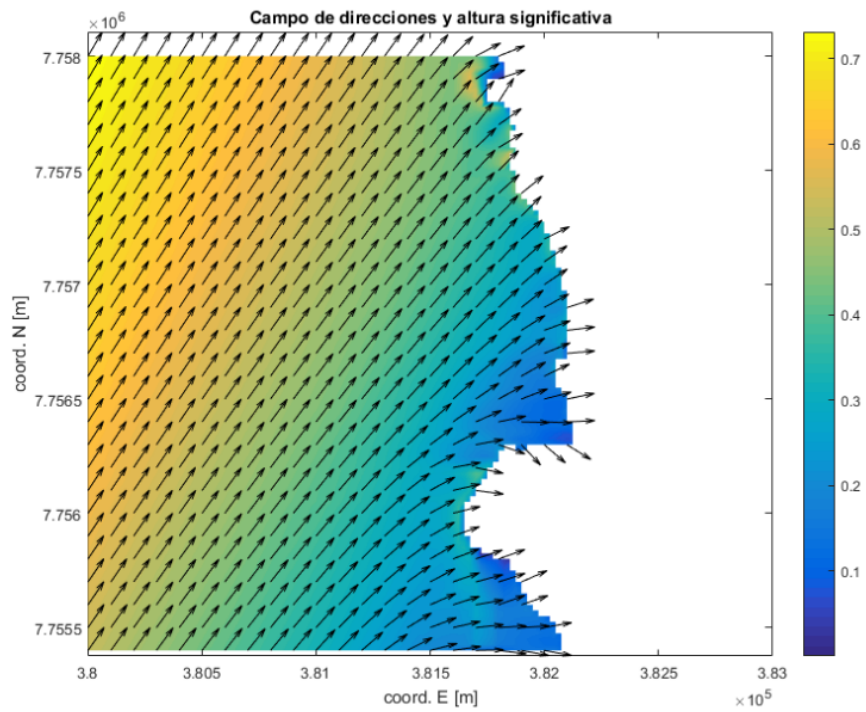
**Figura 9-199: Malla fina - Dir: SW, Tp: 18 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



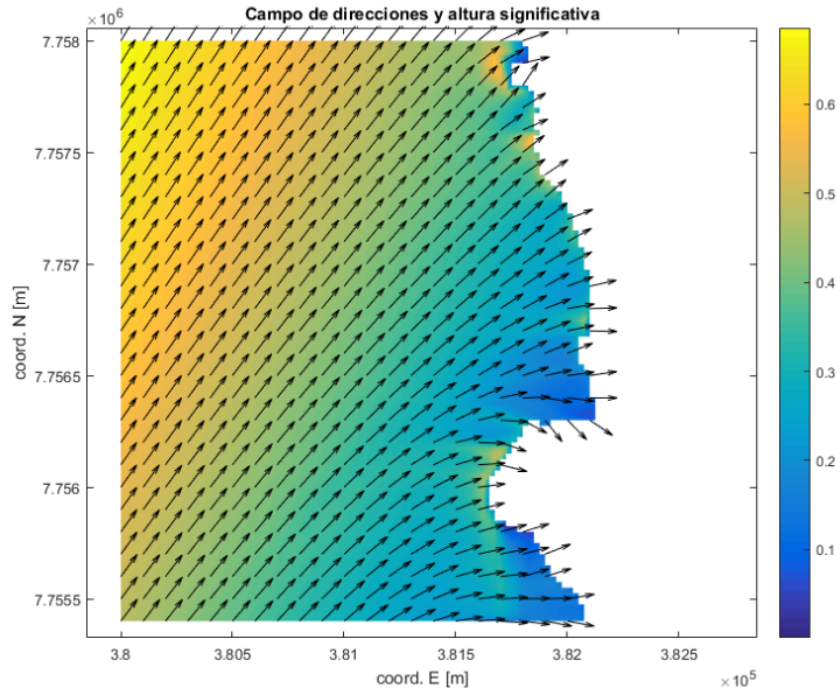
**Figura 9-200: Malla fina - Dir: SW, Tp: 20 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



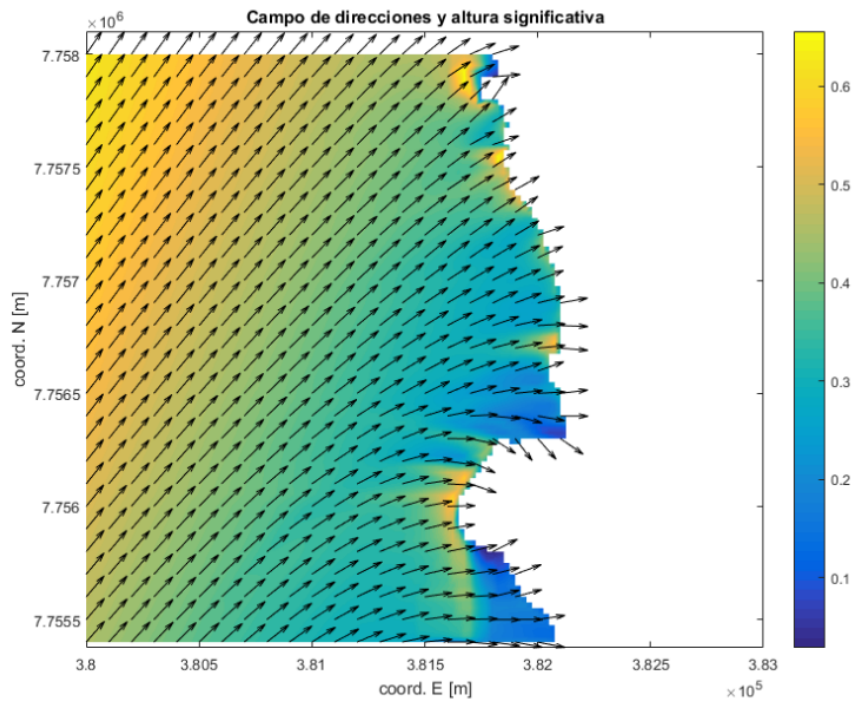
**Figura 9-201: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



