



“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MÓDULOS 2D Y 3D DEL MODELO DELFT3D FLOW PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO ASOCIADO A LAS CORRIENTES DE MAREA EN CANAL CHACAO”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

Reinaldo Adrián Barriga Bauden

Marzo 2016

Aprobación

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MÓDULOS 2D Y 3D DEL MODELO DELFT3D FLOW PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO ASOCIADO A LAS CORRIENTES DE MAREA EN CANAL CHACAO”

Reinaldo Adrián Barriga Bauden

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Marco Matamala C.

Profesor guía

Patricio Winckler G.

Docente

Catalina Aguirre G.

Docente

DECLARACIÓN

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

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a sus derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos, sin implicar esto algún propósito comercial o fines de lucro, lo cual no podrá ser hecho sin la autorización expresa del autor.

Marco Matamala Castro

PROFESOR GUÍA

Reinaldo Barriga Bauden

ALUMNO MEMORISTA

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y hermana, que me brindaron su apoyo constante e incondicional.

A mi padre, que a pesar de no estar físicamente puede contemplar que la promesa ha sido cumplida.

A mi familia en general por su constante apoyo y preocupación.

A mi gran amor Camila quien ha estado a mi lado desde que comencé este sendero, dándome apoyo y amor incondicional, lo cual fue una pieza fundamental para poder culminar este proceso.

A mis amigos Vicente Flores y Marco Soto, quienes me acompañaron durante todo mi proceso de formación y son grandes amigos.

Al señor Matías Quezada, por darme la idea y posibilidad de desarrollar esta memoria. Además de brindarme su apoyo y conocimiento en las primeras etapas de mi desarrollo profesional.

A mi profesor guía Marco Matamala por su amable disposición de apoyarme y guiarme en el desarrollo de este estudio.

A los profesores que fueron parte fundamental de mi formación profesional, Mauricio Molina, Mauricio Reyes, Mario Beale, José Beyá, Catalina Aguirre, Álvaro Valdivia, Luis Arancibia, Patricio Winckler e Ignacio Sepúlveda, a todos ellos gracias.

A Mauricio Bravo y Pablo Mackenney, por darme la confianza y el apoyo de dar mis primeros pasos profesionales en Costa Sur Ltda.

A Pablo Vera y José Ribba, por los largos debates sobre el tema, aportando buenas ideas y apoyo para el desarrollo de esta memoria.

A Diego Arce Morán, que siempre tuvo disposición para ayudarme y darme buenas ideas.

A la profesora Gianina Morales por su ayuda desinteresada en la revisión de la redacción del documento.

A la Dirección de Obras Portuarias por facilitarme los datos para realizar el estudio.

A Matías Valenzuela del departamento de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, por ayudarme con la búsqueda de información e incentivar el desarrollo del estudio.

A Catalina Herrera, por apoyarme en la revisión y redacción del documento.

En general ¡gracias a todos!

Reinaldo.

Dedico este trabajo a:

Mi padre Reinaldo Barriga Barrera, que a pesar de no estar en cuerpo siempre lo estará en mi corazón.

Camila, mi gran amor quien llena mi vida de luz.

Mi querida madre, Rosa.

Fabiola, mi hermana querida.

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad".

Albert Einstein.

LISTA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS.....	2
2.1	Objetivo general.....	2
2.2	Objetivos específicos.....	2
3	MARCO TEÓRICO	3
3.1	Mareas.....	3
3.1.1	Marea astronómica.....	3
3.1.2	Marea meteorológica.....	15
3.1.3	Tipos de marea.....	17
3.1.4	NRS y Nivel medio del mar	19
3.1.5	Predicción de mareas.....	19
3.1.6	Corrientes de marea y energía potencial	22
3.2	Ecuaciones hidrodinámicas fundamentales	22
3.2.1	Ecuación de continuidad	23
3.2.2	Ecuación de momentum.....	23
3.3	Implementación en Modelo Delft3D Flow RM	23
3.3.1	Módulo 2D	24
3.3.2	Módulo 3D	27
4	METODOLOGÍA	32
4.1	Elección del lugar	34
4.2	Caracterización del recurso en el sector	35
4.2.1	Revisión y análisis de antecedentes	35

4.2.2	Pre proceso de los datos de entrada del modelo hidrodinámico.....	38
4.3	Modelo hidrodinámico 2D	40
4.3.1	Pre proceso	40
4.3.2	Proceso	45
4.3.3	Post proceso.....	46
4.4	Modelo hidrodinámico 3D	47
4.4.1	Pre proceso	47
4.4.2	Proceso	50
4.4.3	Post proceso.....	52
4.5	Caracterización del potencial energético en zonas de interés	52
4.6	Análisis comparativo entre ambos módulos 2D y 3D	53
4.7	Creación atlas de energía potencial	54
5	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN CANAL CHACAO, X REGIÓN	55
5.1	Elección del lugar	55
5.2	Caracterización del recurso en el sector	56
5.2.1	Revisión y análisis de antecedentes	56
5.2.2	Pre proceso de los datos de entrada del modelo hidrodinámico.....	60
5.3	Modelación 2D.....	66
5.3.1	Pre proceso	67
5.3.2	Proceso	71
5.3.3	Post proceso.....	84
5.4	Modelación 3D.....	87
5.4.1	Pre Proceso.....	87

5.4.2	Proceso	88
5.4.3	Post Proceso	101
5.5	Caracterización del potencial energético en zonas de interés	104
5.6	Análisis comparativo entre ambos módulos 2D y 3D	104
5.7	Creación atlas de energía potencial de promedio mensual en Canal Chacao	119
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122
6.1	Discusión	122
6.1.1	Discusión sobre los módulos del modelo Delft3D Flow.....	122
6.1.2	Discusión del análisis comparativo entre ambos módulos.	123
6.2	Conclusión.....	124
6.3	Recomendaciones	125
7	REFERENCIAS	126
8	ANEXO	129
8.1	Anexo 1: Resultados calibración modelo 3D por capas.	129
8.2	Anexo 2: Salidas de Sicigias y Cuadratura del modelo 3D por capas.....	139
8.3	Anexo 3: Análisis de potencias 3D descritas en capa Superficial, Intermedia y Fondo.	158
8.4	Anexo 4: Glosario.	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Esquema cuerpos celestes rotando entorno al centro de masas C.	5
Figura 3-2: Esquema Luna – Tierra.	6
Figura 3-3 : Sistema Luna – Tierra.	8
Figura 3-4: Dirección de aceleración de la marea.	10
Figura 3-5: Distribución de fuerzas tractoras en la superficie de la Tierra.	11
Figura 3-6: Declinación lunar.	14
Figura 3-7: Fase lunar.....	15
Figura 3-8: Efectos combinados Luna y Sol sobre la marea.	15
Figura 3-9: Ciclo hidrológico.	17
Figura 3-10: Tipos de marea a nivel mundial.....	18
Figura 3-11: Referencia nivel del mar.	25
Figura 3-12: Esquema desarrollo 3D.	31
Figura 4-1: Diagrama metodología de estudio.....	33
Figura 4-2: Mapeo de coordenadas.	42
Figura 4-3: Calendario Lunar Agosto 2000.	44
Figura 4-4: Tipos de grilla 3D.....	49
Figura 4-5: Perfil vertical con wiggles.	51
Figura 4-6: Perfiles transversales de potencia en Canal Chacao.	54
Figura 5-1: Ubicación Canal Chacao, Chile.	55
Figura 5-2: Información batimétrica disponible en Canal Chacao.	57
Figura 5-3: Mareógrafos en Canal Chacao.....	58
Figura 5-4: Correntómetros en Canal Chacao.	59

Figura 5-5: Línea de costa obtenida desde carta náutica SHOA N°7210.....	60
Figura 5-6: Puntos de batimetría interpolados para la malla numérica.....	61
Figura 5-7: Análisis gráfico condición de borde Oeste.....	62
Figura 5-8: Análisis gráfico condición de borde Este.	63
Figura 5-9: Correlación cruzada de marea vs componente u.	65
Figura 5-10: Correlación cruzada de marea vs componente v.	66
Figura 5-11: Región de modelación.....	67
Figura 5-12: Malla para modelación.....	70
Figura 5-13: Batimetría en la región de modelación.	71
Figura 5-14: Ventana de modelación.....	72
Figura 5-15: Aproximación de nivel del mar - Carelmapu.....	75
Figura 5-16: Aproximación de nivel del mar - Eje 1.....	76
Figura 5-17: Aproximación de nivel del mar - Tique.	76
Figura 5-18: Correlación Modelo Delft3D – Carelmapu.....	77
Figura 5-19: Correlación Modelo Delft3D – Eje 1.	77
Figura 5-20: Correlación Modelo Delft3D – Tique.....	78
Figura 5-21: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos.....	79
Figura 5-22: Dirección de corrientes – Roca Remolinos.....	80
Figura 5-23: Magnitud de corrientes – Bajo Seluain.....	80
Figura 5-24: Dirección de corrientes – Bajo Seluain.....	81
Figura 5-25: Magnitud de corrientes – Puerto Elvira.....	81
Figura 5-26: Dirección de corrientes – Puerto Elvira.	82
Figura 5-27: Correlación modelo Delft3D – Roca Remolinos.	82

Figura 5-28: Correlación modelo Delft3D – Bajo Seluain.	83
Figura 5-29: Correlación modelo Delft3D – Puerto Elvira.	83
Figura 5-30: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 2D.	85
Figura 5-31: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 2D.	86
Figura 5-32: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 2D.	86
Figura 5-33: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 2D.	87
Figura 5-34: Aproximación de nivel del mar – Carelmapu 3D.	92
Figura 5-35: Aproximación de nivel del mar – Tique 3D.	92
Figura 5-36: Aproximación de nivel del mar – Eje 1 3D.	93
Figura 5-37: Correlación Modelo Delft3D – Carelmapu 3D.	93
Figura 5-38: Correlación Modelo Delft3D – Tique 3D.	94
Figura 5-39: Correlación Modelo Delft3D – Eje 1 3D.	94
Figura 5-40: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 1.	96
Figura 5-41: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 1.	96
Figura 5-42: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 5.	97
Figura 5-43: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 5.	97
Figura 5-44: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 9.	98
Figura 5-45: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 9.	98
Figura 5-46: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 1.	99
Figura 5-47: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 5.	99
Figura 5-48: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 9.	100
Figura 5-49: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D promedio.	102
Figura 5-50: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D promedio.	102

Figura 5-51: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D promedio.	103
Figura 5-52: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D promedio.	103
Figura 5-53: Tiempos de simulación módulos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow.	104
Figura 5-54: Sectores de Canal Chacao.	105
Figura 5-55: Perfil longitudinal de potencia promedio mensual en Canal Chacao – Módulo 3D.	107
Figura 5-56: Curvas de excedencia velocidad mensual 2D-3D.	108
Figura 5-57: Análisis energético comparativo entre módulos condición mensual.	109
Figura 5-58: Plano cartesiano con cuadrantes en coordenadas meteorológicas.	109
Figura 5-59: Perfil longitudinal de potencia promedio llenante en Canal Chacao – Módulo 3D.	111
Figura 5-60: Curvas de excedencia velocidad llenante 2D-3D.	112
Figura 5-61: Análisis energético comparativo entre módulos condición llenante.	112
Figura 5-62: Perfil longitudinal de potencia promedio vaciante en Canal Chacao – Módulo 3D.	114
Figura 5-63: Curvas de excedencia velocidad vaciante 2D-3D.	116
Figura 5-64: Análisis energético comparativo entre módulos condición vaciante.	116
Figura 5-65: Esquema gráfico utilizado para generar mapa energético en Canal Chacao. .	119
Figura 5-66: Mapa energético promedio mensual de Canal Chacao.	120
Figura 5-67: Velocidad vertical de módulos y medición en conjunto.	121
Figura 8-1: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 2.	129
Figura 8-2: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 2.	130
Figura 8-3: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 3.	130
Figura 8-4: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 3.	131
Figura 8-5: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 4.	131

Figura 8-6: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 4.....	132
Figura 8-7: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 6.....	132
Figura 8-8: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 6.....	133
Figura 8-9: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 7.....	133
Figura 8-10: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 7.....	134
Figura 8-11: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 8.....	134
Figura 8-12: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 8.....	135
Figura 8-13: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 2.....	135
Figura 8-14: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 3.....	136
Figura 8-15: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 4.....	136
Figura 8-16: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 6.....	137
Figura 8-17: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 7.....	137
Figura 8-18: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 8.....	138
Figura 8-19: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 1.....	139
Figura 8-20: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 1.....	140
Figura 8-21: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 1.....	140
Figura 8-22: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 1.....	141
Figura 8-23: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 2.....	141
Figura 8-24: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 2.....	142
Figura 8-25: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 2.....	142
Figura 8-26: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 2.....	143
Figura 8-27: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 3.....	143
Figura 8-28: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 3.....	144

Figura 8-29: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 3.	144
Figura 8-30: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 3.	145
Figura 8-31: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 4.....	145
Figura 8-32: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 4.....	146
Figura 8-33: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 4.	146
Figura 8-34: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 4.	147
Figura 8-35: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 5.....	147
Figura 8-36: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 5.....	148
Figura 8-37: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 5.	148
Figura 8-38: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 5.	149
Figura 8-39: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 6.....	149
Figura 8-40: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 6.....	150
Figura 8-41: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 6.	150
Figura 8-42: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 6.	151
Figura 8-43: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 7.....	151
Figura 8-44: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 7.....	152
Figura 8-45: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 7.	152
Figura 8-46: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 7.	153
Figura 8-47: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 8.....	153
Figura 8-48: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 8.....	154
Figura 8-49: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 8.	154
Figura 8-50: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 8.	155
Figura 8-51: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 9.....	155

Figura 8-52: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D – capa 9.....	156
Figura 8-53: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 9.	156
Figura 8-54: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 9.	157
Figura 8-55: Perfil longitudinal de potencia mensual en Canal Chacao – Capa Superficial.	159
Figura 8-56: Curvas excedencia de velocidad mensual – Capa Superficial.	159
Figura 8-57: Curvas excedencia de potencia mensual – Capa Superficial.....	160
Figura 8-58: Perfil longitudinal de potencia llenante en Canal Chacao – Capa Superficial. .	161
Figura 8-59: Curvas excedencia de velocidad llenante – Capa Superficial.	161
Figura 8-60: Curvas excedencia de potencia llenante – Capa Superficial.....	162
Figura 8-61: Perfil longitudinal de potencia vaciante en Canal Chacao – Capa Superficial.	163
Figura 8-62: Curvas excedencia de velocidad vaciante – Capa Superficial.	163
Figura 8-63: Curvas excedencia de potencia vaciante – Capa Superficial.....	164
Figura 8-64: Perfil longitudinal de potencia mensual en Canal Chacao – Capa Intermedia.	165
Figura 8-65: Curvas excedencia de velocidad mensual – Capa Intermedia.....	165
Figura 8-66: Curvas excedencia de potencia mensual – Capa Intermedia.	166
Figura 8-67: Perfil longitudinal de potencia llenante en Canal Chacao – Capa Intermedia..	167
Figura 8-68: Curvas excedencia de velocidad llenante – Capa Intermedia.....	167
Figura 8-69: Curvas excedencia de potencia llenante – Capa Intermedia.	168
Figura 8-70: Perfil longitudinal de potencia vaciante en Canal Chacao – Capa Intermedia.	169
Figura 8-71: Curvas excedencia de velocidad vaciante – Capa Intermedia.....	169
Figura 8-72: Curvas excedencia de potencia vaciante – Capa Intermedia.....	170
Figura 8-73: Perfil longitudinal de potencia mensual en Canal Chacao –	171
Figura 8-74: Curvas excedencia de velocidad mensual – Capa Fondo.....	171

Figura 8-75: Curvas excedencia de potencia mensual – Capa Fondo.	172
Figura 8-76: Perfil longitudinal de potencia llenante en Canal Chacao –	173
Figura 8-77: Curvas excedencia de velocidad llenante – Capa Fondo.....	173
Figura 8-78: Curvas excedencia de potencia llenante – Capa Fondo.	174
Figura 8-79: Perfil longitudinal de potencia vaciante en Canal Chacao –.....	175
Figura 8-80: Curvas excedencia de velocidad llenante – Capa Fondo.....	175
Figura 8-81: Curvas excedencia de potencia vaciante – Capa Fondo.	176

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1: Valores de parámetros astronómicos Luna, Sol y Tierra.....	12
Tabla 3-2: Constituyentes astronómicos de la marea principales.....	20
Tabla 5-1: Coordenadas registros nivel del mar.	58
Tabla 5-2: Constituyentes armónicas en mareógrafos Canal Chacao.....	64
Tabla 5-3: Condiciones de borde 2D.	69
Tabla 5-4: Cuadro energético comparativo mensual de los módulos 2D-3D.....	106
Tabla 5-5: Cuadro energético comparativo llenante de los módulos 2D-3D.....	110
Tabla 5-6: Cuadro energético comparativo vaciante de los módulos 2D-3D.....	114
Tabla 5-7: Cuadro comparativo resumen de las principales diferencias entre ambos módulos.	118
Tabla 8-1: Cuadro energético potencia mensual – Capa Superficial.....	158
Tabla 8-2: Cuadro energético potencia llenante – Capa Superficial.....	160
Tabla 8-3: Cuadro energético potencia vaciante – Capa Superficial.....	162
Tabla 8-4: Cuadro energético potencia mensual – Capa Intermedia.....	164
Tabla 8-5: Cuadro energético potencia llenante – Capa Intermedia.....	166
Tabla 8-6: Cuadro energético potencia vaciante – Capa Intermedia.....	168
Tabla 8-7: Cuadro energético potencia mensual – Capa Fondo.	170
Tabla 8-8: Cuadro energético potencia llenante – Capa Fondo.	172
Tabla 8-9: Cuadro energético potencia vaciante – Capa Fondo.....	174

RESUMEN

Con el fin de realizar un análisis comparativo entre los módulos 2D y 3D del modelo Delft 3D Flow, se recopilaron datos de corrientes en la zona de Canal Chacao para, en conjunto con los datos de campo, calibrar el modelo y evaluar diferentes situaciones, incorporando distintas forzantes en ambos módulos del modelo. Se analizaron perfiles transversales a lo largo de Canal Chacao para examinar las diferencias respecto de la estimación del potencial de la energía por corriente de marea, empleando un módulo 2D y 3D del modelo Delft3D Flow. Finalmente, se generaron conclusiones en relación a los recursos (tiempo de procesamiento, horas de trabajo, costos, etc.) necesarios a utilizar para estimar la magnitud de recursos energéticos por corrientes de marea que se encuentran disponibles en la franja del Canal Chacao. Se señalan las ventajas que entrega el uso de cada módulo por separado.

El análisis fue desarrollado en tres etapas. En la primera se analizaron las herramientas disponibles para generar el estudio, evaluando la información disponible para la representación hidrodinámica en 2D y 3D a lo largo de la zona, y se definió la metodología para llevar a cabo el estudio. La segunda etapa consistió en la simulación del comportamiento hidrodinámico del Canal Chacao, mediante un proceso iterativo que culminó al calibrar ambos módulos del modelo. En la tercera etapa se realizó el análisis comparativo de la potencia energética obtenida, utilizando la corriente de marea simulada por ambos módulos.

Efectuar un estudio práctico de esta naturaleza, permite generar recomendaciones respecto a la utilidad de realizar una simulación numérica en dos o tres dimensiones, considerando; tiempos de simulación y precisión de resultados.

En el análisis de tiempos de simulación, se observó que el módulo 3D demoró aproximadamente 29 hrs y el módulo 2D alrededor de 3,5 hrs.

Para evaluar la precisión de los resultados entre los módulos, se consideraron tres condiciones, llenante, mensual y vaciante. Las mayores diferencias fueron; 5,27% en el perfil 2 para la condición Llenante, 2,28% en el perfil 7 para la condición mensual y 6,12% en el perfil 7 para la condición vaciante. En términos energéticos, la diferencia entre los perfiles fue pequeña pues, en términos generales, no superó los $40 \left[\frac{W}{m^2} \right]$. Del análisis de precisión de resultados, se visualizó que el módulo 3D contó con velocidades de corriente promedio mayores al módulo 2D.

En resumen, no se aprecian diferencias energéticas importantes entre ambos módulos, pero si en el tiempo de simulación y detalle que ofrece cada uno. Se recomienda utilizar los módulos de forma complementaria, usando el módulo 2D para identificar zonas energéticas en planta y el módulo 3D para obtener un detalle de la energía en esas zonas.

ABSTRACT

In order to make a comparative analysis between 2D and 3D model Delft3D Flow modules, current data were collected in the Chacao Canal, together with field data to calibrate the model and evaluate different scenarios, incorporating different forcing in both modules. Cross sections were analyzed along Chacao Canal to examine differences regarding the estimation of the potential of tidal current energy. Conclusions are generated in relation to resources (processing time, hours of work, costs, etc.) required to be used to estimate the magnitude of energy resources by tidal currents which are available on Chacao Channel.

The study was developed in three stages: In the first one, I analyze the tools available to evaluating the information available for the hydrodynamic representation in 2D and 3D over the area along with defining the methodology to develop the study. The second stage involved the simulation of hydrodynamic behavior in Chacao Channel, being an iterative process leading to the calibration of both modules of the model. Finally, the third stage was to conduct a comparative analysis of power energy obtained by formulations using current tide simulated by both modules.

Carry out a practical study of this nature can generate recommendations for different projects on the utility to perform a numerical simulation in two or three dimensions. Considering the usefulness of each module, based on the simulation time and accuracy of results.

In the analysis of simulation time, had watched that 3D module took approximately 29 hrs and 2D module about 3.5 hrs.

In the analysis three conditions were evaluated, fill, monthly and vacate. The biggest differences between modules in these conditions were; 5.27% in profile 2 for fill condition, 2.28% in profile 7 for monthly condition and 6.12% in profile 7 for vacate condition. In energy terms, the difference between profiles was small since; in general, it does not exceed $40 \left[\frac{W}{m^2} \right]$. From the precision analysis results, it was visualized that the 3D module had averaged current speeds greater than 2D module.

In summary, the energy differences between modules were minor, the major differences had seen on simulation time and details of every one. It is recommended to use the modules complementarily, using the 2D module to identify energy areas on plant and 3D module for more detail from the energy in those areas.

1 INTRODUCCIÓN

En un poco más de 300 años, la población mundial se ha incrementado de menos de 2 mil millones a más de 7 mil millones, es decir, se registra un aumento de casi el triple de personas en el mundo. Esto sumado a las nuevas tecnologías, impulsa una demanda energética creciente. Según datos del Ministerio de Energía, en Chile se proyectan tasas de consumo energético de 6% a 7% para el 2020, lo cual implicaría una demanda cercana a 100 mil GWh, significando un aumento de 8000 MW, sólo para este periodo de tiempo. (Ministerio de Energía, 2012). Actualmente el sistema interconectado de Chile se encuentra abastecido principalmente por energía convencional, la cual viene limitada por el agotamiento del recurso y la creciente demanda energética. Los desafíos energéticos en Chile más la necesidad de protección al medio ambiente, conducen a explotar nuevas fuentes de energía limpias. Así, surgen las energías renovables no convencionales, que a diferencia de las energías convencionales, pueden restaurar su suministro a una escala de tiempo humana. Chile cuenta con diferentes fuentes de energía renovable no convencional como la Eólica, Solar, Biomasa, Geotérmica e Hidráulica, las que aportan tan solo un 3% de la producción total (Ministerio de Energía, 2012). No obstante, estas fuentes están siendo impulsadas como políticas de Estado por su gran aporte energético y bajo impacto ambiental.

Dentro de las principales fuentes de energía renovable, se encuentra la generada por la marea, que resulta atractiva por contar con un comportamiento predecible y generar importantes aportes energéticos. La marea acentúa su comportamiento en zonas interiores ubicadas al sur del país, tales como fiordos, canales y estuarios. Dentro de las zonas con mayor potencial energético explotable, se encuentra el Canal Chacao, que cuenta con las condiciones geográficas óptimas para extracción del recurso energético. Para esto existen dos alternativas que son: Extraer la energía potencial mediante la implementación de una represa que capte la energía de los desniveles de marea, o extraer la energía cinética extraída de las corrientes de marea, transformándola en energía mecánica, a través de turbinas. Dada las extensas zonas interiores y el menor impacto ambiental, la alternativa de turbinas resulta más atractiva. Actualmente, existen distintos estudios que evalúan la factibilidad económica de extraer energía en la zona, mediante simulaciones hidrodinámicas 2D y la simulación de granjas de turbinas, entre otros (por ejemplo; Sepúlveda, 2010).

El presente estudio busca generar un conocimiento práctico, respecto a qué tan ventajoso resulta realizar un modelo hidrodinámico en dos dimensiones, respecto de uno en tres dimensiones, para evaluar el potencial energético contenido en el Canal Chacao. En la actualidad, se cuenta con una serie de modelos numéricos que permiten llevar a cabo este proceso, sin embargo, este estudio pretende fomentar el libre uso de un modelo de código abierto llamado Delft3D Flow. Con este modelo se caracterizará la hidrodinámica promediada en la vertical (2D) junto con el comportamiento detallado de las corrientes de marea a diferentes profundidades (3D), para luego realizar la comparación entre ambos módulos en diferentes variables (tiempos de simulación, dificultad de uso de cada módulo y calidad de resultados, entre otros). Además se generará un mapa energético promedio mensual, utilizando los resultados del módulo 3D para identificar las zonas energéticamente atractivas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

“Comparar los resultados de los módulos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow para la evaluación del potencial energético por corrientes de marea, en Canal Chacao”

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la capacidad de representar la hidrodinámica del Canal Chacao de los módulos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow, mediante la comparación de los resultados simulados con las mediciones de campo.
- Identificar la disponibilidad de recurso energético en la zona, realizando una simulación con el módulo 3D del modelo Delft3D Flow.
- Establecer una comparación entre ventajas y desventajas sobre el uso de tiempo de simulación, facilidad de uso en cada módulo, precisión en los resultados y porcentaje de error entre los módulos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow para evidenciar la disimilitud entre ellos.
- Realizar recomendaciones sobre la pertinencia de los módulos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow, con el fin de evaluar de la disponibilidad del recurso energético en la zona de Canal Chacao.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Mareas

Las mareas son movimientos periódicos de ascenso y descenso del nivel del mar, originados por una serie de factores. El principal factor es de origen astronómico, representado mediante las fuerzas de atracción que, la Luna, el Sol y otros planetas producen en el mar. Por otra parte, existe otro factor de origen meteorológico, el cual tiene por objeto representar la influencia de distintos fenómenos locales (Pugh, 1987). Dentro de los principales agentes meteorológicos se consideran, el viento y la presión atmosférica. Además, existen una serie de componentes secundarios que perturban el nivel del mar; por ejemplo, el oleaje (wave setup y wave setdown), lluvias, terremotos y meteoritos (Rodríguez et al, 2004).

3.1.1 Marea astronómica

La marea astronómica se origina de la resultante de fuerzas generadas principalmente por la atracción de la Luna y el Sol sobre la Tierra. El concepto de la marea, junto con algunas interrogantes como por qué existen dos mareas diarias ha sido objeto de estudio durante cientos de años. En el siglo XVI Galileo Galilei pensaba que la marea era generada por el ciclo de la Tierra entorno al Sol. En cambio, Johannes Kepler (siglo XVI) tenía seguridad que su origen se debía al efecto de la Luna, a pesar que su teoría explicaba tan solo una marea alta al día. Finalmente, este fenómeno fue resuelto por Isaac Newton en 1687 con su teoría de la gravitación universal.

a) Fuerzas generadoras

El fenómeno de las mareas es gobernado por la teoría de gravitación universal propuesta por Newton (1687). La teoría establece que “*Toda partícula material del universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa*”. Es decir, si se tiene dos partículas m_1 y m_2 separadas a una distancia r medida desde sus centros (Figura 3-1) la magnitud de la fuerza de atracción gravitacional F_G , viene dada por la ecuación (2.1.1) (Kapoulitsas, 1985):

$$F_G = G \frac{m_T m_{SL}}{r^2} \quad (2.1.1)$$

Donde:

m_T = Masa de la tierra.

m_{SL} = Masa de la Luna o el Sol.

G = Constante de gravitación universal $\left(6,67 * 10^{-11} \left[\frac{Nm^2}{Kg^2}\right]\right)$

r = Distancia media entre el centro de masa de ambos astros.

En principio, es necesario notar que la rotación de la Tierra alrededor de su propio eje, no es causante de variaciones del nivel medio del mar a lo largo de las líneas de latitud constante. Esta rotación da lugar a una fuerza centrípeta por unidad de masa con valor constante, dada por la ecuación (2.1.2) (Pugh, 1987):

$$F_c = \Omega^2 R_t \cos\theta \quad (2.1.2)$$

Donde:

Ω = Velocidad angular de la Tierra alrededor de su propio eje.

R_t = Radio de la Tierra.

θ = Latitud.

Considerando que la Tierra permanece irrotacional, es posible plantear el equilibrio entre fuerzas centrípetas y gravitacionales, con el fin de obtener la posición del centro de masa y la velocidad de rotación. La fuerza centrípeta terrestre viene descrita por la ecuación (2.1.3) (Pugh, 1987):

$$F_{cT} = m_T \omega^2 r_T \quad (2.1.3)$$

Donde:

ω = Frecuencia angular del astro.

r_T = Radio de la tierra.

Considerando la estructura presentada como ejemplo en la Figura 3-1 se observa que, de acuerdo con la ley de gravitación universal en cualquier punto X de la tierra un cuerpo celeste de masa S ejerce un empuje gravitacional (F_G), cuya magnitud es inversamente proporcional a la distancia al cuadrado. Igualmente la fuerza gravitacional del cuerpo celeste T genera una aceleración en S. Ambos cuerpos, sin embargo, no colisionan debido a que ambos cuentan con una fuerza centrípeta (ecuación (2.1.3)) en dirección perpendicular a la línea TS. El resultado es que, ambos cuerpos revolucionan en torno al centro de masas común (punto C). El sistema de partículas Tierra y Sol cuenta con un centro de masas común, ubicado a 149.599.550,8 [km] desde el centro del planeta Tierra. El periodo de revolución de la Tierra alrededor del Sol consta de 365 días 5 horas 48 minutos 45,68 segundos, denominado año tropical. (Pugh, 1987 & Hicks, 2006).

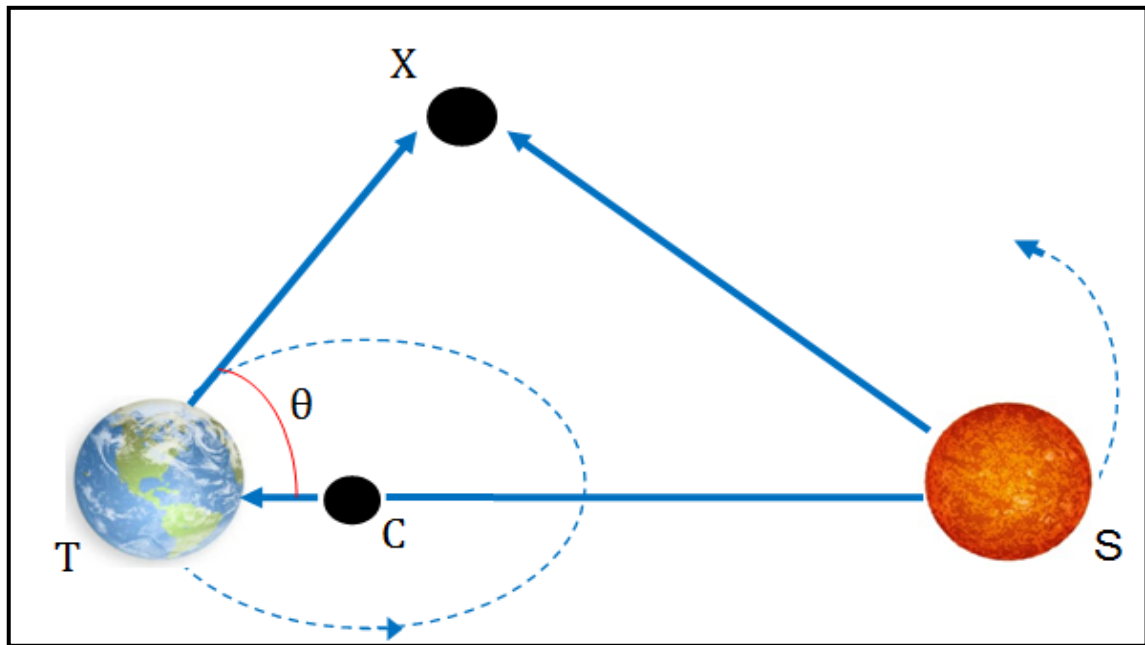


Figura 3-1: Esquema cuerpos celestes rotando entorno al centro de masas C.

Fuente: Elaboración propia.

Para la relación Luna - Tierra, se aplica el mismo principio de rotación en torno a un centro de masas común, con un período de revolución de la Luna sobre la Tierra de 27,32 días solares llamado mes sideral, mismo tiempo que le toma a la Luna rotar sobre su eje. Por otra parte, la Luna completa una revolución en 29 días 12 horas y 44 minutos con respecto al Sol, lo cual se conoce como mes sinódico.

Para realizar el análisis del comportamiento entre el sistema Luna – Tierra, se consideran tanto las fuerzas de atracción gravitatorias entre ambos cuerpos celestes como las fuerzas internas. Asimismo se observa desde un punto de vista externo, que el centro de masas no presenta aceleración (sistema en reposo). La Tierra rota de forma excéntrica respecto al centro de masas ubicado a 4671 kilómetros desde el centro de la Tierra, permaneciendo irrotacional durante el movimiento del sistema. Por tanto, todos los puntos sobre y dentro de la Tierra giran con la misma frecuencia angular, describiendo arcos del mismo radio. En consecuencia, cualquier punto P en la Tierra está sometido en todo momento a la misma fuerza centrípeta por unidad de masa. En la Figura 3-2 se observa un esquema del movimiento excéntrico del sistema Tierra – Luna, donde el punto negro representa el centro de masas del sistema, se utiliza un código de colores que permite visualizar la correspondencia entre la posición de la Luna y Tierra respectivamente dentro de un mes sideral (Pugh, 1987 & Hicks, 2006).

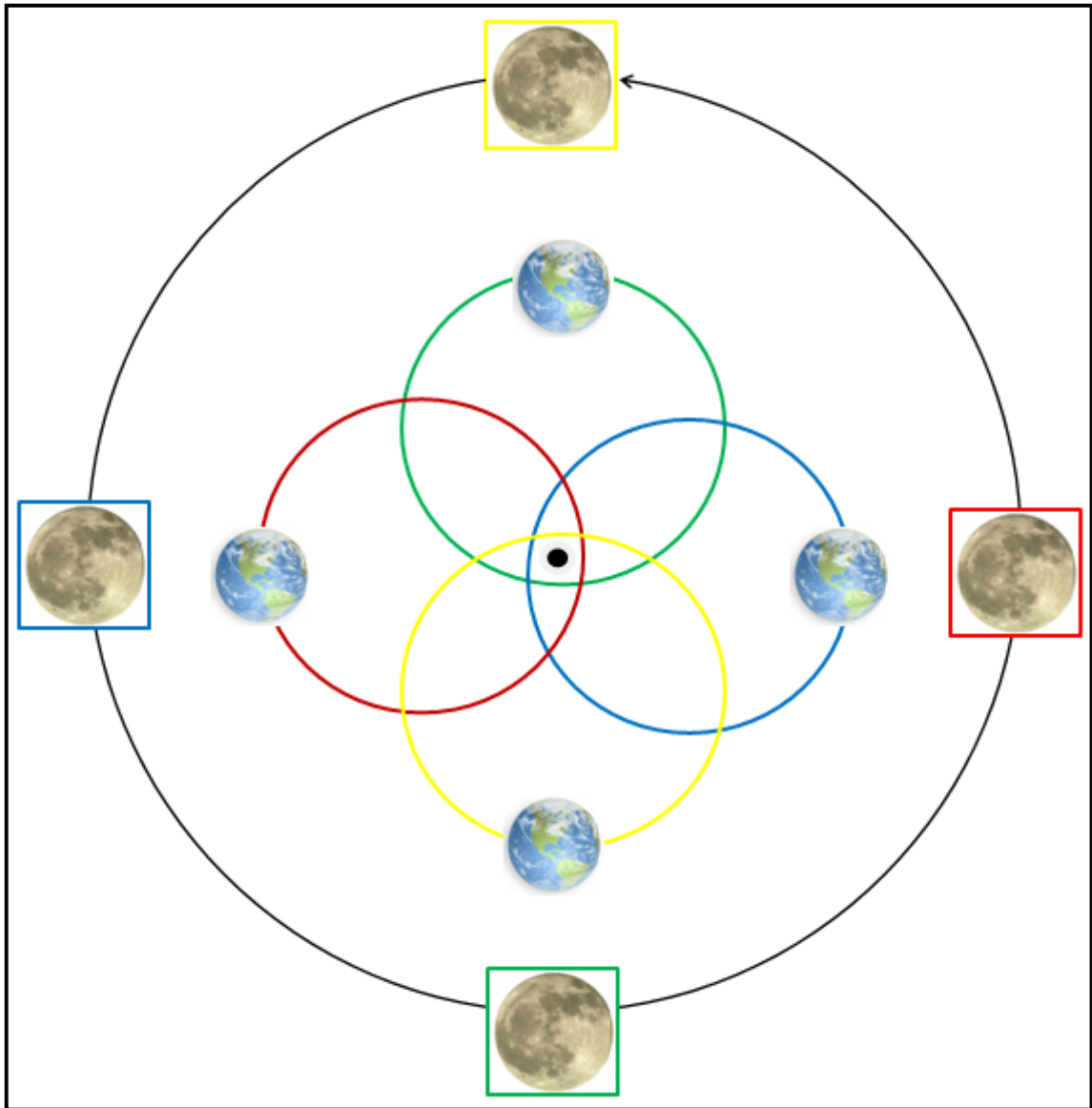


Figura 3-2: Esquema Luna – Tierra.

Fuente: Elaboración propia.

Las partículas experimentan una fuerza centrípeta y de atracción gravitacional, con una magnitud y dirección variables respecto a las distintas posiciones del satélite (declinación α). Se observa como resultado, que estas fuerzas no están balanceadas en todos los puntos del planeta. La resultante entre estas fuerzas produce aceleraciones generadoras de la marea en la Tierra (Gjevick, 2006 & Pugh, 1987).

La marea se genera como resultado de fuerzas diferenciales obtenidas de, la fuerza de atracción gravitacional entre los cuerpos (Tierra-Sol y Tierra-Luna), la fuerza centrífuga producida por la rotación de la Tierra alrededor del Sol, y la Luna alrededor de la Tierra.

Combinando la Ley de gravitación universal y segunda ley de movimiento propuestas por Newton en 1697, se pueden desarrollar formulaciones que describan una fuerza diferencial en cualquier punto de la Tierra, con la dirección y magnitud variable dependiendo del lugar sobre la superficie de la Tierra. Como resultado se obtienen gradientes de fuerza necesarios para producir la aceleración en la órbita terrestre hacia el centro del sistema Tierra-Luna (ecuación (2.1.4)), que puede ser descrita por una componente horizontal a_h y otra vertical a_v (Pugh, 1987; Gjevick, 2006; Hicks, 2006 & Kapoulitsas, 1985).

La fuerza de atracción gravitacional (ecuación 2.1.1) genera una aceleración al centro de la tierra (Figura 3-3) descrita por la ecuación (2.1.4).

$$a_0 = G \frac{m_L \vec{R}}{R^2 R} \quad (2.1.4)$$

Donde:

a_0 = Aceleración al centro de la Tierra.

\vec{R} = Distancia desde el punto O hasta la Luna.

m_L = Masa de la Luna.

$R = |\vec{R}|$ longitud del vector R.

De manera similar, la aceleración en un punto P resultado del empuje gravitacional de la Luna sobre la Tierra (Figura 3-3), se define por la ecuación (2.1.5).

$$a_p = G \frac{m_L \vec{d}}{d^2 d} \quad (2.1.5)$$

Donde:

a_p = Aceleración en el punto P generada por el empuje de la Luna.

\vec{d} = Distancia desde el punto P hasta la Luna.

$d = |\vec{d}|$ longitud del vector d.

Dado que d y R son grandes comparados con el radio de la Luna, se considera entonces un punto M, obteniendo la ecuación (2.1.6):

$$\vec{R} = \vec{r} + \vec{d} \quad (2.1.6)$$

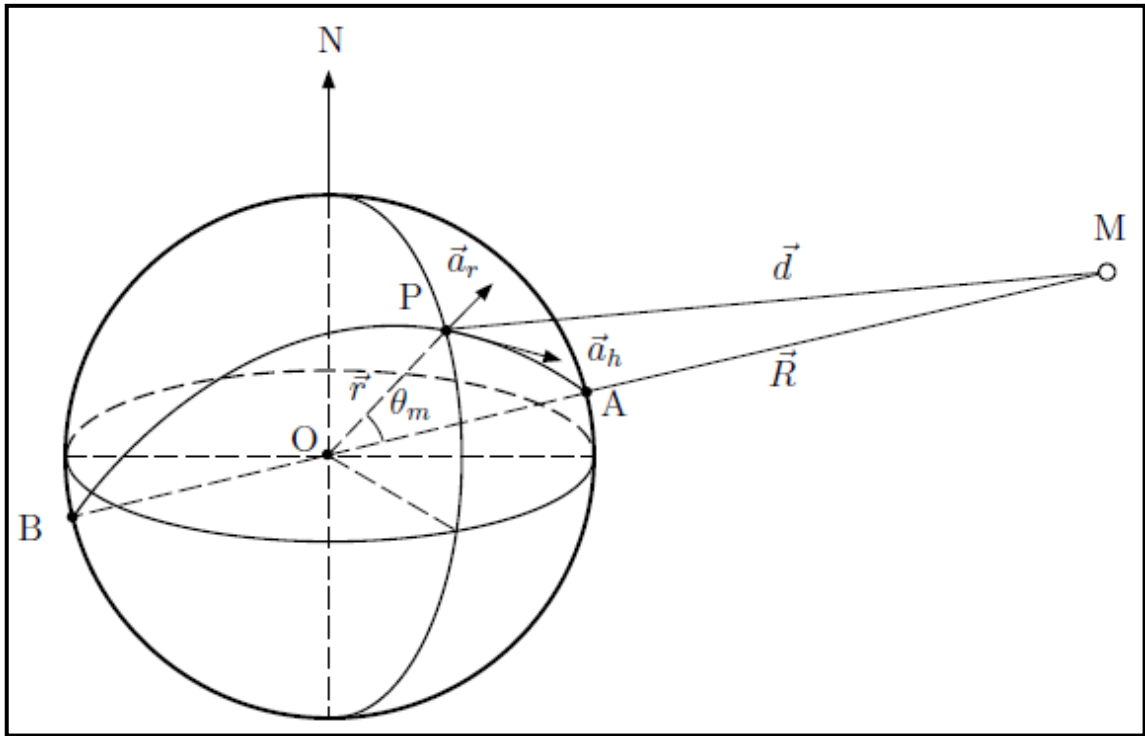


Figura 3-3 : Sistema Luna – Tierra.

Fuente: (Gjevick, 2006).

La diferencia entre a_p y a_o representa la aceleración de la marea correspondiente a la fuerza por unidad de masa, representada la ecuación (2.1.7):

$$\vec{a}_m = \vec{a}_P - \vec{a}_o$$

$$\vec{a}_m = Gm_L \left[\frac{\vec{d}}{d^3} - \frac{\vec{R}}{R^3} \right] \quad (2.1.7)$$

Para una noción más clara del origen de la fuerza, se introduce el concepto de *potencial gravitacional* de un cuerpo. El potencial gravitacional en un punto P ubicado sobre la superficie de la Tierra, resulta del efecto ejercido por la Luna (M) como muestra la Figura 3-3. Éste se define por la ecuación (2.1.8) (Kapoulitsas, 1985):

$$\Omega_P = -\frac{Gm_L}{MP} \quad (2.1.8)$$

En física normalmente la definición de *potencial gravitacional* considera signo negativo, sin embargo, la convención utilizada en geodesia conserva la ecuación (2.1.8) con valor positivo. La ventaja del valor por convención geodésica es que un incremento en el potencial gravitacional genera un aumento del nivel del mar (Garland, 1965 en Pugh, 1987; página, 67).

Aplicando la ley del coseno al triángulo OPM de la Figura 3-3, se tiene:

$$MP^2 = r^2 + \vec{R}^2 - 2r\vec{R} \cos \theta_m$$

Entonces, tenemos:

$$\Omega_P = -\frac{Gm_L}{\vec{R}} \left\{ 1 - 2\frac{r}{\vec{R}} \cos \theta_m + \frac{r^2}{\vec{R}^2} \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

El cual puede ser expandido como una serie de Polinomios de Legendre:

$$\Omega_P = -\frac{Gm_L}{\vec{R}} \left\{ 1 - P_1 \frac{r}{\vec{R}} \cos \theta_m + P_2 \frac{r^2}{\vec{R}^2} \cos \theta_m + P_3 \frac{r^3}{\vec{R}^3} \cos \theta_m + \dots \right\} \quad (2.1.9)$$

Los términos $P_n \cos \theta_m$ polinomios de Legendre son:

$$P_1 \cos \theta_m = \cos \theta_m$$

$$P_2 \cos \theta_m = \frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta_m - 1)$$

$$P_3 \cos \theta_m = \frac{1}{2} (5 \cos^3 \theta_m - 3 \cos \theta_m)$$

$$P_4 \cos \theta_m = \frac{1}{8} (35 \cos^4 \theta_m - (30 \cos^2 \theta_m) + 3) \dots$$

El primer término de la ecuación (2.1.9) es constante (excepto para variaciones de \vec{R}), por lo que no produce fuerzas. El segundo término, produce fuerzas paralelas a OM (Figura 3-3), por tanto, la diferenciación respecto a $(r \cos \theta_m)$ produce un gradiente potencial:

$$-\frac{d\Omega_P}{d(r \cos \theta_m)} = -\frac{Gm_L}{\vec{R}^2}$$

Ésta es la fuerza necesaria para producir la aceleración en la órbita terrestre hacia el centro de masa del sistema Luna-Tierra. El tercer término es el mayor término que produce marea. Para mayor precisión el cuarto término puede ser abandonado porque $(r/\vec{R}) \approx 1/60$, como todos los términos más altos.

Finalmente, el potencial efectivo generador de marea queda definido por la ecuación (2.1.10) (Pugh, 1987; Kapoulitsas, 1985; Gjevick, 2006 & Hicks, 2006):

$$\Omega_P = -\frac{1}{2} G m_L \frac{r^2}{\vec{R}^3} (3 \cos^2 \theta_m - 1) \quad (2.1.10)$$

La fuerza por unidad de masa correspondiente al potencial en el punto P puede descomponerse en dos componentes: una componente de aceleración vertical a_v (ecuación (2.1.11)), y una horizontal a_h (que se mueve a través del arco APB, Figura 3-3) representada por la ecuación (2.1.12), se obtiene luego:

$$-\frac{d\Omega_P}{d(r)} = a_v = 3g \frac{m_L}{m_T} \frac{r^3}{R^3} \left[\cos^2 \theta_m - \frac{1}{3} \right] \quad (2.1.11)$$

$$-\frac{1}{r} \frac{d\Omega_P}{d\theta_m} = a_h = -\frac{3}{2}g \frac{m_L}{m_T} \frac{r^2}{R^3} \sin 2\theta_m \quad (2.1.12)$$

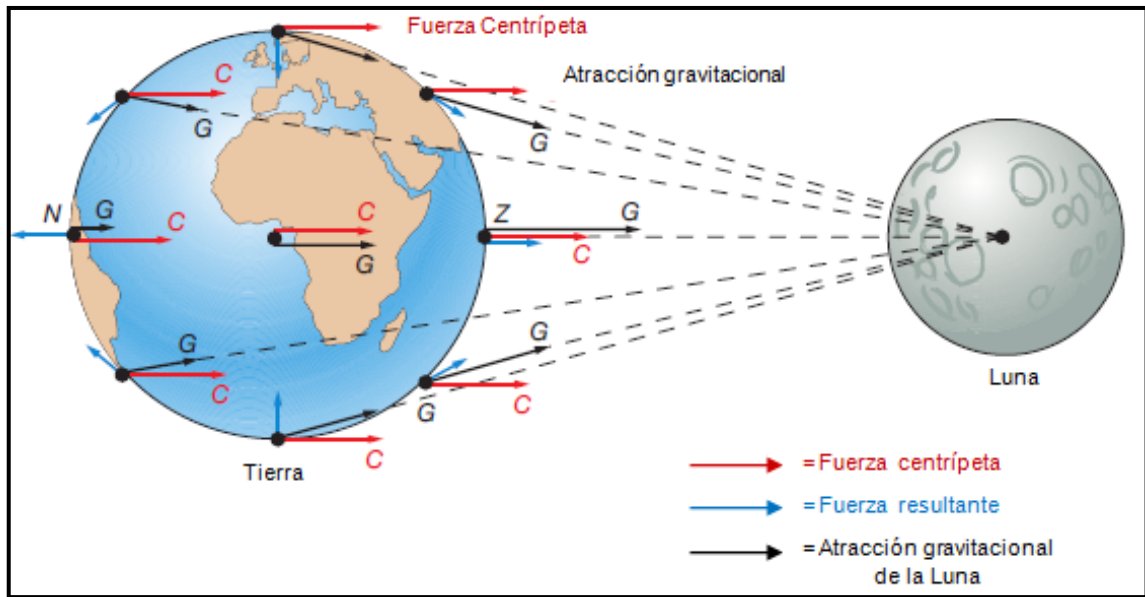


Figura 3-4: Dirección de aceleración de la marea.

Fuente: Essentials of Oceanography, 10th edition.

Por lo tanto, habrá una componente de aceleración dirigida directamente por debajo de la Luna, conocida como punto SubLunar (Z, llamado Zénit), y el punto en la Tierra exactamente opuesto conocido como Antipodal (N, llamado Nadir). La fuerza resultante, surge como producto de la fuerza centrípeta (de signo negativo) y la atracción gravitacional ejercida por la Luna sobre la tierra, como se observa en la Figura 3-4 (Pugh, 1987 & Kapoulitsas, 1985).

Las fuerzas verticales producen pequeñas aceleraciones en el peso de un cuerpo, pero son las diminutas fuerzas horizontales las que producen aceleraciones necesarias para producir movimientos en el agua; éstas son llamadas *fuerzas tractoras*. La Figura 3-5 muestra la distribución de las fuerzas de tracción horizontales en la superficie de la Tierra (Gjevick, 2006).

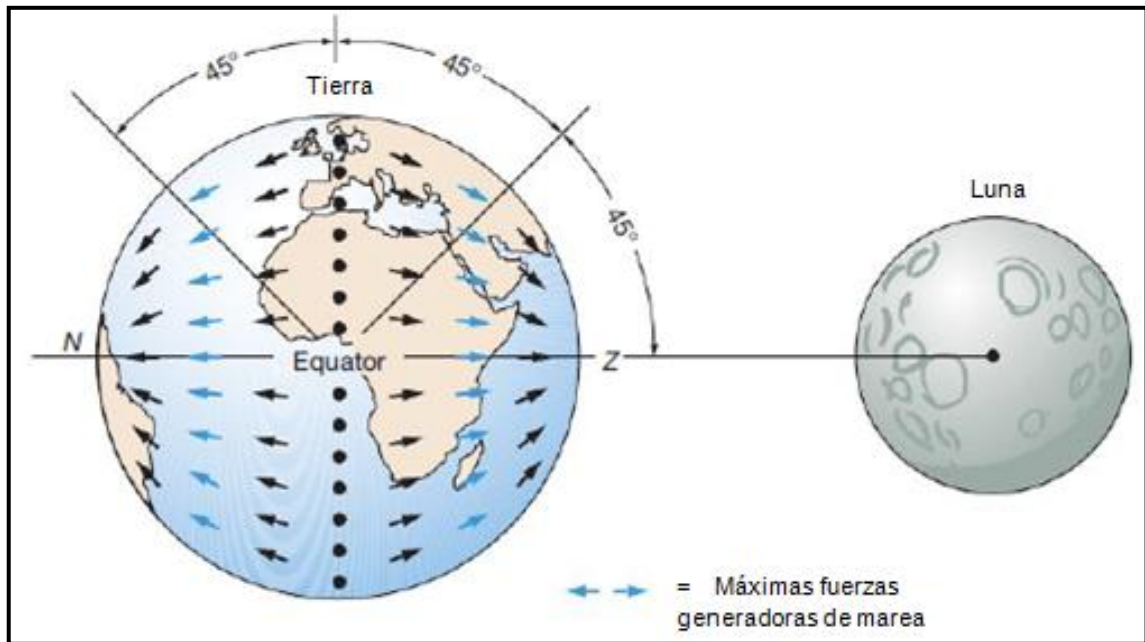


Figura 3-5: Distribución de fuerzas tractoras en la superficie de la Tierra.

Fuente: Essentials of Oceanography, 10th edition.

Finalmente, la Tabla 1 presenta los valores de los parámetros astronómicos utilizados en la descripción de las fuerzas generadoras del fenómeno.

Tabla 1: Valores de parámetros astronómicos Luna, Sol y Tierra.

Tierra	
Masa	$5,973 * 10^{24} \text{ kg}$
Radio medio volumétrico	6.371 km
Distancia media de la Tierra al Baricentro (Luna – Tierra)	6.471 km
Distancia media de la Tierra al Baricentro (Sol - Tierra)	$149.360.000 \text{ km}$
Luna	
Masa	$7,35 * 10^{22} \text{ kg}$
Radio medio	1.738 km
Distancia media a la Tierra	384.400 km
Sol	
Masa	$1,9891 * 10^{30} \text{ kg}$
Radio medio	$1.392.000 \text{ km}$
Distancia media a la tierra	$149.597.871 \text{ km}$

Fuente: Elaboración propia.

b) Patrones de marea

Los análisis detallados del equilibrio de las mareas, junto con los efectos ejercidos por la Luna y el Sol, deben ser estudiados mediante un desarrollo riguroso. Sin embargo, muchas de estas características pueden ser explicadas en términos más generales (Doodson & Warbug, 1941; Webb, 1976 en Pugh, 1987; página 81).

Las principales características observadas en los patrones de marea son: la declinación lunar, las alineaciones de la Luna con el Sol (ciclos de mareas vivas y muertas), efectos de fase lunar y efectos locales de aguas someras (Pugh, 1987).

➤ Declinación lunar

Al comparar los cambios en la marea desde un punto sobre la Tierra, se observa rangos de mareas diurnas máximos cuando la declinación de la Luna es mayor, y pequeños rangos cuando la declinación tiende a cero. Estas variaciones se deben a los efectos de declinación lunar, que generan anomalías entre las dos pleamares y bajamares diurnas. Durante períodos nodales de 18,6 años, la declinación lunar mensual es máxima, variando desde $18,3^\circ$ a $28,6^\circ$ al norte y sur del ecuador. La declinación solar en tanto, varía estacionalmente de $23,5^\circ$ en Junio a $-23,5^\circ$ en Diciembre. Esto implica que, constituyentes de largo periodo son estimadas con periodo de medio mes sidéreo (Luna) y medio año sidéreo (Sol). La Figura 3-6 muestra un eje que une el centro de la Tierra – Luna y que no pasa por el plano ecuatorial, lo cual significa que en un punto dado de la Tierra se observará de forma alterna una pleamar grande y una pequeña. Lo anterior se conoce como *desigualdad diurna de la marea*, que varía en función de un ángulo (δ) variable en el tiempo. Cuando la Luna pasa cercana al ecuador se conoce como marea ecuatorial (B), mientras que, al pasar cerca de su máxima declinación es llamada marea tropical (A) (Pugh, 1987 & Gjevick, 2006).

➤ Mareas vivas y muertas

La órbita lunar alrededor de la Tierra, y terrestre alrededor del Sol, son elípticas. Como se observa en la Figura 3-8, a medida que la Luna alcanza el Perigeo, las fuerzas generadoras de marea aumentan alrededor de un 20% (marea viva). De igual manera, cuando la Luna se aproxima al Apogeo, las fuerzas mareales se ven reducidas hasta un 20% (marea muerta). En el caso del Sol sucede el mismo fenómeno con la diferencia que, su influencia es menor que la lunar. Si estos fenómenos ocurren de forma conjunta, cuando se contempla el Perihelio con Perigeo, más luna llena o nueva se obtienen amplitudes de marea considerablemente grandes. De la misma forma la ocurrencia de afelio y apogeo, junto con la luna en el primer o cuarto cuadrante genera mareas considerablemente menores (Pugh, 1987).

➤ Efectos de Fase lunar

La luna a lo largo del mes sinódico pasa por diferentes ciclos donde los más importantes son; por ejemplo, la Luna llena, Luna nueva, la Luna en su primer cuarto (creciente) y la Luna en su tercer cuarto (menguante). Cuando se tiene Luna llena o nueva el rango de marea es mayor, esto debido al efecto combinado Luna – Sol. Por el contrario, cuando la Luna se encuentra en el primer o tercer cuarto, se observa un rango de marea menor, pues se ejercen fuerzas perpendiculares cuyos efectos sobre la superficie se anulan, Figura 3-7 (Pugh, 1987) .

➤ Efectos locales

Las ondas de marea tienen distintos comportamientos en cada sector debido a efectos de fondo y otros procesos físicos, que alteran tanto su fase como su amplitud. Este comportamiento se representa mediante los componentes armónicos de la marea (efectos astronómicos) como se observa en la Tabla 2. Para sectores interiores como el Canal Chacao resulta fundamental la incorporación de componentes meteorológicos y someros en los parámetros armónicos, ya que en esta zona se tienen registros de grandes diferencias tanto en la amplitud como desfase de la onda de marea (Hicks, 2006).

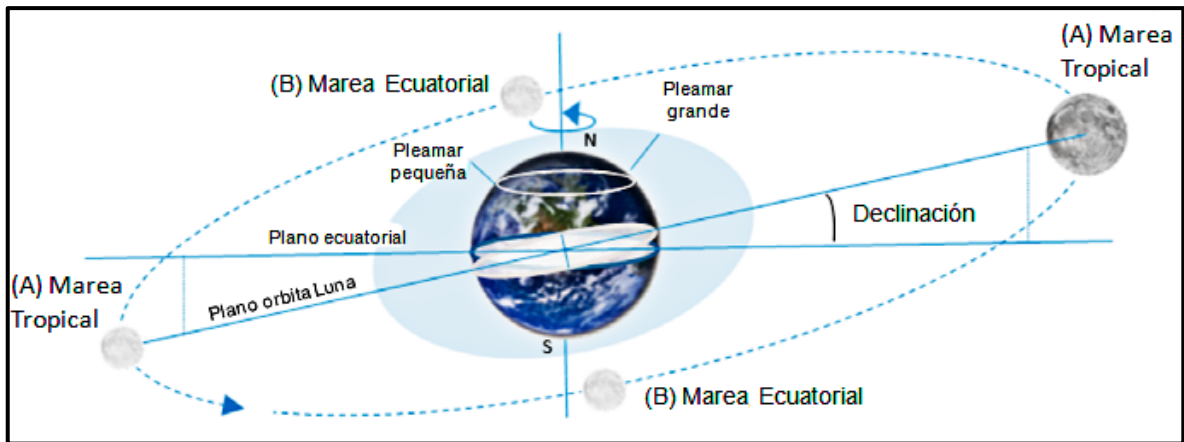


Figura 3-6: Declinación lunar.

Fuente: Universidad de Granada.



Figura 3-7: Fase lunar.

Fuente: www.educarchile.cl.

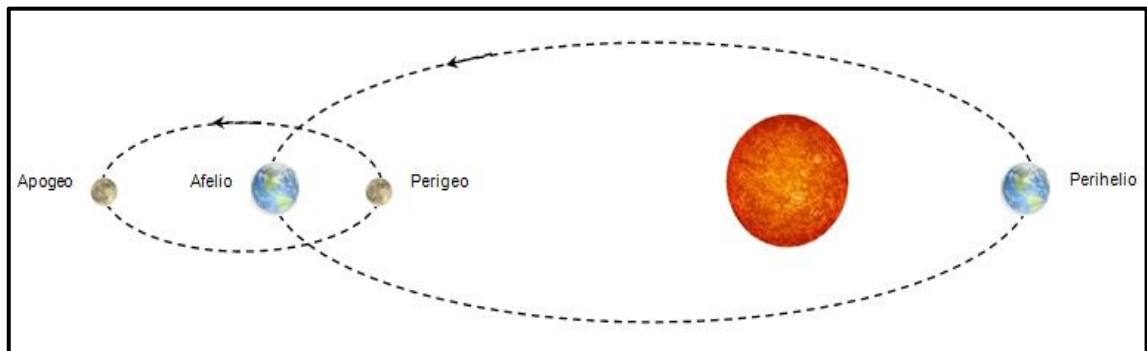


Figura 3-8: Efectos combinados Luna y Sol sobre la marea.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Marea meteorológica

La marea meteorológica es aquella que considera los eventos, que alteran el nivel del mar junto con la fase de la marea de manera local. Dentro de los principales eventos destacan; por ejemplo, el aporte del viento que con grandes rachas, la presión atmosférica, la precipitación, la evaporación y el escurrimiento (Stewart, 2008).

- Presión atmosférica

La variación del nivel del mar por cambios de presión, se define en la ecuación (2.1.12). A nivel del mar, la presión ejercida por una columna de aire que alcanza la parte más alta de la atmósfera es de $14,7 \text{ Lb/pulg}^2$, la cual se llama presión atmosférica estándar. Cuando la densidad del aire resulta más baja de lo habitual (debido a un aumento de temperatura), la presión atmosférica disminuye, por tanto, se generan zonas de baja presión. Por el contrario, si la densidad del aire resulta más alta que lo acostumbrado (debido a disminución de temperatura), la presión atmosférica aumenta. Esto genera zonas de alta presión. Los fluidos se desplazan de zonas de alta presión a zonas de baja presión generando vientos (Hartmann, 1994). La influencia de la presión atmosférica sobre la columna de agua se observa en la ecuación (2.1.13) deducida desde la ecuación (2.1.12).

$$\Delta P = \rho_a * g * \Delta \zeta \quad (2.1.12)$$

$$\Delta \zeta = \frac{\Delta P}{\rho_a * g} \quad (2.1.13)$$

Donde:

ΔP = Presión variable de un sector (milibares).

ρ_a = Densidad del aire (aproximadamente $1,3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$).

g = Gravedad ($9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$).

$\Delta \zeta$ = Variación del nivel del mar (centímetros).

- Viento

El viento proviene de las corrientes de aire generadas por flujos moviéndose desde zonas de alta hacia baja presión. El cambio de presión a través de una sección horizontal se denomina gradiente de presión. La dirección del viento se relaciona con su lugar de origen, en Chile se tiene “viento norte”, proveniente desde el polo sur hacia el norte, variando en las cuencas oceánicas. En el sistema global, los vientos tienden a desviarse hacia la izquierda en el hemisferio sur, y hacia la izquierda en el hemisferio norte, siguiendo el *efecto de Coriolis*. (Rodríguez et al, 2004; Hartmann, 1994).

La fuerza horizontal ejercida por el viento sobre el mar se define por la ecuación (2.1.14).

$$\tau = \rho_a * C_D * U_{10}^2 \quad (2.1.14).$$

Donde:

τ = Esfuerzo generado por viento.

ρ_a = Densidad del aire (aproximadamente $1,3 \frac{Kg}{m^3}$).

C_D = Coeficiente de arrastre no dimensional que asume valores empíricos.

U_{10} = Velocidad del viento a 10 metros sobre el nivel del mar.

- Precipitaciones, evaporación y escurrimiento.

Debido a las diferencias de temperatura y presión en el ambiente el agua se evapora y genera nubes, que luego de transportarse en forma de vapor producen una precipitación. Posteriormente, existe una percolación del agua entre las napas de capas terrestres, siendo depositada en flujos de agua subterráneos, generando un escurrimiento superficial y profundo hacia el mar. Esto se conoce como ciclo hidrológico, el cual queda representado en la Figura 3-9 (Rodriguez et al, 2004; Stewart, 2008).

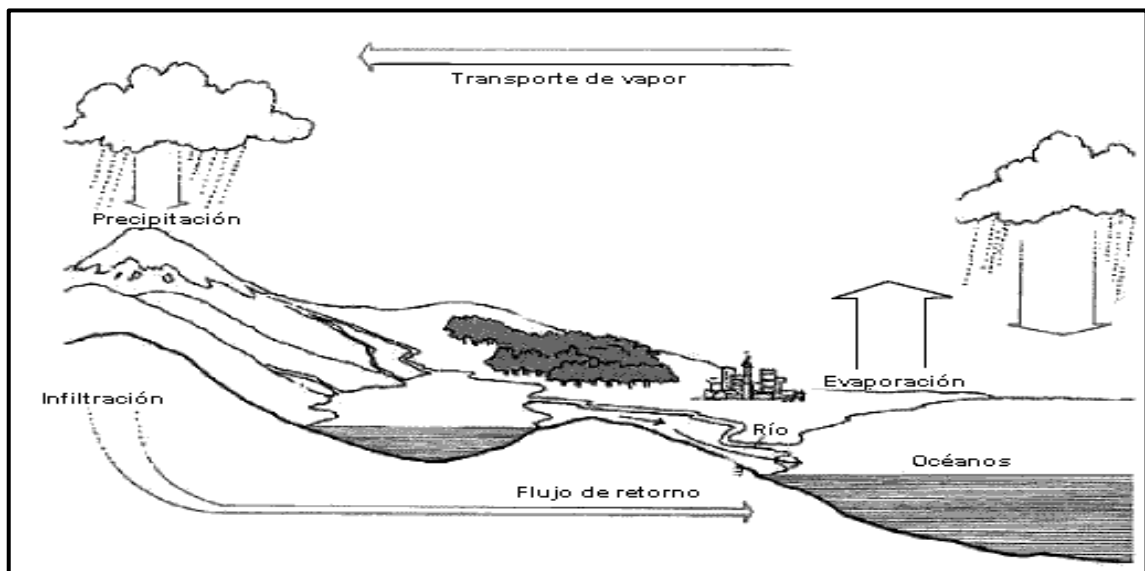


Figura 3-9: Ciclo hidrológico.

Fuente: www.colombiaaprende.edu.co

3.1.3 Tipos de marea

Para clasificar las mareas se utiliza un parámetro F , resultado del cociente entre la suma de amplitudes (A) de las componentes diurnas K_1 y O_1 , y la suma de amplitudes semi diurnas M_2 y S_2 (Pugh, 1987), es decir:

$$F = \frac{A_{K_1} + A_{O_1}}{A_{M_2} + A_{S_2}} \quad (2.1.15)$$

Donde:

$F = 0 - 0,25$; marea semidiurna

$F = 0,25 - 1,5$; marea mixta predominante semidiurna

$F = 1,5 - 3$; marea mixta predominante diurna.

$F > 3$; marea diurna.

Esto quiere decir que, para valores bajos de F existe marea semidiurna con dependencia de las posiciones Luna – Sol en la carrera de mareas. Para valores intermedios, se presentan importantes diferencias entre dos eventos diurnos; por ejemplo, dos pleamares consecutivas pueden diferir tanto en amplitud como en tiempo de ocurrencia. Por otra parte, si se cuenta con valores de F altos significa, que existe una marea diurna con una única pleamar diaria, aquí la carrera de marea depende básicamente de la declinación lunar (cuando la declinación lunar es cercana a cero la amplitud de marea es muy pequeña). La Figura 3-10 muestra una representación de cada marea característica (Hicks, 2006 & Gjevick, 2006).

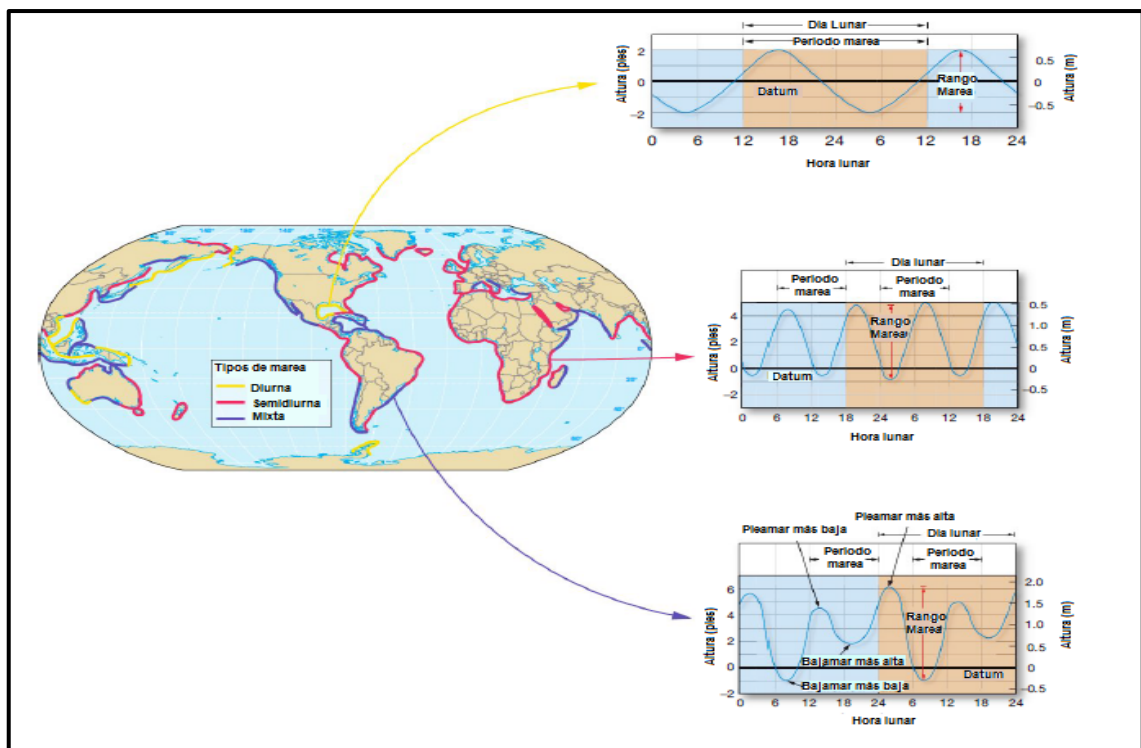


Figura 3-10: Tipos de marea a nivel mundial.

Fuente: Essentials of Oceanography, 10th edition.

3.1.4 NRS y Nivel medio del mar

Según la publicación oficial SHOA 3103, “el *nivel de reducción de sondas* (NRS) es el plano en el cual están referidas las sondas o profundidades de una localidad. Cada país adopta el N.R.S. de acuerdo con las características del régimen de marea en sus costas. Dado que el tipo de marea predominante en el litoral chileno corresponde al de “marea semidiurna mixta”, se adoptó para nuestras costas como nivel de reducción de sondas el plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en perigeo”. Por otro lado, dentro de la misma publicación se define el Nivel medio del mar como “Nivel promedio de los movimientos del nivel del mar. Su expresión física sería la del plano que adoptarían las aguas en reposo, depurada la acción de la marea. Coincide muy aproximadamente con el geoide. Existen variaciones de corto período causadas por condiciones atmosféricas y de mar (marejadas anormales, mar de fondo); de período medio (variaciones estacionales de la presión y del viento atmosférico) y de largo período, que pueden tomar décadas y aún siglos”.

3.1.5 Predicción de mareas

El análisis de los datos observados del nivel del mar y las corrientes de marea, tiene dos propósitos generales. En primer lugar, permite obtener la base para la predicción de la marea en el futuro, lo cual resulta una valiosa ayuda para el transporte marítimo y las operaciones portuarias. En segundo lugar, los resultados se pueden analizar de forma científica, proporcionando parámetros para describir el comportamiento de las mareas en una región (Pawlovicz, 2002).

a) Constituyentes de la marea

Los estudios desarrollados por Darwin (1883) y Doodson (1928), permitieron descomponer las componentes de la marea mediante análisis armónicos, los cuales consideran los movimientos de la Tierra, Sol y Luna, para obtener la frecuencia y relevancia de cada uno de los astros sobre la marea. El análisis supone que las fuerzas generadas por la Luna y Sol en sus trayectorias se originan por un número finito de planetas ficticios. Cada planeta gira alrededor de la Tierra en una órbita situada en el plano del ecuador a una velocidad angular constante, y se seleccionan de manera tal, que reproduzcan la frecuencia de una determinada perturbación astronómica. Cada satélite ficticio se identifica con una letra y un subíndice, que indica el número de oscilaciones de dicha componente durante un día solar (Pugh, 1987). En la Tabla 2, se observan las principales componentes astronómicas del tipo: diurnas, semidiurnas y algunas de largo periodo. Para un análisis completo de la marea en un sector, es necesario considerar componentes no lineales propias de profundidades reducidas.

Tabla 2: Constituyentes astronómicas de la marea principales.

Nombre	Símbolo	Periodo	Coeficiente
Componentes diurnas			
Diurno Luni Solar	K_1	23,93	58,4
Diurno Lunar principal	O_1	25,82	41,5
Diurno Solar principal	P_1	24,07	19,4
Elíptico Lunar mayor	Q_1	26,87	7,9
Elíptico Lunar menor	M_1	24,84	3,3
Componentes semidiurnas			
Lunar principal	M_2	12,42	100
Solar principal	S_2	12,00	46,6
Elíptico Lunar mayor	N_2	12,66	19,2
Semidiurno Luni-Solar	K_2	11,97	12,7
Solar elíptico mayor	T_2	12,01	2,7
Solar elíptico menor	L_2	12,19	2,8
Elíptico lunar 2º orden	$2N_2$	12,91	2,5

Componentes de largo periodo

Quincenal Lunar	M_f	327,9	17,2
Mensual Lunar	M_m	661,3	9,1
Semi-anual Solar	S_{sa}	4383	8,0
Solar anual	S_a	8766	1,0

Fuente: Elaboración propia.

b) Análisis armónico de la marea

El análisis armónico fue desarrollado por primera vez en Inglaterra el año 1867 por Williams Thompson, pero se desarrolló de forma independiente por William Ferrel en 1874 en Estados Unidos. Ha sido trabajado y mejorado por diversos autores como Arthur Doodson (1921, 1928) y Paul Schureman (1924) entre otros. Este análisis permite encontrar, la amplitud y fase de la contribución de cada componente mareal o de corriente mareal.

El análisis se puede llevar a cabo utilizando series de Fourier (por ejemplo, Schureman 1958), o bien, mediante el método de mínimos cuadrados (por ejemplo, Harris et al, 1964). El presente estudio será desarrollado utilizando el método de mínimos cuadrados, incorporando el criterio de Rayleigh pues permite incluir términos que no pueden ser resueltos de forma explícita, empleando un criterio de frecuencia mínima (García et al, 2010). Esto con el propósito de que, las diferencias entre las constituyentes no sea mayor al recíproco de la longitud del espacio (Pawlovicz, 2002). Para obtener una mayor precisión en los resultados se realizan correcciones en la amplitud y período de las componentes armónicas (Pugh, 1987). La ecuación (2.1.16) define el cálculo de marea según (Parker, 2007).

$$\eta(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N a_n p_n \cos(\omega_n t + f_n + F(t)) \quad (2.1.16)$$

Donde:

$\eta(t)$ = Nivel del mar en un tiempo t .

A_0 = Amplitud del nivel medio del mar respecto al nivel de referencia.

a_n = Amplitud de la componente n .

f_n = Fase de la componente n .

ω_n = Frecuencia angular.

t = tiempo de la serie, comenzando en $t = 0$.

p_n = Factor de corrección amplitud de la componente n .

$F(t)$ = Corrección de la fase en el tiempo t .

3.1.6 Corrientes de marea y energía potencial

Las fuerzas generadas tanto por cuerpos celestes como agentes locales producen una dinámica litoral a lo largo del planeta. Las mayores desnivelaciones y desfases se generan principalmente por efectos astronómicos, los cuales producen un traslado de las masas de agua, generando corrientes de marea significativas en canales, fiordos y zonas interiores. Esta energía de escurrimiento cuenta con una componente cinética y otra potencial, siendo esta última la utilizada para realizar el análisis de evaluación del potencial energético contenido en Canal Chacao (Pugh, 1987). La ecuación (2.1.17), describe la energía potencial por corrientes de marea producto de un flujo de agua, que atraviesa una sección determinada:

$$P_{corriente} = \frac{1}{2} \rho_f A_f V_f^3 \quad (2.1.17)$$

Donde:

ρ_f = Densidad del fluido.

A_f = Área que atraviesa el flujo.

V_f = Velocidad del flujo.

3.2 Ecuaciones hidrodinámicas fundamentales

En este apartado se presenta la deducción de las ecuaciones utilizadas por el modelo Delft3D FLOW RM.

El movimiento de las ondas largas es un concepto desarrollado matemáticamente dentro de la rama de la mecánica de fluidos, donde las principales ecuaciones que describen el fenómeno son la ecuación de conservación de la masa y la cantidad de movimiento para fluidos incompresibles.

Desde un punto de vista teórico, los procesos dentro de un Canal varían en las tres coordenadas espaciales (longitudinal, horizontal y transversal), como así también en el tiempo. Dada la complejidad de las ecuaciones de Navier-Stokes, para resolverlas sería

necesario contar con una gran cantidad de datos medidos, con variación espacial y temporal que permitan representar el fenómeno. En la práctica, los datos son aproximados por lo que los modelos 3D son susceptibles a errores en los datos medidos (Henrotte, 2008).

