

Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA TRIDIMENSIONAL DE LOS EFECTOS DE LA SURGENCIA EN BAHÍA MEJILLONES

Nicole Maturana Morales Septiembre 2021

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA TRIDIMEN-SIONAL DE LOS EFECTOS DE LA SURGEN-CIA EN BAHÍA MEJILLONES

NICOLE PATRICIA MATURANA MORALES

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Matías Quezada Labra Profesor Guía		
Patricio Winckler Grez Revisor Docente Universidad de Valparaíso		
Mauricio Reyes Gallardo Revisor Docente Universidad de Valparaíso		

DECLARACIÓN

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

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

Matías Quezada Labra

Profesor Guía

Nicole Maturana Morales Alumna Memorista

AGRADECIMIENTOS

Fue un proceso lleno de aprendizaje, son tantas las palabras de agradecimientos que cuesta canalizarlas y expresarlas, ya que son muchas personas que se involucraron de una u otra manera en el proceso y me empujaron a finalizar esta etapa de mi vida.

Empiezo por agradecerle a mi familia. A mis padres Noemí y Patricio por su amor, apoyo y paciencia incondicional, sin ellos este mérito no sería posible. El esfuerzo de ellos me permitió acceder a la educación superior. Estuvieron en todo momento incentivando a finalizar esta etapa, entregando palabras de aliento. Una mención a mis hermanos Carmen y Mauricio, siempre preocupados por contenerme emocionalmente cuando lo necesité. Fueron los pilares fundamentales que me permitieron no abandonar esta travesía oceánica.

A mi profesor Guía, Matías Quezada, por compartir parte de su sabiduría. El que brindó su apoyo incondicional en el transcurso de este camino, sin tener ningún interés de por medio. Siempre dispuesto a resolver las dudas que se fueron presentando. Gracias por el conocimiento adquirido, doc!

Por supuesto agradecer a Ecotecnos S.A., quienes me acogieron en una primera instancia para desarrollar mi práctica profesional y además me facilitaron la información oceanográfica y meteorológica para cumplir con los propósitos de este proyecto. En especial, agradecer al departamento de Oceanografía Física y Modelamiento Matemático, los que estuvieron dispuestos a entregarme las herramientas necesarias para llevar a cabo la modelación numérica. Mención honrosa a José Ribba, quien prestó su apoyo tanto en la práctica profesional como en este proyecto, siempre con buena disposición a enseñar y resolver dudas.

A los amigos y compañeros de U que se involucraron hasta aquí, por los gratos momentos que vivimos. Gracias a los profesores, por sus enseñanzas y conocimientos, sin ellos esto no sería posible. Por último, agradecer a los profesores que fueron parte la Comisión Evaluadora: Mauricio y Pato, los que se sumergieron en la revisión de este proyecto de título.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INT	RODU	UCCIÓN	1
2.	OB.	JETIV	OS	3
	2.1.	OBJE	TIVO GENERAL	3
	2.2.	OBJE	TIVOS ESPECÍFICOS	3
3.	FUI	NDAM	IENTO TEÓRICO	4
	3.1.	PROC	ESO DE SURGENCIA	4
	3.2.	FENÓ	MENO ENOS	5
	3.3.	MODI	ELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL OCÉANO	6
		3.3.1.	ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA HIDRODINÁMICA	7
		3.3.2.	RESPUESTA DE UN CUERPO ESTRATIFICADO A LA AC- CIÓN DEL VIENTO	8
	3.4.	DESC	RIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS	12
		3.4.1.	MIKE 3 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO	12
		3.4.2.	MIKE 21 SPECTRAL WAVES FM: MÓDULO DE PROPAGA- CIÓN DE OLEAJE	16
4.	AN'	TECE	DENTES DE LA BAHÍA MEJILLONES	21
	4.1.	ZONA	DE ESTUDIO	21
	4.2.	PROY	ECTOS OPERATIVOS EN LA BAHÍA	23
	4.3.	OCEA	NOGRAFÍA Y METEOROLOGÍA	25
		4.3.1.	OLEAJE	25
		4.3.2.	MAREA	27
		4.3.3.	VIENTO	27
		4.3.4.	TEMPERATURA	28
		4.3.5.	CORRIENTES	28

	4.4.	INFOI	RMACIÓ	N BATIMÉTRICA	28
5.	ME	TODO	DLOGÍA	UTILIZADA	30
	5.1.	CARA	CTERIZ	ACIÓN OCEANOGRÁFICA Y METEOROLÓGICA	30
		5.1.1.	REGIST TERCE	ROS DE ADCP Y VIENTO PROPORCIONADOS POR ROS	30
			5.1.1.1.	CORRIENTE	32
			5.1.1.2.	MAREA	32
			5.1.1.3.	OLEAJE	33
			5.1.1.4.	VIENTO	33
		5.1.2.	REGIST	ROS DE DATOS HISTÓRICOS	33
			5.1.2.1.	MAREA	33
			5.1.2.2.	OLEAJE	33
			5.1.2.3.	TEMPERATURA	34
			5.1.2.4.	VIENTO	35
	5.2.	CARA DROE	CTERIZ DINÁMIC	ACIÓN PRELIMINAR MODELACIÓN NUMÉRICA HI- A	35
		5.2.1.	DOMIN	IO NUMÉRICO	35
			5.2.1.1.	CASO IDEAL	35
			5.2.1.2.	CASO REAL	37
			5.2.1.3.	ESTABILIDAD NUMÉRICA	39
	5.3.	CALI	BRACIÓN	NY VALIDACIÓN	40
		5.3.1.	MODEL	O DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE	40
			5.3.1.1.	PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP	41
			5.3.1.2.	PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRI- COS	41
			5.3.1.3.	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	42
			5.3.1.4.	POST-PROCESO	42
		5.3.2.	MODEL	O HIDRODINÁMICO	43
			5.3.2.1.	HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP	43

			5.3.2.2.	HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRI- COS	43
			5.3.2.3.	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	43
			5.3.2.4.	POST-PROCESO	43
	5.4.	EXPL	OTACIÓ	N DEL MODELO	44
		5.4.1.	FORZA	NTES EXTERNAS	44
			5.4.1.1.	MAREA	45
			5.4.1.2.	TEMPERATURA	45
			5.4.1.3.	OLEAJE	48
			5.4.1.4.	VIENTO	48
		5.4.2.	EVALU	ACIÓN DE SURGENCIA	50
			5.4.2.1.	CÁLCULO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO PARA UN CANAL RECTANGULAR	50
			5.4.2.2.	RESPUESTA DE LA BAHÍA A LA ACCIÓN DEL VIENTO	52
			5.4.2.3.	RESPUESTA DE LA BAHÍA BAJO CONDICIONES EL NIÑO Y LA NIÑA	53
6.	RES	SULTA	DOS		56
6.	RE5 6.1.	SULTA CARA ROLĆ	ADOS ACTERIZ OGICA	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO-	56
6.	RE 5 6.1.	SULTA CARA ROLĆ 6.1.1.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO-	56 56
6.	RE5 6.1.	GULTA CARA ROLĆ 6.1.1.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1.	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56
6.	RES 6.1.	SULTA CARA ROLĆ 6.1.1.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1. 6.1.1.2.	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56 56 59
6.	RE 5	SULTA CARA ROLĆ 6.1.1.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1. 6.1.1.2. 6.1.1.3.	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56 56 59 60
6.	RE5 6.1.	SULTA CARA ROLĆ 6.1.1.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1. 6.1.1.2. 6.1.1.3. 6.1.1.4.	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56 59 60 60
6.	RES 6.1.	GULTA CARA ROLĆ 6.1.1.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1. 6.1.1.2. 6.1.1.3. 6.1.1.4. BASE D	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56 59 60 60 60
6.	RE 5	SULTA CARA ROLĆ 6.1.1. 6.1.2.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1. 6.1.1.2. 6.1.1.3. 6.1.1.4. BASE D 6.1.2.1.	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56 59 60 60 62 62
6.	RE5 6.1.	GULTA CARA ROLĆ 6.1.1.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1. 6.1.1.2. 6.1.1.3. 6.1.1.4. BASE D 6.1.2.1. 6.1.2.2.	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56 59 60 60 62 62 63
6.	RE5 6.1.	6.1.2.	ADOS ACTERIZ OGICA REGIST 6.1.1.1. 6.1.1.2. 6.1.1.3. 6.1.1.4. BASE D 6.1.2.1. 6.1.2.2. 6.1.2.3.	ACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFICA Y METEO- TROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCEROS . CORRIENTES	56 56 56 59 60 60 62 62 63 65

	6.2.1.	DOMIN	IO NUMÉRICO	67
		6.2.1.1.	ESTABILIDAD NUMÉRICA	67
6.3.	CALI	BRACIÓ	N Y VALIDACIÓN	67
	6.3.1.	MODEI	LO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE	67
		6.3.1.1.	PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP	67
		6.3.1.2.	PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRI- COS	69
	6.3.2.	MODEI	LO HIDRODINÁMICO	76
		6.3.2.1.	HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP	76
		6.3.2.2.	HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRI- COS	80
6.4.	EXPL	.OTACIÓ	N DEL MODELO	88
	6.4.1.	EVALU	ACIÓN DE SURGENCIA	88
		6.4.1.1.	CÁLCULO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO PARA UN CANAL RECTANGULAR	88
		6.4.1.2.	RESPUESTA DE LA BAHÍA A LA ACCIÓN DEL VIENTO	90
		6.4.1.3.	RESPUESTA DE LA BAHÍA BAJO CONDICIONES EL NIÑO Y LA NIÑA	105
CO	NCLU	SIONES	6 1	.23
. RE	FERE	NCIAS	BIBLIOGRÁFICAS 1	25
NEX	0		1	29
А.	OBTE	ENCIÓN	MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL	129
	A.1.	MALLA	BATIMÉTRICA	129
	A.2.	DESCR	IPCIÓN MODELO HYCOM	130
В.	CIRC	ULACIÓ	N HIDRODINÁMICA A PARTIR DE DATOS ADCP1	131
С.	CIRC COS	ULACIÓ	N HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRI-	138
Б	FUNC	CIONES I	DE TRANSFERENCIA	144

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1.	Comportamiento de la circulación oceánica y atmosférica bajo los efectos de El Niño y La Niña	5
3.2.	Rango de aplicabilidad de las RANS, DNS y LES de acuerdo con el espectro de energía de Kolmogorov	7
3.3.	Cuerpo de agua estratificado en dos capas, (a) expuesto a un esfuerzo de corte del viento actuando en la superficie libre en dirección x , (b) provocando el desplazamiento de la superficie libre y de la interfaz de densidad	9
3.4.	Respuesta del cuerpo de agua estratificado, (a) provocando que ambas capas se desplacen verticalmente en sus extremos, (b) provocando surgencia en respuesta a fuertes vientos generando una mayor inclinación de la interfaz de densidad	10
3.5.	Mallado tridimensional descrito para el modelo hidrodinámico, donde (a) el dominio horizontal comprende una malla estructurada y el vertical una no estructurada, considerada para éste ultimo (b) una grilla en coordenadas sigma.	16
4.1.	Ubicación geográfica de la zona de estudio a nivel regional y local de Bahía Mejillones, en coordenadas UTM, WSG 1984, Huso 19k	22
4.2.	Ubicación geográfica de variables oceanográficas y meteorológicas a utilizar en los modelos numéricos, coordenadas UTM en metros, Dátum WSG 1984, Huso 19k.	26
4.3.	Extensión de cartas náuticas utilizadas en la construcción del dominio numérico.	29
5.1.	Diagrama de flujo de la metodología utilizada.	31
5.2.	Ubicación geográfica de puntos con información de temperatura desde mo- delo HYCOM, dentro del dominio numérico utilizados para generar la con- dición inicial del modelo hidrodinámico, en coordenadas UTM en metros, Dátum WSG 1984, Huso 19k	34
5.3.	Malla 3D para el caso ideal utilizada en el modelo hidrodinámico. Vista en planta de (a) malla triangular no estructurada, donde es posible advertir los bordes oceánicos, que serán forzados, en color azul (S), verde (N) y rojo (W), y (b) batimetría final con profundidad constante. Vista del perfil de profundidades de (c) malla estructurada para el tramo CB demarcado en (b). Coordenadas UTM en metros, Huso 19K	36

5.4.	Malla 3D para el caso real utilizada en el modelo de propagación de oleaje e hidrodinámico. Vista en planta de (a) malla triangular no estructurada, donde es posible advertir los bordes oceanicos, que fueron forzados, en color azul (N), verde (W) y rojo (S), y (b) batimetría final. Vista del perfil de profundidades de (c) malla estructurada para el tramo AB demarcado en (b). Coordenadas UTM en metros, Huso 19K	38
5.5.	Puntos de control dentro del dominio para analizar estabilidad numérica.	39
5.6.	Metodología utilizada para obtener el dominio numérico y luego realizar el proceso de calibración y validación a través del modelo de propagación de oleaje e hidrodinamico a partir de registros históricos.	41
5.7.	Metodología utilizada en la explotación de los modelos concernientes a la Bahía.	49
5.8.	Metodología utilizada en la explotación de los modelos concernientes al Canal.	50
5.9.	Condición inicial de temperatura en el dominio $x-z$ del modelo C26	52
5.10.	Condición inicial de la simulación en la Bahía para la variable temperatura, para el caso B3	54
5.11.	. Transecta AB del dominio Bahía considerada para evaluar surgencia	54
6.1.	Rosa de las corrientes de <i>Datos ADCP1</i> para la campaña de verano, co- rrespondiente a la (a) capa de fondo, (b) intermedia y (c) superficial. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura (4.2)	57
6.2.	Rosa de las corrientes de <i>Datos ADCP1</i> para la campaña de invierno, co- rrespondiente a la (a) capa de fondo, (b) intermedia y (c) superficial. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura 4.2	58
6.3.	Rosa de los vientos de <i>Data Viento</i> correspondiente a (a) la campaña de verano y (b) de invierno. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura 4.2.	61
6.4.	Comportamiento del nivel de mar de <i>Datos Marea</i> de la (a) campaña verano e (b) invierno	62
6.5.	Diagrama de rosa de <i>Datos Oleaje</i>	63
6.6.	Curvas de excedencia de <i>Datos Oleaje</i> , (a) altura de ola y (b) periodo peak, proveniente de SW	65
6.7.	Diagrama de rosa de <i>Datos Viento</i>	66
6.8.	Curvas de excedencia de <i>Datos Viento</i> para velocidad proveniente desde S y SW	66
6.9.	Estabilidad numérica de la batimetría real, mediante la velocidad de la	

corriente para los puntos de control (a) P1 y P2, (b) P3 y P4 y (c) P5 y P6. 68

6.10	 b). Serie de tiempo de propagación de oleaje mediante construcción de borde con Datos ADCP1 (color rojo) y mediciones de campaña verano de Datos ADCP1 (color azul) de (a) altura significativa, (b) dirección peak, y (c) periodo peak. 	70
6.11	. Serie de tiempo de propagación de oleaje mediante construcción de borde con <i>Datos ADCP1</i> (color rojo) y mediciones de campaña invierno de <i>Datos</i> <i>ADCP1</i> (color azul) de (a) altura significativa, (b) dirección peak, y (c) periodo peak	71
6.12	2. Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), campaña verano 2016 para H_s a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	72
6.13	B. Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), campaña verano 2016 para D_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	72
6.14	l. Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), campaña verano 2016 para T_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	72
6.15	6. Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), campaña invierno 2016 para H_s a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	73
6.16	6. Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), campaña invierno 2016 para D_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	73
6.17	7. Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), campaña invierno 2016 para T_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	73
6.18	8. Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP2</i> (en azul), campaña verano 2016 para H_s a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	74
6.19). Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP2</i> (en azul), campaña verano 2016 para D_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	74
6.20). Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de <i>Datos ADCP2</i> (en azul), campaña verano 2016 para T_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q	74
6.21	. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos</i> ADCP1 (en cobre) y registrada por <i>Datos</i> $ADCP1$ (en azul), correspon- diente a la capa de fondo de la campaña verano 2016, a través de (a) serie	T
	de tiempo y (b) grafico Q-Q. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	77

6.22. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámi ADCP1 (en cobre) y registrada por Datos ADCP1 (en azul) diente a la capa intermedia de la campaña verano 2016, a tr serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.	ca de <i>Datos</i> , correspon- ravés de (a) 	7
6.23. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámi ADCP1 (en cobre) y registrada por Datos ADCP1 (en azul) diente a la capa superficial de la campaña verano 2016, a través de tiempo y (b) gráfico Q-Q.	ca de $Datos$, correspon- s de (a) serie 	7
6.24. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámi <i>ADCP1</i> (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul) diente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016, a través de tiempo y (b) gráfico Q-Q	ca de $Datos$, correspon- s de (a) serie 	3
6.25. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámi ADCP1 (en cobre) y registrada por Datos ADCP1 (en azul) diente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016, a t serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.	ca de <i>Datos</i> , correspon- ravés de (a) 	3
6.26. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámi <i>ADCP1</i> (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul) diente a la capa superficial de la campaña invierno 2016, a t serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.	ca de <i>Datos</i> , correspon- ravés de (a) 	3
6.27. Nivel del mar a partir de modelación hidrodinámica de <i>Dato</i> registrado por <i>Datos ADCP1</i> para campaña de (a) verano e 2016, respectivamente	<i>s ADCP1</i> y (b) invierno)
6.28. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámi ADCP1, MVO (en amarillo), M (en cobre), O (en negro) y correspondiente a la capa (a) de fondo, (b) intermedia y (c) s la campaña verano 2016	ca de <i>Datos</i> V (en azul) uperficial de 	L
6.29. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica históricos (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul) diente a la capa de fondo de la campaña verano 2016, a través de tiempo y (b) gráfico Q-Q	de registros), correspon- ; de (a) serie 83	3
6.30. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica históricos (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul) diente a la capa intermedia de la campaña verano 2016, a través de tiempo y (b) gráfico Q-Q	de registros), correspon- s de (a) serie 83	3
6.31. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica históricos (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul) diente a la capa superficial de la campaña verano 2016, a través de tiempo y (b) gráfico Q-Q.	de registros), correspon- s de (a) serie 	3

6.32.	. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspon- diente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q	84
6.33	. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspon- diente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q	84
6.34	. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspon- diente a la capa superficial de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.	84
6.35	. Nivel del mar a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrado por <i>Datos ADCP1</i> para campaña de (a) verano e (b) invierno 2016, respectivamente.	86
6.36	. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (en negro) y señal de marea (en amarillo), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q	87
6.37	. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (en negro) y señal de marea (en amarillo), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q	87
6.38	. Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (en negro) y señal de marea (en amarillo), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q	87
6.39	. Surgencia generada en el Canal mediante modelación hidrodinámica del caso C26	89
6.40	. Gráfico del número de Richardson vs velocidad de entrainment normali- zada por velocidad de corte del viento, para los sets de puntos calculados (naranja) y aquellos desarrollados por Monismith (1986) (azul)	92
6.41	. Respuesta hidrodinámica de la acción del viento en la Bahía, momento en que ocurre surgencia en Punta Angamos considerando los casos (a) de invierno, (b) condición base y (c) de verano	93
6.42	. Evolución temporal de la TSM en [°C] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr], (d) transcurrida 13.2 [hr] y (d) transcurrida 16.5 [hr]; para verano	96

 6.43. Evolución temporal de la temperatura del mar en [°C], equivalente al perfil vertical del tramo AB (Figura 5.11), desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr], (d) transcurrida 13.2 [hr] y (d) transcurrida 16.5 [hr]; para verano. 	97
 6.44. Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr], (d) transcurrida 13.2 [hr] y (d) transcurrida 16.5 [hr]; para verano. 	98
 6.45. Evolución temporal de la TSM en [°C] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 1.7 [hr] (b) transcurridas 3.4 [hr] (b) transcurrida 5.1 [hr], (c) transcurrida 6.8 [hr], (d) transcurrida 8.5 [hr]; para la condición media. 	99
 6.46. Evolución temporal de la temperatura del mar en [°C], equivalente al perfil vertical del tramo AB (Figura 5.11), desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 1.7 [hr] (b) transcurrida 3.4 [hr], (c) transcurrida 5.1 [hr], (d) transcurrida 6.8 [hr] y (d) transcurrida 8.5 [hr]; para la condición media 	100
 6.47. Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 1.7 [hr] (b) transcurrida 3.4 [hr], (c) transcurrida 5.1 [hr], (d) transcurrida 6.8 [hr] y (d) transcurrida 8.5 [hr]; para la condición media. 	101
 6.48. Evolución temporal de la TSM en [°C] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr] y (d) transcurrida 13.2 [hr]; para invierno. 	102
 6.49. Evolución temporal de la temperatura del mar en [°C], equivalente al perfil vertical del tramo AB (Figura 5.11), desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr] y (d) transcurrida 13.2 [hr]; para invierno. 	103
 6.50. Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr] y (d) transcurrida 13.2 [hr]; para invierno. 	104
6.51. Comportamiento de la (a) TSM [°C], (b) componente W de la velocidad de la corriente [cm/s] y (c) velocidad de la corriente [cm/s] en Punta Angamos durante El Niño idealizado.	106
6.52. Comportamiento de la (a) TSM [°C], (b) componente W de la velocidad de la corriente [cm/s] y (c) velocidad de la corriente [cm/s] en Punta Angamos durante La Niña idealizada.	107
6.53. Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 13 [hr] (b) transcurridas 26 [hr] (c) transcurrida 39 [hr] y (d) transcurridas 52 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña idealizado.	108
6.54. Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 13 [hr] (b) transcurridas 26 [hr] (c) transcurrida 39 [hr] y (d) transcurridas 52 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña idealizado.	109

- 6.55. Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 13 [hr] (b) transcurridas 26 [hr] (c) transcurrida 39 [hr] y (d) transcurridas 52 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña idealizado. 110
- 6.56. Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 7 [hr] (b) transcurridas 14 [hr] (c) transcurrida 21 [hr] y (d) transcurridas 28 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño idealizado. . 111
- 6.57. Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 7 [hr] (b) transcurridas 14 [hr] (c) transcurrida 21 [hr] y (d) transcurridas 28 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño idealizado. . 112
- 6.58. Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 7 [hr] (b) transcurridas 14 [hr] (c) transcurrida 21 [hr] y (d) transcurridas 28 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño idealizado. . 113
- 6.59. Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña 1997. 116

6.60. Evolución temporal de la temperatura del perfil AB en [°C] a partir de
la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c)
transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; corres-
pondiente a La Niña 1997

- 6.62. Evolución temporal de la TSM en [°C] a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño 1998. 119
- 6.64. Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño 1998.
- 6.65. Serie temporales de las varaibles (a) TSM y (b) velocidad de la corriente y (c) componente W en Punta Angamos durante los periodos de noviembre El Niño 1997 (color azul) y La Niña 1998 (color cobre).
- A.1. Diagrama de flujo. Metodología de la obtención de malla batimétrica. . . . 130

B.1.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y regis- tros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componenete U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.2.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.3.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.4.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y regis- tros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.5.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.6.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.7.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.8.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.9.	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.10	Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil

B.11	.Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
B.12	.Circulación hidrodinámica a partir de <i>Datos ADCP1</i> (en cobre) y registros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.1.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.2.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componenete U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.3.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.4.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.5.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.6.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.7.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componenete U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil
C.8.	Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y regis- tros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componenete U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil

C.9. Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y regis- tros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.	. 142
C.10.Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y re- gistros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil	. 143
C.11.Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y regis- tros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.	. 143
C.12. Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y regis- tros de <i>Datos ADCP1</i> (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.	. 143
D.1. Funciones de transferencia para el punto FT1 (a) en el dominio del coefficiente de agitación, (b) en el dominio del coeficiente de dirección y (c) en el dominio de las direcciones con que llegan al punto de FT1	. 145
D.2. Funciones de transferencia para el punto FT2 (a) en el dominio del coeficiente de agitación, (b) en el dominio del coeficiente de dirección y (c) en el dominio de las direcciones con que llegan al punto de FT2	. 146

ÍNDICE DE TABLAS

3.1.	1. Valores recomendados por la ROM para la altura de rugosidad superficial z_0 y coeficiente de arrastre superficial.	
4.1.	Nombre del proyecto, titular, tipo de efluente a través de emisario [E] o sifón [S], en coordenadas en UTM de puntos de descargas y toma de agua en la Bahía, caudales de entrada y salida en [m3/s] y temperatura [°C], salinidad [mg/l ó psu] o no aplica [N/A] descargada al mar.	24
4.2.	Periodo de mediciones para las campañas registradas por ADCP1 y ADCP2.	27
4.3.	Detalle de cartas náuticas utilizadas en la elaboración del dominio numérico.	28
5.1.	Set de datos utilizados en el modelo de propagación de oleaje e hidrodina- mico a partir de registros históricos, en el proceso de calibración y validación.	40
5.2.	Parámetros utilizados en el modelo MIKE 21 Spectral Waves FM. $\ .\ .\ .$.	42
5.3.	Parámetros utilizados en el modelo MIKE 3 Flow Model FM	44
5.4.	Descripción de casos, velocidad del viento, profundidad de cada estrato y perfil de temperatura, para Canal.	46
5.5.	Descripción de casos, velocidad del viento, profundidad de cada estrato y perfil de temperatura, para Bahía.	47
5.6.	Parámetros utilizados en la configuración del módulo de temperatura para el Canal	51
5.7.	Parámetros utilizados en la evaluación de surgencia en la Bahía	53
6.1.	Planos de la marea referidos al NRS, correspondiente la campaña de verano e invierno de <i>Datos Marea</i> y <i>Datos ADCP1</i>	59
6.2.	Incidencia de <i>Datos Oleaje</i> , dirección peak vs periodo peak en aguas pro- fundas. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura (4.2)	64
6.3.	Incidencia de <i>Datos Oleaje</i> , dirección peak y altura de ola en aguas pro- fundas. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura (4.2)	64
6.4.	Incidencia de <i>Datos Oleaje</i> , periodo peak y altura de ola	64
6.5.	Incidencia del viento Datos Viento, intensidad vs dirección en [%]	65

6.6.	Coeficiente de correlación entre de propagación de oleaje mediante construc- ción de borde con <i>Datos ADCP1</i> y mediciones de campaña <i>Datos ADCP1</i> .	69
6.7.	Medidas de tendencia central de parámetros de resumen entre propagación de oleaje a partir de registros históricos (simulado) y registros de <i>Datos</i> <i>ADCP1</i> (ADCP1), campaña verano	75
6.8.	Medidas de tendencia central de parámetros de resumen entre propagación de oleaje a partir de registros históricos (simulado) y registros de <i>Datos</i> <i>ADCP1</i> (ADCP1), campaña invierno	75
6.9.	Medidas de tendencia central de parámetros de resumen entre propagación de oleaje a partir de registros históricos (simulado) y registros de <i>Datos</i> <i>ADCP2</i> (ADCP2), campaña verano	76
6.10.	Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos ADCP1</i> y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016	80
6.11.	Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos ADCP1</i> y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.	80
6.12.	Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos ADCP1</i> , MVO, M, O y V para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016. Valores en [cm/s]	82
6.13.	Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016.	85
6.14.	Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016	85
6.15.	Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente en [cm/s], a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (color negro) y variable (amarillo) para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016	86
6.16.	Parámetros utilizados en la obtención de la pendiente teórica de la surgencia a partir de la modelación del caso C26, de acuerdo con Niño (2013)	89
6.17.	Datos experimentales del número de Richardson y velocidad de entraiment normalizada por la velocidad de corte del viento desarrollados por Monis- mith (1986)	90

6.18.	Resumen de parámetros utilizados en el cálculo de velocidad del viento en [m/s], caso del Canal, tiempo de surgencia, t_s , en [s] y [h], diferencial de densidad Δ_{ρ} en [kg/m ³]; esfuerzo de corte del viento, τ_s , en [kg/ms ²]; velocidad de corte del viento, u_* , en [m/s]; número de Richardson, Ri , determinado por la ecuación (3.8); velocidad de entrainment, u_e , a partir de los modelos C1:24.	91
6.19.	Valores medios de las variables oceanográficas analizadas en Punta Angamos para La Niña 1997	115
6.20.	Valores medios de las variables oceanográficas analizadas en Punta Angamos para El Niño 1998	115
B.1.	Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos ADCP1</i> y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016	134
B.2.	Medidas de tendencia central de la componente V de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos ADCP1</i> y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016	134
B.3.	Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos ADCP1</i> y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016	137
B.4.	Medidas de tendencia central de la componente V de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de <i>Datos ADCP1</i> y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016	137
C.1.	Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016	138
C.2.	Medidas de tendencia central de la componente V de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016	138
C.3.	Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por <i>Datos ADCP1</i> para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016	141

RESUMEN

La surgencia costera corresponde al afloramiento de masas de agua y sus propiedades físico - químicas desde aguas profundas a la superficie debido al movimiento de masas de aguas superficiales mar adentro. Se necesitan dos mecanismos para que ocurra surgencia; el viento que transfiere momentum a la superficie del océano y la rotación terrestre Marín et al. (1993), procesos que combinados en zonas costeras afectas por la geometría de la línea de costa, batimetría y estratificación del océano (Vergara, 1992), provocan el movimiento vertical de las aguas superficiales. Proceso favorecido por el transporte de Ekman, cuvas aguas se deflectan hacia la izquierda de la dirección predominante del viento. Dicho movimiento vertical de aguas superficiales, que implica cambios físicos y químicos de la zona eufótica, genera un vacío que es ocupado por aguas provenientes desde zonas más profundas las cuales son ricas en nutrientes, pero bajas tanto en temperatura como en oxígeno (Marín et al., 1993). La Bahía de Mejillones y en específico Punta Angamos es uno de los centros de surgencia más importantes en el norte de Chile. En este estudio se caracterizó la oceanografía y meteorología de la zona mediante la recopilación de datos de marea, oleaje y viento, además de campañas levantadas previamente por terceros utilizadas en el proceso de calibración y validación. Se utilizaron los modelos MIKE 21 FM: Spectral Waves y MIKE 3 FM: Hidrodynamics, que permitieron simular la propagación de oleaje y la hidrodinámica del dominio numérico, respectivamente.