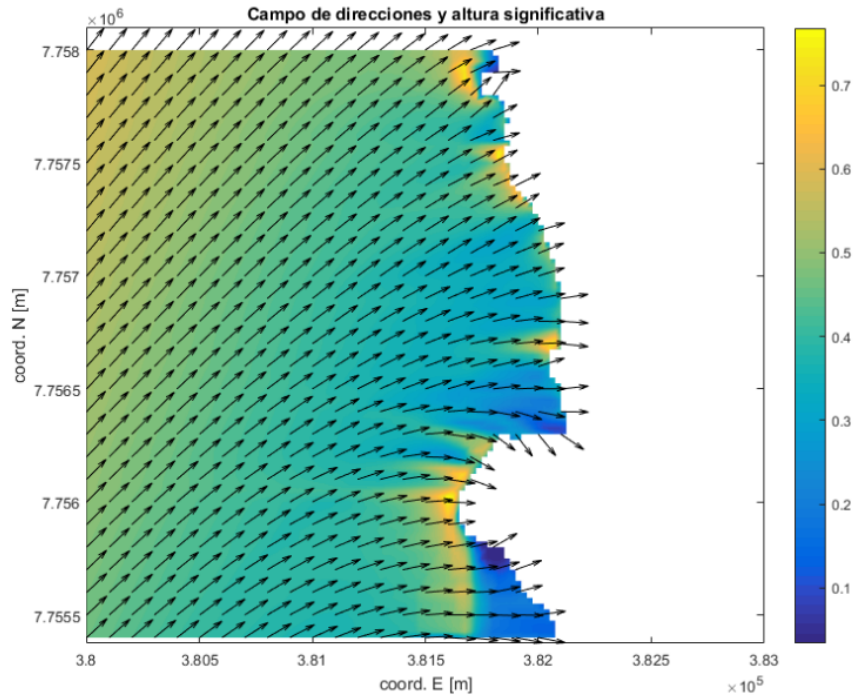
**Figura 9-202: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



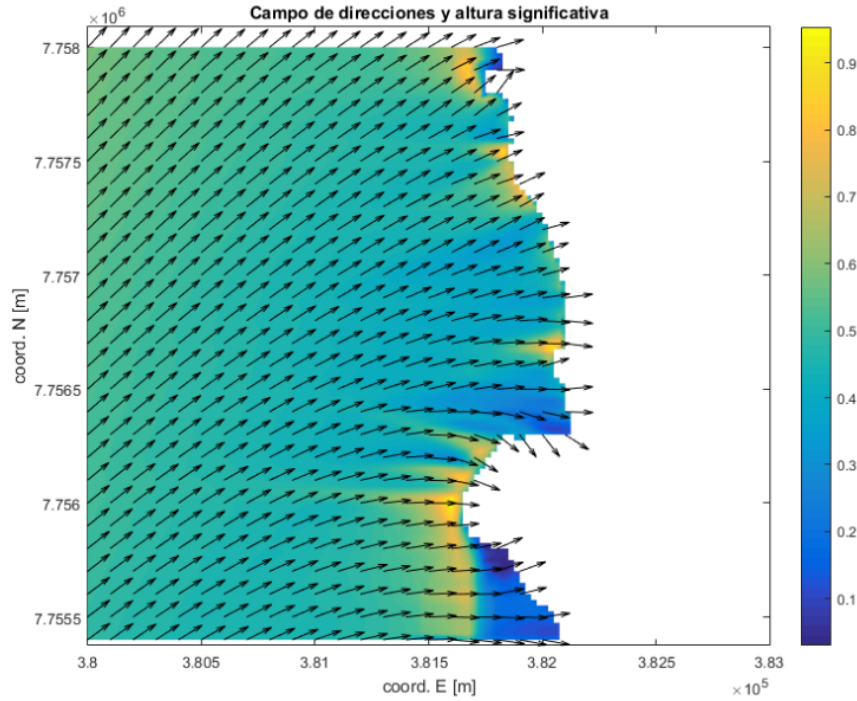
**Figura 9-203: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 8 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



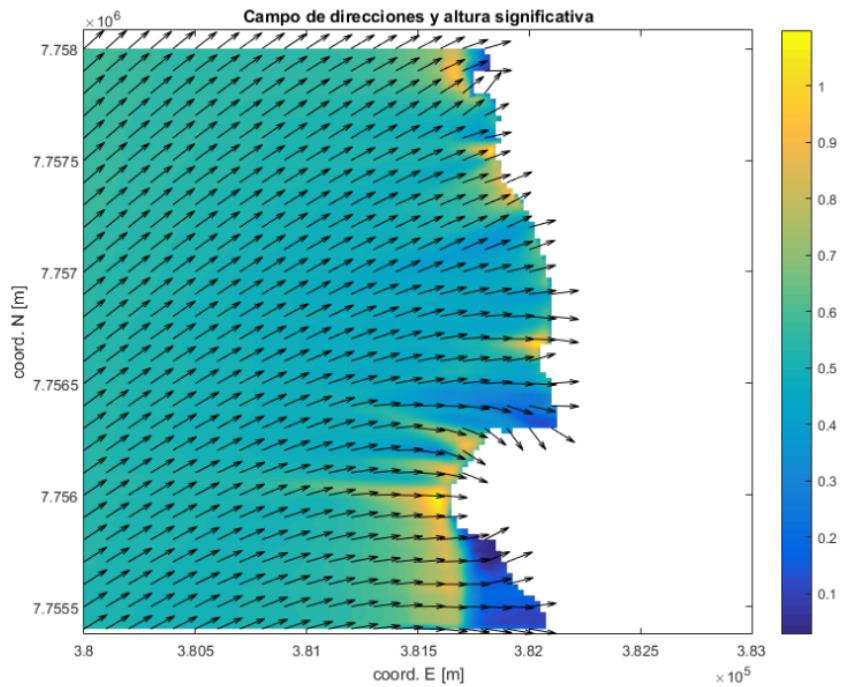
**Figura 9-204: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 10 [s].**  
Fuente: Elaboración propia.



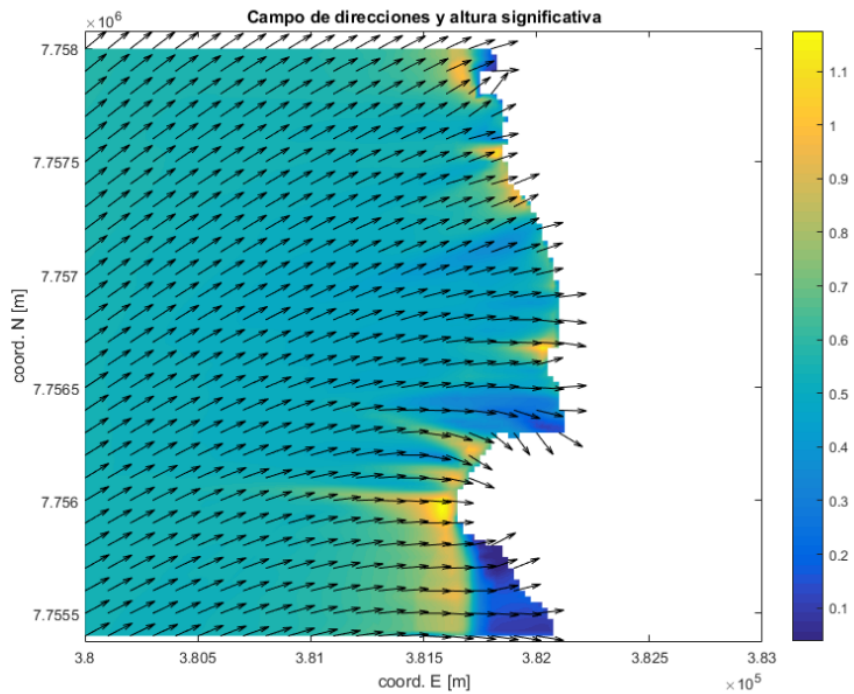
**Figura 9-205: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