3.2.1 Ecuación de continuidad

La ecuación de conservación de la masa para fluidos compresibles (2.2.1), se reduce a la ecuación de continuidad en tres dimensiones, utilizando el teorema de la divergencia en coordenadas cartesianas propuesto por Gauss (1855). La ecuación de conservación de la masa es:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (2.2.1)$$

Para fluidos incompresibles ($\rho = cte$), se tiene:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad (2.2.2)$$

3.2.2 Ecuación de momentum

De acuerdo al enfoque euleriano, considerando un elemento diferencial de volumen, la ecuación de momentum es:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.2.3)$$

Donde $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ es la aceleración local, $\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}$ la aceleración convectiva o advectiva, $-\nabla p$ el gradiente de presión, $\rho \vec{g}$ otro cuerpo y $\mu \nabla^2 \vec{V}$ la viscosidad.

3.3 Implementación en Modelo Delft3D Flow RM

El modelo Delft3D Flow, resuelve las ecuaciones promedio de Reynolds Navier Stokes (RANS en sus siglas en inglés) para un fluido incompresible sobre escalas de tiempo de turbulencia promedio. Tales ecuaciones expresan el principio físico de conservación del volumen, masa y momento (Gerritsen et al, 2007). Éstas son en primera instancia, una derivación de la ecuación de continuidad, que considera el supuesto de fluido incompresible (densidad constante en tiempo y espacio). Luego se incorpora el supuesto de fluido Newtoniano (viscosidad constante en el tiempo), con el cual surgen las ecuaciones de Navier Stokes. Posteriormente, al integrar como supuesto que se dispone de un fluido no viscoso y no existen aportes de fuerzas distintas a la gravedad, se obtiene las ecuaciones de Euler (Winckler Grez, 2012). Por último, se añade como supuesto que se trabaja con ondas largas (Escala horizontal mucho mayor que las verticales), dando como resultado las llamadas

ecuaciones no lineales de aguas someras (Lu, 1998; Mader, 2005; Hearn, 2008 & Winckler Grez, 2012). Por otro lado, cabe destacar que para cálculos de fenómenos próximos a la costa es necesario incorporar los supuestos desarrollados por Boussinesq (Winckler Grez, 2012).

3.3.1 Módulo 2D

El modelo Delft3D Flow resuelve ecuaciones no lineales de aguas someras para lo cual asume, que la profundidad es mucho menor que las escalas de longitud horizontal del flujo. Esto significa, que la ecuación de momento vertical se reduce a la relación de presión hidrostática.

Por otro lado, la ecuación de continuidad, se deriva de la ecuación de continuidad para un fluido incompresible (2.2.2). Ésta considera que, el sistema de coordenadas es curvilíneo ortogonal en dirección horizontal y, además, cuenta con $\xi = \lambda$, $\eta = \phi$ y R , donde λ es la longitud ($^{\circ}$), ϕ la latitud ($^{\circ}$) y R el radio de la tierra (6.378.137 km, WGS84). Luego, incorporando una condición de borde cinemática tanto en la superficie como en el fondo del agua, se obtiene la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)v\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad (2.3.1)$$

Donde:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \text{Variación de la superficie libre en el tiempo.}$$

$$\sqrt{G_{\eta\eta}} = R.$$

$$\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \cos \phi.$$

$(d + \zeta)$ = Profundidad total del agua.

$$u = \frac{1}{(d+\zeta)} \int_d^{\zeta} u dz = \int_{-1}^0 u d\sigma.$$

$$v = \frac{1}{(d+\zeta)} \int_d^{\zeta} v dz = \int_{-1}^0 v d\sigma.$$

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E.$$

De lo anterior, Q representa la contribución por unidad de área en descargas o captaciones de agua, precipitación y evaporación. Los términos q_{in} y q_{out} simbolizan los recursos locales

de fuentes y sumideros de agua por unidad de volumen [$1/s$], P representa la precipitación y E la evaporación. U y V representan las componentes de velocidad horizontal de corriente integrada en la vertical, mediante coordenadas zeta (z) o sigma (σ). ζ es el nivel del mar (Figura 3-11), h la profundidad respecto al nivel de referencia ($z = \sigma = 0$) y H la profundidad total (Deltares, 2014 & Gerritsen et al, 2007).

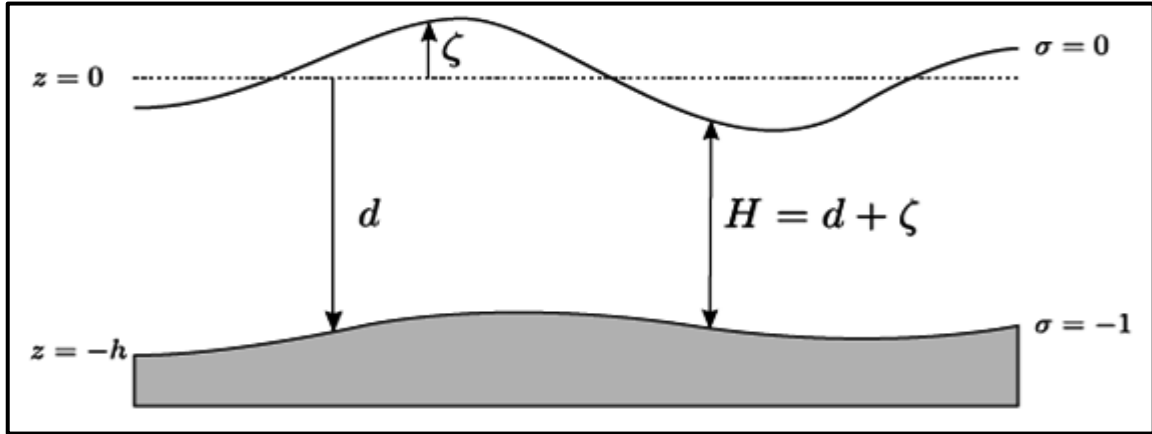


Figura 3-11: Referencia nivel del mar.

Fuente: Delft3D Flow User Manual.

Las ecuaciones no lineales de aguas someras en dirección horizontal, que emplean coordenadas σ en dirección vertical, vienen dadas en dirección u por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_v = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

Y en dirección v por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f_u = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Las variaciones barotrópicas de densidad son excluidas. Por otra parte, las variaciones baroclínicas de densidad son incorporadas, donde los términos P_ξ y P_η representan dichos gradientes de presión. Las fuerzas F_ξ y F_η , describen los esfuerzos de Reynolds en dirección horizontal. Los términos M_ξ y M_η simbolizan la contribución debida a ganancias o pérdidas de momento (fuerzas externas por estructuras hidráulicas, captación o descargas de agua, stress en el oleaje, etc.). El símbolo f representa el parámetro de Coriolis, el cual depende

de la latitud geográfica (ϕ) y la velocidad angular de rotación terrestre (Ω). El parámetro de Coriolis, se obtiene mediante la fórmula $f = 2\Omega \sin \phi$. Finalmente, el término g representa la aceleración gravitacional, y ν_V el coeficiente de viscosidad turbulenta vertical (Deltares, 2014 & Gerritsen et al, 2007).

En las ecuaciones (2.3.2), (2.3.3) y (2.3.4), las coordenadas $u(x, y, \sigma, t)$, $v(x, y, \sigma, t)$ y $\omega(x, y, \sigma, t)$ representan las componentes de velocidad en dirección horizontal (x, y) y vertical (σ), respectivamente. Para resolver las ecuaciones en dos dimensiones, Delft3D Flow utiliza el método de diferencias finitas.

Las velocidades verticales ω en el sistema de coordenadas σ se calculan desde la ecuación de continuidad (2.3.1). En la superficie, los efectos de precipitación y evaporación son tomados en cuenta. La velocidad vertical ω se puede interpretar como la velocidad asociada con el movimiento de surgencia¹ o hundimiento². El sistema de coordenadas cartesianas, no incorpora las velocidades verticales “físicas” (w) (relativamente pequeñas) dentro de las ecuaciones del modelo. La velocidad vertical se expresa como (Deltares, 2014):

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (2.3.4)$$

En las ecuaciones de aguas someras, el momento vertical es reducido a la ecuación de presión hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (2.3.5)$$

Luego de integrar esta expresión, la presión hidrostática queda definida por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \quad (2.3.6)$$

Finalmente, considerando una densidad constante del agua y, tomando en cuenta la presión atmosférica, los gradientes de presión se expresan mediante:

¹ Surgencia: Fenómeno oceanográfico, que consiste en el movimiento vertical de masas de agua en la costa, desde niveles profundos hacia la superficie con viento soplando en dirección Sur a Norte.

² Hundimiento: Fenómeno oceanográfico, que consiste en el movimiento vertical de masas de agua en la costa, desde niveles superficiales hacia el fondo con viento soplando en dirección Norte a Sur.

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (2.3.7)$$

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (2.3.8)$$

En las ecuaciones (2.3.7) y (2.3.8), los gradientes de la superficie libre $\left(\frac{\partial \zeta}{\partial \eta}\right)$ son llamados gradientes de presión barotrópica. Junto con ello, las simulaciones de marejada ciclónica (storm surges en sus siglas de inglés) incorporan los efectos de presión atmosférica, donde las variaciones en espacio y tiempo son relevantes. En los gradientes horizontales, se introduce una derivación vertical por transformación en coordenadas σ .

Las fuerzas F_{ξ} y F_{η} en las ecuaciones de momentum (2.3.2) y (2.3.3), representan los esfuerzos de Reynolds horizontales. En Delft3D Flow, se aplica una simplificación reducida a los operadores de Laplace a lo largo de las líneas de grilla (Mellor & Blumberg, 1985), obteniendo:

$$F_{\xi} = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad (2.3.9)$$

$$F_{\eta} = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (2.3.10)$$

Donde el valor de viscosidad turbulenta es constante. Para resolver las ecuaciones no lineales de aguas someras Delft3D introduce la viscosidad horizontal de Remolinos ν_H^{fondo} e introduce el término ν_{SGS} (sub escalas de viscosidad Remolinos horizontal) para incorporar contribuciones turbulentas horizontales. Esto, permite simular las mayores escalas de turbulencia horizontal mediante una metodología llamada HLES en inglés. (Mellor & Blumberg, 1985; Deltares, 2014 & Gerritsen et al, 2007). Finalmente, la viscosidad horizontal para modelos 2D, queda representada por la ecuación (2.3.11):

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{fondo} \quad (2.3.11)$$

Al utilizar la metodología HLES, se calcula el valor de ν_{SGS} y la turbulencia tridimensional mediante modelos de turbulencia cerrados (descritos en el Acápite 3.3.2)(Gerritsen et al, 2007).

3.3.2 Módulo 3D

Delft3D Flow, incorpora este principio en modelos no hidrostáticos para fenómenos en 3D (De Vriend & Stive, 1987 & Lu, 1998).

En un modelo hidrodinámico no hidrostático en 3D, las ecuaciones de momentum provienen de las ecuaciones promediadas de Reynolds y Navier Stokes en coordenadas cartesianas, descritas por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} P_u + F_u - \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.3.12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho} P_v + F_v - \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.3.13)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} P_w + F_w - \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.3.14)$$

Donde:

$$F_w = \nu_H \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.3.15)$$

Los términos de presión tienen una parte hidrostática (Ecuación 2.3.6) y una no hidrostática. Esta última se calcula mediante un paso llamado corrección de presión, el cual requiere resolver una ecuación de tipo Poisson. La ecuación de continuidad (2.3.1) es válida también para modelos del tipo σ (Deltares, 2014 & De Vriend & Stive, 1987).

Para modelar la turbulencia vertical en 3D existen cuatro modelos de turbulencia cerrada implementados en Delft3D, los cuales permiten determinar el coeficiente de viscosidad turbulenta ν_V y el coeficiente vertical de difusión de Remolinos D_{3D} . Estos son:

- Coeficiente constante.
- Modelo algebraico cerrado de viscosidad Remolinos.
- $k - L$ modelo de turbulencia cerrado.
- $k - \varepsilon$ modelo de turbulencia cerrado.

Los modelos de turbulencia cerrados difieren en su prescripción de la energía cinética k , la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ε , y el largo de la mezcla L . El modelo de Coeficiente constante es simplemente cerrado en un valor constante previamente asignado. Cabe destacar que, este modelo conduce a perfiles de velocidad parabólicos (como en flujos laminares). Los otros tres modelos se basan en el concepto de viscosidad turbulenta propuesto por Kolmogorov, 1942 y Prandtl, 1945. El concepto está relacionado a una

característica de escala de tiempo y escala de velocidad. La viscosidad Remolinos es, por tanto:

$$v_{3D} = c'_{\mu} L \sqrt{k} \quad (2.3.16)$$

Donde:

c'_{μ} = Es una constante para calibración derivada de constantes empíricas en el modelo

$$k - \varepsilon; c'_{\mu}=c_{\mu}^{1/4}, c_{\mu}=0.09 \text{ (Rodi, 1984).}$$

k = Energía cinética turbulenta.

L = Largo de la mezcla.

Estos modelos usan fórmulas analíticas para determinar el valor de k y L . La energía cinética turbulenta k depende de las velocidades por fricción o gradientes de velocidades para determinar el largo de mezcla L , mediante la fórmula (Bakhmetev, 1932):

$$L = k(z + d) \sqrt{1 - \frac{z+d}{H}} \quad (2.3.17)$$

Donde k es la constante de Von Kármán, $k \approx 0.41$. En flujos homogéneos, esto conduce a perfiles logarítmicos de velocidad.

Para cálculos de difusión vertical de Remolinos (D_{3D}), se tiene:

$$D_{3D} = \frac{v_{3D}}{\sigma_c} \quad (2.3.18)$$

El parámetro σ_c es el número de Prandtl-Schmidt, donde el valor numérico depende de la sustancia c . Por otra parte, el parámetro v_{3D} es definido por la ecuación (2.3.16).

Dentro de los cuatro modelos cerrados de turbulencia que resuelve Delft3D Flow, el más sustentable para la resolución del módulo hidrodinámico 3D en Canal Chacao es el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, ya que es un modelo utilizado anteriormente para simulaciones de marea por Baumert & Radach, 1992 y Davies & Gerritsen, 1993. Además, cuenta con recomendaciones de uso para escalas con complejidad de fondo, ya que genera distintas escalas de turbulencia. Una de las principales ventajas del modelo $k - \varepsilon$ es que incorpora la estratificación en el cálculo (Deltares, 2014).

En el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, las ecuaciones de transporte se resuelven, considerando la energía cinética turbulenta k y disipación de energía ε . Incorporando además, términos que representan los esfuerzos de corte en el fondo, la superficie, y en el flujo mismo (Dissanayake, 2011).

$$L = c_D \frac{k\sqrt{k}}{\varepsilon} \quad (2.3.19)$$

Donde c_D toma valores de calibración propuestos por (Rodi, 1984):

$$c_{D1} = 1.44$$

$$c_{D2} = 1.92$$

$$c_{D3} = 0 \text{ (estratificación inestable)}$$

$$c_{D3} = 1 \text{ (estratificación estable)}$$

Las ecuaciones para energía cinética turbulenta k y disipación de energía ε (donde la interacción con las olas es despreciada), son dadas respectivamente por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial k}{\partial \sigma} = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_k \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + P_k + P_{kw} + B_k - \varepsilon \quad (2.3.20)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + P_\varepsilon + P_{\varepsilon w} + B_\varepsilon - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.3.21)$$

Con:

$$D_k = \frac{v_{mol}}{\sigma_{mol}} + \frac{v_{3D}}{\sigma_k} \quad \text{y} \quad D_\varepsilon = \frac{v_{3D}}{\sigma_\varepsilon} \quad (2.3.22)$$

En las ecuaciones (2.3.20) y (2.3.21), los números de Prandtl-Schmidt son $\sigma_k = 1$ y $\sigma_\varepsilon = 1.3$ respectivamente. El término P_k representa la producción de energía cinética en los esfuerzos de corte del flujo (Uittenbogaard, 2003). El flujo de boyantes B_k representa la conversión de energía cinética turbulenta en energía potencial. Los términos P_{kw} y $P_{\varepsilon w}$ representan disipaciones de energía. El modelo de turbulencia $k - \xi$, fue validado mediante la simulación de un flujo estratificado en Hong Kong (Postma et al, 1998) y verificado para la evolución estacional de la termoclina (Burchard & Baumert, 1995).

Las ecuaciones de momentum en tres dimensiones, se pueden dividir en un flujo primario y uno secundario (De Vriend & Stive, 1987). El flujo primario se considera como el promedio en la vertical (2DH) en el campo de flujo, mientras que, el flujo secundario simboliza la distribución vertical de velocidades (1DV) como se observa en la Figura 3-12. (Henrotte, 2008). Utilizando lo anterior, se obtienen los resultados asociados a un campo de velocidades cuasi 3D (Q3D), donde las velocidades u y v incluyen los efectos de arrastre en el resultado (Stokes, 1847).

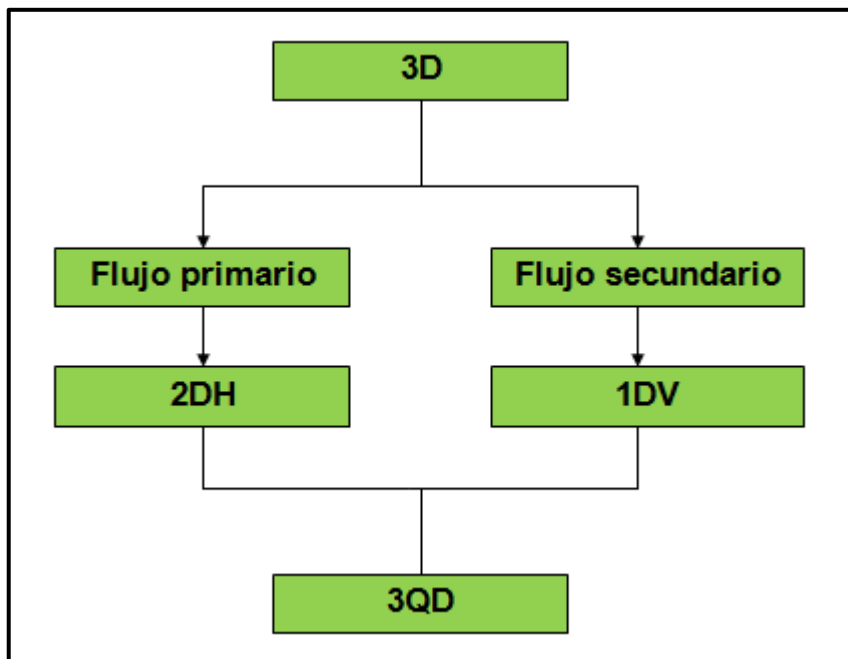


Figura 3-12: Esquema desarrollo 3D.

Fuente: Elaboración propia basado en (Henrotte, 2008).

4 METODOLOGÍA

El presente estudio incurre de forma secuencial en distintas etapas que abarcan desde cómo elegir un lugar apropiado, hasta el análisis comparativo entre los módulos hidrodinámicos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow. Además, se incluye un atlas energético de promedio mensual de todo el lugar, que permite visualizar las zonas energéticas dentro del mes sinódico a modelar (comprendido entre Agosto-Septiembre del año 2000). La Figura 4-1 presenta el esquema utilizado:

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MÓDULOS 2D Y 3D DEL MODELO DELFT3D FLOW PARA EVALUAR EL POTENCIAL ENERGÉTICO ASOCIADO A LAS CORRIENTES DE MAREA EN CANAL CHACAO”

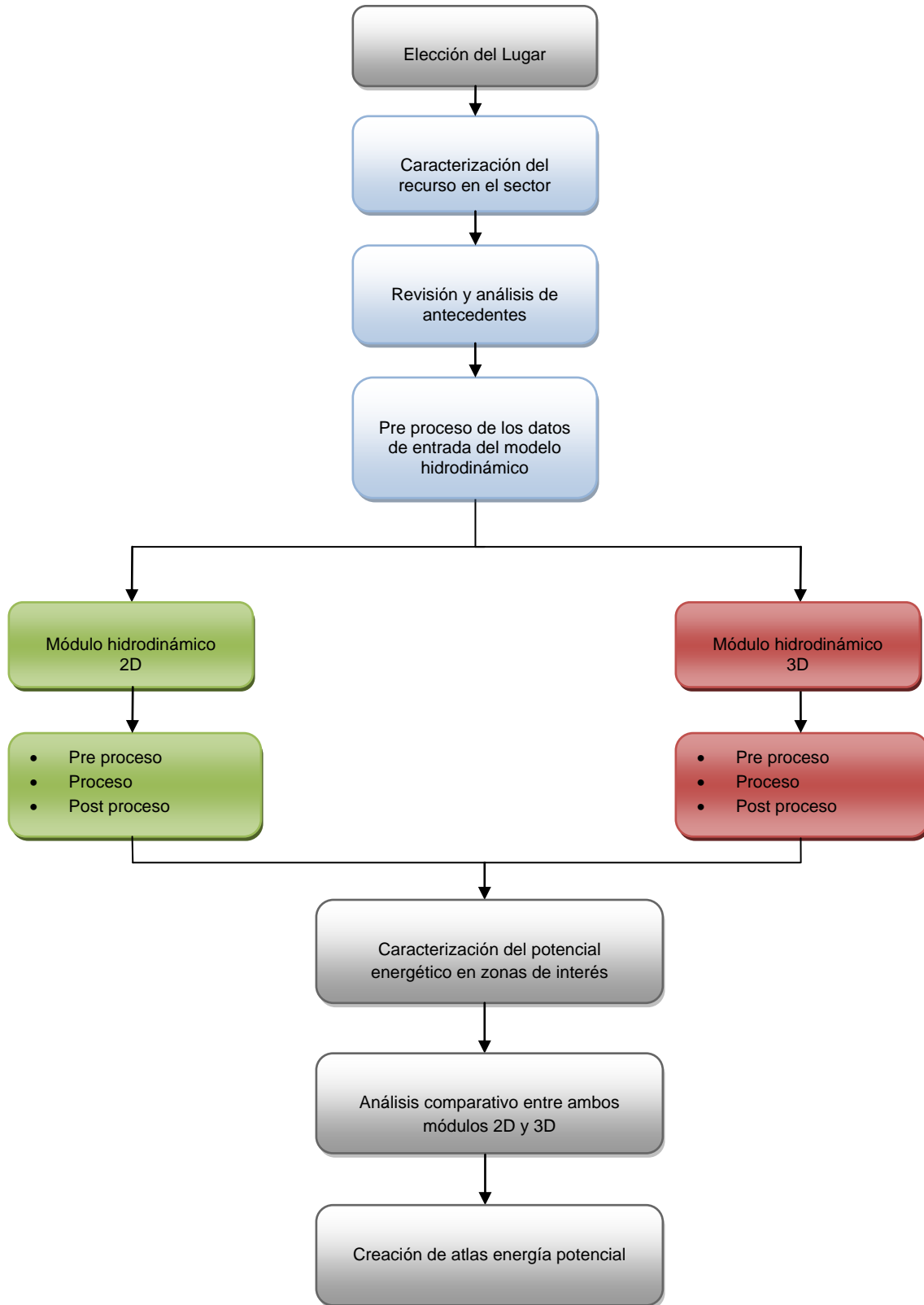


Figura 4-1: Diagrama metodología de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1 Elección del lugar

Para la selección de un lugar adecuado es necesario considerar múltiples aspectos, que incluyen desde identificar el objetivo que se busca alcanzar con el estudio, hasta verificar la factibilidad técnica del sector para llevar a cabo la propuesta. Para determinar zonas que permitan una extracción de energía generada por corrientes de marea es importante considerar sectores estrechos donde se cuente velocidades de corrientes apropiadas y que, además, estos sectores presenten zonas abrigadas para favorecer el emplazamiento y funcionamiento de dispositivos de extracción de ERNC³.

➤ Criterios generales

Los principales criterios⁴ para determinar el sector a desarrollar el estudio son:

a) Condiciones generales

Es importante verificar si se cuenta con condiciones técnicas necesarias para la instalación de dispositivos de medición (Mareógrafos, correntómetros, ADCP entre otros). Dentro de las principales condiciones observadas en Canal Chacao, se tiene:

- Velocidades máximas con 4 [m/s] en el promedio vertical, y hasta 5 [m/s] en las capas superficiales al considerar la distribución horizontal de velocidades en la vertical.
- Profundidades desde 10 hasta 220 [m] dentro del dominio.
- Se observan zonas abrigadas.
- Las corrientes son generadas principalmente por mareas, que son esencialmente predecibles.
- Se cuenta con zonas características, que presentan las mayores velocidades dentro del Canal Chacao, ubicando sectores energéticos atractivos para la implementación de dispositivos de extracción energética.

³ ERNC: Energías Renovables No Convencionales.

⁴ Elaboración propia a partir de (García, 2009).

b) Condiciones para la utilización del recurso

Existen otros factores, que son relevantes para el desarrollo de proyectos de esta envergadura, tales como:

- Verificar las zonas protegidas para; fondeo, zonas de pesca, zonas de preservación y rutas de navegación, con el fin de evitar conflictos de interés.
- Contar con un fondo apropiado para el emplazamiento de los dispositivos.
- Verificar la factibilidad técnico-económica de implementar un dispositivo en base a la demanda energética de la zona.

El análisis de las condiciones puede ser realizado con información base como, cartas náuticas proporcionadas por el SHOA⁵ y modelos globales de marea como el TOPEX⁶ (el cual permite comprender el comportamiento general de la principal forzante en el sector). Además, se puede contar con antecedentes del lugar desde el Sistema Integrado de Administración del Borde Costero (DIRECTEMAR).

4.2 Caracterización del recurso en el sector

Luego de identificar el lugar de estudio, resulta necesario realizar una caracterización del recurso en base a la información disponible en el sector con el fin de verificar si se cuenta con condiciones técnicas para la utilización del recurso energético. Posteriormente, se realiza un pre-proceso a los datos recopilados, definiendo las condiciones iniciales y de borde, que permitan representar las corrientes de marea dentro del dominio numérico.

4.2.1 Revisión y análisis de antecedentes

Debido a que la energía disponible resulta de la extracción del recurso generado por la velocidad de corriente de marea, es fundamental realizar un análisis de los antecedentes que permita caracterizar zonas que, en base a los criterios preliminares, resultan atractivas. Los antecedentes más relevantes son enumerados a continuación:

⁵ SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada.

⁶ <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

a) Geografía

La información geográfica disponible proviene de cartas náuticas (SHOA pub 3000-2009), información satelital (Google Earth⁷ u otros programas de libre acceso), información de aerofotogrametría⁸ e información proporcionada por estudios privados realizados en el lugar. Esta información permite; por ejemplo, definir la línea de costa, realizar análisis preliminares estimando distancias y ubicando zonas singulares características.

b) Batimetría

La batimetría se entiende como la medición de profundidades, que permiten definir la geometría del fondo. Para realizar este procedimiento existen diversas técnicas, donde una de las más utilizadas es el uso del sonar⁹ montado en la quilla de un buque, el cual lanza una sonda al fondo marino, la cual basada en el efecto Doppler permite representar la profundidad real del sector. Actualmente existen dos tipos de mediciones con ecosonda¹⁰: monohaz y multihaz, siendo este último más utilizado para estudios de ingeniería.

Para referenciar las mediciones de batimetría se debe considerar, el Nivel de Reducción de Sondas (NRS) de forma altimétrica en coordenadas geográficas o UTM (Universal Transverse Mercator). El sistema de referencia dependerá de la información batimétrica disponible.

Para confeccionar un modelo numérico, es fundamental contar con una información batimétrica apropiada. El SHOA mediante el CENDHOC (Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile), que cuenta con una extensa base de datos batimétricos del territorio nacional, permite solicitar los datos necesarios para estudios académicos a través del correspondiente sitio de internet¹¹.

Los levantamientos hidrográficos, son clasificados de acuerdo a la publicación SHOA 3105 (SHOA, Especificaciones técnicas para la ejecución de sondajes, 2003).

⁷ <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>.

⁸ <http://www.saf.cl/>.

⁹ SONAR: Sound Navigation and Ranging.

¹⁰ Ecosonda: Instrumento para definir la geometría del fondo marino mediante ultrasonidos.

¹¹ http://www.shoa.cl/n_cendhoc/usuario.htm.

c) Registro nivel del mar

Para realizar estudios, resulta importante comprender el comportamiento del nivel del mar conociendo los rangos máximos y mínimos, ya que, permiten determinar la implementación de uno u otro dispositivo de generación. Además, permite conocer el comportamiento de las mareas propina días y rutas de navegación apropiadas dentro del mes. Por otro lado, la marea es un antecedente necesario al momento de realizar diseños de infraestructura costera en zonas de mar interior.

Por otra parte, para efectuar una modelación hidrodinámica es fundamental contar con condiciones de borde, las que usualmente son referidas a las variaciones del nivel del mar.

Para obtener registros del nivel del mar existen distintas maneras. Anualmente el SHOA publica tablas de marea, que permiten determinar las alturas y ocurrencias de pleamares y bajamares en base a distintos puertos de referencia a lo largo del país. Esta información tiene como finalidad proporcionar antecedentes para la navegación lo que, bajo ciertos escenarios (puertos secundarios), puede resultar insuficiente para definir las condiciones de borde en un modelo.

Es por esto, que lo recomendable es pesquisar acerca de registros en el lugar, o bien, utilizar una medición del nivel del mar.

Actualmente se cuenta con información satelital de niveles del mar de modelos globales, como por ejemplo el TOPEX 7.2, con una resolución de 1/12º para el Océano Pacífico. Para modelos implementados en canales, ríos o fiordos es recomendable realizar un modelo que integre su límite en mar abierto, debido a la baja precisión en los datos de marea de los modelos globales en zonas de mar interior.

Para definir las condiciones de marea se debe contar con observaciones continuas del nivel del mar en el área de estudio de por al menos 30 días, con el fin de representar completamente el ciclo lunar. A partir de estos datos es posible realizar análisis armónicos y armónicos (Pub. 3201-SHOA, 2005), que permitan determinar niveles de referencia, niveles de reducción de sonda y aportes astronómicos o meteorológicos en el lugar.

d) Registro de corrientes

El estudio de corrientes tiene como objetivo determinar el patrón de circulación en el área de interés. A diferencia de los registros de nivel del mar, los registros de corrientes resultan más escasos, y para calibrar un modelo hidrodinámico resultan esenciales. Debido a que los registros de corrientes se ven afectados por condiciones meteorológicas locales, no es factible utilizar un método diferente de una medición directa para recopilar información en el sector, la cual puede ser obtenida mediante un instrumento fijo o remolcado. Para el trabajo con modelos hidrodinámicos, es recomendable disponer de una medición cercana a los sectores donde se desea obtener mayores aproximaciones.

Existe diferentes tipos de estudios para corrientes; Observaciones lagrangianas (utilizando derivadores), Observaciones eulerianas (instrumentos anclados), y observaciones por transectos.

Conforme a la publicación SHOA 3201, la observación de la correntimetría euleriana fija deberá prolongarse por un período mínimo de 30 días, y no exceder un intervalo de muestreo de 10 minutos.

La medición de correntimetría euleriana proporciona los datos para calibrar las corrientes de forma temporal en un sector de interés. Asimismo, si la medición incorpora el registro de corrientes a diferentes profundidades en la columna de agua, genera información útil para validar modelos en tres dimensiones. Además, permite caracterizar la variación de velocidades de corrientes horizontales en la vertical, necesaria al momento de cuantificar la potencia del flujo.

Por otra parte, la medición de correntimetría lagrangiana permite comprender fenómenos de mesoescala como la trayectoria del viento local, el comportamiento del patrón de corrientes a distintas profundidades, etc. Este tipo de observaciones brinda una visión espacio-temporal más completa, que si solo se utilizara diferentes estaciones de medición fijas en el lugar. En base a lo anterior, este tipo de mediciones pueden utilizarse para validar el modelo, realizando una comparación cualitativa del patrón de corrientes en 2D (García, 2009).

Finalmente, las mediciones de corrientes en transectos obtenidas con la técnica de bottom tracking o ADCP¹² remolcado, otorga una descripción mucho más amplia de la trayectoria y magnitud de las corrientes dentro del área de estudio. Por lo tanto, dependiendo de la duración, puede ser un dato útil para calibrar un modelo hidrodinámico.

Si bien, con los datos medidos se puede tener una buena aproximación del comportamiento de las corrientes locales, realizar un modelo hidrodinámico resulta una herramienta necesaria para obtener una representación de las corrientes a mayor escala, lo cual es un respaldo necesario para futuras modificaciones del uso del recurso en el lugar.

4.2.2 Pre proceso de los datos de entrada del modelo hidrodinámico

Luego de realizar una caracterización del recurso disponible es necesario procesar la información recopilada para generar un escenario base, que luego de simulaciones reiteradas, permita obtener las condiciones de borde adecuadas para representar el comportamiento hidrodinámico en la zona de estudio.

¹² ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler.

a) Geografía

Una vez definida y caracterizada la zona de estudio de forma preliminar, se define la condición de borde cerrada o línea de costa, utilizando en primera instancia la información de cartas náuticas. Luego, se complementa la información disponible mediante el programa Google Earth, generando correcciones de coordenadas mediante información satelital. Por otra parte, se generan las condiciones de borde abiertas que serán empleadas para introducir las forzantes al modelo numérico.

b) Batimetría

Luego de recopilar y organizar la información batimétrica disponible, es necesario realizar un proceso de los datos (Filtro para eliminar datos erróneos, chequear que se representa correctamente el fondo marino, etc.), Esto se lleva a cabo mediante herramientas incorporadas dentro del modelo Delft3D. Efectuar este pre proceso de información, tiene por objetivo representar apropiadamente la geometría del fondo marino. Finalmente, se elabora la batimetría basada en un espaciamiento, que va de acuerdo al detalle que se requiere en cada zona de interés.

Para desarrollar la batimetría que será utilizada en el estudio, se emplea la herramienta QUICKIN incorporada dentro del modelo Delft3D Flow, la cual una vez definida la malla, permite interpolar los puntos de batimetría usando un método de interpolación triangular. Al finalizar el proceso de interpolación, el programa brinda un reporte con detalles e información de carácter general del proceso.

c) Marea

Una vez establecidos los puntos de medición de marea, se define la forzante de marea, tal que, represente adecuadamente las corrientes generadas por la misma. Para definir la forzante de marea, se tienen distintos métodos tales como, obtener los parámetros armónicos forzantes del estudio desde modelos globales de marea, o bien, desde las mediciones obtenidas en terreno. Si bien el método de modelos globales es una alternativa para realizar un modelo hidrodinámico, no aplica para el presente estudio. Como se mencionó en el acápite 4.2.1, el modelo global de mareas TOPEX 7.2 cuenta con una resolución de $1/12^\circ$ para el Océano Pacífico, lo cual disminuye la precisión de los datos en zonas interiores como fiordos, lagos o canales (Información obtenida por el *Dr. Laurence Padman* via e-mail). Dado lo anterior, se opta por obtener los forzantes armónicos de marea desde las mediciones ubicadas próximas a las estaciones de Tique (Este) y Carelmapu (Oeste), disponiendo de la medición cercana a Puerto Elvira para calibrar el modelo.

El análisis se llevará a cabo utilizando el código abierto de Matlab T-Tide (Pawlovicz, 2002), el cual realiza el análisis armónico mediante la técnica de mínimos cuadrados, incorporando una corrección que minimiza los problemas en registros de corto periodo.

d) Corrientes de marea

Posterior a identificar la ubicación de las mediciones dentro del área de estudio, se debe realizar una revisión de la información disponible mediante filtros, que permitan eliminar anomalías registradas en la medición. Por otra parte, para chequear la influencia del agente de marea sobre la corriente, es recomendable realizar una correlación cruzada entre las componentes vectoriales de la corriente (u y v) y la marea medida en un sector. Para el presente estudio la correlación cruzada se llevará a cabo en el sector de Roca Remolinos.

4.3 Modelo hidrodinámico 2D

La modelación en 2D consiste en una técnica utilizada para encontrar soluciones analíticas a ecuaciones diferenciales promediadas en la vertical mediante cálculos numéricos. Estas ecuaciones describen diversos sistemas objeto de estudio; por ejemplo, propagación de oleaje o circulación costera. Los principales modelos empleados son: icónicos (reproducción a escala reducida de un fenómeno y sus propiedades relevantes), análogos (representación física de un fenómeno, considerando las propiedades más relevantes), y numéricos (representación analítica). Actualmente se utilizan los modelos numéricos, básicamente por su menor costo operacional, donde destacan los basados en métodos de diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos.

La resolución del problema planteado en el presente estudio es obtenida por Delft3D Flow en base al método de resolución de diferencias finitas para el módulo 2D y volúmenes finitos para el módulo 3D. En la confección del modelo hidrodinámico, se observan tres etapas primordiales, Pre proceso, Proceso y Post proceso, las cuales consideran la configuración de los parámetros de entrada, análisis de datos, elección de escenarios, ajuste de parámetros de modelación, calibración y validación del modelo numérico respecto a la realidad. Además de la utilización de los resultados obtenidos, para realizar análisis posteriores al proceso de simulación.

4.3.1 Pre proceso

Esta etapa consiste en la confección, configuración y análisis de los parámetros iniciales para representar el fenómeno físico asociado al estudio.

- Batimetría

La batimetría es una información importante utilizada para estimar la profundidad en los nodos en la malla numérica del modelo, obteniendo así una representación completa del fondo marino en el área de estudio. Lo principal, es verificar que la densidad de la batimetría es igual al nivel de resolución que se busca obtener en los diferentes sectores dentro del dominio del modelo numérico.

- Límites abiertos y cerrados

Los límites abiertos y cerrados definen las delimitaciones de la región de modelación. Los límites abiertos definen las fronteras a través del campo de flujo, son artificiales y confeccionados para delimitar el área computacional del modelo en sectores ocupados por agua. Los límites cerrados, conocidos también como línea de costa, corresponden a la frontera entre las regiones ocupadas por agua y las ocupadas por tierra. Debido a la importancia de tener una buena línea de costa definida, se verifica previamente el registro de puntos que la definen a partir de imágenes satelitales, cartas náuticas o diferentes fuentes de información geográfica (Por ejemplo, modelos globales como GEBCO).

El modelo Delft3D Flow para ecuaciones tanto en 3D, como de profundidad promediada 2D o de onda larga ofrece un set de ecuaciones diferenciales parciales representadas de forma hiperbólica (caso viscoso) o parabólicas (caso no viscoso). Por lo que, para obtener un problema matemático bien planteado con una solución única, se debe especificar un conjunto de condiciones iniciales y de contorno para el niveles de agua y velocidades horizontales (Deltares, 2014). Para esto, Delf3D Flow ofrece diferentes opciones orientadas en la configuración de las condiciones de borde (límites abiertos) y los límites “tierra-agua” (límites cerrados).

- En las condiciones de borde cerradas la componente normal de velocidad es nula.
- Las condiciones de borde abiertas definen la interacción entre las masas de agua externas e internas del dominio, permitiendo contar con un área de modelación limitada, que reduce el esfuerzo computacional. Delft3D Flow ofrece distintas opciones para la configuración de los bordes abiertos:
 - a) Nivel del mar, ya sea mediante series de tiempo, parámetros astronómicos, parámetros armónicos ó relación QH (De la condición de borde con nivel del mar, se utiliza la descarga total calculada a partir de la descarga por celda).
 - b) Componentes de velocidad normal y/o tangencial, deben ser prescritos para obtener un buen valor matemático como condición de borde inicial.
 - c) Descarga total o por celda en puntos del dominio numérico.
 - d) Condiciones de borde absorbente para ondas (Riemman) o condiciones de borde Neumann para el estudio del impacto en modelos hidrodinámicos frente a problemas de ingeniería (interacción con rompeolas, espigones, etc), los cuales normalmente son difíciles de calibrar.

En el presente estudio se utilizó una condición de borde del tipo Nivel del Mar, definida mediante parámetros armónicos. Para esta configuración, se asigna un valor al parámetro

“alpha” ($\alpha = 0$), que permite disipar la reflexión de la onda de marea en la frontera abierta debido a perturbaciones de onda corta propagándose hacia el límite desde el interior del modelo.

- Confección de la malla

Delft3D Flow utiliza mallas regulares, cuenta con una herramienta, que permite chequear la ortogonalidad de las cuadrículas. Las coordenadas pueden ser definidas como cartesianas o esféricas, en ambos casos debe utilizarse una cuadrícula curvilínea. Las cantidades geométricas $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ introducidas dentro de la ecuación (2.3.1), son discretizadas en la malla de cálculo como se observa en la Figura 4-2.

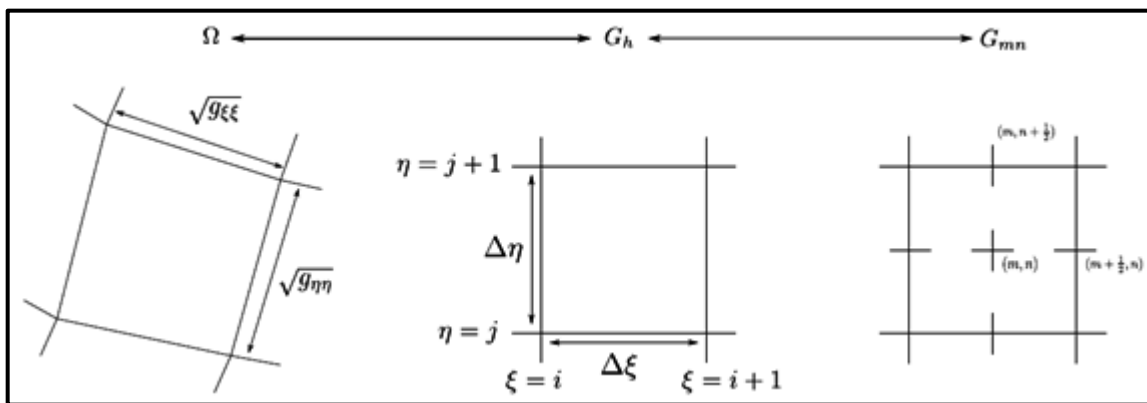


Figura 4-2: Mapeo de coordenadas.

Fuente: (Deltares, 2014).

El principal criterio a considerar al momento de trabajar la malla computacional es la resolución. Ésta debe representar el fenómeno de forma apropiada en los sectores de interés. No obstante, esto dependerá también de la calidad de la información batimétrica disponible en el sector y de la naturaleza del estudio. Para contar con una solución robusta de las ecuaciones no lineales en aguas someras, la malla debe ser adecuada para resolver problemas tanto en el espacio como en el tiempo, y además eficiente de forma computacional. Existe una serie de criterios básicos para cumplir con estas condiciones mínimas:

- **Criterio geométrico:** Debido a que Delft3D Flow trabaja con elementos cuadrículares, es importante considerar que éstos sean ortogonales¹³ y bien estructurados, ya que de lo contrario el modelo presentará inestabilidad.

¹³ Se sugiere como criterio de ortogonalidad que, $\cos(\varphi) < 0,02$ donde φ representa el ángulo entre líneas de la grilla (Deltares, 2014).

- Criterio de transición: Para minimizar los errores de cálculo en la malla numérica, debe existir un cambio proporcional desde un elemento grande a uno menor¹⁴. De no ser así, habrá inestabilidades numéricas propagando errores a lo largo del dominio.
- Criterio de número de Courant-Friedrich-Levy (CFL): Es una condición necesaria para la estabilidad del modelo, a medida que se resuelven las ecuaciones diferenciales mediante el método de diferencias finitas.

El número de Courant queda definido por la ecuación (4.3.1), el cual considera el valor del lado de cada elemento $\{\Delta_x, \Delta_y\}$ que es un valor característico del espaciamiento de la grilla en cada dirección. Además, incorpora el *time step*¹⁵ Δ_t , aceleración de gravedad y la profundidad del agua en metros (H).

$$CFL = \frac{\Delta_t \sqrt{gH}}{\{\Delta_x, \Delta_y\}} \quad (4.3.1)$$

El término \sqrt{gH} proviene de la teoría lineal de ondas largas y representa la celeridad de onda propagándose en aguas someras (Pugh, 1987).

El valor del número de Courant debe cumplir un criterio numérico para garantizar estabilidad. En el caso de Delft3D Flow el criterio general es:

$$CFL = \frac{\Delta_t \sqrt{gH}}{\{\Delta_x, \Delta_y\}} < 10 \quad (4.3.2)$$

El modelo Delft3D permite chequear el número de Courant, presentando un mapa de la malla con los valores de Courant para cada elemento. Para obtener información batimétrica en todo el lugar, se interpola el valor de los puntos conforme a una resolución espacial propuesta, mediante un proceso iterativo donde se debe verificar que se cumple con el criterio de Courant.

- Intervalo de tiempo a simular

Al momento de estructurar un modelo forzado por corrientes de marea, resulta conveniente determinar el intervalo mínimo de datos medidos necesarios para representar el comportamiento de la marea en un mes lunar completo (Figura 4-3). La representación del

¹⁴ Se sugiere que la relación de aspecto se encuentre en el rango 1 a 2, a menos que el flujo predomine una línea de la grilla.

¹⁵ *time step*: Paso de tiempo destinado para el cálculo computacional.

comportamiento de la marea, debe contar con al menos el período de un mes sinódico, el cual representa el periodo medio de la revolución de la Luna alrededor de la Tierra con respecto al Sol, con una duración aproximada de 29,5305 días. Por lo tanto, es recomendable contar con al menos 30 días de datos medidos de forma continua.

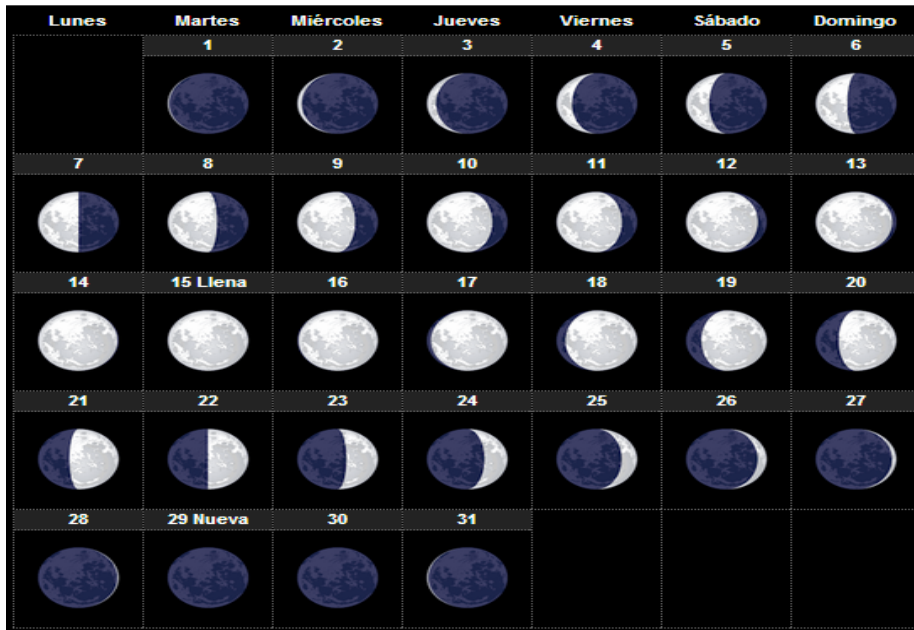


Figura 4-3: Calendario Lunar Agosto 2000.

Fuente: TuTiempo (2000).

- Marea

Una vez adquiridas las mediciones se debe definir el tipo de condición mareal que será utilizada. Una vez obtenidos los parámetros armónicos en el pre proceso de datos, se seleccionan la mayor cantidad de constituyentes influyentes dentro de cada condición de borde abierto del modelo, que serán utilizadas en la simulación.

- Aceleración de Coriolis

Luego de configurar la malla numérica en coordenadas cartesianas, el modelo Delft3D Flow solicita especificar la latitud y orientación del modelo, donde la latitud define la locación del modelo respecto a la Tierra. Una vez ingresado el valor de latitud, el modelo calcula la fuerza de Coriolis asociada a la misma, la cual posteriormente es incorporada en los cálculos hidrodinámicos como fue descrito en el acápite 3.3.1.

4.3.2 Proceso

El proceso consiste en una etapa de implementación de diferentes escenarios, con el fin de alcanzar los objetivos del estudio. En el caso particular del presente trabajo, se utilizó un escenario con condiciones iniciales definidas en el acápite 4.3.1. Estas condiciones se modifican de forma iterativa, hasta obtener un ajuste adecuado entre los resultados obtenidos por el modelo, y los datos registrados por los instrumentos en terreno. Por lo general, esta etapa precisa de diferentes parámetros, siendo los principales:

- time step

El time step es un parámetro que se modifica de forma iterativa con el fin, que la malla computacional utilizada cumpla con el criterio de estabilidad de Courant definido por la ecuación (4.3.2). Cabe destacar que, este valor es diferente en cada malla numérica, y si toma un valor erróneo el modelo se tornará inestable.

- Parámetros numéricos

El modelo Delft3D Flow cuenta con una cantidad de parámetros, necesarios para permitir al modelo representar los distintos escenarios propuestos. Por lo general, el rango de valores para estos parámetros numéricos viene especificado en el manual de usuario. Para el desarrollo del presente documento, se utiliza un esquema cíclico¹⁶ para ecuaciones integradas en la vertical (Deltares, 2014).

- Parámetros físicos

Para representar el comportamiento del fluido a modelar, resulta necesario definir una serie de parámetros físicos. Entre los más recurrentes se encuentran la fricción de fondo, la cual viene definida por el número de Chézy, Manning o White-Colebrook (Deltares, 2014), que permiten calibrar las velocidades de corriente de acuerdo a su interacción con el fondo. Otro parámetro importante es la viscosidad turbulenta horizontal. Por otro lado, se incorporan los términos de disipación de energía por turbulencia en modelos 2D, utilizando el método HLES¹⁷ propuesto por Delft3D Flow, el cual incorpora los efectos de turbulencia en los procesos de viscosidad y difusión 2D.

¹⁶ Para mayor información de un esquema cíclico, revisar página 291 del manual de usuario Delft3D Flow.

¹⁷ HLES: Simulación horizontal de Remolinos en gran escala.

- Proceso de calibración

Esta etapa se refiere a la comparación de los resultados medidos por un instrumento versus los valores obtenidos por el modelo numérico. Para determinar si el modelo se encuentra calibrado existe una serie de parámetros estadísticos, que permiten analizar la correlación entre dos variables, dentro de los cuales se encuentran; por ejemplo, el coeficiente de correlación lineal, coeficiente de determinación, error cuadrático medio, prueba chi cuadrado, método seis sigma y Nash-Sutcliffe. En el presente estudio se utilizará el coeficiente de determinación¹⁸ (R^2) y error cuadrático medio (ECM), considerando el modelo calibrado si, el valor de marea se encuentra entre: $R^2 > 0,95$ y $ECM < 0,05$. Además, de contar con un valor de magnitud de corrientes entre: $R^2 > 0,75$ y $ECM < 0,15$.

4.3.3 Post proceso

La etapa de post proceso representa el conjunto de actividades necesarias que tienen por objeto realizar un análisis de los resultados, implementarlos en el sector de estudio y validarlos. En primera instancia, se analizan los resultados obtenidos respecto a si se representan las zonas características previamente establecidas en el acápite 4.2.1, de acuerdo a lo que se espera obtener con la modelación realizada en el lugar. Principalmente se busca, representar el comportamiento de zonas singulares como Roca Remolinos, además de interpretar la velocidad y dirección media de la corriente. Esto permite obtener una caracterización; por ejemplo, del comportamiento promedio de la velocidad de corrientes que atraviesan zonas singulares e identificar zonas potenciales dentro del canal. Asimismo, representar la velocidad de corrientes en situaciones favorables o desfavorables para periodos dentro del mes lunar como, sicigias y cuadraturas, en condiciones de llenante - vaciante. Se puede trabajar, por tanto, con gráficos, tablas y mapas, que permitan alcanzar los objetivos propuestos en el estudio.

Cabe destacar la diferencia fundamental entre el proceso de calibración y validación. El primero, se refiere a la comparación entre los valores medidos por un instrumento y los valores obtenidos por el modelo, como fue descrito anteriormente. El segundo en tanto, se refiere a la validación del modelo en otro periodo de tiempo; por ejemplo, si se calibró el modelo en Invierno, se valida la condición de Verano utilizando el mismo modelo base, donde si el valor de validación no se ajusta a la realidad, quiere decir que el modelo que se creía calibrado no lo está. Al realizar este procedimiento de forma satisfactoria, se valida el modelo en un periodo de tiempo distinto.

¹⁸ Coeficiente de determinación: El coeficiente de determinación varía entre cero y uno, si la relación entre las variables es cercana a uno existe una similitud entre ambas, mientras que, próximas a cero describen una muy mala similitud entre los datos.

4.4 Modelo hidrodinámico 3D

Para realizar estudios que requieren de un mayor detalle se utilizan los modelos hidrodinámicos en 3D, que permiten estudiar procesos físicos, que inciden en la columna de agua. Con el fin de asegurar, que se cumple el principio de conservación de la masa y el volumen, el modelo Delft3D Flow resuelve las ecuaciones 3D mediante el método de volúmenes finitos.

Si bien, la confección de un modelo 3D es similar a un modelo promediado en la vertical, éste considera parámetros, que permiten describir el comportamiento del flujo a través de la columna de agua. Además, Delft3D Flow cuenta con dos tipos de coordenadas, que permiten representar la columna de agua: las coordenadas sigma (σ) y zeta (z). El presente estudio será desarrollado utilizando la coordenada tipo zeta (z).

4.4.1 Pre proceso

A continuación las variables usadas en la configuración del módulo 3D:

- Batimetría

Se trabaja igual a lo expuesto en el acápite 4.3.2.

- Límites abiertos y cerrados

Las condiciones de límites abiertos y cerrados descritas para un modelo 3D, son similares a las definidas para un modelo 2D. La principal diferencia radica en la incorporación de los efectos sobre la columna de agua. Por tanto, resulta relevante verificar la línea de costa mediante distintas referencias con la finalidad de reducir el error efectuado por el modelo tridimensional. Como se mencionó en el acápite 4.4, el modelo Delft3D Flow trabaja los límites abiertos y cerrados, de acuerdo a dos configuraciones verticales, coordenada sigma (σ) o zeta (z), las cuales serán descritas más adelante. El modelo Delft3D Flow ofrece tres opciones para representar el perfil vertical en la condición de borde abierta:

- Uniforme: La velocidad del perfil es uniforme sobre la profundidad del agua.
- Logarítmico: La velocidad del perfil es una función logarítmica sobre la profundidad del agua.
- Por capa: El perfil de velocidad proviene de un archivo tomado de un modelo de superficie mayor, anidado para la condición de borde.

El modelo Delft3D define la condición cinemática vertical, de acuerdo al tipo de coordenada (σ o Z) utilizada para representar el comportamiento 3D, estimando la superficie libre como $\sigma = 0$ y $z = \zeta$, mientras que, el fondo será $\sigma = -1$ y $z = -d$ (d =profundidad [m]). Finalmente,

siendo w la velocidad vertical relativa al plano, se considera la impermeabilidad de la superficie libre y el fondo, de acuerdo a la siguiente condición cinemática para una grilla en coordenadas sigma (σ):

$$w |_{\sigma=-1} = 0 ; w |_{\sigma=0} = 0 \quad (4.4.1)$$

Para una grilla en coordenadas Z , la condición cinemática inicial será:

$$w |_{z=-d} = 0 ; w |_{z=\zeta} = 0 \quad (4.4.2)$$

Resulta interesante mencionar que, si bien, la condición del límite cerrado describe un flujo normal hacia la frontera con valor cero, existe una condición de contorno, que define la transición entre la tierra y el agua con un esfuerzo cortante a lo largo de la frontera. Para esta condición el modelo Delft3D prescribe dos condiciones:

- Esfuerzo cortante tangencial igual cero (deslizamiento libre o Free-slip).
- Deslizamiento parcial (Partial-slip).

Para simulaciones de gran escala, la influencia de esfuerzos tangenciales puede ser despreciada. Se utiliza entonces deslizamiento libre en las fronteras cerradas (Free-slip). Por otra parte, en simulaciones de pequeña escala (por ejemplo, escala de laboratorio), la influencia ya no es despreciable. Se debe incorporar entonces un deslizamiento parcial en los límites cerrados (Partial-slip), calculando el esfuerzo cortante tangencial asociado, en base a leyes logarítmicas¹⁹ (Deltares, 2014).

- Confección de la grilla

Para la confección de la malla 3D, es necesario considerar la forma de distribución vertical en la grilla. Para la grilla de coordenadas sigma, el número de capas a lo largo del área computacional es constante, independientemente de la profundidad del agua local. La distribución del espesor de capa relativo es generalmente no uniforme, facilitando una mayor resolución en las zonas de interés. Por otra parte, la grilla Z cuenta con líneas horizontales de coordenadas, que están casi paralelas con las interfaces de densidad (isopícnas) en regiones con pendiente de fondo inclinadas. Esto resulta importante, ya que reduce la mezcla artificial de propiedades escalares como la salinidad y temperatura. En esta configuración de grilla, el fondo es representado con una forma de escalera. La representación de ambas grillas se observa en la Figura 4-4.

¹⁹ Para mayor detalle sobre ésta condición se recomienda revisar el manual de usuario Delft3D Flow, página 218.

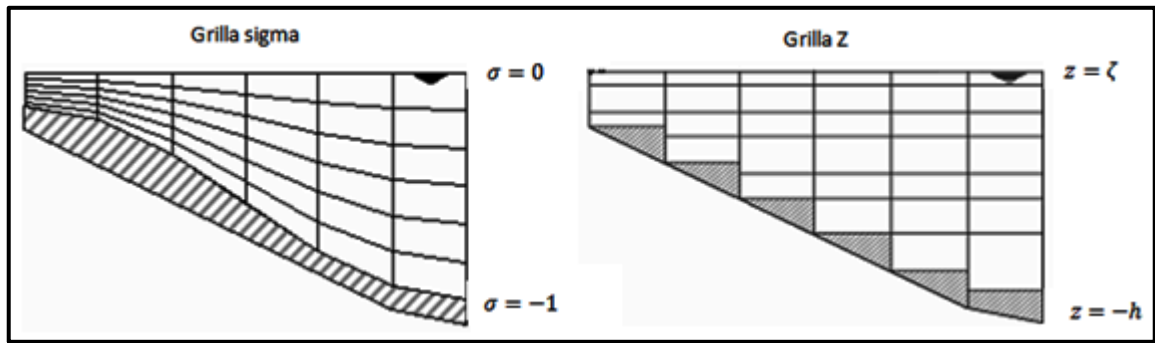


Figura 4-4: Tipos de grilla 3D.

Fuente: (Deltares, 2014).

Para el presente estudio se utiliza la grilla Z. El porcentaje de cada capa en la vertical es asignado por el usuario dado que, existe una variación tanto del fondo como la superficie libre, por tanto, el número de celdas activas varía en el espacio y tiempo. Por consiguiente, los índices de celdas activas superiores e inferiores de la grilla Z, no son constantes. Para la confección de distintas grillas verticales, resulta necesario comprender la finalidad del estudio, considerando la estratificación en la columna de agua, la eficiencia del modelo y el largo de escala. Para modelos de flujo hidrostático, que resuelvan las ecuaciones en aguas someras (Shallow water equations) se observa que, el espaciamiento de la grilla de forma horizontal es mayor al vertical, situación reflejada en la relación $\Delta_x, \Delta_y \gg \Delta_z$. Por el contrario, para los modelos de flujo no hidrostáticos, resueltos mediante ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSWE en sus siglas en inglés), el largo de escalas de flujo es del mismo orden en ambas direcciones.

Para la resolución de las ecuaciones de aguas someras en 3D, es recomendable contar con un modelo robusto (incondicionalmente estable), preciso y eficiente. El tiempo de integración explícita de las ecuaciones en aguas someras en una grilla rectangular, está sujeto a un *time step* basado en el número de Courant para propagación de ondas, descrito por:

$$CFL_{onda} = 2\Delta t \sqrt{gh} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} < 1 \quad (4.4.3)$$

Donde Δt es el *time step*, g es la aceleración de gravedad, h es la profundidad total del agua y $\Delta x = \sqrt{G_{\xi\xi}}$ e $\Delta y = \sqrt{G_{\eta\eta}}$ son el espaciamiento en dirección ξ y η . Para contar con las condiciones mencionadas. Se debe cumplir al menos, con el criterio de la ecuación (4.3.2) para modelos implícitos (términos de advección horizontal resueltos mediante el método “Cíclico”), o bien, con el criterio de la ecuación (4.4.3) para modelos explícitos con el fin de no generar inestabilidad numérica.

- Aceleración de Coriolis

Al igual que lo descrito en el acápite 4.3.1, el módulo 3D será trabajado, utilizando coordenadas cartesianas. Posteriormente, la Aceleración de Coriolis se incorporará en las ecuaciones hidrodinámicas tridimensionales, mediante las ecuaciones descritas en el acápite 3.3.2.

4.4.2 Proceso

La etapa de proceso en un modelo 3D, consta de un procedimiento separado en diferentes etapas primordiales, que permiten definir el proceso de configuración y calibración del modelo 3D. Estas etapas se refieren; por ejemplo, al ajuste de parámetros numéricos, parámetros físicos y *time step*, los cuales son modificados de manera iterativa hasta lograr una representación oportuna del comportamiento de las corrientes de marea en la columna de agua.

- *time step*

En la etapa del proceso el valor de *time step* es modificado, para cumplir con el criterio del número Courant (CFL) en esquemas implícitos propuesto en la ecuación (4.3.2), asegurando así que se cuenta con un modelo estable. Para un modelo grilla Z, es necesario iterar el valor del *time step* hasta contar con un modelo estable.

- Parámetros numéricos

Los parámetros numéricos utilizados en el módulo 3D resultan similares a los usados en el módulo 2D. Sin embargo, la cantidad de variables numéricas aumenta a medida que se incorporan procesos físicos como salinidad, temperatura o viento. Aquí juega un papel relevante el esquema de advección para momentum, ya que los esquemas de diferencia advectivos de segundo orden o superior en grillas gruesas, pueden presentar oscilaciones no físicas cerca de regiones con gradientes empinados. Para sistemas 3D, estas oscilaciones son llamadas “wiggles” los cuales se originan en proximidades a grandes pendientes (por ejemplo: Roca Remolinos en Canal Chacao) y pueden generar perfiles verticales de temperatura y/o salinidad irreales, como se observa en la Figura 4-5. La solución, por tanto, presenta valores negativos, que son eliminados mediante un proceso iterativo de filtro vertical. La técnica introduce términos artificiales de advección y difusión, mediante procesos iterativos de resolución (Forester, 1979). En el presente estudio, se utiliza el *esquema cíclico* para momentum propuesto por Delft3D Flow, el cual se basa en un esquema de segundo orden para aproximar los términos de advección horizontal. Además, trabaja con el método

ADI²⁰ para la integración de términos en la ecuación de continuidad. Para mayores detalles se recomienda revisar (Uittenbogaard et al, 1992).

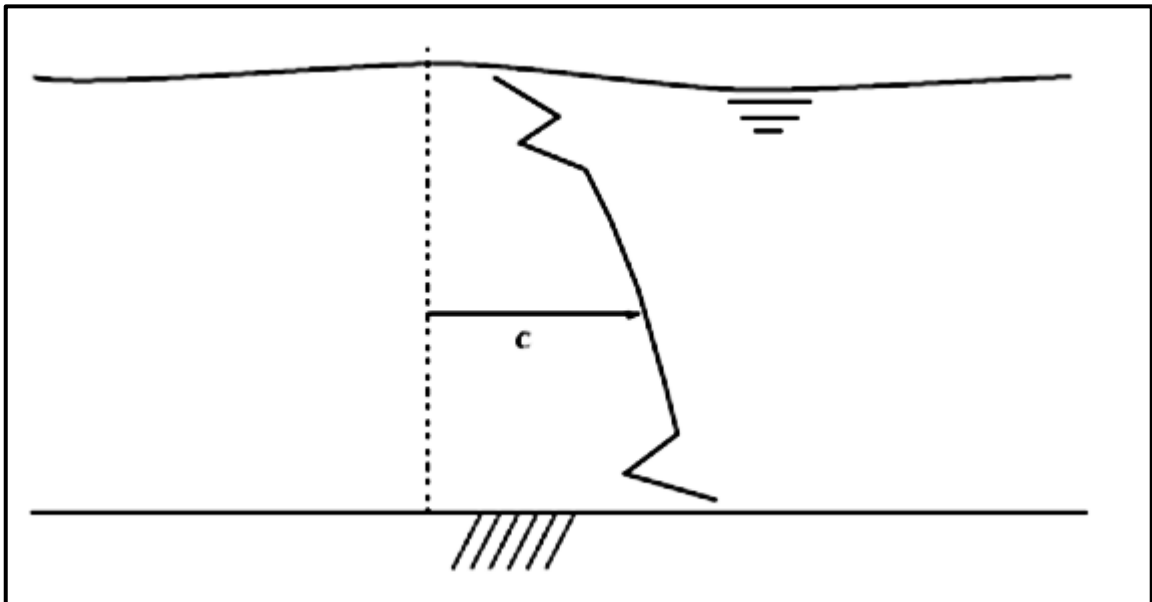


Figura 4-5: Perfil vertical con wiggles.

Fuente: (Deltares, 2014).

- Parámetros físicos

Los procesos físicos descritos en un módulo 3D resultan similares a uno promediado en la vertical. Sin embargo, a diferencia del módulo 2D, el módulo 3D incorpora parámetros, que permiten integrar los efectos turbulentos dentro de las ecuaciones. Por otra parte, los efectos ocasionados por la interacción de las corrientes de marea con el fondo, fueron incorporados mediante una formulación cuadrática del stress de fondo, similar a la utilizada en un modelo con profundidad promediada. La tensión de corte por fondo en 3D, se relaciona con la corriente de la primera capa sobre el suelo marino mediante un perfil logarítmico en la vertical. Descrito por medio del número de Manning, donde la contribución de la componente vertical de velocidad se considera despreciable (Deltares, 2014). En resumen existen una serie de parámetros físicos, que deben ser ajustados con el fin de representar adecuadamente los procesos, que se desarrollan en la columna de agua.

²⁰ ADI: Dirección Alternativa Implícita.

- Proceso de calibración

De forma similar al proceso descrito en el acápite 5.3.3, la calibración del módulo 3D consiste en comparar los datos medidos por instrumentos versus los obtenidos por la modelación numérica. La principal diferencia, que existe en la calibración de ambos módulos radica en que, el módulo 2D puede ser calibrado con valores de magnitud de corrientes promediadas en la vertical. Por otro lado, el módulo 3D se calibra, comparando el valor obtenido en distintas capas y espesor, respecto a las capas medidas en la columna de agua por el instrumento.

4.4.3 Post proceso

En la etapa de post-proceso del módulo 3D se debe analizar, representar y validar los resultados obtenidos. A diferencia del módulo 2D, se incorporan los análisis de los resultados conseguidos en la columna de agua. Además, se representan los resultados de las velocidades de corrientes obtenidas a distintas profundidades. Finalmente, queda abierta la posibilidad de validar el módulo 3D del modelo para un intervalo de tiempo diferente.

Con los resultados del modelo 3D es posible, además, realizar un análisis en la columna de agua con el fin de; por ejemplo, ubicar las profundidades óptimas donde extraer energía mediante dispositivos en la zona, obtener antecedentes útiles de los patrones de corrientes en la zona, para representar procesos termohalinos complejos como plumas térmicas, plumas salinas y la dispersión de contaminantes.

4.5 Caracterización del potencial energético en zonas de interés

Canal Chacao ofrece gran cantidad de energía potencial renovable no convencional, con velocidades que alcanzan los 8 a 9 nudos. Al utilizar un dispositivo adecuado para la extracción de energía potencial por corrientes de marea, se pueden generar grandes cantidades de energía renovable con 18 horas diarias, alcanzando un peak de 3000 MW de Potencia (UNEP, Armada, Open, & Blue, 2010).

La forma de obtener la energía potencial proveniente de mareas, se deriva del análisis de la ecuación para energía cinética, descrita por la ecuación (4.5.1).

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.5.1)$$

Donde; E es la energía cinética en Joules, v es la velocidad de corriente en [m/s] y m es la masa en [Kg].

La potencia se define como energía por unidad de tiempo, por lo tanto, la potencia efectiva por unidad de área a través de un flujo de agua se calcula de acuerdo a lo descrito por la ecuación (2.1.17). Esta ecuación se utilizará en el presente estudio, para medir la potencia

con velocidades promediadas en la vertical en 2D, y velocidades calculadas por capas para el modelo 3D. Cabe destacar que, debido a una serie de factores como considerar calado para buques mayores, conservación o mínima alteración de la flora y fauna local, resulta imposible extraer el total de la energía potencial teóricamente disponible en Canal Chacao.

4.6 Análisis comparativo entre ambos módulos 2D y 3D

En el presente estudio se realizará un análisis comparativo, para el mes comprendido entre Agosto y Septiembre del año 2000, respecto de la energía potencial obtenida mediante un perfil promediado en la vertical (módulo 2D), versus la obtenida en el módulo 3D por capas con promedio en la vertical. Además, se evaluará la energía potencial obtenida en la columna de agua para tres capas; superficial, intermedia y fondo. Esto se llevará a cabo, considerando siete perfiles transversales a lo largo del Canal Chacao, como se observa en la Figura 4-6. Para efectuar el análisis, se utiliza un método que pondera las velocidades dentro del mes, el cual considerando un área unitaria entrega la potencia en $[Kw/m^2]$. Además, si se estima un área representativa para cada uno de los perfiles seleccionados, se obtiene la potencia de flujo (en Mega Watts $[MW]$), que atraviesa a cada sección. Ésta metodología consiste en seleccionar la ocurrencia ponderada de la velocidades, para diferentes rangos de magnitudes $[m/s]$ dentro del mes sinódico. Esto se realiza a través de una tabla dinámica, donde se agrupa las velocidades de corrientes cada $0,1 [m/s]$, contando la cantidad de veces que se presenta un valor de velocidad dentro del mes. Posteriormente, se calcula su frecuencia relativa, utilizando el valor medio de velocidad en cada rango donde, luego de considerar el porcentaje de ocurrencia más la densidad del agua de mar, se obtendrá los valores de potencia promedio para un área unitaria en $[Kw/m^2]$. Después, incorporando un valor de área predeterminada para cada perfil transversal (Figura 4-6), se tendrá la potencia resumida en $[MW]$. Entonces, se realiza un análisis gráfico de las potencias obtenidas, que permita visualizar la diferencia entre la energía obtenida por cada módulo. Además, se incluirá un histograma que represente éstas diferencias claramente. Finalmente, se generarán tablas comparativas, que consideren las mayores velocidades para la condición llenante, vaciante y mensual.



Figura 4-6: Perfiles transversales de potencia en Canal Chacao.

Fuente: Elaboración propia.

Los perfiles de la Figura 4-6, son seleccionados de acuerdo a las zonas más características respecto a la velocidad de corrientes generadas por marea dentro del Canal Chacao (Contreras et al, 2008). Luego de realizar este análisis, se obtiene un perfil longitudinal del potencial energético que atraviesa el sector. Se compararan los tiempos de simulación, las principales diferencias de un modelo respecto al otro. Analizando esto en tres escenarios específicos: la condición de Llenante, Vaciante y Promedio dentro del mes sinódico. Finalmente, se genera una tabla comparativa general, que deje a la vista las principales diferencias entre los módulos.

4.7 Creación atlas de energía potencial

Con el fin de obtener una mejor visualización del potencial energético por corrientes de marea disponible, se realizará un mapa de la potencia promedio mensual contenida en el sector. Para ello se selecciona una serie de puntos distanciados de manera equidistante entre elementos de la malla utilizada para la simulación de ambos módulos (Figura 5-12). Se realizará una interpolación utilizando el método Kriging sobre los valores obtenidos, con el fin de generar una imagen de la potencia promedio mensual [Kw/m^2] para todo el sector. Este análisis será realizado utilizando los valores promedio 2D, excluyendo del mapa de potencia mensual los análisis 3D por capas. Esto debido a que, esta potencia 3D por capas se estimará dentro del análisis de los perfiles transversales propuestos en el acápite 4.6.

5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN CANAL CHACAO, X REGIÓN

En el presente capítulo se aplicará la metodología expuesta en el sector de Canal Chacao. El procedimiento de desarrollo, será similar al descrito en el capítulo 4.

5.1 Elección del lugar

El Canal Chacao presenta condiciones óptimas para la extracción de energía, pues cuenta; con zonas abrigadas para la instalación de dispositivos de extracción, y velocidades máximas sobre los 4 [m/s]. La Figura 5-1 muestra una representación de la morfología en el lugar. Dentro de la zona, se observa un régimen semi diurno mixto de marea con un rango de 3.5 a 6.5 [m]

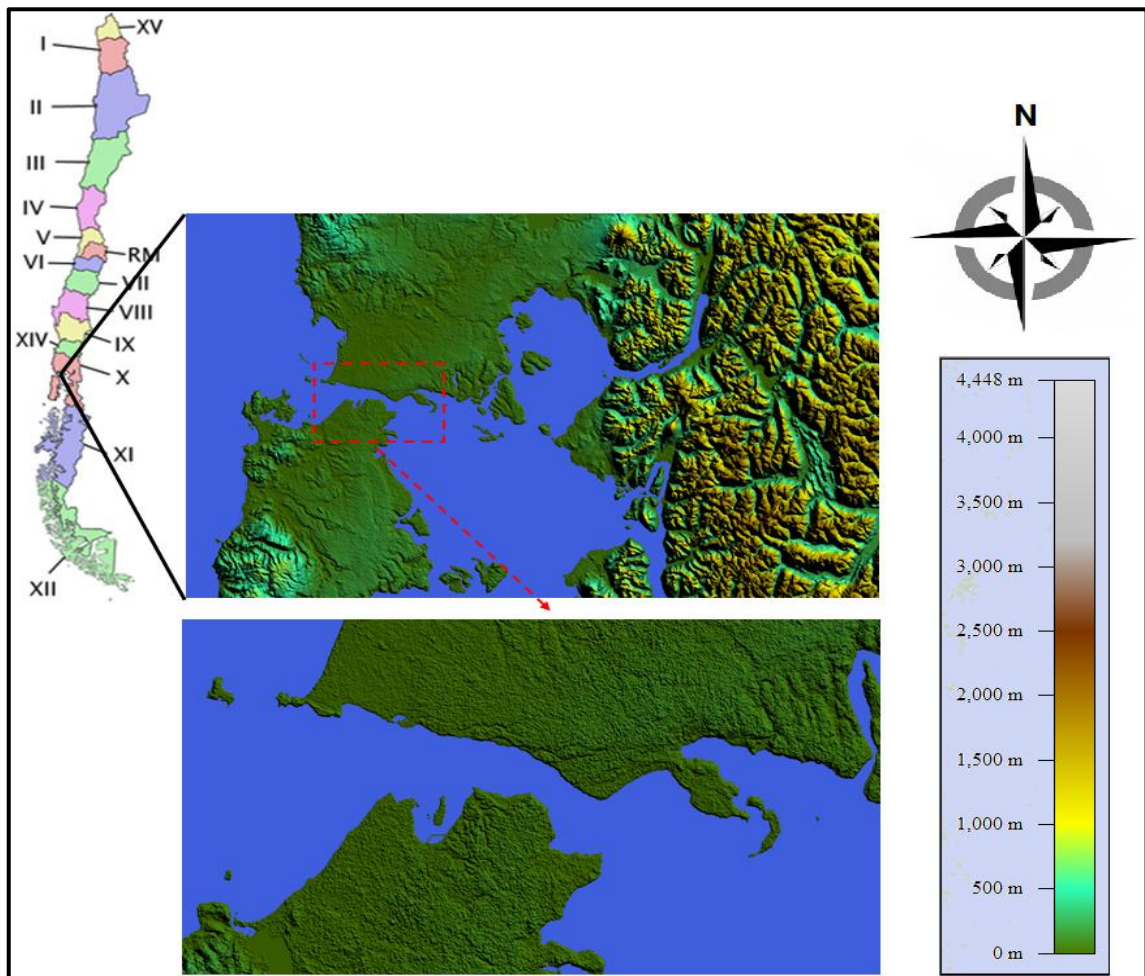


Figura 5-1: Ubicación Canal Chacao, Chile.

Fuente: Elaboración propia con SRTM proporcionado por CGIAR.

5.2 Caracterización del recurso en el sector

Al realizar un primer análisis de los antecedentes disponibles para caracterizar el comportamiento hidrodinámico dentro del Canal Chacao, se observó en base a las mediciones del lugar, que hay un gran desfase entre la marea del Oeste respecto a la zona Este, hecho corroborado en otros estudios (Contreras et al, 2008) y (Sepúlveda, 2010). Con el fin de realizar una buena práctica de modelación, se analizó la posibilidad de utilizar el modelo global de mareas Topex 7.2 para definir las condiciones de borde. No obstante, la baja resolución de éste en condición de mar abierto y menor aún al entrar en canales, fiordos y ríos, terminaron por hacerlo inviable (*Información obtenida de Dr. Laurence Padman vía e-mail*). Se concluyó que, esta zona es la mejor opción para generar una condición de borde inicial en base a las mediciones disponibles. Una vez descrita la elección del lugar, se realizará la descripción del proceso de la configuración inicial del modelo.

5.2.1 Revisión y análisis de antecedentes

A continuación, se describe la revisión y análisis de los antecedentes disponibles.

a) Geografía

La información geográfica del lugar se obtuvo de la Carta Náutica SHOA N° 7210 junto con imágenes satelitales obtenidas del software Google Earth²¹, con el propósito de planificar la distribución espacial del área a modelar.

b) Batimetría

La información batimétrica disponible procede de información obtenida de la carta electrónica SHOA CL4LL010. Ésta fue complementada con información batimétrica medida en terreno, proporcionada por la empresa ICUATRO-COWI (2000), la cual ofrece una mayor resolución en sectores específicos como Roca Remolinos y dos sectores aledaños a ella. La información utilizada en el presente estudio fue facilitada directamente por el MOP²² Departamento de Vialidad, el cual autorizó el uso de la información. Gracias a esta información se logra obtener una mejor representación de la geometría en el sector de la Roca Remolinos. Además, se incorporó información de batimetría medida por la empresa Geomar en el año 2009, la cual fue facilitada mediante la gestión de la DOP²³. La información batimétrica total queda descrita en la Figura 5-2.