Basado en lo anterior, el presente trabajo dio una respuesta hidrodinámica a la ocurrencia del afloramiento, identificando las condiciones necesarias para que dicho fenómeno fuese reproducido numéricamente. Para ello, se realizó un estudio basado en el comportamiento teórico a través de un caso ideal, donde se modeló un canal rectangular. Además, se desarrolló la simulación numérica de Bahía Mejillones, efectuando un análisis de sensibilidad a las variables meteorológicas que tienen relevancia en el proceso de surgencia. Adicionalmente, se evaluó un caso ideal y real de El Niño y La Niña permitiendo visualizar variaciones en velocidad de la corriente y temperatura.

Los resultados en el canal rectangular, indicaron que la configuración definida para el modelo hidrodinámico permitió contrastar el afloramiento con el calculo de la pendiente teórico propuesto por Niño (2013). Los modelos C1:24, con variaciones en el perfil de temperatura y en la velocidad del viento permitieron una comparación con experimentos desarrollados por Monismith (1986). Con respecto a la Bahía, el análisis de sensibilidad de la forzante viento indicó que a mayor magnitud, menor es el tiempo de surgencia. Se demostró que la fase cálida y fría modifican la proporción de las masas y variaciones en la TSM.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe gran explotación de las zonas costeras, especialmente de aquellas que brindan condiciones de abrigo al oleaje y por ende las hacen propicias para desarrollar diversas obras marítimas para el servicio de naves mayores, producción energética y utilización de aguas para consumo industrial y/o humano, entre otras.

En la actualidad, los proyectos de ingeniería requieren de su desarrollo en términos sustentables, es decir, que su operación no modifique de manera abrupta las condiciones basales del medio en el cual se construye. Es por ello que se hace necesario comprender los fenómenos biológicos, físicos y químicos que ocurren dentro del océano y, mediante herramientas como la modelación numérica, representar la hidrodinámica costera y estudiar el impacto ambiental de los proyectos que pueden alterar el medio biótico y evaluar la calidad de vida humana y sus actividades económicas asociadas (Nihoul, 1987; Nihoul y Jamart, 1987).

En la costa chilena, existen diversos polos de desarrollo portuario e industrial marítimo, siendo en su mayoría focos de preocupación ambiental debido a la gran cantidad de proyectos que se han llevado a cabo. Por ejemplo, la Bahía de Quintero cuenta con más de 5 empresas usuarias con actividades que van desde el desarrollo energético mediante centrales térmicas, hasta la descarga de residuos orgánicos (SEA, 2019).

Otro de los ejemplos característico del litoral chileno y que cuenta con una alta industrialización es la Bahía Mejillones que gracias a Punta Angamos, corresponde a un sector con gran abrigo natural a las condiciones de oleaje más frecuentes y consecuentemente hacen de ella una zona de explotación industrial. Al igual que en Quintero, diversos proyectos conviven dentro de de la bahía afectando drásticamente el ecosistema marino y terrestre. En el sitio web del Servicio de Evaluación Ambiental (www.sea.gob.cl), se pueden conocer dichos proyectos y además la evaluación del impacto que provocan durante su fase de implementación, operación y abandono de la obra. Además, dichos proyectos en su mayoría necesitan de agua para funcionar y posteriormente dicho flujo es devuelto al mar con alteraciones en sus características físico, químicas y biológicas, las cuales posiblemente son capaces de alterar el comportamiento natural del medio. Un reciente estudio denominado Diagnóstico y Monitoreo Ambiental de Bahía Mejillones del Sur, concluye que la condición ambiental de la bahía es deficiente con tendencia en deterioro (MMA, 2019).

El sector de Mejillones y en particular Punta Angamos, han sido estudiadas por diversos autores los cuales han evidenciado que en dicho sector es frecuente el desarrollo del proceso de surgencia costera, lo cual posteriormente a su generación, tiene una tendencia a movilizarse hacia el interior de la bahía. Esta intrusión del agua desde capas inferiores en profundidad hacia las superiores y hacia el sector industrializado de la bahía, tiene el potencial de generar alteraciones significativas en la calidad de aguas.

Cabe destacar que el centro de surgencia tiene gran relevancia en la costa norte chilena (Marín et al., 1993, 2003). Dicho proceso consiste en el afloramiento de agua rica en nutriente y baja en temperatura, favoreciendo la vida marina, en Punta Angamos producto de los patrones de viento presentes. Dicho afloramiento genera una bifurcación de filamentos fríos que por una parte ingresan a la bahía y otro que se dirige en dirección al océano

(Marín et al., 2003). Otro fenómeno de interacción oceano - atmósfera importante a mayor escala que afecta la surgencia, se trata de El Niño, Oscilación del Sur. Dicho fenómeno presenta una fase fría y otra cálida que acrecienta y disminuye el afloramiento de agua mas fría, respectivamente, en las costas chilenas (Bello et al., 1997).

Estudios técnicos desarrollados por Ecotecnos S.A., mencionan la presencia de la sombra de surgencia en la Bahía de Mejillones, proceso que ocurre como consecuencia del afloramiento y gracias a la reducción de los vientos en Punta Angamos, el agua que emerge de las profundidades se calienta rápidamente siendo transportada por advección al interior de la Bahía. Su incorporación y posterior descarga desde los sistemas de enfriamiento de las plantas termoeléctricas que existen en la Bahía, pueden generar emulsión hidrodinámica y consecuentemente evidenciarse presencia de espuma en el medio marino. Esta condición se ha presentado durante los últimos años, de una manera recurrente, incluso siendo reportado por diversos portales de noticias¹.

Si bien los mecanismos necesarios para la generación de la surgencia en el sector de Mejillones han sido descritos previamente por Marín et al. (1993, 2003) y Letelier et al. (2012), la evidencia de campo ha demostrado que éstos no son estrictos y puede ocurrir la surgencia en condiciones diferentes. Por ejemplo, de acuerdo con Marín et al. (1993) es requisito fundamental que el viento sople desde el suroeste (SW por sus siglas en inglés), con velocidades mayores a los 5 m/s durante ventanas inerciales superiores a 31 horas, de tal modo que el peraltamiento de la superficie del mar, produzca el exceso de momentum necesario para activar el transporte vertical. Por su parte, Letelier et al. (2012) indica que dichas condiciones pueden presentarse todo el año y se asocia principalmente al movimiento estacional del Anticiclón del Pacífico Sur. La presencia de la Península de Angamos corresponde al aspecto geomorfológico más relevante y que favorece el transporte vertical, llegando a producir una clara diferenciación tanto en el transporte de Ekman, como en la temperatura.

La presente tesis busca dar una respuesta hidrodinámica a la ocurrencia de surgencia, identificando las condiciones necesarias para que este fenómeno sea reproducido numéricamente. Para dicho propósito, en primera instancia se estudió el comportamiento teórico a través de un canal rectangular (caso ideal) y se implementó una simulación numérica de la Bahía de Mejillones (caso real), a partir de la cual se realizó una análisis de sensibilidad a las variables meteorológicas que tienen relevancia en el proceso de afloramiento. Además se evalúa El Niño y La Niña, permitiendo visualizar variaciones en la velocidad de la corriente, temperatura.

 $^{^{1}} https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-antofagasta/2018/10/12/vecinos-denuncian-que-tuberia-de-termoelectrica-arrojo-espuma-en-mejillones-descartan-toxicidad.shtml$

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la surgencia generada en Bahía Mejillones, mediante la caracterización y simulación hidrodinámica de las forzantes marea, oleaje, temperatura y viento, modelando la condición de casos medios de las forzantes principales que influyen en el proceso de surgencia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información oceanográfica y meteorológica de la zona estudiada.
- Caracterizar la hidrodinámica de Bahía Mejillones.
- Evaluar la surgencia para un canal y comparar sus resultados con experimentos desarrollados por terceros.
- Determinar el comportamiento de la surgencia a través de un análisis de sensibilidad de la forzante viento en Bahía Mejilones.
- Evaluar la influencia del ciclo ENOS ideal en el proceso de surgencia.
- Evaluar la influencia del ciclo ENOS real en el proceso de surgencia.

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 PROCESO DE SURGENCIA

La surgencia costera corresponde al afloramiento de aguas y sus propiedades físico - químicas desde aguas profundas a la superficie, debido al movimiento de masas de aguas superficiales mar adentro. Se necesitan dos mecanismos para que ocurra surgencia; el viento que transfiere momentum a la superficie del océano y la rotación terrestre (Marín et al., 1993), procesos que combinados en zonas costeras afectas por la geometría de la línea de costa, batimetría y estratificación del océano (Vergara, 1992), provocan el movimiento vertical de las aguas superficiales, gracias al transporte de Ekman. Dicho movimiento vertical de aguas superficiales, que implica cambios físicos y químicos de la zona eufótica, genera un vacío que es ocupado por aguas provenientes desde zonas más profundas, las cuales son ricas en nutrientes, pero bajas en temperatura y oxígeno (Marín et al., 1993).

De acuerdo con Fonseca y Farías (1987), Letelier et al. (2012) y Pérez-Arvizu et al. (2013), los focos de surgencia se desarrollan con mayor intensidad en bahías, penínsulas y puntas. Estas zonas demarcadas por una morofología y batimetría distinta de la línea de costa, en conjunto con vientos favorables durante todo el año (Rutllant y Montecino, 2002) generan patrones de circulación oceánica y atmosférica que provocan cambios en la variabilidad oceanográfica (Letelier et al., 2012).

En el caso de Mejillones, la Península y en específico Punta Angamos es uno de esos lugares donde ocurre afloramiento de aguas ricas en nutrientes (Rutllant y Montecino, 2002), gracias a los vientos favorables expuestos a la circulación del Anticiclón Subtropical del Pacífico (APS) (Montecino et al., 2005). Este afloramiento rápidamente se calienta debido a la reducción de los vientos en Punta Angamos y mediante el proceso de advección es transportado al interior de la Bahía, proceso descrito como sombra de surgencia (Marín et al., 2003).

Según Marín et al. (1993) se necesita un viento superior a los 5 [m/s] con ventanas superiores a 31 horas para que produzca el momentum necesario y genere el levantamiento de la superficie del mar y por ende el movimiento vertical. Marín et al. (2003) define un sistema de surgencia bifurcada en Punta Angamos debido al viento predominante SW que incluye por un lado, un filamento de surgencia va en dirección NW cuando la intensidad del viento supera los 5 [m/s], mientras que un segundo filamento entra a la Bahía cuando el viento alcanza intesidades menores a 5 [m/s], siendo éste el generador de la sombra de surgencia.

Mayores antecedentes de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de surgencia bajo la influencia del viento, se presentan en el numeral 3.3.2.

3.2 FENÓMENO ENOS

El Niño, Oscilación del Sur (ENOS) es denominado por diversos autores como un sistema de interacción océano - atmósfera, en el que variaciones en los patrones de vientos son las principales causas en los cambios de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y por ende en la circulación oceánica y atmosférica. El fenómeno es considerado, además, como uno de los eventos de gran relevancia desarrollado a nivel interanual que puede durar 18 meses el ciclo completo y aparece cada 2 a 7 años. Cabe destacar que es un evento irregular que puede variar en intensidad y duración (Maturana et al., 1997; Lau y Nath, 2003 y Zambrano, 1986).

Es importante señalar que El Niño, Oscilación del Sur como ciclo comprende una fase cálida, fría y neutra, siendo las dos primeras más estudiadas por su impacto significativo en variables oceanográficas y meteorológicas como TSM, patrones de los vientos, precipitaciones, presión atmosférica, nivel del mar y surgencia (Maturana et al., 1997). La fase cálida viene asociada a El Niño, mientras que la fría se denomina La Niña. Los cambios oceánicos y atmosféricos se presentan en el Pacífico ecuatorial y, dependiendo de cada fase del fenómeno, los efectos tendrán mayor relevancia en el Pacífico oriental y occidental (OMM, 2014).

Figura 3.1: Comportamiento de la circulación oceánica y atmosférica bajo los efectos de El Niño y La Niña.



Fuente: Adaptado de OMM (2014)

En condiciones normales, el viento sopla con intensidad media de este a oeste, presentando TSM mayores en el Pacífico occidental y más bajas en el Pacífico oriental lo que conlleva al afloramiento de agua más densa y fría en las costas chilenas. En condiciones La Niña, los vientos se intensifican transportando masas de agua caliente de este a oeste, advirtiéndose en la Figura 3.1. Dicha fase permite que en las costas chilenas el afloramiento cobre una mayor relevancia en comparación a una condición neutra y por ende, predomine agua fría y rica en nutrientes en la superficie y, que la termoclina reduzca su espesor (Bello

et al., 1997). Producto del movimiento de agua caliente hacia el Pacífico occidental, las precipitaciones se intensifican en dicha zona y por ende, se presenta sequía en el Pacífico oriental producto de la alta presión atmosférica de la zona (OMM, 2014).

Bajo condiciones de El Niño, ocurre todo lo opuesto que la fase fría. Los vientos pierden intensidad y cambian de dirección en el oeste y centro del Pacífico, Figura 3.1, implicando que la masa de agua caliente abarque gran parte del Pacífico tropical, impactando en las costas chilenas del norte (Maturana et al., 1997). Las precipitaciones abarcan una mayor zona pues el calor de la superficie del mar se eleva a la atmósfera y por ende se presenta una baja presión atmosférica. Dicha acumulación de agua caliente en el este provoca que la termoclina se hunda y que la surgencia se debilite (Bello et al., 1997).

Este ciclo oscilatorio del océano producto del fenémeno ENOS y sus efectos en la ubicación de la termoclina, serán evaluados numéricamente en la presente tesis, con la finalidad de evaluar los efectos de la profundización de la termoclina en el proceso de surgencia.

3.3 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL OCÉANO

Hidrodnámica es el término que se le da al estudio del movimiento de agua y las fuerzas involucradas en éste. Refiriéndose a un fluido como el océano, gran cantidad de procesos hidrodinámicos ocurren como consecuencia de forzantes externas como la marea, el viento y el oleaje, entre otras. Dichos procesos generados en el océano involucran al transporte de sedimentos, contaminantes y nutrientes, además de variables como las velocidades, patrones de circulación, mezcla, dispersión, temperatura, densidad y estratificación del agua (Csanady, 1981; Ji, 2008).

Debido al desarrollo industrial de las regiones costeras y su evidente interacción con el medio marino, se hace imprescindible evaluar la hidrodinámica, y los fenómenos biológicos y químicos a los que se ven expuestas, debido a los procesos de descarga o interacciones con diversas estructuras. Es por ello que nace la ecohidráulica como una herramienta que permite evaluar íntegramente los fenómenos que repercuten en el ecosistema. Aparejada a la hidrodinámica está la calidad del agua como un problema a resolver, implicando estudios de la disponibilidad biológica (como zooplancton y fitoplancton) y química (como nitrato, fósforo, clorofila, entre otros), en un lugar expuesto a la interacción causada por factores antrópicos. Es por ello que se hace necesaria una evaluación integral del impacto ambiental de proyectos en regiones costeras y en todas aquellas zonas en donde se quiera preservar y mejorar el medio ambiente (García, 1996).

Una forma de estimar el impacto ambiental que generan los proyectos marítimos o estudiar una zona costera específica, es utilizando modelos numéricos hidrodinámicos, mediante los cuales es posible cuantificar la reacción del medio marino a alteraciones en las características biológicas, físicas y químicas a las que el cuerpo de agua estará expuesto. El análisis de sensibilidad juega un rol importante, dado que se hace necesario determinar las variables dependientes e independientes según su importancia en el fenómeno estudiado y cómo el alterarlas influye en la respuesta hidrodinámica (Winckler, 2018).

3.3.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA HIDRODINÁMICA

Para llevar a cabo la modelación hidrodinámica se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento del fluido gobernado por las leyes de conservación de la masa, de momentum y de energía. En la actualidad no existe una solución analítica general de dichas ecuaciones, por lo que es necesario recurrir a aproximaciones que permiten resolver la hidrodinámica en cuestión. Tal es el caso de las ecuaciones *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), *Direct Numerical Simulation* (DNS) y *Large Eddy Simulation* (LES), las que permiten aproximar o resolver la turbulencia y cuyas ventajas y desventajas radican en la discretización espacial, condiciones de borde y forzantes del problema a estudiar.

Se pueden utilizar las RANS, DNS y LES, dependiendo del detalle con que se quiera modelar o resolver la turbulencia. Kolmogorv estipula que la turbulencia está formada por remolinos de distintos tamaños y que los de mayor escala fluyen hacia aquellos de menor, término conocido como cascada de energía (Kolmogorov, 1941). Una mejor descripción gráfica del rango de aplicabilidad de dichas ecuaciones se presenta en la Figura 3.2, siendo E(k) el espectro de energía y k el número de ola.

Figura 3.2: Rango de aplicabilidad de las RANS, DNS y LES de acuerdo con el espectro de energía de Kolmogorov.



Fuente: Adaptado de Aybay (2010)

Las RANS promedian el campo de velocidades y presiones incluyendo términos que representan la interacción entre fluctuaciones turbulentas, denominadas tensor de esfuerzos de Reynolds (Reynolds, 1985), que requiere de un modelado adicional para cerrar el sistema de ecuaciones. Sus ventajas radican en la reducción del costo computacional, mientras que su desventaja implica obtener un resultado que no incluye una resolución explícita de la turbulencia en el campo de velocidades.

Las DNS por su parte, resuelven directamente el set de ecuaciones de Navier-Stokes sin ningún tipo de aproximación ni modelos adicionales para todo el espectro de energía de turbulencia. Lo anterior se logra considerando un tamaño de grilla más pequeño que el remolino de menor tamaño dentro del flujo. Por lo tanto, su ventaja radica en una mejor comprensión de las variables involucradas, mientras que su desventaja se explica por el uso de una mayor resolución espacial, traduciéndose en un alto costo computacional (Zhiyin, 2015). Las LES resuelven el movimiento turbulento de grandes remolinos mediante un filtro espacial de las ecuaciones de gobierno, generando que aparezca un término fluctuante que requiere de ecuaciones adicionales para cerrar el modelo (Zhiyin, 2015). De acuerdo a ello, se utilizan submodelos entre los que destacan el de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963), de similaridad de escala (Bardina et al., 1980) y dinámico de Germano (Germano et al., 1991); que permiten aproximar los remolinos más pequeños y por ende, cubrir todo el espectro de energía de la turbulencia.

El módulo hidrodinámico de MIKE utilizado en la presente tesis, resuelve las ecuaciones RANS considerando supuestos de Boussinesq y presión hidrostática (sección 3.4.1). Siguiendo los objetivos de la presente tesis, a continuación se presentan las ecuaciones que rige el fenómeno de surgencia bajo la influencia del viento, destacando que las ecuaciones que describen dicho fenómeno son las RANS.

3.3.2 RESPUESTA DE UN CUERPO ESTRATIFICADO A LA AC-CIÓN DEL VIENTO

Basado en Niño (2013), se describe a continuación las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de surgencia. Se considera un canal de largo L en dirección x, con una estratificación del fluido en dos capas de espesor h_1 y h_2 y densidades ρ_1 y ρ_2 , respectivamente. El viento sopla sobre la superficie libre del agua en dirección x, ejerciendo esfuerzo de corte, τ_s , que produce una transferencia vertical de momentum horizontal a lo largo de L, del cuerpo de agua inicialmente inmóvil, como se aprecia en la Figura 3.3a (Niño, 2013).

El problema descrito anteriormente se resuelve a partir de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) con el supuesto de presión hidrostática en cada una de las dos capas. Considerando que se trata de un problema 2D, se presentan ecuaciones de momentum en el eje x (3.1), en el eje z (3.2) y la ecuación de continuidad (3.3) (Niño, 2013).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + w_i \frac{\partial u_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial \hat{p}}{\partial x}\right) i + \frac{1}{\rho_i} \frac{(\partial \tau_{xx})_i}{\partial x} + \frac{1}{\rho_i} \frac{(\partial \tau_{zx})_i}{\partial z}$$
(3.1)

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial w_i}{\partial x} + w_i \frac{\partial w_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial \hat{p}}{\partial z}\right) i + \frac{1}{\rho_i} \frac{(\partial \tau_{xz})_i}{\partial x} + \frac{1}{\rho_i} \frac{(\partial \tau_{zz})_i}{\partial z}$$
(3.2)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = 0 \tag{3.3}$$

Donde $u_i \neq w_i$ son las componentes horizontal y vertical, respectivamente, de las velocidades del fluido debido al viento en la capa i, donde i = 1, 2. \hat{p}_i es la presión piezométrica en la capa i. $(\tau_{xx})_i \neq (\tau_{zz})_i$ son los esfuerzos normales en la capa i en dirección $x \neq z$, respectivamente. $(\tau_{xz})_i \neq (\tau_{zx})_i$ son los esfuerzos de corte en la capa i en dirección $x \neq z$, respectivamente. De las ecuaciones de momentum se desprecian los términos no lineales considerando como una aproximación de primer orden que las velocidades del flujo provocadas por el viento son pequeñas (Niño, 2013).

La influencia del viento en el cuerpo de agua produce desplazamientos ξ_1 y ξ_2 de la superficie libre y de la interfaz de densidades, de la capa 1 y capa 2, respectivamente (Figura 3.3b). Luego de aplicar la condición de presión hidrostática y posterior a ello,

Figura 3.3: Cuerpo de agua estratificado en dos capas, (a) expuesto a un esfuerzo de corte del viento actuando en la superficie libre en dirección x, (b) provocando el desplazamiento de la superficie libre y de la interfaz de densidad.



Fuente: Adaptado a partir de (Niño, 2013)

promediar las velocidades en profundidad se obtiene el sistema de ecuaciones en la capa 1 (3.4) y la capa 2 (3.5).

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi_1}{\partial x} + \frac{1}{\rho_1 h_1} ((\tau_{zx})_{h_1 + h_2} - (\tau_{zx})_{h_2})$$
(3.4)

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} = -g \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \xi_1}{\partial x} - g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2} \frac{\partial \xi_2}{\partial x} + \frac{1}{\rho_2 h_2} ((\tau_{zx})_{h_2} - (\tau_{zx})_0)$$
(3.5)

Donde se considera el esfuerzo de corte que actúa sobre la superficie libre, en la interfaz de densidad y en el fondo, $(\tau_{zx})_{h_1+h_2} = t_s$, $(\tau_{zx})_{h_2} = t_i$ y $(\tau_{zx})_0 = t_b$, respectivamente.

Cuando se alcanza el estado estacionario, $\partial U_i/\partial t = 0$, es posible, a partir de las ecuaciones (3.4) y (3.5), evaluar las pendientes de la superficie libre (3.6) y de la interfaz de densidad (3.7), despreciando los esfuerzos de corte τ_i y τ_b , considerando que son pequeños en comparación con la influencia del esfuerzo de corte superficial τ_s .

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = F r_*^2 \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial x} = -\frac{1}{Ri_0} \tag{3.7}$$

Donde Ri_0 es el Número de Richardson (3.8), $Fr_* = u_{*s}/\sqrt{gh_1}$ es el Número de Froude y u_{*s} es la velocidad de corte del viento.

$$Ri_{0} = \frac{\rho_{2} - \rho_{1}}{\rho_{1}} \frac{gh_{1}}{u_{*_{s}}^{2}} = \frac{\Delta\rho}{\rho_{1}} \frac{1}{Fr_{*}^{2}}$$
(3.8)

$$u_{*s} = \sqrt{(\tau_s/\rho_1)} \tag{3.9}$$

Figura 3.4: Respuesta del cuerpo de agua estratificado, (a) provocando que ambas capas se desplacen verticalmente en sus extremos, (b) provocando surgencia en respuesta a fuertes vientos generando una mayor inclinación de la interfaz de densidad.