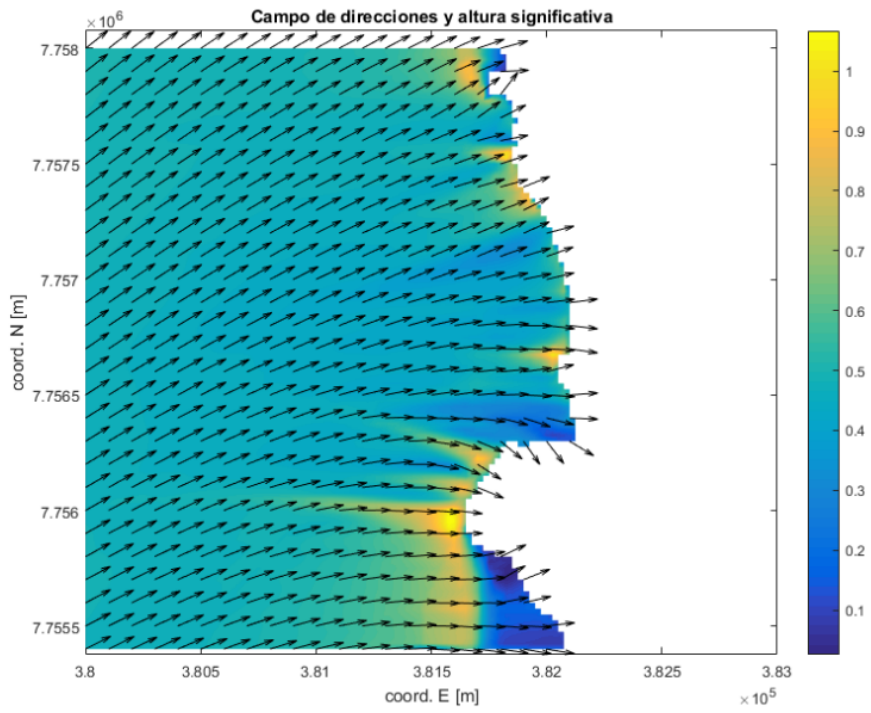
**Figura 9-206: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



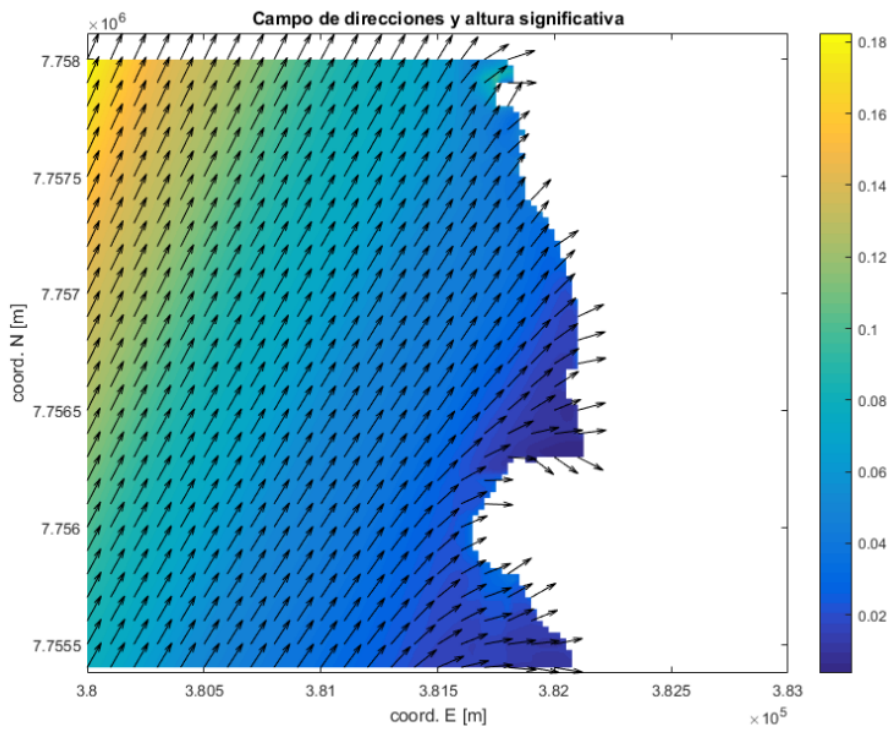
**Figura 9-207: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



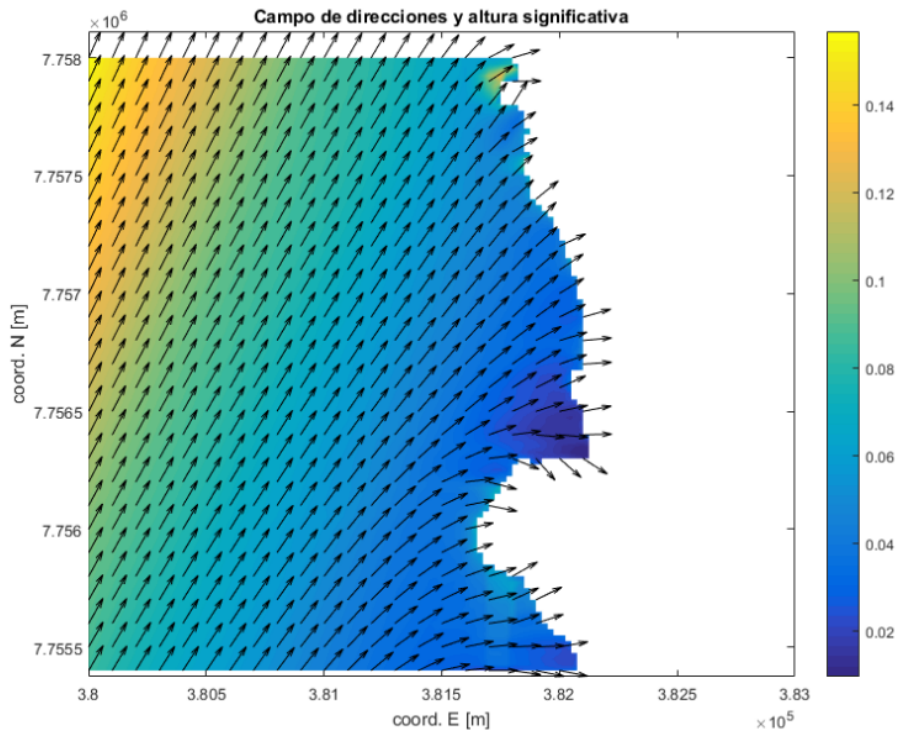
**Figura 9-208: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