²¹ <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>.

²² MOP: Ministerio de Obras Públicas.

²³ DOP: Dirección de Obras Portuarias.

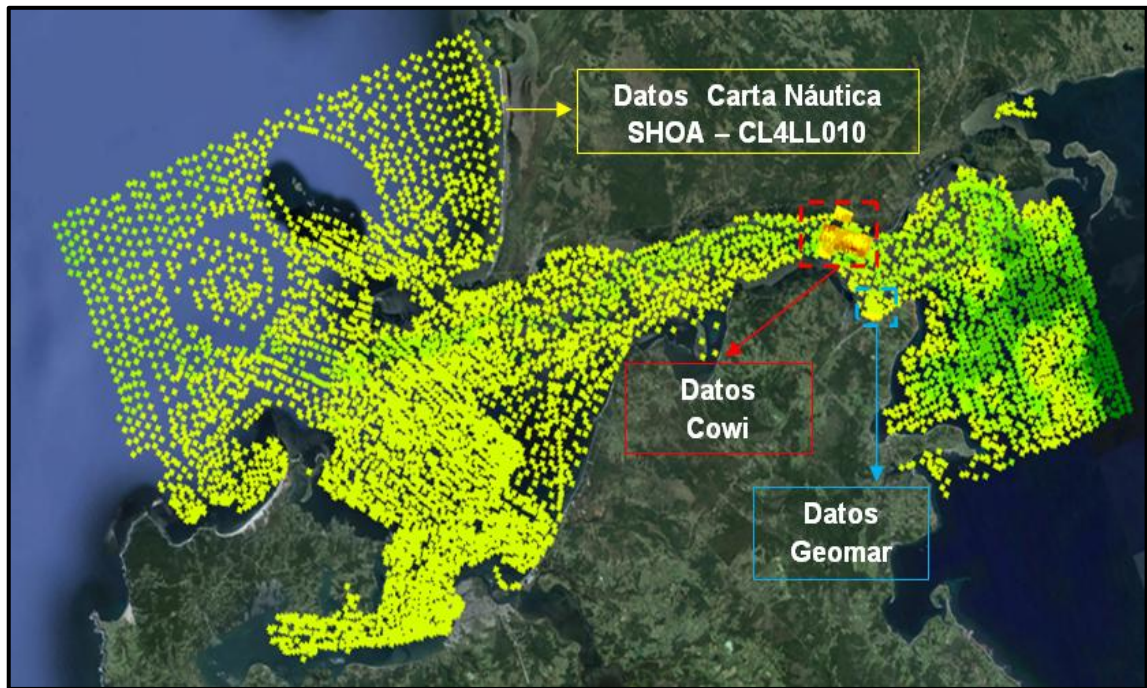


Figura 5-2: Información batimétrica disponible en Canal Chacao.

Fuente: Elaboración propia.

c) Registro del nivel del mar

En el año 2000 se realizó un estudio preliminar de ingeniería básica, que tuvo por objeto la representación del comportamiento hidrodinámico en el sector de emplazamiento del proyecto puente Canal Chacao, actualmente se encuentran disponibles previa solicitud, las campañas de medición efectuadas por la empresa ICUATRO-COWI (2000) a lo largo del sector. Dentro de éstas se cuenta con el registro de cinco mareógrafos instalados dentro de la zona, de los cuales sólo fueron considerados tres para este estudio. Estos registros cubren desde el 07 de Agosto del 2000 hasta el 06 de Septiembre del 2000, cumpliendo con el criterio de la publicación SHOA 3201. En la Tabla 3, se observa las coordenadas donde estaban ubicados los instrumentos.

Tabla 3: Coordenadas registros nivel del mar.

Sector	Coordenada Geográfica		Coordenada UTM (WGS-84)	
	Sur	Oeste	Sur	Oeste
Carelmapu	41°45'10"	73°43'00"	5376876	606694
Eje 1	41°47'60"	73°31'60"	5371389	621846
Manao	41°51'00"	73°30'00"	5365695	624630
Pihuio	41°49'00"	73°41'00"	5369741	609357
Tique	41°47'52"	73°24'10"	5371191	632924

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-3, presenta la distribución espacial de las mediciones de marea realizadas en Canal Chacao de las cuales, fueron consideradas solo tres; Carelmapu, Tique y Eje 1. Respecto a las estaciones mareográficas, tanto Carelmapu como Tique están ubicadas aproximadamente a 3,4 [km] de las condiciones de borde Oeste y Este respectivamente. Sin embargo, considerando que existe un desfase mareal importante (Contreras et al, 2008), las condiciones de borde se determinarán de manera iterativa, para representar la marea en cada borde.

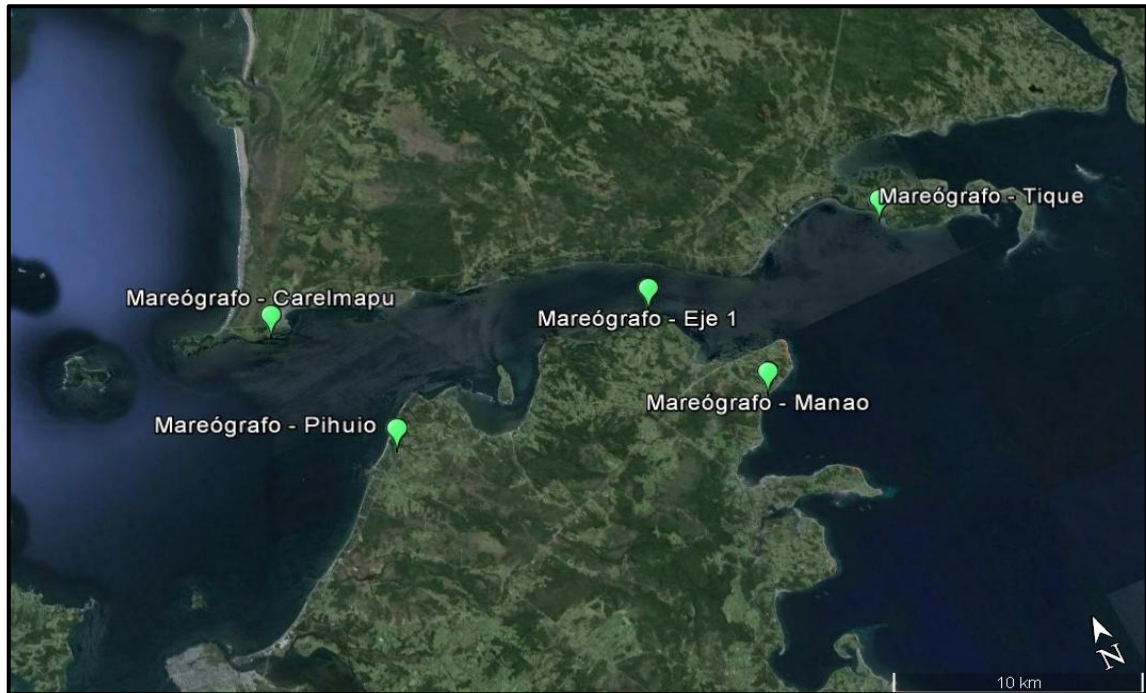


Figura 5-3: Mareógrafos en Canal Chacao.

Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth.

d) Registro de corrientes

Se dispone de tres registros de corrientes dentro de Canal Chacao, los cuales se encuentran ubicados en Puerto Elvira, Bajo Seluain y Roca Remolinos como se observa en la Figura 5-4. Estos registros comprenden mediciones verano e invierno. Dado que la ventana de tiempo donde se registraron estas mediciones, coincide con los registros del nivel del mar sólo entre los meses de Agosto y Septiembre del año 2000, se utilizará esta ventana para realizar el estudio. Los instrumentos utilizados para registrar los datos fueron correntómetros marca FSI, modelos 2D-ACM Shallow Water Current Meter para Puerto Elvira y Bajo Seluain. Estos fueron instalados, usando un sistema de anclaje “porta correntómetro” de acero inoxidable, de 3 [m] sobre el fondo marino, empotrado con un bloque de cemento de 1800 [Kg] aproximadamente. Tanto en Puerto Elvira como Bajo Seluain el instrumento fue fondeado en el veril de 30 [m].

Para registrar los valores de corrientes en Roca Remolinos se empleó un ADCP, instalado en el veril de 28 [m]. Se configuró con 9 capas de muestreo con 2 [m] de espesor cada una. La medición se realizó desde los 3,21 [m] hasta los 21,21 [m] desde el fondo, estimando rapidez y dirección de la corriente en cada una de las capas.

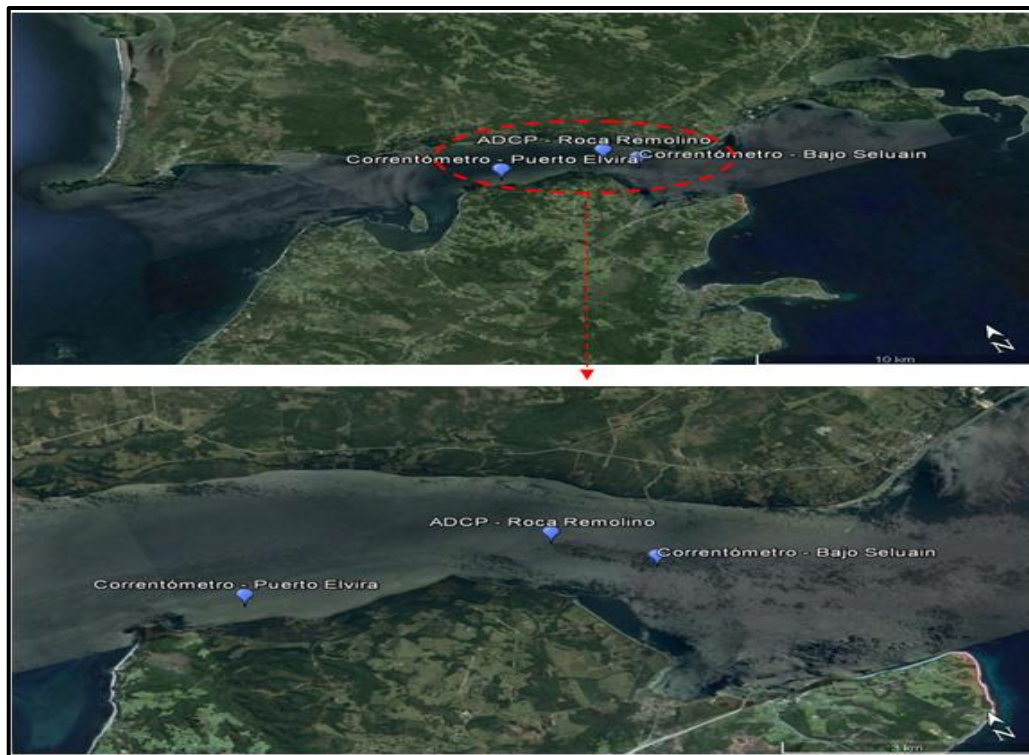


Figura 5-4: Correntómetros en Canal Chacao.

Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth.

Las mediciones realizadas con ADCP se realizaron en dos campañas distintas, utilizando dos metodologías diferentes. La primera de forma Euleriana (instrumento anclado) y la segunda mediante el método de Bottom Tracking, para obtener datos instantáneos de corrientes en distintos puntos del canal. Las mediciones de corrientes con el método de Bottom Tracking, fueron efectuadas para verano e invierno en 3 transectos dentro del sector. Estos son entre las zonas de; Puerto Elvira-Teresita, Eje 1 y Punta Tres Cruces-Punta Coronel. En todos ellos se realizaron mediciones bajo la condición de marea llenante y vaciante, para sicigia y cuadratura.

5.2.2 Pre proceso de los datos de entrada del modelo hidrodinámico

A continuación se describirá el proceso realizado en la información disponible, de manera previa a la configuración de las condiciones iniciales del modelo hidrodinámico en cada uno de sus módulos.

a) Geografía

Luego de reunir la información disponible de cartas náuticas e información satelital proveniente del software Google Earth. Se procedió a generar la condición de borde cerrado, también conocida como línea de costa. Una vez ingresada en el modelo Delft3D Flow ésta debió ser suavizada, ya que al usar elementos regulares en la malla numérica, presenta mayor dificultad para representar zonas geométricamente complejas. La Figura 5-5 muestra la línea de costa suavizada e ingresada en el modelo, la cual proviene de la carta náutica SHOA N°7210.

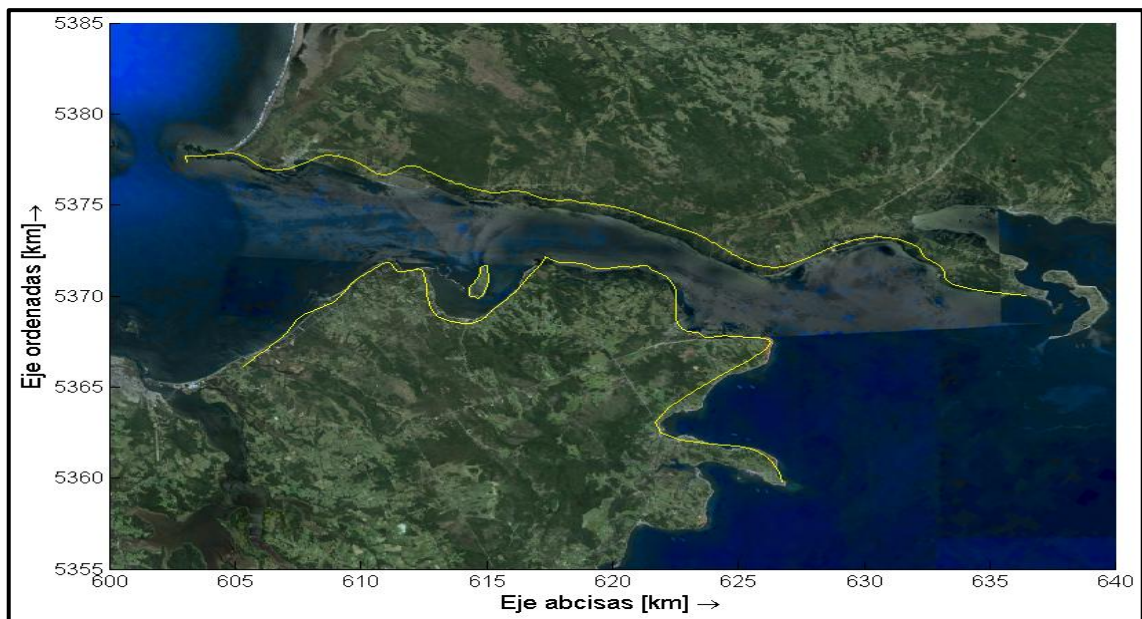


Figura 5-5: Línea de costa obtenida desde carta náutica SHOA N°7210.

Fuente: Elaboración propia.

b) Batimetría

Se procedió a configurar la batimetría utilizando la herramienta RGFRID incorporada dentro del modelo Delft3D Flow. Posteriormente, se recurre a la herramienta QUICKIN para interpolar de acuerdo a la resolución que se quiere obtener en cada sector del dominio. La Figura 5-6 muestra los puntos de batimetría dentro de Canal Chacao luego de ser interpolados. La resolución del espaciamiento entre los puntos, se distribuye de forma más “gruesa” al aproximarse a los límites abiertos, y aumenta la densidad de puntos obtenidos en el centro del canal. Las mayores distancias entre puntos alcanzan los 1600 [m] al Sur-Este del canal, mientras que, las distancias menores cuentan con aproximadamente 10 [m] entre puntos en sectores puntuales dentro de Roca Remolinos.

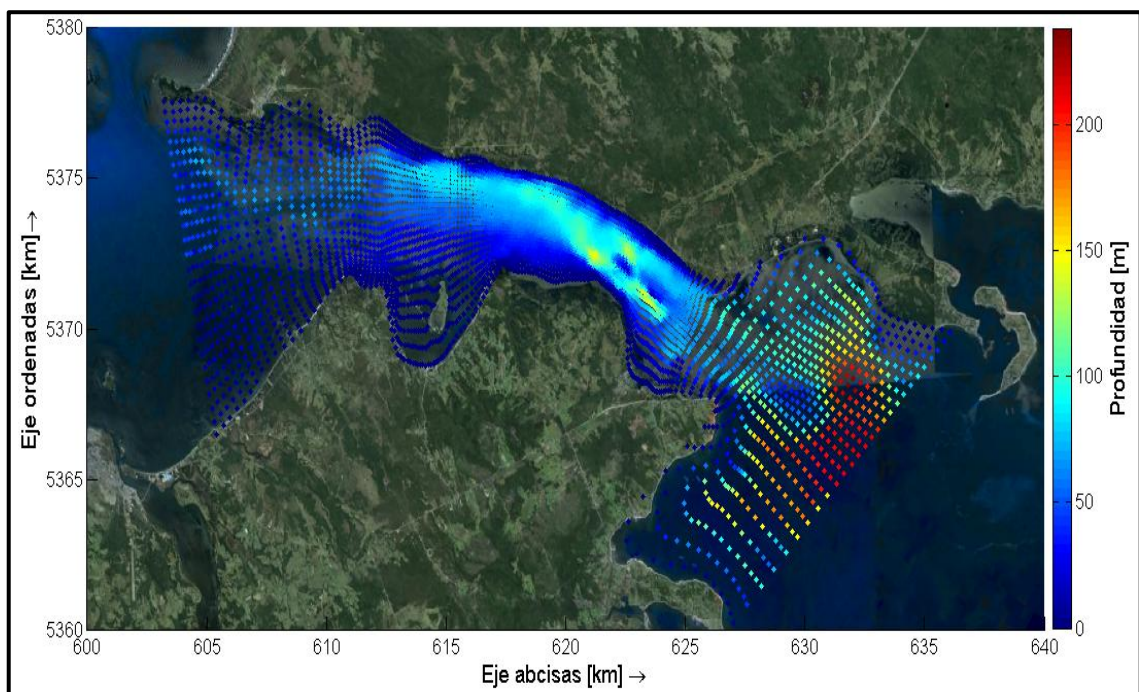


Figura 5-6: Puntos de batimetría interpolados para la malla numérica.

Fuente: Elaboración propia.

c) Marea

Debido a que, la marea es el principal agente forzante de las corrientes en Canal Chacao, verificar el desfase de la marea (previsto desde otros estudios) resulta fundamental. Para determinar las condiciones de borde, se analizó la marea medida en las estaciones ubicadas al Este y Oeste del canal. Este análisis consistió en representar gráficamente el desfase entre las estaciones de Carelmapu - Pihuio al Oeste y Tique-Manao al Este (Figura 5-3). Para realizar esto, fue necesario desarrollar un análisis armónico, que permitiera predecir la serie de marea en las estaciones de Pihuio y Manao, ya que en la ventana de tiempo a modelar estas estaciones no contaban con registros (Contreras et al, 2008). Como se

observa en la Figura 5-7, la estación de Pihuio presenta un desfase de alrededor de 50 [min] respecto a la estación Carelmapu. En la Figura 5-8 se contempla, que el desfase mareal entre la estación Tique y Manao es mucho menor.

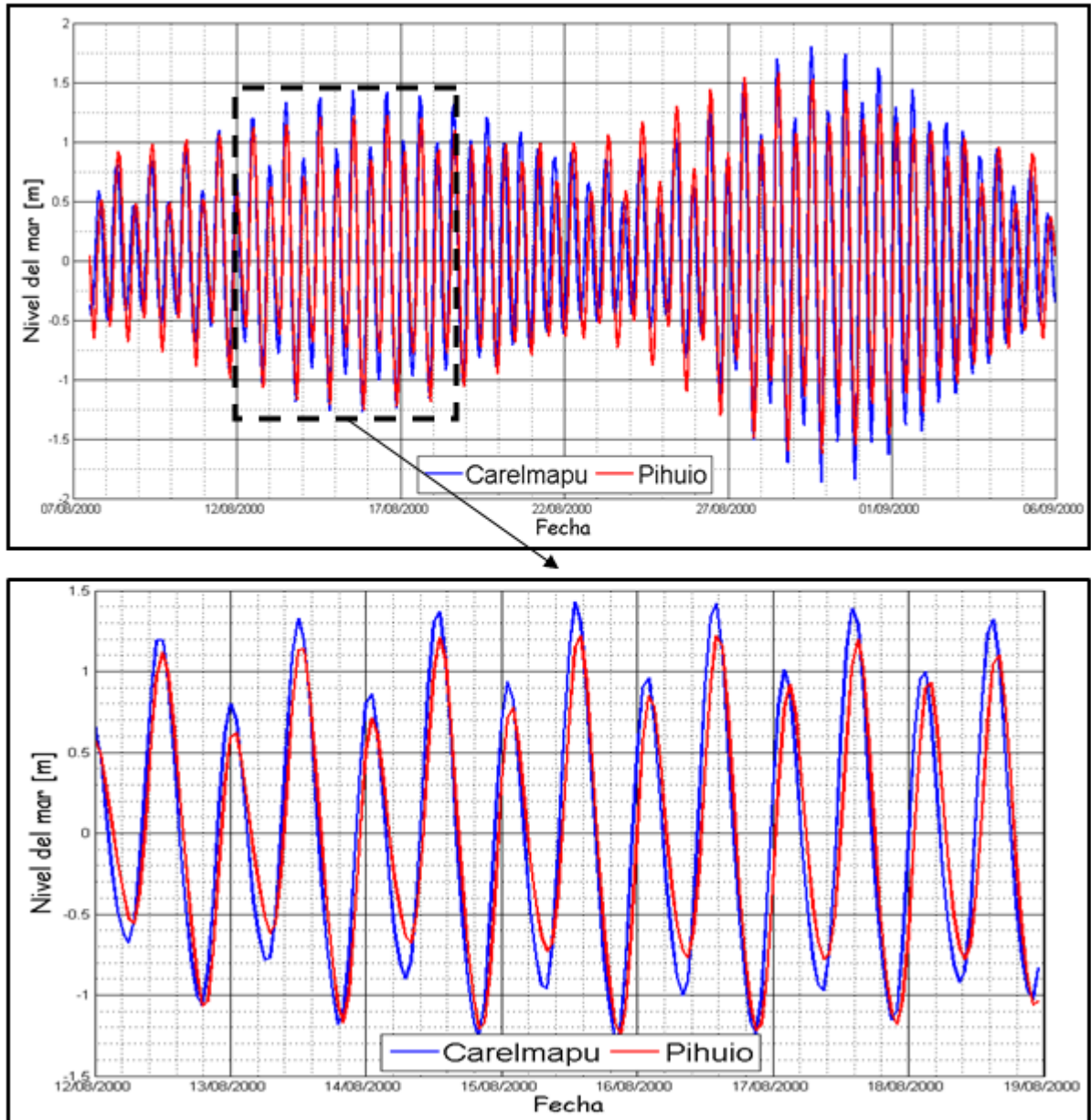


Figura 5-7: Análisis gráfico condición de borde Oeste.

Fuente: Elaboración propia.

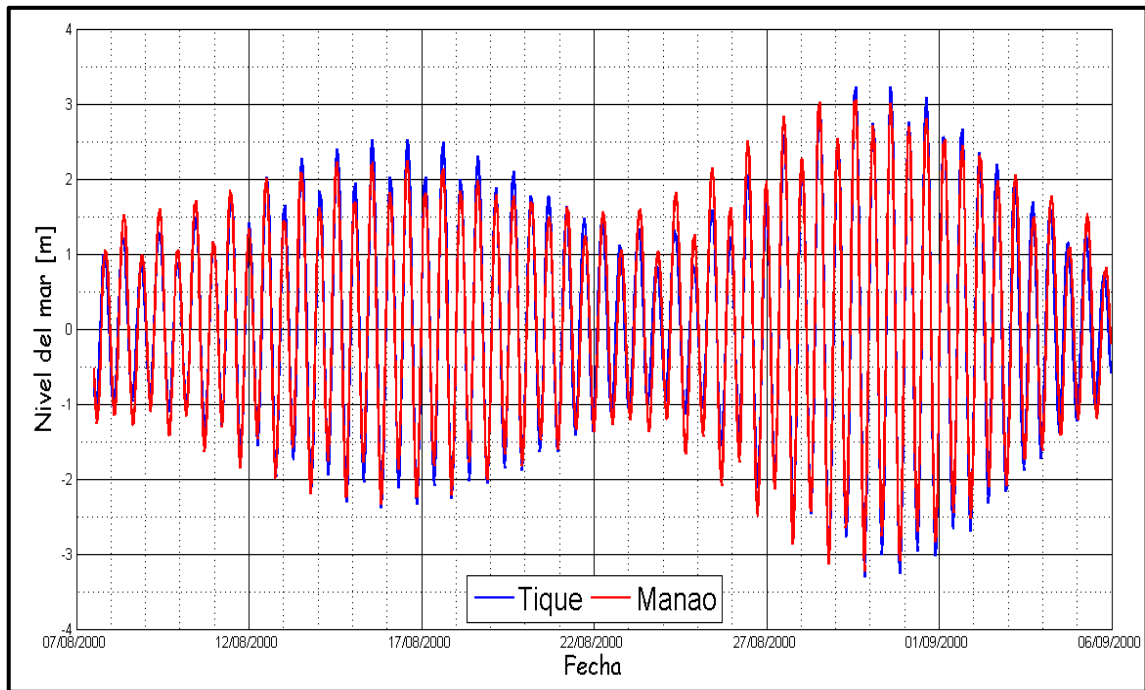


Figura 5-8: Análisis gráfico condición de borde Este.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó un análisis armónico mediante el método de mínimos cuadrados T-Tide (Pawlovicz, 2002) para las estaciones de Carelmapu, Eje 1 y Tique obteniendo los resultados observados en la Tabla 4.

Ésta presenta las constituyentes armónicas resultantes para los registros mareográficos de las tres estaciones mencionadas. Cabe destacar que las constituyentes armónicas alcanzadas en cada una de las estaciones, pueden excluir efectos someros generados cuando la onda de marea siente el fondo. Estos efectos se observan dentro de todo el área de modelación, exhibiendo una alta variabilidad en la amplitud de las constituyentes dentro del dominio. Las constituyentes armónicas determinadas mediante el código T-Tide, presentaron un valor porcentual²⁴ de 98,2% para Carelmapu, 98,9% para Tique y 99,1% para Eje 1.

²⁴ $Valor\ porcentual = \frac{Porcentaje\ de\ Predicción}{Porcentaje\ de\ Medición}$

Tabla 4: Constituyentes armónicas en mareógrafos Canal Chacao.

	Estación de medición		Carelmapu		Tique		Eje 1	
	Armónicos	Frecuencia	Amplitud [m]	Desfase [°]	Amplitud [m]	Desfase [°]	Amplitud [m]	Desfase [°]
Constituyentes astronómicas	2Q1	0,03571	0,0065	213,86	0,0072	225,41	0,0064	239,67
	Q1	0,03722	0,0287	292,09	0,0344	303,28	0,0286	296,28
	O1	0,03873	0,1365	322,88	0,1598	330,89	0,1456	326,02
	K1	0,04178	0,1836	22,9	0,2150	29,18	0,2118	25,01
	J1	0,04329	0,0056	76,08	0,0055	47,33	0,0046	74,61
	N2	0,07900	0,2126	356,02	0,4080	8,62	0,3413	4,08
	M2	0,08051	0,8988	28,22	1,7181	41,30	1,4776	35,75
	S2	0,08333	0,4051	61,45	0,8280	74,99	0,6639	66,94
Constituyentes someras y de largo periodo	OO1	0,04483	0,0052	174,1	0,0050	134,52	0,008	159,67
	UPS1	0,04634	0,0029	26,7	0,0046	16,23	0,0026	33,42
	ETA2	0,08507	0,0178	66,86	0,0374	87,35	0,0259	82,35
	NO1	0,04027	0,0096	233,18	0,0130	253,15	0,0062	207,36
	MO3	0,11924	0,0069	281,29	0,0078	302,83	0,0151	290,5
	M3	0,12077	0,0007	68,82	0,0045	63,68	0,0024	57,62
	MK3	0,12229	0,0102	347,49	0,0049	4,80	0,0185	351,65
	SK3	0,12511	0,003	310,43	0,0065	262,23	0,0047	272,65
	MN4	0,15951	0,0344	339,66	0,0027	339,43	0,0585	330,14
	M4	0,16102	0,0818	8,19	0,0050	50,13	0,1435	358,71
	MS4	0,16384	0,072	31,98	0,0055	112,66	0,1223	21,48
	S4	0,16667	0,0109	47,36	0,0056	99,80	0,0169	44,11
	2MK5	0,20280	0,002	271,47	0,0018	47,27	0,0012	15,07
	2SK5	0,20845	0,0006	218,39	0,0004	35,31	0,0016	138,89
	2MN6	0,24002	0,0048	189,68	0,0038	43,19	0,0051	113
	M6	0,24153	0,0064	202,52	0,0077	78,58	0,0083	141,03
	2MS6	0,24436	0,0101	233,31	0,0111	106,17	0,0108	169,99
	2SM6	0,24718	0,0038	242,84	0,0062	117,89	0,0056	183,17
	3MK7	0,28331	0,0008	74,06	0,0016	20,27	0,0025	44,69
	M8	0,32205	0,0071	104,25	0,0035	39,54	0,0107	79,53
MSF	0,00282	0,0823	196,13	0,0336	193,39	0,1307	193,33	

Fuente: Elaboración propia.

d) Corrientes

Las corrientes dentro de Canal Chacao, se ven dominadas por la marea. Para esta influencia, se realizó un análisis de correlación cruzada en el sector de Roca Remolinos entre las componentes vectoriales de la corriente u y v, respecto de la marea medida en el sector denominado Eje 1, considerando un desfase de ∓ 20 horas. La Figura 5-9 y Figura 5-10 muestran los resultados obtenidos de la correlación cruzada, evidenciándose el efecto forzante de la marea sobre las corrientes con valores altos de correlación, sobre 0,9.

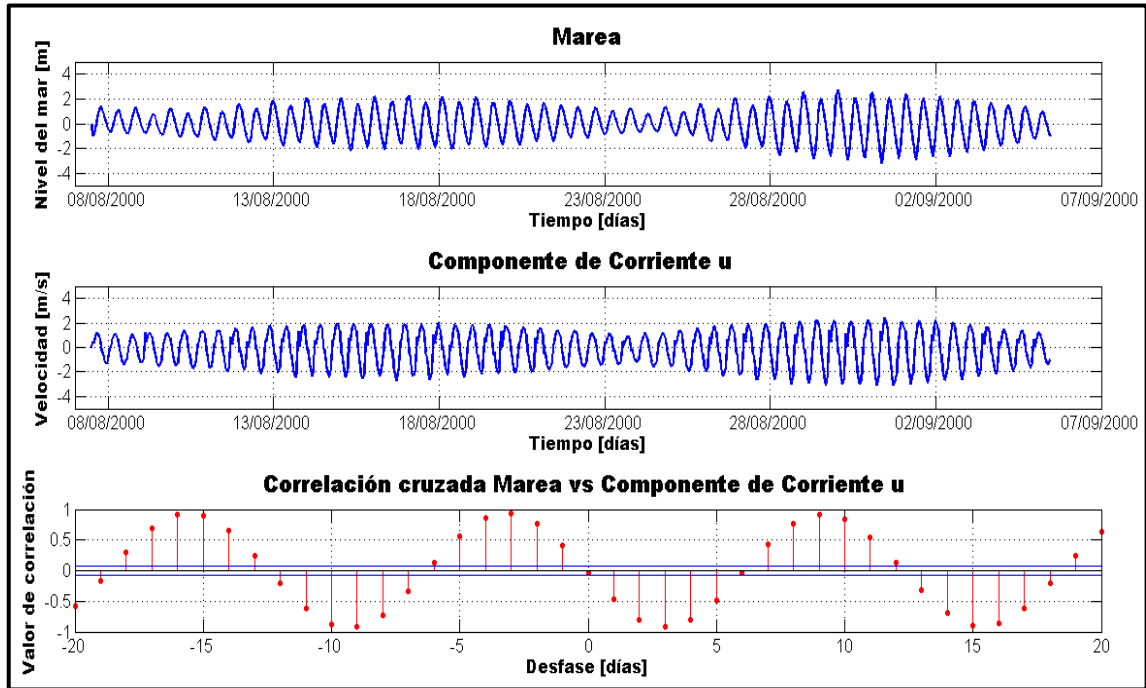


Figura 5-9: Correlación cruzada de marea vs componente u.

Fuente: Elaboración propia.

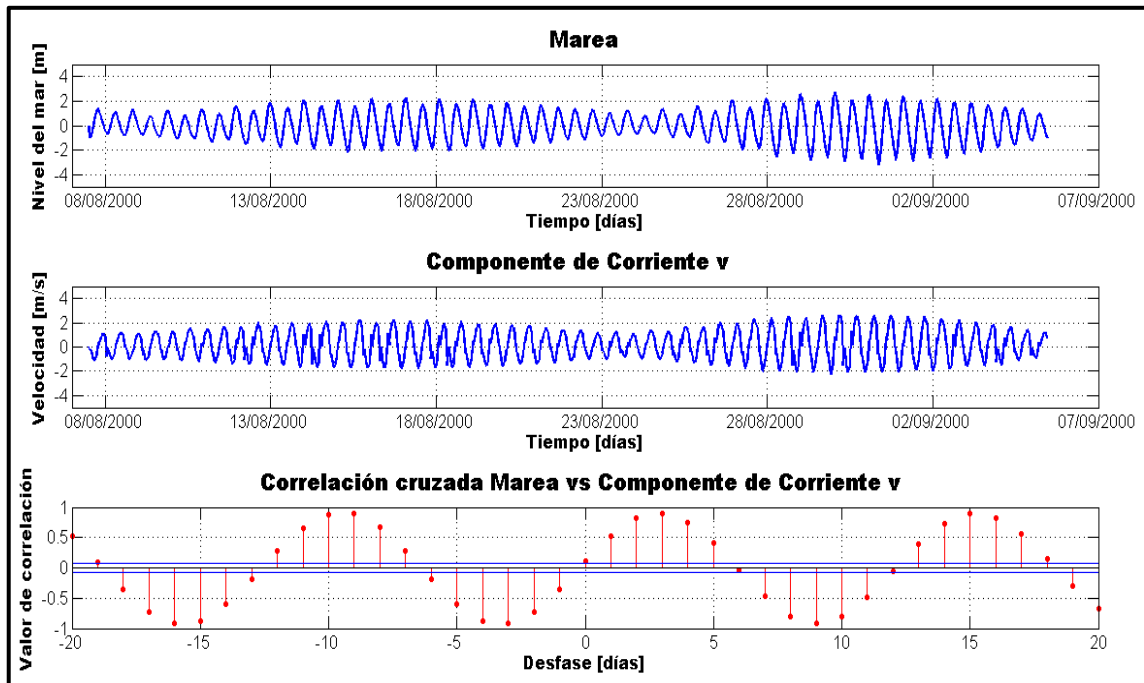


Figura 5-10: Correlación cruzada de marea vs componente v.

Fuente: Elaboración propia.

5.3 Modelación 2D

La modelación en 2D se llevó a cabo, utilizando el programa Delft3D Flow mediante la interfaz gráfica proporcionada por Deltares (TU Delft Technology University, 2014).

Deltares desarrolló un software totalmente integrado para un enfoque multidisciplinario, que permite realizar cálculos 3D para costas, ríos y estuarios. Dentro de las múltiples áreas de desarrollo, el modelo permite llevar a cabo simulaciones de flujos, transporte de sedimentos, olas, estudios de calidad de aguas, desarrollos morfológicos y ecología. Delft3D se compone de varios módulos, capaces de interactuar unos con otros, agrupados alrededor de una única interfaz gráfica de usuario.

Delft3D-FLOW permite calcular fenómenos de flujo y transporte no estacionario, que resultan de mareas y forzantes meteorológicas, las cuales pueden ser definidas por un límite rectilíneo o curvilíneo. Dentro de las principales características consideradas por el modelo se encuentran; los efectos de rotación terrestre forzantes de marea, gradientes de presión, resolución de las ecuaciones de advección-difusión para calcular gradientes verticales densimétricos complejos, modelos de turbulencia, simulación robusta en planos con puntos secos, entre otros. Una ventaja incorporada por el modelo Delft3D es la resolución de las ecuaciones para aguas someras (Shallow water equations) mediante el método implícito ADI

(Alternating Direction Implicit), lo que permite definir pasos temporales (time step) no tan pequeños.

Dentro de las principales desventajas del modelo Delft3D Flow se encuentra que, utiliza mallas estructuradas, lo cual presenta menor eficiencia para representar sectores con geometrías complejas. Los pasos utilizados para la implementación del modelo 2D serán descritos a continuación.

5.3.1 Pre proceso

- Región de modelación

La región de modelación fue definida, considerando dos condiciones de limites abiertos en forma lineal, y una condición de limite cerrado para la costa como se observa en la Figura 5-11. Se utilizó una condición de borde lineal, para disminuir la inestabilidad numérica, que se generaba al utilizar una condición de borde semicircular.

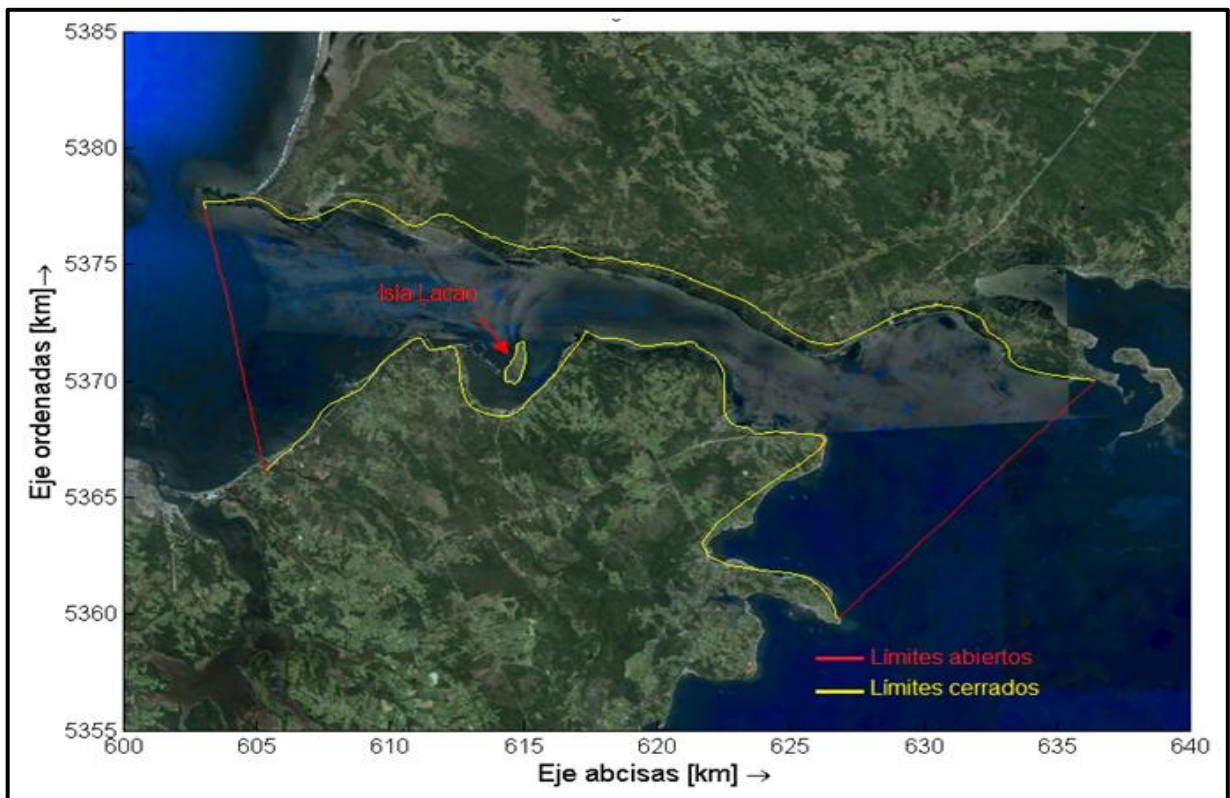


Figura 5-11: Región de modelación.

Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth.

- Límites abiertos y cerrados

El dominio de la modelación viene definido por cuatro límites, dos límites cerrados (amarillos en Figura 5-11) y dos límites abiertos (color rojo en Figura 5-11).

- Límites cerrados

Los límites cerrados fueron definidos en base a la Carta Náutica Electrónica CL4LL010 de Canal Chacao (SHOA, 2009), complementada por información satelital obtenida de Google Earth.

Se definió los límites cerrados con una velocidad ortogonal nula, representando así la interacción “agua-tierra”.

Los límites cerrados fueron definidos al norte por la línea de costa colindante al continente, y al sur por la línea de costa contigua a la Isla de Chiloé. Además, se configuró el modelo para que, Isla de Lacao (Figura 5-11) no sea inundada en condiciones normales.

- Límites abiertos

Los límites abiertos tienen por objeto restringir el dominio del modelo, sin necesidad de considerar grandes extensiones en mar abierto o mar interior para representar el comportamiento hidrodinámico. Los límites abiertos fueron definidos en sectores aledaños a la interacción del Canal Chacao, las condiciones de borde correspondientes a las regiones abiertas fueron definidas mediante líneas rectas, utilizando parámetros armónicos como forzantes iniciales.

Con el fin de representar correctamente la señal registrada en ambos límites, se procedió a realizar una serie de modelaciones de prueba, utilizando la estación de Eje 1 como punto de calibración, y las estaciones de Carelmapu y Tique como condiciones de borde al Oeste, y al Este del canal. Este proceso se realizó de manera reiterada hasta que, se logró representar algunos días de marea en Sicigia y Cuadratura. Mediante valores de correlación R^2 (Coeficiente de determinación) mayor a un 98% en Eje 1, y sobre un 95% para las otras dos estaciones. Además, se aplicó un filtro sobre las mediciones utilizadas como condiciones de borde, seleccionando las constituyentes armónicas con una influencia mayor al 1% respecto a la componente lunar principal (M_2). Una vez hecho esto, se simuló el mes completo, haciendo nuevos ajustes a las componentes armónicas, disminuyendo el error mediante análisis armónicos al residuo mareal. Además, la señal del límite abierto Oeste se comparó respecto a la señal observada por el modelo global de mareas Topex 7.2., permitiendo realizar pequeños ajustes en el borde Oeste dentro del proceso iterativo. Por otra parte, se modificó la estación de Tique de forma simultánea hasta representar satisfactoriamente el comportamiento hidrodinámico proveniente de ambos bordes en toda la zona de estudio.

En primera instancia, luego de 37 iteraciones²⁵ de aproximadamente 15 minutos computacionales, se logra representar correctamente la marea en ventanas de tiempo menores. Finalmente, utilizando las condiciones de borde obtenidas se simuló el mes completo, realizando leves modificaciones de las componentes armónicas en el proceso. Luego de 40 iteraciones se logra converger en las condiciones de borde definitivas al Oeste y Este del Canal Chacao. La Tabla 5 muestra las condiciones de borde que serán utilizadas para la simulación en dos dimensiones.

Tabla 5: Condiciones de borde 2D.

Condición de borde	Oeste		Este	
	Amplitud [m]	Desfase [°]	Amplitud [m]	Desfase [°]
MSF	0,0838	203,81	0,0359	200,2
2Q1	0,0073	327,14	0,0084	345,4
Q1	0,0284	41,63	0,0335	53,65
O1	0,1356	74,32	0,1585	82,17
NO1	0,0101	352,07	0,0136	11,82
K1	0,1840	143,20	0,2155	149,4
J1	0,0061	201,69	0,0064	177,7
OO1	0,0042	295,29	0,0051	234,4
UPSILON1	0,0027	190,36	0,0033	193,2
N2	0,2136	223,42	0,4105	235,9
M2	0,8994	260,16	1,72	273,3
S2	0,4040	301,38	0,8251	314,9
ETA2	0,0165	309,37	0,0346	329,7
MO3	0,0072	258,35	0,0086	275
M3	0,0009	6,38	0,0049	38,56
MK3	0,0102	343,13	0,0052	6,34
SK3	0,0034	302,07	0,0074	262,6
MN4	0,0347	79,51	0,0036	91,95
M4	0,0815	112,14	0,0052	169,1
MS4	0,0721	143,55	0,0043	218,3
S4	0,0110	169,15	0,0068	224,2
2MN6	0,0047	164,45	0,0036	6,68
M6	0,0061	176,71	0,0082	50,67
2MS6	0,0105	216,68	0,011	93,86

²⁵ Las simulaciones se llevaron a cabo en un notebook con procesador Intel Core i5-2450M, que cuenta con 4 Gb de memoria RAM, y un disco duro de 500 Gb con 5400 RPM.

2SM6	0,0035	237,57	0,0061	102,5
M8	0,0071	311,19	0,0036	244,9

Fuente: Elaboración propia.

- Generación de malla

En el presente estudio se generó una malla rígida de elementos, utilizando un *time step* relativamente pequeño para resolver el modelo hidrodinámico.

Se optó por implementar una grilla en coordenadas cartesianas mediante la cual se logró alcanzar una estabilidad numérica.

Con elementos pequeños cerca de los sectores de interés con lados de 50 [m] en promedio, siendo los más pequeños de hasta 14 [m] para celdas puntuales. Se obtuvieron valores máximos de 5,6 para el N° de Courant, lo cual cumple con la exigencia de ser menor a 10 (Deltares, 2014). Para esto, se utilizó un time step de 3 [seg]. La malla utilizada en la modelación se observa en la Figura 5-12.

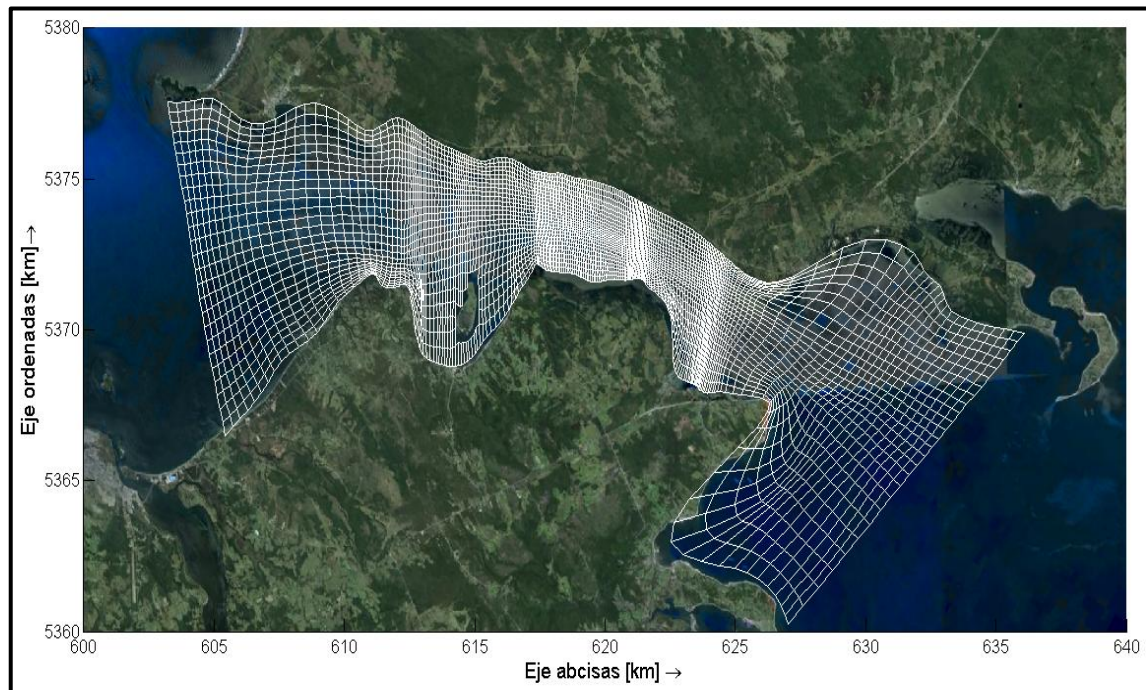


Figura 5-12: Malla para modelación.

Fuente: Elaboración propia.

La malla cuenta con 10038 nodos, el lado de los elementos varía desde 9,15 [m] hasta 1604,15 [m] del mayor elemento ubicado al Sur-Este de Canal Chacao, cabe destacar, que

se logró representar la onda de marea y la corriente de forma adecuada gracias a la estabilidad ofrecida por el modelo Delft3D (Lesser, 2009).

La Figura 5-13 representa la batimetría incorporada a la malla, empleada para la simulación.

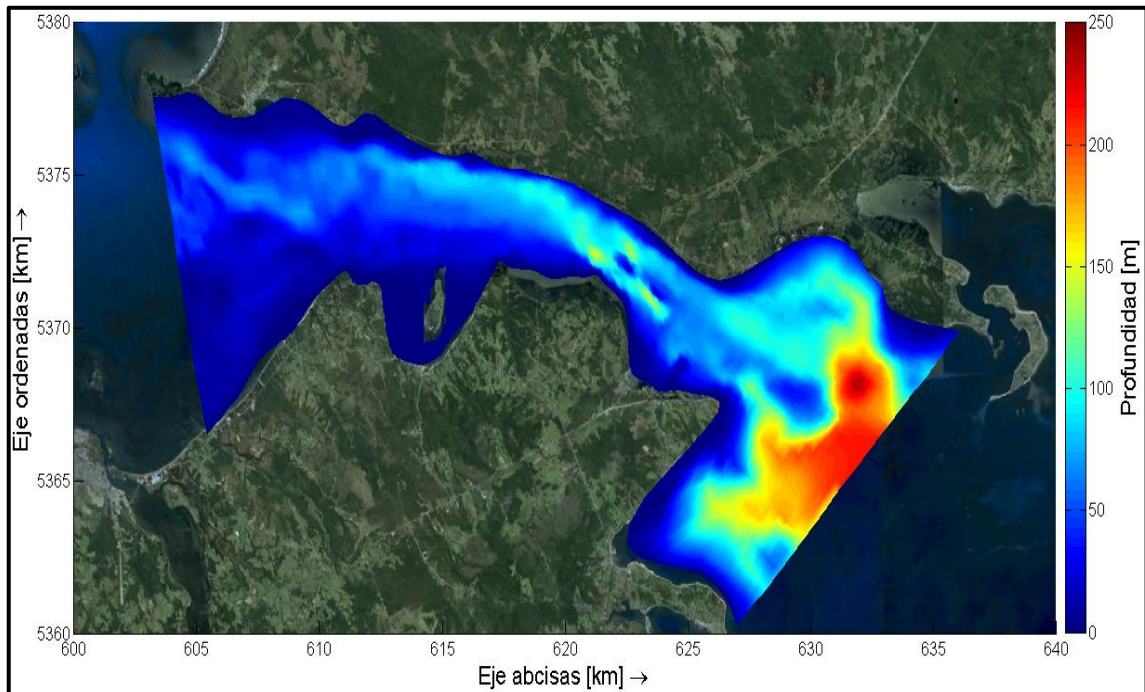


Figura 5-13: Batimetría en la región de modelación.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Proceso

En esta etapa serán descritos los procesos, que fueron necesarios para llevar a cabo el modelo, considerando desde los valores iniciales para configurarlo hasta su calibración.

➤ time step

El valor de *time step* utilizado fue de 0,05 [min], ya que con este valor el número de Courant alcanzó un máximo de 5,6 cerca del centro, y cercano a cero en las proximidades de los límites abiertos del dominio. Estos valores no sobrepasan el criterio ($4\sqrt{2}$) para modelos resueltos mediante un método implícito (Deltares, 2014).

➤ Parámetros de modelación

A continuación se describirán los principales parámetros considerados en la configuración del módulo 2D.

✓ Tipo de modelación

Esta sección presenta el módulo en dos dimensiones usando coordenadas cartesianas (UTM 18-G).

✓ Inicio de modelación

Para llevar a cabo la simulación se asignó un desnivel inicial igual a cero en todo el dominio de la modelación. Luego, se forzó gradualmente el modelo desde los límites abiertos, imponiendo un valor uniforme del nivel del mar para todos los nodos mediante una condición de borde lineal.

✓ Periodo de modelación

La ventana de tiempo a modelar fue definida en base al análisis de los intervalos de tiempo registrados por los instrumentos disponibles en el lugar. El mes sinódico modelado fue seleccionado dentro de un intervalo donde existía una medición continua y simultánea, tanto de corrientes como de mareas, cumpliendo con lo dispuesto por el reglamento SHOA 3201. La Figura 5-14 presenta los registros de corrientes y mareas, obtenidos en cada estación para la campaña de invierno del estudio Puente en el Canal Chacao en el año 2000. Como se observa en color celeste, de acuerdo a los criterios ya expuestos, la ventana de tiempo seleccionada para modelar quedó comprendida entre el 07/08/2000 a las 00 Hrs hasta el 05/09/2000 a las 23 Hrs.

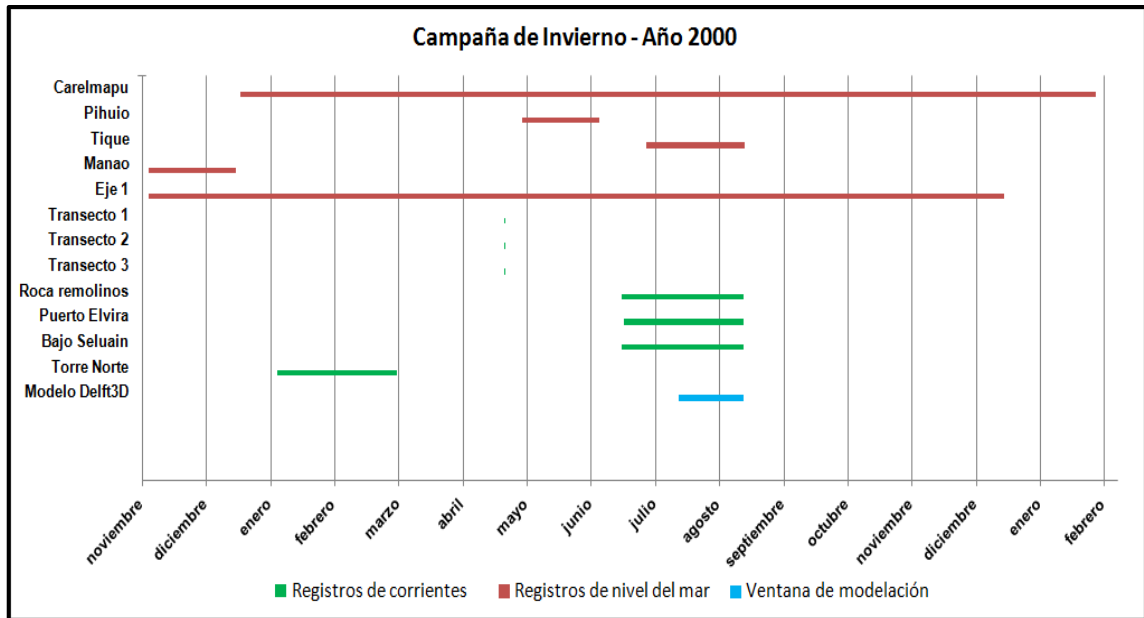


Figura 5-14: Ventana de modelación.

Fuente: Elaboración propia.

✓ Parámetros numéricos

Los parámetros numéricos especificados dentro del modelo Delft3D, son aquellos que se relacionan con inundación, secado y otras opciones avanzadas.

En el presente estudio, se configuró el modelo para chequear el proceso seco y mojado al centro (puntos de nivel del mar), y en las caras de la cuadrícula (puntos de velocidad).

Se definió el umbral de profundidad en el cual las celdas de la grilla estaban "mojadas". El umbral se determinó en relación al cambio de la profundidad del agua por cada *time step*, con el fin de prevenir profundidades negativas ya que esto conllevaría a un mayor tiempo de cálculo en el modelo²⁶. El valor asignado de umbral para la modelación fue 0.03 [m].

Se definió la profundidad marginal empleada para determinar los niveles del agua en las caras de las celdas. Inicialmente se definen por la profundidad del fondo marino en el punto, más el nivel de agua. Si esta profundidad es menor que la profundidad marginal se cuenta con tres alternativas, considerando la velocidad de la componente u de corriente:

- ✓ Mayor que cero, la profundidad del agua es igual a la profundidad del fondo marino más el nivel del agua en la celda.
- ✓ Menor que cero, la profundidad del agua es igual a la profundidad del fondo marino más el nivel de agua en la celda siguiente.
- ✓ Igual a cero, la profundidad del agua es igual a la profundidad del fondo marino más el máximo nivel de agua entre la celda activa y la posterior.

Para el presente estudio se utilizó la profundidad marginal por defecto -999,99 [m].

Se definió un “tiempo de suavizado”, el cual se utilizó en el inicio de la simulación para generar una transición suave entre las condiciones iniciales, y las condiciones de borde. Para el presente estudio se utilizó un tiempo de suavizado de 0.05 [*min*].

Por último, se definió el esquema de advección para momentum. El modelo Delft3D Flow presenta cuatro esquemas de advección para momentum: Esquema WAQUA, método cíclico, esquema de inundación y esquema multidireccional contra el viento (sólo para modelos 3D del tipo Z). Para el presente estudio, se asignó el esquema cíclico para la resolución del modelo, pues, se basa en la disipación del error en el esquema de fase,

²⁶ Para detalles técnicos, se recomienda revisar el manual Delft3D hidrodinámico, página 92.

trabajando con un método de resolución implícito propuesto por Delft3D Flow, el método ADI. (Stelling & Leendertse, 1992).

✓ Parámetros físicos

Los parámetros físicos se dividen en diferentes clases, donde los más necesarios siempre están disponibles para asignarles un valor, mientras que, los otros se activan a medida que el modelo es configurado para ciertos escenarios. Los parámetros constantes utilizados para el estudio, son:

- La gravedad con un valor de $9,8 [m/s^2]$.
- La densidad del agua con $1025 [Kg/m^3]$.
- Latitud con un valor de $-41,8 [^\circ \text{decimales}]$

Dentro de los parámetros que pueden ser variables se encuentra la rugosidad. Como se mencionó en el acápite 4.3.2, existen distintos parámetros que permiten aproximar el valor de rugosidad de fondo, de los cuales se optó por utilizar el número de Manning. Se asignó un valor de Manning uniforme de 0.03 en dirección U y V. La ecuación 5.3.1 representa la formulación de Manning, que permite determinar el coeficiente de fricción de Chezy, el cual es un valor incorporado en la resolución de las ecuaciones de momentum (ecuación (2.3.12)).

$$C_{2D} = \frac{H^{1/6}}{n} \quad (5.3.1)$$

Donde H : Profundidad del agua.
 n : Coeficiente de rugosidad asignado por el usuario.
 C_{2D} : Coeficiente de Chezy en 2D.

Por otro lado, se incorporó la fricción de las paredes laterales calculada a partir de una formulación de “ley de pared”. Las tres condiciones de deslizamiento disponibles son: deslizamiento libre, parcial y nulo. Para el estudio se utilizó la condición libre, lo que representa una velocidad de corte máximo y velocidad cero.

Finalmente se incorporó la viscosidad horizontal mediante un valor uniforme de $1,5 [m^2/s]$ para todo el dominio.

✓ Calibración

La calibración, se efectuó a partir de ajustes realizados en los parámetros de rugosidad de fondo, viscosidad y forzantes armónicos de marea en los límites abiertos . La verificación del modelo con la realidad se hizo comparando los registros del nivel del mar de las estaciones de Carelmapu, Tique y Eje 1, y las mediciones de corrientes efectuadas en Roca Remolinos, Bajo Seluain y Puerto Elvira.

- Nivel del mar

Respecto a la representación del nivel del mar se obtuvo un ajuste adecuado de las estaciones de medición, siendo Carelmapu la que presentó mayores diferencias especialmente al comienzo simulación. Se prestó interés a la estación de Eje 1, ya que ésta se utilizó como punto de calibración. Esto debido a que las condiciones de borde abiertas fueron determinadas, utilizando como referencia las mediciones de Carelmapu y Tique, y complementadas con información del modelo global de marea TOPEX 7.2. La evidencia del ajuste satisfactorio de la señal de marea, se manifiesta en el comparación entre la medición y la estación de marea disponible dentro de Canal Chacao (Eje 1), con un R^2 de 96,19%. La Figura 5-15, Figura 5-16 y Figura 5-17 representan el comportamiento del nivel del mar respecto a los valores simulados, los cuales están referenciados al nivel medio del mar e incorporan el error asociado. Por otra parte, la Figura 5-18, Figura 5-19 y Figura 5-20 muestran la correlación obtenida entre los valores medidos y simulados, para cada punto de medición en base a una regresión lineal.

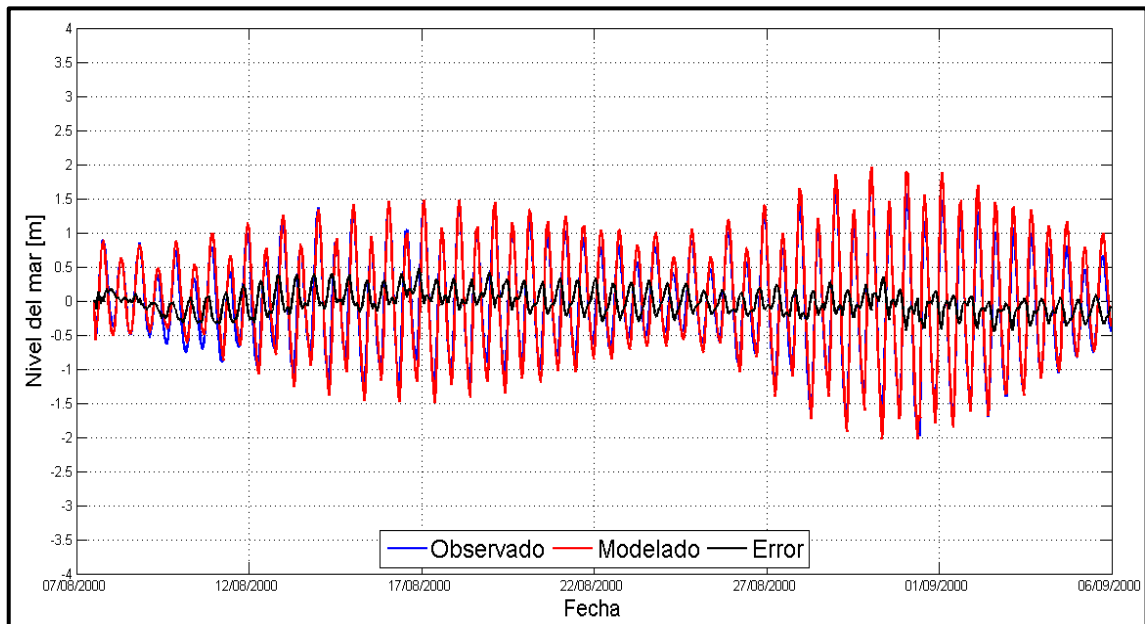


Figura 5-15: Aproximación de nivel del mar - Carelmapu.

Fuente: Elaboración propia.

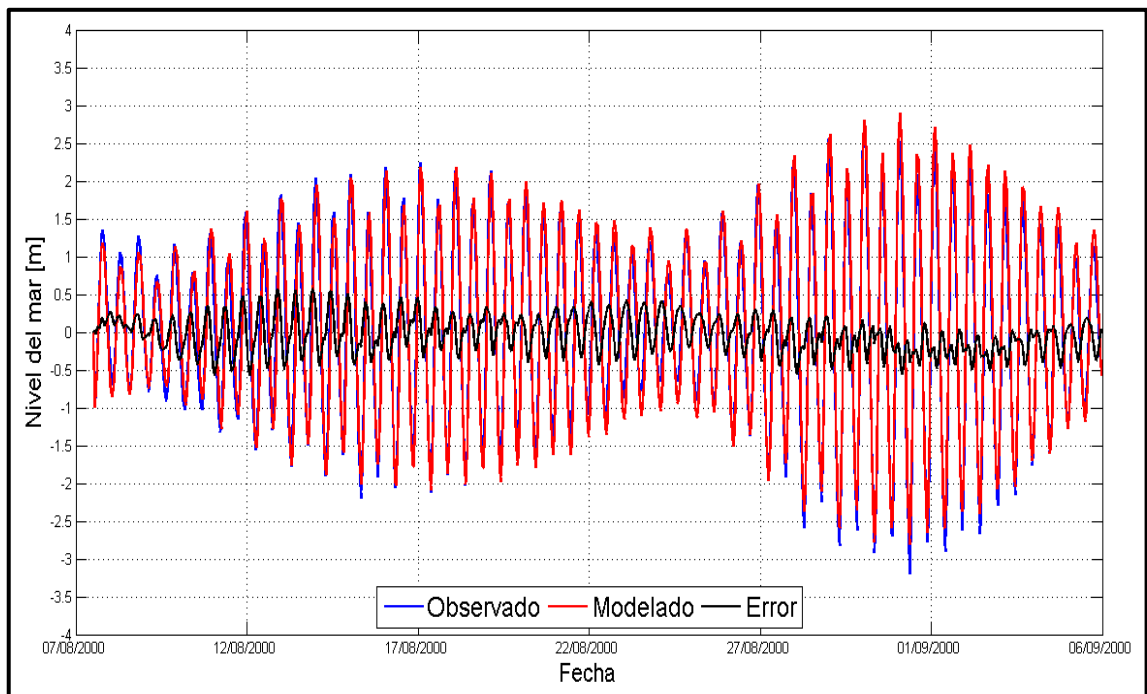


Figura 5-16: Aproximación de nivel del mar - Eje 1.

Fuente: Elaboración propia.

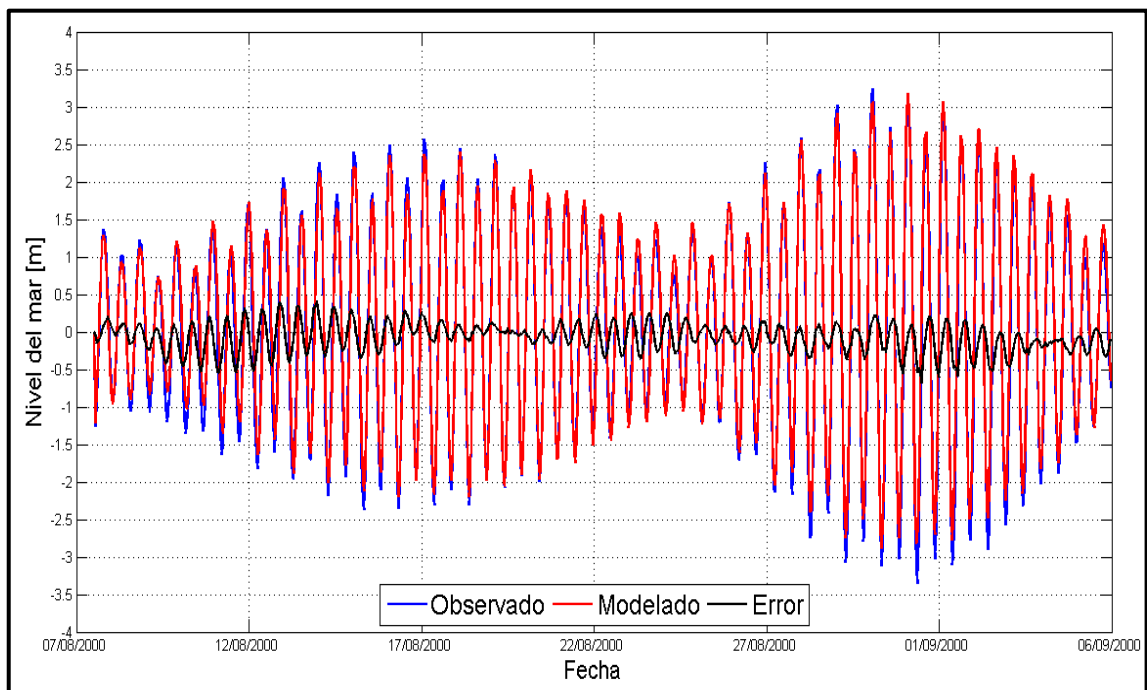


Figura 5-17: Aproximación de nivel del mar - Tique.

Fuente: Elaboración propia.

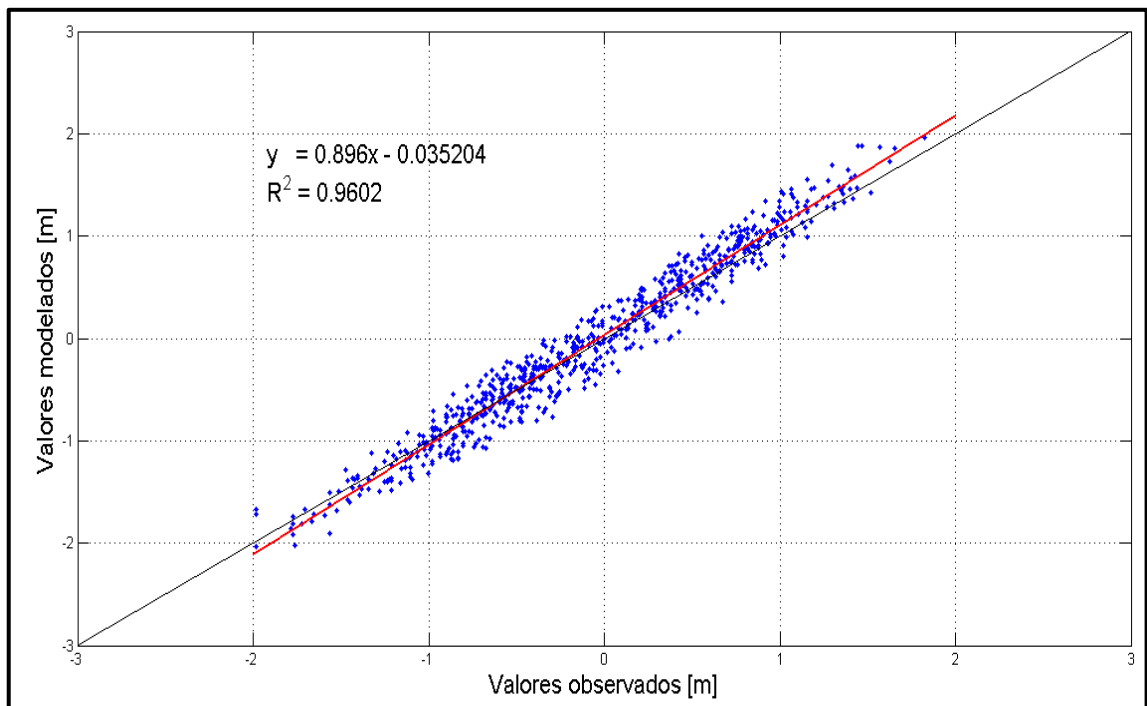


Figura 5-18: Correlación Modelo Delft3D – Carelmapu.

Fuente: Elaboración propia.

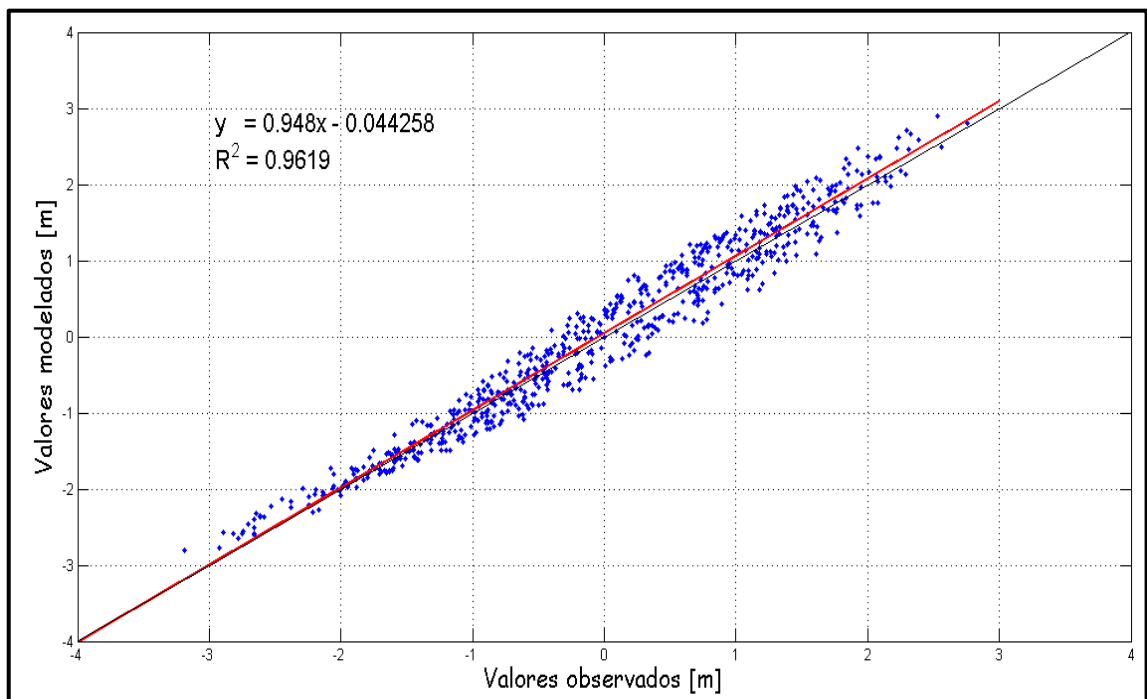


Figura 5-19: Correlación Modelo Delft3D – Eje 1.

Fuente: Elaboración propia.

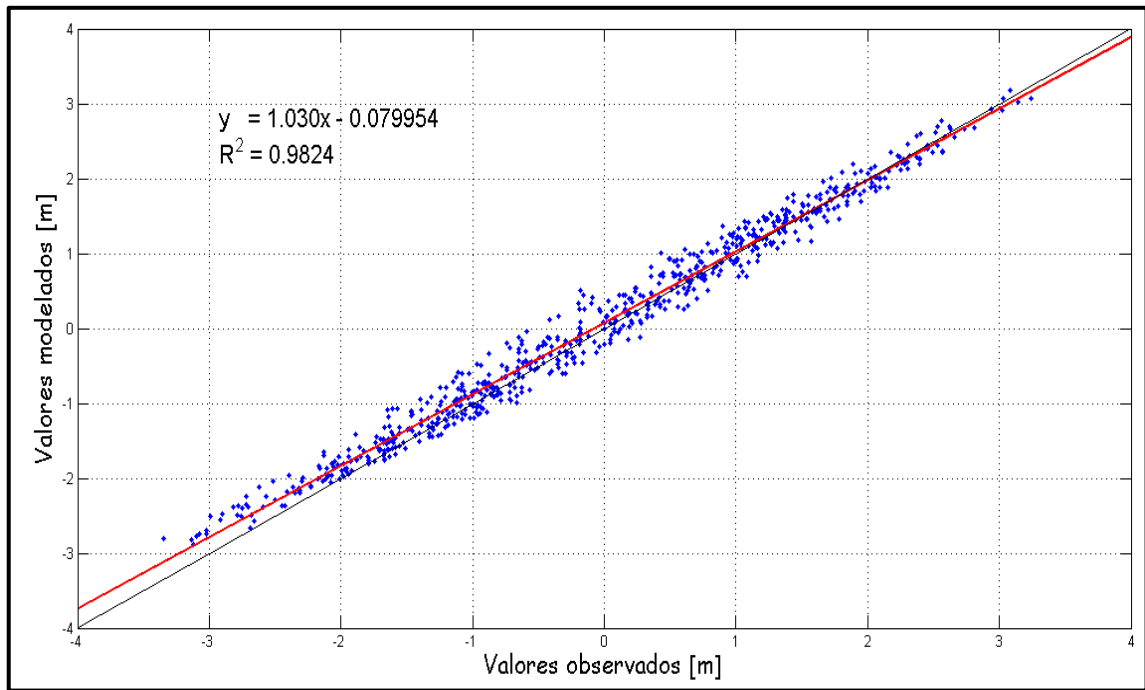


Figura 5-20: Correlación Modelo Delft3D – Tique.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5-15 y Figura 5-16, tanto la estación de Carelmapu como Eje 1 presentaron los mayores residuos respecto a la medición instrumental. No obstante, como se aprecia en la Figura 5-18 y Figura 5-19 existió una buena correlación lineal con algo más de un 96% entre los datos de marea simulada y medida. Por lo tanto, se puede asumir que, en términos generales, el fenómeno fue representado. Por otra parte, como se observa en la Figura 5-20, la estación de Tique alcanzó la mejor correlación lineal a pesar de ubicarse en un sector configurado con un mallado grueso dentro de la simulación. Ello indica que a pesar de contar con elementos grandes en la malla para la zona Noreste del lugar, el modelo representó el comportamiento de la marea en dicho sector.

Adicionalmente se determinó el error medio cuadrático (ECM), para contar así con un segundo parámetro de referencia. Se obtuvo un valor de ECM de 0,0276, 0,0604 y 0,0331 [m] para Carelmapu, Eje 1 y Tique respectivamente. Este valor indica que luego de considerar los errores tanto por defecto como por exceso, el valor de marea de la estación de Carelmapu difirió menos respecto de la medición en promedio dentro del mes (Figura 5-15). Por otra parte, las estaciones de Eje 1 y Tique contaron con mayores ECM en promedio dentro del mes, los cuales fueron registrados mayormente dentro de los primeros 10 días de simulación, tal como se observa en la Figura 5-16 y Figura 5-17.