Fuente: Adaptado a partir de (Niño, 2013)

De acuerdo con las ecuaciones (3.6) y (3.7), se observa que la pendiente de la interfaz de densidad es negativa, contraria a la pendiente de la superficie libre, considerando una menor elevación de la superficie en comparación con la interfaz de densidad, como se aprecia en la Figura 3.4a.

De acuerdo con las Recomendaciones de Obras Marítimas ROM 0.4-95, el esfuerzo de corte superficial, τ_s , se obtiene mediante la ecuación (3.10), donde ρ_a es la densidad del aire, 1.225 $[kg/m^3]$ de acuerdo con International Standard Atmosphere (ISA), C_d es el coeficiente de arrastre superficial, considerado como 0.004 de acuerdo a la Tabla (3.1) según Del Estado (1995) y U es la velocidad del viento en [m/s].

$$\tau_s = \rho_a \cdot C_d \cdot U^2 \tag{3.10}$$

Tabla 3.1: Valores recomendados por la ROM para la altura de rugosidad superficial z_0 y coeficiente de arrastre superficial.

Tipo de Superficie	z_0 [m]	$10^{3}C_{d}$
I. Mar abierto y campo abierto llano sin		
obstáculos (p.e. zonas costeras llanas,	0.001 - 0.01	1.9 - 3.4
desiertos.).		
II. Mar con oleaje muy fuerte y campo abierto,		
llano u ondulado, con obstáculos dispersos (p.e.	0.01 - 0.3	3.4 - 13
praderas, páramos.).		
III. Superficies boscosas, campo con obstáculos		
abundantes y pequeñas zonas urbanas	0.3 - 1.0	13 - 30
(obstáculos con alturas entre $9 \ge 15 m$).		
IV. Superficies con grandes y frecuentes	10 50	20 200
obstáculos, y grandes ciudades.	1.0 - 5.0	50 - 500

Fuente: Adaptado a partir de la ROM 0.4-95 (Del Estado, 1995)

Se asume que la diferencia de densidad entre la capa superficial y la de fondo es relativamente pequeña y se espera que la pendiente de la interfaz de densidad sea mucho mayor que la pendiente de la superficie libre. Ello permite asumir que la pendiente de la superficie es nula. En tal caso, puede ocurrir que para velocidades de viento mayores exista una mayor inclinación de la interfaz de densidad, incluso llegando hasta la superficie en el extremo desde donde sopla el viento, considerando este fenómeno como surgencia (ver Figura (3.4b)) (Niño, 2013).

De acuerdo con la pendiente de interfaz de densidad de la ecuación (3.4b), da una condición de surgencia (3.11).

$$\frac{h_1}{L}Ri_0 \approx \frac{1}{2} \tag{3.11}$$

También se considera que el parámetro adimensional Wedderburn (Imberger y Hamblin, 1982) (3.12) determina la existencia de surgencia en relación con la intensidad del viento, de acuerdo con la respuesta de la termoclina del cuerpo estratificado (Shintani et al., 2010).

$$W = \frac{h1}{L}Ri_0 \tag{3.12}$$

Monismith (1986) propone formulaciones que sirven tanto para un W < 1 como W > 1, donde utiliza la relación entre la tasa de cambio de la interfaz de densidad y la tasa de profundización entre ambas capas. Lo anterior se logra mediante el supuesto de conservación de flotabilidad a través de una ecuación de estado lineal, de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt}(\Delta\rho h_2) = 0 \tag{3.13}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{h_2 d\Delta \rho/dt}{\Delta \rho} \tag{3.14}$$

Tanto la ecuación (3.13) como (3.14) fueron utilizadas en los experimentos y validadas con lo propuesto por Kranenburg (1985), quien utilizó dimensiones de canal mucho más extensas. De acuerdo a lo expuesto por Monismith (1986), dichos resultados pueden ser

aproximados, por la ecuación (3.15).

$$\frac{dh_2/dt}{u_*} = 0.07Ri^{-1} \tag{3.15}$$

Donde $u_e = dh_2/dt$ representa la tasa de cambio de la profundidad de la capa de mezcla en el momento que alcanza la surgencia. Los experimentos propuestos utilizan la ecuación (3.16) para determinar el número de Richardson.

$$Ri = \frac{\epsilon_{12}gh_1}{u_*^2} \tag{3.16}$$

Donde $\epsilon_{12} = (\rho_1 - \rho_2)/\rho_0$, siendo ρ_0 la densidad media de la columna de agua.

Por otro lado, considerando que se trata de una aproximación lineal, al momento de calcular la pendiente que surge de la simulación hidrodinámica, se asume también un comportamiento lineal, evaluando la pendiente de la ecuación (3.17).

$$m = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \tag{3.17}$$

Las ecuaciones presentadas con anterioridad, describen el modelo conceptual de la surgencia generada por viento. Fenómeno que será reproducido mediante modelación numérica, la que considera una batimetría ideal y real definida para una canal rectangular y Bahía Mejillones, respectivamente. Los modelos numéricos son descritos en la siguiente sección.

3.4 DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

A continuación se describen, someramente, los modelos utilizados en la presente tesis. Para ello se utiliza el software MIKE Zero, que incluye los modelos $MIKE \ 21 \ Spectral \ Waves$ FM y $MIKE \ 3 \ Flow \ Model \ FM$, para resolver la propagación de oleaje y la hidrodinámica de la bahía, respectivamente. Disponer de dicho software es posible gracias a una licencia estudiantil proporcionada por el Instituto Hidraúlico Danés (DHI) para el desarrollo de la presente tesis.

3.4.1 MIKE 3 FLOW MODEL FM: MÓDULO HIDRODINÁMICO

Corresponde a un modelo numérico tridimensional, con la capacidad de modelar flujos en estuarios, bahías y áreas costeras. Adicionalmente, puede simular flujos tridimensionales inestables teniendo en cuenta variaciones de densidad, batimetría y forzantes externas como el viento y la presión atmosférica, elevaciones de mareas, corrientes y otras condiciones hidrográficas.

La solución numérica se basa en un sistema tridimensional de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), invocando supuestos de Boussinesq y de presión hidrostática. Es por ello que el modelo se sustenta de las ecuaciones de continuidad (3.18), momentum en el eje x (3.19) y en el eje y (3.20).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \tag{3.18}$$

$$+\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} -$$
(3.10)

$$\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \tag{3.19}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h}\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x}\right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t\frac{\partial v}{\partial z}\right) + v_s S$$
(3.20)

Los esfuerzos turbulentos son presentados en la ecuación (3.21) y ecuación (3.22):

 $\frac{\partial u}{\partial t}$

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$
(3.21)

$$F_{v} = \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$
(3.22)

Para resolver las ecuaciones anteriormente presentadas se recurre a las condiciones de borde de superficie y de fondo para u, v y w, mostradas en la ecuación (3.23) y ecuación (3.24), respectivamente.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \ \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} \left(\tau_{sx}, \tau_{sy}\right)$$
(3.23)

Para $\boldsymbol{z}=-\boldsymbol{d}$

Para $z = \eta$

$$u\frac{\partial d}{\partial t} + v\frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} \left(\tau_{bx}, \tau_{by}\right) \tag{3.24}$$

El esfuerzo provocado por la fricción del fondo, $\vec{\tau_b}$, es determinado por la ley de fricción cuadrática como indica la ecuación 3.25

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \tag{3.25}$$

Para el cálculo tridimensional, \vec{u}_b es la velocidad a una distancia Δz_b sobre el fondo marino y el coeficiente de arrastre se determina asumiendo un perfil logarítmico entre el fondo marino y un punto Δz_b sobre éste como muestra la ecuación (3.26)

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa} ln\left(\frac{\Delta z_b}{z_0}\right)\right)^2} \tag{3.26}$$

La velocidad de fricción asociada con la tensión del fondo está dada por la ecuación (3.27)
$$U_{tb} = \sqrt{c_f |\bar{u_b}|^2} \tag{3.27}$$

Cuando el borde del fondo marino es rugoso, z_0 depende de la altura de rugosidad del fondo, definido por la ecuación (3.28), donde *m* es aproximadamente 1/3.

$$z_0 = mk_s \tag{3.28}$$

Con respecto al esfuerzo inducido por el viento, $\vec{\tau}_s$, se calcula mediante la relación empírica mostrada en la ecuación (3.29)

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d u_s |\vec{u}_s| \tag{3.29}$$

La velocidad de fricción asociada con la tensión superficial está dada por la ecuación (3.30)

$$U_{ts} = \sqrt{\frac{\rho_a c_f \left| \bar{u}_w \right|^2}{\rho_0}} \tag{3.30}$$

Las ecuaciones de transporte para temperatura (3.31) y salinidad (3.32) requieren del término de difusión horizontal definido en la ecuación (3.33), que a su vez define los coeficientes de difusión en función de la viscosidad de eddy de la ecuación (3.34). Más detalles de las formulaciones del modelo hidrodinámico son presentados en DHI (2014b).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_\nu \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \tag{3.31}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_\nu \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \tag{3.32}$$

$$(F_T, F_s) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y}\right)\right) (T, s)$$
(3.33)

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T}, \quad D_v = \frac{\nu_t}{\sigma_T} \tag{3.34}$$

Donde:

x, y, z	Coordenadas cartesianas
η	Elevación de la superficie del agua
d	Profundidad del agua sin movimiento
$h = \eta + d$	Profundidad total del agua
u, v, w	Componentes de la velocidad en la dirección $x, y \ge z$
$f=2\Omega sin\phi$	Parámetro de Coriolis (Ω es la velocidad angular y ϕ es la latitud geográfica)
g	Aceleración gravitacional
ρ	Densidad del agua
S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}	Componentes del tensor de radiación
$ u_t $	Viscosidad vertical turbulenta (o eddy)
p_a	Presión atmosférica
$ ho_0$	Densidad referencial del agua
t	Tiempo
A	Viscosidad de eddy horizontal
$\vec{\tau}_s = \tau_{sx}, \tau_{sy}$	Componentes $x \in y$ del esfuerzo del viento en la superficie
$\vec{\tau_b} = \tau_{bx}, \tau_{by}$	Componentes $x \in y$ del esfuerzo de la fricción del fondo
S	Magnitud de descarga debido a las fuentes
u_s, v_s	Velocidad por la cual el líquido es descargado al agua
D_{ν}	Coeficiente de difusión vertical turbulento
c_f	Coeficiente de drag
$\vec{u}_b = (u_b, u_b)$	Velocidad del flujo sobre el fondo
$\kappa = 0,4$	Constante de Kármán
z_0	Escala de longitud de rugosidad del fondo
k_s	Altura de rugosidad del fondo
$ ho_a$	Densidad del aire
c_d	Coeficiente de drag del aire
$\vec{u}_w = (u_w, u_w)$	Velocidad del viento 10 m sobre la superficie del mar
\widehat{H}	Término fuente debido al intercambio de calor con la atmósfera
T_s, s_s	Temperatura y salinidad de la fuente
F_T, F_s	Difusión horizontal de temperatura y salinidad
D_h	Coeficiente de difusión horizontal
σ_T	Número de Prandtl

De acuerdo a los términos fuentes y sumideros incluidos en las ecuaciones del módulo hidrodinámico de MIKE 3 Flow Model FM, se mencionan aquellos no considerados en la presente memoria:

- Fuerza de Coriolis
- Cobertura de hielo
- Precipitación y evaporación
- Fuentes
- Estructuras

La discretización espacial de dichas ecuaciones es posible a través del método de volúmenes finitos centrado en la celda. Para el dominio horizontal se usa una malla estructurada mientras que para el vertical una no estructurada. En cuanto a la superficie libre, se considera una aproximación de la transformación de coordenadas sigma (DHI, 2014b).

Figura 3.5: Mallado tridimensional descrito para el modelo hidrodinámico, donde (a) el dominio horizontal comprende una malla estructurada y el vertical una no estructurada, considerada para éste ultimo (b) una grilla en coordenadas sigma.



Fuente: Elaboración propia a partir de DHI (2014b).

Para forzar el módulo hidrodinámico, no sólo se utiliza viento sino también marea y oleaje, y para caracterizar este último se usa un modelo de propagación de olas espectrales MIKE21 Spectral Waves FM, definido a continuación.

3.4.2 MIKE 21 SPECTRAL WAVES FM: MÓDULO DE PROPAGA-CIÓN DE OLEAJE

Modelo que simula el crecimiento, decaimiento y transformación del oleaje tipo sea (mar de viento) a swell (mar de fondo) desde aguas profundas a zonas costeras. Se basa en el método de volúmenes finitos de celda centrada para la discretización de la ecuación de balance de acción del oleaje (ecuación 3.35) definida como (DHI, 2014a)

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$
(3.35)

$$\sigma = \sqrt{gktanh(kd)} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$$
(3.36)

Dado que se trata de un estudio de pequeña escala, se utiliza la ecuación de conservación de acción del oleaje (3.37) en coordenadas cartesianas, donde la velocidad de propagación de la onda \vec{v} (3.37) está compuesta por $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ (3.38, 3.39 y 3.40) y además, las fuentes asociadas a la energía S (3.41). Todas ellas son descritas a continuación.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \tag{3.37}$$

$N(\sigma, \theta)$	Espectro de densidad de acción del oleaje
$E(\sigma, \theta)$	Densidad de energía
$\sigma = 2\pi f_r$	Frecuencia angular relativa
f_r	Frecuencia relativa
θ	Dirección de la ola
g	Aceleración gravitacional
d	Profundidad del agua
$ec{U}$	Vector de la velocidad de la corriente
k	Número de ola
$\omega = 2\pi f_a$	Frecuencia angular absoluta
f_a	Frecuencia absoluta
\vec{k}	Vector del número de ola
$N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$	Densidad de acción del oleaje
$\vec{x} = (x, y)$	Coordenadas cartesianas
t	Tiempo
$\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$	Velocidad de propagación del grupo de olas
S	Término fuente de la ecuación de balance de energía
u, v, w	Componentes de la velocidad en la dirección $x, y \ge z$
∇	Operador diferencial

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}g + \vec{U}$$
(3.38)

$$c_{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial t} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right) - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$
(3.39)

$$c_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right)$$
(3.40)

Donde s es la coordenada del espacio en la dirección de la ola θ , y m es la coordenada perpendicular a s. $\nabla_{\vec{x}}$ es el operador diferencial bidimensional en el espacio \vec{x} .

Dado que, al interactuar con la superficie del océano, el viento produce la energía necesaria para el crecimiento y formación del oleaje, se debe considerar que varios factores suman o restan energía en este proceso. Estos factores se representan por el término fuente S de la ecuación 3.41 (DHI, 2014a).

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$
(3.41)

- S_{in} : Generación de energía debido al viento
- S_{nl} : Transferencia de energía producida por la interacción no lineal ola ola
- S_{ds} : Disipación de energía debido al white capping
- S_{bot} : Disipación de energía debido a la fricción del fondo
- S_{surf} : Disipación de energía debido a la rotura por profundidad

Se asume una propagación de olas de cresta corta mediante un modelo que considera la formulación paramétrica desacoplada direccional de la ecuación de acción del oleaje propuesto por Holthuijsen et al. (1989). En el desarrollo del modelo estos investigadores consideran la generación de energía debido al viento, disipación de energía debido al fondo y disipación de energía debido a la rotura por profundidad (S_{in} , S_{bot} y S_{surf}), como los factores que inciden en el crecimiento y transformación del oleaje en aguas profundas y someras. Se considera además, que el modelo de propagación de oleaje es capaz de calcular los tensores de radiación (3.42), utilizados en la simulación hidrodinámica a través de MIKE 3 Flow Model FM en el módulo *Hidrodinámico*. La formulación de dichas ecuaciones se presenta a continuación (DHI, 2014a).

$$S_{xx} = \frac{1}{2}g(f_{u2} + f_{pp})$$

$$S_{xy} = \frac{1}{2}g(f_{uv})$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2}g(f_{v2} + f_{pp})$$
(3.42)

$$f_{pp} = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} \left(1 + \frac{2kd}{sinh(2kd)}\right) E(f,\theta) df d\theta$$

$$f_{u2} = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} \cos^{2} \left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{sinh(2kd)}\right) E(f,\theta) df d\theta$$

$$f_{uv} = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} \cos \left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \sin \left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{sinh(2kd)}\right) E(f,\theta) df d\theta$$

$$f_{v2} = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} \sin^{2} \left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) \left(1 + \frac{2kd}{sinh(2kd)}\right) E(f,\theta) df d\theta$$
(3.43)

En la siguiente sección, se presenta una pequeña descripción teórica de la propagación del oleaje.

PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Una de las formas de propagar el oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras es mediante transferencia espectral. Este método consiste en propagar la totalidad de la energía contenida en el espectro al sitio de interés, aplicando funciones de transferencia que son aplicadas a la función de densidad espectral, $S_0(f, \theta)$, correspondiendo de esta manera a una metodología conservativa de la energía total del oleaje en su zona de generación.

Las funciones de transferencia determinan la variación que experimenta la altura y dirección del espectro a medida que avanza desde aguas profundas a aguas someras, considerando los fenómenos de disipación de energía, refracción, difracción y asomeramiento. Con ello se obtienen coeficientes de agitación (K_a) y dirección $(K_d \circ d\theta_0/d\theta)$ del oleaje en el punto de interés (Massel, 2017), en función de la dirección y período de ola en aguas

profundas. Ambos coeficientes se obtienen al modelar parámetros de resumen de alturas unitarias, periodos y direcciones representativos de la zona de estudio.

La función de densidad espectral en el punto, $S_p(f, \theta)$, es presentada a continuación (Massel, 2017).

$$S_p(f,\theta) = K_a^2 \frac{d(\theta_0)}{d\theta} S_0(f,\theta)$$
(3.44)

Una vez determinada la función de densidad espectral en aguas someras, es necesario calcular los parámetros estadísticos de resumen, siendo los más representativos la altura significativa espectral, H_m , período peak, T_p , y dirección peak, D_p , que se calculan mediante rutinas en el programa MatLab. La formulación utilizada, de acuerdo con Holthuijsen (2007), se presenta a continuación.

• Altura significativa espectral, H_m

$$H_m = 4\sqrt{m_0} \tag{3.45}$$

$$m_0 = \int \int f^n S_p(f,\theta) df d\theta \qquad (3.46)$$

Donde m_0 es denominado momento de orden enésimo del espectro de la función de densidad espectral $S(f, \theta)$, siendo f la frecuencia y θ la dirección. m_0 es el área bajo la curva de $S(f, \theta)$ y representa un promedio de aquellos desplazamientos verticales, que se traducen en la energía total de éste (Silva-Casarín, 2005).

• Período peak, T_p

$$T_p = \frac{1}{f_p} \tag{3.47}$$

Donde f_p es la frecuencia peak, corresponde al máximo valor que alcanza el espectro de densidad de energía asociado al rango de frecuencias. T_p se obtiene mediante una interpolación de tercer grado del tipo:

$$S(f) = af^3 + bf^2 + cf + d$$

Luego de la tercera derivada de S igualada a cero se obtiene el inverso de f_p .

- Dirección peak, D_p , corresponde a la dirección asociada al máximo valor que alcanza el espectro de densidad de energía asociado al rango de direcciones. Para este parámetro se utiliza la misma metodología anterior, interpolación de tercer grado de la función $E(\theta)$.
- Dispersión direccional del oleaje σ_{θ}

$$\sigma_{\theta} = \left[2\left(1 - \left(a^2 + b^2\right)^{1/2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.48)

$$a = \frac{1}{m_0} \int \int \cos(\theta) S(f, \theta) \, df \, d\theta$$

$$b = \frac{1}{m_0} \int \int \sin(\theta) S(f, \theta) \, df \, d\theta$$
 (3.49)

Además de dicho procedimiento, también se realiza una propagación de parámetros de resumen desde aguas profundas a someras, los que se utilizan en la obtención de los tensores de radiación que abarque todo el dominio numérico. Para ello, a partir de la función de densidad espectral $S_0(f, \theta)$, se obtiene H_{m_0} de la ecuación (3.45), mientras D_{p_0} y T_{p_0} corresponden al máximo valor que alcanza el espectro de densidad de energía asociado al rango de direcciones y frecuencias, respectivamente.

4 ANTECEDENTES DE LA BAHÍA MEJILLO-NES

El siguiente apartado tiene por objetivo, poner a disposición del lector toda aquella información relevante de Bahía Mejillones y que permite, en una posterior metodología, trazar los lineamientos para llevar a cabo los propósitos de la presente memoria. Se considera una somera descripción de la zona de estudio, proyectos operativos en la Bahía y aquellas variables oceanográficas y meteorológicas levantada previamente por terceros.

4.1 ZONA DE ESTUDIO

El lugar de estudio se emplaza en la Región de Antofagasta, comuna de Mejillones, específicamente en la bahía de Mejillones del Sur (de ahora en adelante Bahía). La comuna se ubica a 65 kilómetros al norte de la ciudad de Antofagasta. Según el Censo (2017), cuenta con 13.467 habitantes y su principal actividad económica es industrial, portuaria y servicio a la minería, desarrollo energético, pesca y turismo (Catalán, 2009), debido a la condición de abrigo que presenta la Bahía.

La Bahía está protegida al sur por la Península Mejillones (23°S) (de ahora en adelante Península) y expuesta al norte por el Océano Pacífico, como se aprecia en la Figura 4.1. La Península se extiende 40 [km] fuera de la costa y su longitud es de 55 [km] aproximadamente, entre Punta Angamos (al norte) y Punta Tetas (al sur), que presentan elevaciones de 754 [m] y 1146 [m], respectivamente. Punta Tetas tiene la capacidad de desviar los vientos locales y las corrientes hacia el oeste (Escribano et al., 2004).

El oleaje reinante que llega a la zona de estudio proveniente del suroeste (Beyá et al., 2016), se ve reducido dentro de la Bahía debido a la Península, permitiendo que sea difractado y por ende arribe a la costa con menor energía, facilitando la explotación del borde costero.

Sin embargo, la Bahía se ve expuesta a las olas que arriban desde el cuarto cuadrante y que usualmente predominan en la época estival. Estos frentes de ondas que se producen en el invierno del hemisferio norte pueden llegar a producir alteraciones en la operatividad de los buques en los sitios portuarios de la Bahía.

Un proceso importante que destaca Rodriguez et al. (1991) es la presencia de un centro de surgencia que ocurre en la punta norte de la Península. Dicho proceso genera que tanto la temperatura como el oxígeno disminuyan mientras que los nutrientes aumentan, implicando mayor productividad en el ecosistema marino (Mann y Lazier, 2013).



Figura 4.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio a nivel regional y local de Bahía Mejillones, en coordenadas UTM, WSG 1984, Huso 19k.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que el proceso de surgencia ocurre, debido a la advección que producen las corrientes, los nutrientes que fueron dispuestos en la superficie se propagan hacia el interior de la Bahía, en un proceso que se ha denominado como sombra de surgencia por Marín et al. (1993).

4.2 PROYECTOS OPERATIVOS EN LA BAHÍA

El Servicio de Evaluación Ambiental (de ahora en adelante SEA) es el organismo público encargado de revisar los proyectos o actividades sometidos a la normativa vigente a través del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (de ahora en adelante SEIA). El SEA cuenta con numerosa información proveniente desde estudios de línea base requeridos por la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y que permiten elaborar el Estudio de Impacto Ambiental (de ahora en adelante EIA) de aquellos proyectos o actividades que pudieran generar algún tipo de impacto en el medio ambiente. La línea de base proporciona información de aquellos proyectos con EIA aprobado, en calificación o rechazado y dicha información es gratuita para todos los ciudadanos en el sitio web¹(SEA, 2019).

En la Bahía se cuenta con información de línea base para 43 proyectos sometidos a una EIA, que se encuentran aprobados por el SEIA y que en la actualidad operan con normalidad. La información relevante recopilada de la página web corresponde a coordenadas geográficas en UTM, Datum WGS84, de descargas y captaciones de agua de mar, caudales de descarga salinas y térmicas (SEA, 2019). En la Tabla 4.1 se informa sobre el nombre del proyecto, titular, tipo de utilización de agua, coordenadas geográficas, caudal y característica del agua descargada al mar. También se aprecia la cantidad de emisarios y sifones que cada uno de ellos tiene a su disposición, así como el caudal, con su respectivo valor, captado y expulsado de éstos. La importancia de conocer dicha información radica en que luego que se genera la surgencia, esta agua rica en nutrientes y baja en temperatura permanece durante días en el lugar, siendo captada por los emisarios y al ser expulsada genera emulsión hidrodinámica e incluso llega a generar presencia de espuma en el medio marino². En ello radica la importancia de conocer adecuadamente el medio en que se emplazan los proyectos costeros, de manera que generen el menor impacto en el ecosistema. A continuación se describe la información oceanográfica y meteorológica que permita cumplir con los objetivos de este proyecto de título.

¹Sitio web desde donde se obtiene la línea base de Chile https://www.sea.gob.cl

 $^{^{2}} https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-antofagasta/2018/10/12/vecinos-denuncian-que-tuberia-de-termoelectrica-arrojo-espuma-en-mejillones-descartan-toxicidad.shtml$

Tabla 4.1: Nombre del proyecto, titular, tipo de efluente a través de emisario [E] o sifón [S], en coordenadas en UTM de puntos de descargas y toma de agua en la Bahía, caudales de entrada y salida en [m3/s] y temperatura [°C], salinidad $[mg/l \circ psu]$ o no aplica [N/A] descargada al mar.