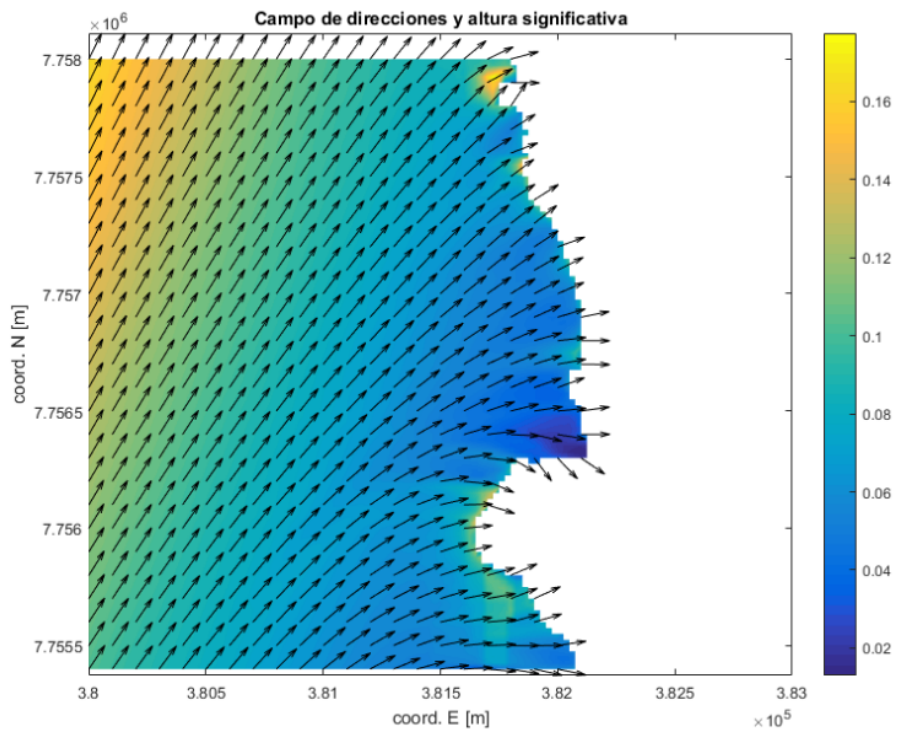
**Figura 9-209: Malla fina - Dir: SSW, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



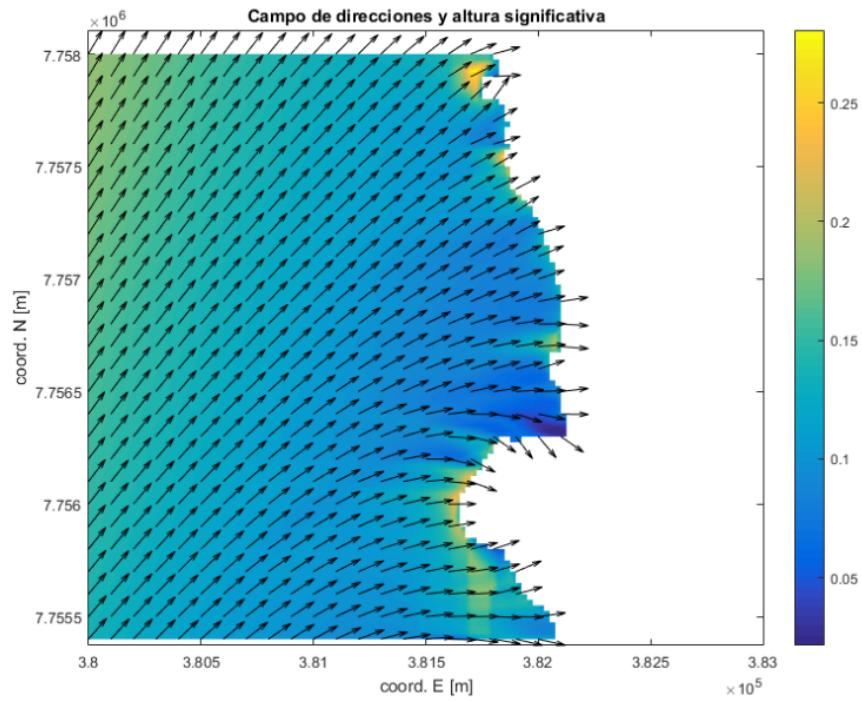
**Figura 9-210: Malla fina - Dir: S, Tp: 4 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



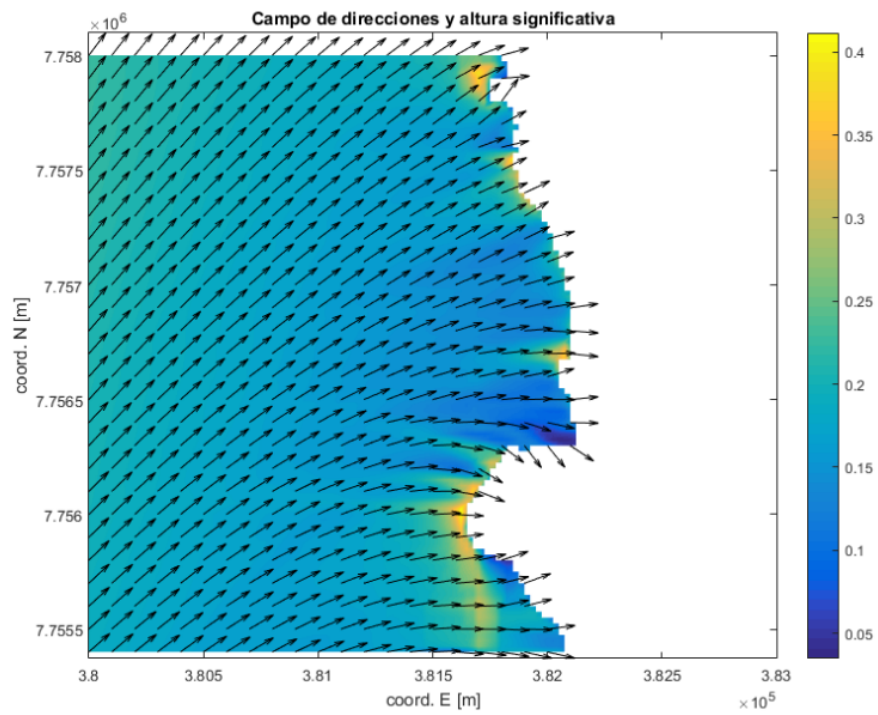
**Figura 9-211: Malla fina - Dir: S, Tp: 6 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