- Corrientes

La verificación de magnitud de corrientes se realizó modificando los parámetros iniciales (rugosidad de fondo mayoritariamente), hasta alcanzar una buena aproximación entre los datos medidos y los simulados. Esto se verificó, utilizando los antecedentes disponibles en Bajo Seluain, Puerto Elvira y Roca Remolinos. En términos generales, la comparación de las series de magnitud de corrientes fue satisfactoria dentro del mes simulado, como se observa en la Figura 5-21, Figura 5-22 y Figura 5-23. Además, se considera que la representación de la dirección del patrón de corrientes para las tres estaciones de medición fue adecuada, como se aprecia en la Figura 5-24, Figura 5-25 y Figura 5-26. Las correlaciones entre la magnitud de corrientes simuladas versus medidas alcanzaron valores satisfactorios en cada una de las estaciones de medición. Como se visualiza en la Figura 5-27, Figura 5-28 y Figura 5-29, la correlación lineal alcanzada presentó valores de un 75,93% para Puerto Elvira, 81,27% en Bajo Seluain y un 81,85% en Roca Remolinos (respecto a la medición con promedio vertical). Considerando que obtener un valor sobre un 75% del coeficiente de determinaciónⁱ (R^2), presume que el modelo hidrodinámico implementado, representa las magnitudes de corrientes promedio dentro de Canal Chacao (Contreras et al, 2008 & Sepúlveda, 2010).

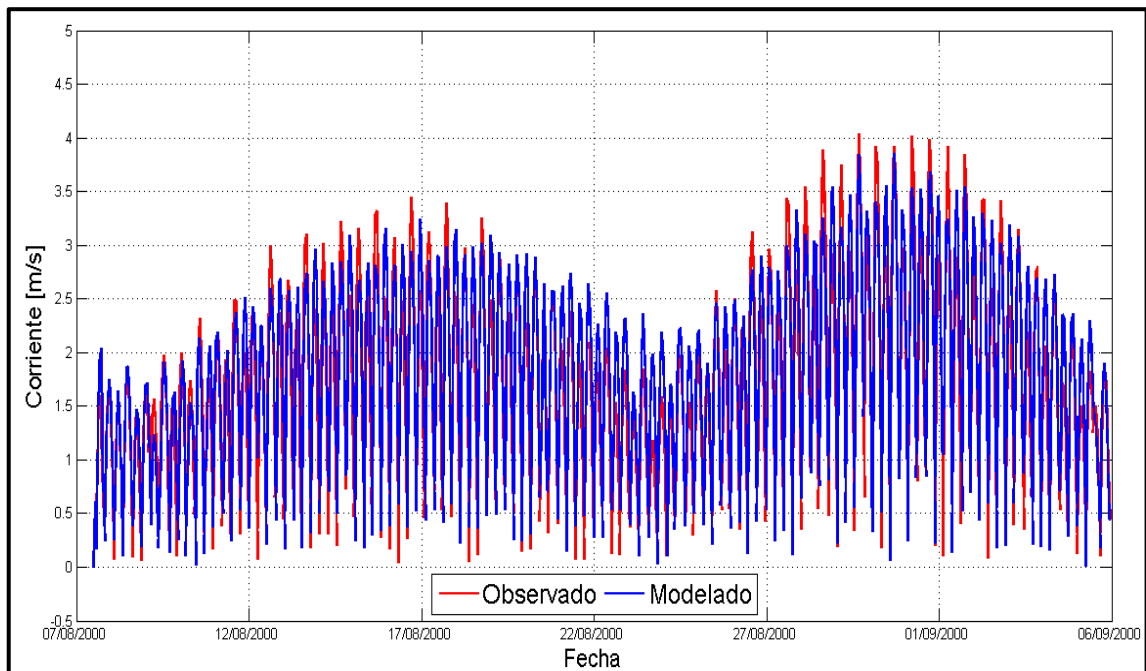


Figura 5-21: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos.

Fuente: Elaboración propia.

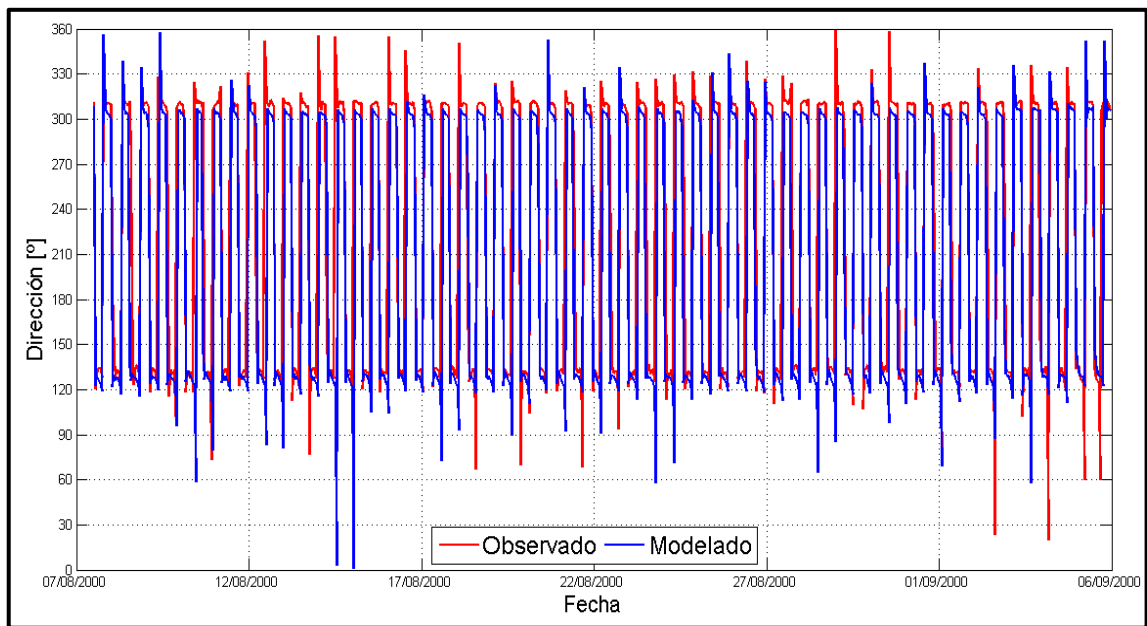


Figura 5-22: Dirección de corrientes – Roca Remolinos.

Fuente: Elaboración propia.

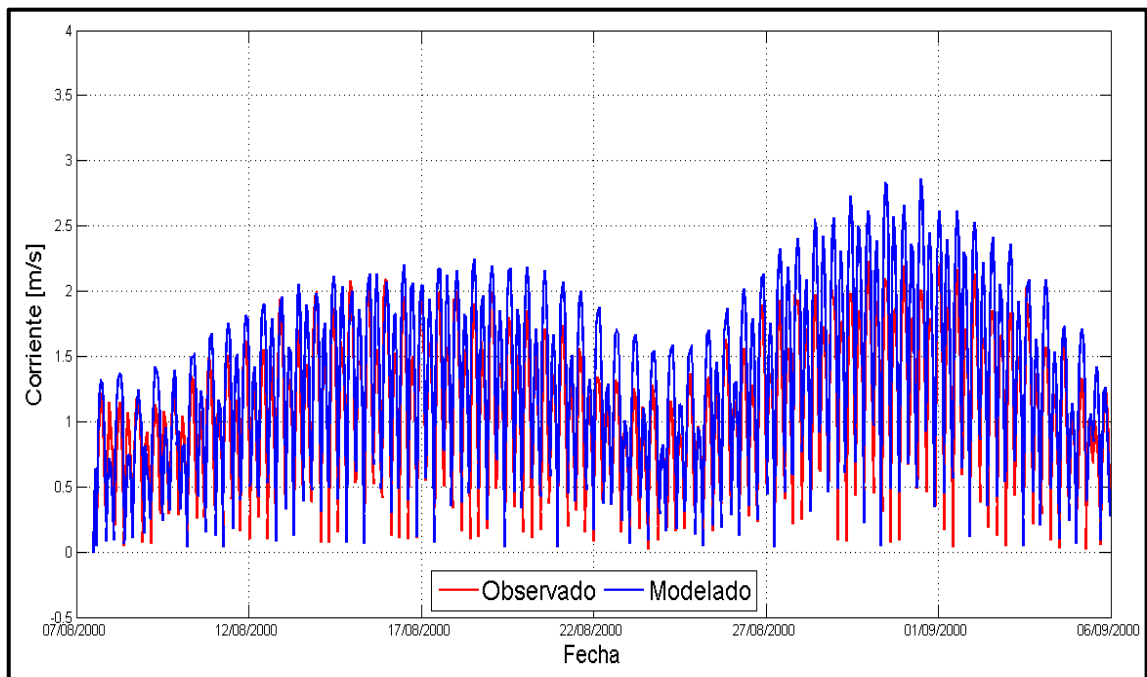


Figura 5-23: Magnitud de corrientes – Bajo Seluain.

Fuente: Elaboración propia.

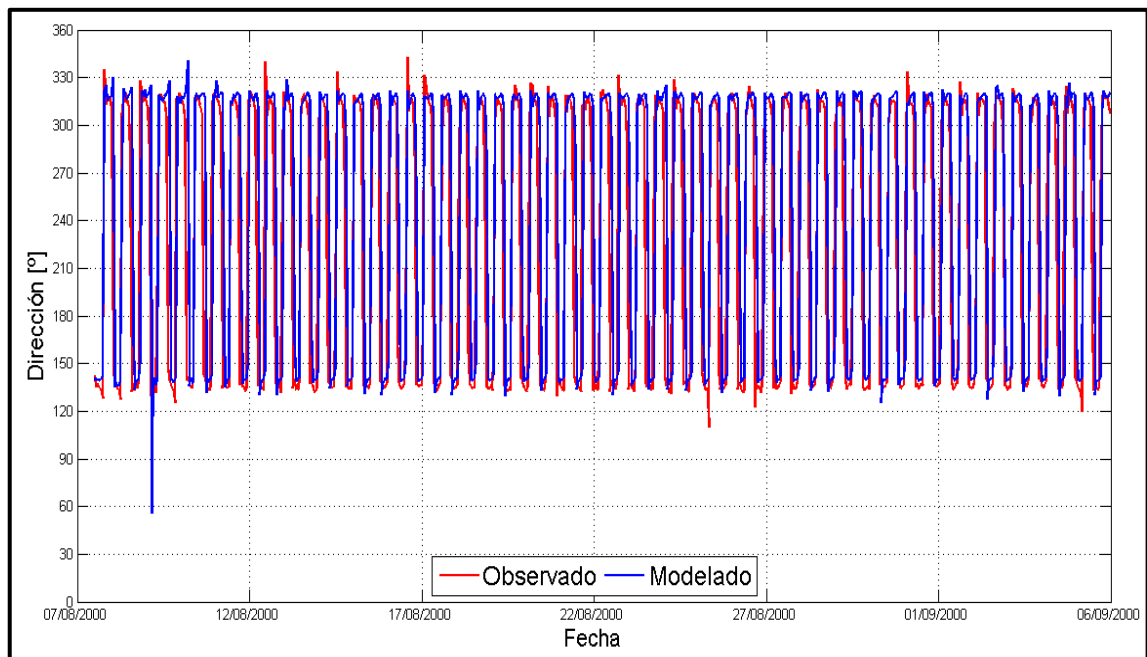


Figura 5-24: Dirección de corrientes – Bajo Seluain.

Fuente: Elaboración propia.

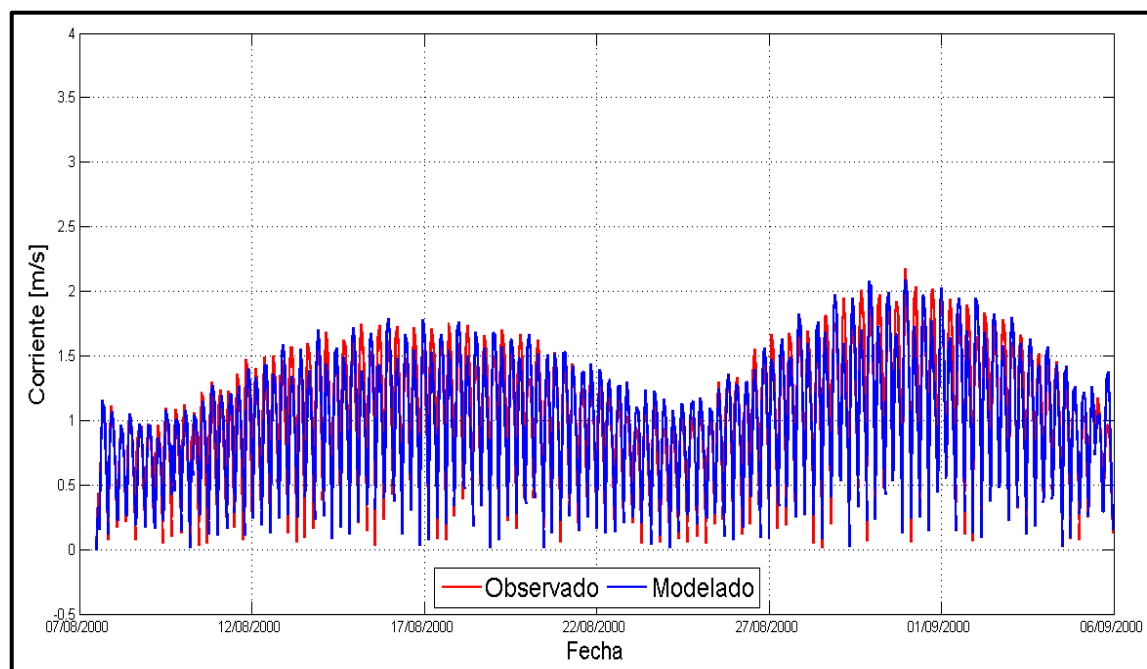


Figura 5-25: Magnitud de corrientes – Puerto Elvira.

Fuente: Elaboración propia.

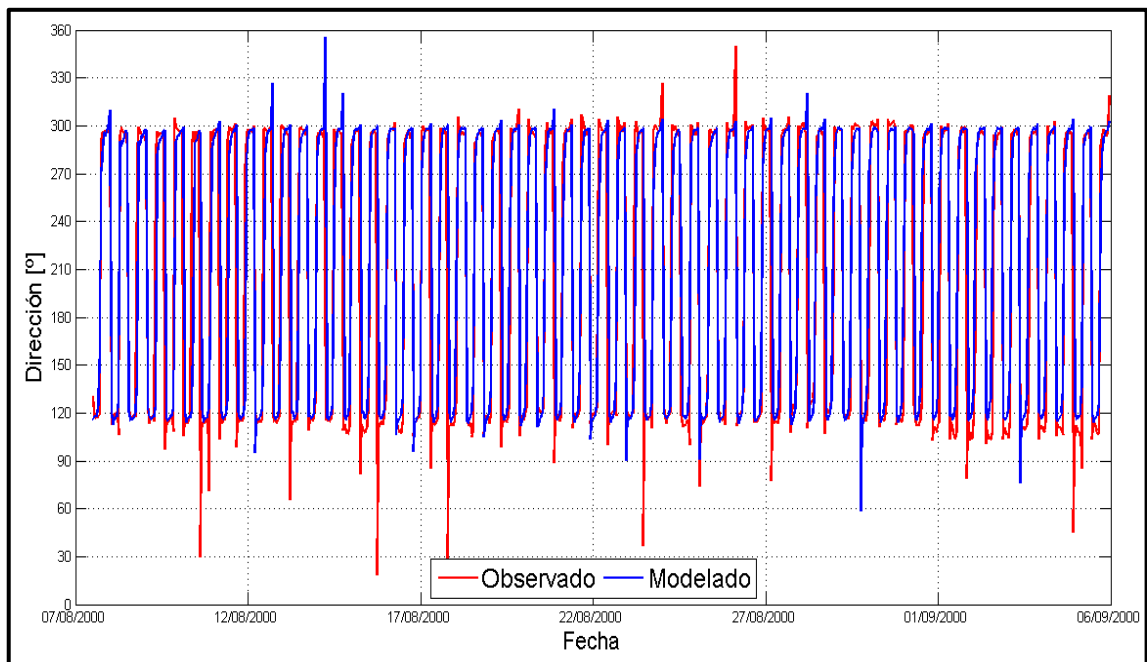


Figura 5-26: Dirección de corrientes – Puerto Elvira.

Fuente: Elaboración propia.

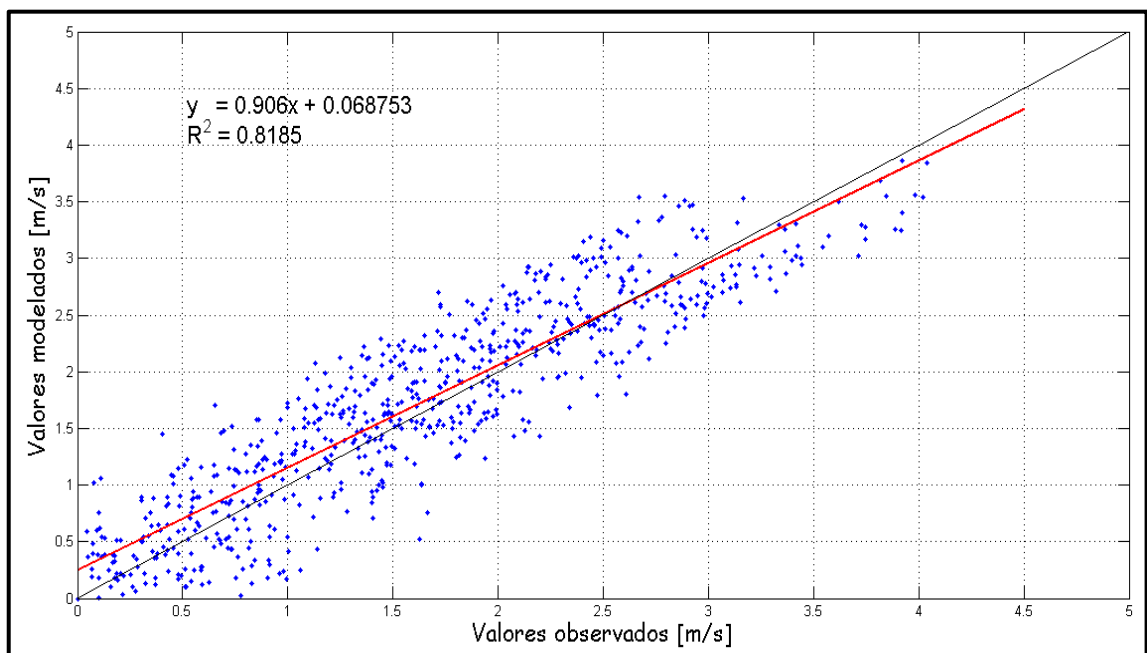


Figura 5-27: Correlación modelo Delft3D – Roca Remolinos.

Fuente: Elaboración propia.

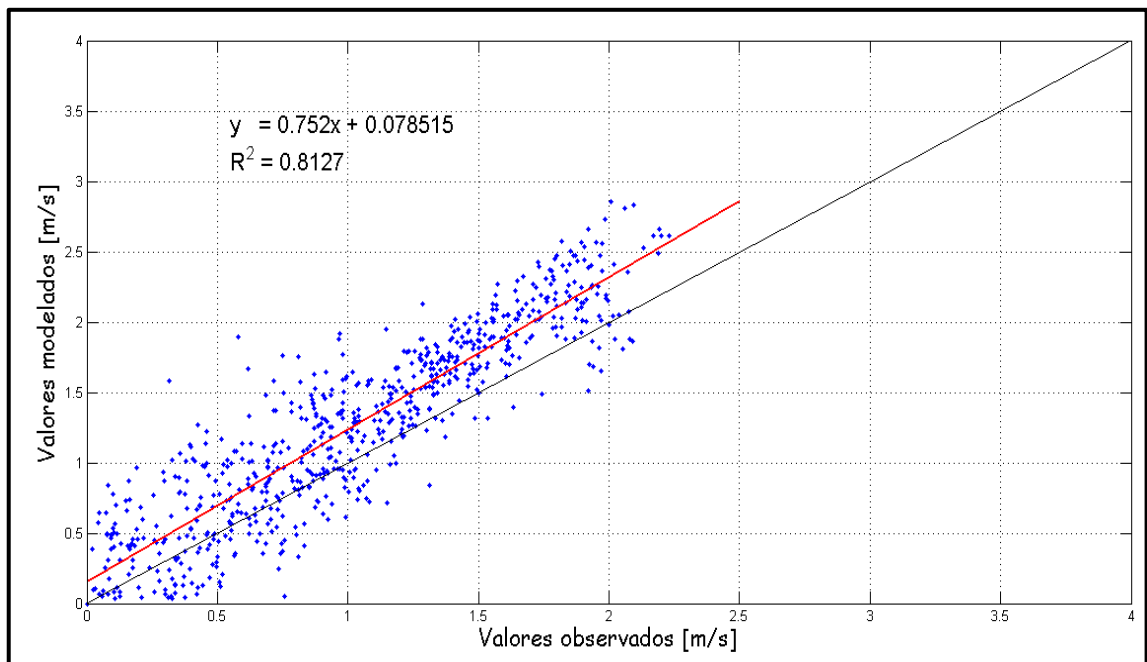


Figura 5-28: Correlación modelo Delft3D – Bajo Seluain.

Fuente: Elaboración propia.

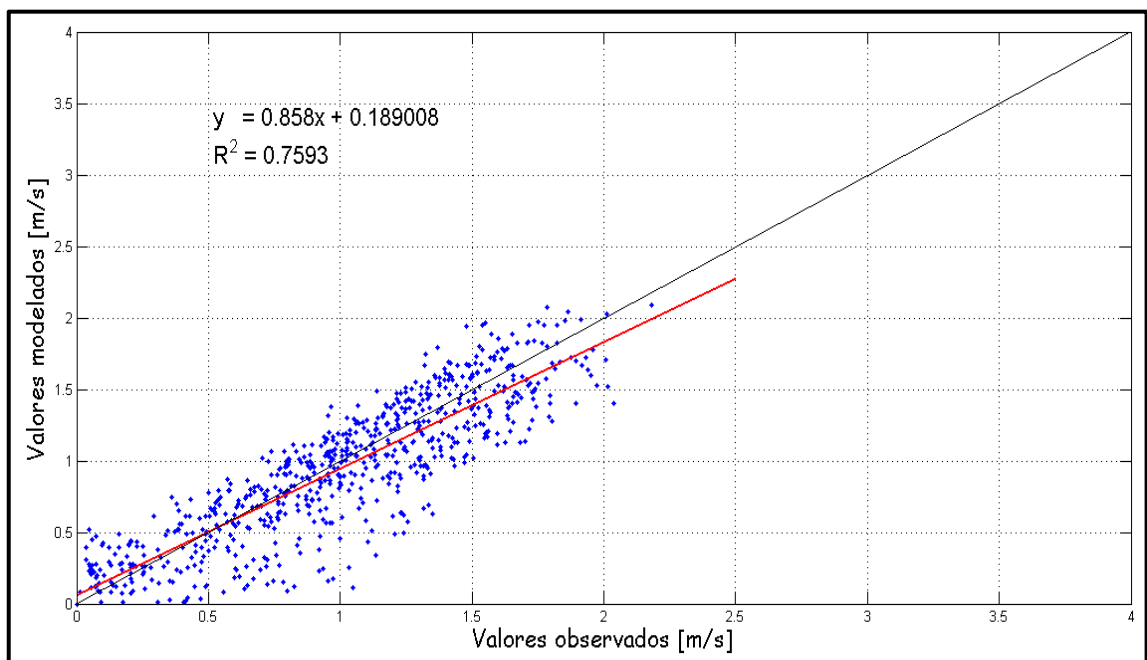


Figura 5-29: Correlación modelo Delft3D – Puerto Elvira.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5-27, la mejor correlación se obtuvo en Roca Remolinos. Por otra parte, el valor obtenido del ECM para cada uno de los puntos de medición respecto del valor simulado fue de 0,1469, 0,0813 y 0,0579 [m/s] para Roca Remolinos, Bajo Seluain y Puerto Elvira respectivamente. Esto permite deducir que a pesar de contar con un mayor R^2 en la estación de Roca Remolinos, ésta se registra el mayor ECM de las tres estaciones. Las diferencias se deben mayormente a las desigualdad que se producen entre los peaks de la serie de corrientes simuladas y medidas. Por otro lado, la estación que registró la menor dispersión en la tendencia de los datos de las series comparadas (ECM=0,0579) es Puerto Elvira, como se aprecia en la Figura 5-29. Cabe destacar que se observaron algunas divergencias al comparar las direcciones de corrientes, ya que; por ejemplo, en Canal Chacao la corriente que va hacia el Este comienza una hora antes de la bajamar, y la que va hacia el Oeste comienza una hora antes de la pleamar. Este comportamiento produjo desfases que fueron representados en la simulación luego de realizar diferentes pruebas, donde se modificaron sutilmente los forzantes armónicos de la marea hasta interpretar esta conducta. Resulta relevante mencionar que, si bien se obtuvo una correlación satisfactoria ($R^2 = 0.818$) de la magnitud de corrientes en Roca Remolinos (Figura 5-27), el modelo subestimó levemente la magnitud para éste sector puntual (Figura 5-21). Por otro lado, los resultados obtenidos tanto para Bajo Seluain como Puerto Elvira se ajustaron adecuadamente a la medición, sobrestimando ligeramente la velocidad de corriente medida. Como se observa en la Figura 5-28 y Figura 5-29, el coeficiente de determinación en estas estaciones alcanzó un 81,27% y 75,93% para Bajo Seluain y Puerto Elvira respectivamente.

En resumen, se observó una respuesta satisfactoria del modelo respecto a la magnitud de corrientes en las tres estaciones de medición.

5.3.3 Post proceso

Se procedió a realizar un análisis del comportamiento de las corrientes en toda la región de modelación, con el fin de visualizar los sectores que cuentan con mayor magnitud de corrientes bajo distintas condiciones extremas dentro del mes lunar. Para evaluar las condiciones más favorables o desfavorables dentro del mes se consideraron los eventos más extremos, esto es, las mareas más altas (sicigias) y más bajas (cuadratura), tanto para la condición llenante vaciante dentro del mes.

Como se observa en la Figura 5-33, los sectores que presentan las mayores velocidades en la condición de Sicigia máxima se encuentran en: Roca Remolinos, Punta Picuta (frente a Carelmapu), Punta Redonda (al norte de Isla Lacao) y Bajo Young (al Noroeste de Carelmapu). A pesar que la condición de sicigia máxima llenante (Figura 5-32) presenta velocidades altas, son menores a las observadas en condición vaciante - sicigia como vaciante - cuadratura. Por otro lado, las zonas que presentan las menores velocidades son: Punta Tres Cruces (al Norte de Manao) y en Canal Caulin (alrededor de Isla Lacao) (Figura 5-30 y Figura 5-31). Existe un grado de incertidumbre respecto de los valores obtenidos en Canal Caulin, debido a que no se contó con batimetría en detalle para este

sector. Así pues, en Isla Lacao se podrían obtener velocidades sustancialmente diferentes al trabajar con batimetría de detalle.

Resulta interesante destacar que tanto en sicigia como cuadratura de la condición vaciante la corriente tiende a rotar, generando un flujo de retorno al Sur-Este del canal próximo a la Bahía de Parga, (Figura 5-31 y Figura 5-33). Por otro lado, tanto en sicigia como cuadratura de la condición llenante se aprecia un flujo de corriente en dirección Norte-Sur, que posteriormente se dirige hacia el Este frente a Punta Tres Cruces (Figura 5-30 y Figura 5-32). No obstante lo anterior, en este sector el patrón de corrientes muestra una clara tendencia a seguir alineada al canal.

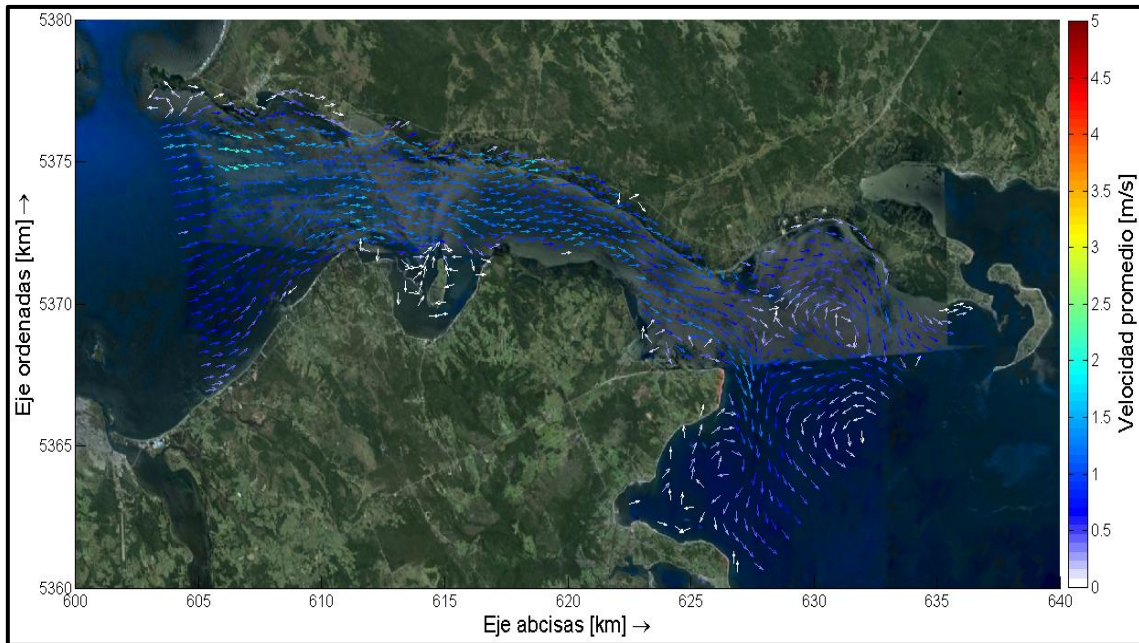


Figura 5-30: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 2D.

Fuente: Elaboración propia.

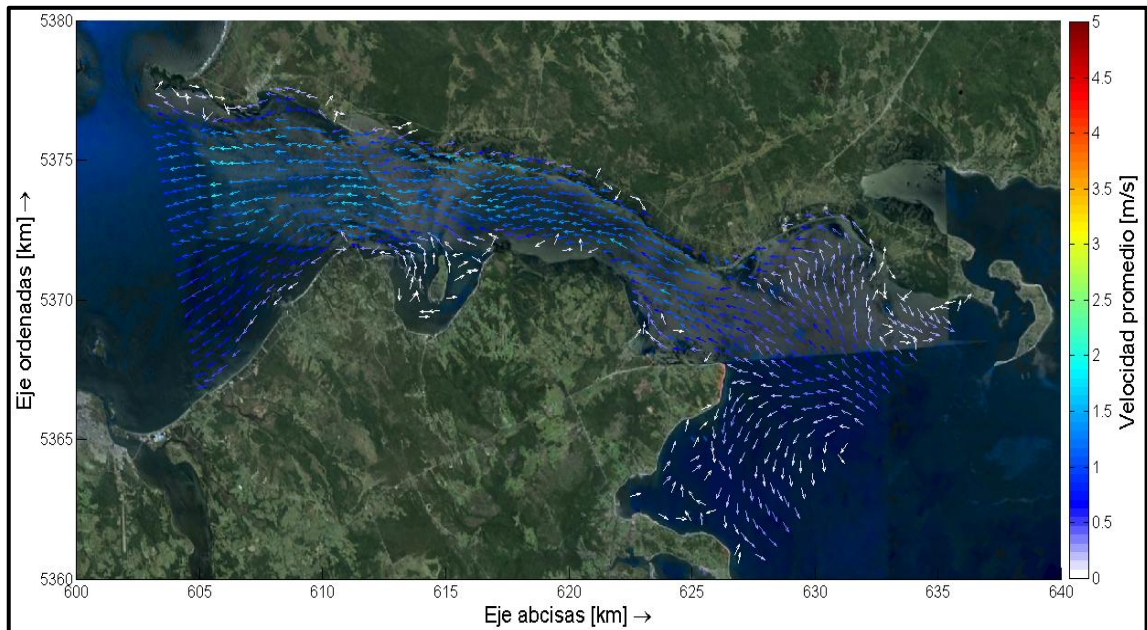


Figura 5-31: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 2D.

Fuente: Elaboración propia.

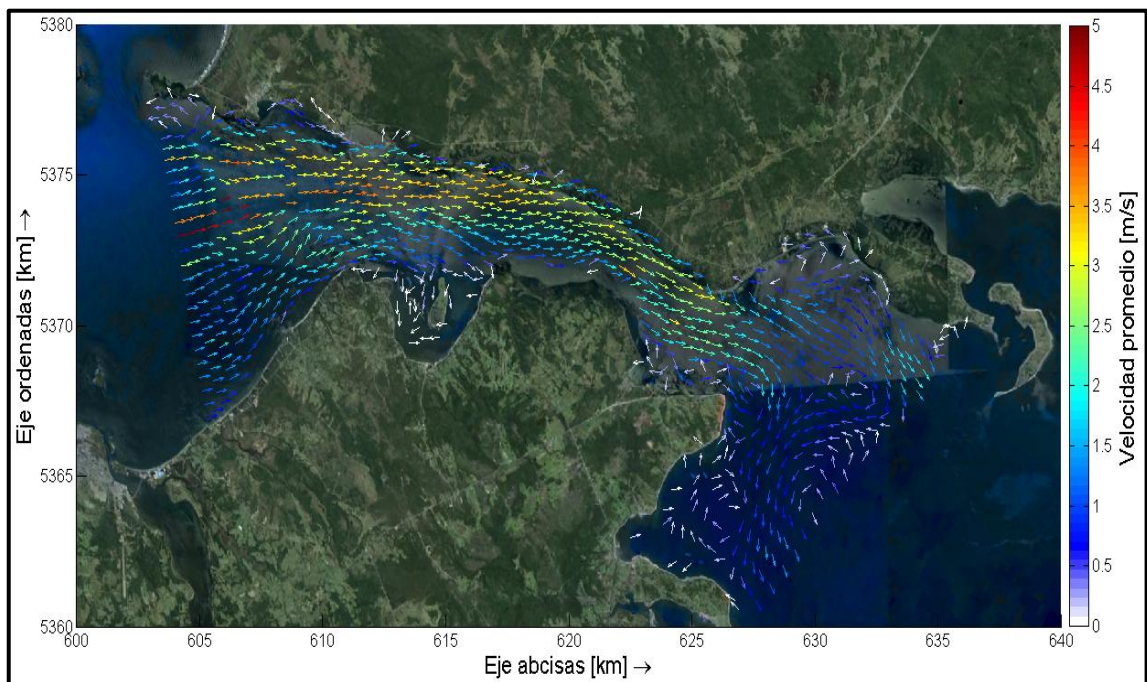


Figura 5-32: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 2D.

Fuente: Elaboración propia.

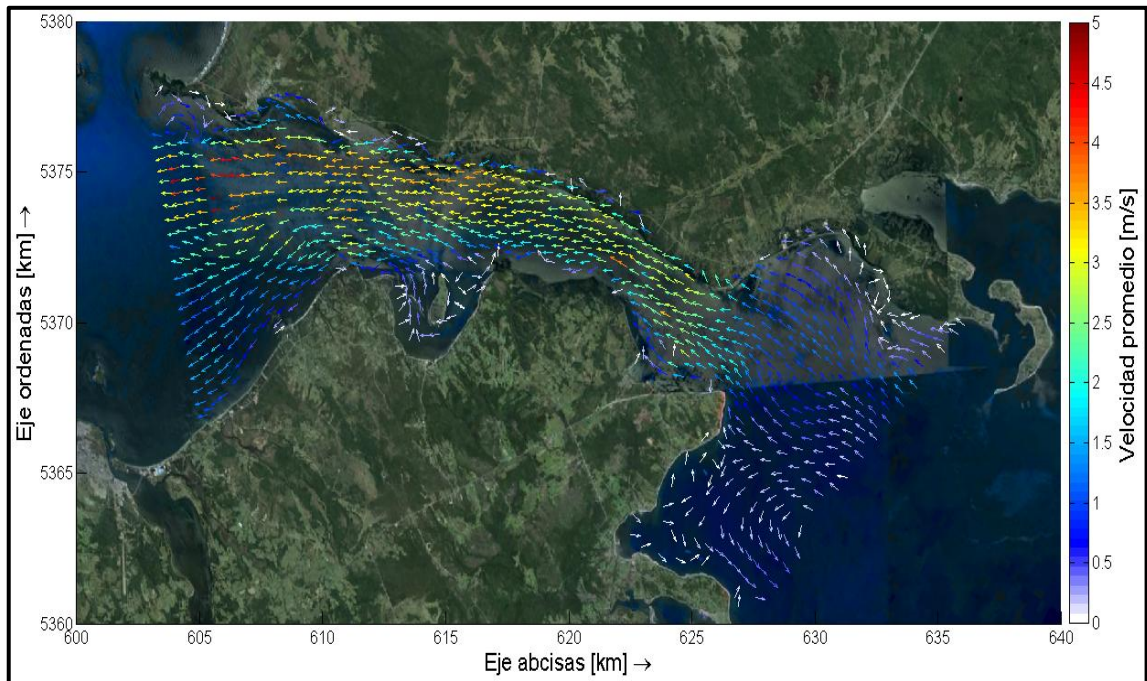


Figura 5-33: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 2D.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Modelación 3D

En el presente acápite, se expondrán los procesos llevados a cabo para implementar el módulo 3D.

5.4.1 Pre Proceso

- Región de modelación

La región de modelación utilizada en el módulo 3D fue la misma seleccionada para el módulo en 2D, ya que esto permite conservar un escenario base para la realizar el análisis comparativo entre ambos módulos del modelo.

- Límites abiertos y cerrados

Los límites abiertos y cerrados utilizados en el módulo 3D son los mismos que los presentados en el módulo 2D.

✓ Límites cerrados

Los límites que representan la relación tierra-agua del módulo 3D son los mismos definidos para el módulo 2D, a excepción de la incorporación de una condición de Free-slip para el deslizamiento vertical, lo cual resulta en una velocidad normal cero.

✓ Límites abiertos

Las condiciones de límite abierto utilizadas para forzar el módulo 3D son las mismas empleadas en el módulo 2D. La Tabla 5 presenta las constituyentes armónicas ingresadas como forzantes en el módulo 3D. Así también, se utilizó la condición de borde “nivel del mar” con un parámetro de reflexión “alpha” igual a cero, y forzante del tipo armónico.

➤ Generación de malla

El modelo numérico 3D se implementó utilizando una malla rígida de elementos curvilíneos, los cuales fueron distribuidos de manera desigual dentro del dominio, (acápite 5.3.1). Se empleó elementos grandes cerca de las condiciones de borde abiertas, y elementos de menor tamaño en la parte central del canal.

Como fue descrito en el acápite 5.3.1, dado que existe escasa información de batimétrica en el sector, se optó por generar una malla con elementos de tamaño irregular. La malla fue elaborada usando coordenadas cartesianas para describir el plano (x, y) , mientras que, el comportamiento vertical (z) fue descrito mediante el sistema de coordenadas Z. En base a esta configuración, la precisión de los valores de corrientes decrece desde la superficie hacia el fondo del lecho marino (Figura 4-4) mediante una grilla en forma escalonada. Por otra parte, se utilizó una densidad constante, por tanto, se espera no contar con “wiggles” (Figura 4-5) que puedan generar inestabilidades numéricas, asociadas al comportamiento vertical en la malla.

Finalmente, se generó un archivo de batimetría utilizando los datos recopilados descritos en el acápite 5.2.2, mediante el programa Surfer 10 Golden Software (Figura 5-13). Debido a la escasa información batimétrica entorno en Canal Caulin (entorno a Isla Lacao), no se obtuvo una adecuada representación de la variabilidad del fondo, por tanto, los resultados simulados en este sector no fueron precisos.

5.4.2 Proceso

En esta etapa se presentarán las configuraciones iniciales efectuadas en el modelo 3D hasta su posterior calibración, además, se establecerán los resultados obtenidos por capas en el módulo 3D.

➤ time step

La definición del paso de tiempo o time-step, representa un valor de gran relevancia utilizado para obtener una estabilidad en el modelo numérico de tres dimensiones.

Al igual que para el módulo 2D, el time step está condicionado por el número de Courant-Friedrichs-Levy. El valor de *time step* debió ser modificado hasta obtener un modelo estable. En este estudio se usó un valor de *time step* de 0,05 [s], al igual que el modelo 2D.

Como se describió en el acápite 5.3.2, los valores máximos de Courant para la malla se encuentran en torno a 5,6, lo cual no excede el criterio requerido por el modelo para desarrollos mediante esquemas implícitos.

➤ Parámetros de modelación

✓ Tipo de modelación

El estudio corresponde a un modelo en tres dimensiones, configurado para resolver el comportamiento hidrodinámico de Canal Chacao, utilizando 9 capas de profundidad empleando coordenadas cartesianas (UTM 18-G).

✓ Inicio de modelación

Para la simulación se asignó una condición inicial al nivel medio del mar para cada nodo, es decir, un desnivel inicial igual a cero en todo el dominio de la modelación. Gradualmente se comenzó a forzar el modelo desde los límites abiertos, imponiendo un valor uniforme del nivel del mar mediante valores armónicos de marea para todos los nodos, usando una condición de borde lineal. Además, se utilizó una grilla en coordenadas Z configurada con 9 capas verticales generando un perfil vertical inicial de velocidades uniformes.

✓ Periodo de modelación

La ventana de tiempo a modelar se definió en el mismo intervalo de tiempo considerado para el módulo 2D, ya que se buscó conservar una similitud temporal de ambos modelos para realizar el análisis comparativo. El periodo simulado corresponde al mes sinódico. La Figura 5-14 presenta los registros de corrientes y mareas obtenidos en cada estación, para la campaña de invierno del estudio Puente en el Canal Chacao en el año 2000. Se observa que la ventana de tiempo seleccionada para modelar abarca entre el 07/08/2000 a las 00 Hrs hasta el 05/09/2000 a las 23 Hrs.

✓ Parámetros numéricos

Como se describió en el acápite 5.3.2, los valores de profundidad pueden ser especificados al centro o en las esquinas de la cuadrícula. Para el módulo 3D se especificó la profundidad en el centro de las cuadrículas, considerando la profundidad mínima en las caras de cada celda. Se utilizó este método, ya que permitió obtener mejores resultados de velocidad en cada capa de profundidad. Los demás parámetros numéricos fueron configurados de igual forma que lo expuesto en el acápite 5.3.2.

Finalmente se definió el esquema de advección para momentum y la discretización espacial de los términos advectivos. El modelo Delft3D Flow presenta cuatro esquemas que permiten definir la advección para momentum: Esquema WAQUA, Método Cíclico, Esquema de Inundación y Esquema multidireccional contra el viento para modelos 3D con coordenadas Z. De manera similar a lo presentado en el acápite 5.3.2 se usó el esquema cíclico, ya que se basa en la disipación del error en el esquema de fase y presenta resultados más precisos en la vertical. (Stelling & Leendertse, 1992).

✓ Parámetros físicos

Los parámetros utilizados para el estudio fueron:

- La gravedad con un valor de $9,8 [m/s^2]$.
- La densidad del agua con $1025 [Kg/m^3]$.
- Latitud con un valor de $-41,8 [^\circ]$.

Por otra parte, se utilizó una formulación cuadrática de stress de fondo para definir el comportamiento del fondo en el modelo 3D, similar a la empleada por un modelo de profundidad promediada (2D). La tensión de corte en 3D de la capa de fondo, viene relacionada con la corriente que pasa justo sobre el fondo, la ecuación (5.4.1) representa el valor del coeficiente de rugosidad de Chezy en 3D.

$$C_{3D} = \frac{\sqrt{g}}{k} \ln \left(1 + \frac{\Delta Z_b}{2Z_0} \right) \quad (5.4.1)$$

Donde Z_0 : Largo de la rugosidad de fondo [m].
 k : Energía cinética turbulenta [m^2/s^2].
 ΔZ_b : Espesor de la capa de fondo [m].

La principal diferencia entre el coeficiente de Chezy 2D y 3D radica, en que éste último define el coeficiente considerando una cantidad de capas con espesor definido en la columna de agua, asumiendo un perfil vertical de forma logarítmica.

Se incorporó la viscosidad horizontal de fondo mediante una viscosidad de Remolinos horizontal con $1,5 [m^2/s]$ para todo el dominio. Adicionalmente, se incorporó la viscosidad de Remolinos vertical con un valor de $1 * 10^{-6} [m^2/s]$ recomendado por (Deltares, 2014).

En el presente trabajo se empleó el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, ya que es uno de las más utilizados en el área y, además, es una configuración recomendada para este tipo de escenarios (Deltares, 2014).

➤ Calibración

En la etapa de calibración del módulo 3D, se exponen los resultados obtenidos respecto al nivel del mar para las tres estaciones disponibles y, a diferencia del módulo 2D, se hace una comparación de los resultados simulados respecto a los datos medidos por el ADCP en Roca Remolinos en cada una de las 9 capas disponibles.

✓ Nivel del mar

En el módulo 3D, la representación del nivel del mar resulta fundamental para describir correctamente el comportamiento hidrodinámico en la columna de agua. Para hacer comparable los resultados entre ambos módulos, se optó por utilizar la misma malla numérica, y se contó con una calibración de nivel del mar similar a la descrita en 5.3.2. Al igual que para el módulo 2D, la calibración del nivel del mar se consideró superada una vez que se alcanzó un buen valor de correlación entre la serie simulada versus la medida en la estación de Eje 1. La Figura 5-34, Figura 5-35 y Figura 5-36 representan la comparación entre la marea simulada con el módulo 3D versus la marea medida en cada estación. La Figura 5-37, Figura 5-38 y Figura 5-39 permite visualizar la correlación obtenida en cada punto de medición de marea.

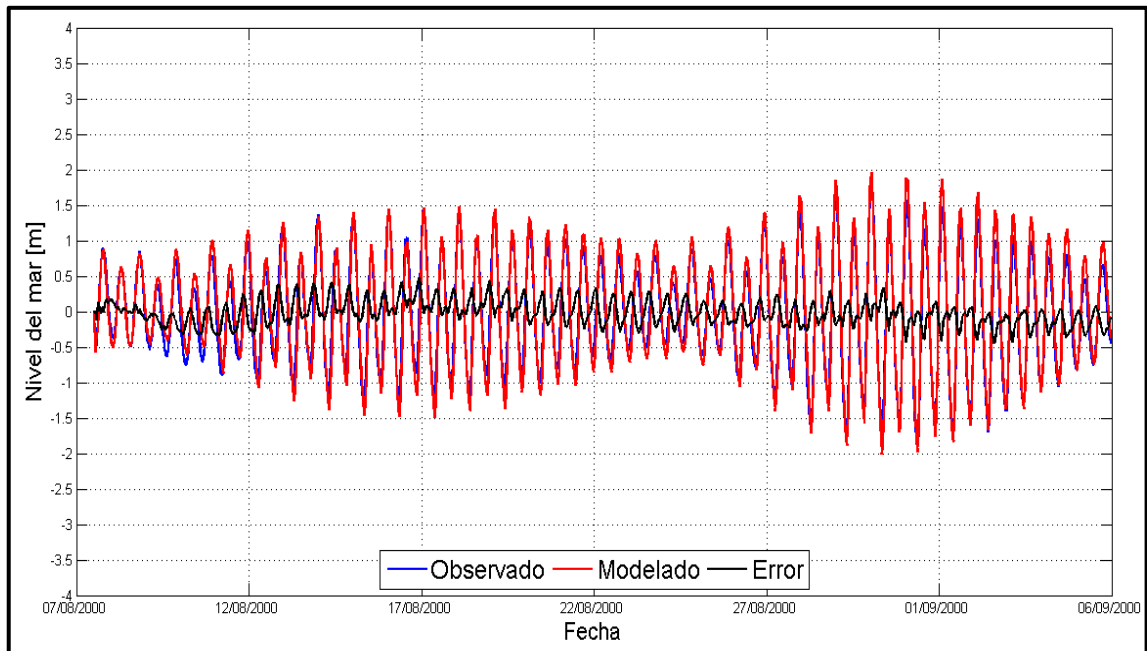


Figura 5-34: Aproximación de nivel del mar – Carelmapu 3D.

Fuente: Elaboración propia.

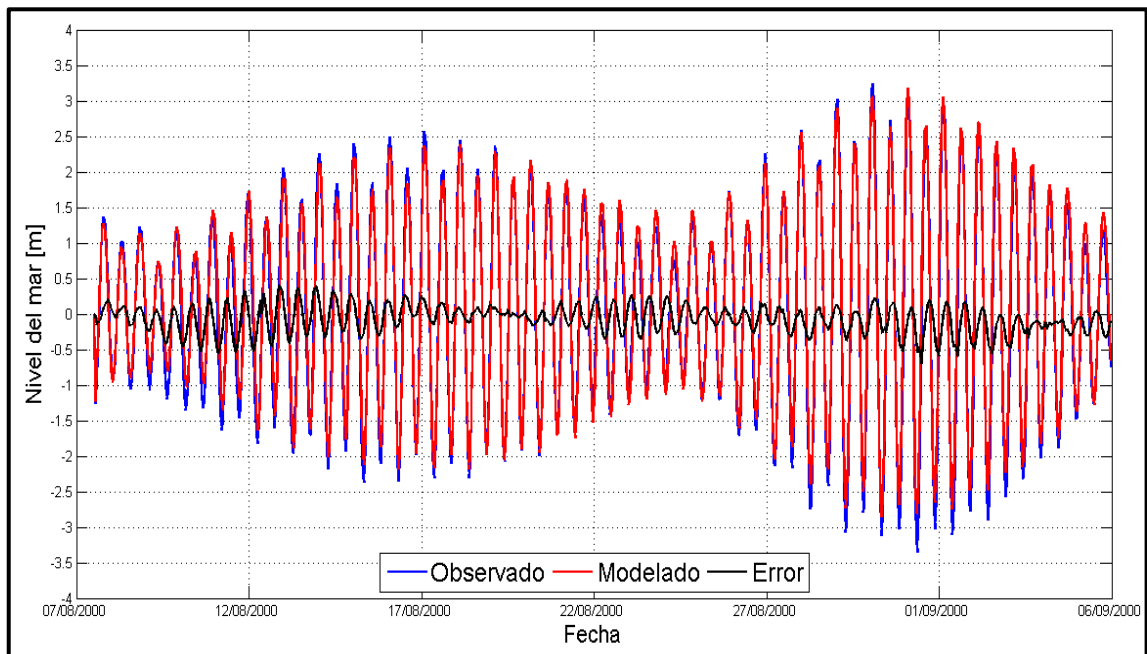


Figura 5-35: Aproximación de nivel del mar – Tique 3D.

Fuente: Elaboración propia.

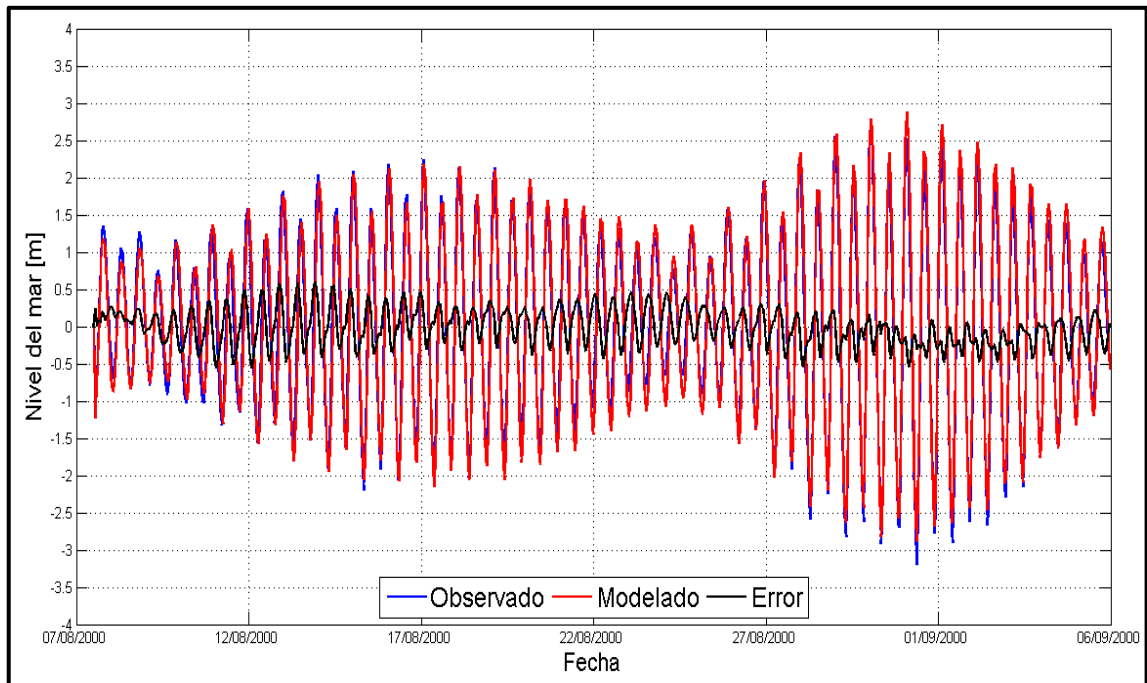


Figura 5-36: Aproximación de nivel del mar – Eje 1 3D.

Fuente: Elaboración propia.

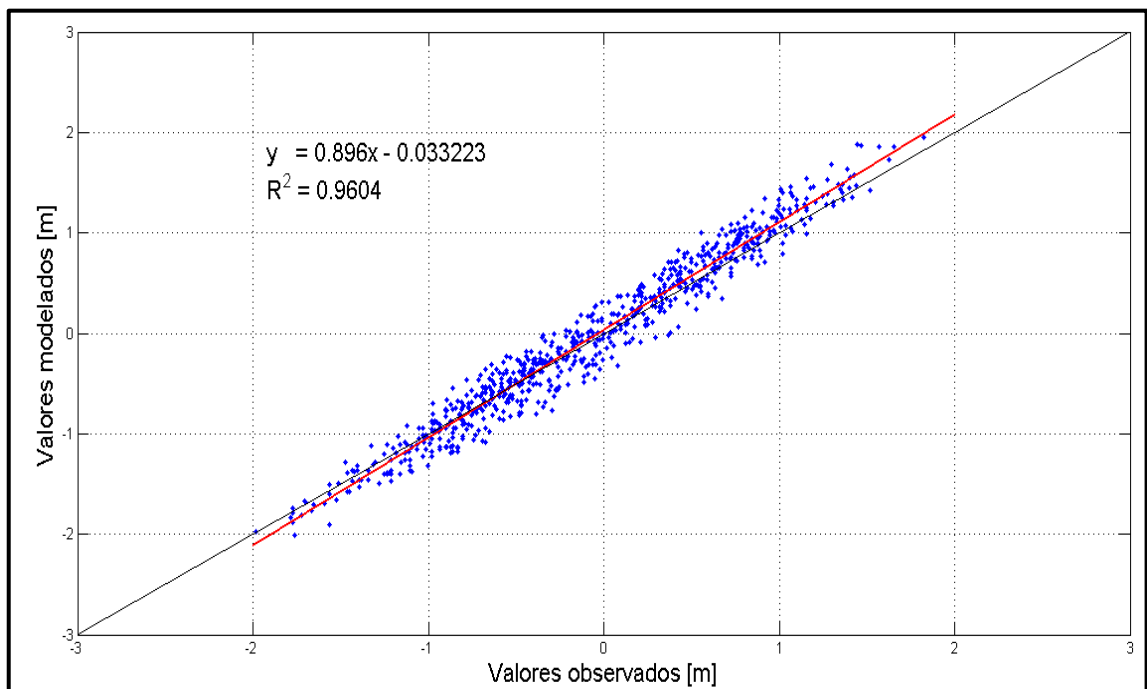


Figura 5-37: Correlación Modelo Delft3D – Caremapu 3D.

Fuente: Elaboración propia.

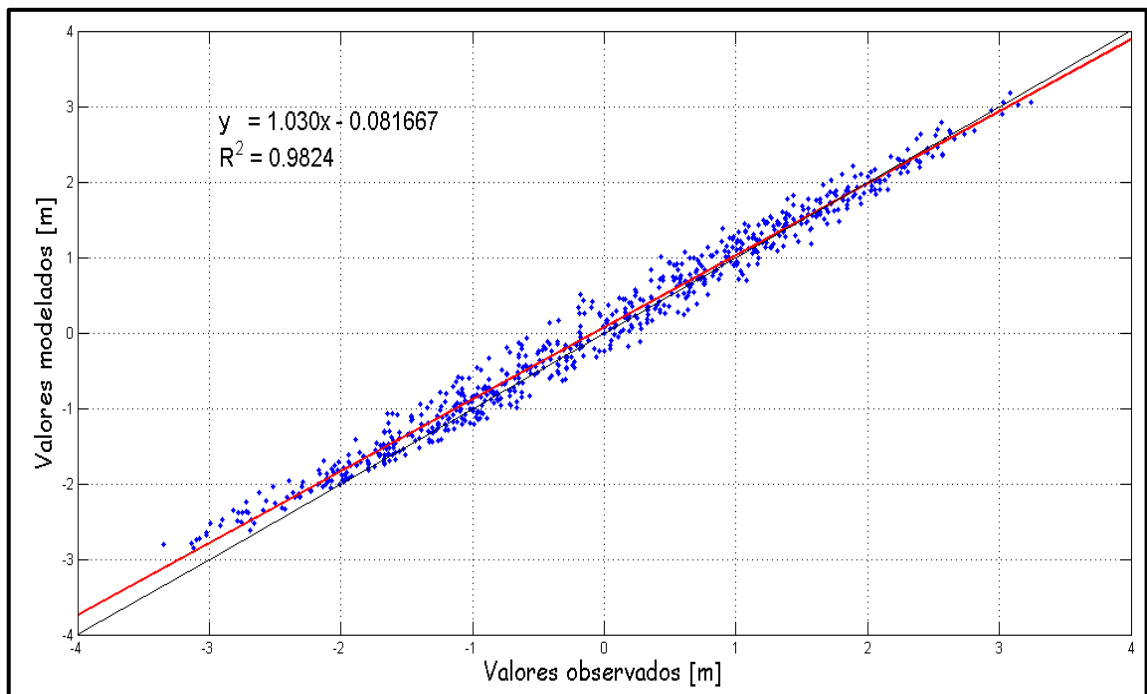


Figura 5-38: Correlación Modelo Delft3D – Tique 3D.

Fuente: Elaboración propia.

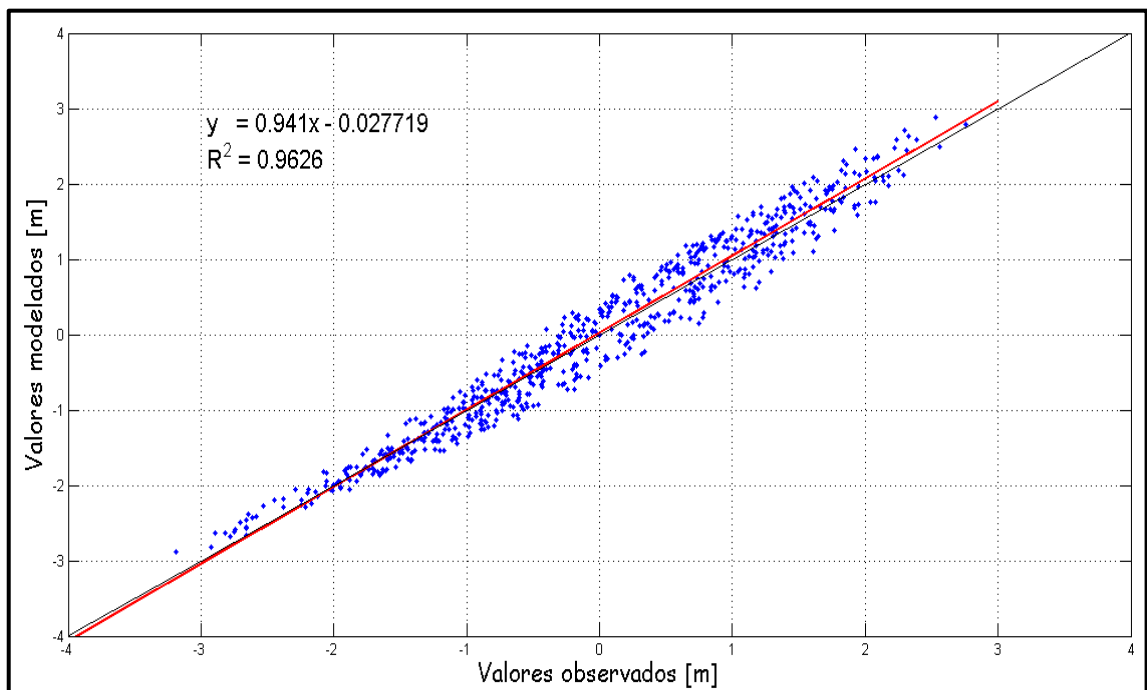


Figura 5-39: Correlación Modelo Delft3D – Eje 1 3D.

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar a lo descrito en el acápite 5.3.2, como se observa en la Figura 5-34, Figura 5-35 y Figura 5-36, el error residual de marea resultó mayor en las estaciones de Tique y Eje 1. Sin embargo, como se observa en la Figura 5-37, Figura 5-38 y Figura 5-39 éstas presentaron una correlación lineal sobre un 96% entre los datos de marea simulada y medida, por tanto, el fenómeno fue representado correctamente. La estación que contó con la mayor correlación lineal es Tique, a pesar de trabajar con elementos gruesos en la malla en el sector. Es importante resaltar que los mayores errores residuales observados en Eje 1 y Carelmapu, se registraron dentro de los primeros 10 días de simulación.

Por otra parte, se calculó el ECM con 0.0272 para Carelmapu, 0.0602 en Tique, y 0.0331 para Eje 1. A pesar de observar una gran similitud respecto a la calibración del modelo 2D, se registró una leve disminución del error al calcular la señal de marea con el modelo 3D. Una vez obtenido un valor de correlación lineal superior a un 95% para la estación Eje 1, se asumió superada la calibración para el nivel del mar del módulo 3D.

✓ Corrientes

Una vez considerados satisfactorios los resultados de correlación en las 9 capas del modelo 3D, se consideró superada la etapa de calibración de corrientes.

A continuación se presenta la comparación entre la serie de datos simulados y medidos en las capas 1, 5 y 9 en el sector de Roca Remolinos, descritas por la Figura 5-40, Figura 5-42 y Figura 5-44 respectivamente. La Figura 5-41, Figura 5-43 y Figura 5-45 representan la dirección de las corrientes simuladas respecto a las registradas por el ADCP en las capas 1, 5 y 9 respectivamente. Las seis capas restantes se encuentran en el Anexo 1: Resultados calibración modelo 3D por capas.. Como se observa en la Figura 5-46, Figura 8-13 y Figura 8-14 siguiendo, los mejores resultados de calibración se observan en las tres capas superiores, reduciendo su valor conforme se aproximan al fondo.

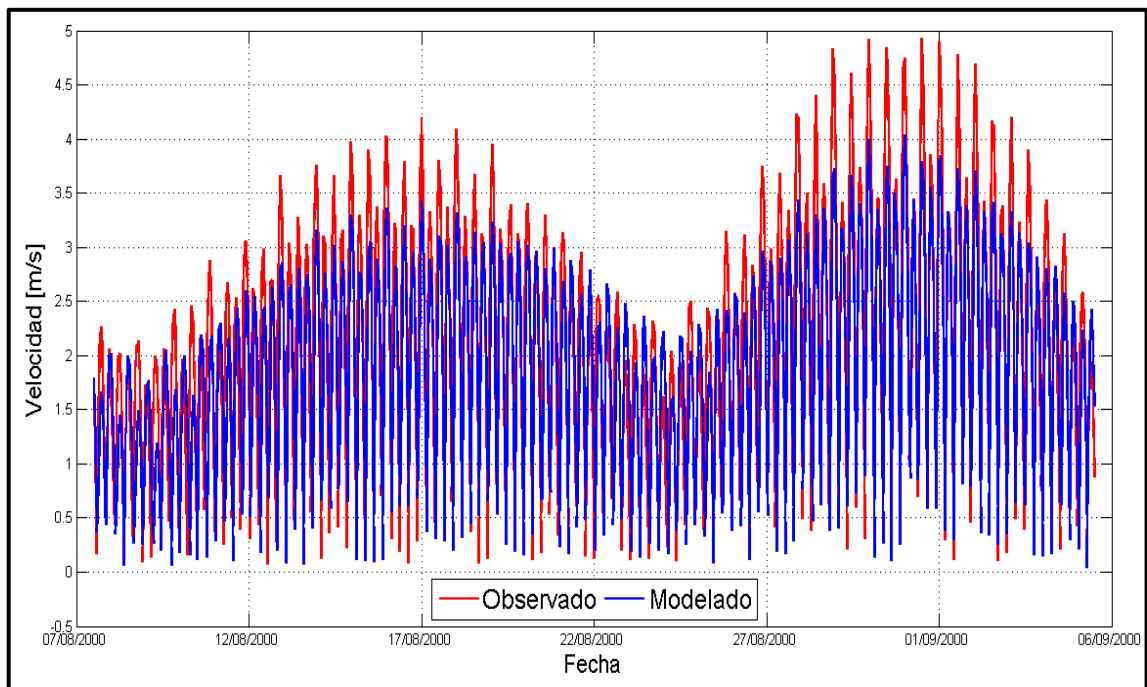


Figura 5-40: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 1.

Fuente: Elaboración propia.

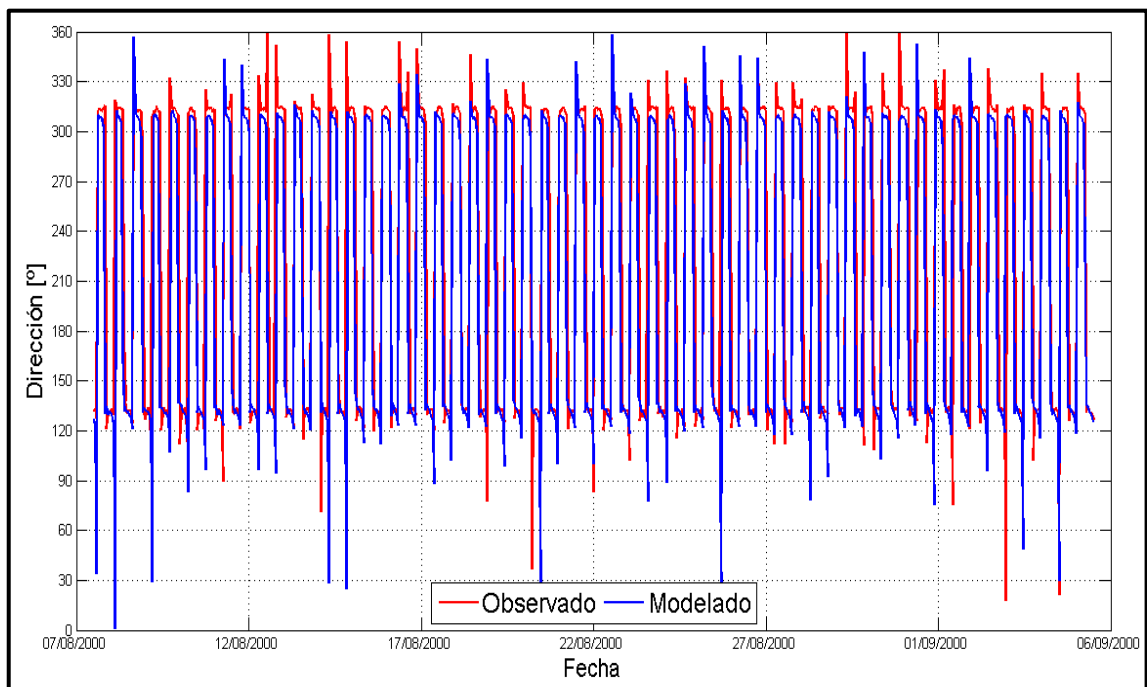


Figura 5-41: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 1.

Fuente: Elaboración propia.

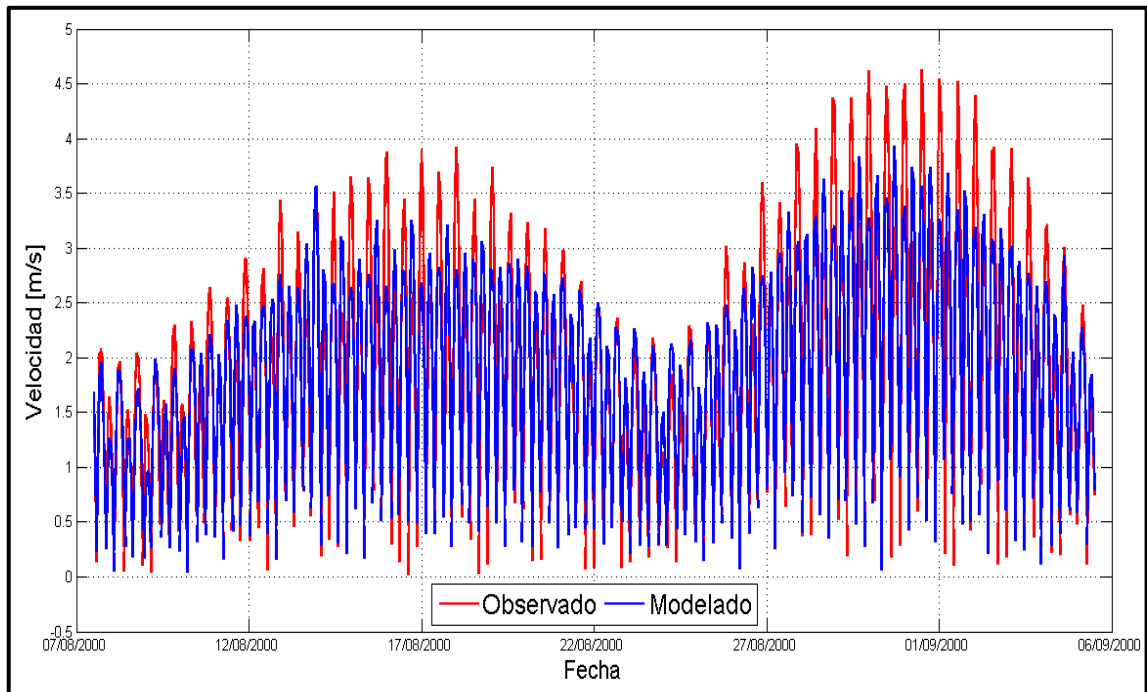


Figura 5-42: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 5.

Fuente: Elaboración propia.

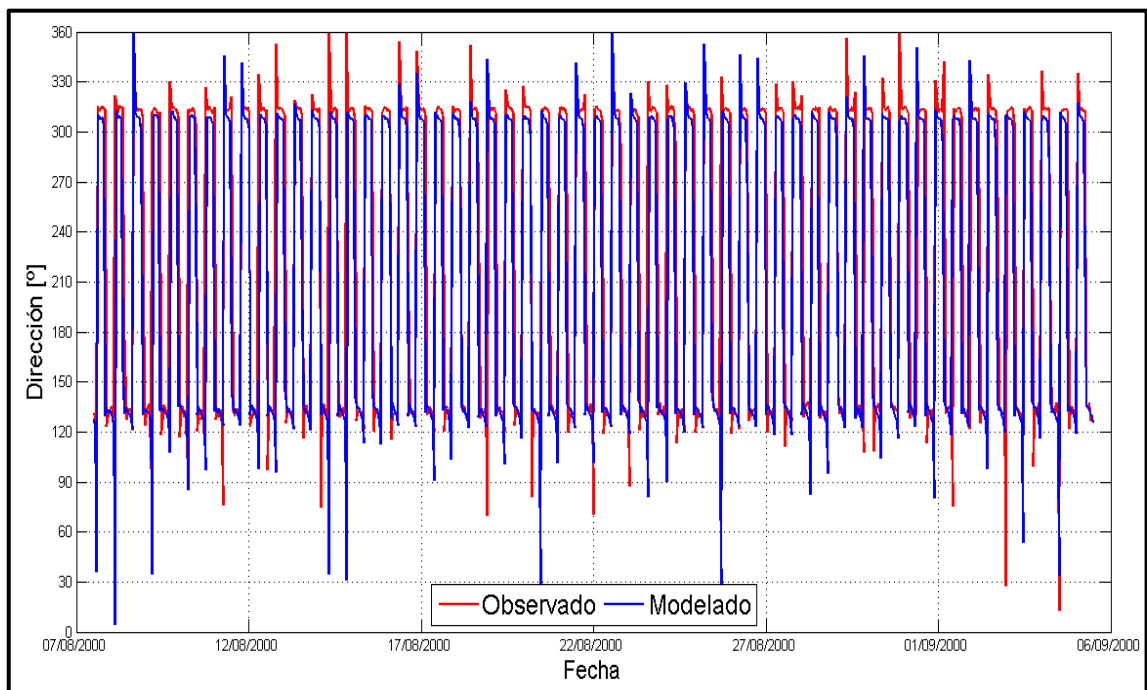


Figura 5-43: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 5.

Fuente: Elaboración propia.

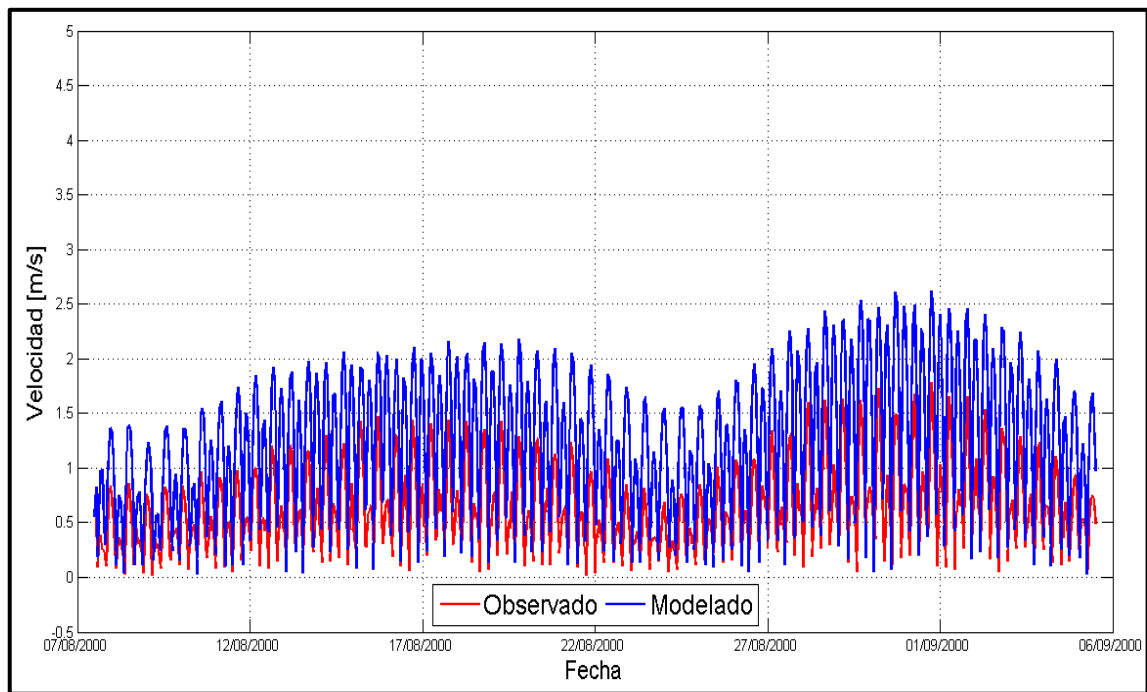


Figura 5-44: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 9.

Fuente: Elaboración propia.

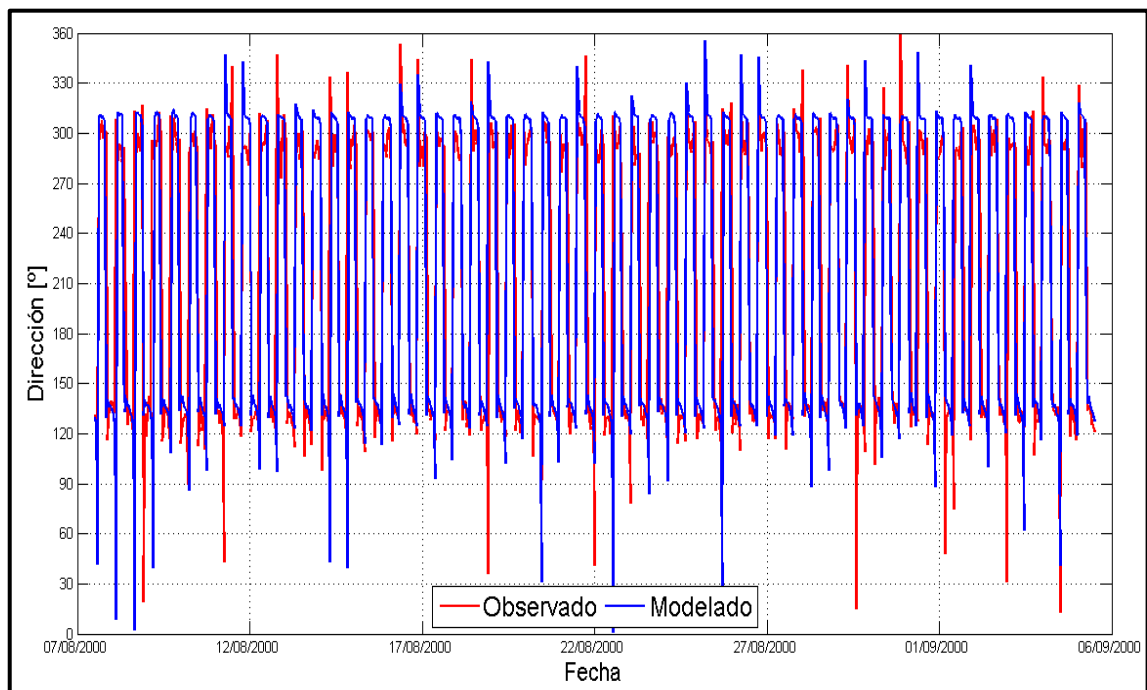


Figura 5-45: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 9.

Fuente: Elaboración propia.