Nombre del prevente	Titular a carro	Tine	Coordenadas		Candal	Valor
Nombre der proyecto	Thular a cargo	Tipo	Sur	Este	Caudai	valoi
		S	7445458	353309	0.5	N/A
	Enaex S.A.	S	7445561	353301	2.9	N/A
America i da a Madamia aida		Е	7445775	353448	2.9	30°C
Amphacion y Modernizacion		S	7445617	353482	2.9	N/A
Planta Prillex america		Е	7445840	353474	2.9	30°C
		Е	7445840	353494	2.9	30°C
		S	7445617	353545	2.9	N/A
		Е	7446968	354188	1.8	8°C
		Е	7446952	354155	1.8	8°C
		S	7447154	354093	1.8	0.3mg/l
Terminal Marítimo Flotante de	Due en el C	S	7447165	354084	1.8	N/A
GNL	Progas S.A.	S	7447175	354074	1.8	N/A
		S	7446968	354188	1.8	N/A
		S	7446952	354155	1.8	N/A
		S	7446940	354198	1.8	N/A
EIA Central Termoeléctrica	Empresa Eléctrica	S	7449777	359455	0.8	N/A
Cochrane	Cochrane	Е	7449727	359401	2.0	25°C
Ampliación Productiva Planta de	Molibdenos y	S	7449100	358930	0.05	N/A
Procesamiento de Molibdeno	Metales S.A.	Е	7449059	358909	0.03	N/A
Ampliación Plantas de Ácido	Enaex S.A.	Е	7445706	353736	3.1	
Nitrito y Nitrato de Amonio		S	7445609	353706	3.1	N/A
Enaex				359208	1.7	
Ampliación Planta	Empresa Eléctrica	E	7449477			58 psu
Desalinizadora de Agua de Mar,	Angamos S.A.	S	7449414	359261	1.7	N/A
Central Termoelèctrica Angamos		S	7449432	359246	1.7	N/A
Central a Gas Natural Ciclo		S	7452618	361489	0.9	/ N/A
Combinado Kelar	Kelar S.A.	E	7452791	361769	0.8	25° C
		S	7452504	361115	1.6	N/A
Planta Desalinizadora v		S	7452484	361101	1.6	N/A
Suministro de Agua Industrial	Caitan SpA	E	7452423	361229	1.6	36 psu
		Е	7452436	361239	1.6	36 psu
Terminal de GNL Norte Grande	Sociedad GNL	S	7450152	358738	0.3	N/A
	Compleio Portuario	S	7448086	357923	0.002	N/A
Complejo Portuario de Mejillones	Meiillones	Ē	7448050	357929	0.001	$\frac{100 \text{ mg/l}}{100 \text{ mg/l}}$
		S	7446017	353892	0.1	23 °C
	•	S	7446026	353886	0.1	<u> </u>
	Gasatacama Chile	S	7446033	353878	0.1	N/A
Central Termoeléctrica Ttanti	S.A.	E	7446112	353834	0.1	0.04 mg/l
	~	E	7446111	353833	0.1	N/A
	-	E	7446111	353832	0.1	N/A
	Gasatacama Chile	S	7446451	354886	17.6	N/A
Central Térmica Atacama	S.A.	E	7446783	354939	17.6	25 °C

Fuente: Elaboración propia a partir de información disponible en www.sea.cl

4.3 OCEANOGRAFÍA Y METEOROLOGÍA

Para estudiar la surgencia generada en la Bahía, es necesario contar con un modelo hidrodinámico que permita resolver numéricamente la respuesta del cuerpo de agua, de una manera adecuada. Para ello, es pertinente contar con variables oceanográficas como la marea, oleaje, temperatura del mar, y meteorológicas como el viento, temperatura atmosférica, radiación solar, cobertura de nubes, entre otras variables de intercambio de calor, las que en conjunto influyen en el movimiento del agua y entregan como resultado, entre otras variables, la circulación hidrodinámica y temperatura del cuerpo de agua (Winckler, 2018).

Para llevar a cabo la simulación numérica, se cuenta con información de campo levantada previamente por terceros. Estos antecedentes se emplean tanto para la calibración y validación, y posterior explotación de los modelos de propagación de oleaje e hidrodinámico.

La calibración y validación se lleva a cabo con registros de datos de ventanas de tiempo estival e invernal. Los modelos son forzados con datos de marea, oleaje y viento y luego los resultados de dichos modelos son comparados con las campañas estivales e invernales de dos ADCP's, dependiendo del caso estudiado. Luego de obtener la configuración de cada modelo, es posible representar la hidrodinámica de la Bahía.

La ubicación georeferenciada desde donde fueron registradas las variables oceanográficas y meteorológicas, se muestra en la Figura 4.2.

4.3.1 OLEAJE

La información de oleaje en aguas profundas ha sido proporcionada por la Universidad de Valparaíso a través del Atlas de Oleaje (Datos Oleaje³), quienes cuentan con una base de datos de estados de mar, modelados cada 3 horas, comprendidos en el período 1979 - 2017 en forma de espectros bidimensiolanes, para un total de 29 frecuencias y 24 direcciones.

Adicionalmente se dispone de información proporcionada por la consultora Ecotecnos S. A. a través de los proyectos EIA Central Termoeléctrica Cochrane (Datos ADCP1⁴) y EIA Terminal de GNL Norte Grande (Datos ADCP2⁵), ambas en aguas de baja profundidad y en las cercanías de la línea de costa. Cada locación de instrumento, cuenta con campañas de verano e invierno registradas por un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), cuyo periodo de medición se muestra la Tabla 4.2. Los registros están promediados cada 3 horas.

 $^{^3\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 354066.00 m E, 7447111.00 m S

 $^{^4\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 359097.00 m E, 7449576.00 m S

 $^{^5\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 354066.00 m E, 7447111.00 m S



Figura 4.2: Ubicación geográfica de variables oceanográficas y meteorológicas a utilizar en los modelos numéricos, coordenadas UTM en metros, Dátum WSG 1984, Huso 19k.

Fuente: Elaboración propia

Los Datos Oleaje se usan como forzante en el modelo de propagación de oleaje, considerando las mismas ventanas de tiempo presentes en la Tabla 4.2, para calibrarlo y validarlo a través de una comparación con Datos ADCP1 y Datos ADCP2. Luego de ello, es posible obtener los tensores de radiación que entrega dicho modelo, para incorporarlos como forzante en el modelo hidrodinámico y realizar una calibración y validación. En segunda instancia, al contar con las configuraciones de ambos modelos numéricos es factible realizar su explotación utilizando Datos Oleaje, de acuerdo con los objetivos del documento.

Tabla 4.2: Periodo de mediciones para las campañas registradas por ADCP1 y ADCP2.

Data	Verano	Invierno
ADCP 1	28/02/2016 - 20/04/2016	21/06/2016 - 25/07/2016
ADCP 2	Sin información	20/08/2011 - 13/09/2011

4.3.2 MAREA

La información de nivel del mar (Datos Marea⁶) se obtiene gratuitamente desde el Sea Level Station Monitoring Facility (IOC-UNESO, 2019) a través de su página web, que cuenta con información del mareógrafo dentro de la Bahía con el nombre MejillonesCL, administrado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Los datos del nivel del mar promediados cada 1 minuto, se descargan para la misma ventana de tiempo indicada en la Tabla 4.2, de tal manera que coincidan con aquellos medidos por ADCP.

Adicionalmente, se dispone con registros del nivel del mar (Datos ADCP1) promediados cada 10 minutos.

Datos Marea es utilizada en la calibración y validación del modelo hidrodinámico, que entrega como resultado, corrientes, que son comparadas con aquellas campañas estival e invernal registradas por Datos ADCP1. Una vez lista la configuración del modelo hidrodinámico, es factible la explotación de éste utilizando Datos Marea.

4.3.3 VIENTO

Dentro de los antecedentes facilitados por la consultora Ecotecnos S.A., incluye registros de viento (Data Viento⁷) para la campaña estival e invernal registrado por Datos ADCP1.

La información correspondiente a la intensidad y dirección del viento (Datos Viento⁸) está disponible gratuitamente gracias a la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC, 2015) a través de su sitio web, que cuenta con una estación llamada *Cerro Moreno Antofagasta*. La información proporciona magnitud y dirección promediados cada 1 hora, comprendiendo el periodo 1980 - 2017. La dirección y velocidad considera como nivel de

 $^{^6\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 351
430.00 m E, 7444925.00 m S

 $^{^7\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 360831.00 m E, 7449618.00 m S

 $^{^8\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 352796.00 m E, 7405896.00 m S

referencia los 10 m.s.n.m e indica la dirección verdadera desde donde sopla el viento.

En síntesis, Datos Viento en conjunto con Datos Marea y los tensores de radiación entregados por Datos Oleaje a través del modelo de propagación de oleaje, son las forzantes utilizadas para calibrar y validar el modelo hidrodinámico, considerando las ventanas de tiempo impuestas por la campaña estival e invernal registradas por Datos ADCP1.

4.3.4 TEMPERATURA

La información de temperatura para construir las condiciones de borde (CB) e iniciales (CI), se recopiló desde el Modelo Híbrido de Coordenadas del Oceáno (HYCOM), creado por Bleck (2002), gratuitamente a través de su sitio web. Los registros vienen promediados cada 3 horas y abarcan gran parte del dominio numérico como se observa en la Figura 5.2.

Datos Temperatura se utiliza como forzante en el modelo hidrodinámico y forma parte en la explotación del módulo hidrodinámico, pues no se cuenta con información que permita calibrar y validar dicha variable dentro de la Bahía.

4.3.5 CORRIENTES

La información acerca de la magnitud y dirección de las corrientes forma parte de Datos ADCP1, cuyos registros están promediados cada 10 minutos, además de abarcar toda la columna de agua desde donde se instala el instrumento aproximadamente en el veril 15 [m] desde la costa.

De acuerdo a las anteriores forzantes expuestas, los resultados del proceso de calibración y validación del modelo hidrodinamico serán contrastados con los registros de corrientes Datos ADCP1 tanto para la campaña de verano como la de invierno, respectivamente.

4.4 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA

La información batimétrica se obtiene a partir de las cartas náuticas del SHOA N° 1300 y N° 1331, de acuerdo con la Publicación N°3000 "Catálogo de Cartas y Publicaciones Náutica" (SHOA, 2015). La extensión que abarcan las cartas náuticas en la zona de estudio se aprecia en la Figura 4.3. Un mayor detalle en cuanto al nombre y escala de cada una de ellas se observa en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Detalle de cartas náuticas utilizadas en la elaboración del dominio numérico.

Número	Nombre	Escala
1300	Puerto Tocopilla a Rada de Antofagasta	1:200.000
1330	Bahía Mejillones del Sur	1:50.000
	Puerto Mejillones del Sur	1:20.000

Fuente: Elaboración propia a partir de SHOA (2015)



Figura 4.3: Extensión de cartas náuticas utilizadas en la construcción del dominio numérico.

Fuente: Elaboración propia a partir de (SHOA, 2015)

5 METODOLOGÍA UTILIZADA

En la presente sección se muestran los procedimientos para cumplir con los objetivos específicos de la presente memoria. En primera instancia, fue pertinente contar con una caracterización preliminar oceanográfica y meteorológica de la zona estudiada, la cual permitió por una parte y mediante información de oleaje, marea y viento, llevar a cabo las tareas de calibración y validación de los modelos de propagación de oleaje e hidrodinámico, y por otra parte, definir lineamientos utilizados a través de forzantes en dichos modelos numéricos, incluyendo a la temperatura, para una adecuada representación de los fenómenos estudiados.

En la Figura 5.1 se muestra el diagrama de flujo concerniente a las tareas que permitieron llevar a cabo la metodología. La línea segmentada en color verde indica que si la tarea cumple, es factible ir a la siguiente.

5.1 CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA Y METEO-ROLÓGICA

Como primera actividad se realizó la caracterización del comportamiento hidrodinámico de la Bahía, basado en evaluar las siguientes variables.

- Corrientes
- Oleaje
- Marea
- Vientos

A continuación, se menciona el procesamiento y/o procedimiento utilizado en cada una de ellas.

5.1.1 REGISTROS DE ADCP Y VIENTO PROPORCIONADOS POR TERCEROS

La información levantada previamente por terceros, tanto de registros de ADCP (corriente, marea y oleaje) como de viento, es descrita a continuación.



Figura 5.1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

Fuente: Elaboración propia

5.1.1.1. CORRIENTE

La obtención de los datos de corrientes se realizó mediante el software *WinADCP* (RDinstruments, 2011b), del cual es posible exportar un archivo cuyos parámetros están contenidos para la columna de agua en un total de 59 capas cada una con espesor de 0.5 [m], siendo éstos magnitud, dirección y las componentes ortogonales U y V, entre otros, promediados cada diez minutos.

Una vez extraída la información de magnitud y dirección, fue necesario realizar una corrección por desviación magnética terrestre, pues el ADCP está referido al Norte Magnético y los registros deben referirse al Norte Geográfico. Para ello, se aplicó la declinación magnética determinada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2019) calculada en base al modelo International Geomagnetic Reference Field (IGRF), en el cual se ingresan coordenadas geográficas de la ubicación de Datos ADCP1 y la fecha en que comenzó el registro, dando una desviación de 3.40 [°] y 3.47 [°] en dirección W, para la campaña de verano e invierno, respectivamente.

La información de las componentes de la corriente, permitió conocer el comportamiento de la circulación dentro de la Bahía, entregando como resultado las características que rigen el flujo en la época estival e invernal del año 2016. Para ello, el registro *Datos ADCP1* fue discretizado en tres capas de la columna de agua: la capa de fondo se determinó por encima de la zona de blanqueo del instrumento, y la capa superficial se estimó de acuerdo con bajamar mínima, de la siguiente manera:

- Capa superficial: a 3 metros bajo la superficie del agua.
- Capa intermedia: a 7 metros bajo la superficie del agua.
- Capa de fondo: a 12 metros bajo la superficie del agua.

Los resultados son presentados mediante histogramas de frecuencias en el numeral 6.1.1.1 para cada una de las campañas de Datos ADCP1.

Adicionalmente, la magnitud y dirección concerniente en ambas campañas, fue utilizada para contrastar los resultados del modelo hidrodinámico en el proceso de calibración y validación (numeral 6.3.2.1).

5.1.1.2. MAREA

La información de la marea, viene contenida en el mismo archivo desde donde se extrajeron las corrientes. El análisis de las mareas se realizó empleando la información registrada por el instrumento ADCP, el cual provee de un registro cada 10 minutos del nivel del mar. A partir de la serie se efectuó sólo un análisis no armónico, debido a que su caracterización no es relevante para los propósitos de esta memoria de título.

Se calcularon los valores no armónicos de la marea propuestos en la Publicación N° 3202 por SHOA (1999), siendo necesario un registro horario de a lo menos 30 días consecutivos que garantice la ocurrencia de las cuatro fases de la Luna. Se dispone de observaciones correspondiente a los meses de marzo y parte de junio y julio de 2016 (campañas de verano e invierno de *Datos ADCP1*). Los planos de la marea fueron referidos al Nivel

de Reducción de Sondas (NRS) para posteriormente contrastarlos con aquellos calculados con datos del nivel del mar extraídos desde *Sea level station monitoring facility, IOC*. Los resultados se presentan en el numeral 6.1.1.2.

5.1.1.3. OLEAJE

La obtención de datos de olas se realizó mediante el software WavesMon (RDinstruments, 2011a). Como resultado, entregó estados de mar promediados cada 3 horas que incluye, entre otros parámetros de resumen, altura significativa H_s , periodo peak T_p y dirección peak D_p , siendo de relevancia para describir dicha forzante. Los resultados se presentan en el numeral 6.1.1.3.

5.1.1.4. VIENTO

La información de magnitud y dirección del viento estaba disponible para uso, por lo que no fue necesario algún procedimiento adicional para ello.

Los resultados se presentan en el numeral 6.1.1.4, donde es posible apreciar las variaciones producidas entre verano e invierno para la ventana de tiempo registrada por *Datos ADCP1*.

5.1.2 REGISTROS DE DATOS HISTÓRICOS

La información de mareas, oleaje, temperatura y vientos recopilada desde distintas fuentes (*Datos Marea, Datos Oleaje, Datos Temperatura y Datos Viento*) es descrita a continuación.

5.1.2.1. MAREA

Para efectos de la presente memoria sólo se evaluó la marea astronómica, considerando su relevancia como forzante en el ascenso y descenso del nivel del mar, debido al notorio predominio de los movimientos de los astros Luna y Sol sobre la Tierra (SHOA, 1999). Se calcularon los valores no armónicos de *Datos Marea* propuestos en la Publicación N° 3202 por SHOA (1999), siendo necesario un registro horario de a lo menos 30 días consecutivos. Los registros comprendieron los periodos de tiempo mostrados en la Tabla 4.2 disponibles en el archivo *Datos ADCP1*.

Los registros fueron ordenados desde 0 a 23 horas de forma continua (SHOA, 1999) y luego se calcularon los diferentes planos de la marea descritos en dicha publicación respecto del nivel de referencia al NRS. Los resultados se presentan en el numeral 6.1.2.1.

5.1.2.2. OLEAJE

La información contenida en *Datos Oleaje* corresponde a espectros bidimensiolanes, $S_0(f, \theta)$, en aguas profundas para un total de 29 frecuencias y 24 direcciones con una extensión de

38 años. Se determinaron los parámetros de resumen (altura signifiativa, dirección peak y periodo peak) en aguas profundas de acuerdo a las ecuaciones presentadas en el numeral 3.4.2.

Dichos parámetros han sido utilizados para describir el clima de oleaje operacional de la zona, a través de diagrama de rosas, curvas de excedencia y tablas de incidencia, las que se publican en el numeral 6.1.2.2. Esta caracterización se realizó con el propósito de obtener forzantes para el modelo numérico, así como también, los antecedentes necesarios para la calibración del módulo de propagación de oleaje, según se describe en la metodología (5.3.1). Las funciones de transferencia se presentan en el Anexo (D).

5.1.2.3. TEMPERATURA

La información de temperatura (*Datos Temperatura*) tiene por objetivo la construcción de CB y CI utilizadas como forzante dentro del modelo hidrodinámico. El modelo HYCOM proporciona datos de temperatura en gran parte del dominio numérico y a profundidades de 5000 [m], como muestra la Figura 5.2, nodos que han sido interpolados con el propósito de abarcar todo el mallado horizontal y vertical en la construcción de la CI. Además, aquellos puntos demarcados en el rectángulo negro, en el borde oceánico son utilizados en la construcción de la CB.

Figura 5.2: Ubicación geográfica de puntos con información de temperatura desde modelo HYCOM, dentro del dominio numérico utilizados para generar la condición inicial del modelo hidrodinámico, en coordenadas UTM en metros, Dátum WSG 1984, Huso 19k.



Fuente: Elaboración propia

5.1.2.4. VIENTO

Se contó con 37 años de mediciones y se utilizan para caracterizar el clima de vientos operacional de la zona mediante diagrama de rosas, tablas de incidencia y curvas de excedencia, incluidos en el numeral 6.1.2.3. La caracterización de esta variable se realizó con el propósito de obtener forzantes para el modelo numérico, así como también, los antecedentes necesarios para la calibración del módulo hidrodinámico.

5.2 CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR MODELACIÓN NUMÉRICA HIDRODINÁMICA

Se presenta el proceso de obtener el dominio numérico y sobre el cual se realizará la calibración y validación del modelo de propagación de oleaje e hidrodinámico.

5.2.1 DOMINIO NUMÉRICO

En esta sección se ahonda en la obtención del mallado numérico que permitió modelar la surgencia para el caso ideal (en adelante Canal) y el caso real (en adelante Bahía), tal como será presentado en el numeral 5.4. Se crearon dos dominios numéricos, el primero orientado a verificar si el modelo numérico reproducía de manera adecuada el proceso de surgencia en un Canal mientras que el segundo fue determinado para simular la Bahía.

5.2.1.1. CASO IDEAL

Para la malla del canal, se consideró una longitud de 300 [m] y una profundidad constante de 100 [m] dentro de la Bahía, pues este caso es una representación a menor escala de ésta. Con respecto al dominio vertical, se determinaron 10 capas equidistantes, que permitieron representar los perfiles de temperatura utilizados como forzantes en el modelo hidrodinámico. La malla de la Figura 5.3 contiene 183 nodos y 308 elementos, lo que permite reducir el costo computacional sin perder información necesaria para describir el proceso de surgencia. La Figura 5.3c ilustra las capas equidistante del dominio vertical equivalente al tramo C^1D^2 .

 $^{^1\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 320000.00 m E, 7480060.00 m S

 $^{^2\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 320300.00 m E, 7480060.00 m S

Figura 5.3: Malla 3D para el caso ideal utilizada en el modelo hidrodinámico. Vista en planta de (a) malla triangular no estructurada, donde es posible advertir los bordes oceánicos, que serán forzados, en color azul (S), verde (N) y rojo (W), y (b) batimetría final con profundidad constante. Vista del perfil de profundidades de (c) malla estructurada para el tramo CB demarcado en (b). Coordenadas UTM en metros, Huso 19K.



(a)



(c) Fuente: Elaboración propia

5.2.1.2. CASO REAL

La confección de la malla batimétrica, utilizando las cartas náuticas digitales del SHOA (2015) de la Tabla 4.3, estuvo compuesta por dos etapas. Primero se realizó una limpieza de las cartas náuticas en el software Global Mapper, individualizando veriles, sondajes y la línea de costa que posteriormente fueron exportados al software SMS para confeccionar una malla triangular no estructurada. Mayores antecendentes sobre la generación de la malla batimétrica se presentan en el Anexo (A.1).

La línea de costa consideró como límite sur parte de la Península de Angamos, y al norte por punta sin identificar (Figura 4.1), dado que estos límites, y en particular el del sur, tienen gran influencia en la hidrodinámica de la Bahía (Letelier et al., 2012).

A partir de la caracterización de *Datos Oleaje* fue posible advertir el mayor periodo peak Tp = 24[s] conllevando que a partir de 500 [m] de profundidad dicho estado de mar se encuentra en aguas profundas. Por ello, el borde oceánico se localizó a profundidades mayores a 500 [m] de manera que la propagación hacia la costa fue desde aguas profundas.

La malla vertical se configuró dentro del módulo hidrodinámico de MIKE 3 Flow Model FM. La adecuada interpretación del dominio vertical permitió que el modelo sea capaz de representar las distintas forzantes que fueron ingresadas como CB y CI, según corresponda. Se consideró un tipo de malla estructurada en coordenadas sigma, con 15 capas de diferentes espesor, más finas en la superficie, permitiendo representar adecuadamente los perfiles de temperatura ingresados, y más gruesa tanto a mayor profundidad como a mayor distancia de la línea de costa.

De acuerdo con la Figura 5.4b, el perfil demarcado por el tramo A^3B^4 mostrado en el dominio vertical de la Figura 5.4c, fue usado para evaluar la surgencia que ocurre en A. Dado que el viento incidente desde S y SW representa el 79.96% de ocurrencia de acuerdo con el clima operacional peresentado en la Tabla 6.5, gran parte de la energía transferida al océano se propaga en la misma dirección hacia la costa, por lo que se ha decidido utilizar dicha transecta como representativa en la evaluación de surgencia.

El mallado contiene 1190 nodos y 2229 elementos, permitiendo llevar a cabo los propósitos del proyecto de título, teniendo en cuenta que ésta no consideró gran costo computacional. En la Figura 5.4 se aprecia el mallado final, el cual pasó por un proceso de estabilidad numérica descrito a continuación.

 $^{^3}$ Coordenadas geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 344000.00 m E, 7452000.00 m S 4 Coordenadas geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 365500.00 m E, 7475000.00 m S

Figura 5.4: Malla 3D para el caso real utilizada en el modelo de propagación de oleaje e hidrodinámico. Vista en planta de (a) malla triangular no estructurada, donde es posible advertir los bordes oceanicos, que fueron forzados, en color azul (N), verde (W) y rojo (S), y (b) batimetría final. Vista del perfil de profundidades de (c) malla estructurada para el tramo AB demarcado en (b). Coordenadas UTM en metros, Huso 19K.



Fuente: Elaboración propia

5.2.1.3. ESTABILIDAD NUMÉRICA

Luego de obtener la malla 3D del caso real, presentado en la Figura 5.4, fue necesario determinar si ésta era estable numéricamente. Para ello, se analizó el campo hidrodinámico de la Bahía generado por la forzante marea, utilizando como condición de borde una onda armónica sinusoidal, η , de la forma:

$$\eta = A * \cos\left(\frac{2\pi}{T} + \phi\right) \tag{5.1}$$

adoptando una amplitud de onda A = 0.5 [m], periodo T = 12 [hr] y un ángulo de desfase $\phi = \pi/4$. La estabilidad numérica de la malla fue analizada para seis puntos de control dentro de la Bahía presentados en la Figura 5.5.

Dicho procedimiento fue primordial para llevar a cabo la etapa de calibración, validación y explotación de los modelos numéricos, ya que el comportamiento hidrodinámico de la Bahía fue capaz de representar el flujo y reflujo de la marea además de determinar el tiempo que tardó en converger. Los resultados se presentan en el numeral 6.2.1.1.

Figura 5.5: Puntos de control dentro del dominio para analizar estabilidad numérica.



5.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

De acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 5.1, luego de lograr la estabilidad numérica del caso real de la Figura 5.4, se procedió a calibrar y validar los modelos MIKE 21 Spectral Waves FM y MIKE 3 Flow Model FM, es decir, del módulo de oleaje y del módulo hidrodinámico, respectivamente. Es necesario explicar dos actividades para evaluar la calibración y validación del caso real:

- Construir una condición de borde con *Datos ADCP1* para calibrar el modelo de oleaje, permitiendo utilizar los tensores de radiación resultantes como forzante al modelo hidrodinámico en conjunto con la marea y viento. Esta tarea tuvo como finalidad replicar las corrientes registradas por el ADCP mediante los modelos ya mencionados. Mayores detalles de la metodología empleada en los modelos de oleaje e hidrodinámico a partir de *Datos ADCP1* y *Data Viento* se visualizan en el numeral 5.3.1.1 y numeral 5.3.2.1, respectivamente.
- Construir una condición de borde con *Datos Oleaje* para el modelo de propagación de oleaje, entregando como resultado los tensores de radiación en todo el dominio horizontal, para luego ser utilizados para forzar el modelo hidrodinamico junto con la condición de borde de *Datos Marea* y *Datos Viento*. Las corrientes entregadas por este último modelo son comparadas con las registradas por *Datos ADCP1*. Mayores detalles de la metodología empleada en la representación de la propagación de oleaje y de la hidrodinámica a partir de registros históricos se visualizan en el numeral 5.3.1.2 y numeral 5.3.2.2, respectivamente. La Tabla 5.1 y Figura 5.6 resumen lo anteriormente descrito.

Tabla 5.1: Set de datos utilizados en el modelo de propagación de oleaje e hidrodinamico a partir de registros históricos, en el proceso de calibración y validación.

Forzante	Modelo	Módulo	Resultado	Comparación	
Datos Oleaje	MIKE 91 FM	Propagación	Oleaje	Datos ADCP1	
Datos Oleaje		de oleaje	Oleaje	Datos ADCP2	
Tensores de			Corriente		
radiación	MIKE 3 FM	Hidrodinámico	Corriente	Dates ADCP1	
Datos Marea	ea MIRE 5 FW HIGOMIA		Maroa	Datos ADOI I	
Datos Viento			Marea		

Fuente: Elaboración propia

5.3.1 MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Para llevar a cabo dicha tarea, se dispuso de las variables oceanográficas contenidas en *Datos Oleaje*, *Datos ADCP1* y *Datos ADCP2*. La ubicación geográfica desde donde se obtuvo dicha información se presentó en la Figura 4.2.

Figura 5.6: Metodología utilizada para obtener el dominio numérico y luego realizar el proceso de calibración y validación a través del modelo de propagación de oleaje e hidrodinamico a partir de registros históricos.