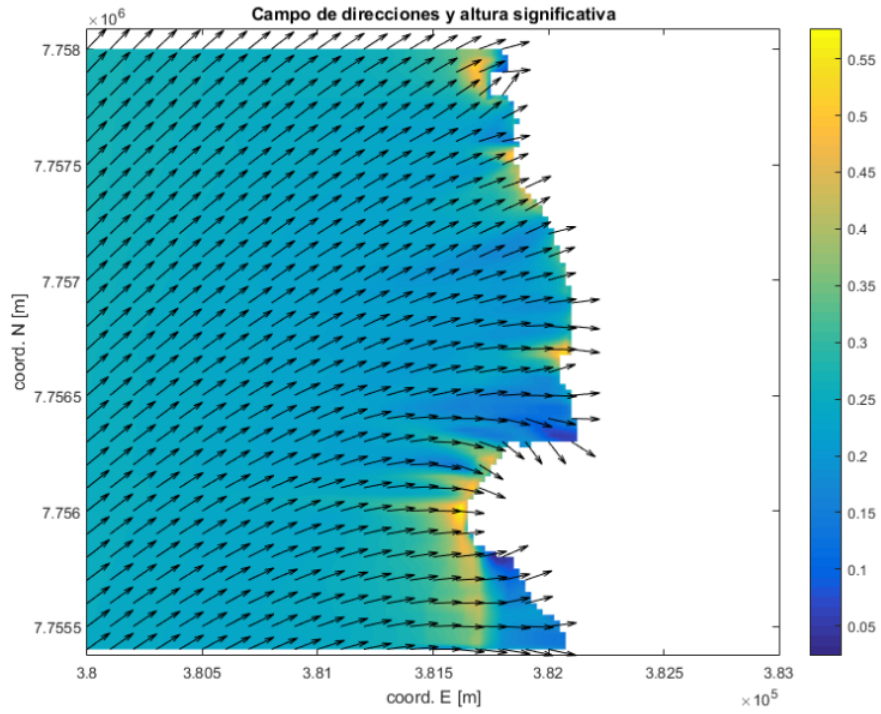
**Figura 9-212: Malla fina - Dir: S, Tp: 8 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



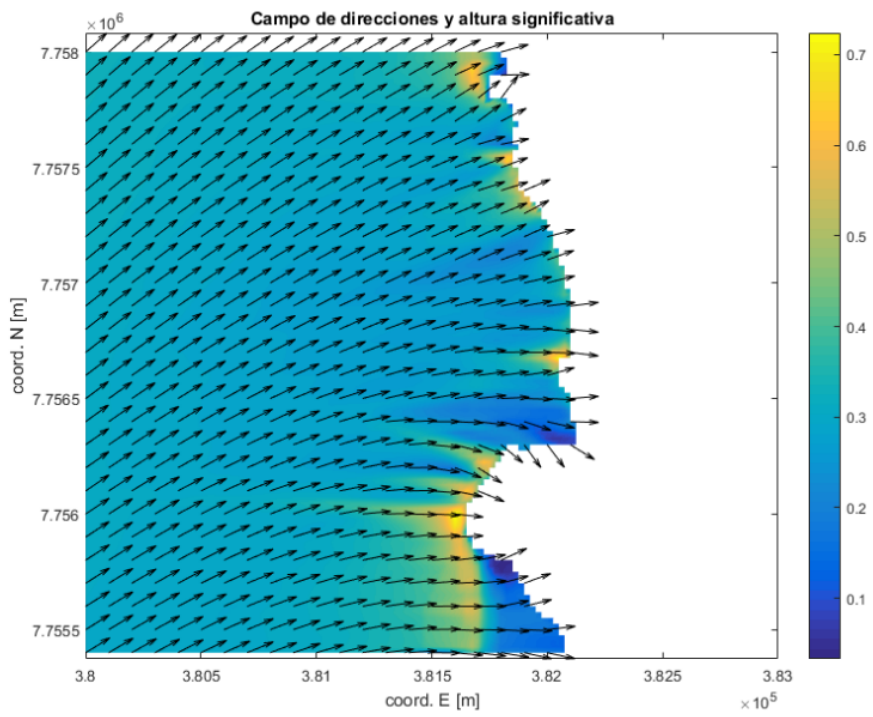
**Figura 9-213: Malla fina - Dir: S, Tp: 10 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



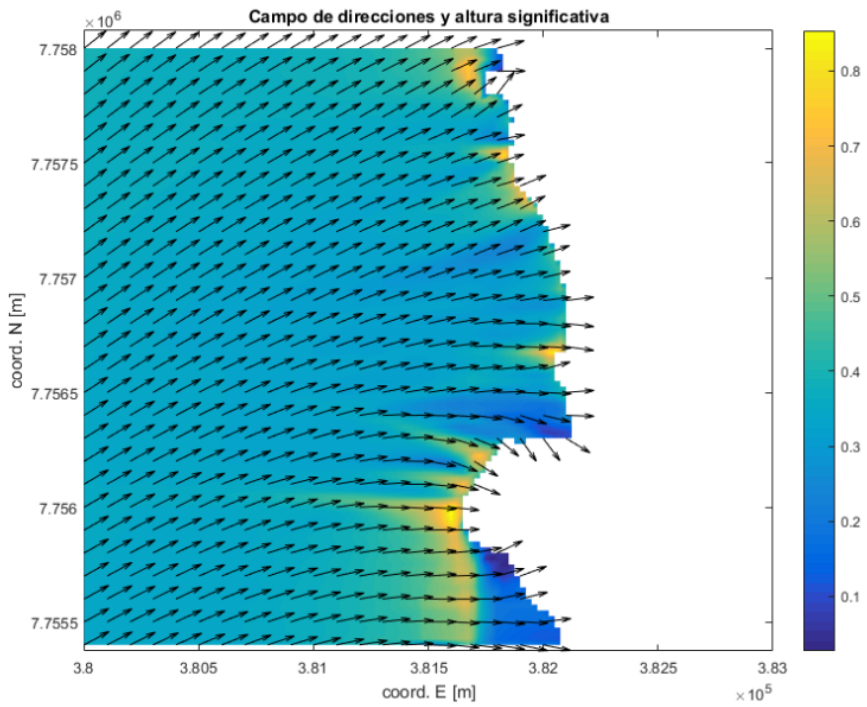
**Figura 9-214: Malla fina - Dir: S, Tp: 12 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