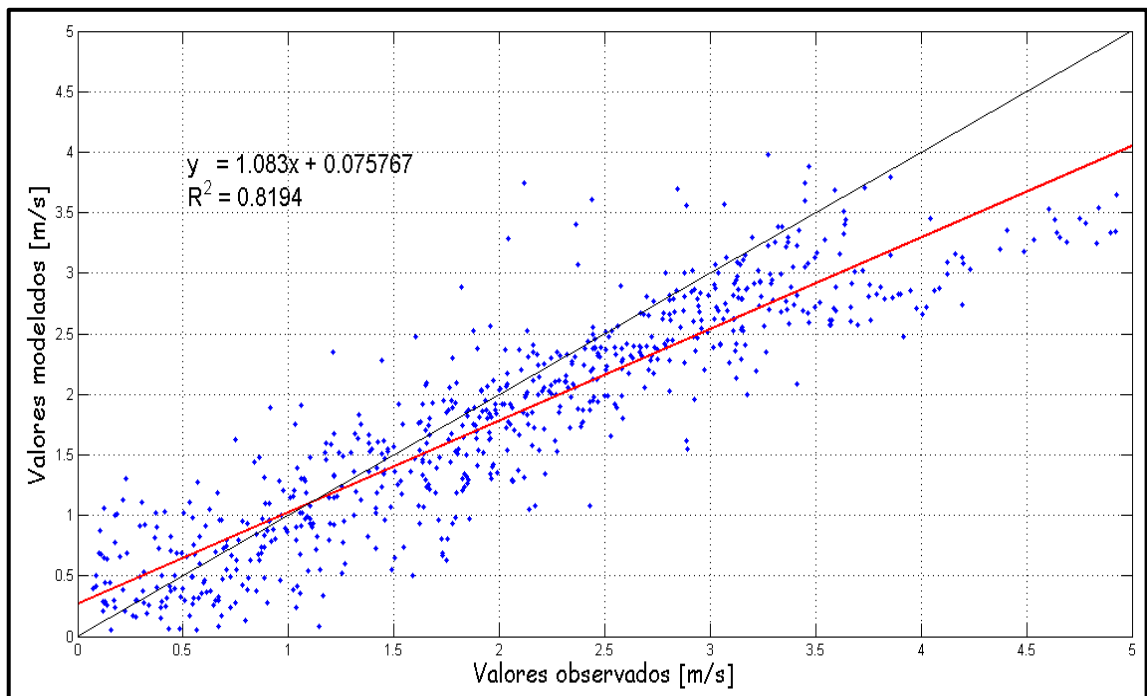


Figura 5-46: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 1.

Fuente: Elaboración propia.

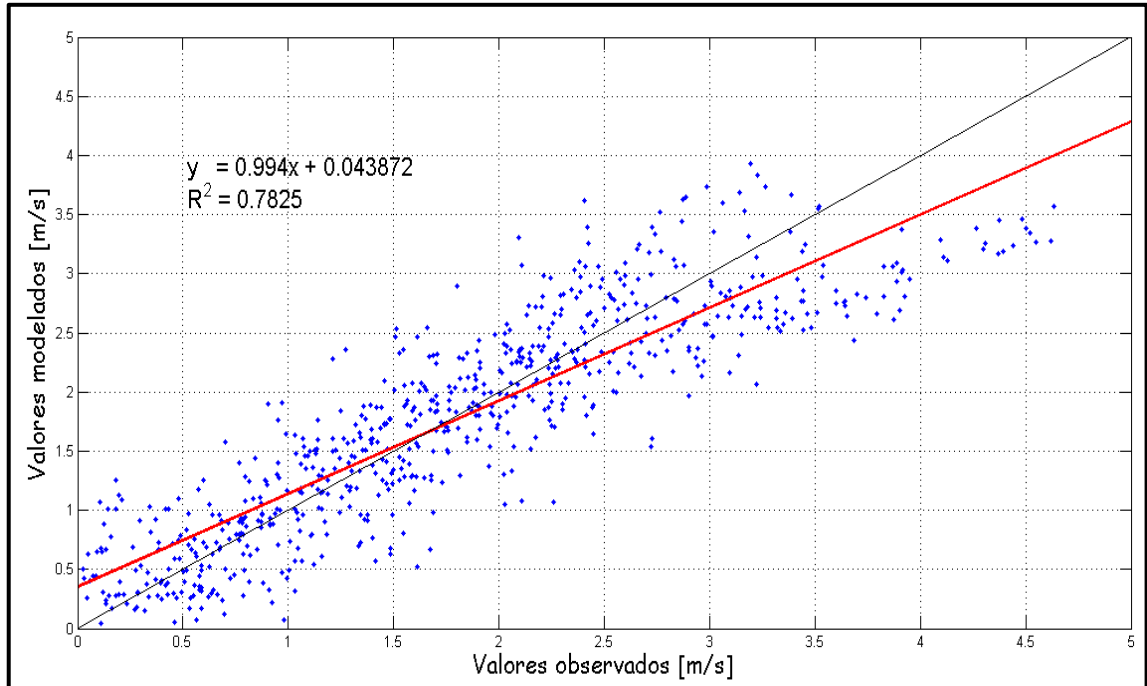


Figura 5-47: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 5.

Fuente: Elaboración propia.

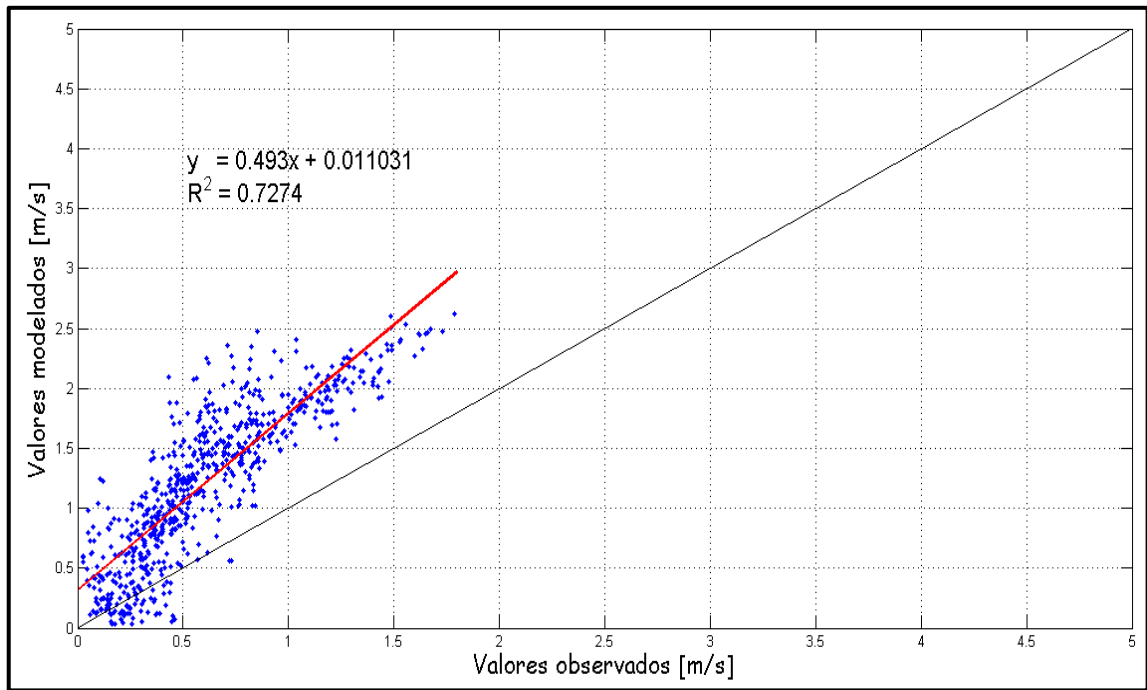


Figura 5-48: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 9.

Fuente: Elaboración propia.

Similar a lo realizado en el proceso de calibración 2D, se optó por determinar el error medio cuadrático en cada una de las capas, obteniendo un valor ECM de 0.1561, 0.1825 y 0.1096 [m/s] en las capas 1,5 y 9 respectivamente. Acerca de estos valores es importante considerar que a pesar de contar con correlaciones sobre 81% en las primeras capas y sobre 72% en las restantes, se registró errores considerables en la simulación. Esto puede deberse, en parte, al hecho de trabajar con una malla numérica, que no fue lo suficientemente refinada para representar adecuadamente la totalidad del fenómeno en cuestión. Cabe destacar que no se tiene certeza de los resultados registrados por el ADCP, debido a la limitada información disponible sobre las condiciones de funcionamiento del instrumento y de la geometría compleja del sector. Dado lo anterior, y considerando los estudios previos realizados en el lugar (Sepúlveda, 2010 & Contreras et al, 2008), se concluye que el modelo representa satisfactoriamente el comportamiento promedio de las corrientes por capa, pero no alcanza los peaks de corrientes en las capas superficiales.

Como se observa en la Figura 5-40, Figura 8-1, Figura 8-3 y Figura 8-5, la media de corrientes se ajustó bien a las registradas por el ADCP, pero no así los valores peaks del mes. El ADCP registró velocidades que disminuyeron desde la superficie hacia el fondo, mientras que, el modelo representó esta tendencia pero con una distribución vertical distinta. Esto ocasionó subestimaciones del modelo en las capas superficiales y sobrestimación en las capas de fondo (Figura 8-9, Figura 8-11 y Figura 5-48). A pesar de contar con diferencias entre el modelo 3D y la medición de corrientes, se obtuvo con una aproximación

satisfactoria. En resumen, el modelo representó la tendencia promedio de las velocidades, pero no reprodujo el comportamiento singular de los valores peaks registrados por el ADCP en Roca Remolinos.

5.4.3 Post Proceso

Luego del proceso de calibración, se procedió a realizar un análisis de la región de modelación dentro del mes sinódico. Se realizó la extracción de velocidades por corrientes de marea del módulo 3D promediadas en la vertical y por cada una de las 9 capas simuladas. Durante las mayores sicigias y cuadraturas, para la condición llenante y vaciante.

Con el fin de no entorpecer la lectura, se decidió incorporar en el Anexo 2: Salidas de Sicigias y Cuadratura del modelo 3D por capas. las imágenes de salidas por capa del módulo 3D. Como se observa en la Figura 5-52, los sectores con mayores velocidades en Sicigia son: Roca Remolinos, Bajo Young, Bajo Amazonas y al Sur de Punta redonda. La cuadratura mínima del mes (Figura 5-49) presentó velocidades menores en: Punta Tres Cruces, Bahía Pargua y Canal Caulin. Además de conocer los sectores donde se observaron las mayores y menores velocidades dentro de Canal Chacao, es útil saber cómo se distribuyen estas en la columna de agua. Se aprecia que las mayores velocidades se ubicaron entre la primera y cuarta capa, siendo la primera capa la que exhibió las mayores velocidades con algo más de $4 [m/s]$ en el sector de Roca Remolinos y $5 [m/s]$ en el sector de Bajo Amazonas. Si bien, este último presentó los mayores peaks de velocidades, considerando el promedio mensual de velocidades registró valores menores que Roca Remolino.

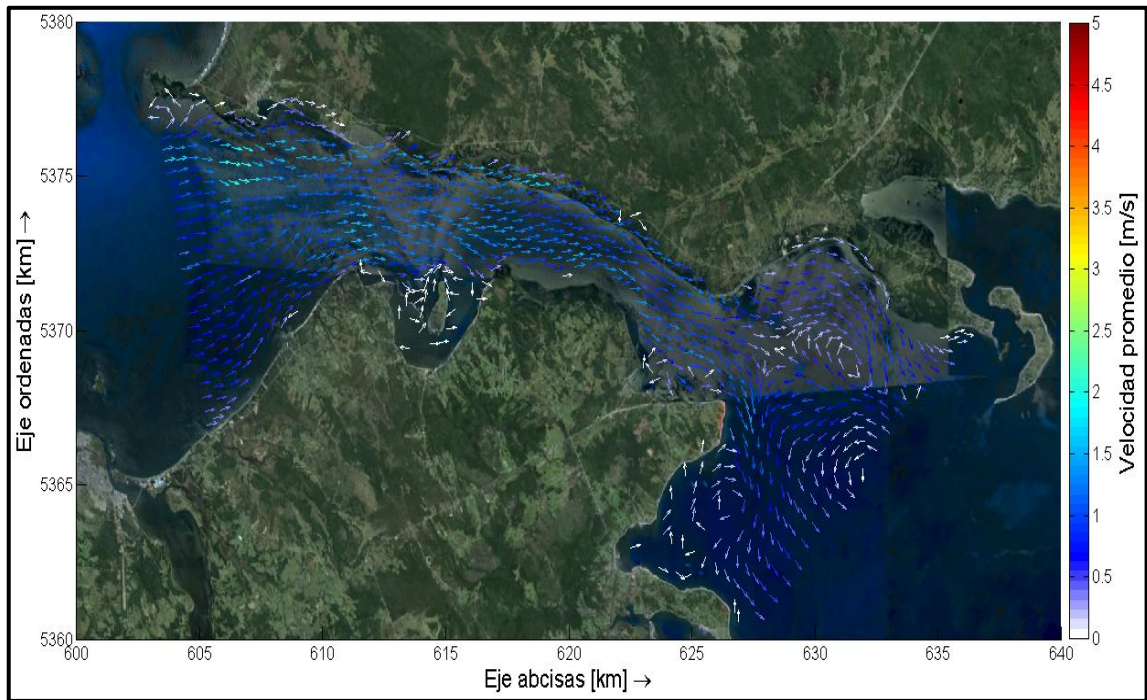


Figura 5-49: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D promedio.

Fuente: Elaboración propia.

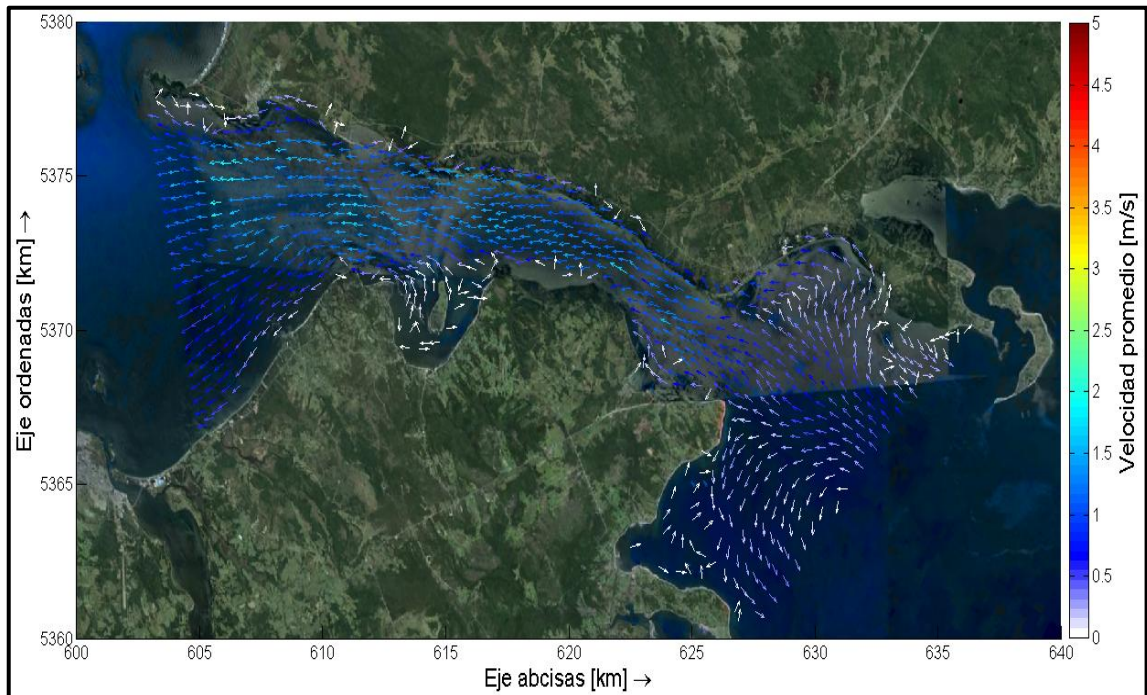


Figura 5-50: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D promedio.

Fuente: Elaboración propia.

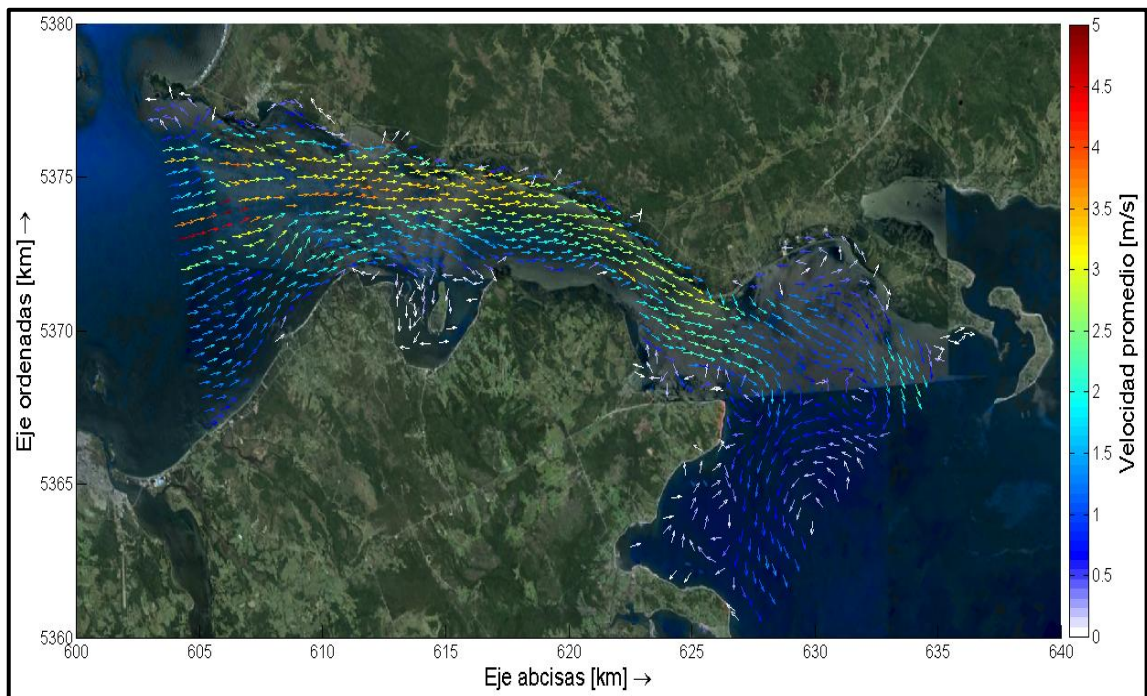


Figura 5-51: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D promedio.

Fuente: Elaboración propia.

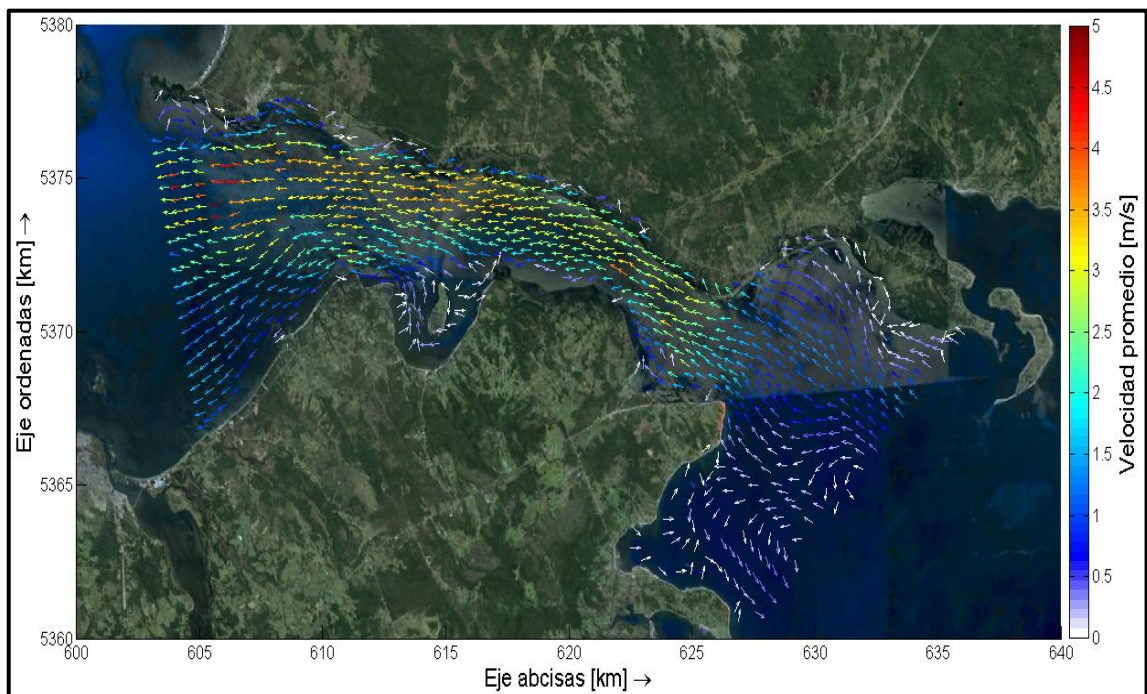


Figura 5-52: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D promedio.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Caracterización del potencial energético en zonas de interés

Como se mencionó en el acápite 4.5, para llevar a cabo el cálculo de la energía contenida dentro del sector de estudio se utilizó la ecuación (2.1.17), la cual se implementó obteniendo la potencia energética asociada a las corrientes de marea en diferentes perfiles. Además, se empleó en el cálculo de la energía promedio mensual de todo Canal Chacao, la cual se representó mediante un mapa energético (descrito en el acápite 4.7). Para desarrollar estos análisis se utilizó la metodología de ocurrencia de velocidades propuesta en el acápite 4.6. Los resultados obtenidos para cada análisis serán descritos en los acápites 5.6 y 5.7 respectivamente.

5.6 Análisis comparativo entre ambos módulos 2D y 3D

El presente acápite describe el análisis comparativo desarrollado entre los módulos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow.

➤ Análisis tiempo de simulación

En primer lugar, se consideró como parámetro de comparación el tiempo de simulación de cada módulo, para esto es necesario describir las condiciones en las que trabajaron ambos módulos. Como se aprecia en la Figura 5-53, el módulo 2D se demoró 3,57 horas en realizar el proceso de simulación completo del mes sinódico, y el módulo 3D utilizó 29,02 horas para completar el proceso.

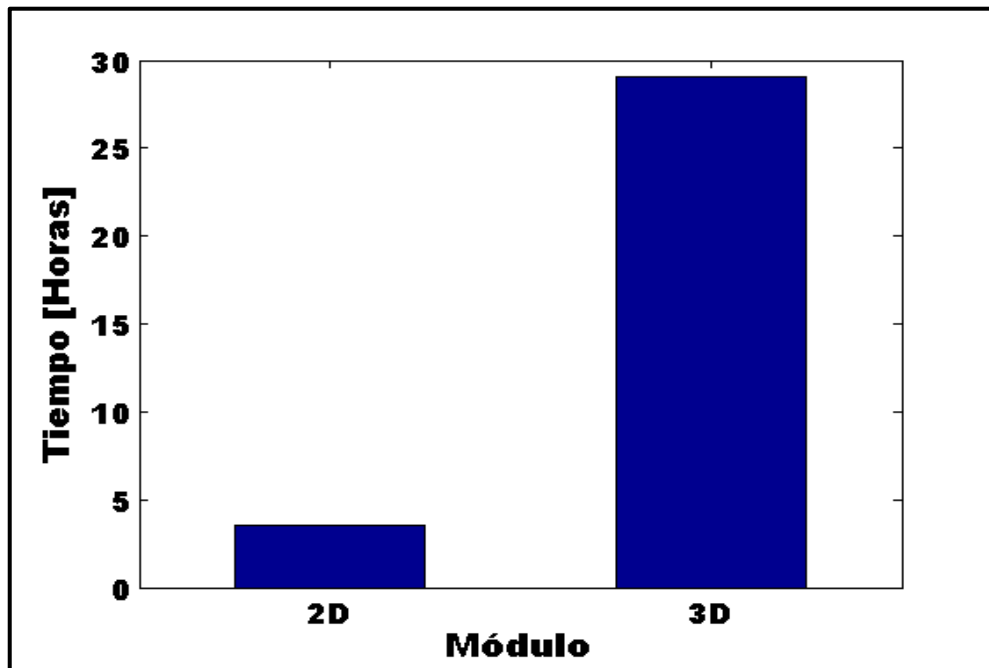


Figura 5-53: Tiempos de simulación módulos 2D y 3D del modelo Delft3D Flow.

Fuente: Elaboración propia.

➤ Análisis comparativo de la potencia energética mensual

En esta sección se compara la diferencia entre el potencial energético asociado a las corrientes de marea obtenidas por el módulo 2D versus el promedio vertical del módulo 3D, bajo tres escenarios distintos; condición llenante, vaciante y mensual. El análisis comparativo se llevó a cabo utilizando siete perfiles a lo largo del lugar, descritos en el acápite 4.6. Los resultados del análisis se sintetizaron en tres cuadros resúmenes, que representan los resultados en cada escenario propuesto. Estos cuadros cuentan con el valor de la velocidad máxima y media para las condiciones llenante - vaciante en ambos módulos. Además, se incorporó la profundidad media y máxima del sector junto con la longitud de cada perfil propuesto. Adicionalmente, se integraron los cálculos de la potencia promedio [Kw/m^2] de los perfiles para cada escenario propuesto, la cual se obtuvo mediante la ecuación (2.1.17).

De los resultados obtenidos para el escenario de velocidad promedio mensual (Tabla 6), se observó que los perfiles 1 y 5 contaron con una mayor energía. Las mayores diferencias entre las velocidades simuladas por ambos módulos se presentaron en los perfiles 1, 3, 6 y 7. En términos generales, las mayores velocidades simuladas se obtuvieron con módulo 3D, debido al mayor detalle en la columna de agua. Se observó que las velocidades máximas mensuales en condición vaciante fueron semejantes en ambos módulos, particularmente en los perfiles 3 y 4. Las máximas velocidades promedio del mes se registraron en el perfil 5 con un valor de 4 [m/s] y 4,01 [m/s], para el módulo 2D y 3D respectivamente. En condición llenante, no se presentaron mayores diferencias entre las velocidades máximas de ambos módulos, con excepción de los perfiles 1 y 5, que mostraron considerables diferencias. Respecto de las potencias promedio simuladas por ambos módulos, no se registraron mayores diferencias. La Figura 5-54, representa la ubicación de sectores que forman parte del presente estudio.

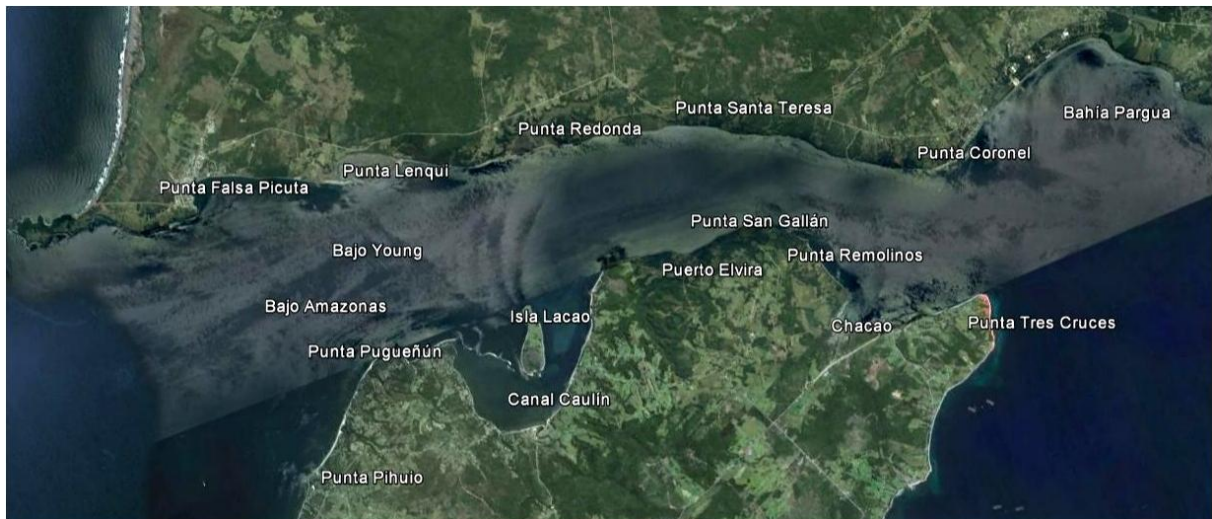


Figura 5-54: Sectores de Canal Chacao.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Cuadro energético comparativo mensual de los módulos 2D-3D.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	281126
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciante máxima 2D [m/s]	5,04	3,67	3,70	3,29	4,00	3,35	2,83	3,51
Velocidad Vaciante media 2D [m/s]	1,29	1,39	1,31	1,42	1,50	1,29	0,91	1,30
Velocidad Vaciante máxima 3D [m/s]	5,13	3,68	3,71	3,30	4,01	3,36	2,84	3,52
Velocidad Vaciante media 3D [m/s]	1,26	1,39	1,38	1,50	1,51	1,31	0,91	1,32
Velocidad Llenante máxima 2D [m/s]	3,01	3,30	3,57	2,99	3,49	2,94	2,30	3,09
Velocidad Llenante media 2D [m/s]	1,06	1,14	1,09	1,31	1,26	1,22	0,65	1,10
Velocidad Llenante máxima 3D [m/s]	3,06	3,32	3,59	3,00	3,51	2,96	2,32	3,11
Velocidad Llenante media 3D [m/s]	1,22	1,15	1,09	1,32	1,35	1,22	0,66	1,14
Potencia promedio mensual 2D [Kw/m^2]	2,37	2,12	1,96	2,08	2,74	1,95	0,52	1,97
Potencia promedio perfil mensual 2D [MW]	622,27	585,89	556,57	504,99	704,06	497,72	203,30	526,00
Potencia promedio mensual 3D [Kw/m^2]	2,40	2,12	1,98	2,08	2,78	1,97	0,54	1,98
Potencia promedio perfil mensual 3D [MW]	631,22	586,96	563,87	505,07	715,43	505,11	208,04	530,35
Diferencia energética entre módulos [%]	1,42	0,18	1,29	0,01	1,59	1,46	2,28	1,18

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 5-55, el perfil longitudinal de potencias presenta un valor cercano a 600 [MW] en el perfil 1, ubicado hacia el Oeste de Canal Chacao atravesando el Bajo Amazonas. Alcanza un valor sobre 500 [MW] en el perfil 4 y aumenta a 700 [MW] en el perfil 5. Finalmente, se tiene alrededor de 200 [MW] en el sector que atraviesa desde Punta Tres Cruces hasta la Bahía Pargua (perfil 7). Los perfiles 1 y 5, presentaron un potencial energético promedio mensual de alrededor de 600 y 700 [MW] respectivamente. El perfil 5 se presenta como una buena alternativa para la extracción del recurso disponible, pues tiene las condiciones de operatividad adecuadas para implementar un dispositivo de extracción energética. Los resultados obtenidos fueron similares en ambos módulos, siendo sutilmente mayor por parte del módulo 3D en cada perfil.

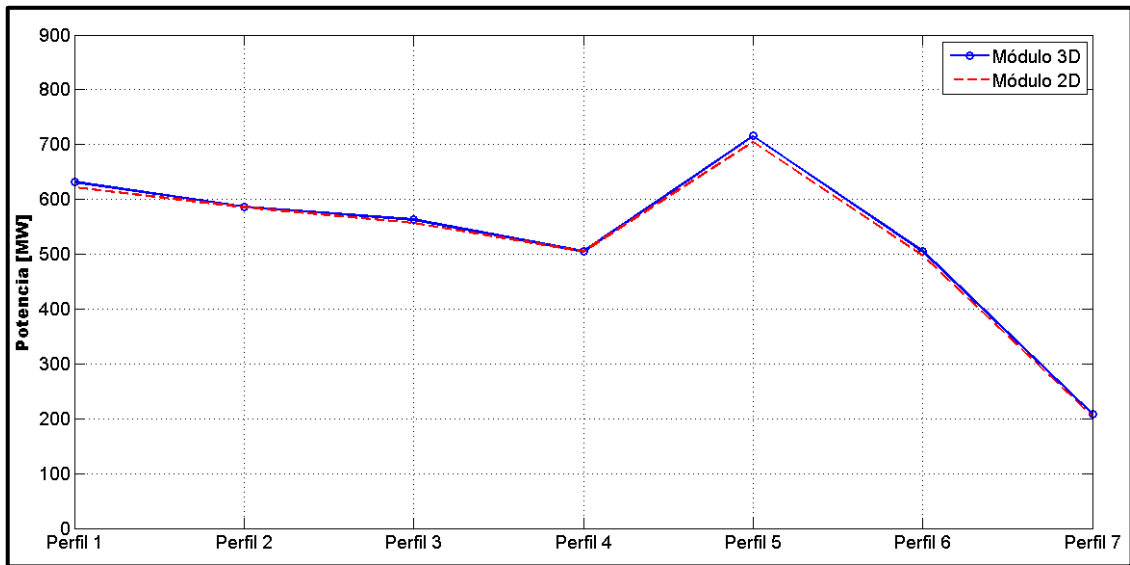


Figura 5-55: Perfil longitudinal de potencia promedio mensual en Canal Chacao – Módulo 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis comparativo usando la potencia mensual promedio por unidad de área [Kw/m^2]. Como se aprecia en la Figura 5-57 (b), las mayores diferencias no sobrepasaron los $0,05 [Kw/m^2]$, siendo los perfiles 1, 5 y 6 los que presentaron las mayores diferencias. La mayor diferencia se registró en el perfil 5 con un poco más de $40 [W/m^2]$. Esta diferencia se debe a la máxima velocidad en condición llenante.

Con el fin de profundizar en el análisis de potencia energética contenida tras los perfiles de estudio, se optó por realizar un análisis con curvas de excedencia de velocidad y potencia promedio mensual para ambos módulos. Para ello, se visualizó gráficamente la diferencia entre las curvas de excedencia de velocidad, simuladas por ambos módulos (Figura 5-56). En términos generales, existe una buena aproximación en la distribución mensual de velocidades entre los perfiles simulados con ambos módulos, siendo levemente mayores en el módulo 3D. Si bien, la mayor diferencia entre ambos módulos recayó sobre el perfil 5 (Figura 5-57 (b)) con un poco más de $40 [W]$, en general no se observaron mayores diferencias entre las curvas de excedencia. Resulta interesante mencionar que la diferencia entre las curvas de excedencia del perfil 3, se debe a las velocidades simuladas en condición vaciante (Tabla 6). Por otro lado, pese a que las mayores velocidades simuladas se observaron en el perfil 1, éste tuvo una probabilidad de excedencia de $1 [m/s]$ menor al 50%. El perfil 5, en tanto, excedió el umbral de $1 [m/s]$ en casi un 70%, conservando una excedencia mayor respecto a los demás perfiles para cada rango de velocidades. Esto se explica por el principio de conservación de la masa, es decir, el flujo que atraviesa el sector de Roca Remolinos cruza por un estrechamiento geográfico donde disminuye la sección.

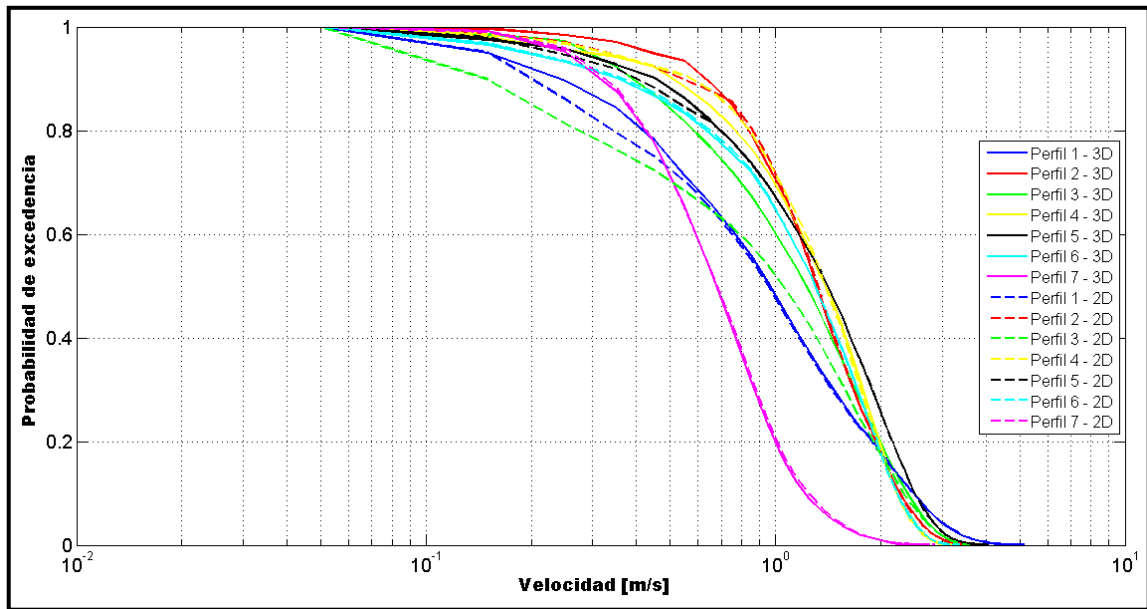


Figura 5-56: Curvas de excedencia velocidad mensual 2D-3D.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se dispuso de un análisis de la potencia por unidad de área asociada a cada perfil. Como se observa en la Figura 5-57 (a), el perfil 7 presentó la menor potencia promedio por unidad de área del mes. A pesar que las curvas de potencia obtenidas fueron similares entre ambos módulos, se apreció un leve aumento de la potencia del módulo 3D promedio. En términos generales, el perfil 7 excedió la potencia promedio mensual de $1 [Kw/m^2]$ casi un 8%. Sin embargo, no se registraron diferencias significativas entre ambos módulos para este perfil (ver Figura 5-57 (b)). Por otra parte, la mayor diferencia de la potencia promedio mensual entre los módulos se presentó en el perfil 5, lo cual se explicó por las inconsistencias relevantes en los patrones de flujo 2D alrededor de las zonas de estrechamiento.

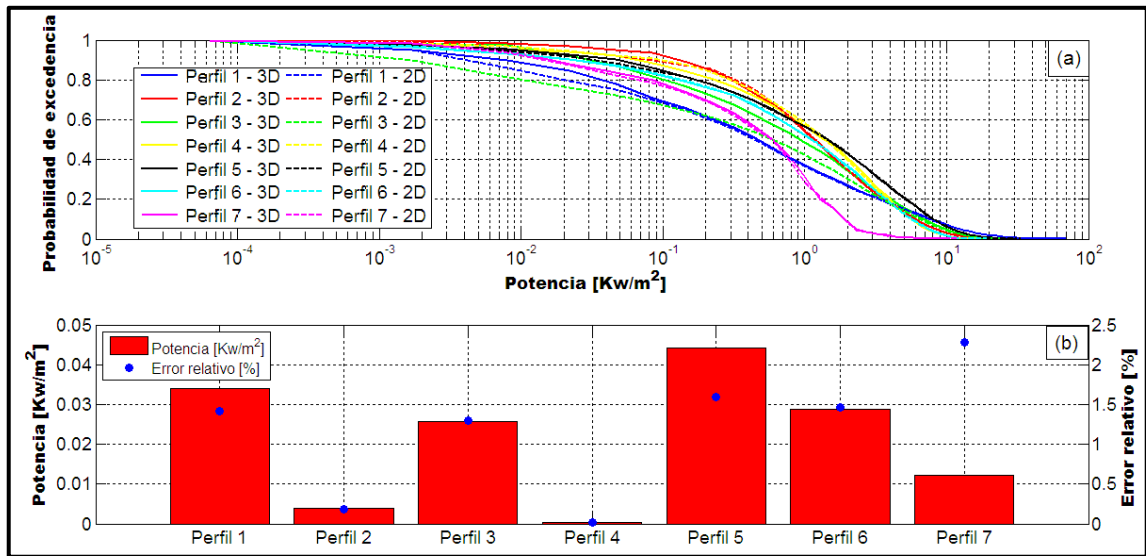


Figura 5-57: Análisis energético comparativo entre módulos condición mensual.

(a) Curvas de excedencia potencia 2D y 3D.

(b) Diferencia de potencia y error relativo entre módulos 2D y 3D.

Fuente: Elaboración propia.

- Análisis comparativo entre módulos de la potencia energética llenante

Con el fin de contar con más de un punto de análisis respecto de los resultados obtenidos entre ambos módulos, se analizó la cantidad de energía contenida bajo la condición llenante. Para determinar las magnitudes de corriente en condición llenante, se seleccionaron las velocidades en dirección hacia el segundo cuadrante (Figura 5-58).

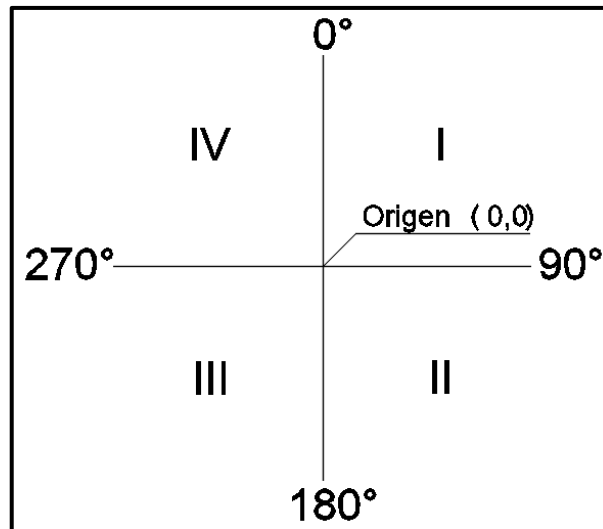


Figura 5-58: Plano cartesiano con cuadrantes en coordenadas meteorológicas.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis en condición llenante, similar al descrito en el acápite 4.6. Como se observa en la Tabla 7, existen diferencias entre los resultados en condición llenante 2D, respecto a los obtenidos en condición llenante 3D. La mayor diferencia se encuentra en el perfil 2 con $0,9 \left[\frac{Kw}{m^2} \right]$, seguida por la registrada en el perfil 5 con $0,6 \left[\frac{Kw}{m^2} \right]$. El aporte energético en condición llenante del perfil 1 fue menor al mensual, ya que las mayores velocidades de dicho perfil se observaron en la condición vaciante y mensual. Por último, es relevante mencionar que los análisis realizados bajo la condición llenante cuentan con una serie de errores asociados.

Tabla 7: Cuadro energético comparativo llenante de los módulos 2D-3D.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Llenante máxima 2D [m/s]	3,01	3,30	3,57	2,99	3,49	2,94	2,30	3,09
Velocidad Llenante media 2D [m/s]	1,06	1,14	1,09	1,31	1,26	1,22	0,65	1,10
Velocidad Llenante máxima 3D [m/s]	3,06	3,32	3,59	3,00	3,51	2,96	2,32	3,11
Velocidad Llenante media 3D [m/s]	1,22	1,15	1,09	1,32	1,35	1,22	0,66	1,14
Potencia promedio Llenante 2D [$\frac{Kw}{m^2}$]	1,51	1,58	1,92	2,07	2,49	1,81	0,34	1,67
Potencia promedio perfil Llenante 2D [MW]	395,77	437,73	547,10	503,13	639,83	464,23	130,63	445,49
Potencia promedio Llenante 3D [$\frac{Kw}{m^2}$]	1,51	1,67	1,93	2,07	2,55	1,81	0,34	1,70
Potencia promedio perfil Llenante 3D [MW]	396,04	462,12	548,75	502,58	655,24	464,41	131,53	451,53
Diferencia energética entre módulos [%]	0.06	5.27	0.30	0.11	2.35	0.04	0.68	3.81

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar a lo propuesto en el análisis comparativo mensual, se graficaron los perfiles longitudinales de potencia promedio correspondientes a la condición llenante. La Figura 5-59, representa la energía potencial contenida a lo largo del perfil longitudinal en los módulos 2D y 3D respectivamente. La potencia promedio llenante contó con un valor cercano a los 400 [MW] al sector Oeste del canal, el cual se incrementó hasta alcanzar un valor próximo a 550 [MW] en el perfil 3. En el sector Este, se obtuvo un valor máximo con alrededor de 650 [MW] en el sector de Roca Remolinos, el cual disminuyó hasta alcanzar los 130 [MW] frente a la Bahía de Pargua (Figura 5-54).

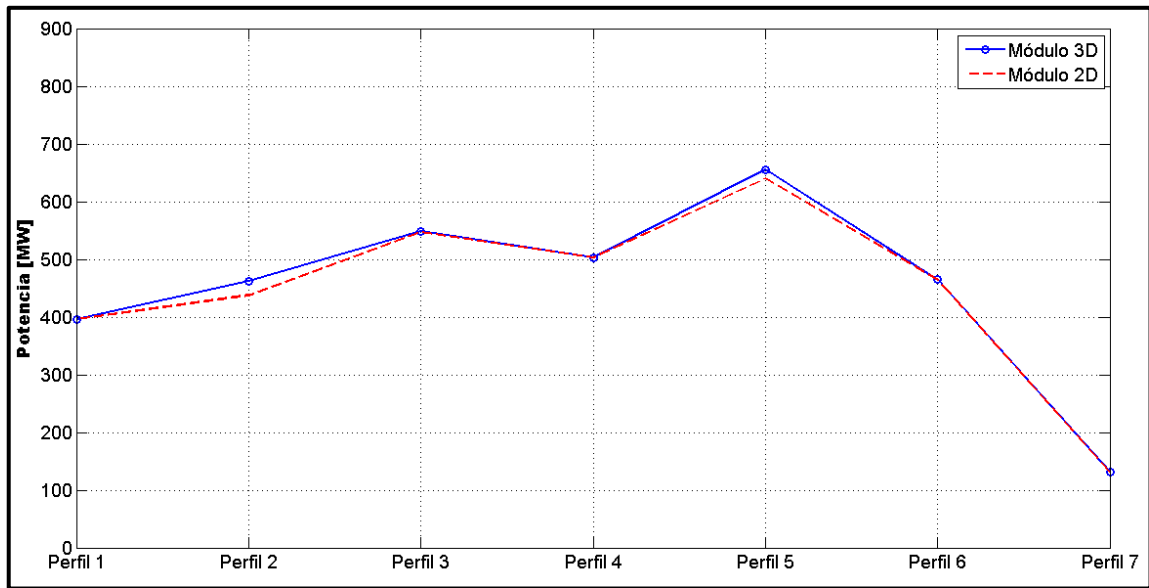


Figura 5-59: Perfil longitudinal de potencia promedio llenante en Canal Chacao – Módulo 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Se graficaron las probabilidades de excedencia de velocidades de cada módulo. Se observó que el perfil 7 presentó los menores porcentajes de excedencia de velocidades de corrientes en condición llenante en el módulo 2D (Figura 5-60). Se conservó la predominancia energética del perfil 5, el cual excedió los $2 [m/s]$ en más de un 20% de las ocasiones. Por otra parte, como se observa en la Tabla 7, los perfiles 3 y 4 excedieron los $2 [m/s]$ en un poco menos del 20% de las veces, lo cual se tradujo en una mayor cantidad de energía asociada a estos perfiles. Los perfiles 1 y 2 excedieron los $2 [m/s]$ sobre un 10% de las veces, y en un 55% y 60% de las veces la velocidad de $2 [m/s]$. Lo anterior implicó que el perfil 1 presentara un menor aporte energético bajo ésta condición. Por otro lado, a pesar de que los resultados de la simulación del módulo 3D presentaron cierta similitud respecto a los del módulo 2D, en términos generales, los perfiles del módulo 3D contaron con velocidades levemente superiores (Figura 5-60). Una prueba de esto es la clara predominancia de velocidades del perfil 5 por sobre los demás.

La Figura 5-61 (b) muestra la diferencia de la potencia promedio llenante obtenida entre los módulos, donde se registraron las mayores diferencias en los perfiles 2 y 5. En resumen, las diferencias energéticas en condición llenante obtenidas entre módulos, resultaron ser bastante reducidas con valores menores a $0,1 [Kw/m^2]$.

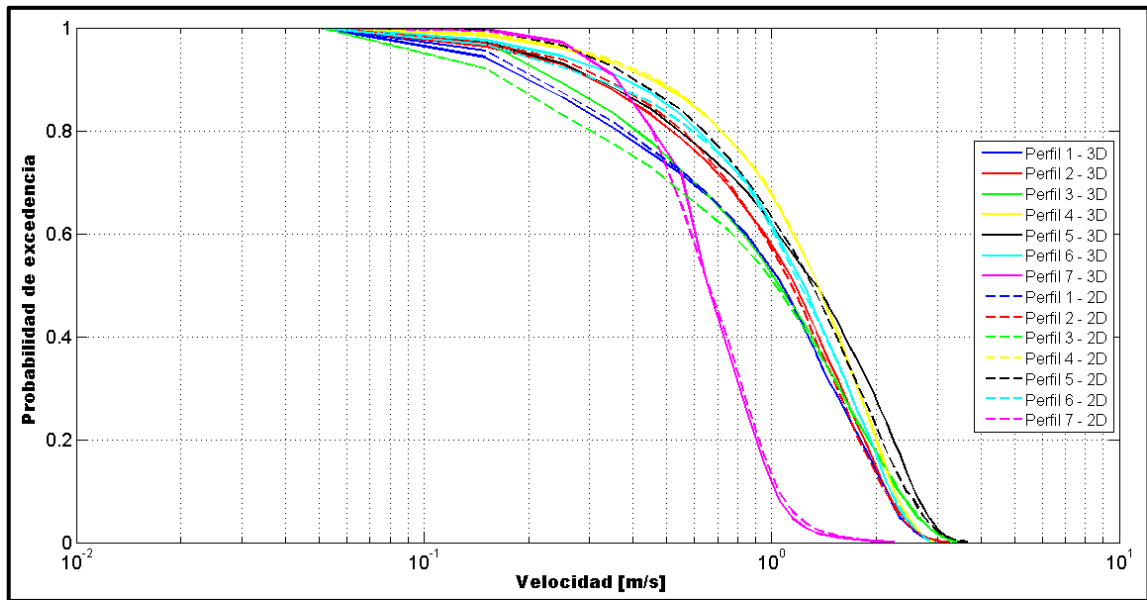


Figura 5-60: Curvas de excedencia velocidad llenante 2D-3D.

Fuente: Elaboración propia.

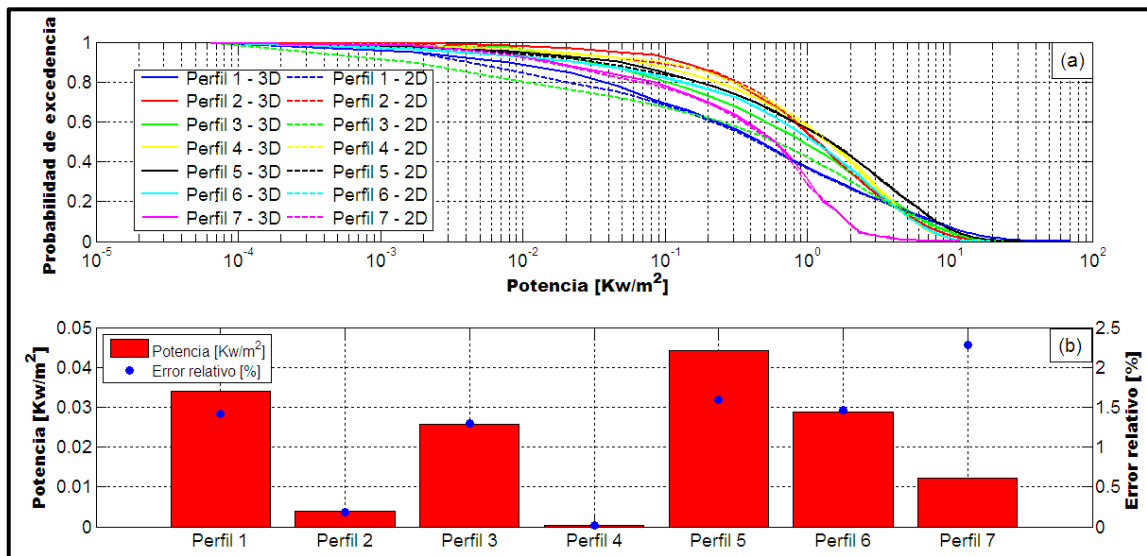


Figura 5-61: Análisis energético comparativo entre módulos condición llenante.

(a) Curvas de excedencia potencia 2D y 3D.

(b) Diferencia de potencia y error relativo entre módulos 2D y 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, luego de comparar las curvas energéticas de potencia promedio llenante entre los módulos se observó que:

El perfil 7 que representa el sector de Punta Tres Cruces hasta Bahía Pargua, registró una potencia energética en condición llenante muy reducida respecto al resto de los perfiles, contando con una diferencia mínima entre ambos módulos.

El perfil 5 cuenta con el mayor aporte bajo esta condición, excediendo los $5 [Kw/m^2]$ en más de un 20% de las veces por parte del módulo 3D, y algo menos de un 20% de las ocasiones por el módulo 2D (Figura 5-61 (a)).

El perfil 2 presentó un leve aumento en el módulo 3D, superando en más de un 10% de las ocasiones los $5 [Kw/m^2]$. El resto de perfiles contó con una excedencia similar. A pesar de que el perfil 1 alcanzó las mayores velocidades dentro del mes, presentó bajas velocidades en condición llenante. Bajo esta condición, se observaron velocidades entre $2 a 3 [m/s]$ y dentro del mes se alcanzaron valores máximos de velocidades entre $4 a 5 [m/s]$. Las menores velocidades observadas en este perfil, disminuyeron la ponderación de velocidades altas, propiciando un aporte energético menor²⁷. En resumen, se observó una excedencia de $5 [Kw/m^2]$ en más de un 10% de las ocasiones para todos los perfiles, a excepción del perfil 7.

➤ Análisis comparativo de la potencia energética vaciante

Se incorporó un tercer escenario de análisis que permitió comparar los resultados obtenidos por ambos módulos en condición vaciante. Para determinar las magnitudes de corriente en condición vaciante, se seleccionaron las velocidades en dirección hacia el cuarto cuadrante (Figura 5-58). Similar a lo mencionado en el análisis comparativo en condición llenante, se seleccionaron las velocidades de corriente $[m/s]$ asociadas a los vectores provenientes del origen (0,0). En la Tabla 8, se presenta el promedio de todos los perfiles de potencia con $605 [MW]$ para el módulo 3D, y $594 [MW]$ para el módulo 2D. Esta condición presentó valores energéticos mayores respecto de las condiciones analizadas anteriormente.

²⁷ Revisar acápite 4.6 para mayores detalles.

Tabla 8: Cuadro energético comparativo vaciante de los módulos 2D-3D.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m ²]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciante máxima 2D [m/s]	3,76	3,67	3,70	3,29	4,00	3,35	2,83	3,51
Velocidad Vaciante media 2D [m/s]	1,29	1,39	1,31	1,42	1,50	1,29	0,91	1,30
Velocidad Vaciante máxima 3D [m/s]	3,76	3,68	3,71	3,30	4,01	3,36	2,84	3,52
Velocidad Vaciante media 3D [m/s]	1,26	1,39	1,38	1,50	1,50	1,31	0,91	1,32
Potencia promedio Vaciante 2D [KW/m^2]	2,51	2,33	2,23	2,59	3,13	2,03	0,70	2,22
Potencia promedio perfil Vaciante 2D [MW]	658,56	643,74	633,46	629,89	803,21	520,60	272,08	594,50
Potencia promedio Vaciante 3D [KW/m^2]	2,51	2,35	2,25	2,62	3,16	2,15	0,75	2,25
Potencia promedio perfil Vaciante 3D [MW]	660,23	648,73	639,61	637,74	810,84	548,94	289,83	605,13
Diferencia energética entre módulos [%]	0.25	0.76	0.96	1.23	0.94	5.16	6.12	2.21

Fuente: Elaboración propia.

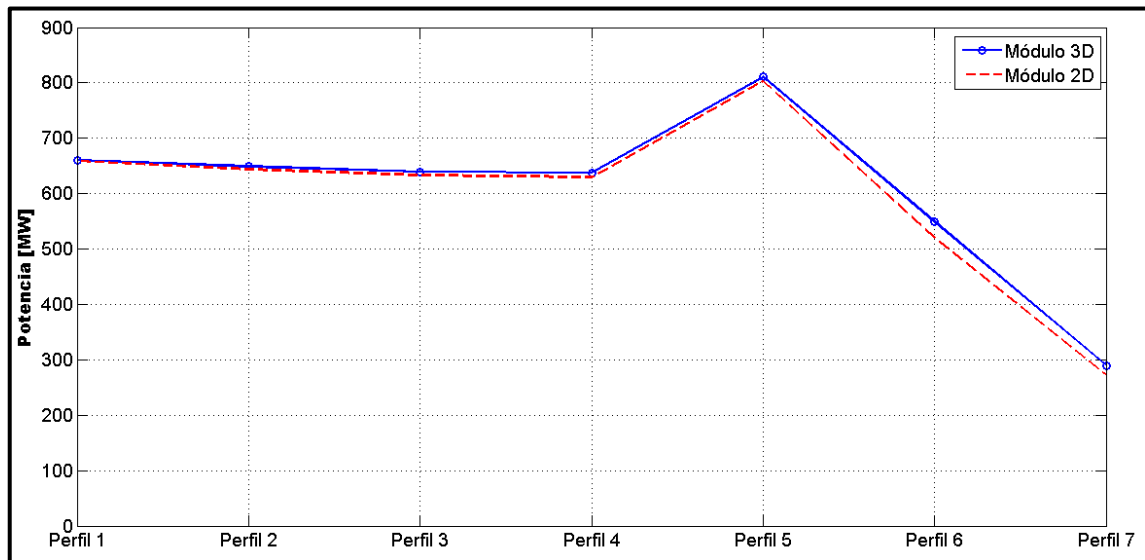


Figura 5-62: Perfil longitudinal de potencia promedio vaciante en Canal Chacao – Módulo 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5-62, los perfiles del módulo 2D presentaron un potencial energético, con algo más de 600 [MW] desde el perfil 1 hacia el Oeste del canal hasta llegar al perfil 5, donde la potencia excede los 800 [MW]. El potencial energético decreció hacia el Este alcanzando los 270 [MW] frente a la bahía de Parga, representada por el perfil 7.

Como se observa en la Tabla 8, la potencia energética obtenida mediante el módulo 3D presentó una leve superioridad respecto del módulo 2D. Esta diferencia se incrementó a medida que los resultados se aproximaron al perfil 5. En un estudio desarrollado el año 2007, se determinó que un módulo hidrodinámico 3D es capaz de cuantificar mejor las características de flujo en el espacio, respecto del módulo 2D, para sectores estrechos (Shen & Diplas, 2007). La Figura 5-62 representa el perfil longitudinal de la potencia energética promedio del módulo 3D, el cual presentó un comportamiento similar al obtenido para el módulo 2D, alcanzando 810 [MW] en el perfil 5, 660 [MW] en el perfil 1 y 605 [MW] en promedio de los siete perfiles (ver Tabla 8).

Se aprecia que la mayor diferencia energética entre los módulos corresponde al perfil 6, el cual presentó una diferencia de más de $0,12 [Kw/m^2]$ del módulo 3D sobre el módulo 2D. La menor diferencia se presentó en el perfil 1 con un poco menos de $0,01 [Kw/m^2]$ del módulo 3D por sobre el módulo 2D (Figura 5-64 (b)). Si bien, este análisis representó la condición más energética dentro del mes:

Presentó desemejanzas entre los módulos para zonas más estrechas en fenómenos de meso escala (Shen & Diplas, 2007).

Resulta un ejercicio útil para visualizar cuales fueron las condiciones de operación promedio más energéticas dentro del mes. Lo cual permite, por ejemplo, contabilizar el tiempo de operatividad en condiciones ideales para la utilización del recurso máximo disponible, observar los máximos valores que pueden alcanzar las velocidades de corrientes bajo esta condición y visualizar la cantidad de potencia máxima disponible para extraer en condiciones apropiadas.

En los perfiles correspondientes a Roca Remolinos, Punta Redonda y Bajo Seluain se rebasó la velocidad de $1 [m/s]$ en aproximadamente un 70% de las veces. El perfil 1 ubicado en la zona de Bajo Amazonas-Bajo Young, excedió esa velocidad en un 50% oportunidades, a pesar de contar con las mayores velocidades simuladas en ambos módulos dentro del mes. Por otra parte, el perfil 5 correspondiente a Roca Remolinos superó en alrededor de un 30% los 2 [m/s], el resto de perfiles lo hizo en un 20% de las ocasiones (Figura 5-63).

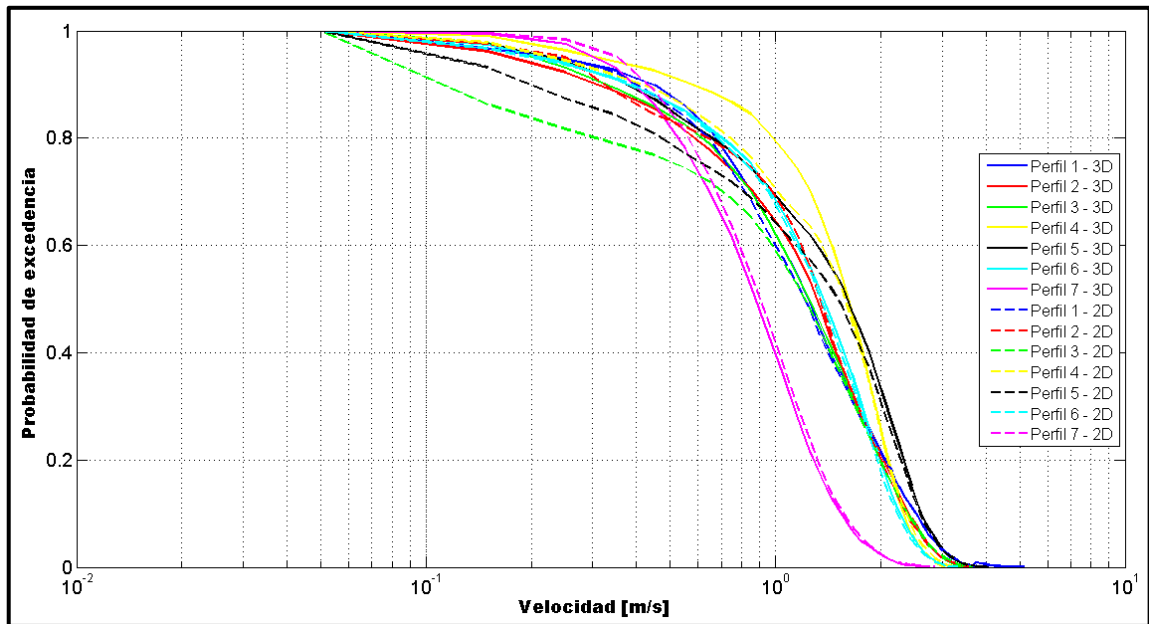


Figura 5-63: Curvas de excedencia velocidad vaciante 2D-3D.

Fuente: Elaboración propia.

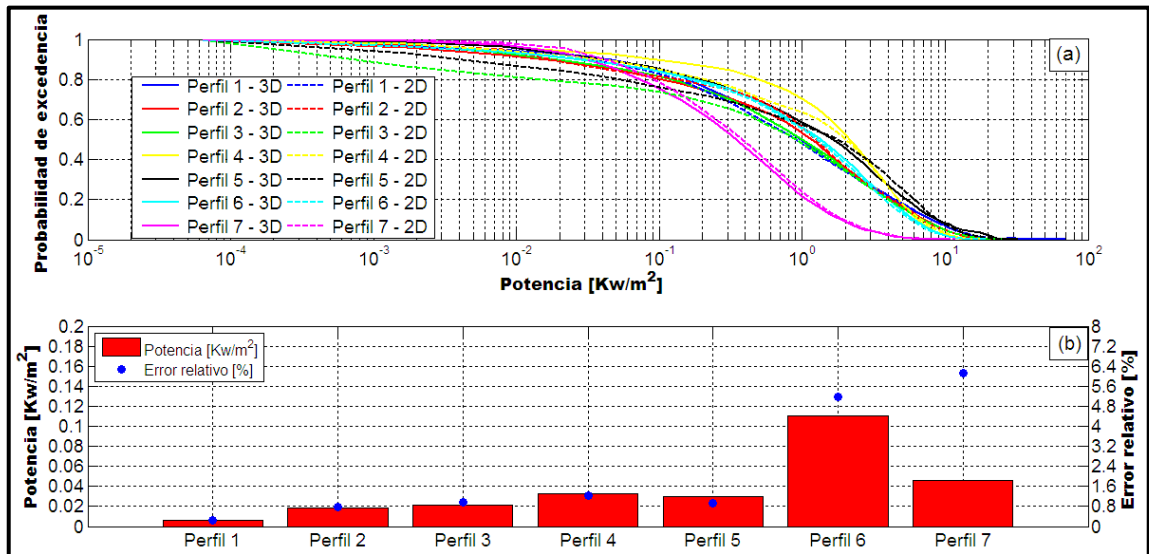


Figura 5-64: Análisis energético comparativo entre módulos condición vaciante.

(a) Curvas de excedencia potencia 2D y 3D.

(b) Diferencia de potencia y error relativo entre módulos 2D y 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Se calculó la probabilidad de excedencia de velocidades y potencia para cada módulo, utilizando los perfiles previamente seleccionados. Al evaluar la probabilidad de excedencia asociada a la velocidad, se apreció que la mayor diferencia se obtuvo en el perfil 6 (Figura

5-63), el cual excedió los 2 [m/s] casi un 19% de las veces por parte del módulo 2D. En el módulo 3D, se excedió en un poco más de un 20% esta velocidad para este perfil (Figura 5-63). Por otro lado, como se aprecia en la Figura 5-63, la excedencia de la velocidad de 1 [m/s] fue menor por el módulo 2D respecto del 3D. A pesar de contar con una tendencia similar en la distribución de velocidades, la velocidad del módulo 3D fue levemente mayor. Se mantuvo una predominancia energética en condición vaciante del módulo 3D en los perfiles 1,4 y 5, correspondientes a las zonas ubicadas en Punta Falsa Picuta - Punta Pihuio, Punta Santa Teresa-Puerto Elvira y Punta Barrancos - Punta Remolinos, respectivamente (Figura 5-54).

Se observó que la mayor parte de los perfiles excedió los 5 [Kw/m^2] en más de un 20% de las veces por parte de ambos módulos, a excepción del perfil 7, el cual presentó baja en condición vaciante. Como se visualiza en la Figura 5-64 (a), el perfil 1 presentó una excedencia de potencia de hasta 70 [Kw/m^2], no obstante, en términos generales, éste presentó un promedio de velocidades menor que las del perfil 5 para esta condición.

Por último, para resumir las principales diferencias observadas entre ambos módulos, se realizó una tabla comparativa utilizando cinco puntos de comparación. La Tabla 9 la ventaja y desventaja de utilizar cada módulo, respecto a cada punto de comparación.

En el capítulo 8.3 se incorpora un análisis detallado de la potencia energética contenida en tres capas principales:

- Superficie, obtenida del promedio de velocidades de las tres primeras capas simuladas desde la superficie hacia el fondo.
- Intermedia, que representa el promedio de velocidades obtenidas desde las tres capas de velocidad intermedias en la columna de agua.
- Fondo, que describe el promedio de velocidades obtenidas de las tres capas de velocidad consideradas desde el fondo hacia la superficie.

Esta información permite observar la distribución de la potencia energética a distintas profundidades, donde se observó que la mayor energía se concentró en la capa superficial, determinada por las tres primeras capas definidas desde la superficie en la columna de agua, donde, como se aprecia en la Tabla 10, los valores de velocidades de corrientes en los perfiles superaron en promedio los 2 [m/s]. Además, las velocidades máximas superaron los 3,8 [m/s] en algunos perfiles (perfiles 2 y 3), 5,16 [m/s] en el sector de Bajo Amazonas-Bajo Young (perfil 1), y los 4,19 [m/s] en el perfil 5 correspondiente a Roca Remolinos. Se obtiene, por tanto, un potencial que alcanza un máximo de 3,16 [Kw/m^2] en la capa superficial del perfil 5, lo que al ser analizado empleando un área más acotada, superaría holgadamente este valor.

Tabla 9: Cuadro comparativo resumen de las principales diferencias entre ambos módulos.

Módulos Hidrodinámicos - Modelo Delft3D Flow				
		Dos dimensiones (2D)		Tres dimensiones (3D)
		Resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical mediante diferencias finitas, en algunos casos incorporando modelos de cierre de turbulencia. Delft3D Flow, permite discretizar la región de estudio mediante una malla rígida (elementos cuadrículares).		Resuelve las ecuaciones de aguas someras mediante volúmenes finitos. Delft3D Flow, permite utilizar un esquema no hidrostático, disponible en mallas tipo Z. Permite discretizar la región de estudio mediante una malla rígida (elementos cuadrículares), incorporando el mallado vertical con una configuración tipo σ o Z.
Variable de comparación	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Tiempo de simulación	Requiere menor tiempo de cómputo respecto al módulo 3D, debido a que calcula la velocidad de corriente con un promedio vertical.			Requiere altos tiempos de cómputo, los cuales incrementan de acuerdo a la cantidad de capas que sean empleadas en la simulación 3D.
Calibración del modelo	Tiempo de calibración acotado para representar las velocidades promediadas en la vertical.			Requiere un tiempo de calibración mayor, debido a que precisa ser calibrado por cada capa de velocidades considerada en la vertical.
Simulación de corrientes de marea en zonas con fuerte cambio geográfico		Menor precisión respecto a la simulación hidrodinámica en sectores con fuertes cambios geográficos.	Otorga mayor precisión y detalle en los resultados, al incorporar procesos físicos en sectores con fuertes cambios geográficos.	
Potencial energético utilizable dentro de Canal Chacao		Subestima el potencial energético contenido dentro del área de estudio.	Brinda mayor detalle de la energía contenida a diferentes profundidades.	
Generalidades en aplicación energética		Posee una menor gama de opciones para determinar la implementación de dispositivos de extracción energética.	Otorga un buen detalle del comportamiento energético vertical.	

Fuente: Elaboración propia.

5.7 Creación atlas de energía potencial de promedio mensual en Canal Chacao

Para identificar la disponibilidad del recurso energético dentro de Canal Chacao a lo largo del mes sinódico, se generó un mapa energético promedio mensual. Este fue desarrollado de acuerdo a lo descrito en el acápite 4.7, donde luego de obtener los promedios mensuales energéticos para cada punto equidistante de la malla numérica (Figura 5-65). Estos fueron procesados, utilizando diferentes programas, interpolando e iterando los valores hasta obtener un mapa representativo del potencial energético promedio mensual de Canal Chacao.

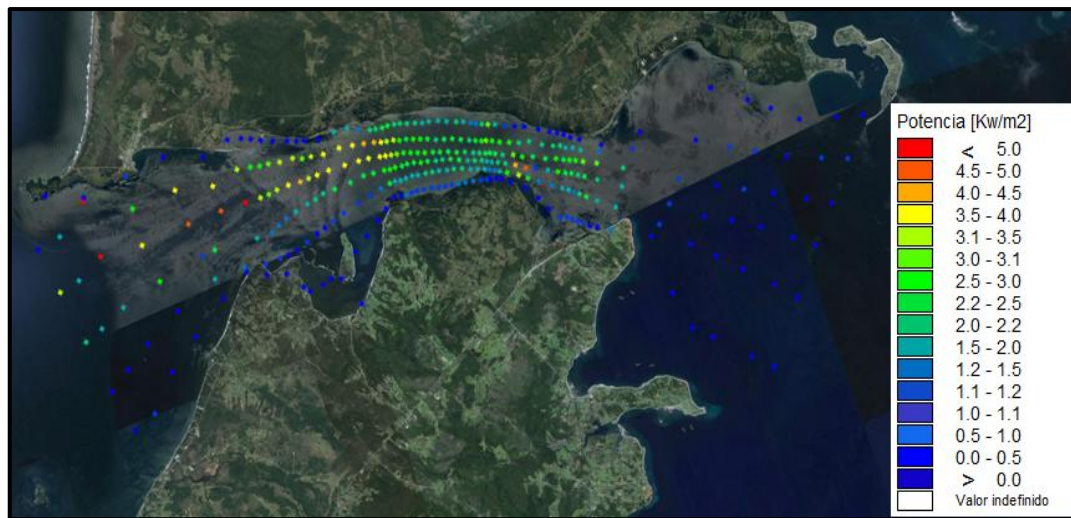


Figura 5-65: Esquema gráfico utilizado para generar mapa energético en Canal Chacao.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la potencia energética por unidad de área del módulo 3D promediado en la vertical, para toda la extensión de Canal Chacao. La Figura 5-66, presenta los sectores más energéticos dentro del mes, ubicados en zonas estrechas y con cambio de fondo considerable. Dentro de las zonas más llamativas se encuentran: El lugar de Roca Remolinos con una potencia energética promedio mensual entre 4 y 4,5 $[Kw/m^2]$, el sector de Bajo Amazonas presentó una potencia energética promedio mensual de un poco más de 5 $[Kw/m^2]$. Además, se observaron dos zonas potencialmente llamativas, una con un rango de 4,5 a 5 $[Kw/m^2]$ próxima a Punta Lenqui y una zona más extensa cerca a Punta Pugueñún con valores de potencia entre 3,5 a 4,5 $[Kw/m^2]$. Por último, se observaron dos zonas con potencia en el rango de 2,5 y 3,5 $[Kw/m^2]$, ubicadas próximas a Punta San Gallan y Bajo Seluain (Figura 5-54).

En términos generales, se observaron algunas zonas con un potencial energético promedio atractivo para la implementación de dispositivos de extracción, las cuales cuentan con una media de $4,5 \left[\text{Kw}/\text{m}^2 \right]$. La potencia en estas zonas fue representada mediante un análisis con perfiles (acápites 5.6) y un mapa energético de promedio mensual.

Los perfiles transversales utilizados en el estudio, atenuaron el verdadero aporte de potencia en las zonas de análisis respectivas. Como se observa en la Tabla 6, el valor máximo de potencia promedio mensual se registró en el perfil 5 (acápites 4.6) con $2,78 \left[\text{Kw}/\text{m}^2 \right]$. No obstante, luego de determinar la potencia mediante el mapa energético de promedio mensual (usando el procedimiento propuesto en el acápite 4.7), se obtuvieron valores de potencia energética en un rango de 4 a $4,5 \left[\text{Kw}/\text{m}^2 \right]$ para este sector, lo cual sobrepasó en aproximadamente $1,5 \left[\text{Kw}/\text{m}^2 \right]$ el valor obtenido con el análisis del acápite 5.6.

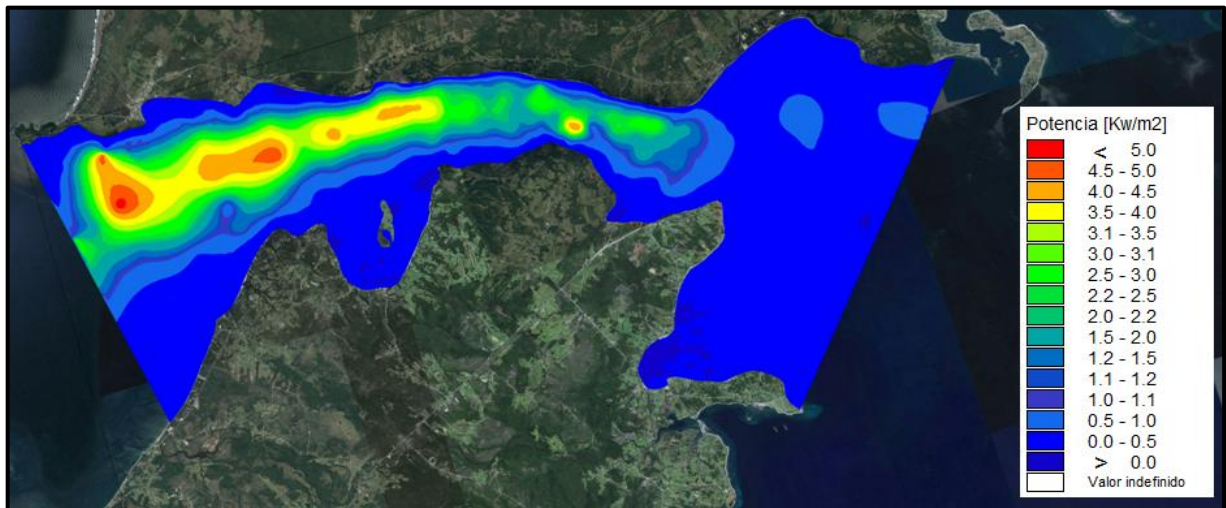


Figura 5-66: Mapa energético promedio mensual de Canal Chacao.

Fuente: Elaboración propia.