Fuente: Elaboración propia

5.3.1.1. PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP

Se construyó una condición de borde con la información *Datos ADCP1* que fue forzada en el modelo de propagación de oleaje, cuyos resultados han sido contrastados con dicha condición, obteniendo coeficientes de transferencia de altura y dirección de la ola. A partir del oleaje propagado se construyó una nueva condición de borde, que tuvo como finalidad ajustar los nuevos parámetros en base a la pérdida o ganancia de energía evidenciada en los coeficientes de transferencia K_a y Δ_D .

Los tensores de radiación entregados por el modelo de oleaje en conjunto con la marea y el viento han sido utilizados como forzamiento del modelo hidrodinámico para determinar el comportamiento de las corrientes, resolviendo que la configuración de los modelos numéricos permitió representar los órdenes de magnitud registrados por *Datos ADCP1*. En el numeral 6.3.1.1 es posible visualizar los resultados de la propagación de oleaje a partir de registros de *Datos ADCP1*.

5.3.1.2. PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRICOS

Se realizó una transferencia espectral de la totalidad de la energía contenida en los espectros *Datos Oleaje*, a los sitios de interés $P1^5(ADCP1)$ y $P2^6(ADCP2)$. Para ello, se

 $^{^5\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 359097 m E, 7449576 m S

 $^{^6\}mathrm{Coordenadas}$ geográficas en UTM, Dátum WGS 1984: 354066 m E, 7447111 m S

propagaron $H_{m_0} = 1[m]$, mientras D_{p_0} y T_{p_0} comprendieron marcas de clases discretizadas cada 15 [°] y 2 [s], para rangos 195 - 360 [°] y 6 - 24 [s], respectivamente. La propagación de alturas unitarias permitió obtener los coeficientes de altura, K_a , y dirección, K_d , experimentados por el espectro de energía del oleaje desde aguas profundas, $S_0(f,\theta)$, hacia someras, $S_p(f,\theta)$, denominados en su conjunto como funciones de transferencia (presentadas en el Anexo D).

Este método de propagación de oleaje corresponde a una descripción lagrangiana del fenómeno, en tanto que el modelo requiere de una representación euleriana dentro del dominio numérico. Para lo cual, se propagaron los parámetros de resumen en aguas profundas, contenidos en el espectro de energía, $S_0(f, \theta)$.

5.3.1.3. CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Para lograr la calibración y validación, fue necesario un proceso iterativo que permitió modificar los parámetros del modelo con la finalidad de obtener resultados concordante entre las mediciones y la modelación numérica. Por ello, la configuración utilizada para el proceso es detallado en la Tabla 5.2.

Sección	Parámetro	Valor			
	Spectra Formulation	Directionally decoupled			
Basic Equations		parametric formulation			
	Time formulation	Quasi stationary formulation			
	Geographical space	Low order fast algorithm			
	discretization	Low order, last algorithm			
Solution Technique	Method	Newton-Raphson iteration			
Solution rechnique	Max. number of iterations	500			
	Tolerance	0.001			
	Relaxation factor	0.1			
Diffraction	Smoothing factor	1			
Wave Breaking	Type of gamma	0.8			
Bottom Friction	Nikuradse roughness, kn	0.04 [m]			
Initial Conditions	Zero Spectra	_			
Boundary Conditions	Wayog paramotorg	Variando en el tiempo,			
Doundary Conditions	waves parameters	constante en todo el borde			

Tabla 5.2: Parámetros utilizados en el modelo MIKE 21 Spectral Waves FM.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.4. POST-PROCESO

Los resultados proporcionados por el modelo entregó los parámetros de resumen H_s , T_p y D_p transferidos a los puntos P1 y P2. Cuyos valores permitieron determinar las funciones de transferencia: coeficiente de agitación, K_a y de dirección, K_d .

Posteriormente fue posible calcular la transferencia espectral propuesta en la ecuación (3.44), siendo necesario transferir el espectro de aguas profundas $S_0(f, \theta)$ a aguas someras

de acuerdo a K_a y $d\theta_0/d\theta$, considerando que tanto el espectro como los coeficientes presentaron distintas discretizaciones de frecuencias y direcciones. Se implementaron rutinas en MatLab que hicieron posible la extrapolación e interpolación entre ambos rangos para obtener $S_p(f,\theta)$ y calcular los parámetros de resumen en los puntos correspondientes a P1 y P2 de acuerdo con las formulaciones presentadas en el numeral 3.4.2.

5.3.2 MODELO HIDRODINÁMICO

Contando con la configuración del modelo de propagación de oleaje, fue posible proseguir con el módulo hidrodinámico, presentado a continuación.

5.3.2.1. HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP

Los tensores de radiación que resultaron desde la propagación de oleaje se usaron para forzar el modelo hidrodinámico, además de incluir marea y viento *Datos ADCP1* y *Data Viento*, respectivamente.

Los resultados de la circulación en la Bahía se presentaron en el numeral 6.3.2.1.

5.3.2.2. HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRICOS

De acuerdo a lo indicado en el numeral 5.3.1.2, luego de transferir *Datos Oleaje* desde aguas profundas hacia someras, mediante propagación espectral, fue necesario obtener los tensores de radiación, de acuerdo con el ultimo párrafo redactado en dicho numeral, y que en conjunto con las forzantes *Datos Marea* y *Datos Viento* se modeló la hidrodinámica de la Bahía.

Es posible visualizar los resultados de la circulación en la Bahía son presentados en el numeral 6.3.2.2.

5.3.2.3. CONFIGURACIÓN DEL MODELO

De acuerdo con la caracterización de la hidrodinámica en la Bahía, fue necesario un proceso iterativo que permitió obtener buenos resultados para posteriormente compararlos con *Datos ADCP1*. Para ello, la configuración que presentó un mejor ajuste de los datos se presenta en la Tabla 5.3. Cabe destacar que la forzante viento presentaba las mayores fluctuaciones en la circulación, por lo que la fricción de ésta fue sometida a una serie de pruebas que permitió obtener el mejor parámetro.

5.3.2.4. POST-PROCESO

De acuerdo a las Cartas Náuticas, la profundidad existente donde se ubica el ADCP1 es de 13.6 [m], por lo tanto, para realizar la comparación de estos registros con los proporcionados por el modelo hidrodinámico, se analizaron tres capas características de la columna de

Sección	Parámetro	Valor			
	Time integration	Low order, fast algorithm			
Solution Technique	Space discretization	Low order, fast algorithm			
Solution rechnique	Minimun time step	$0.01 \ [s]$			
	Maximun time	600 [s]			
	Critical CFL number	0.8			
	Horizontal Eddy Viscosity	0.28			
Eddy Viscosity	Smagorinsky formulation	0.28			
Eddy Viscosity	Vertictal Eddy Viscosity	$1.8e_{-0.06} = 0.4 [m_{2}/s]$			
	Log Law formulation	1.00-000 - 0.4 [m2/3]			
Bed resistence	Roughness height	0.01 [m]			
Wind Forcing	Constant	0.0007			
Wave Radiation	Varying in time and	Resultados modelo de			
wave manation	domain	propagación de oleaje			
		De acuerdo con el valor			
Initial Conditions	Surface elevation	inicial de la Condición de			
		Borde			
Boundary Conditions	Specified level	Varying in time, constante			
Doundary Conditions	Specified level	along boundary			

Tabla 5.3: Parámetros utilizados en el modelo MIKE 3 Flow Model FM.

Fuente: Elaboración propia

agua: superficial, intermedia y de fondo. Cada capa se ubicó a la profundidad especificada en el numeral 5.1.1.1.

5.4 EXPLOTACIÓN DEL MODELO

Luego de comparar y validar tanto el modelo de propagación de oleaje como el hidrodinámico, se procedió a la explotación de éstos. A continuación, se presentan las forzantes utilizadas en el Canal y la Bahía a través de los dominios numéricos presentados en la Figura 5.3 y Figura 5.4 donde es posible advertir 26 y 58 casos, respectivamente. Además, el perfil de temperatura se definió con el valor del estrato superior (T1) e inferior (T2) y la estratificación (E) y también los parámetros de las distintas forzante utilizadas dependiendo del caso. Con respecto al caso ideal, las forzantes fueron temperatura y viento consideradas relevantes en la generación de surgencia, mientras que para el caso real, adicionalmente se incorporaron las forzantes marea y oleaje, ya que junto a las ya mencionadas generan el campo hidrodinamico de la Bahía. Las metodologías seguidas tanto para el caso ideal como real, se presenta en la Figura 5.8 y Figura 5.7, respectivamente.

5.4.1 FORZANTES EXTERNAS

En el presente apartado se detallan aquellos parámetros concernientes a marea, oleaje, temperatura y viento considerados en la modelación hidrodinámica, cuyos lineamientos

surgen a partir de resultados de la caracterización preliminar presentados en la sección 6.1.

5.4.1.1. MAREA

De acuerdo con el análisis no armónico efectuado a *Datos Marea*, cuyos planos de referencia se presentan en el numeral 6.1.2.1, se estimó un valor del nivel medio del mar (NMM) igual a 0.66 [m] como representativo de verano e invierno de 2016, cuyos valores fueron 0.68 [m] y 0.65 [m], respectivamente.

Dicho NMM fue utilizado como forzante de los modelos presentados en la Figura 5.7, en especial de los casos B57 y B58, pues el registro histórico no disponía de información anterior al año 2013. Además, la Publicación N° 3202 del SHOA define un NMM 0.686 [m] equivalente a noviembre de 1997 (SHOA, 1999), muy similar al promediado entre las campañas mencionadas, justificando su utilización como forzante de marea.

Adicionalmente, la Figura 6.38 muestra el comportamiento de las corrientes de la campaña de invierno 2016, utilizando la forzante constante y variable, de la cual es posible concluir que la marea variable en el tiempo proporcionó un flujo y reflujo entregando mayores de las velocidades de la corriente, factor a considerar al momento de evaluar El Niño y La Niña.

5.4.1.2. TEMPERATURA

En la malla ideal, el modelo C26 se utilizó para contrastar el cálculo teórico de la pendiente al momento de ocurrir surgencia en el canal. Los modelos C(1:24), tuvieron por objetivo evaluar el comportamiento hidrodinámico para profundidades de h_1 25, 50 y 75 [m], mientras los valores de temperatura correspondieron a aquellos determinados por estudios de Marín et al. (2003). En la Tabla 5.4 se presenta un resumen de los casos, indicando velocidad del viento, profundidad y temperatura del estrato h1 y h2.

En los modelos B1 y B2, se definieron los perfiles de temperatura a partir de estudios realizados por Baharona y Gallegos (2000), Marín et al. (1993) y Glantz (2000), donde estipularon la variación de TSM, el comportamiento de la termoclina asociada a El Niño y La Niña. Considerando que ambos extremos representan la fase cálida y fría del fenómeno ENOS, se determinó entre ambos casos una diferencia de 1 [°C] para los perfiles verticales, por lo que para la capa superior e inferior se definieron temperaturas de 13 [°C] - 9 [°C] y 14 [°C] - 10 [°C] mientras que la profundización de la termoclina fue 15 [m] y 50 [m] para La Niña y El Niño, respectivamente (Figura 5.7 y Tabla 5.5).

En los modelos B(3:20) se usaron perfiles verticales de temperatura idealizados de verano, cuyos valores obtenidos desde HYCOM para un año neutro, fueron, para la capa superficial e inferior de 19 [°C] y 12 [°C], respectivamente, y la profundización de la termoclina alcanzó 16 [m]. De acuerdo con estudios realizados por UCN (2016) y Letelier et al. (2012), se desarrolló una fase neutra en el año 2013, por lo tanto se escogió el mes de enero para determinar dicho perfil.

En cuanto a los perfiles de temperatura idealizados de invierno para los modelos B(39:56), se escogió del mismo año 2013 el mes de julio para obtener el perfil vertical desde HYCOM,

del cual se determinó un promedio para el estrato superior e inferior de 16 [°C] - 12 [°C], respectivamente, y la profundización de la termoclina a 34 [m].

Para los modelos B(21:38), que representan un caso medio entre verano e invierno de los anteriormente descritos, se obtuvo un promedio entre ambos con temperatura para la capa superior e inferior de 18 [°C] y 12 [°C], respectivamente, y una termoclina a 25 [m] de profundidad.

Por último, los casos B57 y B58 correspondieron a la modelación de un evento La Niña para noviembre de 1998 y El Niño para noviembre de 1997, respectivamente (Bello et al., 1997) y (OMM, 2014). El perfil de temperatura se obtuvo desde HYCOM de acuerdo a los periodos mencionados. En la Tabla 5.5 se presenta un resumen de los casos evaluados, con su respectivo estrato, temperatura, dirección y velocidad del viento, profundidad y temperatura del estrato h_1 y h_2 . Cabe destacar que por simplicidad, sólo se resumieron los casos asociados a verano de B(1:20), omitiendo B(21:38) y B(39:56).

Tabla 5.4: Descripción de casos, velocidad del viento, profundidad de cada estrato y perfil de temperatura, para Canal.

Casa	Viento	Estra	to [m]	Temperatura [°C]		
Caso	[m/s]	h1	h2	h1	h2	
C1		25	75	14	10	
C2	2	50	50	14	10	
C3		75	25	14	10	
C4		25	75	14	10	
C5	4	50	50	14	10	
C6		75	25	14	10	
C7		25	75	14	10	
C8	6	50	50	14	10	
C9	-	75	25	14	10	
C10		25	75	14	10	
C11	8	50	50	14	10	
C12		75	25	14	10	
C13		25	75	14	10	
C14	10	50	50	14	10	
C15	_	75	25	14	10	
C16		25	75	14	10	
C17	12	50	50	14	10	
C18		75	25	14	10	
C19		25	75	14	10	
C20	14	50	50	14	10	
C21	_	75	25	14	10	
C22		25	75	14	10	
C23	16	50	50	14	10	
C24		75	25	14	10	
C25	5	15	85	13	9	
C26	5	50	50	14	10	

Fuente: Elaboración propia.

Caro	Vi	ento	ito Estrato		Temperatura		Olea	ıje	
Caso	Vel	Dir	h1	h1	h2	Hs	Тр	Dp	
B1	5	225	15	13	9	2	13	225	
B2	5	225	50	14	10	2	13	225	
B3	2	202.5	16	19	12				
B4	4	202.5	16	19	12				
B5	6	202.5	16	19	12				
B6	8	202.5	16	19	12				
B7	10	202.5	16	19	12				
B8	12	202.5	16	19	12	Dramalia			
B9	2	225	16	19	12				
B10	4	225	16	19	12				
B11	6	225	16	19	12				
B12	8	225	16	19	12	110	medio	verano	
B13	10	225	16	19	12				
B14	12	225	16	19	12				
B15	2	247.5	16	19	12				
B16	4	247.5	16	19	12				
B17	6	247.5	16	19	12				
B18	8	247.5	16	19	12				
B19	10	247.5	16	19	12				
B20	12	247.5	16	19	12				
B57	Noviembre 1998								
B58			No	oviem	bre 1997				

Tabla 5.5: Descripción de casos, velocidad del viento, profundidad de cada estrato y perfil de temperatura, para Bahía.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.3. OLEAJE

Considerando el clima operacional en aguas profundas desarrollado con la información Datos Oleaje y que ha sido presentado en el numeral 6.1.2.2, B1 y B2 han sido forzados con una condición de borde estacionaria, construida a partir de parámetros de resumen seleccionados de las mayores frecuencias de ocurrencia, considerando $H_s = 2[m], T_p = 13[s]$ y $D_p = 225[^\circ]$, como se aprecia en la Tabla (6.2) y (6.3).

Respecto a los modelos B3:20, B21:38 y B39:56, la construcción de la condición de borde transiente, tuvo por objetivo evaluar el comportamiento de las estaciones estivales e invernales, considerando un promedio de los meses de verano (diciembre, enero y febrero) e invierno (mayo, junio y julio), mientras que para el caso base se utilizó un promedio de ambos.

Por último, los modelos B58 y B57 que representan un evento ENOS real, consideraron parámetros de resumen concernientes a noviembre de 1997 y 1998, respectivamente, en la condición de borde transiente.

5.4.1.4. VIENTO

De acuerdo al clima medio realizado con información *Datos Vientos* propuesto en el numeral 6.1.2.3 y considerando los casos a evaluar tanto para el Canal como la Bahía, las intensidades fueron escogidas de acuerdo a las marcas de clases presentadas en la Tabla 5.4 y Tabla 5.5. Se decidió modelar dichas marcas de clases que permitieron generar surgencia.

Considerando que el Canal es una extracto de la transecta AB de la Figura 5.11, se ha utilizado para los modelos C(1:26) dirección de incidencia 270 [°] asumiendo que representa un viento SW en el dominio de la Bahía. Marín et al. (1993) propone una intensidad superior a 5 [m/s] para que genere el momentum necesario que permita wind-setup de la superficie del agua y por ende, la ocurrencia de surgencia. Por ello, se utilizó dicho valor en el modelo C26 para el cálculo teórico de la pendiente propuesto por Niño (2013) en la sección 3.3.2.

Con respecto a los casos de Bahía, se analizó la dirección e intensidad propuesta por Mann y Lazier (2013) en los modelos B1 y B2 correspondientes a La Niña y El Niño idealizado. Los autores estimaron que los vientos generadores de surgencia provienen desde el tercer cuadrante durante todo el año. Por ello, se han utilizado dichos parámetros para los modelos B3:20, B21:38 y B39:56 respectivos de verano, caso base e invierno, con incidencias SW y $225[^{\circ}] \pm 22,5[^{\circ}]$. En relación con los modelos B57 y B58 respectivos de La Niña y El Niño, la construcción de la condición de borde de la presente forzante, se realizó directamente de los registros históricos para el mes de noviembre de los años correspondiente a cada fase de ENOS.



Figura 5.7: Metodología utilizada en la explotación de los modelos concernientes a la Bahía.

Fuente: Elaboración propia


Figura 5.8: Metodología utilizada en la explotación de los modelos concernientes al Canal.

Fuente: Elaboración propia

5.4.2 EVALUACIÓN DE SURGENCIA

La surgencia se evaluó para un caso real (Bahía); incluyendo forzantes como marea, oleaje, temperatura y viento, y para un caso ideal (Canal); forzado solamente con viento y temperatura. Las mallas numéricas de ambos casos se han presentado en el numeral 5.2.1.

5.4.2.1. CÁLCULO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO PARA UN CANAL RECTANGULAR

De acuerdo a lo descrito en la sección 3.3.2, para caracterizar surgencia, primero fue necesario la simulación hidrodinámica del canal representado por la Figura 3.3a. Se consideró como condición de borde e inicial actuando en el canal a la forzante temperatura, evaluando la estratificación del caso C26 de la Tabla 5.4. Adicionalmente, se consideró la forzante

viento constante en el espacio y tiempo, en dirección del eje x positivo, con una velocidad de 5 [m/s], apreciándose en la Figura 3.3a. La teoría propuesta por Niño (2013), permite calcular la pendiente de la interfaz de densidades, indicando la ocurrencia de surgencia en el Canal, tal como se presentó en la Figura 3.4b. Para ello, se requirió de las ecuaciones descritas en el numeral 3.3.2. Los valores de ρ_1 y ρ_2 fueron determinados a partir la simulación hidrodinámica de C26, como la densidad media de cada una de las capas involucradas. El cálculo de la pendiente a partir de C26 fue mediante la ecuación (3.17), denotando el subíndice 1 el extremo de la interfaz que interactúa con la superficie libre y 2 el extremo donde se profundiza la capa.

Adicionalmente, se utilizaron los resultados de siete experimentos propuestos por Monismith (1986) para corroborar lo desarrollado por la presente memoria. Monismith (1986) calculó el Número de Richardson con la ecuación (3.16) y entregó dos formulaciones para obtener la velocidad de entraiment u_e , ecuación (3.14), y una aproximación a dichos resultados, ecuación (3.15). Por lo tanto, concerniente a lo desarrollado por la presente memoria, se obtuvo Ri_o por medio de la ecuación (3.8), τ_s por medio de la ecuación (3.10) y u_* mediante la ecuación (3.9), cuyas formulaciones han sido propuestas por Niño (2013) y utilizadas para calcular u_e con las ecuaciones (3.15) y (3.14). Para llevar a cabo lo anteriormente mencionado, se utilizaron los modelos C1:24 (Figura 5.8) variando h_1 , h_2 y la velocidad del viento.

CONFIGURACIÓN DEL MODELO PARA EL CANAL

Los modelos C1:24 y C26 se han desarrollado mediante el módulo hidrodinámico, cuya configuración detallada en la Tabla 5.3 ha sufrido algunas modificaciones. No se consideró *Wave Radiation*, pues se prescinde del módulo de propagación de oleaje. La consideración de la forzante temperatura mediante las CB y CI, se realizó con la configuración de la Tabla 5.4. Para la difusión de dicha forzante se utilizó la formulación *scaled eddy viscosity formulation*. Un mayor detalle de la configuración del módulo de temperatura se detallada en la Tabla 5.6.

Sección	Parámetro	Valor	
Density	Function of temperature	Reference temperature: 8 [°C]	
	Equation	0 - 40 [°C]	
	Solution technique	Low order	
Temperature Module	Dispersion, Scaled eddy	Constant value: 1	
	viscosity formulation	Constant value. 1	
	Initial Conditions	Varying in domain	
	Boundary Conditions	Varying in time and along	
	Boundary Conditions	boundary	

Tabla 5.6: Parámetros utilizados en la configuración del módulo de temperatura para el Canal.

Fuente: Elaboración propia

La CI se definió como variable en el espacio, mientras la CB varió en el tiempo y a lo largo de la línea, forzada desde el W (Figura 5.3a). En la Figura 5.9 es posible apreciar la CI de temperatura en el espacio x - z del modelo C26 descrito en la Tabla 5.4. El viento se propagó sobre todo el espacio x - y con dirección W.



Figura 5.9: Condición inicial de temperatura en el dominio x - z del modelo C26.

POST-PROCESO

Una vez obtenidos los resultados de los modelos C1:24 y C26, la surgencia se determinó para la transecta longitudinal CD de la Figura 5.3. Se consideró que el afloramiento se produjo en aquel momento que la interfaz de densidad (color rojo) en x = 0 interactuó con la superficie libre y luego de esto, ocurrió la mezcla total del canal.

5.4.2.2. RESPUESTA DE LA BAHÍA A LA ACCIÓN DEL VIENTO

Para evaluar el comportamiento generado por acción del viento en la Bahía, se realizó un análisis de sensibilidad de la velocidad y dirección de acuerdo al clima operacional del numeral 6.1.2.3. En cuanto a la dirección, se evaluaron tres escenarios, considerando que la incidencia ocurre desde el tercer cuadrante (Marín et al., 1993), se evaluó SW además de sus desfases en $\pm 22,5[^{\circ}]$. De acuerdo a la intensidad, se escogieron las clases representativas del clima operacional:

- Dirección [°] : 202.5 225 247.5
- Velocidad [m/s] : 2 4 6 8 10 12 14

Los modelos utilizados en el análisis de sensibilidad corresponden a verano B3:20, base B21:38 e invierno B39:56, cuyas forzantes han sido descritas en el numeral 5.4.1 y de los cuales se ha usado un año neutro (2013) que permitió extraer la información necesaria para construir los perfiles de temperatura.

CONFIGURACIÓN DEL MODELO PARA LA BAHÍA

De acuerdo a los procesos de calibración y validación del modelo de propagación de oleaje y el hidrodinámico, la configuración adoptada para evaluar la acción del viento en la Bahía, se ha presentado en la Tabla 5.2 y Tabla 5.3, respectivamente. Cabe destacar

la incorporación del módulo de temperatura en el modelo hidrodinámico, definiendo la densidad en función de la temperatura y la formulación de dispersión horizontal y vertical de dicha variable como se indica en la Tabla 5.7. No fue posible considerar la misma formulación utilizada en el módulo de temperatura del Canal, pues las dimensiones y en específico la definición de la malla vertical al ser distinta en ambos, la configuración no proporcionó buenos resultados en la Bahía.

Sección	Parámetro	Valor		
Density	Function of temperature	Reference temperature: 8 [°C]		
	Equation	0 - 40 [°C]		
	Solution technique	Low order		
	Horizontal dispersion	Constant value: $0.01 \text{ [m}_2/\text{s]}$		
	coefficient formulation	Constant varue. 0.01 [III2/5]		
Temperature Module	Vertical dispersion	Constant value: $0.001 \text{ [m}_2/\text{s]}$		
	coefficient formulation	Constant value. 0.001 [m2/3]		
	Initial Conditions	Varying in domain		
	Boundary Conditions	Varying in time and along		
	Boundary Collutions	boundary		

Tabla 5.7: Parámetros utilizados en la evaluación de surgencia en la Bahía.

Fuente: Elaboración propia

Las forzantes se consideraron de acuerdo a la siguiente configuración:

Marea : Constante en el tiempo y a lo largo del borde.
Tensores de radiación : Variable en el espacio y tiempo.
Temperatura CB : Variable en el tiempo y a lo largo del borde.
Temperatura CI : Variable en el espacio.
Viento : Constante en el tiempo y espacio.

cuyas extensiones en el espacio y tiempo se describieron en el numeral 5.4.1. La CI de temperatura del modelo B3 quedó definida de acuerdo a la Figura 5.10. De la misma forma han sido recreados los perfiles de temperatura en los demás modelos involucrados en el análisis de sensibilidad.

POST-PROCESO

La surgencia fue analizada para la transecta AB mostrada en la Figura 5.11. Durante la simulación, se consideró que el afloramiento de agua fría ocurrió en aquel momento que la interfaz de densidad en x = 0 ascendió a la superficie.

5.4.2.3. RESPUESTA DE LA BAHÍA BAJO CONDICIONES EL NIÑO Y LA NIÑA

De acuerdo a los modelos descritos en la Tabla 5.5 y para fines de evaluar La Niña y El Niño, se consideraron B1, B2, B57 y B58, permitiendo representar el afloramiento de agua fría en Punta Angamos. Las variables oceanográficas consideradas fueron oleaje, viento, marea y temperatura como forzantes del modelo hidrodinámico.



Figura 5.10: Condición inicial de la simulación en la Bahía para la variable temperatura, para el caso B3.

Figura 5.11: Transecta AB del dominio Bahía considerada para evaluar surgencia.



Fuente: Elaboración propia

CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Para modelar ambas fases del ciclo ENOS, se requirió propagar oleaje y evaluar la hidrodinámica de la Bahía mediante las configuraciones proporcionadas por la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.7, respectivamente. La CB de oleaje se forzó desde N, W y S en el modelo de propagación de oleaje. De acuerdo al modelo hidrodinámico, la CB de marea y temperatura se forzaron desde W. El formato empleado en cada forzante se ha presentado a continuación:

- Marea : Constante en el tiempo y a lo largo del borde.
- Tensores de radiación : Variable en el espacio y tiempo.
- Temperatura CB : Variable en el tiempo y a lo largo del borde.
- Temperatura CI : Variable en el espacio.
- Viento : Variable en el tiempo, constante en el espacio.