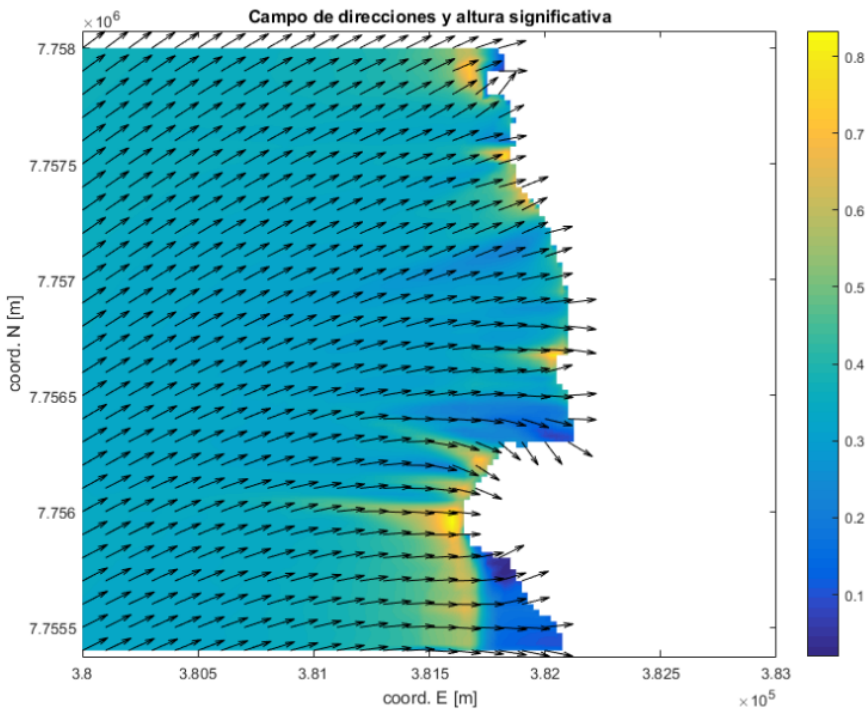
**Figura 9-215: Malla fina - Dir: S, Tp: 14 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



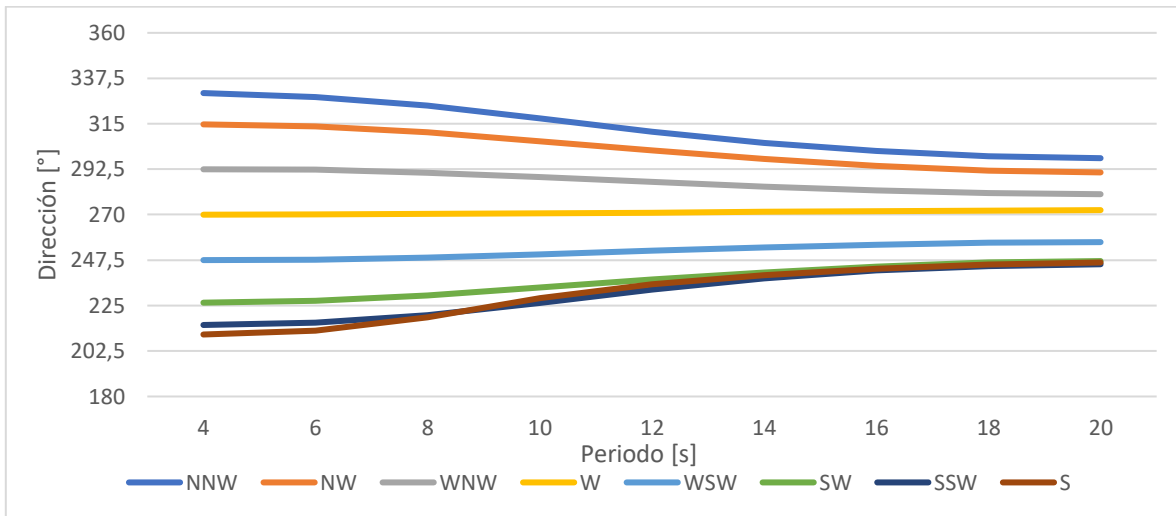
**Figura 9-216: Malla fina - Dir: S, Tp: 16 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-217: Malla fina - Dir: S, Tp: 18 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.

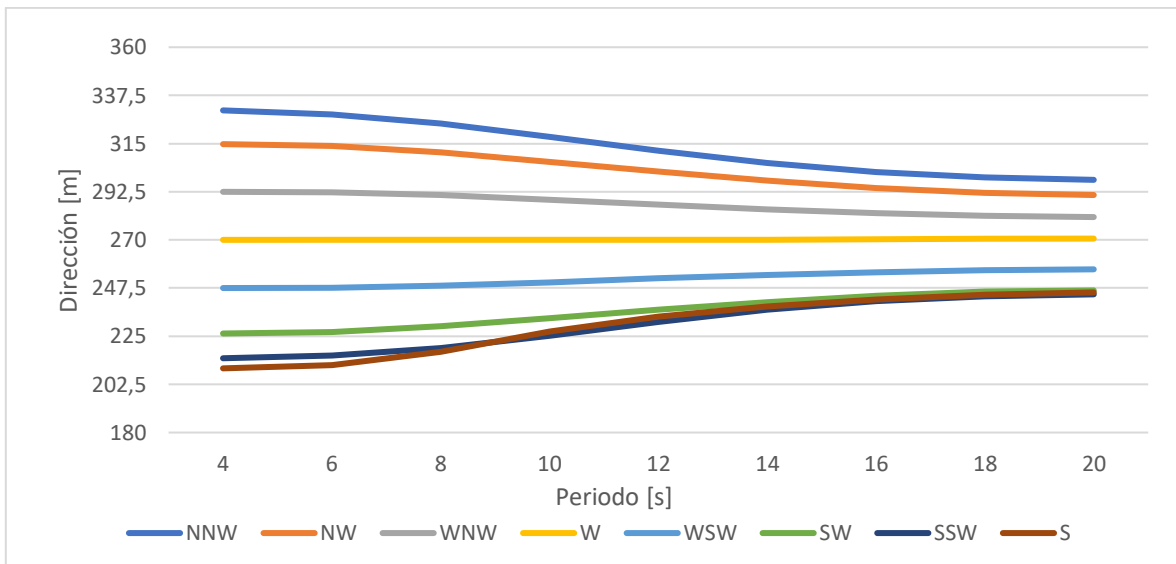


**Figura 9-218: Malla fina - Dir: S, Tp: 20 [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.



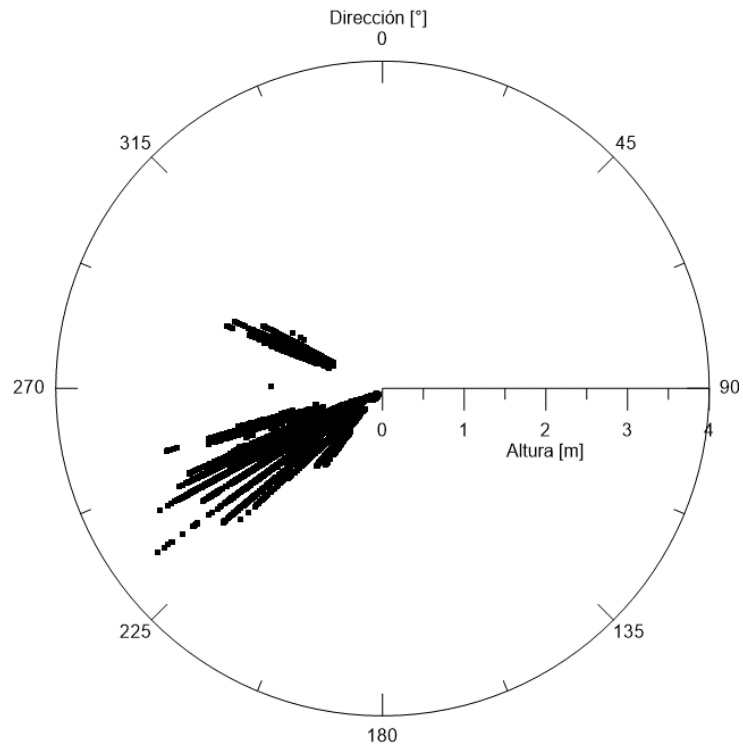
**Figura 9-219: Cambio en las direcciones de propagación en el nodo B.**

Fuente: Elaboración propia.