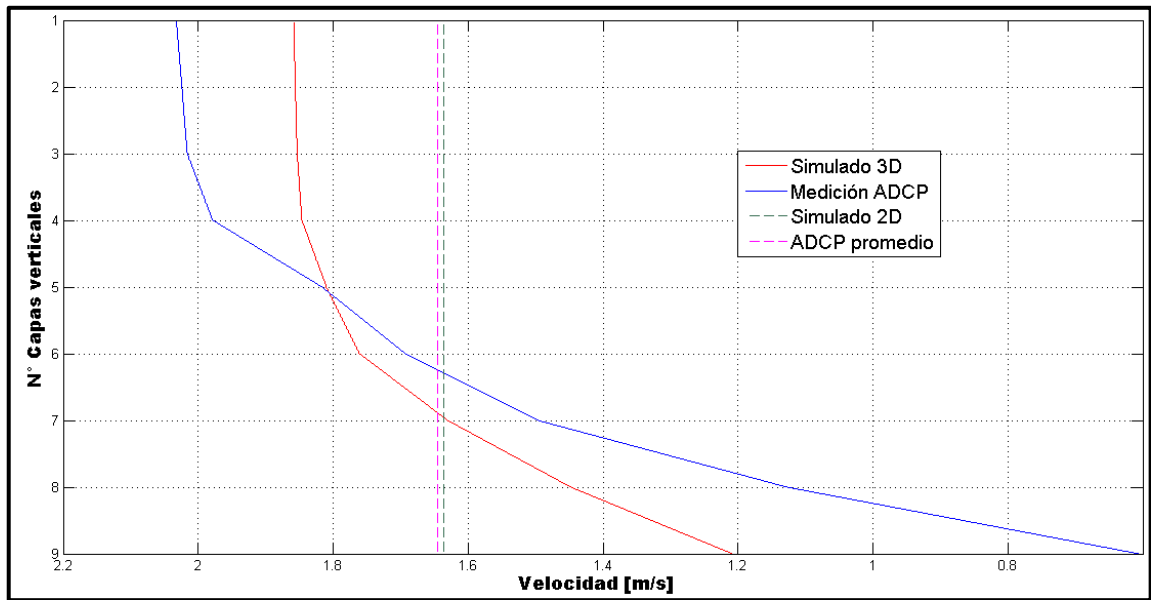


Figura 5-67: Velocidad vertical de módulos y medición en conjunto.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-67, representa la velocidad vertical promedio del mes, registrada por el ADCP con nueve capas de medición, obtenida por el módulo 3D configurado con nueve capas y la alcanzada con el módulo 2D en Roca Remolinos. En términos generales, el módulo 3D presentó diferencias respecto del promedio mensual de velocidades por capas en relación al ADCP. No obstante, al comparar el valor medio mensual simulado con el módulo 2D, versus el promedio mensual registrado por el ADCP, se aprecia una gran similitud.

En el modelo numérico, la magnitud de la corriente se redujo conforme se aproximó al fondo (ANEXO 8.1) de una manera distinta al ADCP. Por lo tanto, la velocidad de corrientes se subestimó en las capas superiores (1 a 4) y se sobrestimó desde la capa 6 en adelante. Este llamativo comportamiento en parte, se explica por la gruesa resolución de la malla horizontal en el sector de Roca Remolinos y la configuración del mallado vertical con coordenadas del tipo Z.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se analizarán los contenidos y resultados del estudio, con sus respectivas conclusiones y recomendaciones en mira de estudios futuros.

6.1 Discusión

A continuación se exhibirán los principales aspectos utilizados en el desarrollo del estudio y su aplicación en Canal Chacao.

6.1.1 Discusión sobre los módulos del modelo Delft3D Flow

Pese a que existen distintos modelos numéricos capaces de llevar a cabo el presente estudio, sólo algunos cuentan con licencias no comerciales. Ésta es una de las principales razones por las que se optó por utilizar el modelo Delft3D Flow.

Para el estudio se dispuso del registro de un ADCP emplazado en Roca Remolinos, además, de dos correntómetros en Puerto Elvira y Bajo Seluain, lo que resulta insuficiente para implementar de manera adecuada el módulo 3D.

Se contó con tres registros medidos de forma simultánea, los cuales tuvieron una duración adecuada para representar la onda de marea dentro del mes sinódico (cumpliendo con la normativa (SHOA, 2005)). Esto permitió realizar un análisis que entregó las componentes armónicas, empleadas para definir apropiadamente las condiciones mareales en el lugar. Además, posibilitaron resolver el desfase registrado en los límites abiertos del modelo, logrando así, una adecuada aproximación de la onda de marea dentro del canal.

Se contó con mediciones de corrientes en la zona, que permitieron verificar las velocidades y direcciones del módulo 2D, sin embargo, fueron insuficientes para contar con certeza del comportamiento en 3D. Finalmente, se elaboró el modelo numérico, que constó de dos módulos:

- Módulo 2D

El módulo 2D se llevó a cabo mediante un proceso estructurado utilizado para modelos hidrodinámicos, implementado gracias a la experiencia adquirida a lo largo del estudio, junto con el respaldo de estudios previos realizados en el lugar. Al realizar un contraste de la representatividad del módulo 2D respecto a otros estudios, se observó que se éste interpretó satisfactoriamente el comportamiento hidrodinámico dentro del lugar. Sin embargo, el modelo Delft3D Flow subestimó algunos peaks de velocidades de corrientes simuladas dentro del mes sinódico en el sector de Roca Remolinos, como se observa en Figura 5-21. Lo anterior se debe principalmente al uso de mallas curvilíneas, las cuales cuentan con menor certeza para representar sectores más complejos como; por ejemplo, Canal Chacao.

No obstante, el fenómeno representó adecuadamente (con un valor de R^2 sobre 75% en los tres puntos de medición) el comportamiento promedio mensual de las corrientes a lo largo del lugar.

- Módulo 3D

El módulo 3D, se desarrolló usando el mismo procedimiento empleado en el módulo 2D. A diferencia del módulo 2D, éste permitió definir el comportamiento hidrodinámico en la vertical mediante una malla tipo Z o una del tipo sigma (σ). Para el presente estudio, se utilizó la configuración de malla vertical del tipo Z con nueve capas, con el fin de representar el comportamiento registrado en la vertical por el ADCP. Además, se incorporaron los efectos de disipación de energía utilizando el esquema de turbulencia $k - \epsilon$. Se logró obtener una representación de la hidrodinámica vertical de manera suficiente (con un R^2 sobre 75% para cada capa). Dado que se trabajó utilizando la misma malla numérica propuesta en el módulo 2D, se obtuvieron resultados promedio similares del comportamiento de las corrientes dentro del mes, sin embargo, el módulo 3D no logró alcanzar los peaks de velocidad registrados en las primeras capas de la columna de agua registradas por el ADCP.

6.1.2 Discusión del análisis comparativo entre ambos módulos.

Se propuso una metodología para llevar a cabo el análisis comparativo del potencial energético asociado a las corrientes de marea en Canal Chacao. Esta metodología tenía por objetivo identificar a través de una revisión preliminar de los antecedentes y estudios recopilados, algunas zonas atractivas que presentarían condiciones favorables para la utilización del recurso energético disponible. Para ello, fueron seleccionados siete perfiles. Con los resultados del análisis, se logró identificar la cantidad de energía en condición: promedio, llenante y vaciante a lo largo del canal, siendo en términos energéticos el perfil 5 el más atractivo. La zona representada por este perfil reúne las condiciones apropiadas para la implementación de un dispositivo de extracción energética, debido a las altas velocidades de flujo que la atraviesan, ser una zona abrigada y contar con profundidades adecuadas. Una limitante observada al evaluar el potencial energético fue la forma de la malla, ya que a consecuencia de ésta no se logró tomar perfiles que atravesaran de forma perpendicular el sector de Roca Remolinos y Bajo Seluain. Éstos siguieron la forma de la malla (con una inclinación de aproximada de unos 30° hacia el Este), obteniendo una disminución de $1,41 \left[\frac{Kw}{m^2} \right]$ en el sector de Roca Remolinos respecto a los antecedentes de otros estudios realizados. Sin embargo, luego de realizar el cálculo de los puntos usados en el mapa energético, se obtuvieron resultados similares a la potencia promedio mensual esperada en cada sector (Contreras et al, 2008).

6.2 Conclusión

En términos generales, no se apreciaron diferencias significativas entre la potencia energética obtenida por los módulos del modelo Delft3D Flow. El módulo 3D, representó con mayor detalle la velocidad de corrientes, pero tuvo un tiempo de cálculo ocho veces mayor al del módulo 2D. La principal diferencia energética entre los módulos, se observó en el perfil 5 con aproximadamente $0,041 \left[\frac{Kw}{m^2} \right]$ a favor del módulo 3D. Las potencias promedio de las secciones elegidas a lo largo del canal, variaron entre los 400 y 700 $[MW]$ con un valor de área promedio de $280.000 [m^2]$, equivalente a $1,98$ a $2,78 \left[\frac{Kw}{m^2} \right]$, a excepción del perfil 7 con $0,54 \left[\frac{Kw}{m^2} \right]$. Estos valores corresponden a promedios en las secciones y resultan menores que los valores obtenidos por puntos específicos definidos dentro del mapa energético (acápite 5.7).

En base a la modelación realizada por ambos módulos en Canal Chacao, se identificaron cuatro sitios atractivos donde las velocidades alcanzaron o superaron en promedio los $2 [m/s]$, mientras que, las velocidades máximas sobrepasaron los $3,5 [m/s]$, llegando a los $5 [m/s]$ en un sector en particular. Estos sitios corresponden a: Roca Remolinos, Bajo Amazonas- Bajo Young, Bajo Seluain y frente a Punta Redonda.

La potencia de las secciones en la capa superficial (correspondiente al promedio de velocidades obtenidas de las capas 1,2 y 3 desde la superficie del módulo 3D), varió entre los 620 y $810 [MW]$, a excepción del perfil 7 (Punta Tres Cruces – Bahía Pargua) con aproximadamente $160 [MW]$, como se observa en la Figura 8-55. Esta potencia decae hacia el fondo, oscilando entre 500 y $745 [MW]$ en la capa intermedia, descrita en la Figura 8-64 (representativa del promedio de velocidades de la capa 4,5 y 6 del módulo 3D), con excepción del perfil 7 con $135 [MW]$. Finalmente, como se aprecia en la Figura 8-73, la capa de fondo registró potencias entre 350 y $580 [MW]$, con excepción del perfil 7 con $103 [MW]$.

Al comparar las ventajas y desventajas de utilizar cada módulo, se concluye que el uso de cada uno viene dado por los requerimientos del estudio. En términos de recursos y de uso (Como tiempos de simulación, facilidad de uso y utilidad) el módulo 2D se perfila como una buena opción para representar el fenómeno. En estudios que requieran de mayor detalle, el módulo 3D se perfilaría como la mejor opción, ya que permite apreciar la energía disponible en la columna de agua.

Dada las condiciones ya descritas se concluye que la utilización de cada módulo vendrá determinada directamente por los requerimientos del estudio y los recursos disponibles para llevarlo a cabo.

Por otra parte, es importante resaltar que el estudio finalizó con cada uno de los objetivos abordados completamente.

6.3 Recomendaciones

A continuación, se presentan algunas recomendaciones útiles para estudios posteriores que puedan ser llevados a cabo mediante modelos de código abierto.

- Se recomienda realizar campañas de mediciones que cuenten con una buena distribución espacial y además posean información del comportamiento vertical de las corrientes [m/s]. Esto, con el fin de permitir una mejor calibración de ambos módulos del modelo numérico.
- Utilizar la herramienta DD²⁸ incorporada en el modelo Delft3D Flow, para generar una malla de elementos mejor que la presentada en este estudio, tal que cuente con los sectores de interés anidados, controlando mejor el tamaño y forma de los elementos.
- Se sugiere utilizar una batimetría de mayor resolución a lo largo de toda la extensión, ya que el término de profundidad es parte de las ecuaciones de momentum, conservación de la masa y volumen. Por lo que, la menor precisión de este valor, influye directamente en los resultados del modelo.
- Debido a la cantidad de energía contenida en el sector de Bajo Amazonas-BajoYoung, se propone realizar estudios de modelación acotados en torno a esta zona empleando el módulo 3D. Además, recopilar mayor información del origen de estas corrientes, determinando finalmente, si es factible y cuál sería el mejor sector para implementar un dispositivo de extracción energética en este lugar.
- El módulo 3D representó el comportamiento promedio por capas en la vertical, sin embargo, no alcanzó los peaks dentro del mes. Por lo tanto, se recomienda contar con una mayor cantidad de mediciones verticales que permitan corroborar esta situación, realizando una nueva modelación numérica en 3D usando el modelo Delft3D Flow, incorporando otra técnica de modelación; por ejemplo, de contar con buena información batimétrica, elaborar una malla anidada con elementos de tamaño definido.
- Se recomienda realizar un análisis complementario con ambos módulos del modelo, utilizando el módulo 2D para ubicar en planta las zonas energéticas más atractivas y posteriormente realizar modelos 3D acotados sobre estas zonas, tal que permitan verificar las profundidades donde se registran las mayores velocidades de corriente en la columna de agua.

²⁸ Este método consiste en trabajar con mallas anidadas, permitiendo definir con mayor precisión el tamaño de los elementos.

7 REFERENCIAS

Bakhmetev, B. A. (1932). *Hydraulics of open channels*. New York: Ing. Soc. Mongrafia. McGraw-Hill.

Baumert, H., & Radach, G. (1992). Hysteresis of Turbulent Kinetic Energy in Nonrotational Tidal Flows: A model Study. *Journal of geophysical Research*. Vol. 97. No. C3. , 3669-3677.

Burchard, H., & Baumert, H. (1995). *On the performance of a mixed-large model based on the k-epsilon turbulence closure*. *Journal of Geophysical Research* 100 (C5): 8523-8540.

Contreras et al, M. (2008). *Evaluación del potencial de energía de las corrientes de marea en el Canal Chacao, X región, Chile*. Viña del Mar: HydroChile S.A.

Davies, A. M., & Gerritsen, H. (1993). An intercomparison of three-dimensional tidal hydrodynamic models of the Irish Sea. *TELLUS* , 200-221.

De Vriend, H. J., & Stive, M. J. (1987). Quasi-3D of Nearshore Currents. *Elsevier Science Publisher* , 565-601.

De Vriend, H., & Stive, M. (1987). *Quasi-3D Modelling of Nearshore Currents*. The Netherlands: MH Delft.

Deltares. (2014). *Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments User Manual*. Boussinesqweg: Deltares.

Dissanayake, P. K. (2011). *Modelling morphological response of large tidal inlet systems to sea level rise*. Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education and TU Delft.

Forester, C. (1979). *Higher Order Monotonic Convective Difference Schemes*. *Journal of Computational Physics*.

García et al, F. (2010). *Constituyentes de marea en la bahía de Santa María (Colombia)*. Medellín.

García, R. (2009). *Evaluación del potencial de la energía de marea para generación en sistemas aislados*. Viña del mar: UTFSM.

Garland, G. D. (1965). *The Earth's Shape and Gravity*. Oxford: Pergamon Press , 183 pp.

Gerritsen et al, H. (2007). *Validation Document Delft3D-FLOW*. Stevinweg: WL Delft Hydraulics.

Gjevik, B. (2006). *Lectures on Tides*. Oslo: UNIS.

- Hartmann, D. L. (1994). *Global Physical Climatology*. California: Academic Press.
- Hearn, C. J. (2008). *The Dynamics of Coastal Models*. New York: Cambridge University.
- Henrotte, J. (2008). *Implementation, validation and evaluation of Quasi-3D in Delft3D*. Stevinweg: Technique University of Delft.
- Hicks, S. D. (2006). *Understanding Tides*. Washington: NOAA.
- Kapoulitsas, G. M. (1985). On the generation of tides. 201-207.
- Kolmogorov, A. N. (1942). "Equations of turbulent motion in incompressible fluid". *Izv. Akad. Nauk. SSR.* , 56-58.
- Lesser, G. R. (2009). *An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling*. The Netherlands: CRC Press.
- Lu, Q.-M. (1998). *Three dimensional modeling of hydrodynamics and sediment transport whit parallel algorithm*. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University.
- Mader, C. L. (2005). *Numerical Models of Water Waves*. Washington, D.C.: CRC PRESS.
- Malebrán, C. U. (2013). Energías Renovables. *Centro de Energías Renovables, Ministerio de Energía* , 16.
- Mellor, G. L., & Blumberg, A. F. (1985). Modeling Vertical and Horizontal Diffusivities whit the Sigma Coordinate System. *American Meteorological Society* , 1379-1383.
- Ministerio de Energía, M. (2012). *Estrategia Nacional de Energía 2012 - 2030*.
- Parker, B. B. (2007). *Tidal analysis and prediction*. New York: NOAA.
- Pawlovicz, e. a. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in Matlab using T_Tide. *Computers Geosciences* , 929-937.
- Postma et al, L. (1998). *Three-dimensional water quality and hydrodynamic modelling in Hong Kong. Stratification and water quality*. Bakelma, Rotterdam: In Proceedings of the 2nd International Symp. on Environmental Hydraulics, Hong Kong.
- Prandtl, L. (1945). Uber ein neues Formelsystem fur die ausgebildete Turbulenz. *Nachrichten von der Akademie der Wissenschaften in Gottingen* , 6-19.
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, surges and Mean Sea Level*. Swindon, UK: Natural Enviroment Research Council.

Rodi, W. (1984). *Turbulence models and their application in Hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'etat de connaissance*. Netherlands: IAHR.

Rodriguez et al, R. M. (2004). *Meteorología y climatología*. Barcelona: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

Sepúlveda, I. (2010). *Simulación de turbinas hidráulicas para extracción de energía de mareas en modelos hidrodinámicos y aplicación en Canal Chacao*. Valparaiso: UTFSM.

Shen, Y., & Diplas, P. (25 de Septiembre de 2007). Application of two- and three-dimensional computational fluid dynamics models to complex ecological steam flows. *Journal of Hydrology* , 195-214.

SHOA. (2003). Especificaciones técnicas para la ejecución de sondeos. *Publicación 3105* , 5-7.

SHOA. (2005). Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. *Publicación 3201* , 11-14.

SHOA. (1992). *Glosario de marea y corrientes*. Valparaiso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

Stelling, G. S., & Leendertse, J. J. (1992). Approximation of Convective Processes by Cyclic AOI methods. Tampa: ASCE.

Stewart, R. H. (2008). *Introduction to Physical Oceanography*. Texas: Texas A & M University.

Stokes, G. (1847). On the theory of oscillatory waves. *Trans. Cambridge Philos. Soc.*

Uittenbogaard et al, R. (1992). *Implementation of three turbulence models in 3D-TRISULA for rectangular grids*. The Netherlands: WL/Delft Hydraulics.

Uittenbogaard, R. (2003). *Modelling turbulence in vegetated aquatic flows*.

UNEP, A. d., O. H., & B. E. (20 de 08 de 2010). *Chile Paraíso Energía Mareomotriz*. Obtenido de Chile Paraíso Energía Mareomotriz: <http://www.energiamareomotriz.cl>

Van Leer, B. (1974). *Towards the ultimate conservative difference scheme II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme*. *Journal of Computational Physics*.

Winckler Grez, P. (2012). *Non Linear Wave Theories*. New York: Cornell University.

8 ANEXO

8.1 Anexo 1: Resultados calibración modelo 3D por capas.

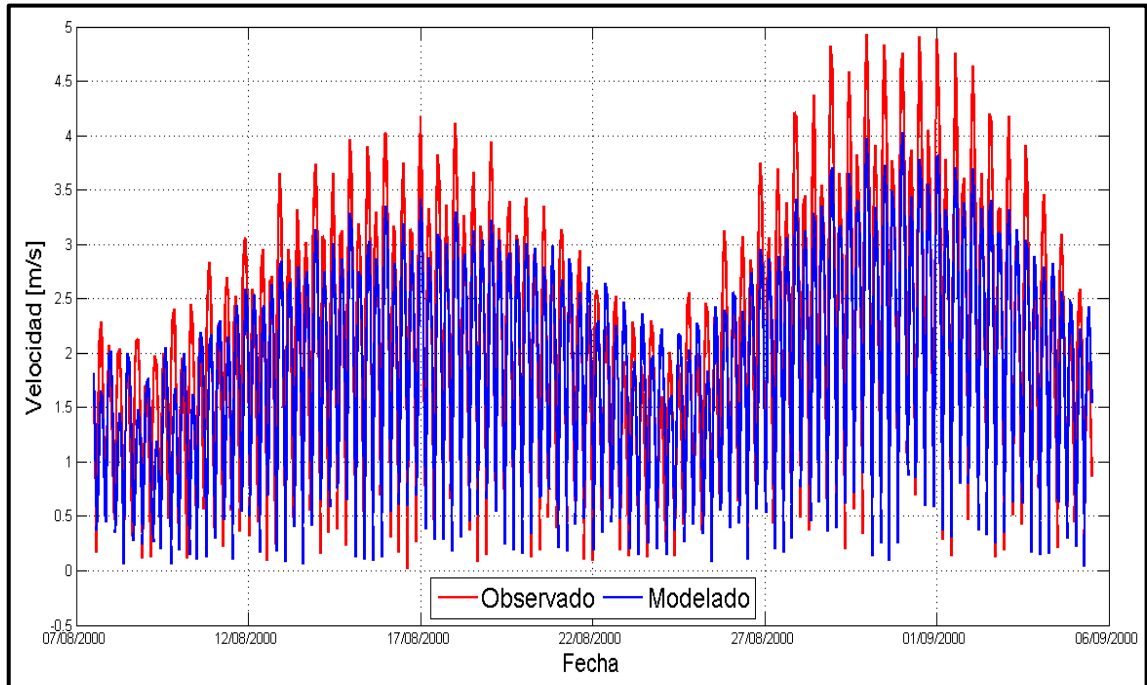


Figura 8-1: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 2.

Fuente: Elaboración propia.

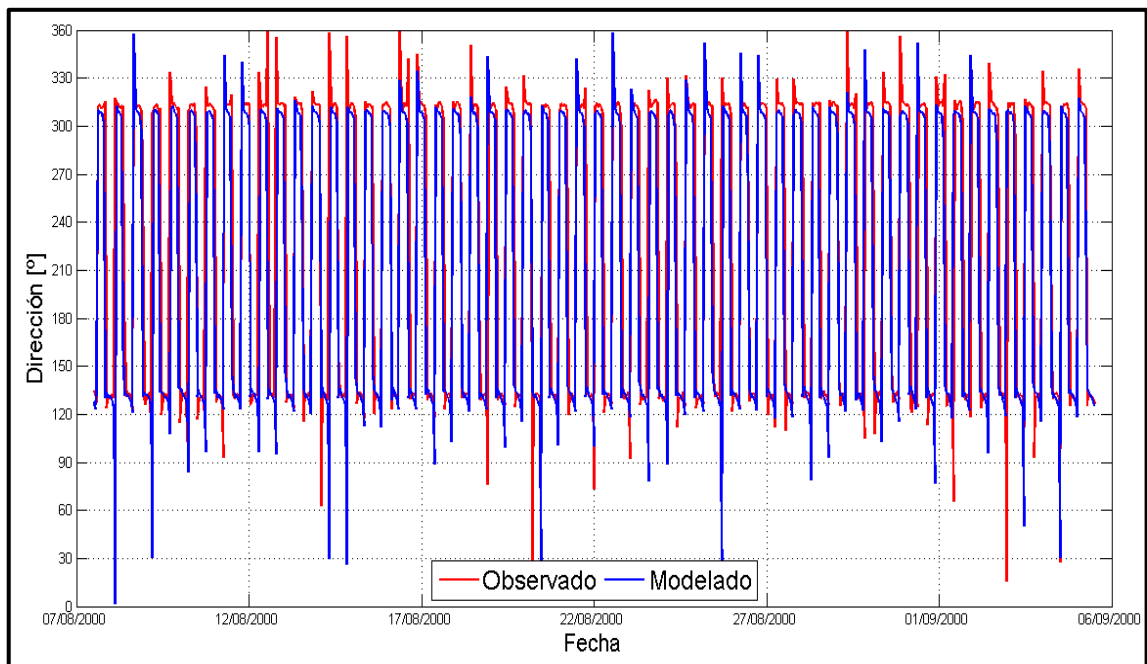


Figura 8-2: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 2.

Fuente: Elaboración propia.

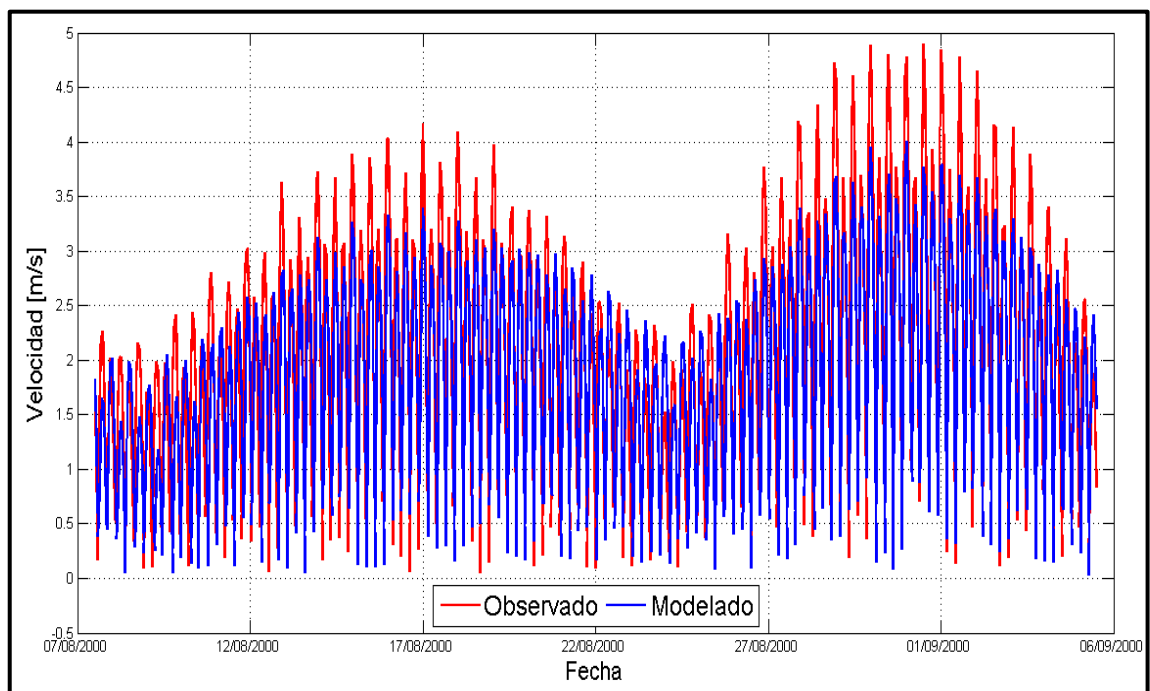


Figura 8-3: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 3.

Fuente: Elaboración propia.

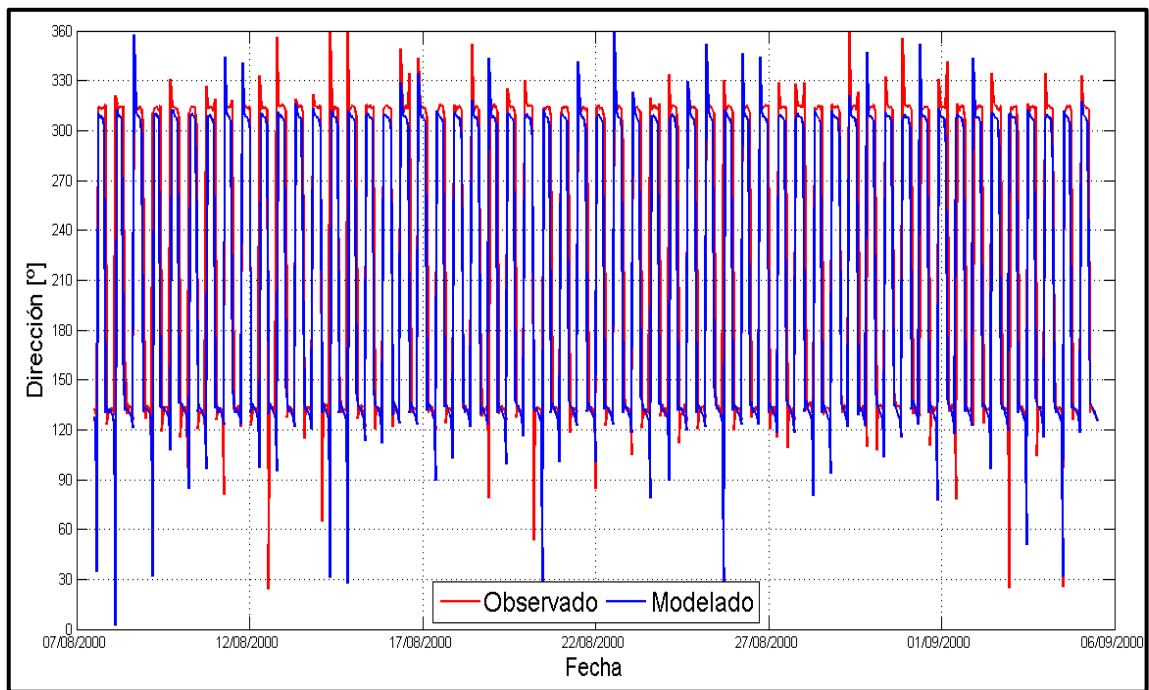


Figura 8-4: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 3.

Fuente: Elaboración propia.

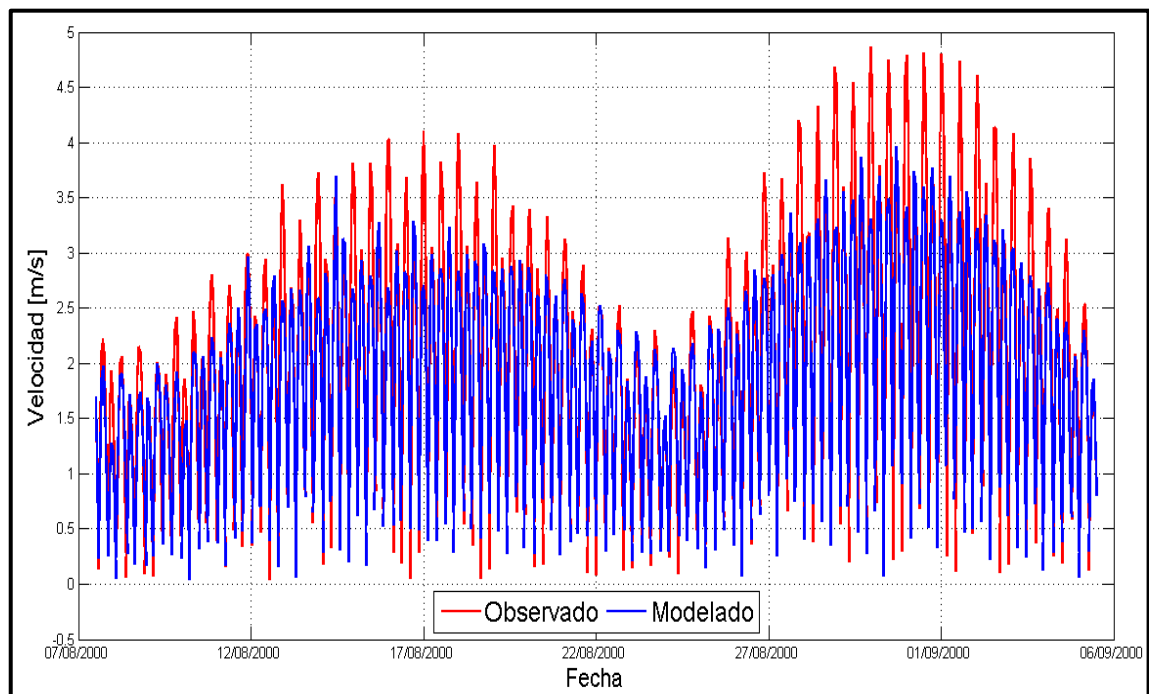


Figura 8-5: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 4.

Fuente: Elaboración propia.

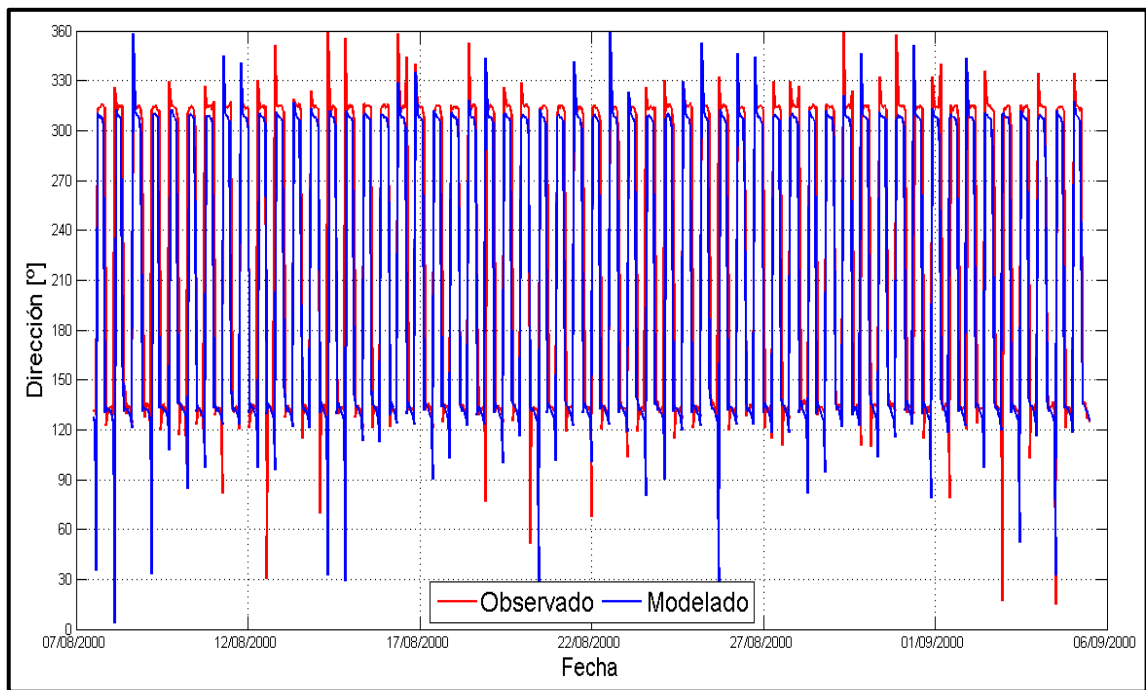


Figura 8-6: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 4.

Fuente: Elaboración propia.

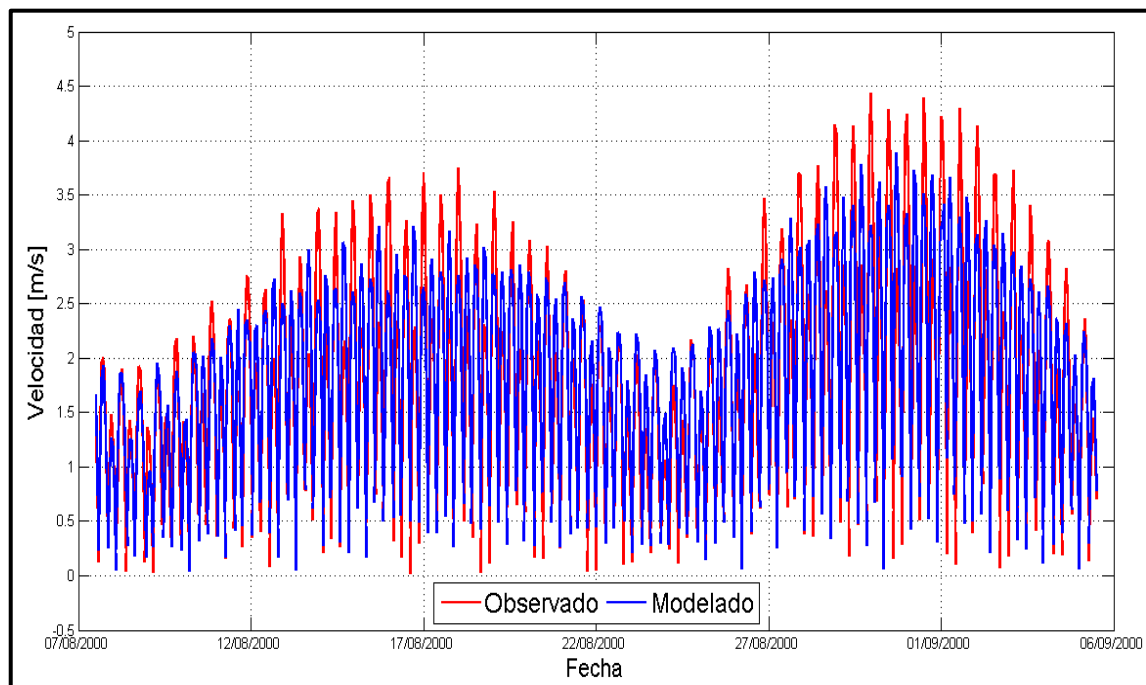


Figura 8-7: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 6.

Fuente: Elaboración propia.

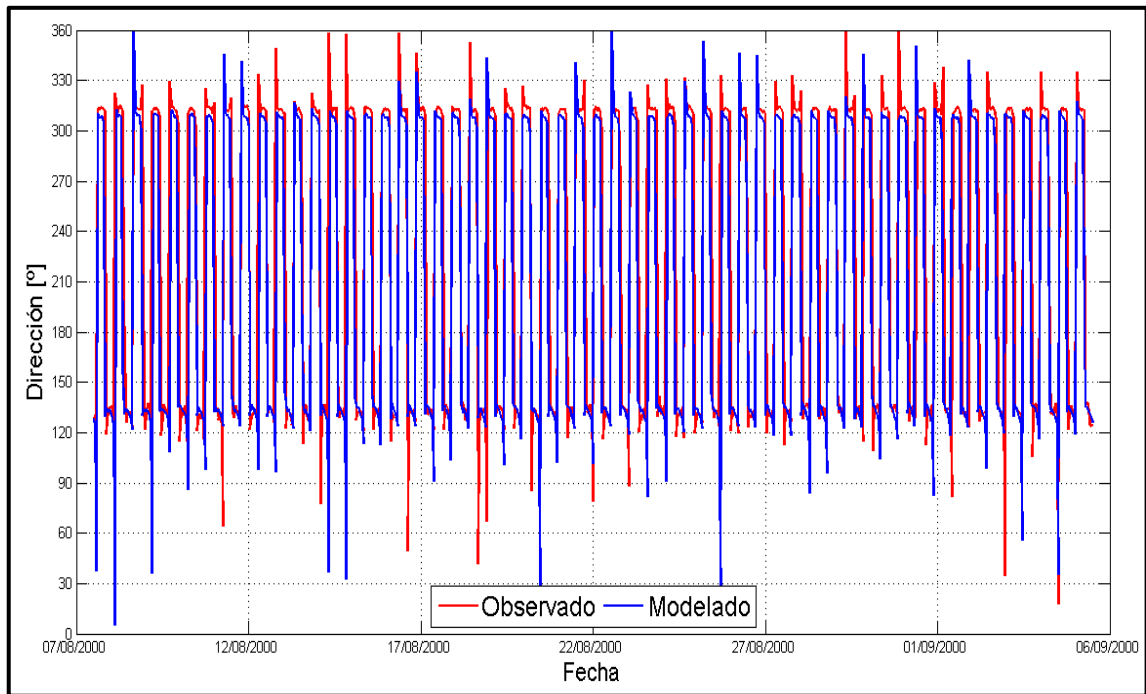


Figura 8-8: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 6.

Fuente: Elaboración propia.

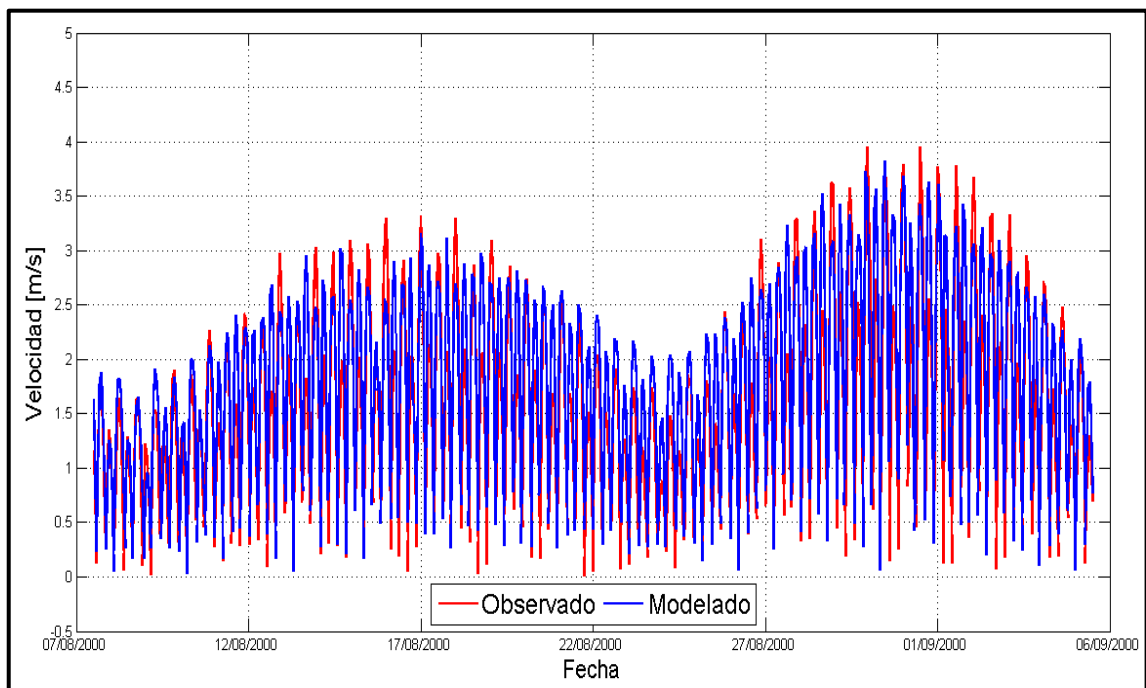


Figura 8-9: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 7.

Fuente: Elaboración propia.

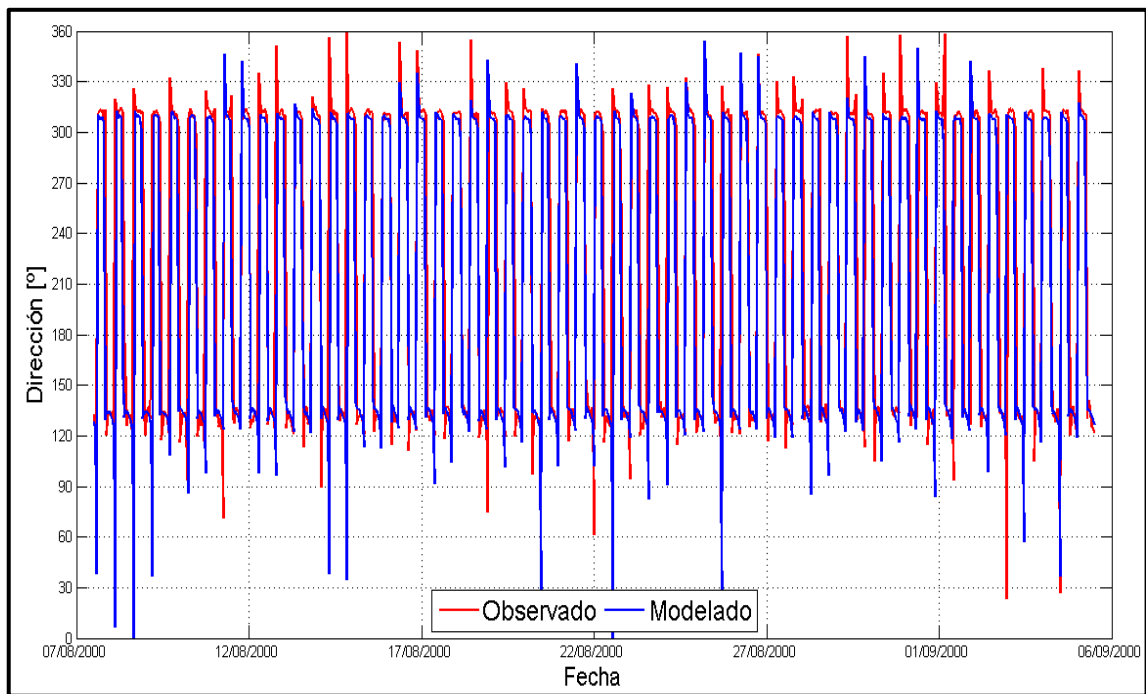


Figura 8-10: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 7.

Fuente: Elaboración propia.

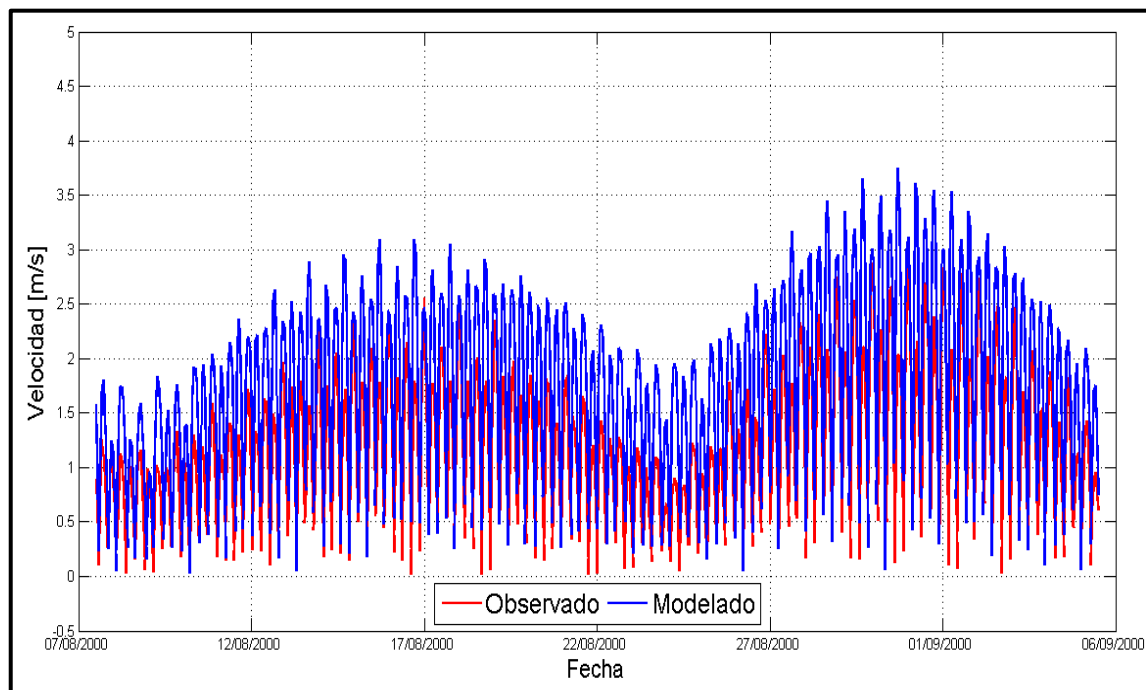


Figura 8-11: Magnitud de corrientes – Roca Remolinos capa 8.

Fuente: Elaboración propia.

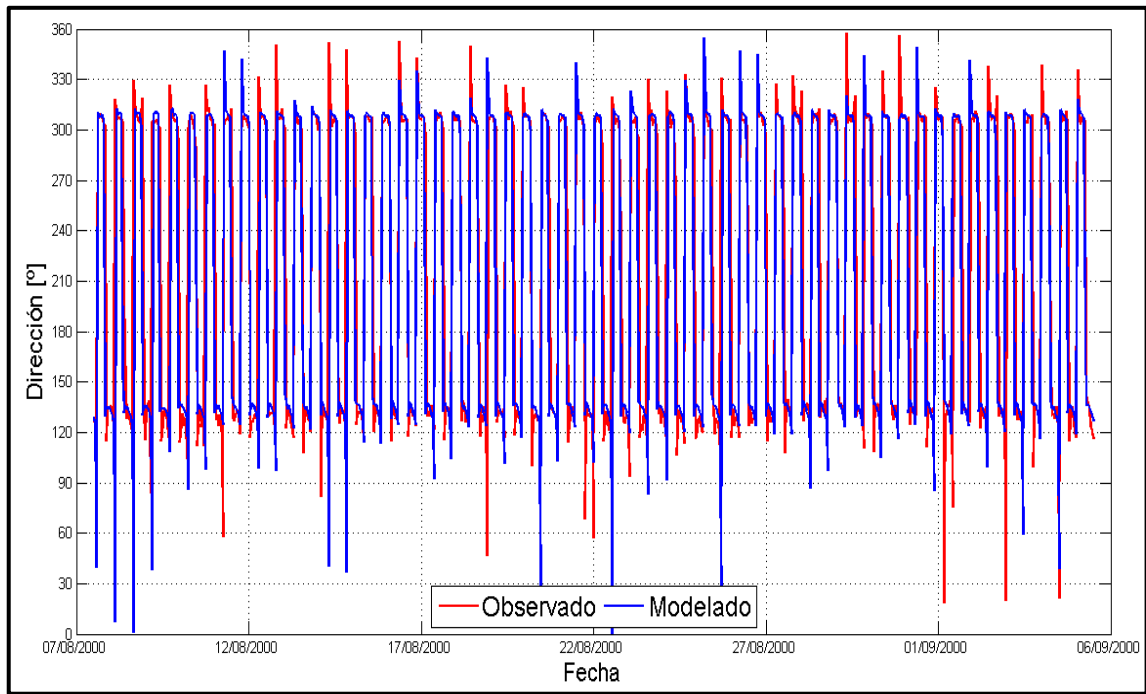


Figura 8-12: Dirección de corrientes – Roca Remolinos capa 8.

Fuente: Elaboración propia.

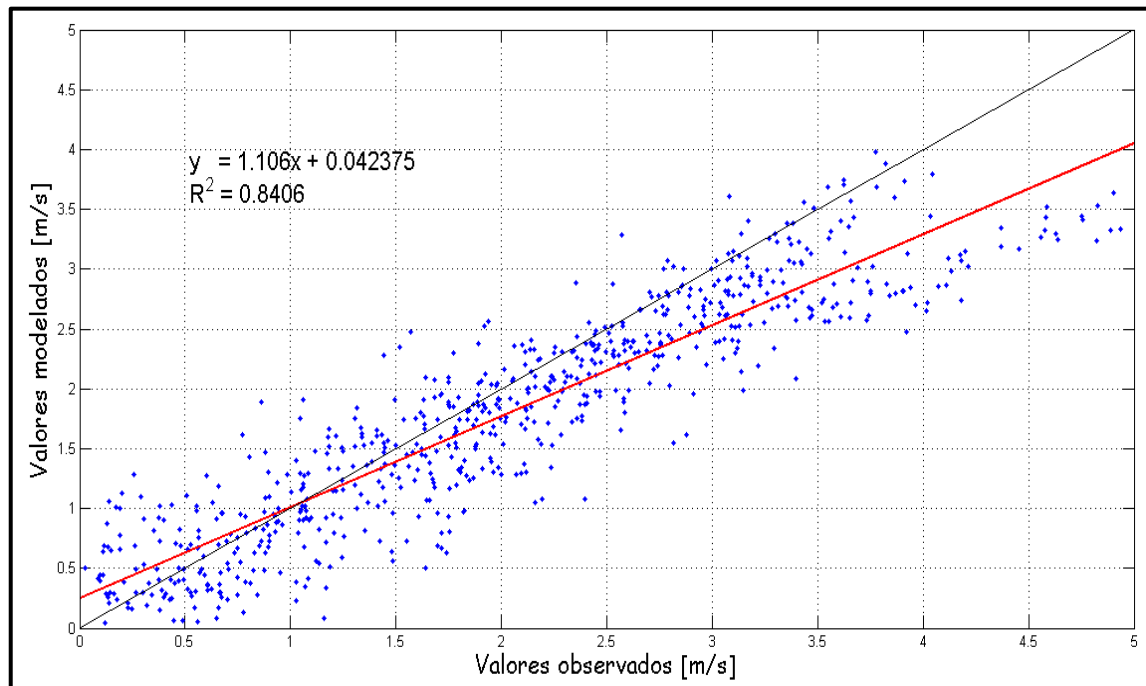


Figura 8-13: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 2.

Fuente: Elaboración propia.

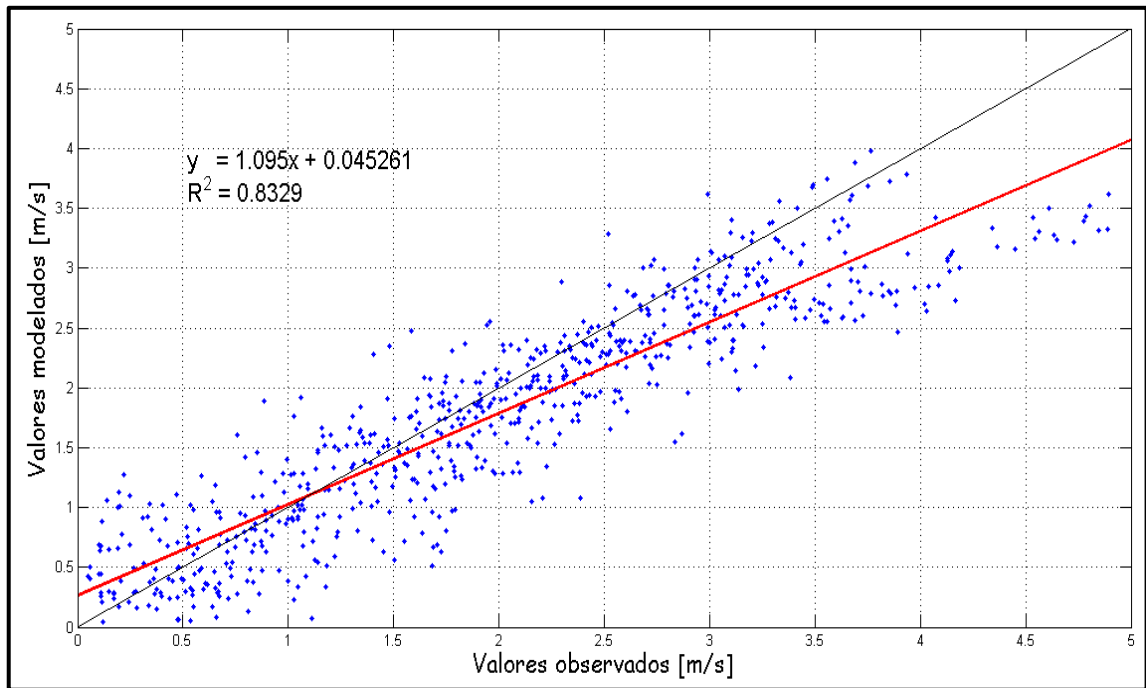


Figura 8-14: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 3.

Fuente: Elaboración propia.

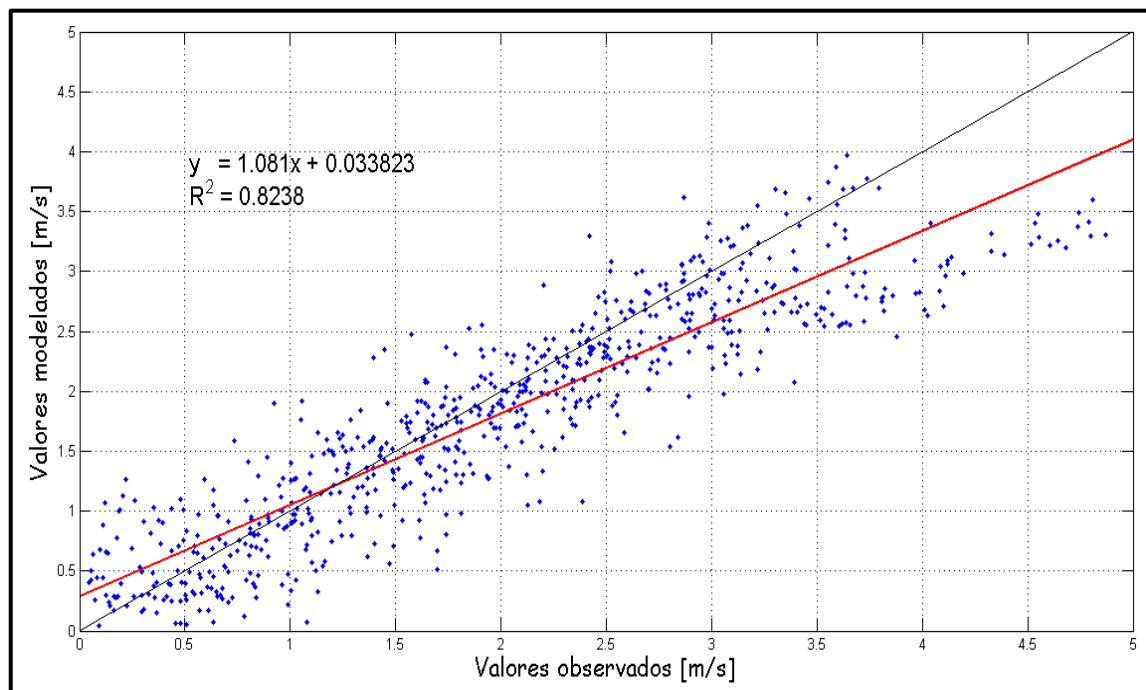


Figura 8-15: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 4.

Fuente: Elaboración propia.

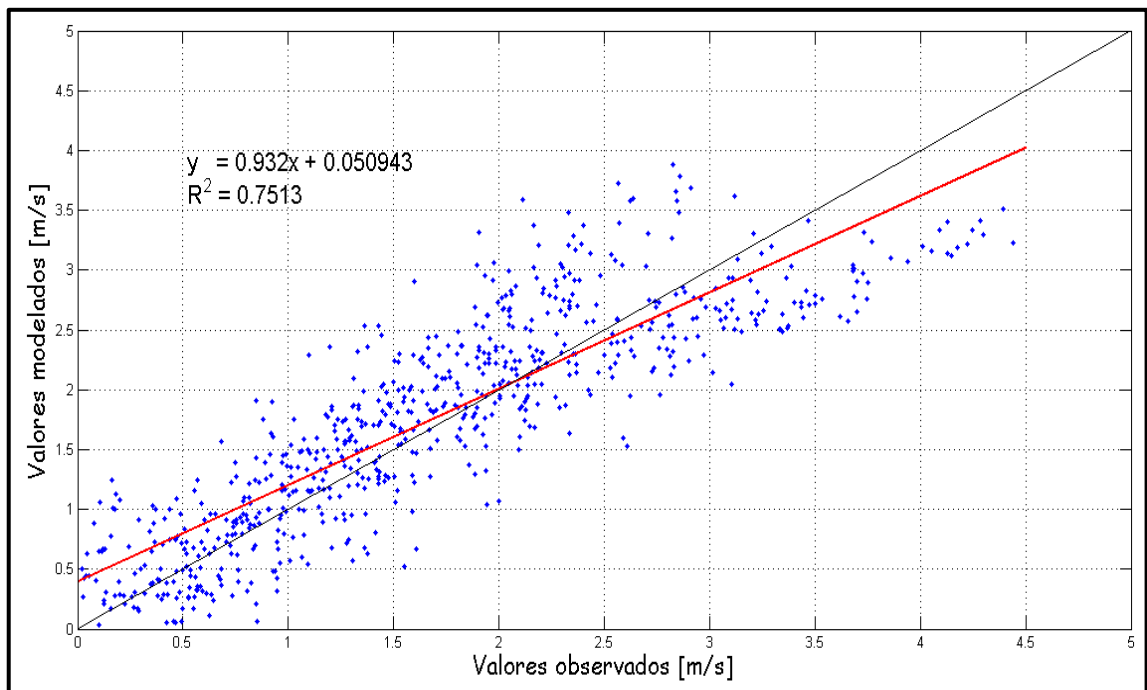


Figura 8-16: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 6.

Fuente: Elaboración propia.

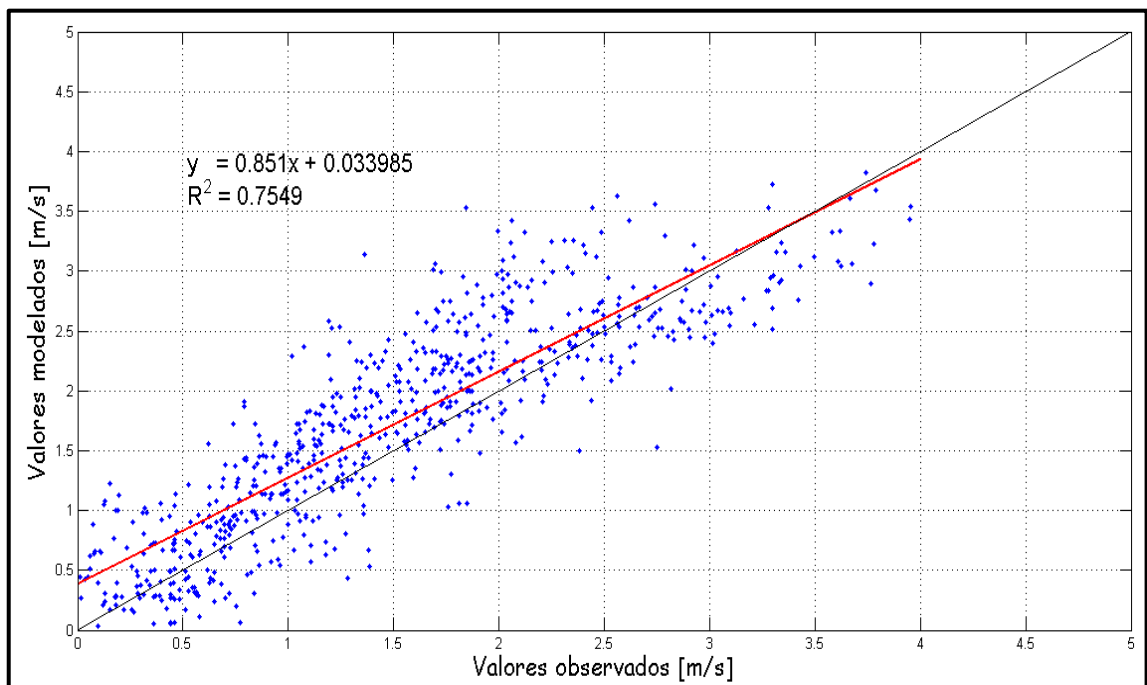


Figura 8-17: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 7.

Fuente: Elaboración propia.

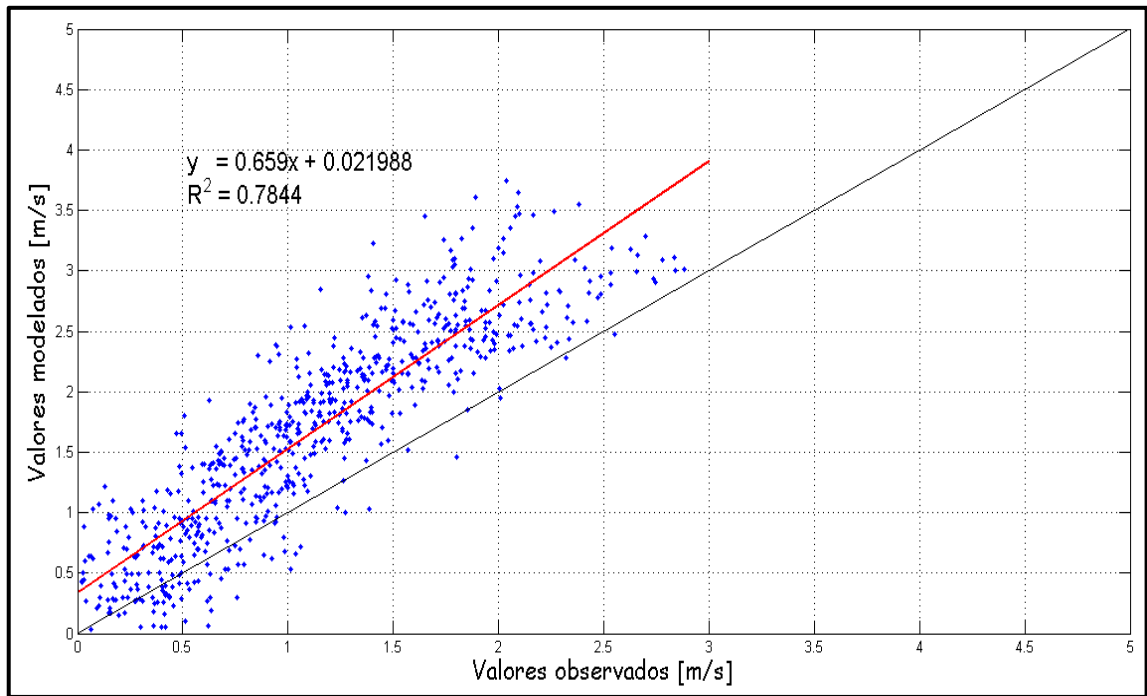


Figura 8-18: Correlación Modelo Delft3D – Roca Remolinos capa 8.

Fuente: Elaboración propia.

8.2 Anexo 2: Salidas de Sicigias y Cuadratura del modelo 3D por capas.

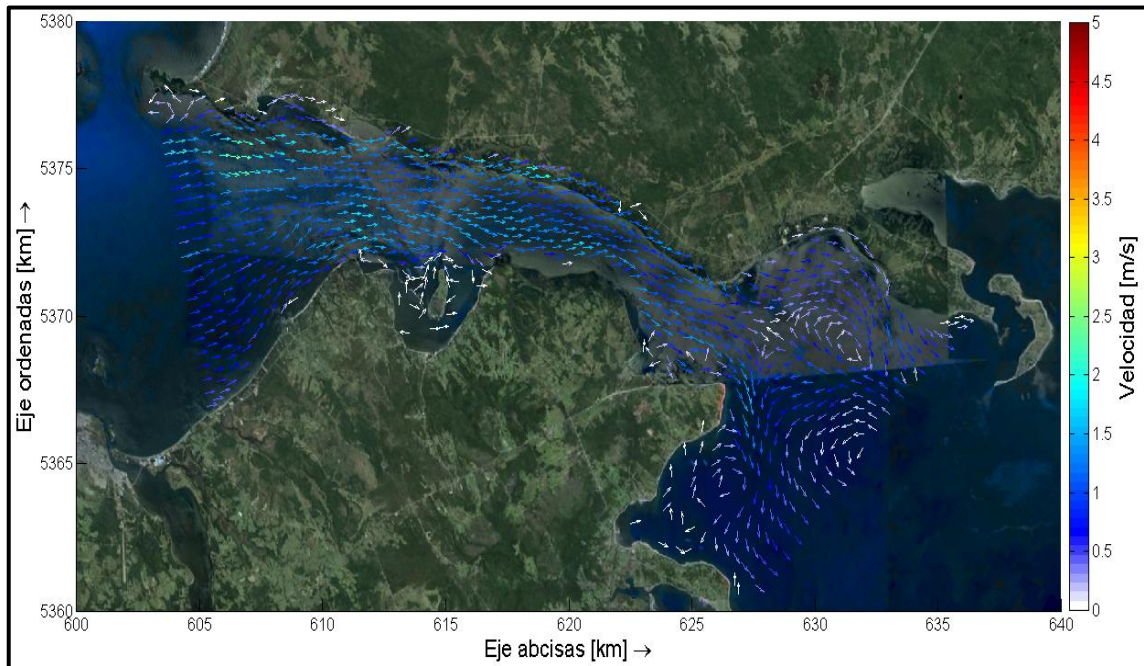


Figura 8-19: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 1.

Fuente: Elaboración propia.

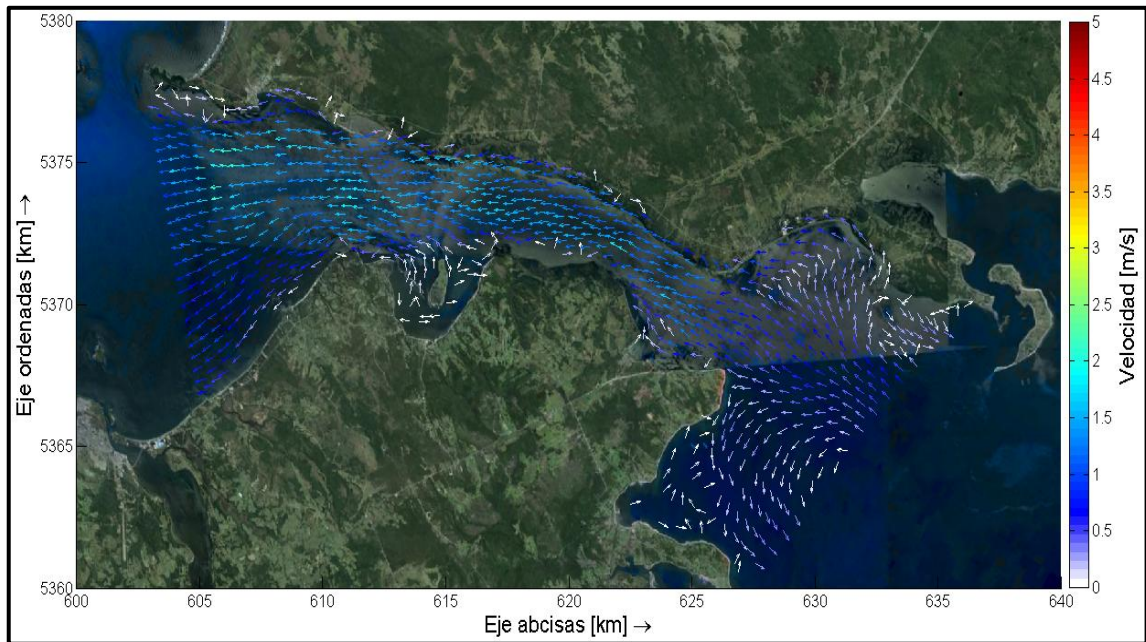


Figura 8-20: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D – capa 1.

Fuente: Elaboración propia.

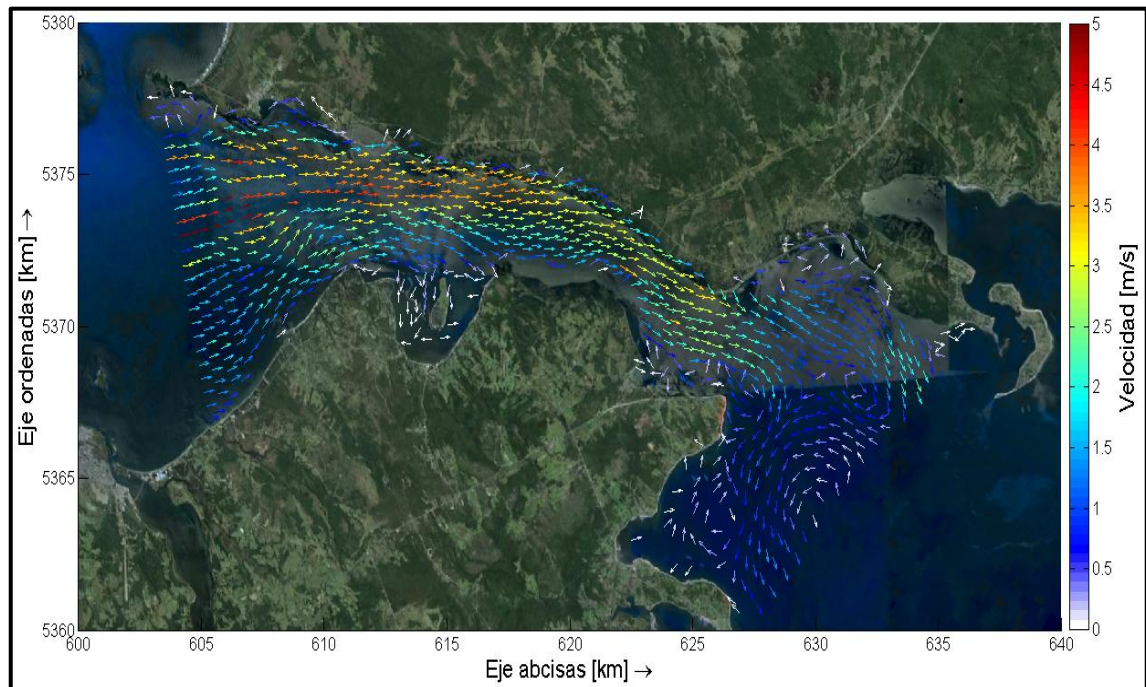


Figura 8-21: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 1.

Fuente: Elaboración propia.

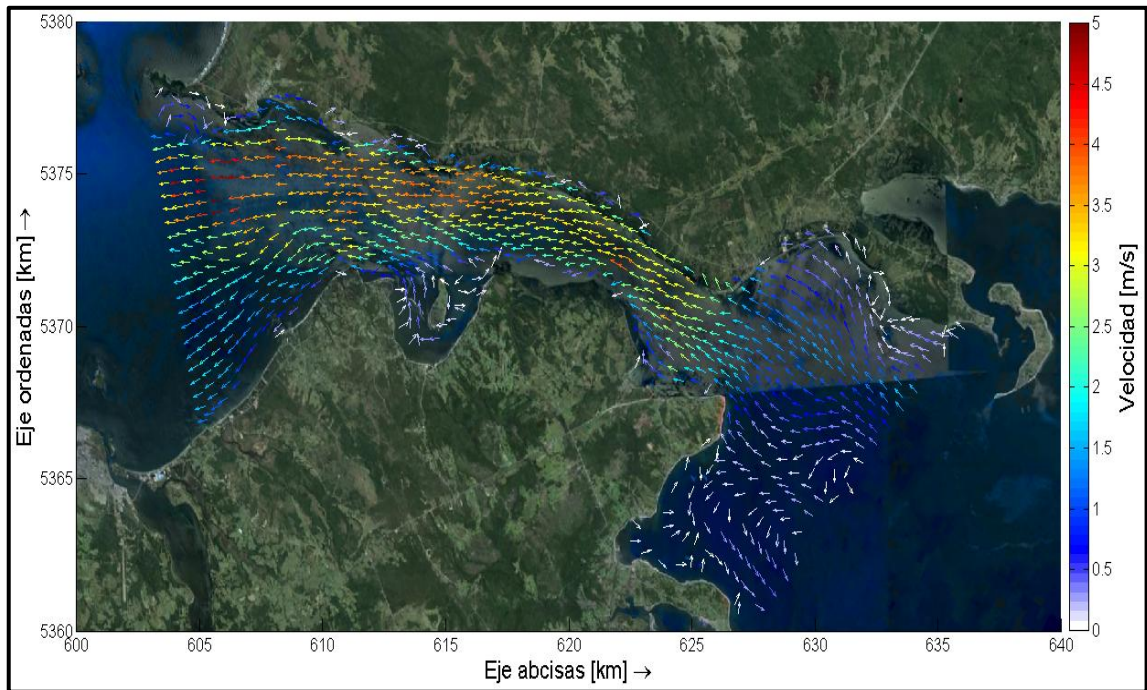


Figura 8-22: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 1.

Fuente: Elaboración propia.

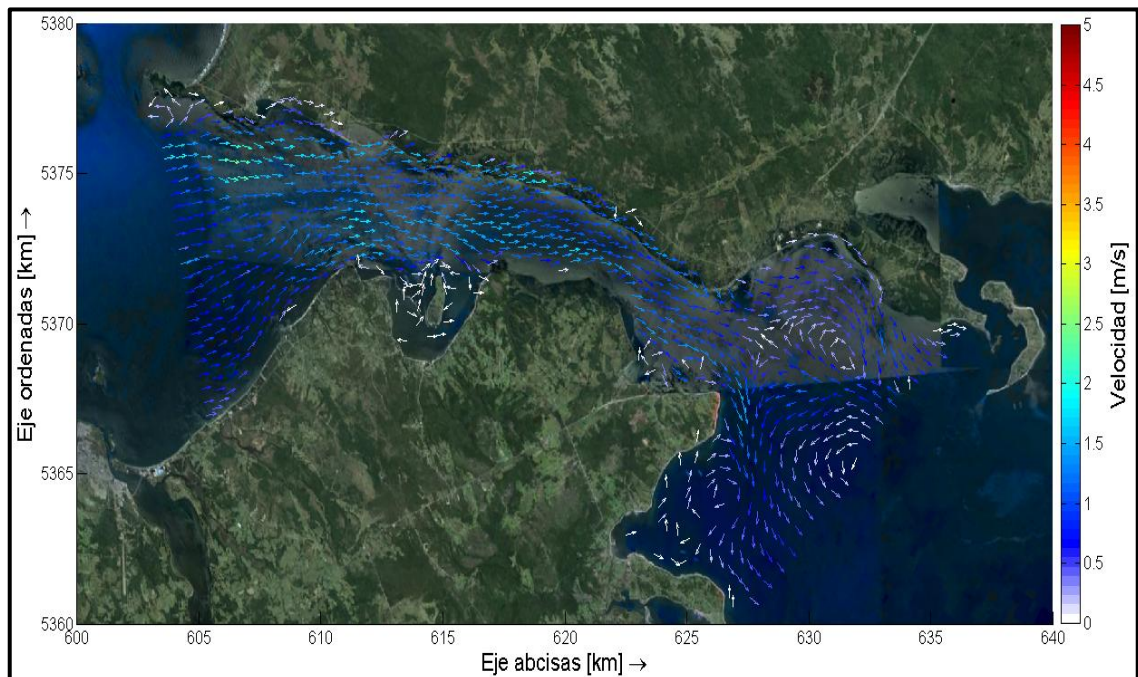


Figura 8-23: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 2.

Fuente: Elaboración propia.

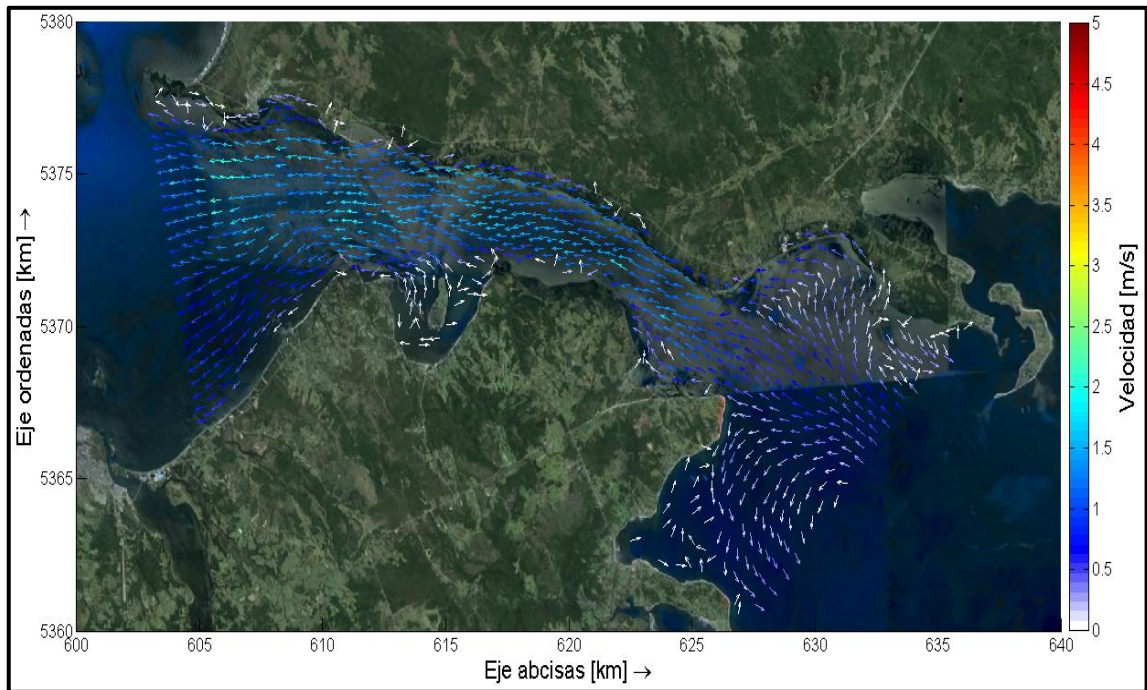


Figura 8-24: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D – capa 2.