POSTPROCESO

A través de los resultados se determinaron los eventos de surgencia generados en cada uno de los modelos, evaluando para la transecta AB su desarrollo espacial y temporal mediante fluctuaciones presentadas en la TSM y velocidad de la corriente.

6 RESULTADOS

Este capítulo se orienta a resolver los lineamientos presentados en la metodología, considerando la caracterización oceanográfica y meteorológica, la modelación numérica hidrodinámica y la explotación del modelo.

6.1 CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR OCEANOGRÁFI-CA Y METEOROLÓGICA

Los resultados de las metodologías presentadas en el numeral 5.1, se presentan en este apartado, tanto para los registros medidos por terceros, a través de ADCP, y aquellos proporcionados por datos históricos.

6.1.1 REGISTROS DE ADCP PROPORCIONADOS POR TERCE-ROS

Se desarrollaron histogramas, diagramas de rosas, tablas de incidencia, curvas de excedencia, series de tiempo de las variables proporcionadas por *Datos ADCP1* y *Data Viento*.

6.1.1.1. CORRIENTES

Mediante histograma de frecuencias se analizó el comportamiento de la intensidad y dirección de la presente variable, discretizada en marcas de clases cada 5 [cm/s] y 45 [°], respectivamente.

De acuerdo con la campaña estival, la Figura 6.1c de la corriente de la capa superficial, presentó una ocurrencia, 41.1 %, en el rango 5-10 [cm/s], mientras que un 33.8 % abarcó aquellas de 0-5 [cm/s]. Un 38.7 % de ocurrencias del flujo se dirigió hacia el SW, seguidamente con una misma frecuencia de 14.9 %, hacia S y W. En la capa intermedia de la Figura 6.1b, las corrientes presentaron una similar ocurrencia de 41.4 % y 40.4 % con velocidades de 0-5 [cm/s] y 5-10 [cm/s], respectivamente. En tanto, el comportamiento de las direcciones, indicó que el flujo se desplazó hacia el tercer cuadrante con una ocurrencia de 37.6 % y 17.4 % hacia S y SW, respectivamente.

Figura 6.1: Rosa de las corrientes de *Datos ADCP1* para la campaña de verano, correspondiente a la (a) capa de fondo, (b) intermedia y (c) superficial. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura (4.2).



57





En la capa de fondo de la Figura 6.2a se observaron velocidades con una mayor frecuencia de ocurrencia, 51.8 %, asociada a la clase 0-5 [cm/s], mientras que un 38.7 % comprendió intensidades 5-10 [cm/s]. Las corrientes observadas tendieron a fluir hacia el tercer cuadrante, con frecuencia de ocurrencias 26.5 % y 17.2 % hacia el SW y S, respectivamente. En la campaña de verano, las velocidades se intensificaron en la superficie debido a la energía transferida desde el viento hacia el océano, mientras que el flujo se desplazó hacia el tercer cuadrante con valores menores hacia el segundo, presentando un comportamiento homogéneo en toda la columna de agua.

En la campaña invernal, el comportamiento de la capa superficial presentado en la Figura 6.2c, indicó un predominio de velocidades agrupadas en el rango 0.5[cm/s] con un 51.8% de ocurrencia. El flujo se desplazó hacia el SW y S con una frecuencia de ocurrencia 26.5% y 17.2%, respectivamente. En la capa intermedia de la Figura 6.2b, las velocidades tendieron a agruparse en el rango 0-5 [cm/s] representado un 54.5% del total de registros, mientras las direcciones presentaron una tendencia marcada hacia SW con una ocurrencia de 29.4%. La Figura 6.2a, indicó que las velocidades se agruparon en torno a 0-5 [cm/s] con una ocurrencia 53.7%. Considerando el comportamiento de las direcciones, el flujo mostró una incidencia marcada hacia el tercer y cuarto cuadrante, específicamente W y SW con los respectivos porcentajes de ocurrencia 21.6% y 19.4%.

En la campaña de invierno, se observó en las capas superficial e intermedia un mayor flujo en comparación con verano. A pesar que el desplazamiento se dirigió hacia el SW, una menor frecuencia de flujo lo hizo hacia el NE - E. En tanto, la capa de fondo con menor influencia del viento presentó un menor rango de velocidades.

6.1.1.2. MAREA

De acuerdo a la metodología presentada en el numeral 5.1.1.2, los planos de referencia de la marea calculados mediante el análisis no armónico proporcionaron un NMM de 0.67 [m] y 0.61 [m] medido desde el NRS para el registros de verano e invierno, respectivamente. Un resumen de los planos de la marea se han definido en la Tabla (6.1). Las variaciones del nivel del mar fueron presentadas en las series temporales de la Figura 6.35.

	Datos Marea		Datos	ADCP1
Campaña	Verano	Invierno	Verano	Invierno
Nivel Medio del Mar	0.675	0.648	0.665	0.608
Nivel Medio de la Marea	0.673	0.649	0.667	0.610
Altura Media de la Pleamar	1.029	1.046	0.935	0.978
Altura Media de la Bajamar	0.311	0.252	0.395	0.230
Altura Media de la Pleamar mas Alta	1.165	1.205	1.019	1.142
Altura Media de la Bajamar mas Baja	0.251	0.201	0.377	0.186

Tabla 6.1: Planos de la marea referidos al NRS, correspondiente la campaña de verano e invierno de *Datos Marea* y *Datos ADCP1*.

Fuente: Elaboración propia

6.1.1.3. OLEAJE

Con respecto a la información de *Datos ADCP1*, la campaña de verano registró altura significativa agrupada en los rangos 0.2-0.4 [m] y 0.4-0.6 [m] con ocurrencias de 29.99 % y 31.13 %, respectivamente. El periodo peak presentó tendencias marcada en torno a 10-14 [s] y 14-18 [s] con ocurrencias de 33.09 % y 48.28 %, respectivamente. La dirección peak incidió con una ocurrencia de 95.10 % desde NW.

Los registros de invierno, indicaron que las direcciones peak de incidencia se agruparon hacia NW y N con una ocurrencia de 86.91% y 12.36%, respectivamente. Los periodos peak, incidieron con una ocurrencia de 42.18% y 39.27% con rangos 14- 18 [s] y 10-14 [s], respectivamente. La altura significativa incidente en P1, tendió a agruparse en los rangos 0.2-0.4 [m] y 0.0 -0.2 [m] con una ocurrencia de 58.18% y 21.09%, respectivamente.

Cabe destacar, el comportamiento estival abarcó un mayor rango de ocurrencia en la altura significativa en comparación a inverno, incluso se registró un estado de mar $H_s = 1,6[m]$, $T_p = 18,6[s]$ y $D_p = 304[^\circ]$. Las series de tiempo de los registros de verano e invierno, han sido presentadas mediante sus parámetros de resumen (color azul) en la Figura 6.10 y Figura 6.11, respectivamente.

6.1.1.4. VIENTO

Con respecto a la información de Data Viento en la campaña de verano, las velocidades se agruparon dentro de las clases 0-2 [m/s] y 2-4 [m/s] con ocurrencias de 29.0 % y 33.7 %, respectivamente. Las direcciones incidieron desde SW y S presentando ocurrencias 23.2 % y 24.5 %, respectivamente, siendo posible visualizar dicha información en la Figura 6.3a. En invierno, las velocidades de la clase 2-4 [m/s] representaron el 47.8 % del registro y las direcciones incidieron desde N y SW con ocurrencias de 20.8 % y 22.4 %, respectivamente. Lo anterior se muestra en la Figura 6.3b. La rosa de los vientos indica que una mayor incidencia desde NE y NW es se asocia a invierno. Es posible advertir que los vientos provenientes desde E y W son reducidos por la Cordillera de la Costa y Punta Angamos, respectivamente.

Figura 6.3: Rosa de los vientos de *Data Viento* correspondiente a (a) la campaña de verano y (b) de invierno. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura 4.2.



Fuente: Elaboración propia

6.1.2 BASE DE DATOS DE REGISTROS HISTÓRICOS

Se desarrollaron histograma de frecuencias, diagramas de rosas, tablas de incidencia, curvas de excedencia, series de tiempo para determinar el comportamiento de las variables concernientes a *Datos Marea, Datos Oleaje* y *Datos Viento* en el lugar de estudio.

6.1.2.1. MAREA

Los planos de referencia de la marea calculados con información proporcionada de *Datos Marea*, permitió determinar el NMM medido desde el NRS, correspondiendo a 0.68 [m] y 0.65 [m] para verano e invierno. Estos valores son comparables al de NMM = 0,686 [m] proporcionado por el SHOA para el puerto de Antofagasta el mes de noviembre de 1997 (SHOA, 1999). Los planos de la marea para ambas campañas fueron descritos en la Tabla 6.1 y el comportamiento del nivel del mar se ha presentado en la Figura 6.4.

Figura 6.4: Comportamiento del nivel de mar de *Datos Marea* de la (a) campaña verano e (b) invierno.



Fuente: Elaboración propia

6.1.2.2. OLEAJE

Del registro Datos Oleaje fue posible determinar el clima de oleaje en aguas profundas. La rosa de la Figura 6.5 indica que el oleaje incide mayoritariamente de la dirección SW. La incidencia de los parámetros de resumen D_{p_0} y T_{p_0} presentada en la Tabla 6.2, indica una mayoritaria incidencia de oleaje desde el tercer cuadrante, representando un 95.57%. Con respecto a T_p predominaron aquellos entre 12 - 16 [s] con una frecuencia de 70.91%. El oleaje incidente SW de periodos 12-16 [s] representó un 69.03%. En cuando a la incidencia NW, agrupó periodos mayores a 12 [s]. De acuerdo a la incidencia entre D_p y H_s de la Tabla 6.3, se observaron variaciones de la altura agrupadas con mayor frecuencia en las clases 1-2 [m] y 2-3 [m] representado el 48.47% y 46.40%, mientras oleaje predominante incidió desde SW con un ocurrencia de 95.57%. En la Tabla 6.4, se observó que la mayor ocurrencia asociada a la clase 2-3 [m] que incidieron con un periodo 12-16 [s] presentaron una frecuencia de 35.77%. En vista de la incidencia predominante del oleaje desde el SW, se determinaron las curvas de excedencias relacionadas a H_{m_0} y T_{p_0} , indicando que el 75% de las olas incidió con 2.4 [m] y 14.7 [s], observándolo en la Figura 6.6a y Figura 6.6b, respectivamente.

Figura 6.5: Diagrama de rosa de Datos Oleaje.



Fuente: Elaboración propia

			Marca de clase Tp [s]								
	Dirección	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24	Total			
	\mathbf{S}	0.00%	0.18%	1.30%	1.31%	0.23%	0.00%	3.02%			
.	SW	0.01%	0.79%	16.22%	69.03%	9.42%	0.12%	95.57%			
	W	0.00%	0.00%	0.20%	0.14%	0.00%	0.00%	0.34%			
	NW	0.00%	0.00%	0.00%	0.43%	0.61%	0.03%	1.07%			
	Total	0.01%	0.96%	17.71%	70.91%	10.27%	0.14%	100.00%			

Tabla 6.2: Incidencia de *Datos Oleaje*, dirección peak v
s periodo peak en aguas profundas. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figur
a(4.2)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.3: Incidencia de *Datos Oleaje*, dirección peak y altura de ola en aguas profundas. La ubicación del instrumento de medición se observa en la Figura (4.2)

		Marca de clase Hs [m]							
Dirección [°]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	Total			
\mathbf{S}	0.04%	1.99%	0.94%	0.06%	0.00%	3.02%			
\mathbf{SW}	0.09%	45.30%	45.24%	4.81%	0.13%	95.57%			
W	0.00%	0.26%	0.08%	0.00%	0.00%	0.34%			
NW	0.00%	0.92%	0.14%	0.00%	0.00%	1.07%			
Total	0.13%	48.47%	46.40%	4.87%	0.13%	100.00%			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.4: Incidencia de *Datos Oleaje*, periodo peak y altura de ola.

		Marca de clase Tp [s]									
Hs [m]	0-4	4-8	8-12	12 - 16	16-20	20-24	Total				
0-1	0.01%	0.03%	0.03%	0.04%	0.01%	0.00%	0.12%				
1-2	0.00%	0.32%	11.50%	31.76%	4.38%	0.09%	48.06%				
2-3	0.00%	0.60%	5.64%	35.77%	4.70%	0.04%	46.75%				
3-4	0.00%	0.01%	0.43%	3.32%	1.17%	0.01%	4.94%				
4-5	0.00%	0.00%	0.01%	0.05%	0.07%	0.00%	0.13%				
Total	0.01%	0.96%	17.61%	70.95%	10.33%	0.14%	100.00%				

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.6: Curvas de excedencia de *Datos Oleaje*, (a) altura de ola y (b) periodo peak, proveniente de SW.

6.1.2.3. VIENTO

De acuerdo a la rosa de la Figura 6.7, las direcciones se agruparon mayoritariamente en el tercer cuadrante, debido a los límites impuestos al W con la Península y Punta Tetas y al E con la Cordillera de la Costa, quedando expuesta a los vientos provenientes de S y SW de acuerdo a la Figura 4.2. Las intensidades, tendieron a agruparse en las clases 2-4 [m/s], representando un 34.37 % de las ocurrencias. Los vientos predominantes desde el S y SW ocurrieron con una frecuencia de 61.42 % y 18.54 %, respectivamente, mientras un 19.97 % de vientos provenientes del S ocurrieron con una intensidad de 4-6 [m/s]. Dicha información ha sido descrita con mayor detalle en la Tabla 6.5. Considerando las curvas de excedencia de las direcciones predominante en la Figura 6.8, las intensidades 2.73 [m/s], 4.37 [m/s] y 6.13 [m/s] no excedieron el 25 %, 50 % y 75 % del total, respectivamente, del viento S, mientras los valores asociados a la dirección SW no excedieron 2.37 [m/s] 3.60 [m/s] y 5.23 [m/s] de los respectivos percentiles mencionados.

Tabla 6.5: Incidencia del viento Datos Viento, intensidad vs dirección en [%].

			Marc	a de cla	ase Inte	nsidad	[m/s]			
Dirección	0_2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-	12-	14-	16-	Total
Direction	0-2	2-4	4-0	0-0	0-10	12	14	16	18	IOtai
Ν	1.01	1.96	1.02	0.24	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	4.26
NE	0.97	0.96	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.17
E	1.86	1.29	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.27
SE	2.57	2.76	0.42	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.81
S	7.43	18.39	19.97	12.77	2.55	0.29	0.02	0.00	0.00	61.42
SW	3.00	7.02	5.04	2.72	0.68	0.09	0.01	0.00	0.00	18.54
W	1.17	1.07	0.25	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.56
NW	0.76	0.93	0.22	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.97
Total	18.77	34.37	27.25	15.89	3.30	0.39	0.03	0.01	0.00	100

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.7: Diagrama de rosa de Datos Viento.

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.8: Curvas de excedencia de Datos Viento para velocidad proveniente desde S y SW.



6.2 CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR MODELACIÓN NUMÉRICA HIDRODINÁMICA

De acuerdo a los lineamientos presentados en el numeral 5.2, en esta sección se indican los resultados referentes al dominio numérico, calibración, validación y explotación del modelo de propagación de oleaje e hidrodinámico.

6.2.1 DOMINIO NUMÉRICO

Se realizó una modelación hidrodinámica considerando como única forzante a la marea, lo que permitió evaluar la estabilidad numérica de la malla a través de la dirección y velocidad de las corrientes generadas por marea.

6.2.1.1. ESTABILIDAD NUMÉRICA

Considerando la marea descrita en el numeral 5.2.1.3 utilizada como forzante del modelo hidrodinámico, en la Figura 6.9 se presentaron las velocidades de la corriente para los seis puntos de control de la Figura 5.5, siendo posible advertir el ascenso y descenso en la intensidad a causa del flujo y reflujo producido por la marea. Además se indica en color negro, el tiempo de 3 días que demora el modelo en estabilizarse. Se observa que en los puntos P1 y P2 la velocidad de la corriente fue menor producto del abrigo brindado por Punta Angamos.

6.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Esta sección presenta los resultados de la metodología indicada en (5.3) acerca de la calibración y validación del modelo de propagación de oleaje e hidrodinámico, utilizando forzantes de oleaje, marea y viento.

6.3.1 MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

A continuación, se describen los resultados de la metodología del numeral 5.3.1 sobre la propagación de oleaje a partir de mediciones de $Datos \ ADCP1$ y aquella provista por la base de datos histórica $Datos \ Oleaje$.

6.3.1.1. PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP

De acuerdo con la metodología presentada en el numeral 5.3.1.1, luego de un proceso iterativo del modelo de propagación de oleaje se obtuvo una condición de borde, la cual



Figura 6.9: Estabilidad numérica de la batimetría real, mediante la velocidad de la corriente para los puntos de control (a) P1 y P2, (b) P3 y P4 y (c) P5 y P6.

(c) Fuente: Elaboración propia

permitió encontrar los coeficientes K_T y Δ_D representativos de los registros *Datos ADCP1*. En la Figura 6.10 y Figura 6.11 se graficaron los registros medidos por el ADCP1 (color azul) y la simulación (color cobre) de la campaña de verano e invierno, respectivamente.

Tabla 6.6: Coeficiente de correlación entre de propagación de oleaje mediante construcción de borde con *Datos ADCP1* y mediciones de campaña *Datos ADCP1*.

Campaña	Hs	Dp	Тр
Verano	0.998	0.971	0.996
Invierno	0.994	0.981	0.997

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los resultados obtenidos, cabe destacar la similitud de H_s y D_p , pues representan parámetros de resumen que ya experimentaron los procesos de difracción, asomeramiento y refracción debido al obstáculo de Punta Angamos. Ello permitió, de esta forma, obtener los tensores de radiación que posteriormente fueron utilizados para replicar la hidrodinámica registrada por *Datos ADCP1*. La comparación mediante coeficientes de correlación (R^2) de los parámetros de resumen se indica en la Tabla 6.6, advirtiendo el menor $R^2 = 0.971$ para la dirección peak y no representando adecuadamente aquellas mayores a 315 [°].

6.3.1.2. PROPAGACIÓN A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRICOS

De acuerdo al numeral 5.3.1.2, la propagación de oleaje con *Datos Oleaje* permitió comparar los parámetros de resumen en aguas someras con aquellos medidos por *Datos ADCP1*, mediante curvas de excedencia, gráfico dato a dato y cuantil - cuantil (Q-Q). Esto se presenta en la Figura 6.12a, Figura 6.13a y Figura 6.14a de H_s , D_p y T_p , respectivamente, para la campaña estival. Las comparaciones de H_s , T_p y D_p , presentaron un $R^2 = 0.979$, $R^2 = 0.997$ y $R^2 = 0.978$ respectivamente. La Figura 6.15a, Figura 6.16a y Figura 6.17a se visualizaron los parámetros de resumen H_s , D_p y T_p , para invierno, donde se observa un $R^2 = 0.995$, $R^2 = 0.656$ y $R^2 = 0.933$, respectivamente. Se utilizó una segunda campaña de verano registrada por *Datos ADCP2*, ubicada al interior de la Bahía como se indicó en la Figura 4.2, para determinar si existió un mejor comportamiento en cuanto al parámetro D_p .

Figura 6.10: Serie de tiempo de propagación de oleaje mediante construcción de borde con *Datos* ADCP1 (color rojo) y mediciones de campaña verano de *Datos ADCP1* (color azul) de (a) altura significativa, (b) dirección peak, y (c) periodo peak.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.11: Serie de tiempo de propagación de oleaje mediante construcción de borde con *Datos* ADCP1 (color rojo) y mediciones de campaña invierno de *Datos ADCP1* (color azul) de (a) altura significativa, (b) dirección peak, y (c) periodo peak.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.12: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), campaña verano 2016 para H_s a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.13: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), campaña verano 2016 para D_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.14: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), campaña verano 2016 para T_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.15: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), campaña invierno 2016 para H_s a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.16: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), campaña invierno 2016 para D_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.17: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), campaña invierno 2016 para T_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.18: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP2* (en azul), campaña verano 2016 para H_s a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.19: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP2* (en azul), campaña verano 2016 para D_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Figura 6.20: Propagación de oleaje a partir de registros históricos (en rojo) y registros de *Datos ADCP2* (en azul), campaña verano 2016 para T_p a través de (a) curvas de excedencia, (b) gráfico dato a dato y (c) gráfico Q-Q.



Observando los resultados presentados en la Figura 6.18a, Figura 6.19a y Figura 6.20a asociado a H_s , D_p y T_p , respectivamente, la anomalía del parámetro direccional persistió, por lo tanto las diferencias en lo simulado y medido fue asociado a que el modelo no ha sido capaz de representar totalmente la difracción provocada por Punta Angamos, considerando que el 95.57 % del oleaje incide desde SW.

Cabe destacar que el modelo *MIKE 21 Spectral Waves FM* resuelve la ecuación de conservación de acción del oleaje de tipo parabólica (3.37), que modela (y no resuelve) los términos asociados al cálculo de la difracción. En casos donde se desea estudiar la agitación portuaria, es necesario contar con un modelo del tipo elíptico o hiperbólico que represente de mejor manera la relación difracción - refracción en la zona de interés. Sin embargo, para el proceso de surgencia, la información que el oleaje proporciona no es tan relevante, por lo que se ha decidido seguir con estas pequeñas diferencias en la estimación del oleaje. De esta forma, se consideró utilizar medidas de tendencia central que permitieron una comparación del orden de magnitud de los parámetros de resumen entre *Datos ADCP1* y la simulación de *Datos Oleaje*. La desviación estándar (DE), media, mediana, moda, percentil 25 y 75 fueron resumidos en la Tabla 6.7, Tabla 6.8 y Tabla 6.9 para campaña de verano e invierno *Datos ADCP1* y verano *Datos ADCP2*, respectivamente, para los parámetros de resumen H_s , D_p y T_p .

Tabla 6.7: Medidas de tendencia central de parámetros de resumen entre propagación de oleaje a partir de registros históricos (simulado) y registros de *Datos ADCP1* (ADCP1), campaña verano.

Parámetro	Serie	DE	Media	Mediana	Moda	P25	P75
He [m]	ADCP1	0.20	0.49	0.48	0.24	0.32	0.63
	Simulado	0.26	0.57	0.54	0.21	0.36	0.76
Tro [d]	ADCP1	1.74	15.29	15.05	13.28	14.11	16.52
TD [2]	Simulado	2.07	15.46	14.88	12.02	13.61	16.62
Dn [º]	ADCP1	3.92	309.13	308.49	308.00	306.52	310.97
[Dh[]	Simulado	1.55	308.87	308.75	304.64	308.29	309.47

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.8: Medidas de tendencia central de parámetros de resumen entre propagación de oleaje a partir de registros históricos (simulado) y registros de *Datos ADCP1* (ADCP1), campaña invierno.

Parámetro	Serie	DE	Media	Mediana	Moda	P25	P75
He [m]	ADCP1	0.07	0.30	0.29	0.28	0.25	0.34
	Simulado	0.08	0.21	0.20	0.09	0.14	0.26
Tro [c]	ADCP1	2.49	13.85	13.68	15.10	12.07	15.18
	Simulado	2.86	15.23	15.40	8.37	13.28	17.50
Dn [º]	ADCP1	4.91	306.29	306.20	301.66	302.82	309.45
	Simulado	3.72	302.13	303.88	294.16	300.06	304.88

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Serie	SE	Media	Mediana	Moda	P25	P75
H _c [m]	ADCP2	0.06	0.34	0.33	0.29	0.29	0.38
	Simulado	0.06	0.30	0.29	0.19	0.26	0.34
Tro [a]	ADCP2	2.12	15.28	15.56	16.40	14.16	16.40
rb [s]	Simulado	1.94	14.92	14.49	12.13	13.43	16.03
Dn [0]	ADCP2	3.01	322.29	322.10	319.50	319.75	324.56
Db[]	Simulado	1.34	319.17	319.46	316.34	317.92	320.29

Tabla 6.9: Medidas de tendencia central de parámetros de resumen entre propagación de oleaje a partir de registros históricos (simulado) y registros de *Datos ADCP2* (ADCP2), campaña verano.

Fuente: Elaboración propia

6.3.2 MODELO HIDRODINÁMICO

Se analizaron los resultados de la metodología descrita en el numeral 5.3.2 sobre la simulación hidrodinámica a partir de registros de *Datos ADCP1* y *Data Viento* y aquella provista por bases de datos históricas *Datos Marea* y *Datos Viento*, además de los tensores de radiación como respuesta de la simulación de propagación de oleaje a partir de *Datos Oleaje*.

6.3.2.1. HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS DE ADCP

Para replicar las corrientes registradas por el ADCP, el modelo hidrodinámico se forzó con marea, viento y tensores de radiación resultantes del numeral 6.3.1.1. La velocidad de la corriente que surge de la modelación hidrodinámica a partir de información de Datos ADCP1 y Data Viento (en color cobre) y aquella registrada por Datos ADCP1 se presenta mediante serie temporal y gráfico Q-Q para la capa superficial, intermedia y de fondo en la Figura 6.23, Figura 6.22 y Figura 6.21, respectivamente, para la campaña de verano. La velocidad de la corriente superficial simulada fue bastante similar a la medida, registrando un valor medio de 7.46 [cm/s] y 7.41 [cm/s], respectivamente, considerando que el aporte de oleaje en la simulación tuvo una apropiada representación de acuerdo con la Figura 6.10. En la campaña de invierno, la simulación presentó un buen ajuste a las mediciones. En la capa superficial de la Figura 6.26, los valores medios de las corrientes fueron de 6.68 [cm/s] y 5.72 [cm/s], respectivamente, debido al mayor aporte de energía por parte de flujo y reflujo de las mareas asociada a la Figura 6.27b en color negro. La Tabla 6.10 y Tabla 6.11 muestra la comparación entre los registros y el modelo para las campañas de verano e invierno, respectivamente, permitiendo de esta manera conocer el comportamiento general de dicha variable.

Figura 6.21: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.22: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.23: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.





Fuente: Elaboración propia

Figura 6.24: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.25: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.26: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.





Fuente: Elaboración propia

Figura 6.27: Nivel del mar a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* y registrado por *Datos ADCP1* para campaña de (a) verano e (b) invierno 2016, respectivamente.



Para dar una mejor respuesta al menor rango de fluctuación en las velocidades de la corriente replicadas para la campaña de verano, y de acuerdo a las limitaciones de la información recopilada, se realizó una simulación de las forzantes por separado, constando de un modelo de marea (M), oleaje (O), viento (V) y las tres variables en conjunto (MVO). A partir de este análisis ilustrado en la Figura 6.28 y Tabla 6.12 se aprecia el pequeño aporte de la marea en la generación de corrientes. El viento, por su parte, es el principal forzante en la superficie, y a medida que la profundidad aumenta, disminuye su efecto producto de la fricción con el lecho marino.