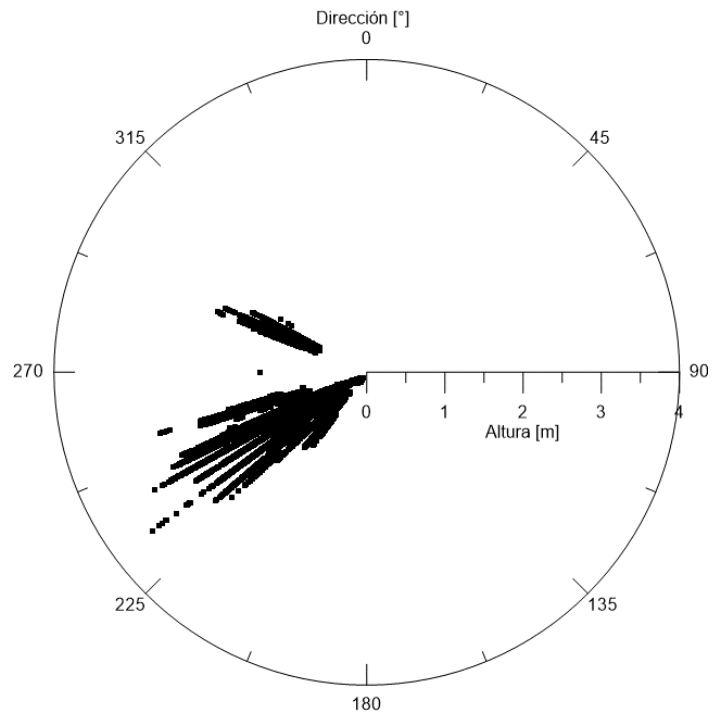


**Figura 9-220: Cambio en las direcciones de propagación en el nodo C.**

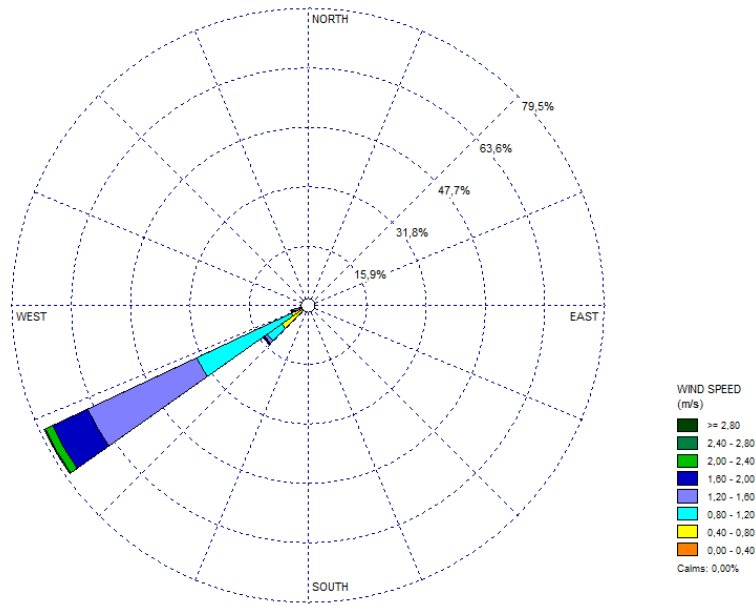
Fuente: Elaboración propia.



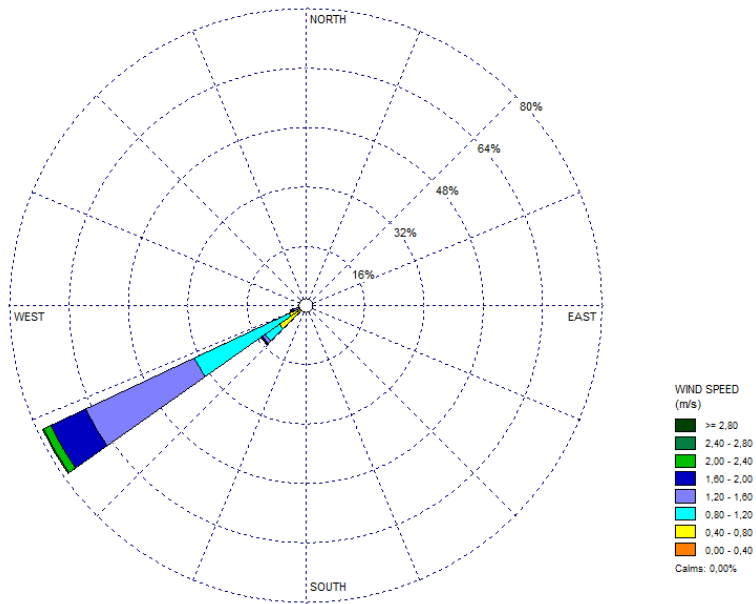
**Figura 9-221: Rosa de dispersión radial nodo B.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-222: Rosa de dispersión radial nodo C.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-223: Rosa de dispersiones acumuladas nodo B.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9-224: Malla de direcciones acumuladas nodo C.**  
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9-1: Alturas de oleaje de tormentas calculadas por Máximos Anuales.**