Fuente: Elaboración propia.

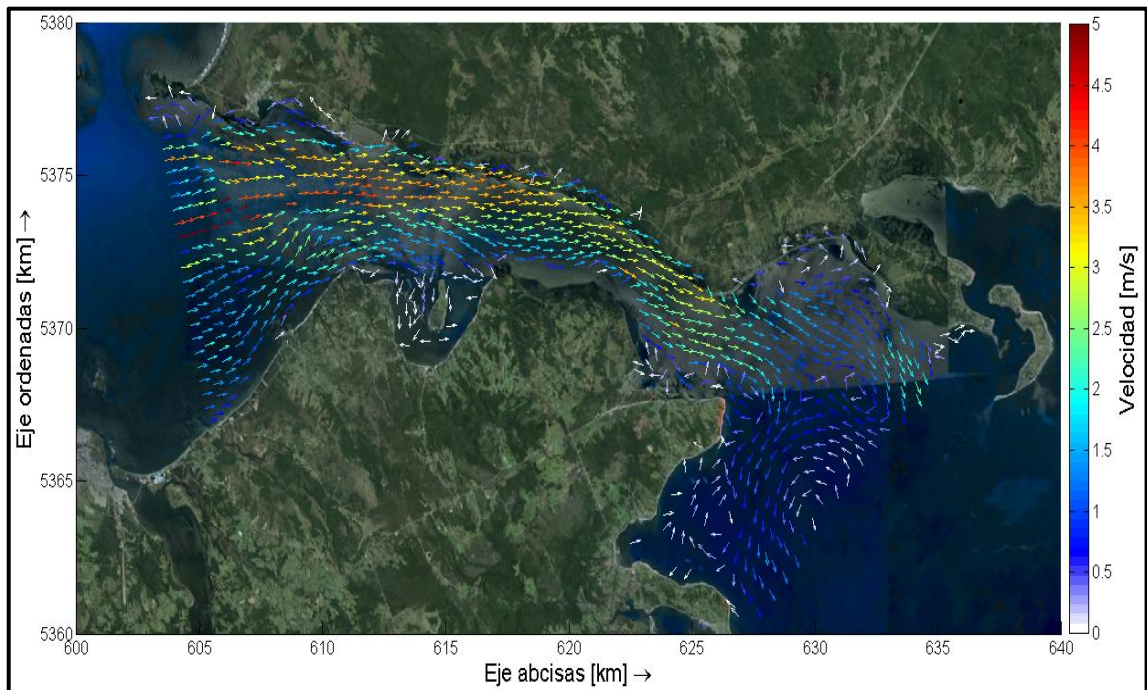


Figura 8-25: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 2.

Fuente: Elaboración propia.

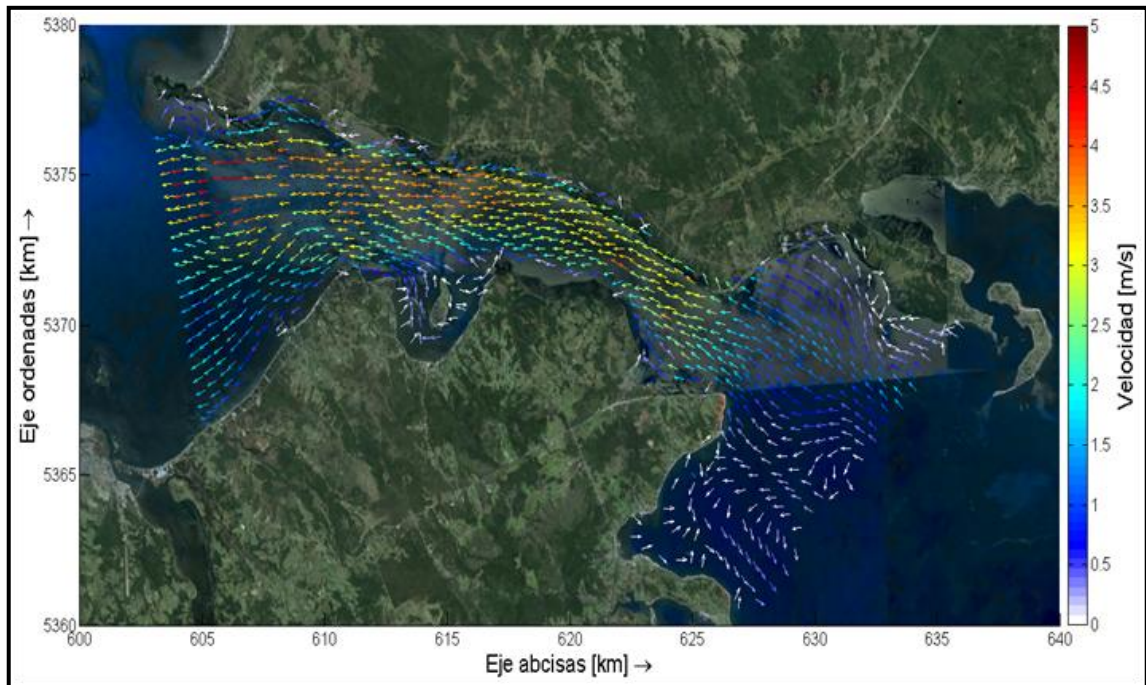


Figura 8-26: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 2.

Fuente: Elaboración propia.

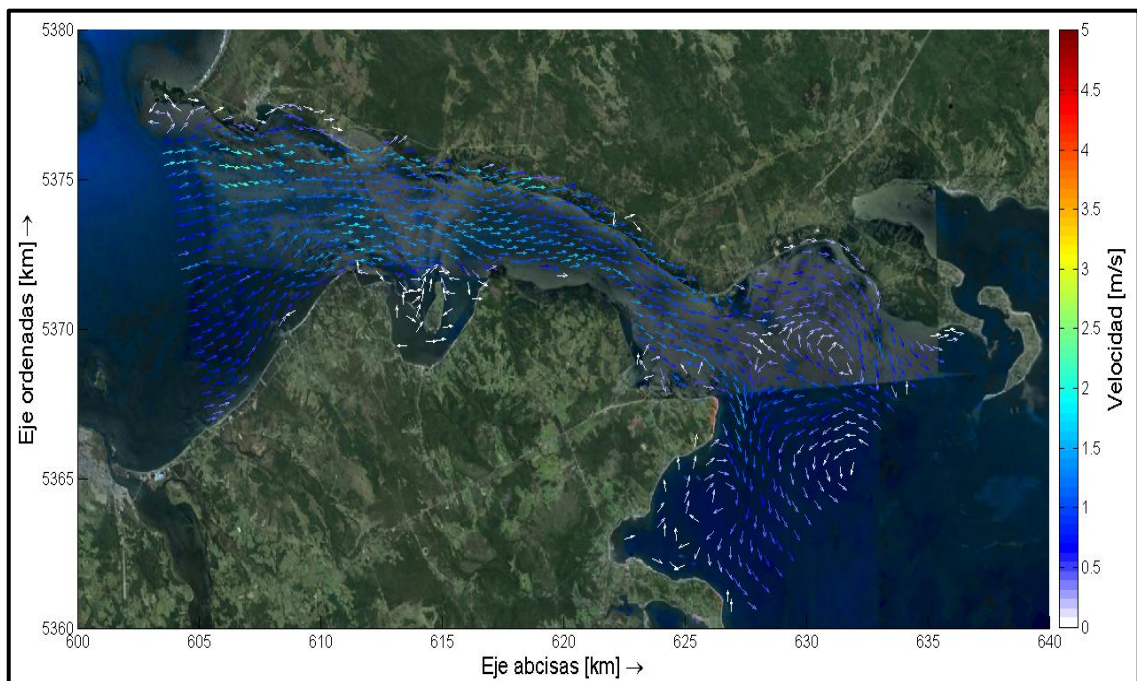


Figura 8-27: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 3.

Fuente: Elaboración propia.

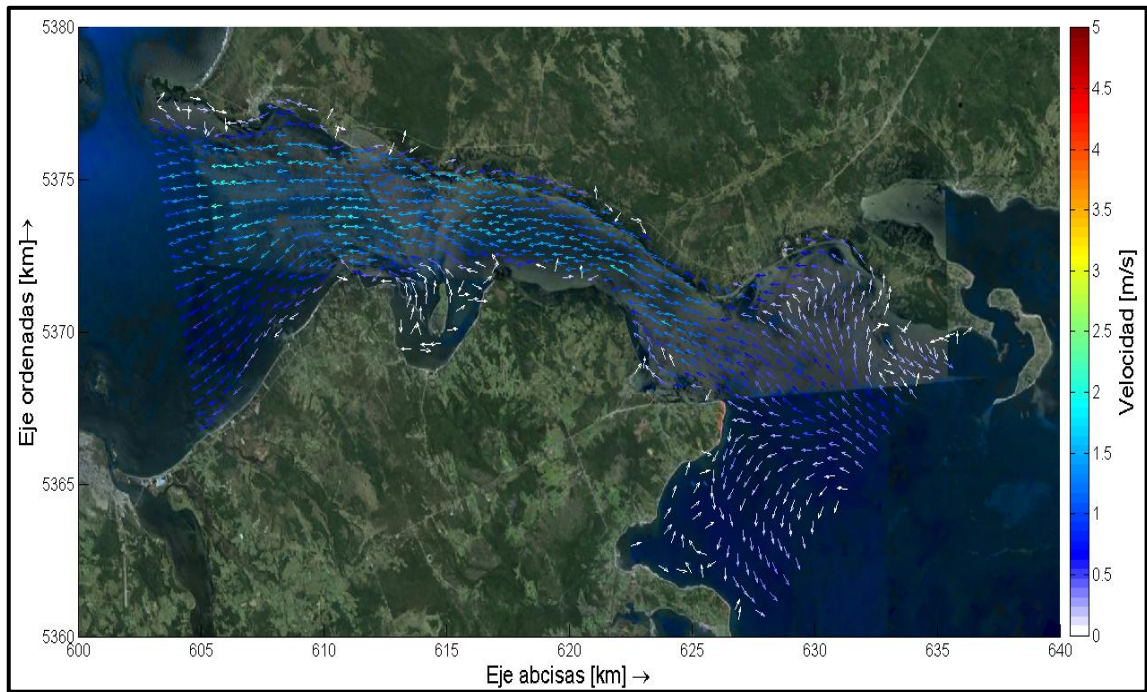


Figura 8-28: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D – capa 3.

Fuente: Elaboración propia.

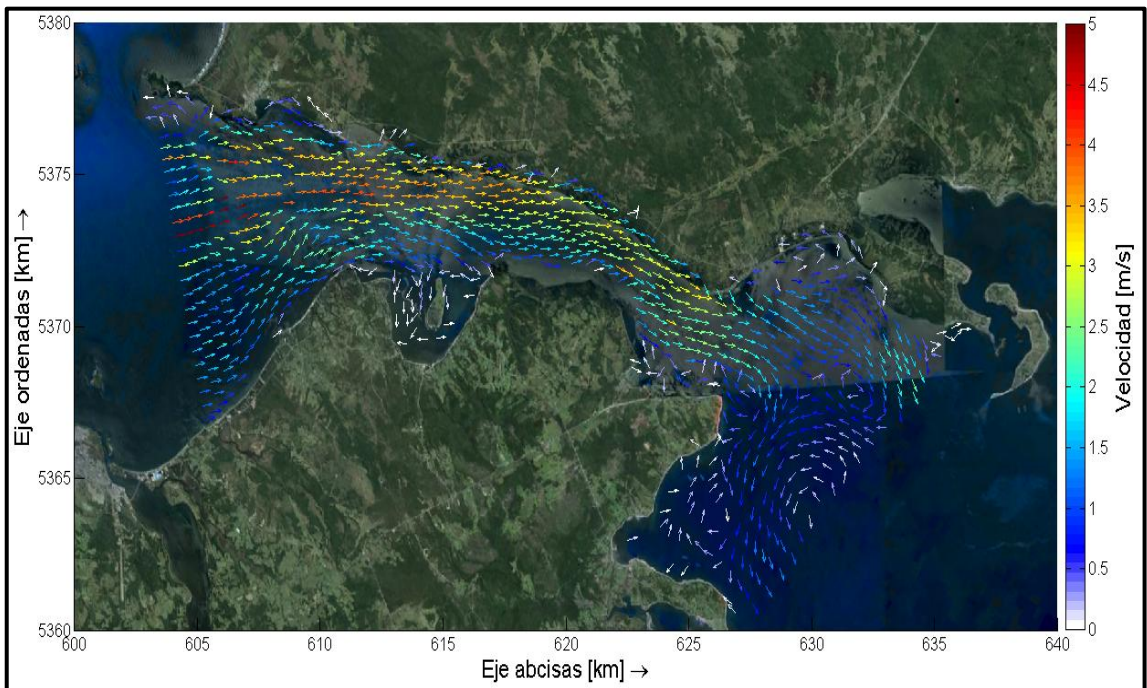


Figura 8-29: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 3.

Fuente: Elaboración propia.

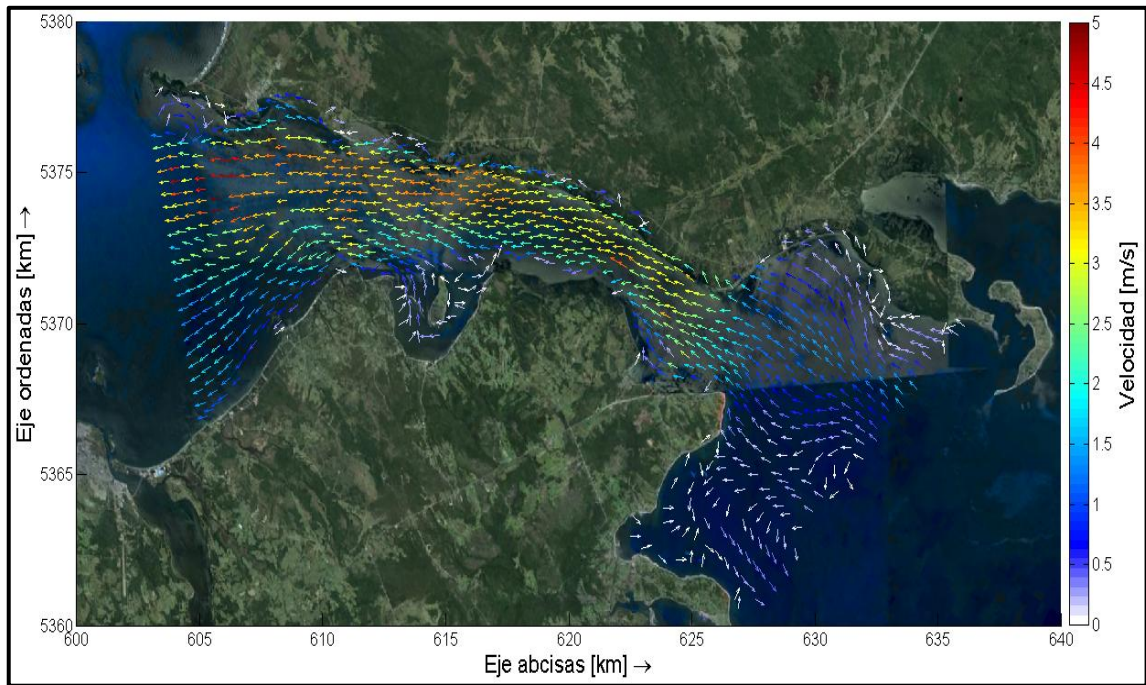


Figura 8-30: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 3.

Fuente: Elaboración propia.

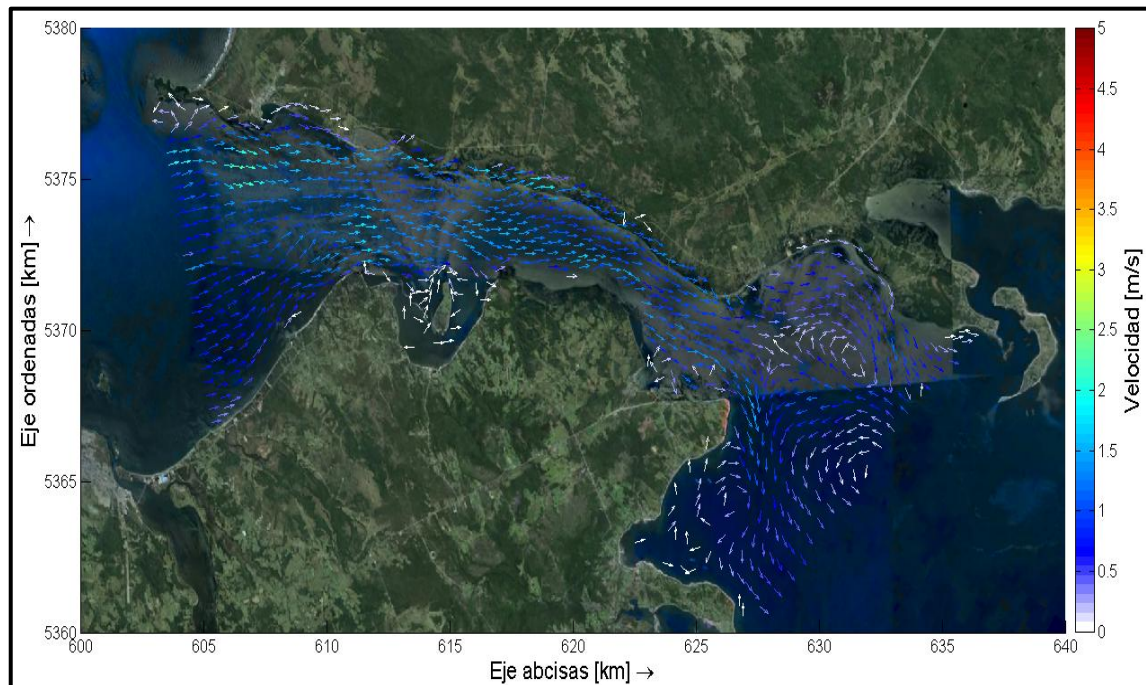


Figura 8-31: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 4.

Fuente: Elaboración propia.

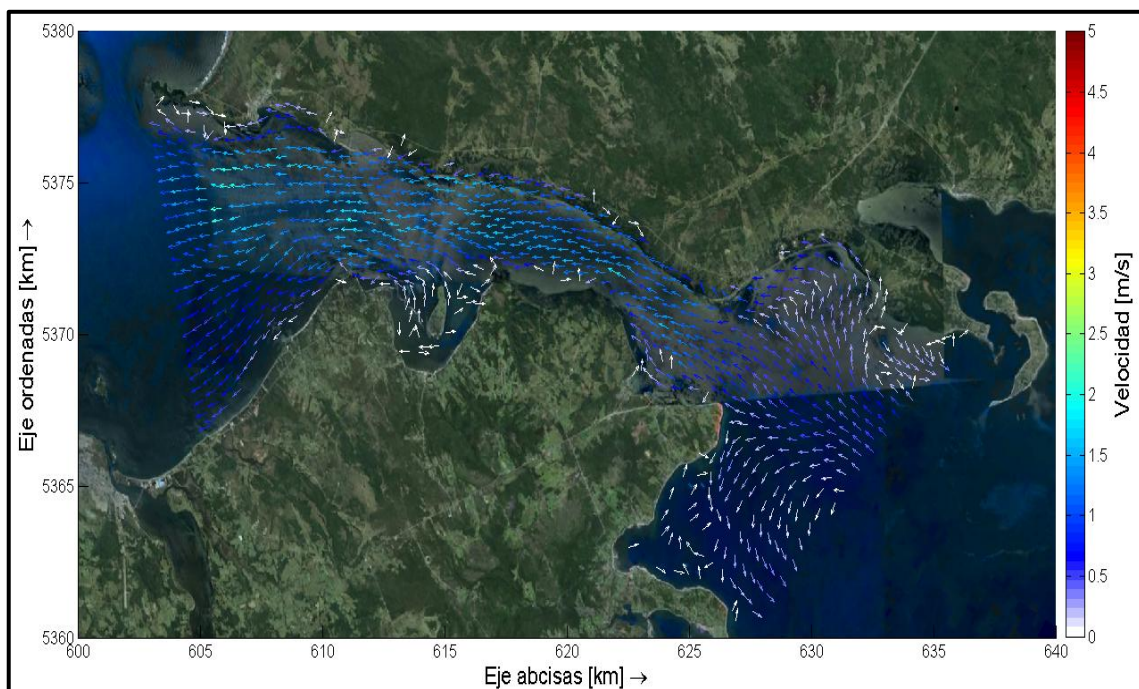


Figura 8-32: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 4.

Fuente: Elaboración propia.

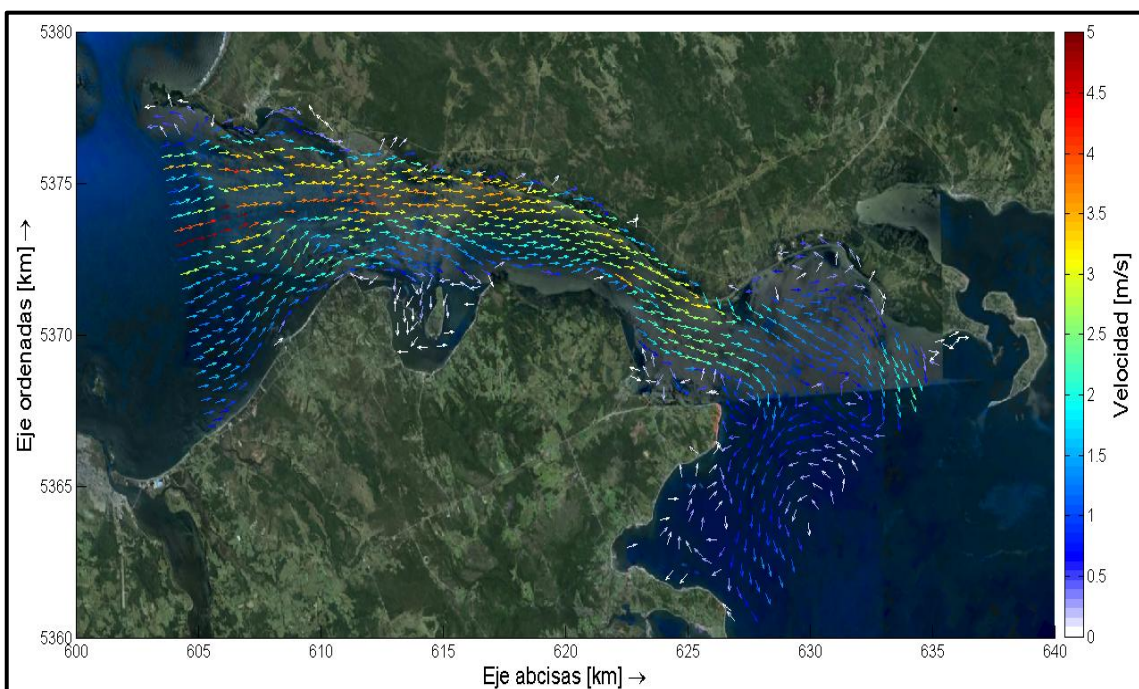


Figura 8-33: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 4.

Fuente: Elaboración propia.

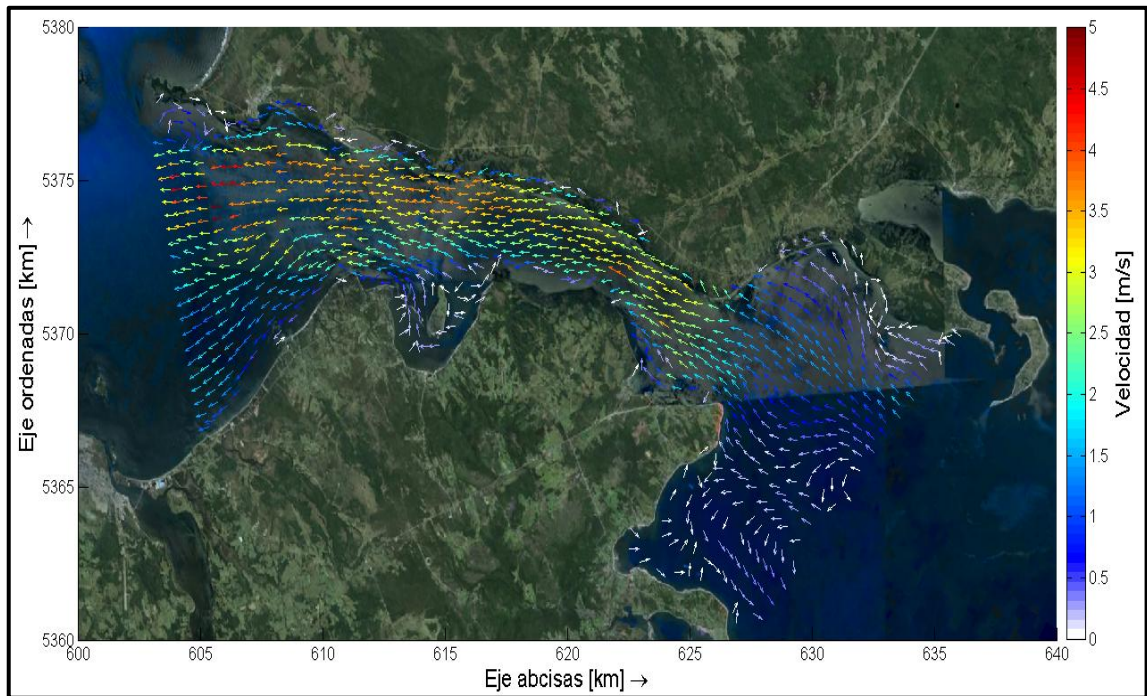


Figura 8-34: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 4.
Fuente: Elaboración propia.

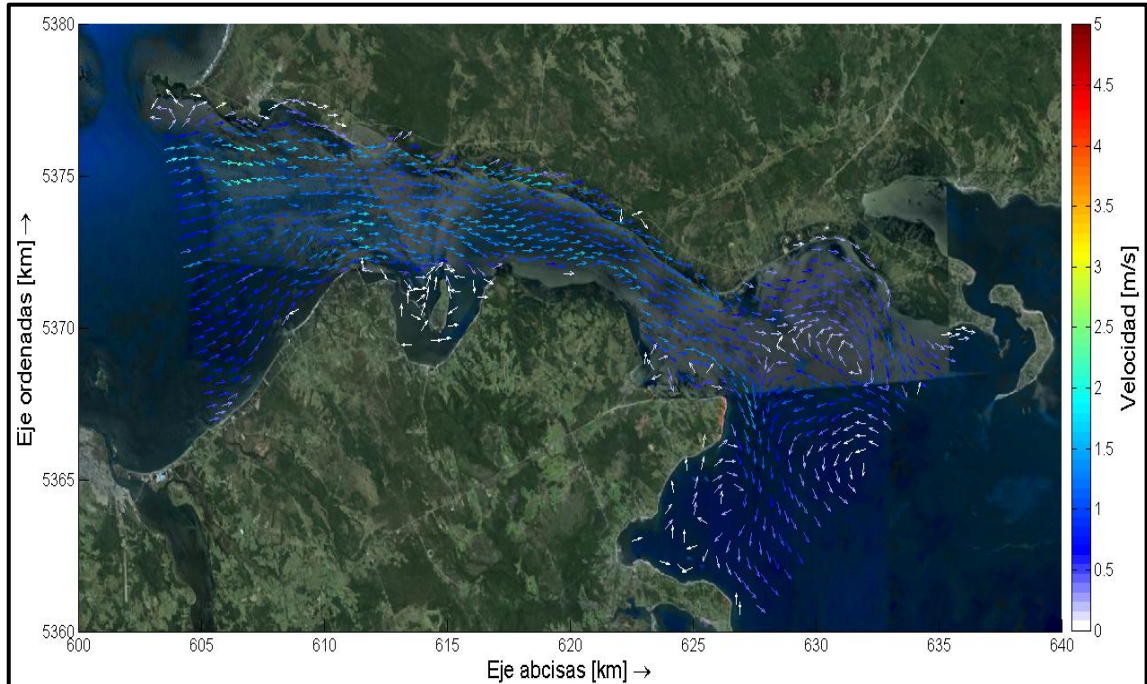


Figura 8-35: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 5.
Fuente: Elaboración propia.

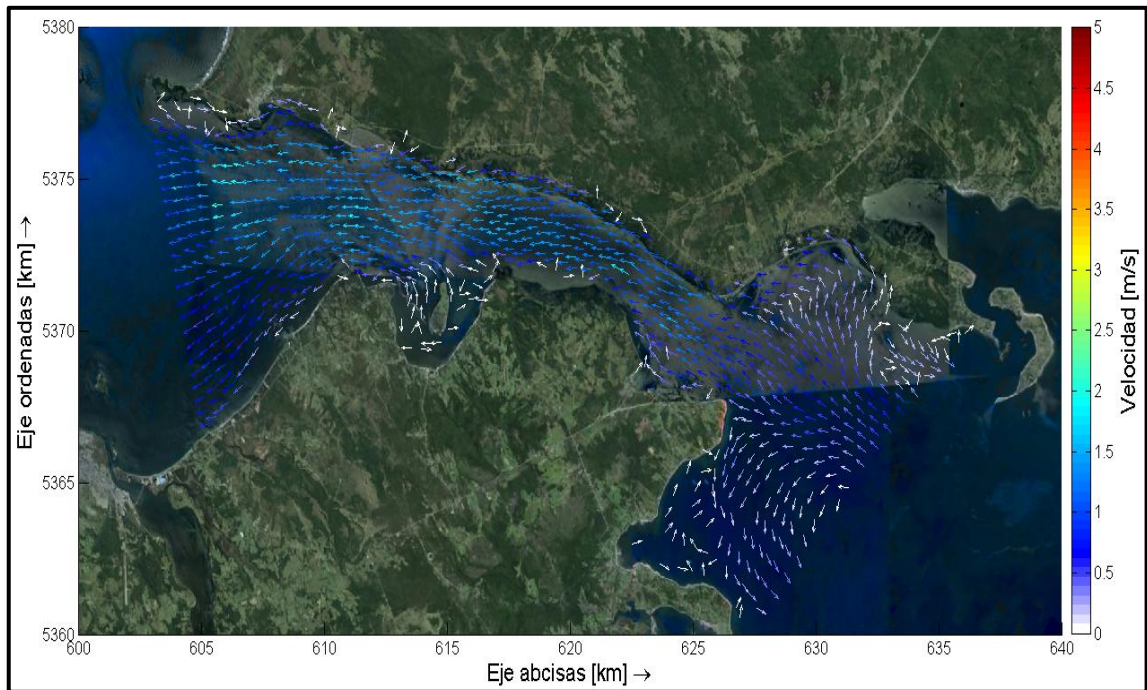


Figura 8-36: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 5.

Fuente: Elaboración propia.

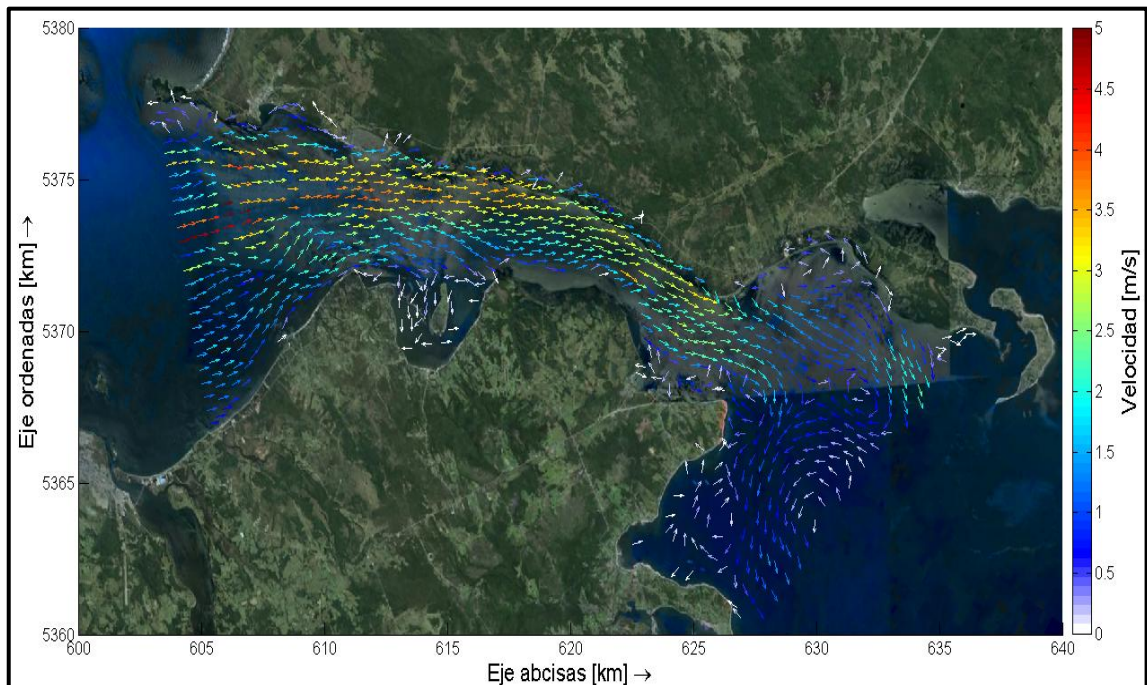


Figura 8-37: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 5.

Fuente: Elaboración propia.

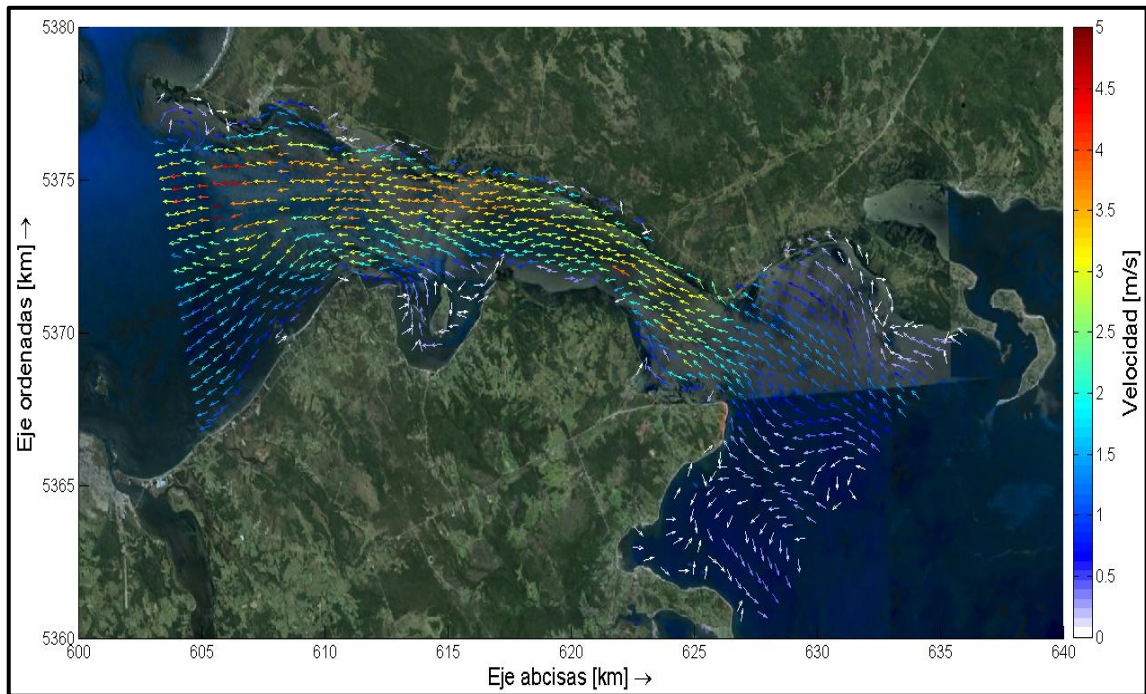


Figura 8-38: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 5.

Fuente: Elaboración propia.

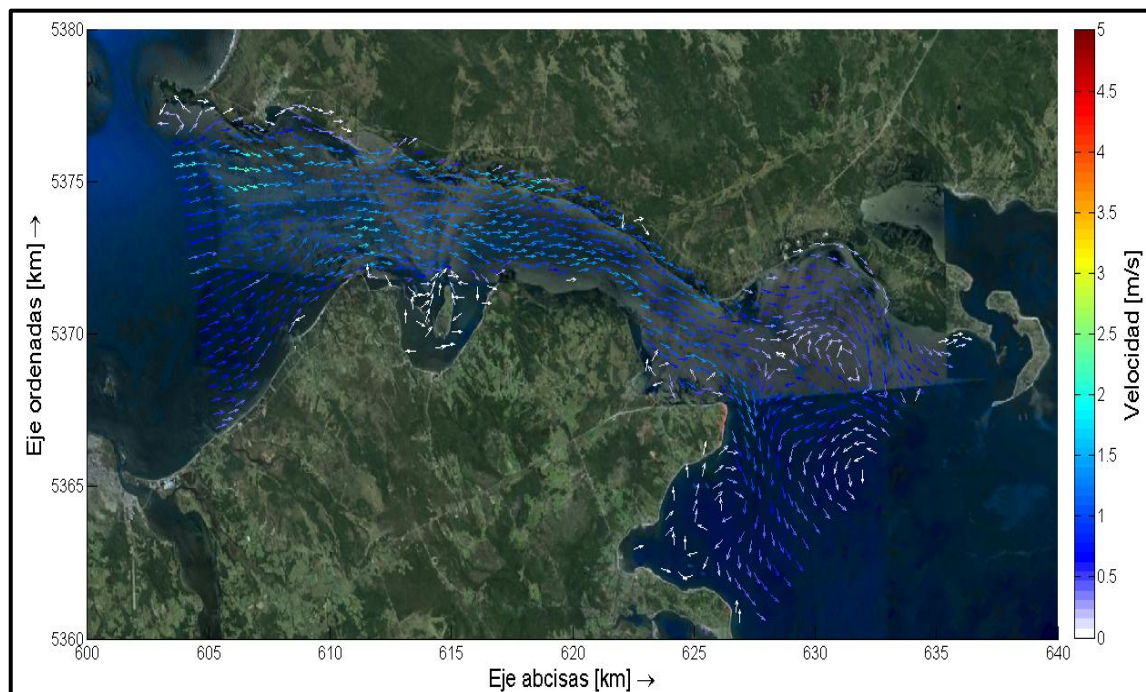


Figura 8-39: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 6.

Fuente: Elaboración propia.

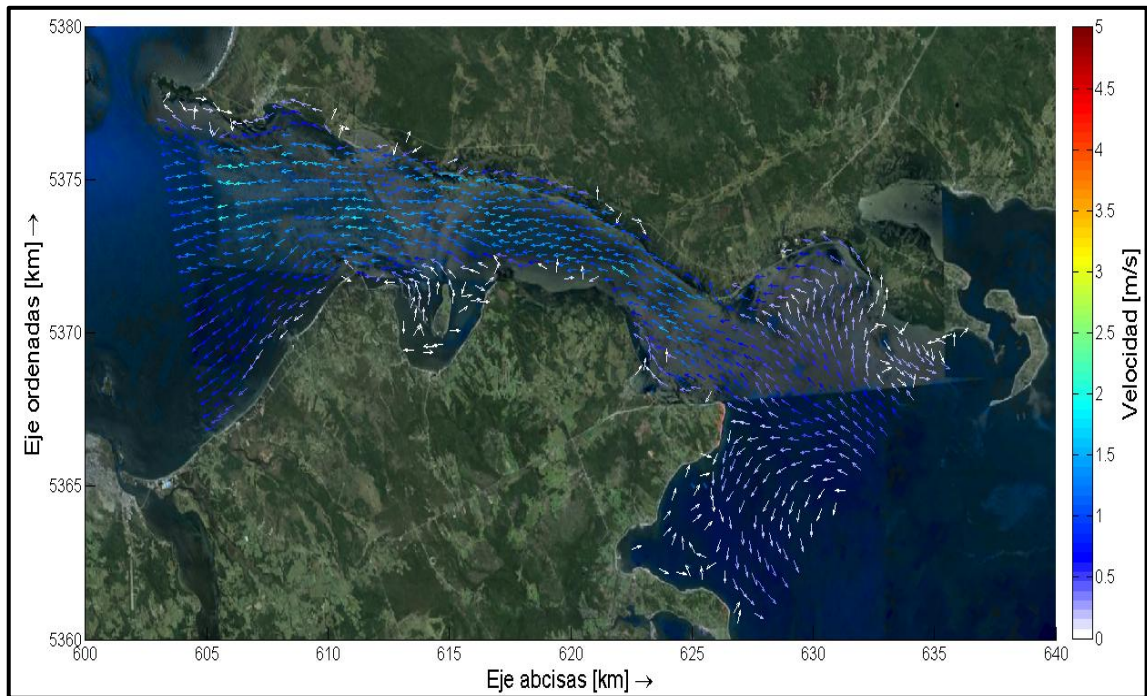


Figura 8-40: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D – capa 6.
Fuente: Elaboración propia.

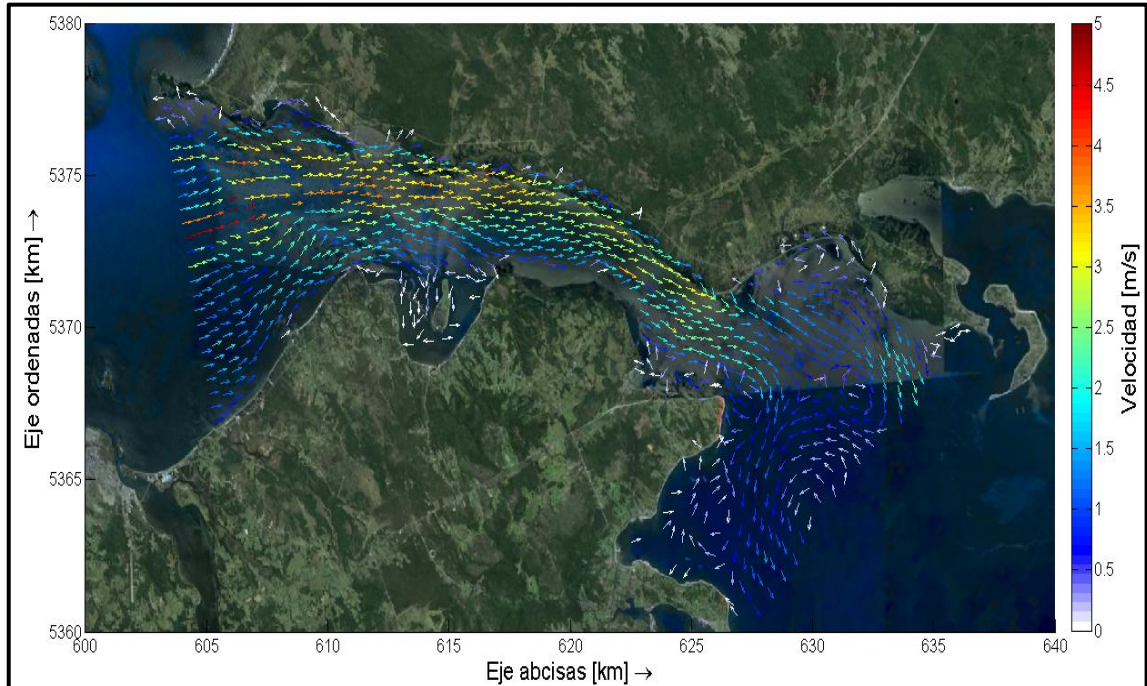


Figura 8-41: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 6.
Fuente: Elaboración propia.

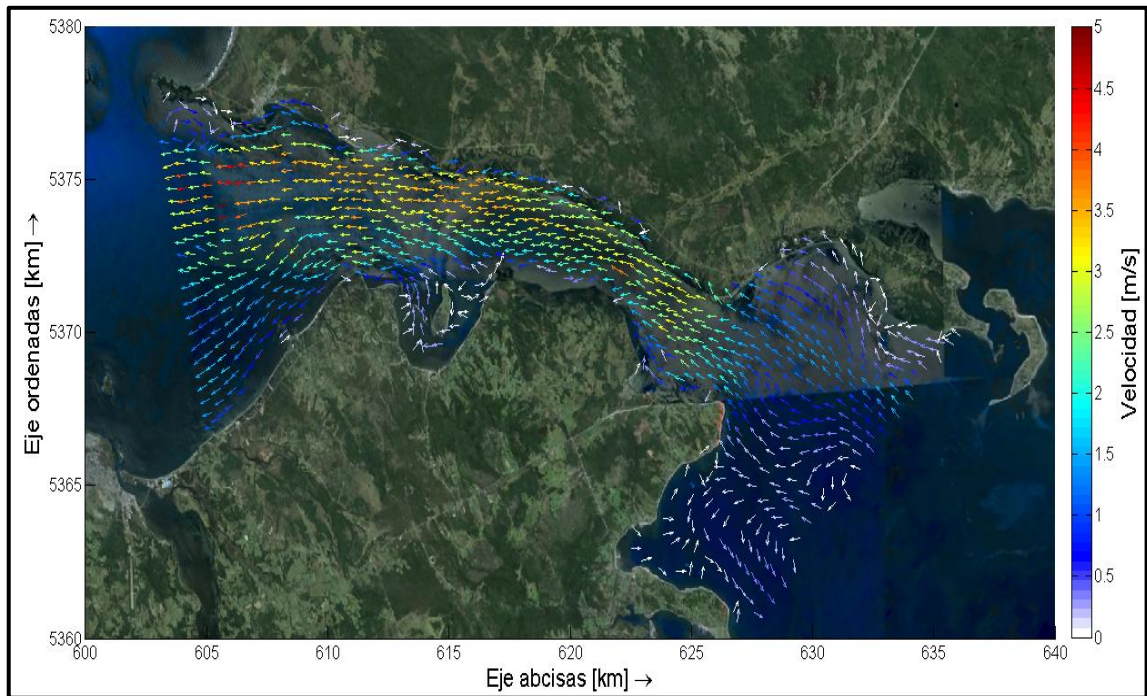


Figura 8-42: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciente 3D – capa 6.
Fuente: Elaboración propia.

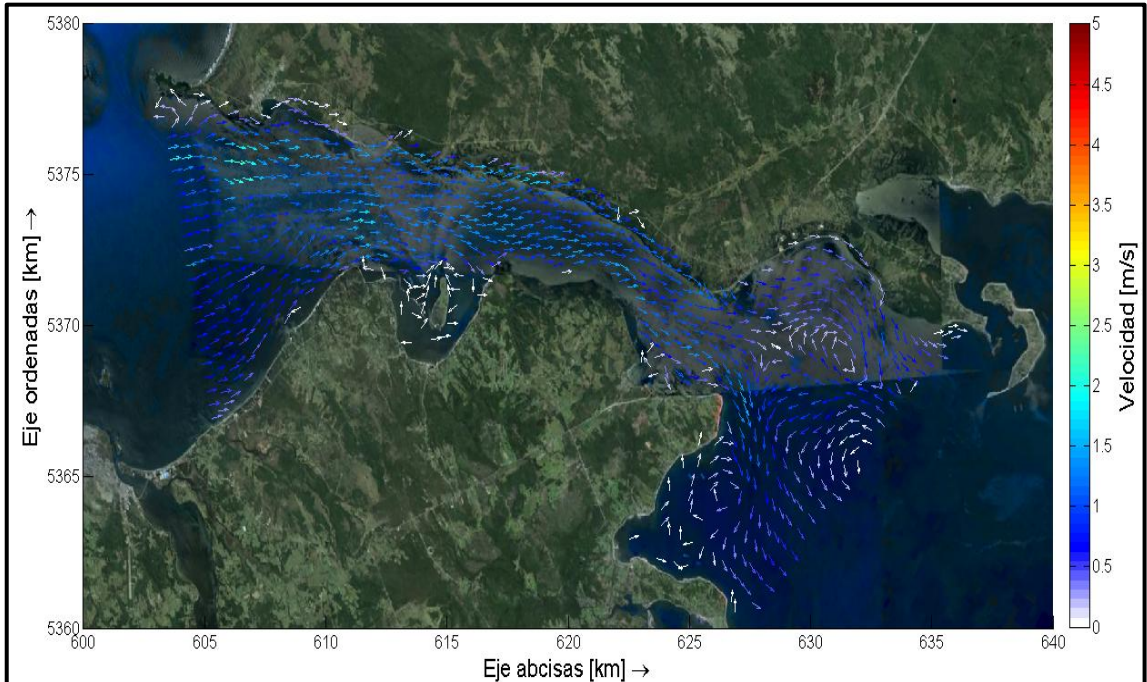


Figura 8-43: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 7.
Fuente: Elaboración propia.

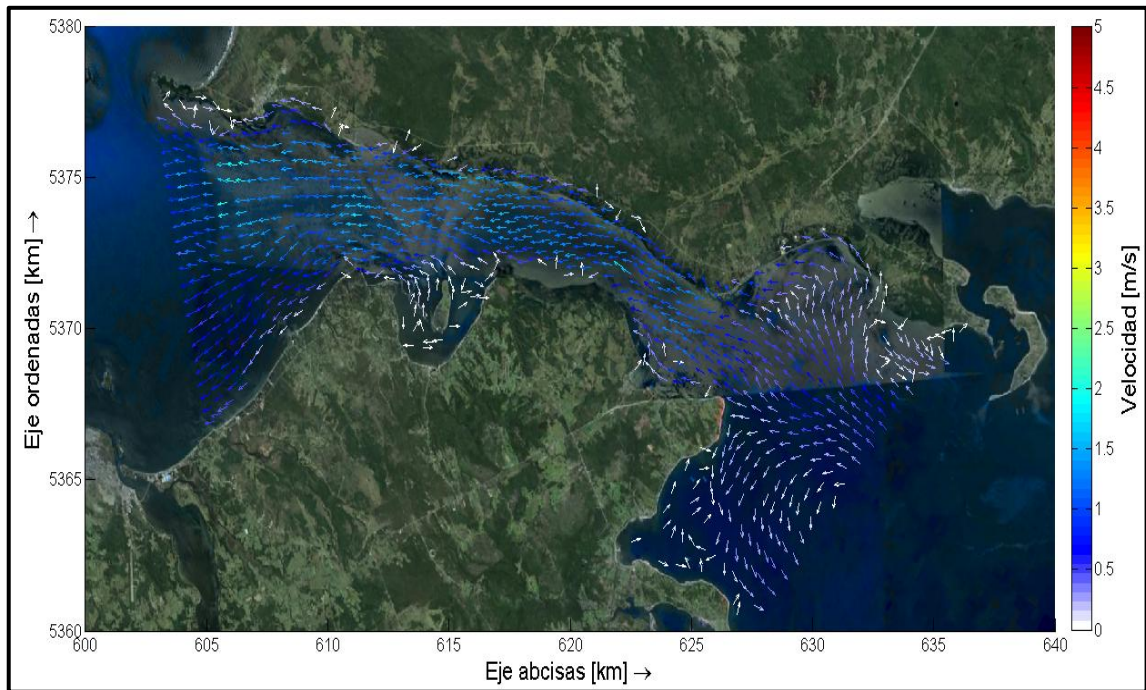


Figura 8-44: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D – capa 7.

Fuente: Elaboración propia.

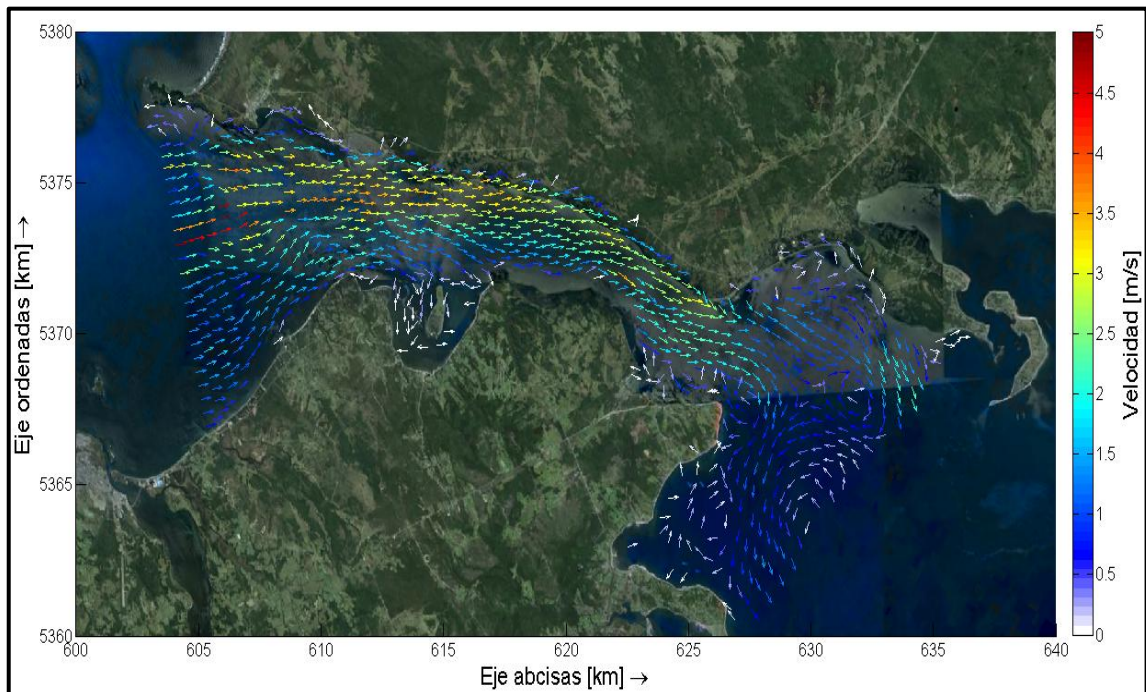


Figura 8-45: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 7.

Fuente: Elaboración propia.

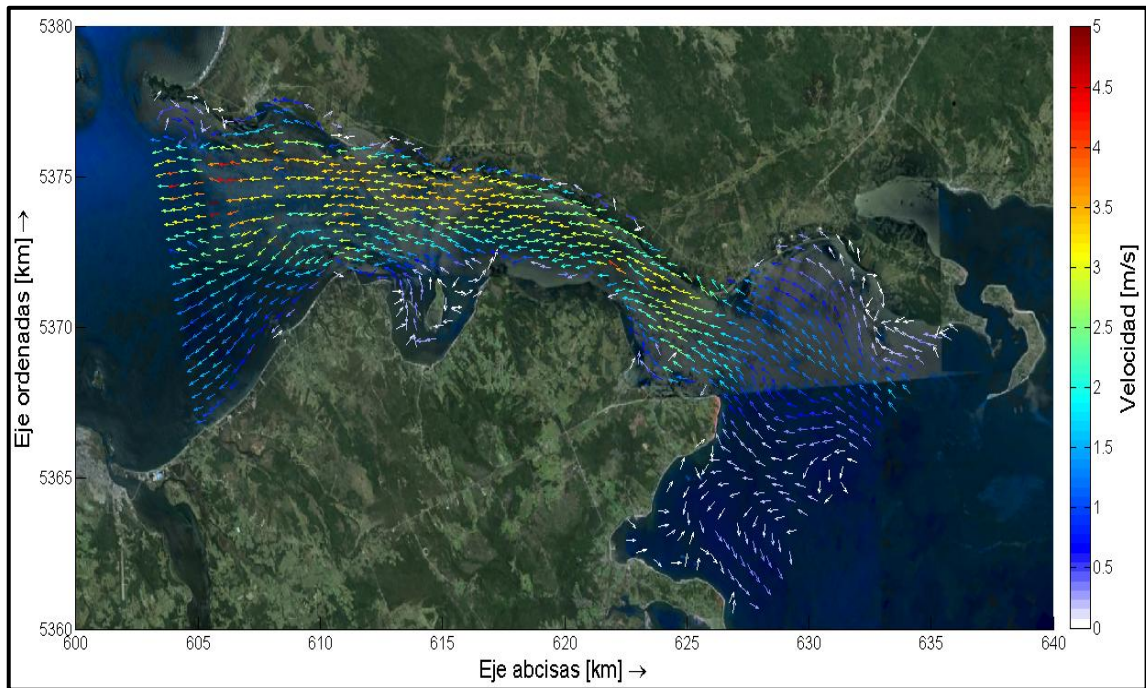


Figura 8-46: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 7.

Fuente: Elaboración propia.

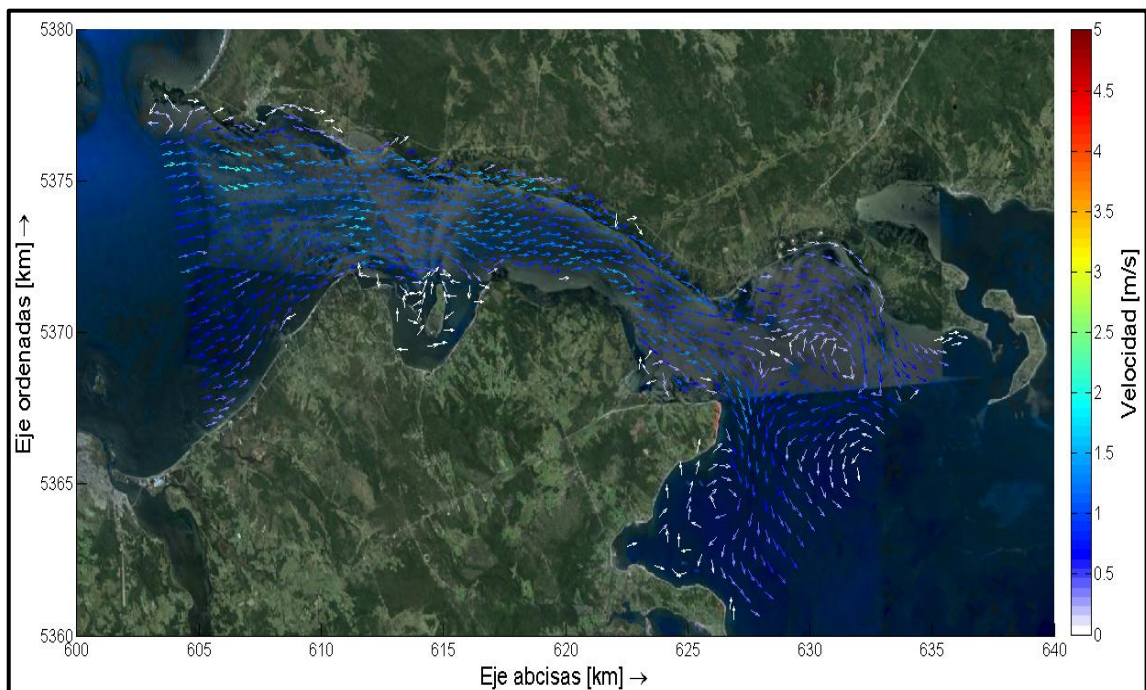


Figura 8-47: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 8.

Fuente: Elaboración propia.

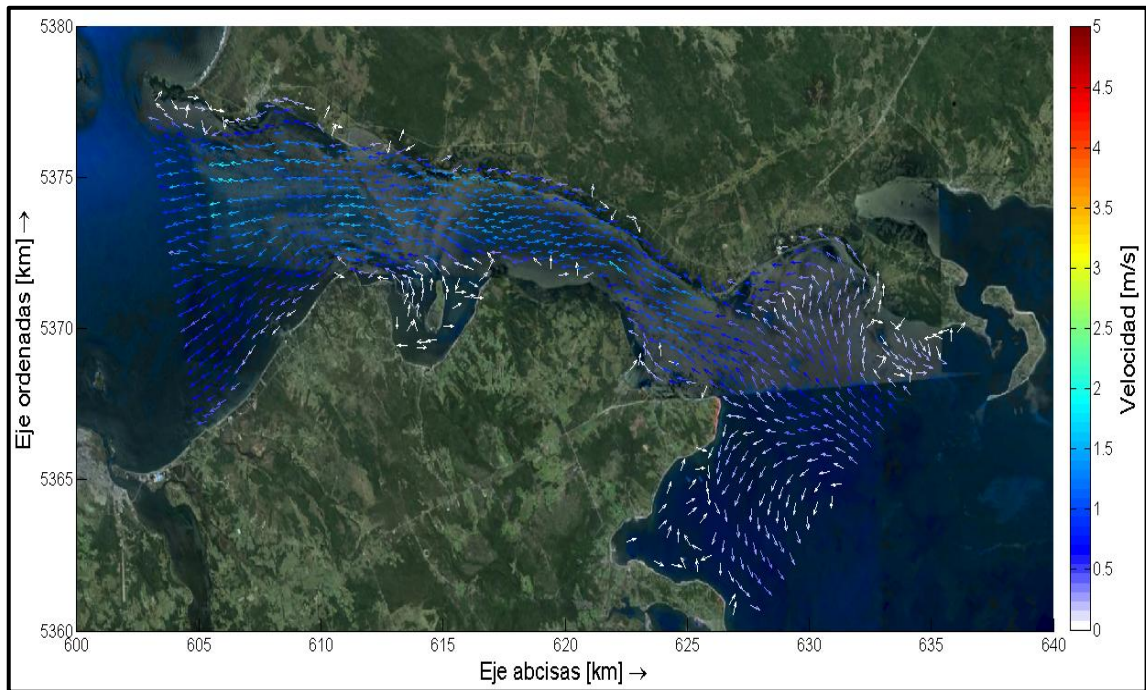


Figura 8-48: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciante 3D – capa 8.

Fuente: Elaboración propia.

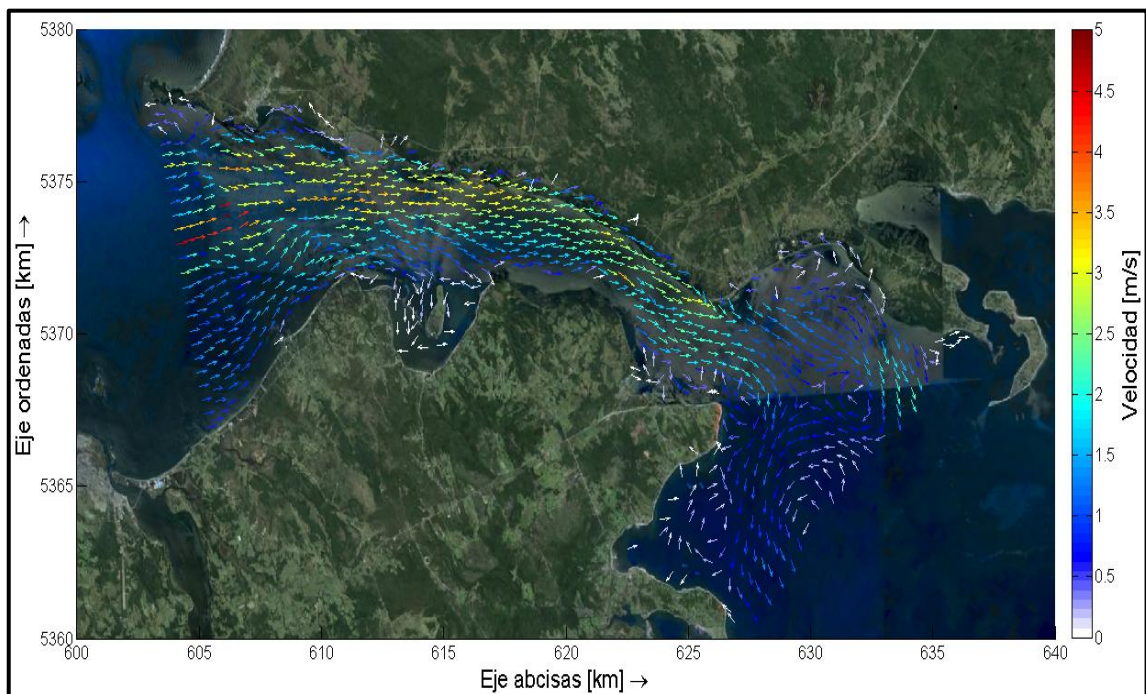


Figura 8-49: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 8.

Fuente: Elaboración propia.

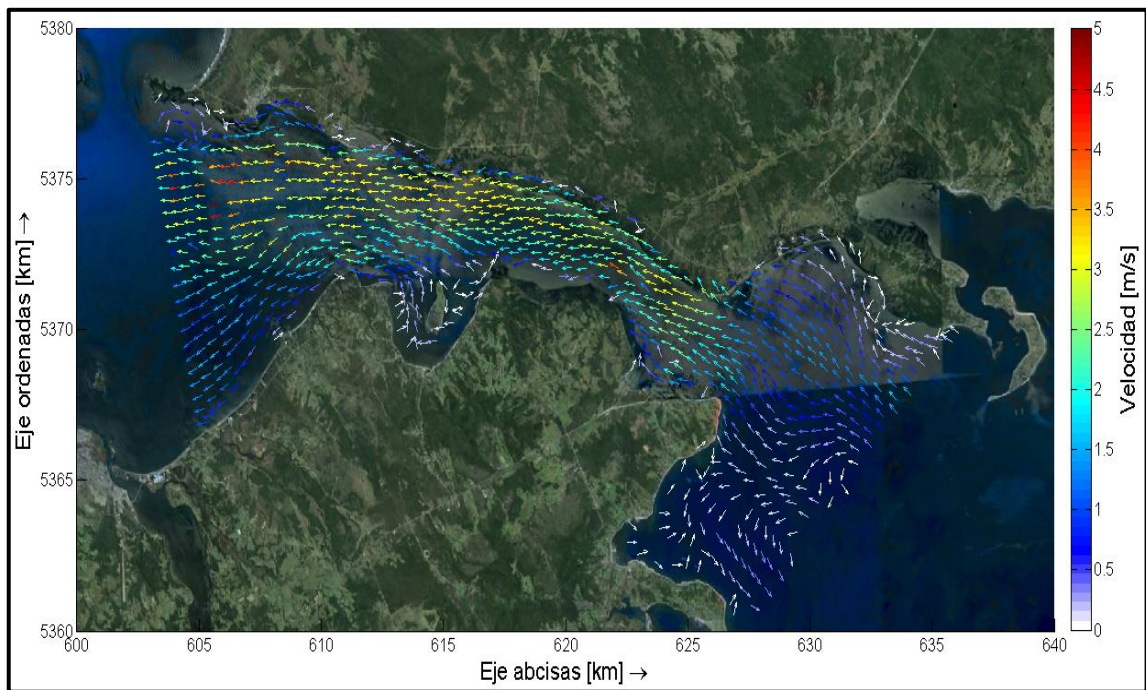


Figura 8-50: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 8.

Fuente: Elaboración propia.

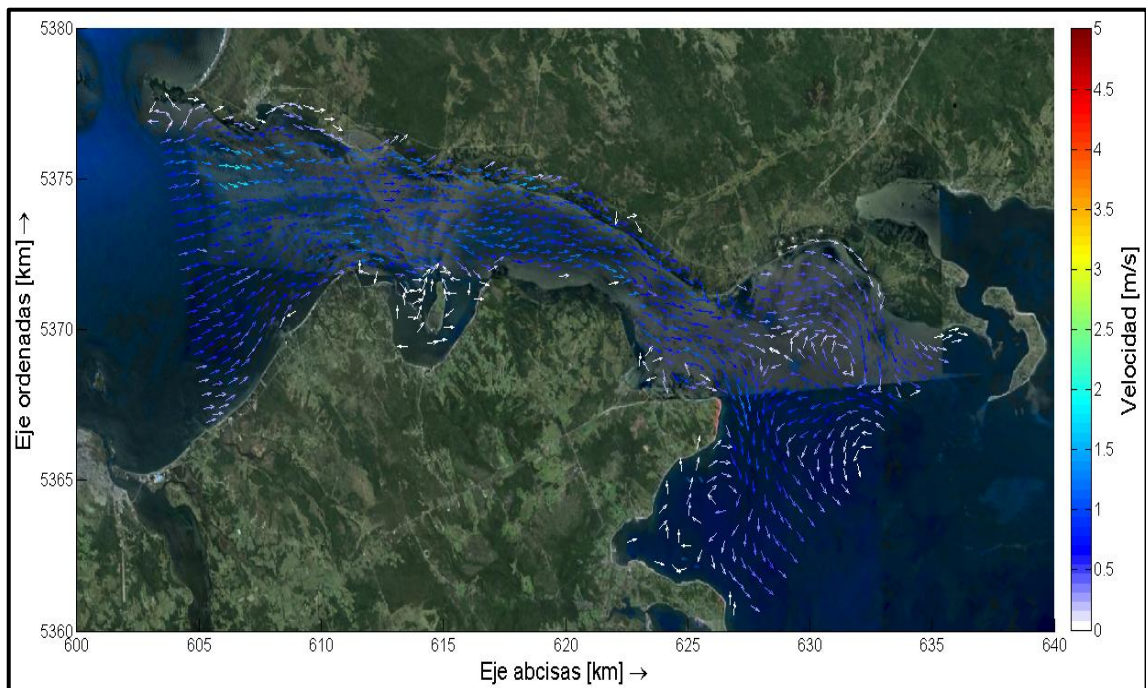


Figura 8-51: Velocidad condición Cuadratura mínima Llenante 3D – capa 9.

Fuente: Elaboración propia.

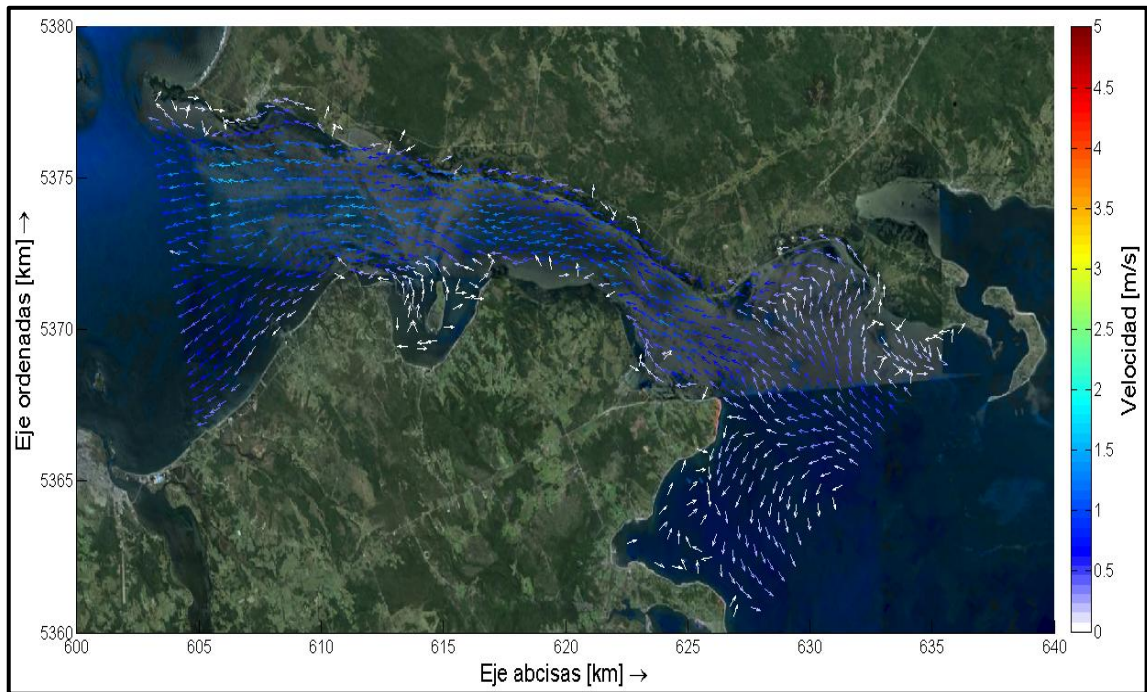


Figura 8-52: Velocidad condición Cuadratura mínima Vaciente 3D – capa 9.

Fuente: Elaboración propia.

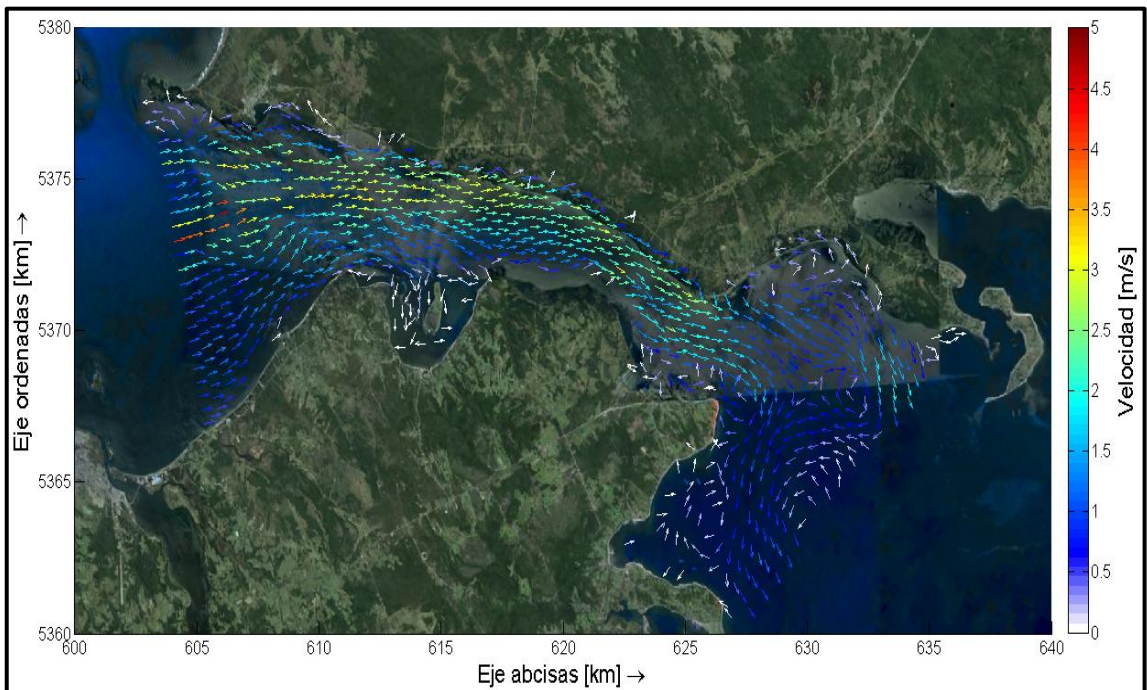


Figura 8-53: Velocidad condición Sicigia máxima Llenante 3D – capa 9.

Fuente: Elaboración propia.

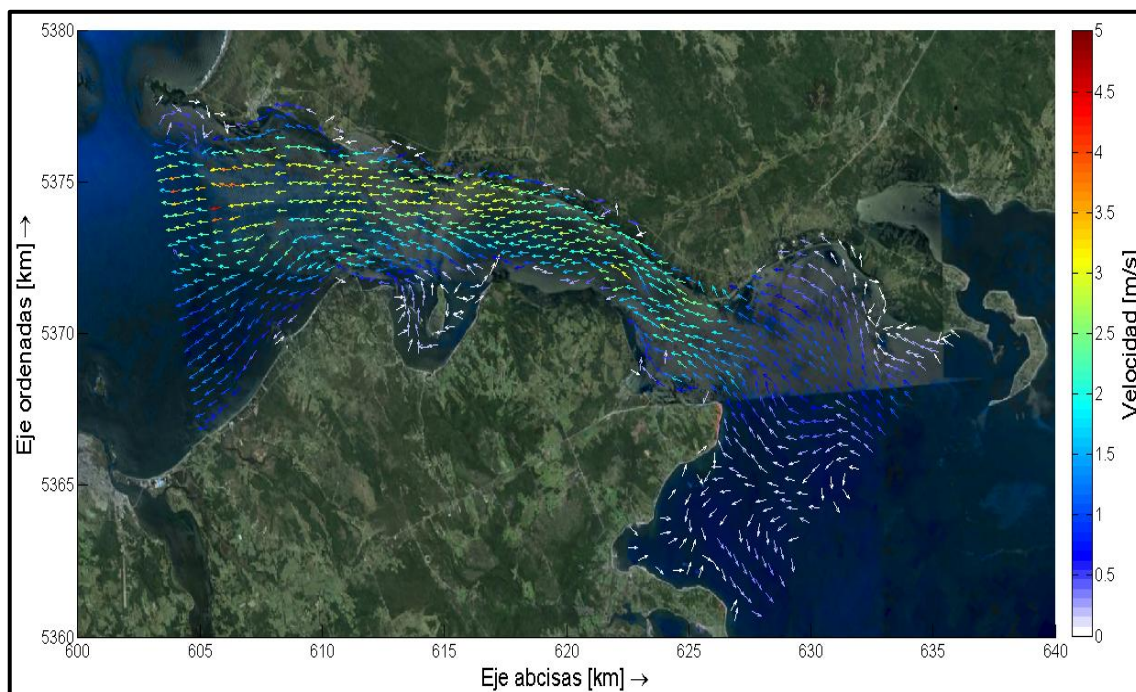


Figura 8-54: Velocidad condición Sicigia máxima Vaciante 3D – capa 9.

Fuente: Elaboración propia.

8.3 Anexo 3: Análisis de potencias 3D descritas en capa Superficial, Intermedia y Fondo.

- Capa superficial – Mensual.