Durante el verano se presenciaron eventos de marejadas, pudiendo aportan mayor energía en la generación de corrientes, pues así lo registró *Datos ADCP1*. En la Figura 6.10a se registraron magnitudes de H_s que superaron 1 [m] y valor medio de 0.5 [m], mientras invierno (Figura 6.11a) presentó estados de mar que excedieron 0.5 [m] y la media no superó 0.3 [m]. Estos eventos también se traducen en una alteración en el Nivel del Mar, como lo registró el ADCP (en color negro) y el mareógrafo de *Datos Marea* (en azul) de la Figura 6.35a y Figura 6.4a, respectivamente, donde no fue posible identificar la modulación típica del ciclo mareal, provocando que esta forzante entregara menor energía a las corrientes de flujo y reflujo (Figura 6.28). El viento, principal generador de marejadas, registró a través de *Data Viento* de la Figura ??, magnitudes de 6-8 [m/s] presentando

Tabla 6.10: Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016.

Capa	Serie [cm/s]	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	ADCP1	4.59	6.60	7.41	3.9	4.00	9.70
Supernetai	Simulado	4.10	6.54	7.46	8.00	4.10	9.80
Intermedia	ADCP1	4.06	5.60	6.45	3.80	3.50	8.50
Intermedia	Simulado	2.60	4.72	5.39	2.62	3.54	6.71
Fondo	ADCP1	3.38	4.80	5.43	3.00	3.00	7.10
Polido	Simulado	1.65	4.28	4.52	2.37	3.34	5.35

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.11: Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.

Capa	Serie [cm/s]	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	ADCP1	3.15	5.20	5.72	3.80	3.40	7.60
	Simulado	3.75	5.76	6.68	3.39	3.71	8.95
Intermedia	ADCP1	3.01	4.70	5.17	3.30	3.00	6.80
	Simulado	2.68	4.61	5.28	2.51	3.31	6.64
Fondo	ADCP1	2.94	4.70	5.10	3.00	2.90	6.90
	Simulado	1.62	3.54	3.85	2.19	2.70	4.66

Fuente: Elaboración propia

una ocurrencia de 8.2 [%]. Ello provocó que la velocidad de la corriente medida por *Datos ADCP1* experimentara mayores fluctuaciones en relación con invierno, de acuerdo con la Tabla 6.13 y Tabla 6.14, respectivamente. Para una mejor comprensión de la variable analizada, en el Anexo (B) se presentaron las componente ortogonales U y V de la velocidad de la corriente.

6.3.2.2. HIDRODINÁMICA A PARTIR DE REGISTROS HISTÓRICOS

En relación a la metodología presentada en el numeral 5.3.2.2, en el presente apartado se presenta la respuesta hidrodinámica de las forzantes *Datos Marea*, *Datos Viento* y *Datos Oleaje*. En la Figura 6.29, Figura 6.30 y Figura 6.31, se muestra la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica (en color cobre) y la registrada por *Datos ADCP1* (color azul) a través de series de tiempo y gráfico Q-Q, para la capa de fondo, intermedia y superficial, proporcionando un $R^2 = 0.996$, $R^2 = 0.997$ y $R^2 = 0.991$, respectivamente, en la campaña de verano. Con respecto a invierno, en la Figura 6.32, Figura 6.33 y Figura 6.34 se presentó la velocidad de la corriente como respuesta de la modelación hidrodinámica de registros históricos (color cobre) y la que fue medida por *Datos ADCP1* (color azul), para la capa de fondo, intermedia y superficial proporcionando un $R^2 = 0.998$, $R^2 = 0.999$ y $R^2 = 0.997$, respectivamente.

Para el periodo estival, las corrientes superficiales fueron subestimadas mientras que las capas intermedia y de fondo fueron sobrestimadas, hecho evidenciado en los gráficos Q-Q.

Figura 6.28: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1*, MVO (en amarillo), M (en cobre), O (en negro) y V (en azul) correspondiente a la capa (a) de fondo, (b) intermedia y (c) superficial de la campaña verano 2016.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.12: Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1*, MVO, M, O y V para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016. Valores en [cm/s]

Capa	Modelo	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	MVO	1.43	3.82	4.03	3.09	3.05	4.76
	М	0.70	1.10	1.23	0.36	0.73	1.59
	0	1.44	5.25	5.03	6.54	3.75	6.34
	V	2.54	5.86	6.08	4.52	3.95	8.02
Intermedia	MVO	1.11	3.53	3.64	3.29	2.84	4.34
	М	0.67	1.07	1.20	0.27	0.72	1.54
	0	1.32	4.83	4.57	2.53	3.39	5.76
	V	1.51	4.52	4.66	2.51	3.50	5.71
Fondo	MVO	0.98	3.32	3.38	1.98	2.68	4.05
	М	0.63	1.04	1.15	0.65	0.69	1.48
	0	1.18	4.27	4.05	2.11	2.98	5.12
	V	1.08	3.86	3.91	2.34	3.12	4.64

T		T1 '	/	•
н	uente:	Ela	boración	propia
-	crorroo.		ooracion	propro

Considerando que la representación de la surgencia en la Bahía ocurre a escala de 30 [hr] de acuerdo con Marín et al. (1993) y que la velocidad de la corriente evaluada cada 10 [min], se escogió una representación de dichas escalas de tiempo mediante las tendencias y valores medios de la magnitud de la corriente. Los estadísticos correspondientes a desviación estándar (DE), mediana, media, moda, percentil 25 (P25) y 75 (P75), se resumen en la Tabla 6.13 y Tabla 6.14 para la campaña verano e invierno, respectivamente. Adicionalmente se graficaron las componentes ortogonales U y V en el Anexo (C). Considerando los valores medios de ambas campañas, tanto para la capa superficial, intermedia y de fondo, es posible indicar que el modelo fue capaz de predecir el orden de magnitud (10^0) de la velocidad de la corriente, pero no así las fluctuaciones de la misma.

Figura 6.29: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.30: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.31: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.





Fuente: Elaboración propia

Figura 6.32: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.33: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.34: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos (en cobre) y registrada por *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.





Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.13: Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016.

Capa	Serie [cm/s]	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	ADCP1	4.72	6.40	7.40	5.00	4.00	9.90
	Simulado	2.31	4.06	4.70	1.97	3.06	5.84
Intermedia	ADCP1	4.09	5.80	6.61	4.20	3.60	8.80
	Simulado	1.54	3.44	3.76	1.32	2.71	4.41
Fondo	ADCP1	3.28	4.60	5.21	3.00	2.90	6.80
	Simulado	1.31	3.22	3.45	2.05	2.58	4.07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.14: Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.

Capa	Serie [cm/s]	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	ADCP1	3.15	5.20	5.72	3.80	3.40	7.60
Supernetai	Simulado	2.31	3.80	4.45	1.85	2.83	5.49
Intermedia	ADCP1	3.01	4.70	5.17	3.30	3.00	6.80
	Simulado	1.72	3.30	3.72	1.46	2.55	4.47
Fondo	ADCP1	2.94	4.70	5.10	3.00	2.90	6.90
	Simulado	1.46	3.04	3.37	1.81	2.37	4.03

Fuente: Elaboración propia

Para justificar el uso de un nivel del mar constante en la explotación del modelo de algunos casos, se utilizaron los resultados arrojados por el modelo hidrodinámico correspondiente a la campaña de invierno y se comparó con aquella simulación que surge de la utilización de los mismos registros pero con un nivel del mar constante de 0.6 [m], de forma de estimar la variación en la velocidad de la corriente. De la Figura 6.36, Figura 6.37 y Figura 6.38, es posible observar el comportamiento entre simular la hidrodinámica a partir de registros variables (oleaje y viento) mientras la marea varía (en color amarillo) y es constante (en negro). En la capa superficial se observó una diferencia de 0.52 [cm/s] a favor de una marea variable. Con respecto al comportamiento general de la columna de agua analizada, la simulación hidrodinámica forzada con una señal de marea presentó fluctuaciones propias de un fenómeno turbulento, como son las corrientes.
Figura 6.35: Nivel del mar a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrado por *Datos ADCP1* para campaña de (a) verano e (b) invierno 2016, respectivamente.



Tabla 6.15: Medidas de tendencia central de la velocidad de la corriente en [cm/s], a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (color negro) y variable (amarillo) para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.

Capa	Marea	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	Constante	1.89	3.45	3.93	1.61	2.57	4.99
	Variable	2.31	3.80	4.45	1.85	2.83	5.49
Intermedia	Constante	1.26	2.84	3.03	3.31	2.16	3.59
	Variable	1.72	3.30	3.72	1.46	2.55	4.47
Fondo	Constante	0.97	2.58	2.66	1.57	1.96	3.12
	Variable	1.46	3.04	3.37	1.81	2.37	4.03

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.36: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (en negro) y señal de marea (en amarillo), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.37: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (en negro) y señal de marea (en amarillo), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



Figura 6.38: Velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos con un nivel del mar constante (en negro) y señal de marea (en amarillo), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016, a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico Q-Q.



En resumen, la modelación de las corrientes generadas tanto por la individualización de las forzantes como en su conjunto (Figura 6.28), concluyó que el viento induce una mayor energía en comparación a la marea, oleaje y MVO, denominado así, como la forzante principal del campo hidrodinámico. La marea, al considerarse como una generadora secundaria de corrientes, se forzó con un valor constante, dada la poca diferencia en contraste al usar una señal de ésta, como muestran los resultados de la capa superficial (Figura 6.38). La modelación hidrodinámica replicada con registros históricos, subestimó las velocidades de las corrientes en toda la columna de agua de verano y gran parte de invierno, salvo en la capa superficial, que fue sobrestimada.

6.4 EXPLOTACIÓN DEL MODELO

De acuerdo a la metodología, a continuación se presentaron los resultados de los modelos hidrodinámicos considerando el caso real (Bahía) y el caso ideal (Canal).

6.4.1 EVALUACIÓN DE SURGENCIA

Las variables oceanográficas involucradas han sido descritas mediante tablas, gráficos y figuras como respuesta a la metodología presentada en el numeral 5.4.2 para los casos de un canal rectangular, para el caso de la Bahía a la acción del viento y bajo condiciones El Niño y La Niña.

6.4.1.1. CÁLCULO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO PARA UN CANAL RECTANGULAR

En esta sección se presentan los resultados del cálculo de la pendiente como respuesta del viento forzante, m_1 y por otra, el cálculo teórico de ésta, m_2 , al momento en que ocurrió surgencia en el canal con estratificación lineal de dos capas (Niño, 2013). En la Figura 6.39 es posible observar la surgencia generada en el canal para el caso C26 con una forzante de viento con velocidad 5 [m/s] y dirección 270 [°], implicando un tiempo de respuesta de 40 [hr]. El cálculo de la pendiente supone que el afloramiento está representado por la ecuación (3.17), con $m_1 = -0.257$. A partir del modelo C26 se obtuvieron los parámetros que permitieron estimar la densidad, velocidad de corte del viento, número de Richardson y que han sido resumidos en la Tabla 6.16. De acuerdo con la ecuación (3.7) se determinó la pendiente del estrato h_2 en el momento que emergió a la superficie libre dando como resultado $m_2 = -0.256$. Considerando un diferencial $\Delta m = 0.001$ entre ambas pendientes calculadas. De este modo se puede afirmar que el modelo hidrodinámico fue capaz de representar la surgencia en el Canal, mediante la implementación de las ecuaciones RANS que definen el movimiento del fluido, las mismas que fueron descritas por Niño (2013) para dar respuesta al fenómeno estudiado.



Figura 6.39: Surgencia generada en el Canal mediante modelación hidrodinámica del caso C26.

Tabla 6.16: Parámetros utilizados en la obtención de la pendiente teórica de la surgencia a partir de la modelación del caso C26, de acuerdo con Niño (2013).

Parámetro	Valor	Unidad
ρ_1	1024.2602	kgm^{-3}
ρ_2	1024.2608	kgm^{-3}
u_*	0.018	ms^{-1}
au	0.322	$kgm^{-1}s^{-2}$
C_d	0.004	
ρ_a	1.225	kgm^{-3}
U	5	ms^{-1}
g	9.82	ms^{-2}
h_1	50	m
L	300	m
Rio	3.910	
m	-0.256	

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

COMPARACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES

Los modelos fueron comparados con los experimentos desarrollados por Monismith (1986) que se presentan en la Tabla 6.17 indicando el número de experimento, número de Richardson, Ri, determinado con la ecuación (3.16), velocidad de entrainment y de corte del viento, u_e y u_* obtenidos a partir de la ecuación (3.14) y ecuación (3.15), respectivamente. La Tabla 6.18 muestra un resumen de los parámetros calculados a partir de los modelos C(1:24), de los cuales, la velocidad de entrainment, u_e , calculada a partir de la ecuación (3.15) y (3.14), respectivamente. El ploteo de los resultados se resumió en la Figura 6.40, la data en naranja y pendiente se calcularon mediante la ecuación (3.15) y (3.14), respectivamente, y los experimentos de Monismith (1986) se presentaron en color azul.

Tabla 6.17: Datos experimentales del número de Richardson y velocidad de entraiment normalizada por la velocidad de corte del viento desarrollados por Monismith (1986).

Experimento	Ri	u_e/u_*	u_e/u_*
1b	120	5.8e-04	6.3e-04
2	295	2.4e-04	3.6e-04
7	264	2.7e-04	2.6e-04
8	138	5.1e-04	4.0e-04
20	100	7.0e-04	9.9e-04
21	103	6.8e-04	7.1e-04
22	69	1.0e-03	7.2e-03

Fuente: Elaboración propia a partir de Monismith (1986).

A pesar de las distintas especificaciones tanto en las dimensiones del canal como en la magnitud de la velocidad del viento, entre los experimentos y la modelación hidrodinámica, ambos set de datos siguieron la misma tendencia de color negro (Figura 6.40). Los cálculos de R_{i_0} (en naranjo) son inferiores a los desarrollados por Monismith (1986) (en azul), cuyos órdenes de magnitud son 10⁰ y 10², respectivamente. La ecuación (3.8) implica que R_{i_0} depende del diferencial de densidad del estrato superior e inferior, cuyo valor en la Tabla 6.18 indica que Δ_{ρ} es del orden de magnitud 10⁻³. Estos resultados determinaron que las diferencias entre ρ_1 y ρ_2 fueron ínfimas, pues luego de ocurrir surgencia se presentó mezcla total en el canal, perdiendo la interfaz de densidades de ambos estratos.

6.4.1.2. RESPUESTA DE LA BAHÍA A LA ACCIÓN DEL VIENTO

De acuerdo con la metodología indicada en el numeral 5.4.2.2, se presentan gráficos del tiempo de ocurrencia de surgencia generada en Punta Angamos para distintas direcciones y velocidad del viento. Los resultados de los modelos B38:56, B21:38 y B3:20 se plasmaron en la Figura 6.41a, Figura 6.41b y Figura 6.41c respectivamente; además se obtuvieron líneas de tendencia con un modelo exponencial de la forma $f(x) = ae^{(bx)}$, cuyos coeficientes fueron calculados con limite de confianza de 95%. La condición media demoró entre 30-35 [hr] en generar surgencia en Punta Angamos para las tres magnitudes más bajas de velocidad del viento. La dirección WSW presentó un comportamiento lineal durante todo el rango de magnitudes.

El comportamiento de invierno presentó fluctuaciones alrededor de 40 y 10 [hr] en el

Tabla 6.18: Resumen de parámetros utilizados en el cálculo de velocidad del viento en [m/s], caso del Canal, tiempo de surgencia, t_s , en [s] y [h], diferencial de densidad Δ_{ρ} en [kg/m³]; esfuerzo de corte del viento, τ_s , en [kg/ms²]; velocidad de corte del viento, u_* , en [m/s]; número de Richardson, Ri, determinado por la ecuación (3.8); velocidad de entrainment, u_e , a partir de los modelos C1:24.

Viento	Canal	t_s	t_s	$\Delta \rho$	$ au_s$	u_*	Ri	u_e	u_e
	1	430200	120	2.9e-04	0.0196	0.0044	3.6324	0.0001	0.0002
2	2	447600	124	1.2e-04	0.0196	0.0044	3.0557	0.0001	0.0001
	3	432000	120	1.1e-05	0.0196	0.0044	0.4132	0.0007	0.0001
	4	180000	50	2.6e-04	0.0784	0.0087	0.8016	0.0008	0.0004
4	5	188400	52	2.8e-04	0.0784	0.0087	1.7407	0.0004	0.0003
	6	182400	51	2.7e-04	0.0784	0.0087	2.5261	0.0002	0.0001
	7	106200	30	6.0e-04	0.1764	0.0131	0.8295	0.0011	0.0007
6	8	112200	31	5.9e-04	0.1764	0.0131	1.6475	0.0006	0.0004
	9	106800	30	2.7e-04	0.1764	0.0131	1.1227	0.0008	0.0002
	10	78000	22	9.1e-04	0.3136	0.0175	0.7116	0.0017	0.0010
8	11	83400	23	1.1e-03	0.3136	0.0175	1.7752	0.0007	0.0006
	12	80400	22	8.8e-04	0.3136	0.0175	2.0589	0.0006	0.0003
	13	69000	19	1.5e-03	0.4900	0.0219	0.7330	0.0021	0.0011
10	14	73800	21	5.6e-03	0.4900	0.0219	5.6274	0.0003	0.0007
	15	72000	20	1.9e-03	0.4900	0.0219	2.8608	0.0005	0.0003
	16	63000	18	2.0e-03	0.7056	0.0262	0.6959	0.0026	0.0012
12	17	67800	19	2.9e-03	0.7056	0.0262	1.9836	0.0009	0.0007
	18	65400	18	2.8e-03	0.7056	0.0262	2.8913	0.0006	0.0004
	19	58800	16	4.1e-03	0.9604	0.0306	1.0475	0.0020	0.0013
17	20	63000	18	4.1e-03	0.9604	0.0306	2.0870	0.0010	0.0008
	21	60000	17	3.2e-03	0.9604	0.0306	2.4539	0.0009	0.0004
	22	54600	15	4.9e-03	1.2544	0.0350	0.9633	0.0025	0.0014
16	23	58800	16	5.5e-03	1.2544	0.0350	2.1603	0.0011	0.0009
	24	56400	16	6.1e-03	1.2544	0.0350	3.5779	0.0007	0.0004

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.40: Gráfico del número de Richardson vs velocidad de entrainment normalizada por velocidad de corte del viento, para los sets de puntos calculados (naranja) y aquellos desarrollados por Monismith (1986) (azul).



tiempo que ocurre surgencia en la Bahía para velocidades bajas y altas, respectivamente. De acuerdo con el gráfico, se presenta un patrón similar para las distintas direcciones a medida que la velocidad del viento aumentó. El viento incidente WSW, demoró un mayor tiempo de surgencia.

En verano, se observó un comportamiento similar para las distintas direcciones y velocidad del viento. El rango en que se generó surgencia en la Bahía fue alrededor de 5 y 14 [hr] para velocidades altas y bajas, respectivamente. A pesar de lo anterior, la dirección de incidencia WSW mantuvo un comportamiento lineal.

De los gráficos presentados en la Figura 6.41, se observa que la surgencia llevó más tiempo en la época invernal que en la estival, asociado principalmente a que las masas de agua más frías y pesadas, tienden a demorar más tiempo en subir a la superficie, considerando las variaciones impuestas en la profundidad y temperatura del estrato superior.

Cabe señalar que la surgencia generada en Punta Angamos pudo ocurrir en una escala de tiempo mayor o menor, dependiendo de la configuración otorgada a la difusión vertical de la temperatura para dar respuesta al fenómeno (Pérez-Arvizu et al., 2013). A pesar de ello, el modelo fue capaz de representar el orden de decenas de horas de ocurrencia definido por Marín et al. (1993).

Por otro lado, se constató un patrón atípico del tiempo de surgencia para una velocidad del viento de 8 [m/s]. Dicha anomalía fue asociada directamente a la frecuencia de resonancia presente en la Bahía, considerando el periodo natural de oscilación de ésta propuesto por Helmothz en la ecuación (6.1),

Figura 6.41: Respuesta hidrodinámica de la acción del viento en la Bahía, momento en que ocurre surgencia en Punta Angamos considerando los casos (a) de invierno, (b) condición base y (c) de verano.



Fuente: Elaboración propia

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gd}}, \ n = 0, 1, 2, 3....$$
(6.1)

Donde T_n es el periodo de oscilación, L es la longitud de la transecta AB (5.11), n = 0 representa el periodo fundamental de la bahía, g es la gravedad y d es la profundidad característica de la zona. En dicho caso, si se asume una profundidad media constante de 110 [m], una longitud de 30.5 [km], se obtiene $T_0 = 3716$ [s]. Por otro lado, si se considera el tiempo que demora el viento en forzar el cuerpo de agua en dicha transecta, se obtiene $T_i = 3813$ [s], considerando un viento de 8 [m/s] y una longitud de canal 30.5 [km].

Por lo tanto, lo que demora un viento constante de 8 [m/s] en forzar el cuerpo de agua, representado como la frecuencia de la onda larga de surgencia, y el periodo natural de oscilación de la bahía son muy similares, provocando resonancia y una perturbación en el tiempo de surgencia de la Figura 6.41. También es importante señalar, que la surgencia generada por un viento WSW, no fue perturbada por la resonancia asociada a ésta.

EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE VARIABLES OCEANOGRÁFI-CAS DE ALGUNOS CASOS PARTICULARES

A continuación, se muestra el patrón de la corriente, TSM y surgencia durante un evento de esta última en la Bahía. El perfil de temperatura fue analizado para el tramo AB (Figura 5.11). Se evaluó la condición de verano, B11, media, B29, e invierno, B47; en cuyas configuraciones varió la termoclina y temperatura, mientras la dirección y velocidad del viento correspondió a 225 [°] y 6 [m/s].

En verano, la surgencia se desarrolló en un periodo de 16.5 [hr]. Durante el inicio, se registraron magnitudes medias de temperatura en la Punta y Península de 17.2 y 17.8 [°C], respectivamente (Figura 6.42a), que descendieron a mínimas de 15.2 y 14.9 [°C], respectivamente, en el momento de mayor intensidad del evento (Figura 6.42e). Las velocidades medias de la corriente en la Punta y Península fueron de 40 y 52 [cm/s], respectivamente (Figura 6.44a), fluctuando en 28 y 61 [cm/s], respectivamente, hacia el final del desarrollo del evento (Figura 6.44e), formando un bifurcación de filamentos fríos, uno en dirección a la Bahía y el otro hacia el océano. El patrón de corrientes mostró una tendencia a desarrollar el filamento con incidencia hacia el océano abierto, durante todo el evento, así lo demostraron magnitudes superiores a 0.5 [m/s] en la parte de la Península.

En la condición media, la surgencia se desarrolló en un periodo de 8.5 [hr]. Al inicio, en la Punta y Península se presentaron temperaturas de 16.7 y 17.1 [°C], respectivamente (Figura 6.45a). Las velocidades de la corriente registraron 38 y 47 [cm/s], respectivamente (Figura 6.47a). Al desarrollarse la surgencia, las temperaturas medias fueron de 16 y 16.9 [°C], respectivamente (Figura 6.45e). Los valores medios de las corrientes fueron de 13 y 44 [cm/s], respectivamente (Figura 6.47e). Durante el comienzo de la surgencia, las corrientes (Figura 6.47) fluyeron hacia el NE y a medida que transcurrió el tiempo, éstas se debilitaron e incluso cambiaron de dirección hacia SW en parte de la Península, por lo que los filamentos no alcanzaron a desarrollarse completamente.

En invierno, la surgencia se desarrolló en un periodo de 13.3 [hr]. Al inicio, en la Punta y Península los valores medios de temperatura fueron de 15 y 15.4 [°C], respectivamente (Figura 6.48a). Las corrientes registraron 0.3 y 0.4 [cm/s], respectivamente (Figura 6.50a).

Al desarrollarse la surgencia, se registró una temperatura mínima de 14.6 [°C] en ambos lugares (Figura 6.48e). Las corrientes fluyeron a 0.58 y 0.67 [cm/s], respectivamente (Figura 6.50e). Las corrientes (Figura 6.50) aumentaron en intensidad a medida que se desarrolló la surgencia, permitiendo que los filamentos fluyeran hacia NE y N en la Punta.

La intensidad máxima de los eventos de surgencia, indicó, de acuerdo a la distribución vertical de temperatura analizado para el tramo AB (Figura 5.11), que la termoclina de 12 [°C] alcanzó los 65, 80 y 100 [m] de profundidad, en verano (Figura 6.43e), condición media (Figura 6.46e) e invierno (Figura 6.49e), respectivamente. Con los resultados expuestos es posible afirmar que en la Bahía se desarrolla una bifurcación de filamentos fríos que se dirigen hacia NE y NW, que se generaron en la fase de aceleración del evento. En Punta Angamos las corrientes tuvieron gran relevancia e incluso la velocidad superó 1 [m/s] en época estival (Figura 6.44e). Este flujo permite que masas de agua más fría asciendan a la superficie, debido a factores combinados de batimetría y geometría asociados a la Península Marín et al. (2003).

Figura 6.42: Evolución temporal de la TSM en [°C] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr], (d) transcurrida 13.2 [hr] y (d) transcurrida 16.5 [hr]; para verano.



Fuente: Elaboración propia







Figura 6.44: Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr], (d) transcurrida 13.2 [hr] y (d) transcurrida 16.5 [hr]; para verano.





Figura 6.45: Evolución temporal de la TSM en [°C] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 1.7 [hr] (b) transcurridas 3.4 [hr] (b) transcurrida 5.1 [hr], (c) transcurrida 6.8 [hr], (d) transcurrida 8.5 [hr]; para la condición media.



(e)

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.46: Evolución temporal de la temperatura del mar en [°C], equivalente al perfil vertical del tramo AB (Figura 5.11), desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 1.7 [hr] (b) transcurrida 3.4 [hr], (c) transcurrida 5.1 [hr], (d) transcurrida 6.8 [hr] y (d) transcurrida 8.5 [hr]; para la condición media.



Fuente: Elaboración propia



Figura 6.47: Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 1.7 [hr] (b) transcurrida 3.4 [hr], (c) transcurrida 5.1 [hr], (d) transcurrida 6.8 [hr] y (d) transcurrida 8.5 [hr]; para la condición media.

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.48: Evolución temporal de la TSM en [°C] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr] y (d) transcurrida 13.2 [hr]; para invierno.



(e)

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.49: Evolución temporal de la temperatura del mar en [°C], equivalente al perfil vertical del tramo AB (Figura 5.11), desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr] y (d) transcurrida 13.2 [hr]; para invierno.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.50: Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] desde el inicio de la surgencia (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurrida 6.6 [hr], (c) transcurrida 9.9 [hr] y (d) transcurrida 13.2 [hr]; para invierno.