<b>Fecha</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Tp [s]</b>	<b>Dp [°]</b>
<b>11 de septiembre de 2005</b>	3.51	9.24	218
<b>9 de agosto de 2015</b>	3.24	14.87	218
<b>26 de julio de 1987</b>	3.02	14.87	218
<b>24 de julio de 2014</b>	2.95	9.24	218
<b>22 de junio de 1997</b>	2.91	14.87	218
<b>19 de agosto de 2010</b>	2.90	16.36	218
<b>14 de agosto de 1988</b>	2.89	14.87	218
<b>23 de agosto de 1992</b>	2.85	16.36	218
<b>26 de mayo de 1985</b>	2.81	16.36	218
<b>27 de agosto de 2008</b>	2.80	14.87	248
<b>23 de junio de 1983</b>	2.80	14.87	218
<b>15 de agosto de 1995</b>	2.79	14.87	218
<b>16 de agosto de 2007</b>	2.78	14.87	218
<b>19 de junio de 1994</b>	2.75	16.36	218
<b>3 de agosto de 1981</b>	2.71	16.36	218
<b>4 de julio de 2013</b>	2.71	16.36	233
<b>9 de junio de 2006</b>	2.64	14.87	233
<b>29 de mayo de 1996</b>	2.64	16.36	233
<b>13 de agosto de 1998</b>	2.63	14.87	218
<b>6 de julio de 1984</b>	2.62	13.52	218
<b>4 de septiembre de 2011</b>	2.60	14.87	233
<b>8 de septiembre de 2009</b>	2.60	8.40	218
<b>27 de julio de 2002</b>	2.59	14.87	218
<b>8 de mayo de 1993</b>	2.58	16.36	218
<b>14 de agosto de 2012</b>	2.57	16.36	218
<b>9 de septiembre de 1980</b>	2.57	14.87	218
<b>23 de julio de 2003</b>	2.56	12.29	218
<b>12 de octubre de 1990</b>	2.55	14.87	218
<b>26 de julio de 1991</b>	2.53	16.36	218
<b>24 de junio de 2004</b>	2.51	14.87	218
<b>20 de mayo de 1986</b>	2.50	14.87	233
<b>14 de septiembre de 1999</b>	2.44	16.36	218
<b>23 de junio de 1989</b>	2.42	18.00	218
<b>17 de mayo de 1982</b>	2.36	14.87	233
<b>2 de julio de 2000</b>	2.35	12.29	218
<b>16 de mayo de 2001</b>	2.23	13.52	218

Fuente: Elaboración propia.

<b>TABLA 2.2.1.1. VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS O INSTALACIONES DE CARÁCTER DEFINITIVO (en años)</b>			
TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL	25	50	100
DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50

**LEYENDA:**

**INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL:**  
Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto.

**DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO:**  
Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo,...).

**NIVEL 1:**  
Obras e instalaciones de interés local o auxiliares.  
Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones,...).

**NIVEL 2:**  
Obras e instalaciones de interés general.  
Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...).

**NIVEL 3:**  
Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.  
(Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).

**Figura 9-225: Vida útil del proyecto.**  
Fuente: ROM 0.2, 1990.

Unit	Slope	Initial damage	Intermediate damage	Failure
Rock	1 : 1.5	2	3-5	8
Rock	1 : 2	2	4-6	8
Rock	1 : 3	2	6-9	12
Rock	1 : 4 - 1 : 6	3	8-12	17

Figura 9-226: Nivel de daño, Van der Meer (1988).  
Fuente: CEM 1110-2-1100 (2002).

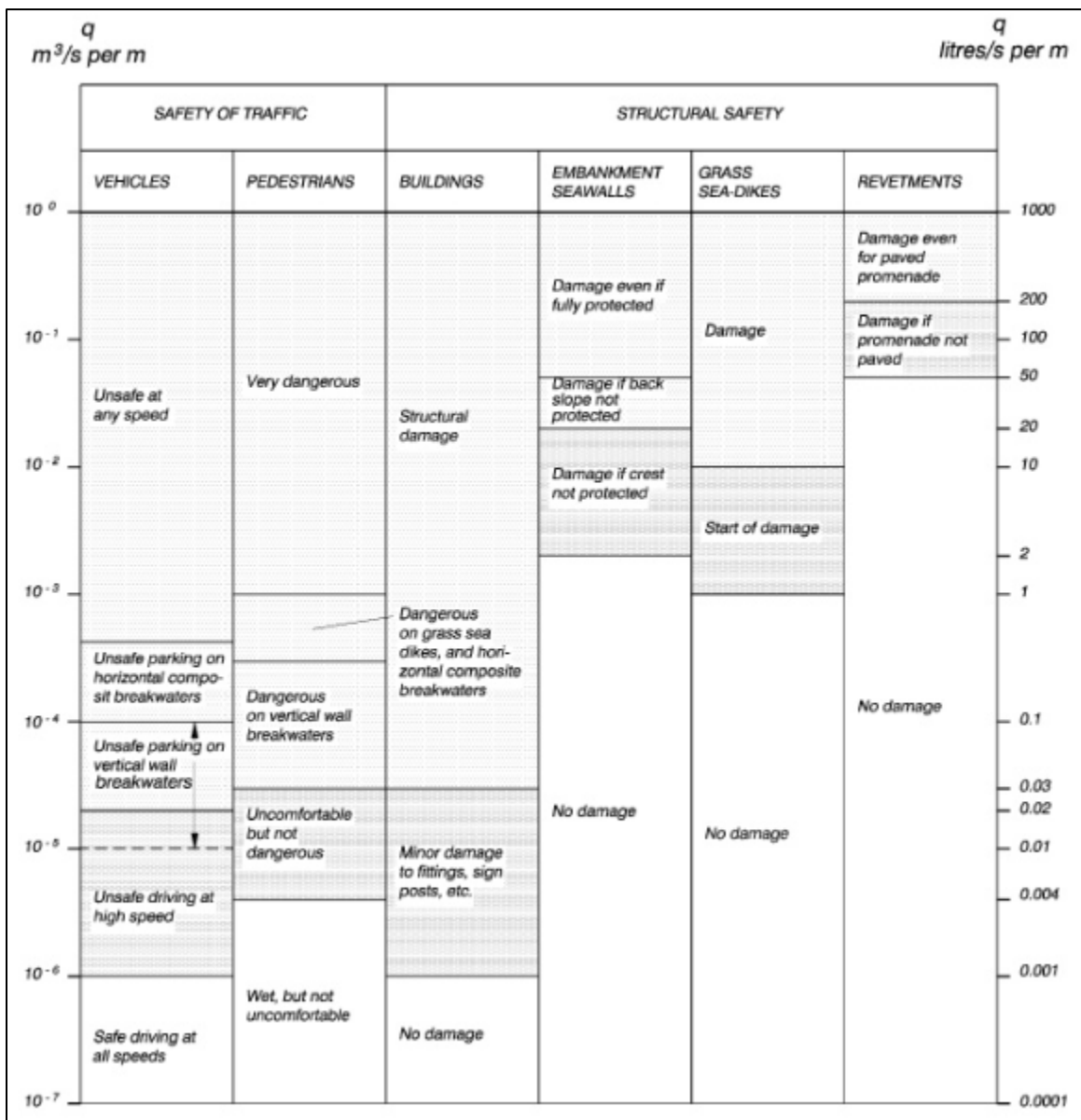


Figura 9-227: Caudal de sobrepaso admisible de acuerdo con el tipo de estructura.  
Fuente: CEM 1110-2-1100 (2002).