Tabla 10: Cuadro energético potencia mensual – Capa Superficial.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	254160	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciente máxima Superficie [m/s]	5,16	3,91	3,88	3,29	4,19	3,54	2,91	3,84
Velocidad Vaciente media Superficie [m/s]	1,36	1,37	1,40	1,51	1,59	1,43	0,80	1,35
Velocidad Llenante máxima Superficie [m/s]	4,00	3,43	3,79	3,27	3,87	3,15	2,47	3,43
Velocidad Llenante media Superficie [m/s]	1,22	1,24	1,11	1,35	1,45	1,40	0,56	1,19
Potencia promedio mensual Superficie [Kw/m^2]	2,69	2,27	2,66	2,58	3,16	2,59	0,42	2,34
Potencia promedio perfil mensual Superficie [MW]	706,15	627,87	675,01	627,04	813,06	663,85	163,68	610,95

Fuente: Elaboración propia.

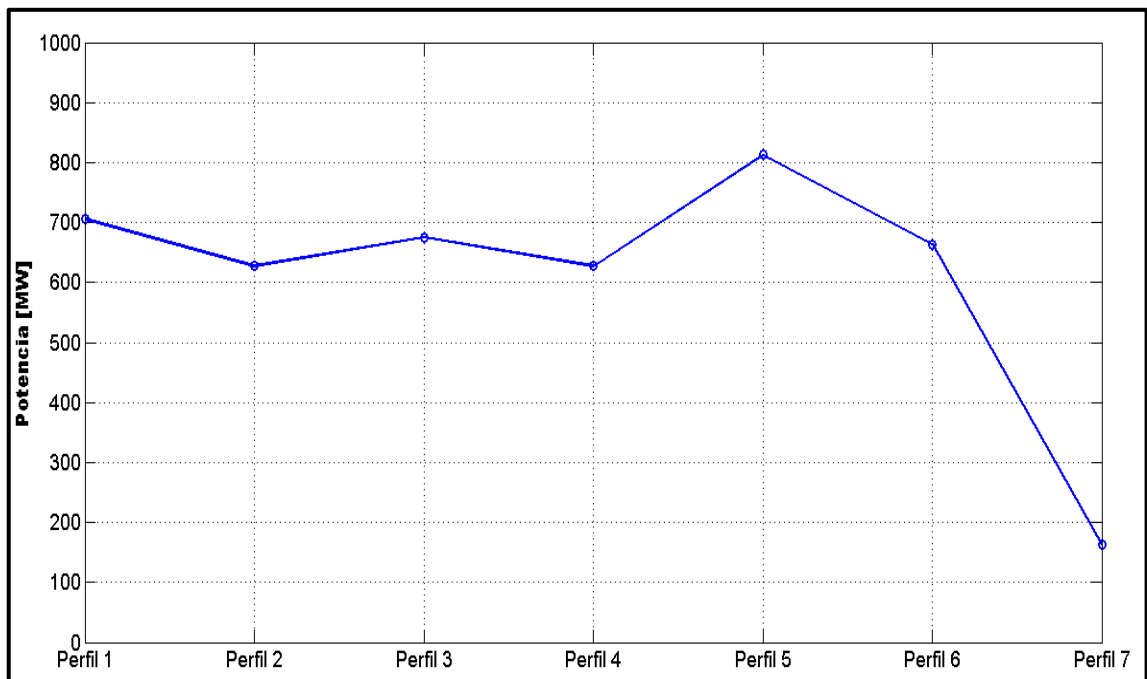


Figura 8-55: Perfil longitudinal de potencia mensual en Canal Chacao – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

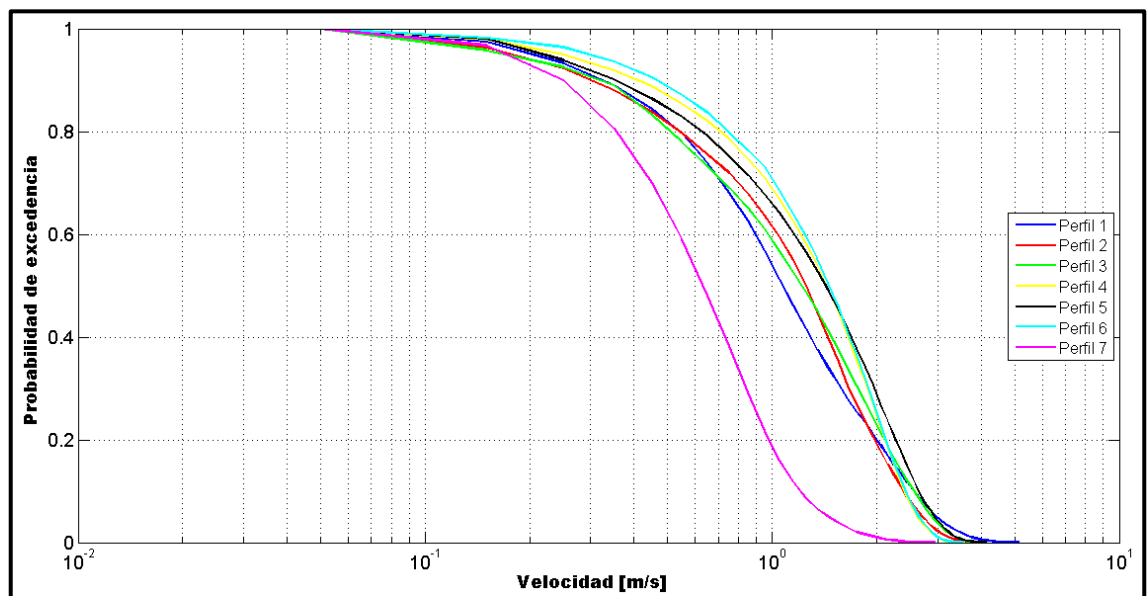


Figura 8-56: Curvas excedencia de velocidad mensual – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

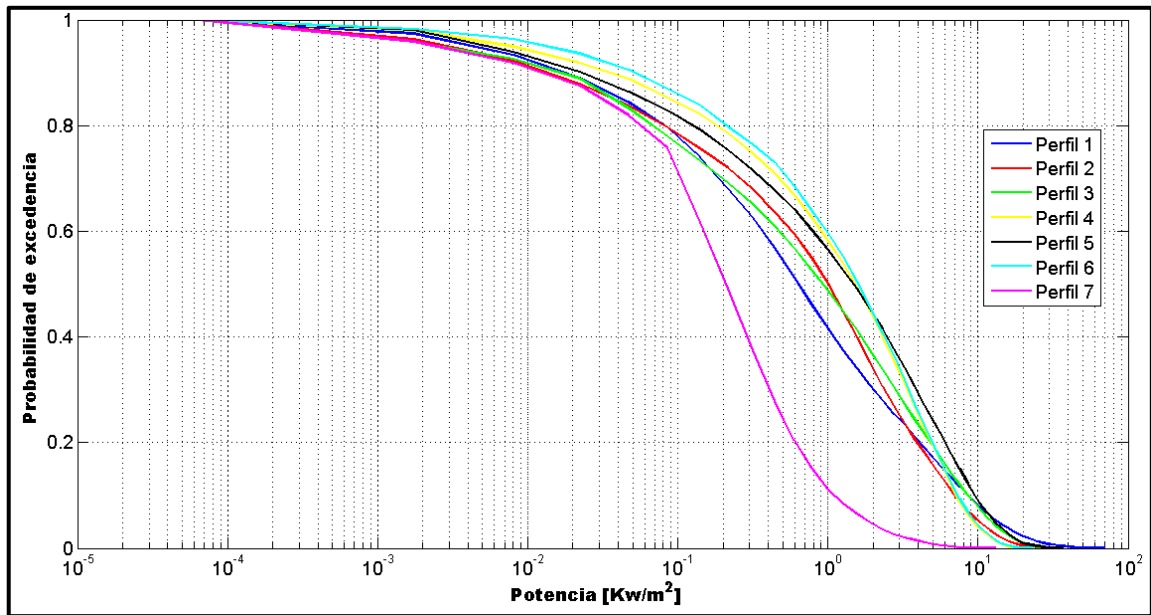


Figura 8-57: Curvas excedencia de potencia mensual – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

- **Capa superficial – Llenante.**

Tabla 11: Cuadro energético potencia llenante – Capa Superficial.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Llenante máxima Superficie [m/s]	4,00	3,43	3,79	3,27	3,87	3,15	2,47	3,43
Velocidad Llenante media Superficie [m/s]	1,22	1,24	1,11	1,35	1,45	1,40	0,56	1,19
Potencia promedio Llenante Superficie [Kw/m^2]	2,39	2,08	2,24	2,46	2,94	2,52	0,28	2,13
Potencia promedio perfil Llenante Superficie [MW]	629,04	574,37	635,34	597,43	755,02	644,16	109,02	563,48

Fuente: Elaboración propia.

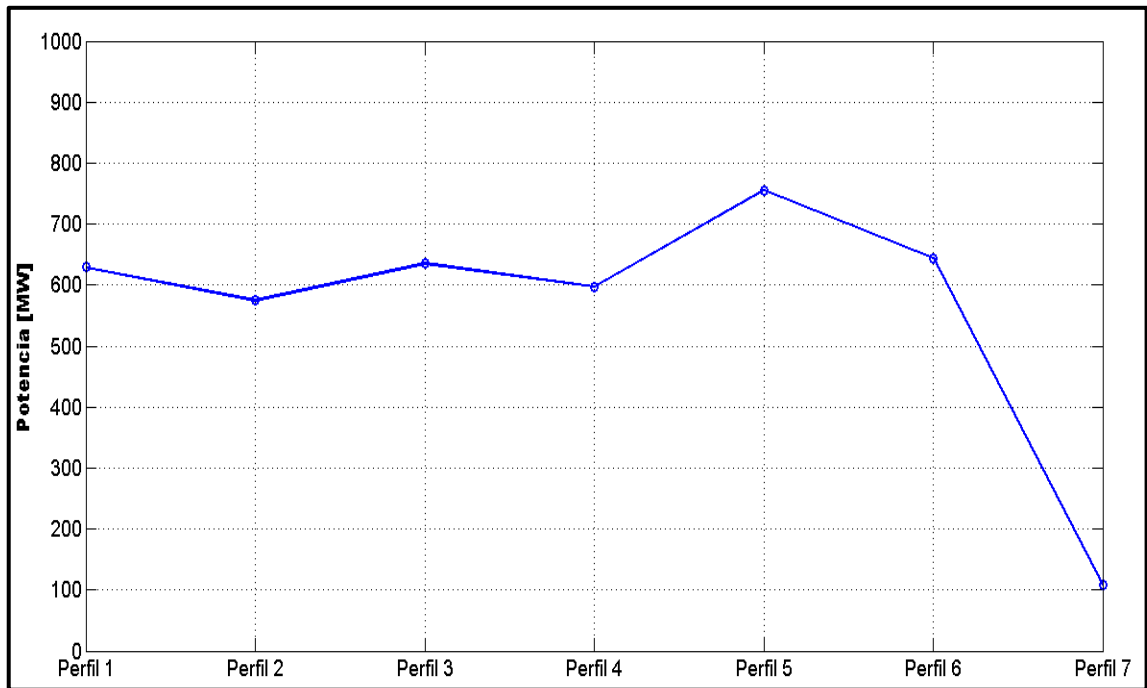


Figura 8-58: Perfil longitudinal de potencia llenante en Canal Chacao – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

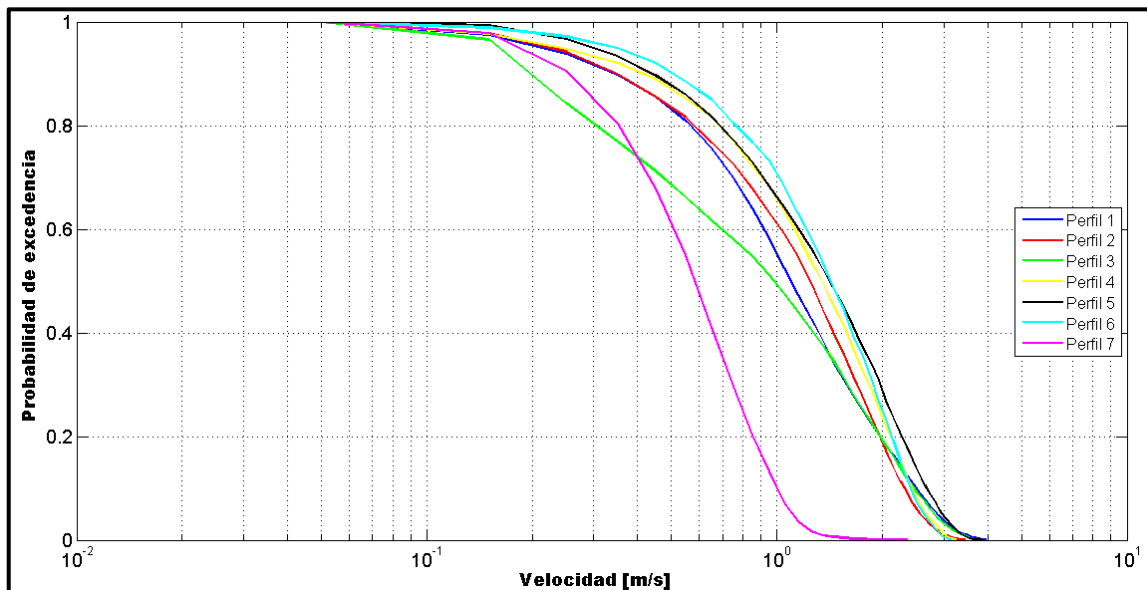


Figura 8-59: Curvas excedencia de velocidad llenante – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

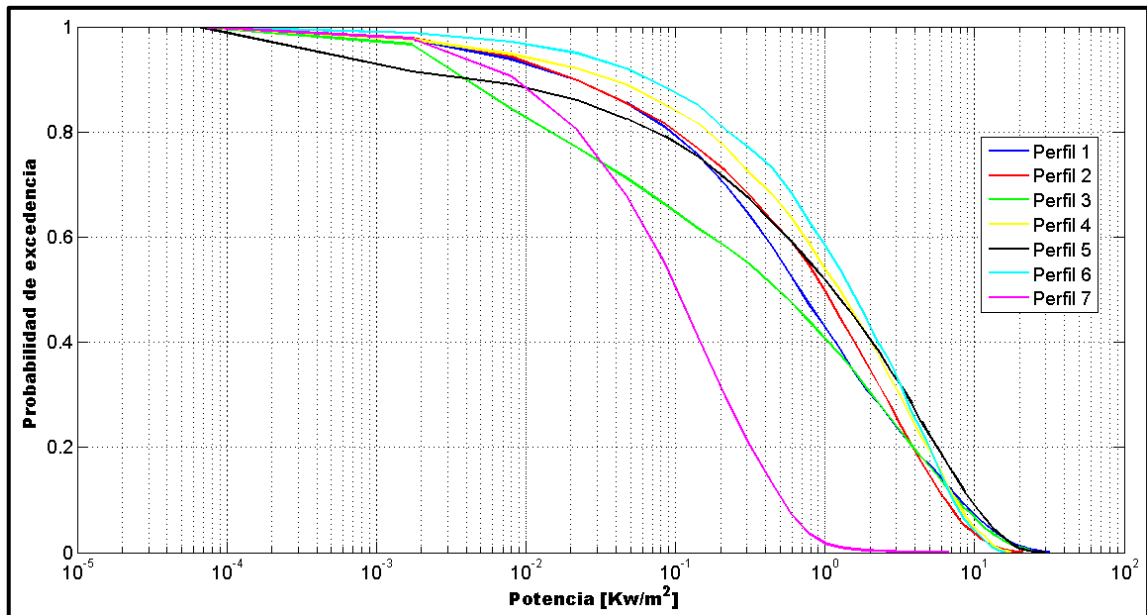


Figura 8-60: Curvas excedencia de potencia llenante – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

- **Capa superficial – Vaciente.**

Tabla 12: Cuadro energético potencia vaciante – Capa Superficial.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciente máxima Superficie [m/s]	5,16	3,91	3,88	3,29	4,19	3,54	2,91	3,84
Velocidad Vaciente media Superficie [m/s]	1,36	1,37	1,40	1,51	1,59	1,43	0,80	1,35
Potencia promedio Vaciente Superficie [Kw/m^2]	3,00	2,81	2,53	2,79	3,65	2,77	0,61	2,59
Potencia promedio perfil Vaciente Superficie [MW]	788,50	776,15	719,12	677,94	936,79	708,28	235,68	691,78

Fuente: Elaboración propia.

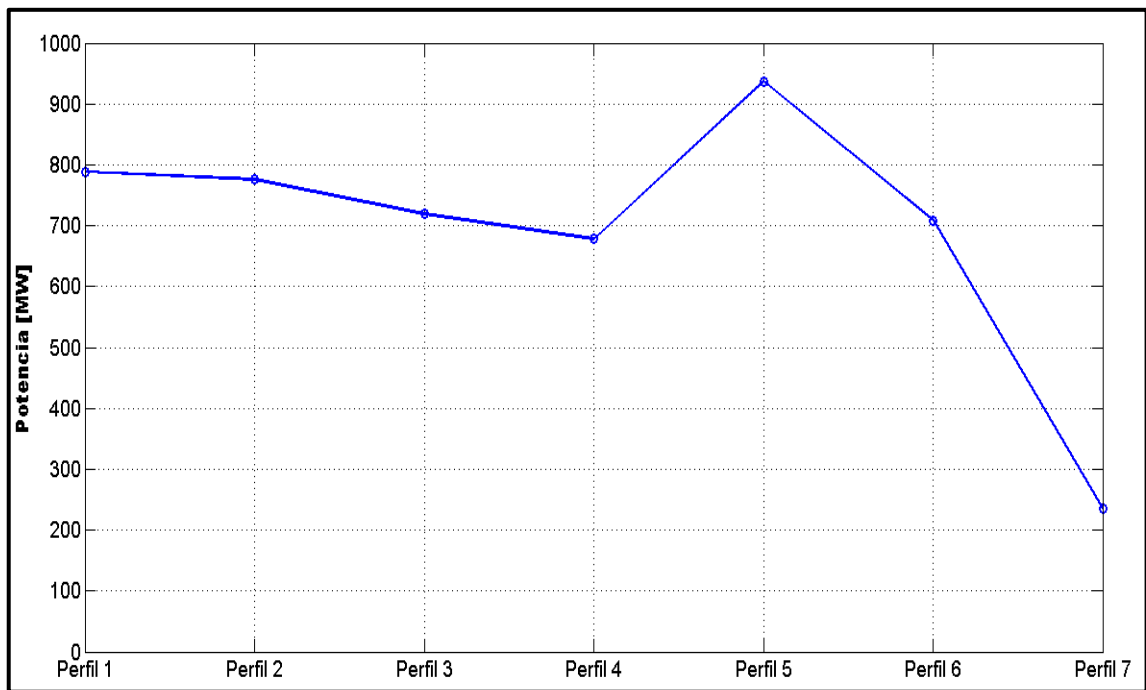


Figura 8-61: Perfil longitudinal de potencia vaciante en Canal Chacao – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

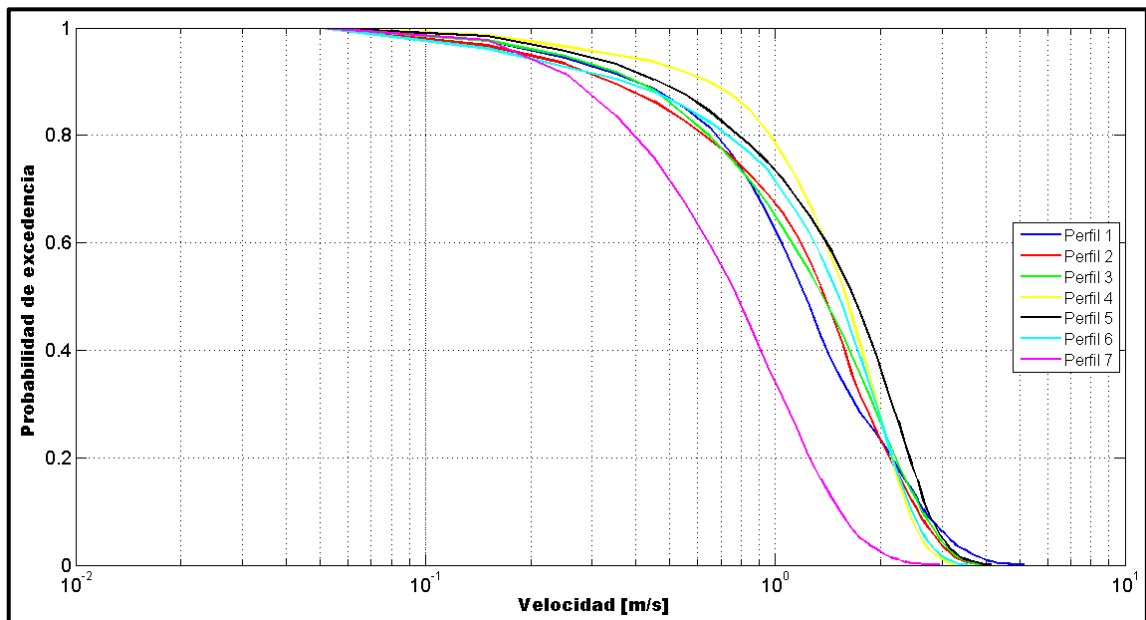


Figura 8-62: Curvas excedencia de velocidad vaciante – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

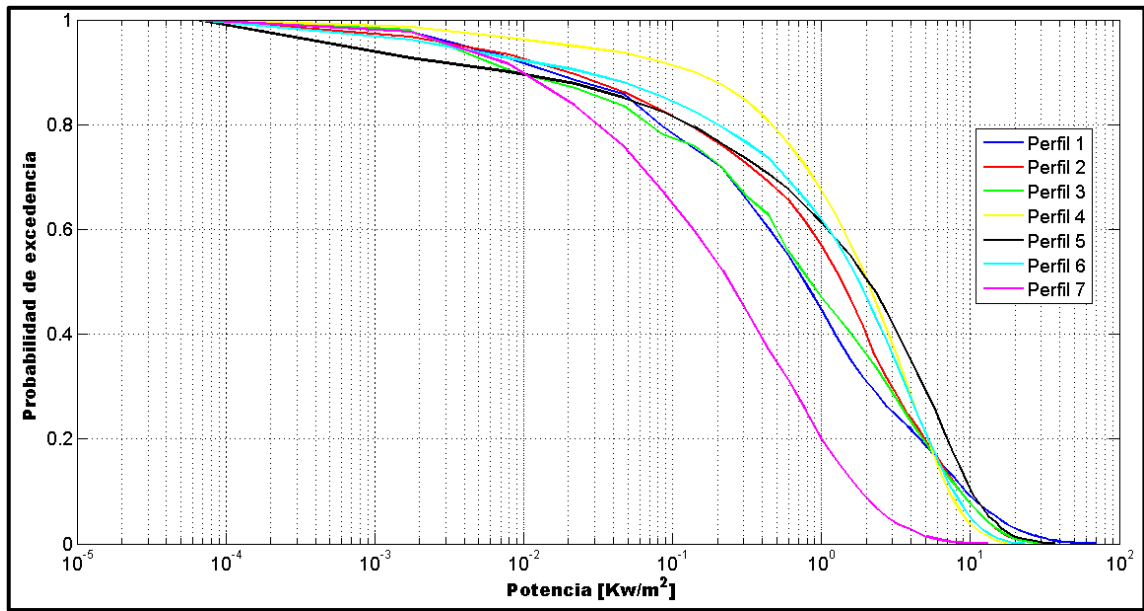


Figura 8-63: Curvas excedencia de potencia vaciante – Capa Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

- **Capa intermedia – Mensual.**

Tabla 13: Cuadro energético potencia mensual – Capa Intermedia.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciante máxima Intermedia [m/s]	4,55	3,25	3,66	3,28	4,10	3,40	2,81	3,58
Velocidad Vaciante media Intermedia [m/s]	1,28	1,27	1,29	1,50	1,57	1,35	0,79	1,29
Velocidad Llenante máxima Intermedia [m/s]	3,83	3,22	3,65	3,21	3,59	3,14	2,29	3,28
Velocidad Llenante media Intermedia [m/s]	1,16	0,78	1,14	1,29	1,34	1,27	0,55	1,07
Potencia promedio mensual Intermedia [Kw/m^2]	2,18	1,83	2,13	2,14	2,91	2,26	0,35	1,97
Potencia promedio perfil mensual Intermedia [MW]	572,64	506,87	604,95	520,69	747,47	578,30	135,73	523,81

Fuente: Elaboración propia.

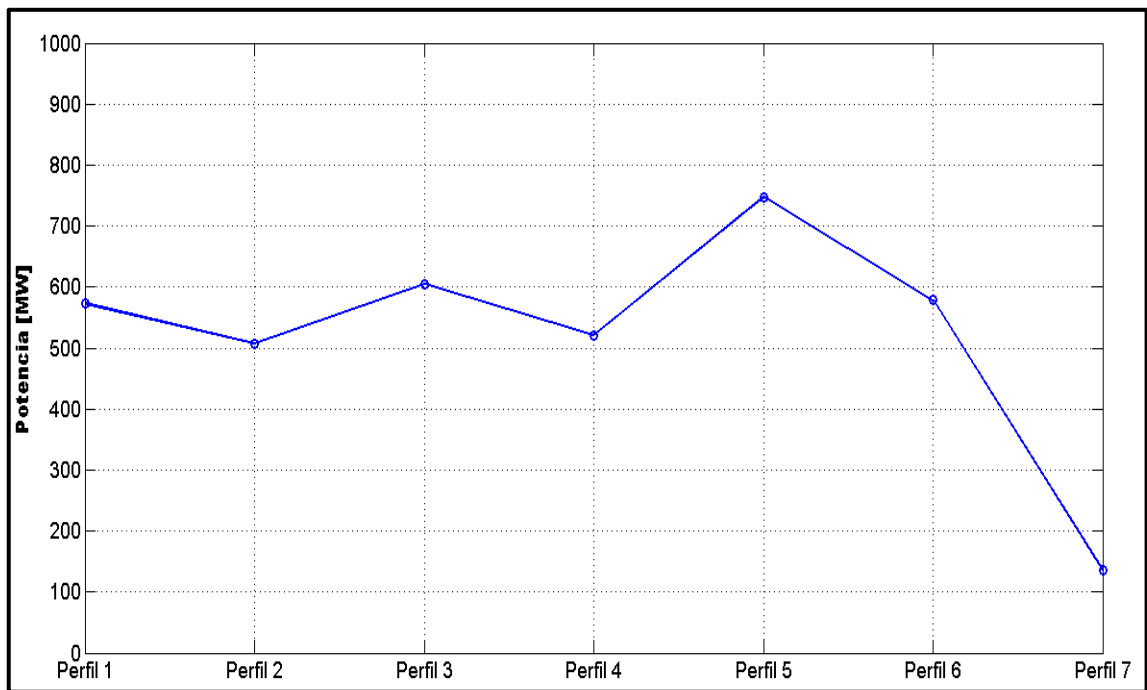


Figura 8-64: Perfil longitudinal de potencia mensual en Canal Chacao – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

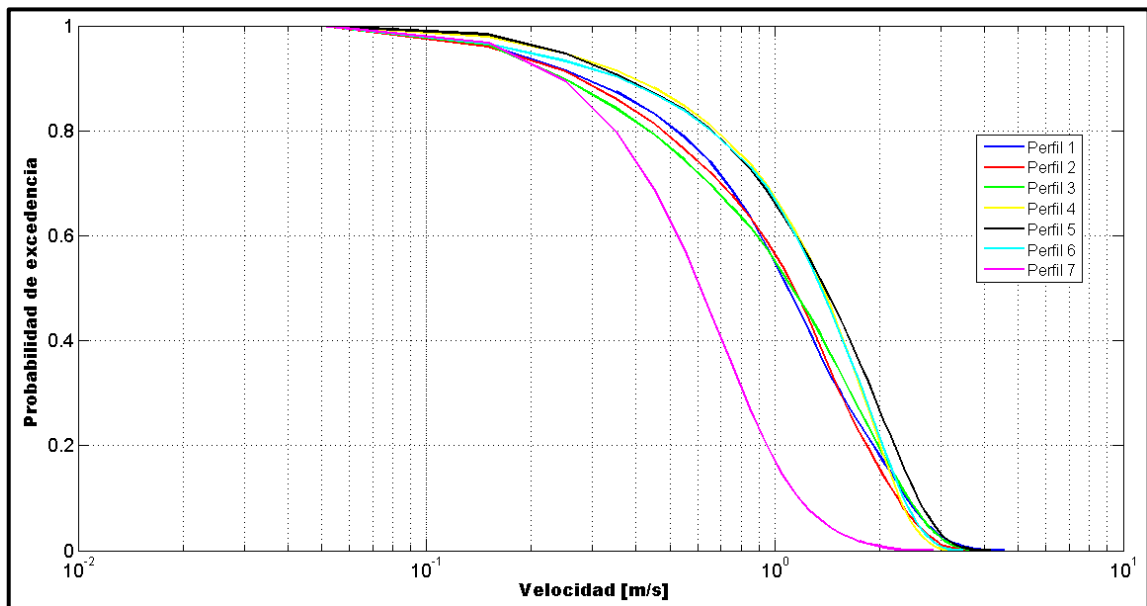


Figura 8-65: Curvas excedencia de velocidad mensual – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

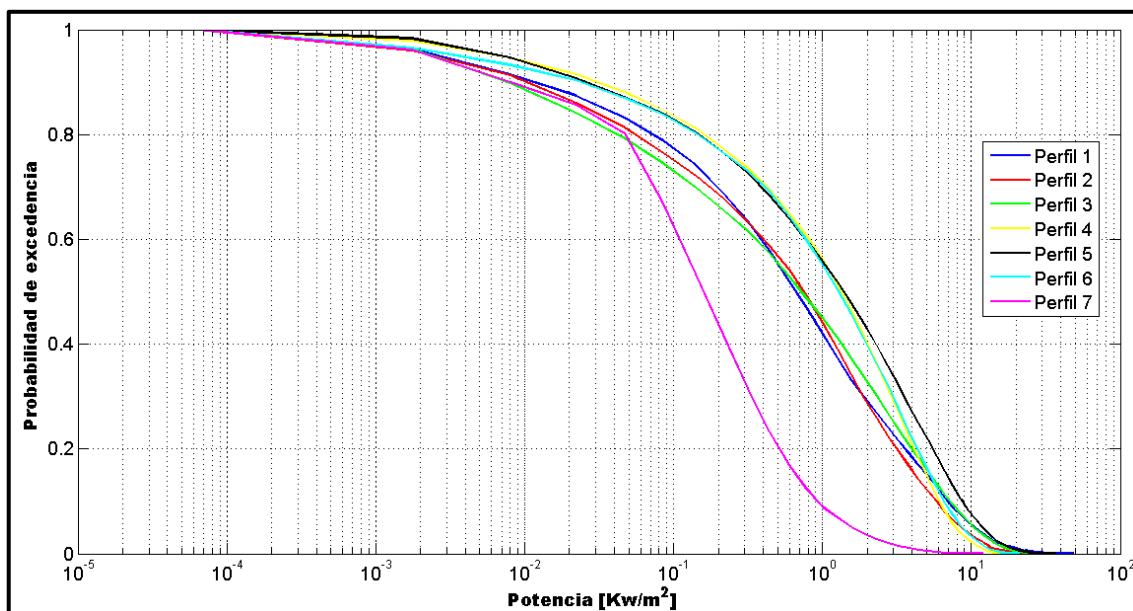


Figura 8-66: Curvas excedencia de potencia mensual – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

- **Capa intermedia – Llenante.**

Tabla 14: Cuadro energético potencia llenante – Capa Intermedia.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Llenante máxima Intermedia [m/s]	3,83	3,22	3,65	3,21	3,59	3,14	2,29	3,28
Velocidad Llenante media Intermedia [m/s]	1,16	0,78	1,14	1,29	1,34	1,27	0,55	1,07
Potencia promedio Llenante Intermedia [Kw/m^2]	2,05	1,09	2,13	2,12	2,50	2,12	0,27	1,75
Potencia promedio perfil Llenante Intermedia [MW]	539,12	301,75	604,95	514,70	641,25	543,69	104,37	464,26

Fuente: Elaboración propia.

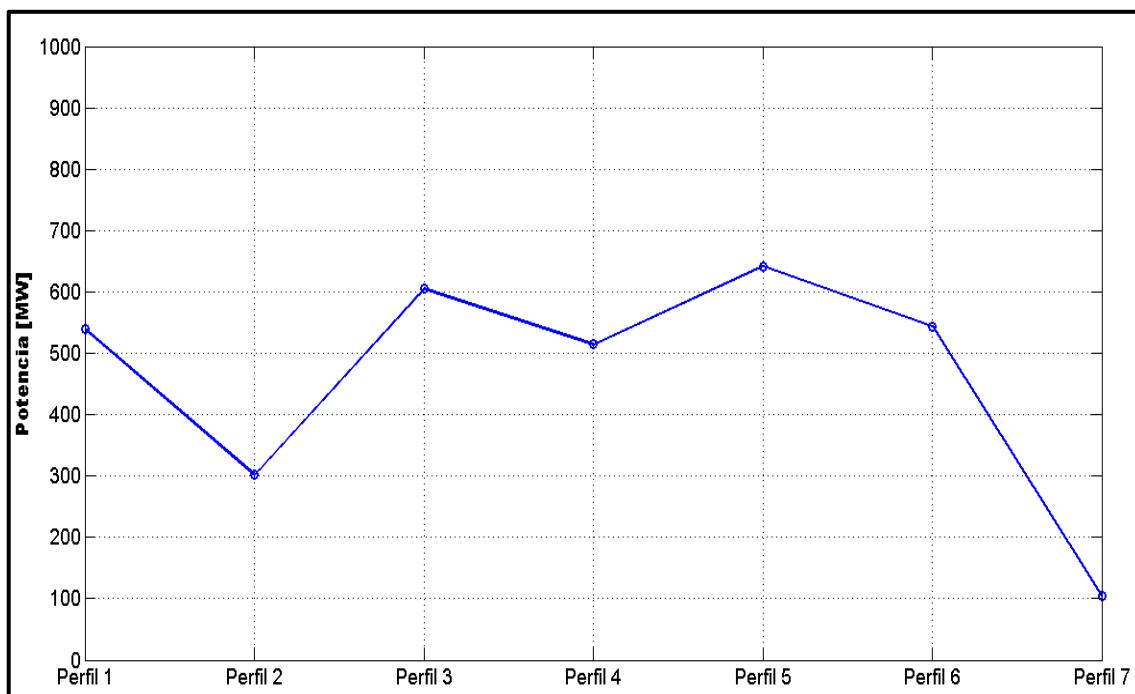


Figura 8-67: Perfil longitudinal de potencia llenante en Canal Chacao – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

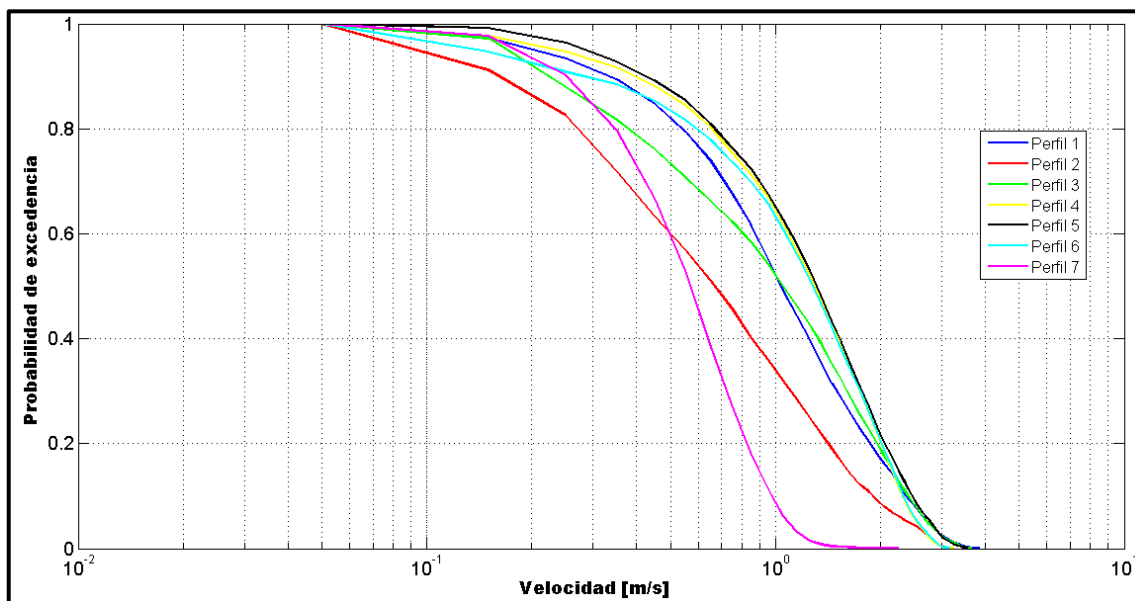


Figura 8-68: Curvas excedencia de velocidad llenante – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

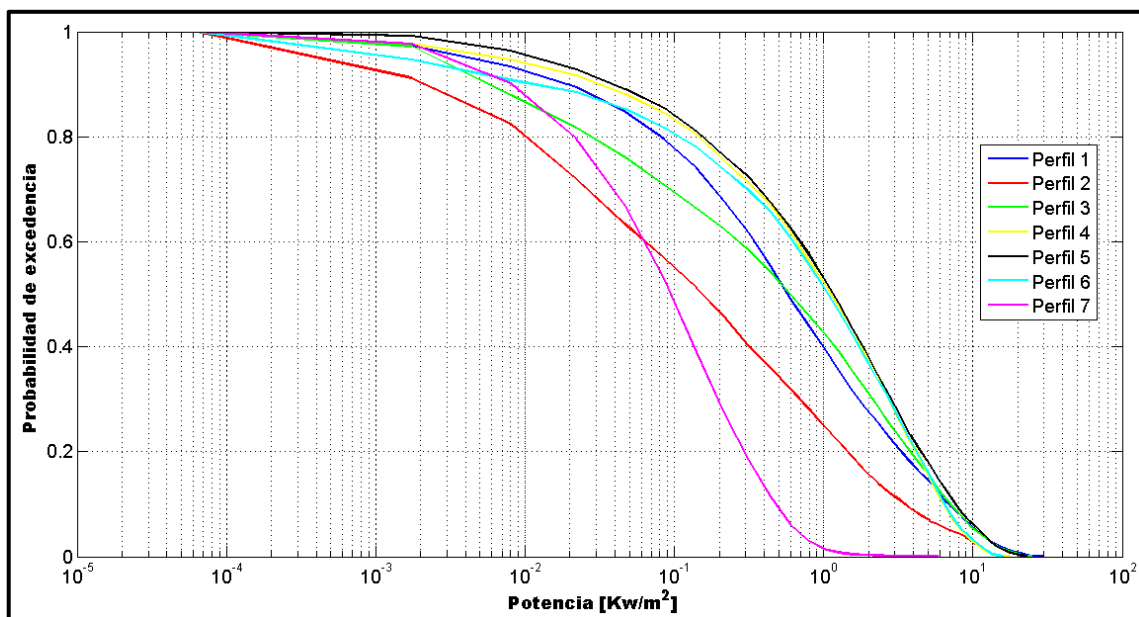


Figura 8-69: Curvas excedencia de potencia llenante – Capa Intermedia.
Fuente: Elaboración propia.

- **Capa intermedia – Vaciante.**

Tabla 15: Cuadro energético potencia vaciante – Capa Intermedia.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciante máxima Intermedia [m/s]	4,55	3,25	3,66	3,28	4,10	3,40	2,81	3,58
Velocidad Vaciante media Intermedia [m/s]	1,28	1,27	1,29	1,50	1,57	1,35	0,79	1,29
Potencia promedio Vaciante Intermedia [Kw/m^2]	2,57	1,99	2,40	2,67	3,37	2,56	0,58	2,31
Potencia promedio perfil Vaciante Intermedia [MW]	674,04	549,22	682,67	650,22	865,71	655,74	224,26	614,55

Fuente: Elaboración propia.

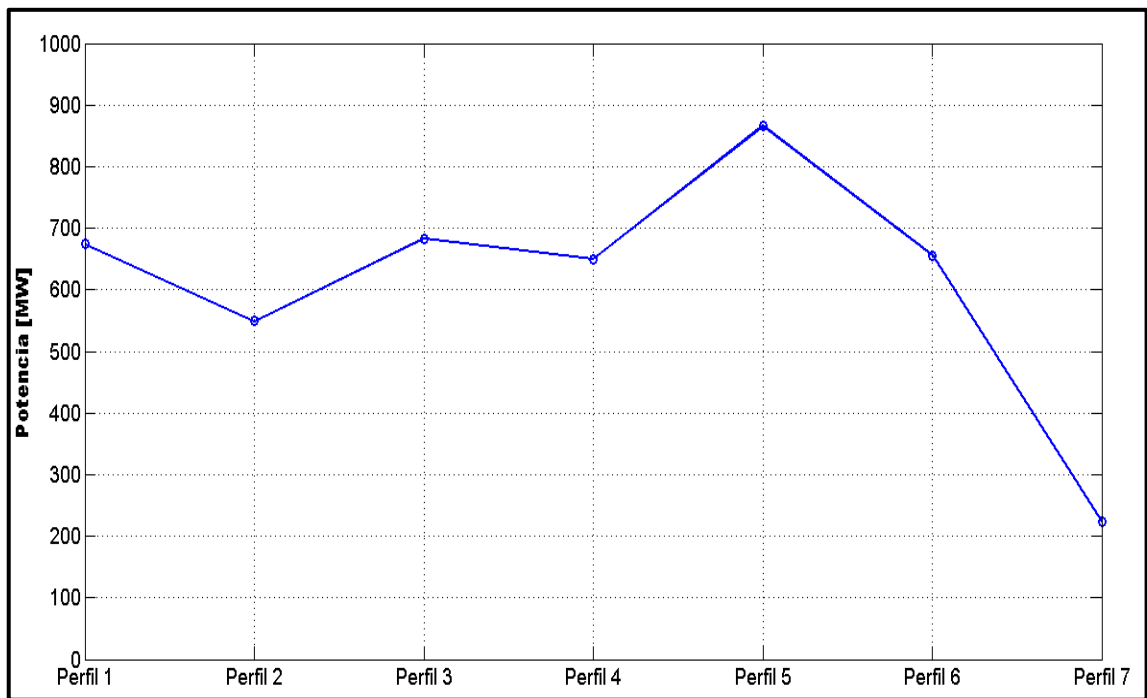


Figura 8-70: Perfil longitudinal de potencia vaciante en Canal Chacao – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

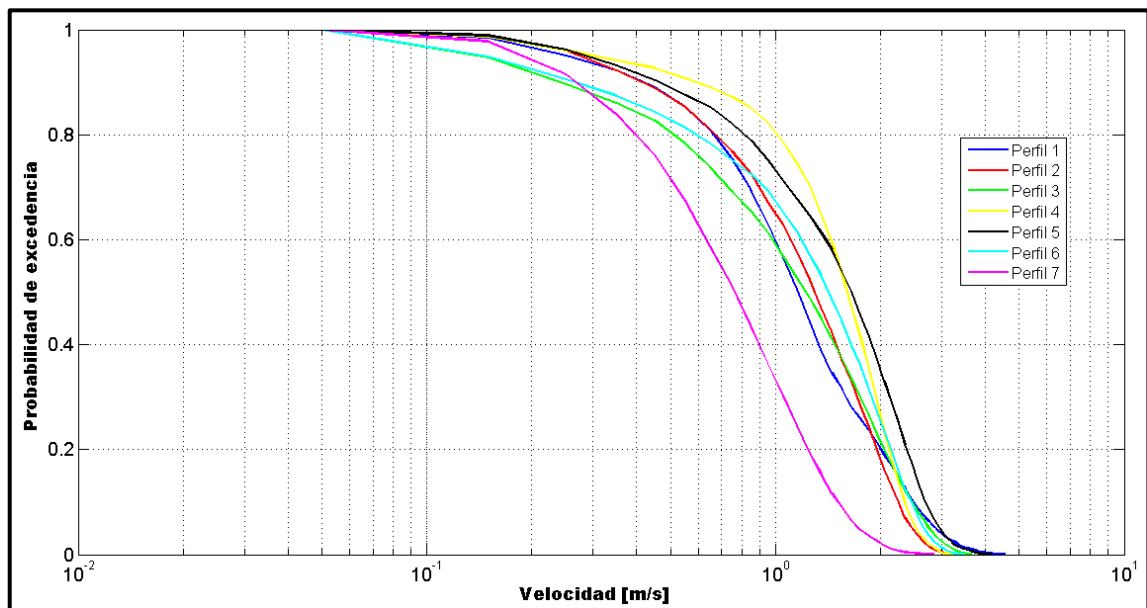


Figura 8-71: Curvas excedencia de velocidad vaciante – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

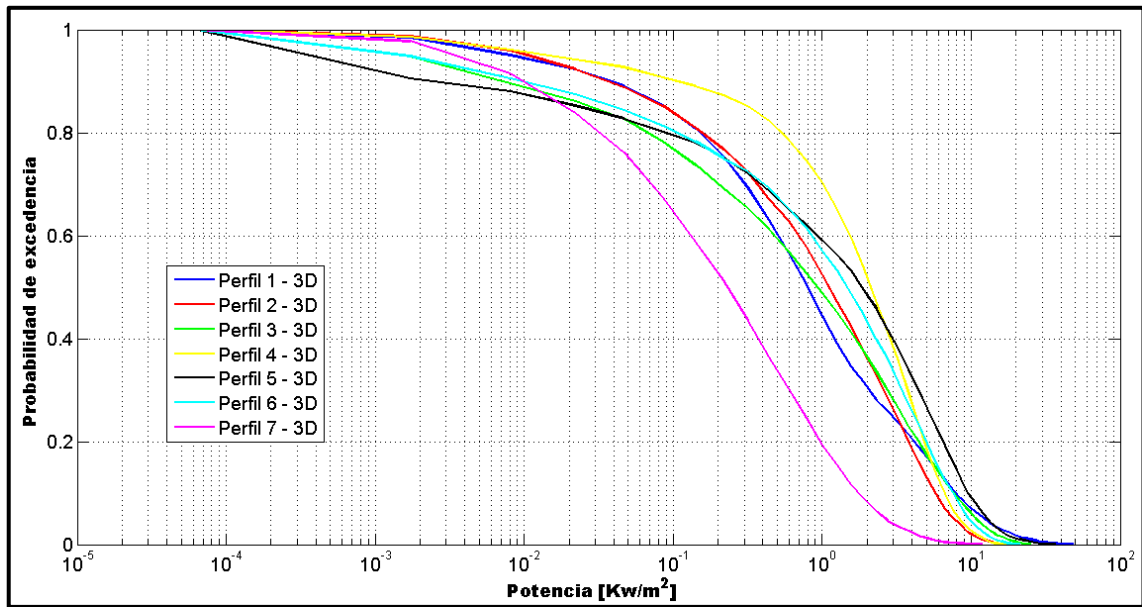


Figura 8-72: Curvas excedencia de potencia vaciante – Capa Intermedia.

Fuente: Elaboración propia.

- **Capa Fondo – Mensual.**

Tabla 16: Cuadro energético potencia mensual – Capa Fondo.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciante máxima Fondo [m/s]	3,53	3,06	3,39	3,07	3,80	3,47	2,69	3,29
Velocidad Vaciante media Fondo [m/s]	1,15	1,16	1,20	1,41	1,29	1,24	0,81	1,18
Velocidad Llenante máxima Fondo [m/s]	3,39	2,95	3,38	2,99	3,40	3,16	2,33	3,09
Velocidad Llenante media Fondo [m/s]	1,08	0,78	1,07	1,22	1,18	1,27	0,60	1,03
Potencia promedio mensual Fondo [Kw/m^2]	1,50	1,30	1,60	1,56	2,26	1,60	0,27	1,44
Potencia promedio perfil mensual Fondo [MW]	394,86	359,76	407,34	379,17	580,44	408,84	103,73	376,31

Fuente: Elaboración propia.

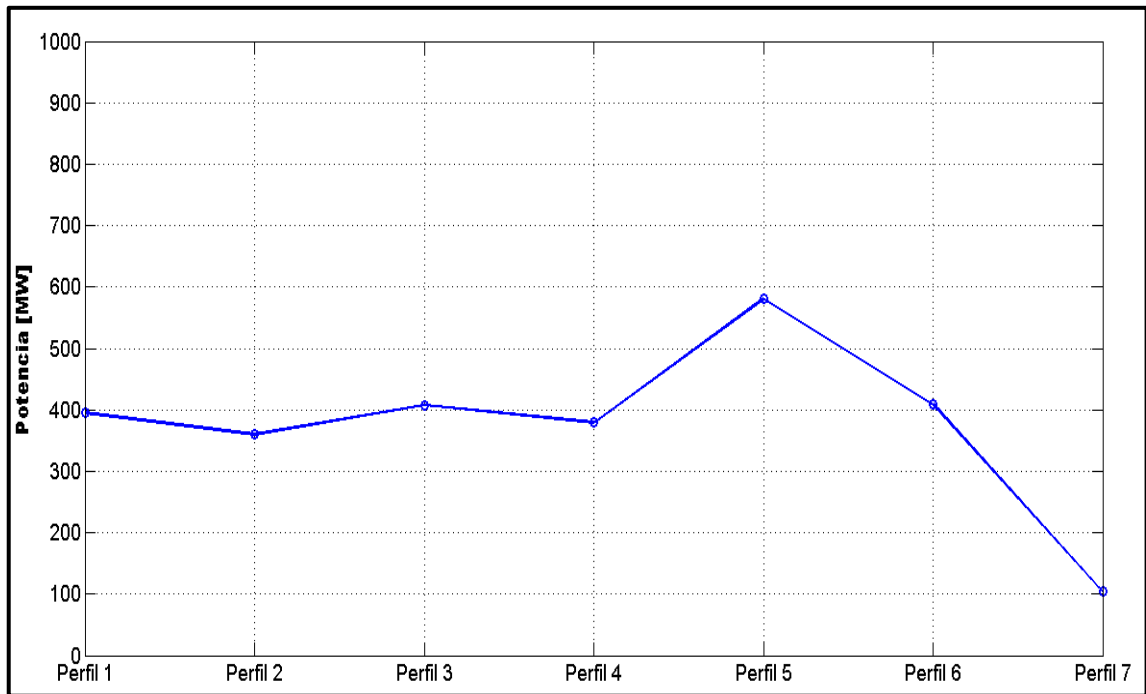


Figura 8-73: Perfil longitudinal de potencia mensual en Canal Chacao – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

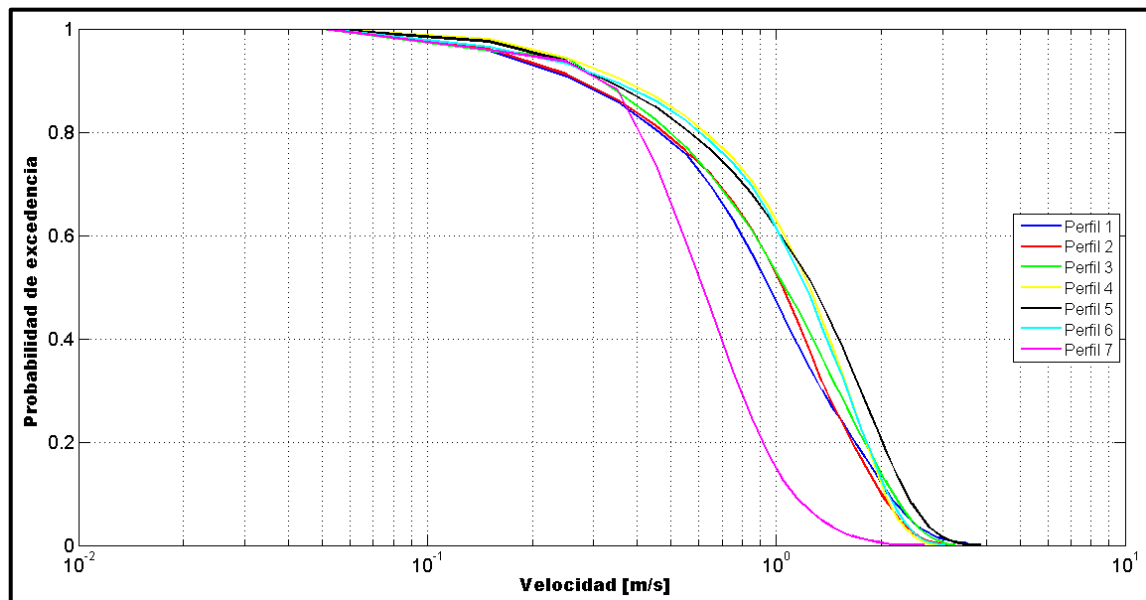


Figura 8-74: Curvas excedencia de velocidad mensual – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

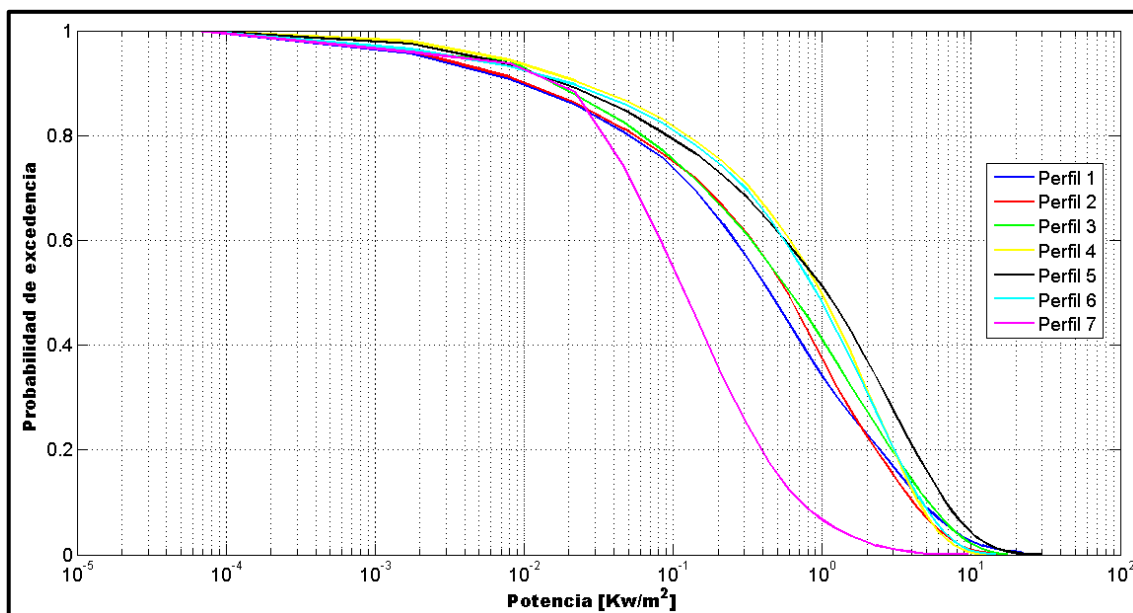


Figura 8-75: Curvas excedencia de potencia mensual – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

- **Capa Fondo – Llenante.**

Tabla 17: Cuadro energético potencia llenante – Capa Fondo.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Llenante máxima Fondo [m/s]	3,47	2,65	3,20	2,80	3,44	2,85	2,10	2,93
Velocidad Llenante media Fondo [m/s]	1,03	0,82	1,01	1,16	1,23	1,17	0,57	1,00
Potencia promedio Llenante Fondo [Kw/m^2]	1,43	0,75	1,41	1,51	1,94	1,52	0,16	1,25
Potencia promedio perfil Llenante Fondo [MW]	376,48	207,56	400,90	368,32	499,26	389,11	61,44	329,01

Fuente: Elaboración propia.

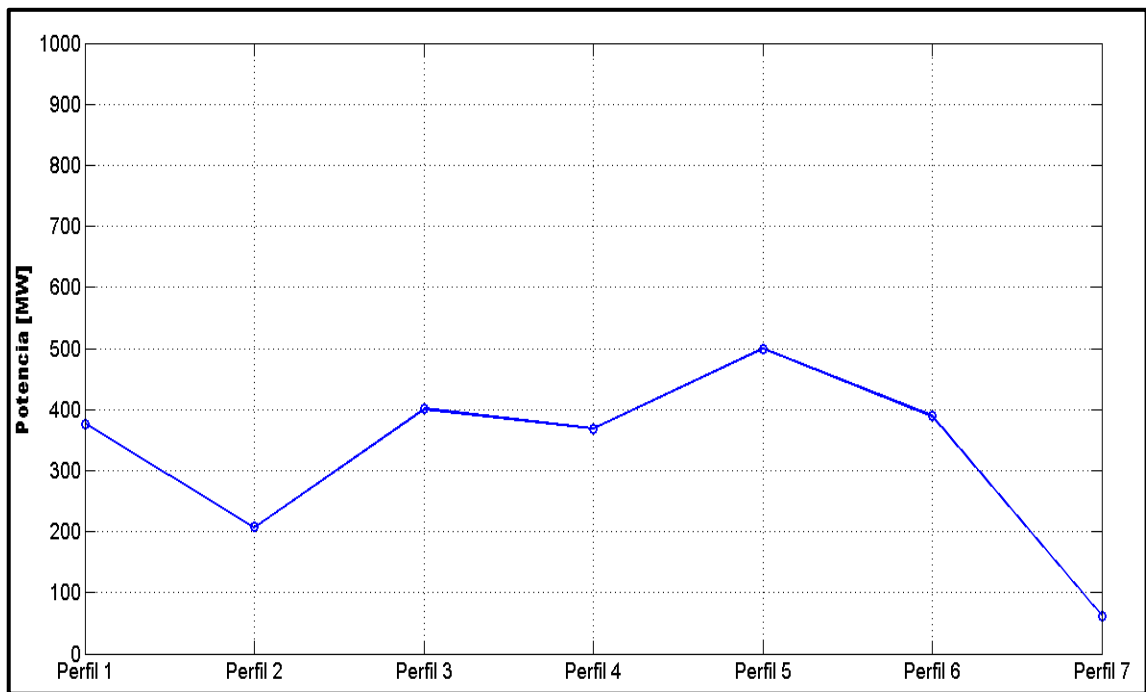


Figura 8-76: Perfil longitudinal de potencia llenante en Canal Chacao – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

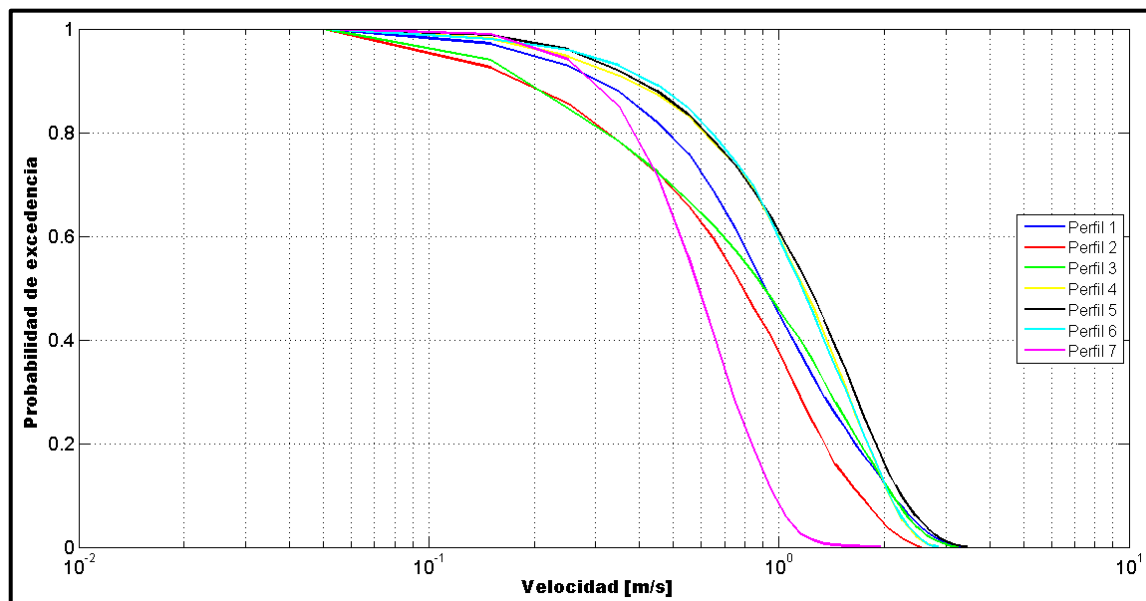


Figura 8-77: Curvas excedencia de velocidad llenante – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

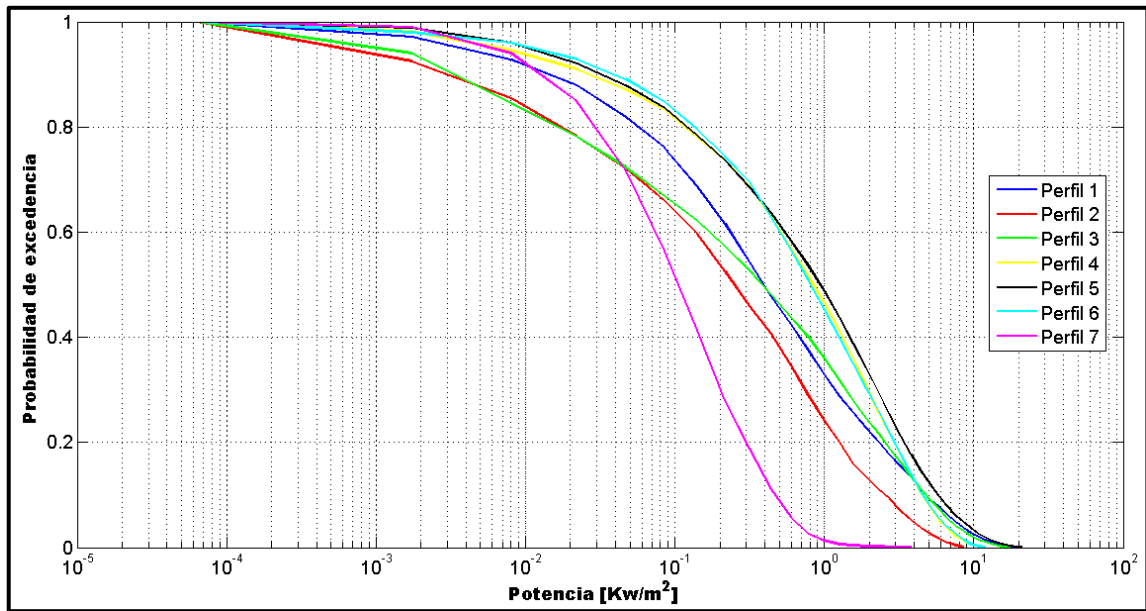


Figura 8-78: Curvas excedencia de potencia llenante – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

- **Capa Fondo - Vaciante.**

Tabla 18: Cuadro energético potencia vaciante – Capa Fondo.

Característica	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Promedio
Área [m^2]	262277	276610	284266	243160	256896	255895	388780	276825
Longitud [m]	7179	4514	5340	3196	2470	4162	6983	4835
Profundidad media [m]	26	39	51	69	66	57	77	55
Profundidad máxima [m]	72	76	90	100	134	78	126	97
Velocidad Vaciante máxima Fondo [m/s]	3,84	3,20	3,23	2,94	3,86	3,10	2,69	3,27
Velocidad Vaciante media Fondo [m/s]	1,07	0,86	1,14	1,34	1,43	1,19	0,81	1,12
Potencia promedio Vaciante Fondo [Kw/m^2]	1,58	1,50	1,66	1,88	2,63	1,77	0,56	1,65
Potencia promedio perfil Vaciante Fondo [MW]	414,03	413,56	471,48	457,10	675,34	452,01	216,43	442,85

Fuente: Elaboración propia.

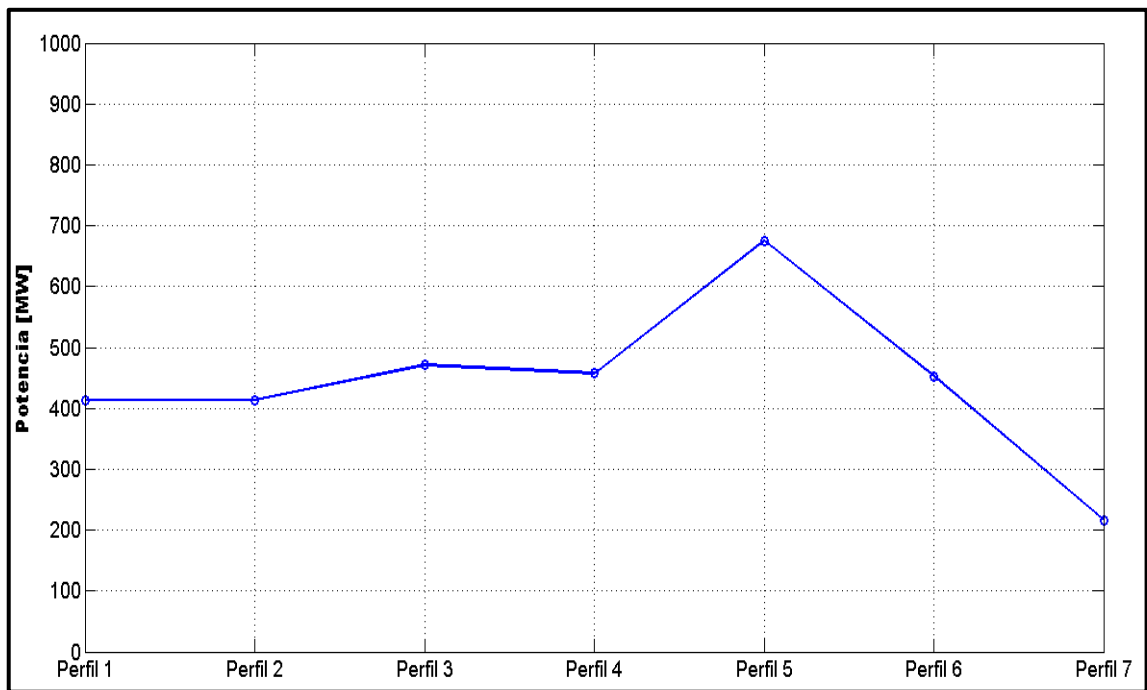


Figura 8-79: Perfil longitudinal de potencia vaciante en Canal Chacao – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

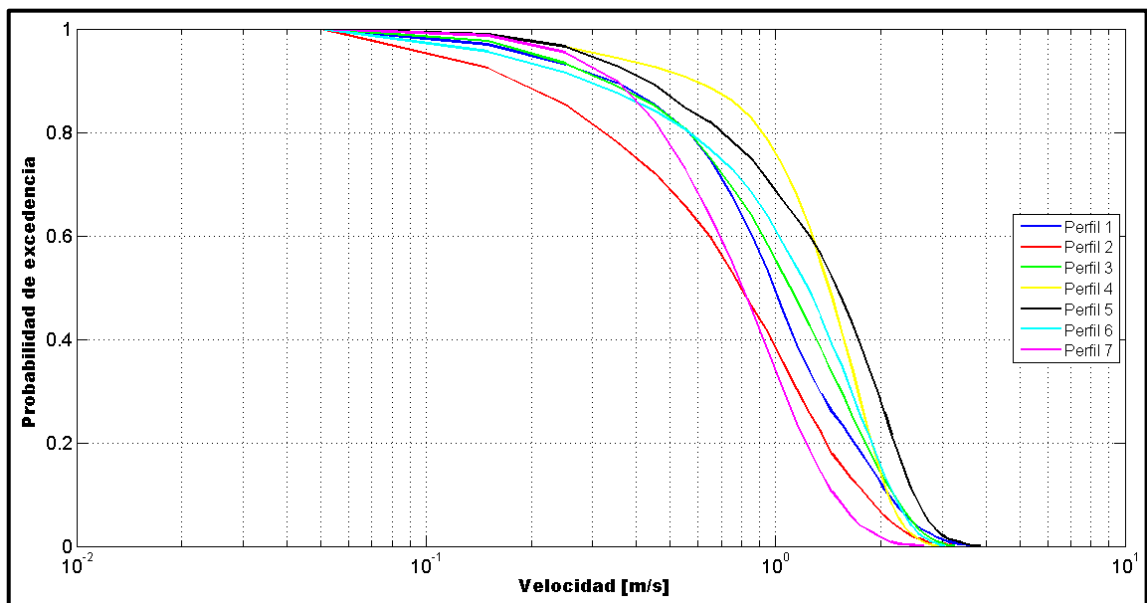


Figura 8-80: Curvas excedencia de velocidad vaciante – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

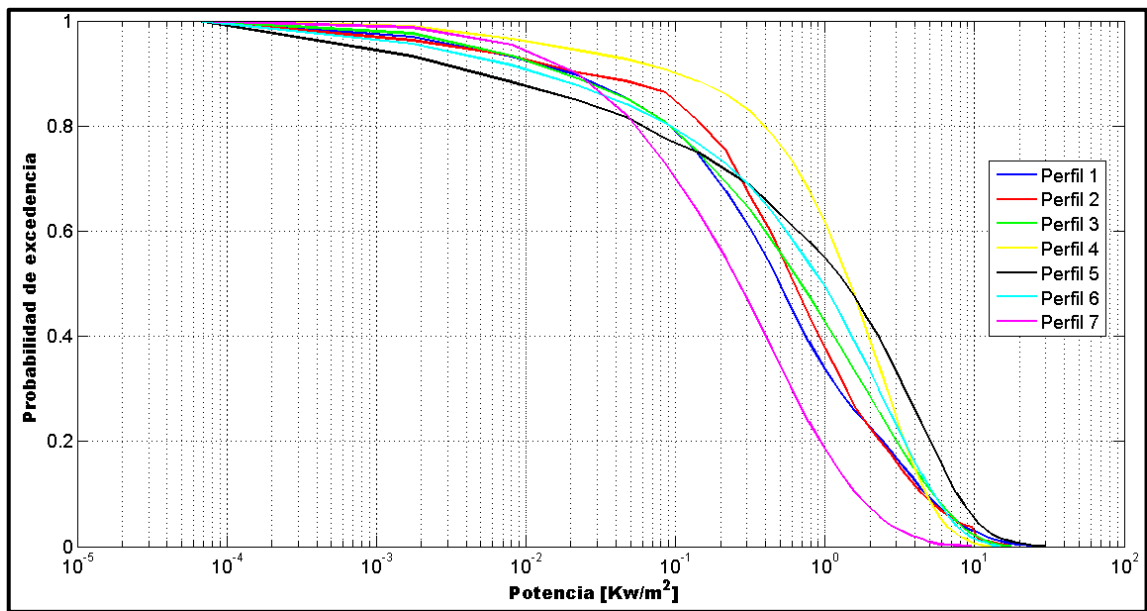


Figura 8-81: Curvas excedencia de potencia vaciante – Capa Fondo.

Fuente: Elaboración propia.

8.4 Anexo 4: Glosario.

- ADCP: Perfilador acústico que mide la magnitud y dirección de la corriente a diferentes profundidades, utilizando el efecto doppler. (www.whoj.edu)
- Altura de marea: Distancia vertical entre el nivel del mar y el nivel de reducción de sondas, o el nivel que se especifique, en un instante cualquiera. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Amplitud de marea: La mitad de la diferencia en altura entre una pleamar y bajamar consecutiva. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Análisis Armónico: Método basado en la suposición que el movimiento de ascenso y descenso de la marea en un lugar cualquiera, puede ser expresado matemáticamente como la sumatoria de una serie de términos armónicos que cumplen ciertas condiciones astronómicas. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Bajamar: Nivel mínimo alcanzado por una marea vaciante en un día cualquiera. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Batimetría: Levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, ya sea del lecho marino, canales, lagos, embalses, etc.
- Calibrar: Comparación de los resultados simulados por un modelo con las mediciones de campo, con el fin de verificar la representatividad del modelo respecto a la realidad.
- Canal: Porción de mar, larga y estrecha, que divide dos islas o continentes generando comunicación entre dos cuerpos de agua, estos existen de forma natural y artificial.
- Ciclo Hidrológico: Describe el movimiento continuo y cíclico de las distintas etapas enmarcadas en el ciclo del agua, cambiando entre líquido, vapor y hielo.
- Correntómetro: Instrumento utilizado para medir la velocidad de la corriente en el mar, en los ríos, arroyos, estuarios, y modelos físicos en laboratorio, etc. (www.cccp.org.co)
- Corriente de flujo: Movimiento de la corriente de marea hacia la costa. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).

- Corriente de marea: El término se aplica exclusivamente a las corrientes periódicas producidas por la marea. Su característica principal es su renovación sin cambio con las mismas mareas. En consecuencia, pueden ser previstas muy exactamente, después de ser objeto de observaciones precisas. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Cuadratura: Posición de la Luna cuando su longitud celeste difiere 90° de la longitud del Sol. Las fases correspondientes se denominan creciente y menguante. Las amplitudes de mareas durante la cuadratura son las mínimas del mes. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Efecto de Coriolis: Este efecto consiste en la aceleración relativa de un cuerpo dentro de un sistema de rotación. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de rotación del sistema y a la velocidad del cuerpo. (Gaspard Coriolis, 1836).
- Energía: Se define como la capacidad de realizar un trabajo.
- Energía de mareas: Es la energía que resulta del aprovechamiento de la marea, es decir las diferencias de la altura media de los mares respecto a la posición relativa de la Tierra, Sol y Luna. La energía disponible puede ser explotada de dos formas: aprovechando la energía potencial (generada por la diferencia de alturas) o la energía cinética (corrientes generadas por marea). (García, 2009).
- ERNC: Las energías renovables no convencionales corresponden a aquellas fuentes de energía que pueden renovar su suministro a escala de tiempo humana. (Malebrán, 2013).
- Escarceos: Zona de pequeñas ondulaciones y Remolinos que se producen en un mar calmo. Rompiente de olas causadas por confluencia de varias corrientes o por el viento que sopla en dirección opuesta a la corriente. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Estoa de marea: Es el instante en que el nivel del mar permanece fijo en pleamar o bajamar.
- Estoa de corrientes: Es el instante en que la velocidad de la corriente de marea está cerca de cero. También se dice que es el momento en que la corriente cambia de dirección y su velocidad es nula. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Flujo: La marea ascendente o creciente recibe el nombre de marea de flujo. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).

- Gradiente de presión: Se define como el cambio de presión por unidad de profundidad, expresado normalmente en $[kPa/m]$. (<http://www.glossary.oilfield.slb.com/>)
- Limite abierto: Se define como el límite que define la frontera entre el dominio del modelo y mar abierto, normalmente aquí se definen las condiciones de borde que gobiernan el problema.
- Limite cerrado: Se define como el límite que define dentro del modelo la interacción tierra – agua, donde éste considera una velocidad normal cero.
- Marea: Se define como el ascenso y descenso rítmico y alternado de la superficie del océano (o nivel del agua) y de los cuerpos de agua conectados con el océano, tales como: estuarios, golfos y canales, que ocurren dos veces al día sobre la mayor parte de la Tierra. y que resultan de la atracción gravitacional de la Luna y en menor grado de la del Sol, actuando desigualmente sobre partes diferentes de la Tierra en rotación. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Marea muerta: También conocida como marea de cuadratura, representa el momento en donde la Luna y el Sol forman un ángulo de 90° , contrarrestando sus efectos de atracción sobre los mares. Esto ocasiona que tanto bajamar como pleamar se vean disminuidas respecto de su valor habitual.
- Marea viva: También conocida como marea de sicigia, representa el momento donde la Luna y el Sol se encuentran alineados, amplificando sus efectos de atracción sobre los mares. En consecuencia, tanto la bajamar como pleamar presentan un aumento respecto de su valor habitual.
- Mareógrafo: Es un instrumento que permite medir y registrar las variaciones del nivel del mar.
- Modelo Hidrodinámico: Es una representación matemática simplificada de un fenómeno físico real.
- Nivel de reducción de sonda: Es el plano al cual están referidas las sondas o profundidades de una localidad. Las necesidades de navegación requieren que la carta náutica en la cual se insertan las sondas muestre la mínima profundidad que se puede encontrar en un punto, por lo tanto, usualmente se adopta como dátum de la carta algún nivel relacionado con las bajamares. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).

- Nivel medio del mar: Como su nombre lo indica es el nivel promedio de los movimientos del nivel del mar. Su expresión física sería la del plano que adoptarían las aguas en reposo, depurada la acción de la marea. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Pleamar: Nivel máximo alcanzado por una marea creciente. Este nivel puede ser efecto exclusivo de mareas periódicas o pueden sumarse a éstas los efectos de condiciones meteorológicas prevalecientes. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Presión Atmosférica: Es la fuerza que produce el peso de una columna de atmósfera ejerce por unidad de área. (www.atmosfera.cl)
- Rugosidad: Este concepto permite describir y definir la forma del lecho marino, utilizando distintas formulaciones propuestas.
- Sicihia: Fase de la luna cuando es llena o nueva. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Sonda: Profundidad obtenida en la operación de sondaje, la cual una vez corregida por la marea se vacía en la carta náutica. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Storm surges: Se refiere a una inundación costera asociada a un sistema atmosférico de baja presión. (NOAA, 2007).
- Time Step: Paso de tiempo destinado para el cálculo computacional.
- Validación: Se refiere a calibrar un modelo en un periodo de tiempo distinto al del estudio, por ejemplo si se calibró el modelo en verano, puede ser validado de forma anual calibrándolo en la condición de invierno.
- Veriles: Líneas que unen los puntos de igual profundidad. (SHOA, Glosario de marea y corrientes, 1992).
- Viento: Movimiento horizontal de aire, generado por diferencias de presión atmosférica. También existen corrientes verticales. (www.buenastareas.com).
- Viscosidad: Es la característica que tiene un fluido de oponer resistencia al flujo.