(e)

Fuente: Elaboración propia

6.4.1.3. RESPUESTA DE LA BAHÍA BAJO CONDICIONES EL NIÑO Y LA NIÑA

Los modelos con batimetría real B1 y B2 corresponden al caso idealizado, mientras B58 y B57 consideró El Niño 1997 y La Niña 1998 para el mes de noviembre, respectivamente. Las variables oceanográficas evaluadas consideraron velocidad de la corriente, TSM y temperatura en la vertical.

RESPUESTA DE LA BAHÍA ANTE UN CASO IDEAL

La Figura 6.51a muestra el comportamiento de la TSM en Punta Angamos durante el periodo de simulación correspondiente a El Niño. Se determinó un evento de surgencia delimitado por las líneas de color rojo y negro indicando el momento de inicio y término, respectivamente, con una magnitud media de 11,70 [°C] y durante su máximo desarrollo la TSM disminuyó a 10,49 [°C], advirtiendo una diferencia de $\Delta = 1,21$ [°C]. La componente W de la corriente (positiva desde la superficie del agua hacia arriba) presentada en la Figura 6.51b, indicó un flujo vertical de agua en Punta Angamos durante el evento de surgencia, advirtiendo el descenso de las parcelas de agua más caliente cuya área fue ocupada por el ascenso de agua fría a la superficie. Se observan valores máximos de 0,075 [cm/s] con flujo hacia el fondo marino, y 63,78 [cm/s] para la componente W y velocidad de la corriente, respectivamente.

De acuerdo con La Niña, en la Figura 6.52
a se observó un comportamiento asintótico de la TSM, característico de sistemas ca
óticos (Navarro López, 2010). La ocurrencia de un evento de surgencia fue demarcado por líne
as entrecortadas roja y negra aludiendo al inicio y término de éste, siendo posible encontrar una magnitud media de 9,64 [°C] en ambos casos y una mínima de 9,23 [°C], consider
ando un diferencial $\Delta = 0,38$ [°C]. En la Figura 6.52 se avistó el ascenso de agua mas fría hacia la superficie, identificando valores máximos de 0,0088 [cm/s] y 21,71 [cm/s] para la componente W y velocidad de la corriente, respectivamente.

Considerando el periodo que demora el evento en desarrollarse, se determinó un tiempo de surgencia para La Niña y El Niño de 52 [hr] y 28 [hr]. Esta diferencia fue asociada a las bajas velocidades presentes en la fase fría, pues en la Figura 6.52b se verificó que al inicio de la surgencia la parcela de agua helada se encuentra a una mayor profundidad demorando más tiempo en estar disponible en la superficie. A partir de la Figura 6.51a y Figura 6.52a la TSM tiende a presentar un comportamiento constante donde la fase cálida y fría tendieron a una magnitud de 10 [°C] y 9 [°C], respectivamente.



Figura 6.51: Comportamiento de la (a) TSM [°C], (b) componente W de la velocidad de la corriente [cm/s] y (c) velocidad de la corriente [cm/s] en Punta Angamos durante El Niño idealizado.

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.52: Comportamiento de la (a) TSM [°C], (b) componente W de la velocidad de la corriente [cm/s] y (c) velocidad de la corriente [cm/s] en Punta Angamos durante La Niña idealizada.

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.53: Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 13 [hr] (b) transcurridas 26 [hr] (c) transcurrida 39 [hr] y (d) transcurridas 52 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña idealizado.





Figura 6.54: Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 13 [hr] (b) transcurridas 26 [hr] (c) transcurrida 39 [hr] y (d) transcurridas 52 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña idealizado.

Figura 6.55: Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 13 [hr] (b) transcurridas 26 [hr] (c) transcurrida 39 [hr] y (d) transcurridas 52 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña idealizado.



(e)

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.56: Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 7 [hr] (b) transcurridas 14 [hr] (c) transcurrida 21 [hr] y (d) transcurridas 28 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño idealizado.



(e)

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.57: Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 7 [hr] (b) transcurridas 14 [hr] (c) transcurrida 21 [hr] y (d) transcurridas 28 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño idealizado.

Figura 6.58: Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 7 [hr] (b) transcurridas 14 [hr] (c) transcurrida 21 [hr] y (d) transcurridas 28 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño idealizado.



(e)

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a La Niña, la Figura 6.53 muestra los campos superficiales de temperatura en el transcurso del evento; desde el inicio de éste, cada 13 [hr], 26 [hr], 39 [hr] y 52 [hr]. El movimiento vertical de las parcelas de agua se visualiza en la Figura 6.54, observando que agua más caliente se concentró cerca de la costa, producto del viento 225 [°] que desplazó el flujo en dicha dirección, mientras aquella más fría emergió en Punta Angamos. De acuerdo con la Figura 6.55, la batimetría y geometría del norte de la Península fueron factores claves en el desarrollo de la hidrodinámica, pues en esa zona las corrientes presentaron grandes fluctuaciones que repercutieron en eventos de afloramientos.

Con respecto a El Niño, la Figura 6.56 considera la evolución espacial y temporal del evento de surgencia. Se advierte la fase inicial, el desarrollo transcurridas 7 [hr], 14 [hr] y 21 [hr] y por supuesto la fase final luego de 28 [hr], denotando el enfriamiento en Punta Angamos. La Figura 6.57 muestra la circulación vertical que experimentó la temperatura en el tramo AB, observando el desplazamiento de agua caliente y posterior ascenso de agua fría en la Punta. Además, se advierte que a partir de las 14 [hr] (Figura 6.57c) la Bahía comienza a llenarse de agua fría, lo que se condice con los campos superficiales de corrientes. En la Figura 6.58 se aprecia que los vientos desplazan las masas superficiales de agua hacia la izquierda, favoreciendo el transporte de Ekman.

RESPUESTA DE LA BAHÍA ANTE UN CASO REAL

Se presentan los resultados acorde la metodología, evaluando el impacto provocado por el fenómeno ENOS en las masas de agua y transporte de la temperatura en la Bahía.

Con respecto a La Niña, la Figura 6.59 muestra la evolución temporal de la TSM durante un evento de surgencia desde el momento en que la temperatura se mantuvo en una condición normal (6.59a), durante su desarrollo (6.59b, 6.59c y 6.59d) y la vuelta a su condición normal (6.59e). Durante dicho evento, en Punta Angamos se registró un descenso de $\Delta = 4.38$ [°C] transcurridas 6.7 [hr], de acuerdo con la Tabla 6.19. La Figura 6.60 indica la secuencia experimentada por la temperatura del tramo AB, desde su condición inicial (6.60a), durante su desarrollo $(6.60b, 6.60c \ y \ 6.60d)$ y la condición final (6.60e). La termoclina se estabilizó a 45 [m] de profundidad con una temperatura de 14 [°C]. De acuerdo con la velocidad de la corriente de la Figura 6.61, es posible indicar que variaciones de temperatura superficiales (Figura 6.59) y verticales (Figura 6.60) se condicen con los movimientos de masas de agua en Punta Angamos. Al inicio (6.61a) las corrientes se dirigen hacia la Bahía, luego el transporte de Ekman desplaza el flujo dando lugar a la surgencia (6.61b, 6.61c), para posteriormente desplazar el flujo nuevamente a la Bahía (6.61e). La influencia de Punta Angamos es clave, pues los valores medios de velocidades fueron de $0.73 \ [m/s]$ transcurridas 13.3 [hr] del inicio de la surgencia de acuerdo con la Tabla 6.19. Por otra parte, los valores medios se estimaron en 0.15 [m/s] dentro de la Bahía.

Considerando El Niño, la TSM en la Figura 6.62 evolucionó desde su condición inicial (6.62a), desarrollo (6.62b, 6.62c y 6.62d) a un estado similar al de la condición inicial (6.62e). El descenso de temperatura fue $\Delta = 3,60$ [°C]. Las variaciones de TSM a medida que transcurrió el afloramiento se resumen en la Tabla 6.20. En concordancia, la Figura 6.63 muestra cambios de temperatura en la columna de agua durante el evento. La Figura 6.63c indica el momento que el agua mas fría ascendió a la superficie en Punta Angamos a las 6,7 [hr]. La termoclina se mantuvo estable para un profundidad media superior a 60 [m] en su condición inicial (Figura 6.63a) y a medida que el evento se debilitó, dicha

Tabla 6.19:	Valores	medios	de las	variables	oceanográficas	analizadas	en	Punta	Angamos	para La
Niña 1997.										

		Tiempo de surgencia en [hr]					
Variable	Unidad	00.00	03.30	06.70	10.00	13.30	
TSM	[°C]	17.49	16.89	13.11	16.62	17.19	
Velocidad de la corriente	[m/s]	0.37	0.22	0.11	0.68	0.73	

Fuente:	Elaboración	propia
r active.	Lice of a coron	propro

Tabla 6.20: Valores medios de las variables oceanográficas analizadas en Punta Angamos para El Niño 1998.

		Tiempo de surgencia en [hr]					
Variable	Unidad	00.00	03.30	06.70	10.00	13.30	
TSM	[°C]	16.99	16.46	13.39	15.36	17.00	
Velocidad de la corriente	[m/s]	1.07	0.28	0.51	0.36	0.89	

Fuente: Elaboración propia

profundidad no superó 60 [m] con una temperatura de 14 $[^{\circ}C]$. Los campos superficiales de corrientes (Figura 6.64), en un comienzo se desplazaron hacia la Bahía (6.64a), luego y gracias al transporte de Ekman, el flujo se dirigió hacia el oceáno (6.64b, 6.64c y 6.64d), permitiendo que las parcelas mas frías emergen a la superficie, para posteriormente redirigir el flujo al interior de la Bahía (6.64e). Cabe destacar, la condición inicial presentó la mayor magnitud media en el desarrollo del evento, registrando 1,07 [m/s] en Punta Angamos. Dicha magnitud se atribuye a una mayor transferencia de momentum, desde el viento hacia el océano, requerido para generar el desplazamiento vertical de la masa de agua, pues la termoclina de El Niño superó en 15 [m] a la registrada durante un evento La Niña.

Las magnitudes medias de la velocidad de la corriente resumidas en la Tabla 6.19 y Tabla 6.20 para el evento La Niña y El Niño, respectivamente, son comparables a los resultados de las modelación hidrodinámica de la Bahía desarrollada por MMA (2019), cuyos valores medios se estimaron en 0.25-0.5 [m/s] para primavera y verano. La Figura 6.65 muestra la evolución temporal de las propiedades del flujo en Punta Angamos. La TSM (6.65a) registró de manera clara ambas fases, determinando un valor medio de 14,75 [°C] y 16,38 [°C] durante La Niña y El Niño, respectivamente. La velocidad de la corriente (6.65b) registró una media de 1.08 [m/s] (1.13 [m/s]) para La Niña (El Niño). La componente W (6.65c) registró un valor medio de -8.57E-4 y -7.55E-4 en La Niña y El Niño, respectivamente.

Figura 6.59: Evolución temporal de la TSM en [°C], a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña 1997.



(e)

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.60: Evolución temporal de la temperatura del perfil AB en [°C] a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña 1997.

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.61: Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a La Niña 1997.



(e)

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.62: Evolución temporal de la TSM en [°C] a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño 1998.



Fuente: Elaboración propia



Figura 6.63: Evolución temporal de la temperatura del perfil AB en [°C] a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño 1998.

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.64: Evolución temporal de la velocidad de la corriente en [m/s] a partir de la condición inicial (a), transcurridas 3.3 [hr] (b) transcurridas 6.7 [hr] (c) transcurrida 10.0 [hr] y (d) transcurridas 13.3 [hr] de la surgencia; correspondiente a El Niño 1998.



(e)

Fuente: Elaboración propia




7 CONCLUSIONES

Durante el proceso de calibración y validación se evidenció que las forzantes marea, oleaje y viento recopiladas en la presente tesis, tuvieron gran impacto en los resultados esperados. De acuerdo al modelo de propagación de oleaje, los coeficientes de correlación superaron 0.65 en los parámetros H_s y T_p , mientras D_p presentó menos consistencia con los registros de *Datos ADCP1*. De acuerdo con el modelo hidrodinámico, la velocidad de la corriente fue subestimada en las capas inferiores, presentando un mejor comportamiento en la superficie. Esto fue asociado por una parte, a una menor representación de la difracción del oleaje al interior de la Bahía y por otra parte, a la transferencia de momentum desde el viento al oceáno, pues *Datos Viento* incidió desde S y SW representando el 79 % de las ocurrencias, lo que se vio reflejado en una menor variabilidad direccional en el campo de corrientes. Sin embargo, ambos modelos fueron capaces de representar los órdenes de magnitud de las variables del oleaje y las corrientes registradas por los ADCP's.

Con respecto a los casos de Canal, la estimación de la pendiente de la surgencia presentó consistencia entre la teoría y modelación de C26, ya que sus valores fueron de m = -0.256 y m = -0.257, respectivamente. Marín et al. (1993) indicó que el afloramiento ocurre cuando el viento sopla desde el SW con intensidad 5 [m/s] durante un periodo de 30 [hr], y de acuerdo con los resultados de C26 el tiempo fue de 40 [hr]. A pesar de las grandes diferencias en las dimensiones de los canales de prueba y la magnitud del viento de los modelos C1:24 y aquellos desarrollados por Monismith (1986), siguen la misma tendencia, es decir, los valores de R_{i_0} y u_* calculados por las ecuación 3.15 de Monismith (1986), cuyo gráfico se mostró en la Figura 6.40.

Con respecto a los casos de Bahía, el análisis de sensibilidad del viento presentado en la Figura 6.41, indicó menores variaciones en el tiempo de surgencia en verano, mientras la condición media e invierno tendieron a mayores perturbaciones e incluso grandes fluctuaciones en el tiempo de surgencia. Por lo tanto, el modelo fue capaz de representar la condición de verano, al tener una termoclina menos profunda el afloramiento demoró menos tiempo. Cabe destacar también el efecto de la resonancia en la Bahía, pues la perturbación generada por un viento de 8 [m/s] en el tiempo de surgencia, fue asociada directamente a este fenómeno. En concreto, se calculó el tiempo que demora el viento en forzar el cuerpo de agua, $T_i = 3813[s]$ y el periodo natural de oscilación de la Bahía, $T_0 = 3716[s]$, indicando que ambos periodos entraron en resonancia.

Los modelos de La Niña y El Niño idealizados, donde sólo se modificó el perfil de temperatura y las demás forzantes fueron las mismas para ambos casos, fueron capaces de representar eventos de surgencia. La TSM de la Figura 6.54 y Figura 6.57 mostraron la secuencia temporal y espacial de la transecta AB de un afloramiento en Punta Angamos respecto de la fase cálida y fría. Además se constató un proceso descrito por Marín et al. (2003): cuando el evento de surgencia se desacelera, el agua caliente ubicada cerca de la costa dentro de la Bahía, es desplazada fuera de ésta y reemplazada por agua más fría, siendo advertido en la Figura 6.57d.

Los modelos de El Niño y La Niña para noviembre de 1997 y 1998, respectivamente, validaron el comportamiento esperado para ambas fases; cambios en la proporción de masas de agua, intensidades del viento y la distribución de temperatura en la columna de agua. En la Figura 6.65 se observaron las fluctuaciones de TSM, velocidad de la corriente y componente W experimentadas en Punta Angamos. Durante los eventos de surgencia, en Punta Angamos se registró un descenso de 4.38 y 3.6 [°C] en La Niña y El Niño, respectivamente. La velocidad de la corriente registró valores medios de 0.42 [m/s] y 0.62 [m/s] en la fase fría y cálida, respectivamente, valores que fueron contrastado con modelación hidrodinámica desarrollada por MMA (2019), indicando que en primavera y verano los rangos medios de corrientes fueron 0.25-0.5 [m/s] en la capa superficial. Por lo tanto, Punta Angamos correspondió al aspecto geomorfológico más relevante que favoreció el transporte vertical.

En la actualidad, un factor a tener en cuenta es cómo el cambio climático puede afectar en el desarrollo de eventos de surgencia, pues aumentos de TSM provocan cambios en la proporción de las masas de agua y nivel del mar. Lo que puede influir en la disponibilidad de nutrientes en los campos superficiales de la Bahía y otras regiones costeras en donde ocurren este tipo de eventos.

RECOMENDACIONES

- Con respecto a las fuentes de información, en futuras investigaciones se recomienda incluir otra base de datos de vientos que se encuentre dentro de la Bahía y que proporcione un mayor rango de direcciones de incidencia. La estación ubicada en Cerro Moreno (Figura 4.2) estuvo influenciada por grandes elevaciones que perturbaron la dirección verdadera desde donde sopla el viento, y por ende perjudicaron la modelación hidrodinámica de la Bahía.
- Considerando los procesos de surgencia que ocurren con periodicidad en Punta Angamos y que posteriormente se desplazan al interior de la Bahía (sobra de surgencia), se recomienda una evaluación de los efectos biológicos y químicos de los proyectos que se desarrollan actualmente, y que han sido identificados en la Tabla 4.1. De acuerdo con estudios teóricos desarrollados por Ecotecnos S.A., la sombra de surgencia en conjunto con la acción antrópica producen emulsión hidrodinámica capaz de influir en el medio biótico.
- Dado que la geomorfología de la Península es fundamental en el proceso de surgencia, se recomienda incorporar la elevación de las distintas puntas que conforman dicho bloque estructural que sobresale de la línea de costa, en conjunto con un modelo de vientos que entregue magnitudes y direcciones en todo el dominio numérico. Estos factores ayudarían a estudiar de mejor manera la sombra de surgencia dentro de la Bahía.
- Como se trata de un evento oceano-atmosférico, se deben considerar factores meteorológicos como cobertura de nubes, radiación solar, temperatura del aire, presión atmosférica, precipitación y humedad relativa que permita un mayor control de los resultados esperados, los que no estuvieron disponibles en el desarrollo de esta tesis.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aybay, O. (2010). Time-conservative finite-volume method with large-eddy simulation for computational aeroacoustics. PhD thesis, Durham University.
- Baharona, M. y Gallegos, R. (2000). Surgencias en la costa norte de chile durante las temporadas niña 1996-1997 y niño 1997-1998. Revista de Geografía Norte Grande, 27:53–60.
- Bardina, J., Ferziger, J., y Reynolds, W. (1980). Improved subgrid-scale models for largeeddy simulation. In 13th fluid and plasmadynamics conference, page 1357.
- Bello, M., Barbieri, M., Salinas, S., y Soto, L. (1997). Surgencia costera en la zona central de chile, durante el ciclo el niño-la niña 1997-1999. El Niño-La Niña, 2000:77–94.
- Beyá, J., Álvares, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winckler, P., y Molina, M. (2016). Atlas de oleaje de chile. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- Bleck, R. (2002). An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates. Ocean modelling, 4(1):55–88.
- Bleck, R., Halliwell, G., Wallcraft, A., Carrol, S., Kelly, K., y Rushing, K. (2002). Hybrid coordinate ocean model (hycom). User's Manual, page 199.
- Catalán, R. (2009). Plan de desarrollo comunal de mejillones 2008-2018. Municipalidad de Mejillones.
- Csanady, G. T. (1981). Circulation in the coastal ocean, part 1. Eos Transactions American Geophysical Union, 62.
- Del Estado, P. (1995). Rom 0.4-95. Recomendaciones para obras marítimas. Acciones climáticas II: Viento.
- DGAC (2015). Portal de Servicios Climáticos Dirección Meteorológica de Chile. https://climatologia.meteochile.gob.cl. Recuperado: 10-02-2019.
- DHI (2014a). MIKE 21 Spectral Waves Module, Scientific Documentation. *Hørsholm*, Denmark: DHI Water Environment Health.
- DHI (2014b). MIKE 3 Flow Model, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. *Hørsholm, Denmark: DHI Water Environment Health.*
- Escribano, R., Rosales, S. A., y Blanco, J. L. (2004). Understanding upwelling circulation off antofagasta (northern chile): A three-dimensional numerical-modeling approach. *Continental Shelf Research*, 24(1):37–53.
- Fonseca, T. y Farías, M. (1987). Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Investigaciones Pesqueras*, 34:33–46.
- García, M. H. (1996). Hidrodinámica ambiental. Universidad Nac. del Litoral.

- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., y Cabot, W. H. (1991). A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3(7):1760–1765.
- Glantz, M. H. (2000). Why care about el niño and la niña? In Elsevier Oceanography Series, volume 63, pages 149–169. Elsevier.
- Holthuijsen, L. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters.
- Holthuijsen, L., Booij, N., y Herbers, T. (1989). A prediction model for stationary, shortcrested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal engineering*, 13(1):23–54.
- Imberger, J. y Hamblin, P. F. (1982). Dynamics of lakes, reservoirs, and cooling ponds. Annual Review of Fluid Mechanics, 14(1):153–187.
- IOC-UNESO (2019). Sea level station monitoring facility. http://www. ioc-sealevelmonitoring.org. Recuperado: 10-02-2019.
- Ji, Z.-G. (2008). Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries. John Wiley & Sons.
- Kolmogorov, A. N. (1941). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers. Cr Acad. Sci. URSS, 30:301–305.
- Kranenburg, C. (1985). Mixed-layer deepening in lakes after wind setup. Journal of Hydraulic Engineering, 111(9):1279–1296.
- Lau, N.-C. y Nath, M. J. (2003). Atmosphere–ocean variations in the indo-pacific sector during enso episodes. *Journal of Climate*, 16(1):3–20.
- Letelier, J., Soto-Mardones, L., Salinas, S., Vincenti, L., Pavez, R., y Arriagada, M. (2012). Influencia de la península de mejillones en la variabilidad oceanográfica anual e interanual frente al norte de chile. *Revista de biología marina y oceanografía*, 47(3):513–526.
- Mann, K. H. y Lazier, J. R. (2013). Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans. Number 3. John Wiley & Sons.
- Marín, V., Rodríguez, L., Vallejo, L., Fuenteseca, J., y Oyarce, E. (1993). Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de bahía mejillones del sur (antofagasta, chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 66(4):479–491.
- Marín, V. H., Delgado, L. E., y Escribano, R. (2003). Upwelling shadows at mejillones bay (northern chilean coast): a remote sensing in situ analysis. *Investigaciones Marinas*, 31(2):47–55.
- Massel, S. R. (2017). Ocean Surface Saves: Their Physics and Prediction.
- Maturana, J., Bello, M., y Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno el niño, oscilación del sur. *El Niño-La Niña*, 2000:13–27.
- MMA (2019). Diagnóstico y monitoreo ambiental de Bahía Mejillones del Sur. Ministerio del Medio Ambiente Centro de ecología aplicada.
- Monismith, S. (1986). An experimental study of the upwelling response of stratified reservoirs to surface shear stress. *Journal of Fluid Mechanics*, 171:407–439.

- Montecino, V., RUTLLANT, J., y SALINAS, S. (2005). Coastal ocean circulation off western south america. *The Global Coastal Ocean-Regional Studies and Syntheses*, 11:273.
- Navarro López, E. M. (2010). La naturaleza, las matemáticas, la ingeniería y el caos. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 18(1):5–7.
- Nihoul, J. C. (1987). [Elsevier Oceanography Series] Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics Volume 45 — Perspective in Three-Dimensional Modelling of the Marine System.
- Nihoul, J. C. y Jamart, B. M. (1987). Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics. Elsevier.
- Niño, Y. (2013). Response of a stratified water body to wind. surface set-up and interfacial displacement. Departamento de Ingniería civil de la Universidad de Chile, (1):201–213.
- NOAA (2019). Magnetic Declination Estimated Value. https://climatologia. meteochile.gob.cl. Recuperado: 21-04-2019.
- OMM (2014). El Niño, Oscilación del Sur. Organización Mundial Meteorológica, Boletín N° 1145.
- Pérez-Arvizu, E. M., Aragón-Noriega, E. A., y Espinosa-Carreón, T. L. (2013). Variabilidad estacional de la clorofila ay su respuesta a condiciones el niño y la niña en el norte del golfo de california. *Revista de biología marina y oceanografía*, 48(1):131–141.
- RDinstruments (2011a). Wavesmon user's guide. RD Instruments Acoustic Doppler Solutions, 7.
- RDinstruments (2011b). Winadcp user's guide. RD Instruments Acoustic Doppler Solutions.
- Reynolds, O. (1985). On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. volume 186, pages 123–164. Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
- Rodriguez, L., Marin, V., Farías, M., y Oyarce, E. (1991). Identification of an upwelling zone by remate sensing and in situ measurements. mejillones del sur bay (antofagastachile. *Scientia Marina*, (55):467–473.
- Rutllant, J. y Montecino, V. (2002). Multiscale upwelling forcing cycles and biological response off north-central chile. *Revista chilena de historia natural*, 75(217):e231.
- SEA (2019). Servicio de evaluación ambiental. Gobierno de Chile.
- Shintani, T., de la Fuente, A., de la Fuente, A., Niño, Y., y Imberger, J. (2010). Generalizations of the wedderburn number: Parameterizing upwelling in stratified lakes. *Limnology and Oceanography*, 55(3):1377–1389.
- SHOA (1999). Publicación SHOA N° 3202, Instrucciones Oceanográficas N°2 Método Oficial para el Cálculo de los Valores no Armónicos de la Marea. 2.
- SHOA (2015). Publicación SHOA Nº 3000, Catálogo de Cartas y Publicaciones Náuticas.
- Silva-Casarín, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Serie Docencia. Instituto de Ingeniería. UNAM. México, 179.

- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3):99–164.
- UCN (2016). Programa de seguimiento del medio ambiente marino: Ampliación de las instalaciones portuarias de Puerto Mejillones etapa de operación. Departamento de biología marina, Universidad Católica del Norte.
- Vergara, J. (1992). Simulación de un fenómeno de surgencia costera a los 29°5'ls chile. *Revista Investigación Pesquera*, (37).
- Winckler, P. (2018). Introducción al modelado de procesos costeros.
- Zambrano, E. (1986). El fenómeno de.^{el} niñoz la oscilación sur (enso).
- Zhiyin, Y. (2015). Large-eddy simulation: Past, present and the future. *Chinese journal* of Aeronautics, 28(1):11–24.

ANEXO A OBTENCIÓN MODELO DE ELEVACIÓN DI-GITAL

A.1 MALLA BATIMÉTRICA

Para obtener la batimetría de la Bahía, la metodología utilizada es detallada a continuación:

Procedimiento en Global Mapper:

- Las cartas naúticas son cargadas al software Global Mapper.
- Se debe revisar que la proyección y Datum geodésico sea consistente con la zona estudiada.
- A continuación es necesario verificar si la línea de costa de las cartas coincide con la de Worl Map incluida en el programa, para hacer las correcciones pertinentes.
- Se limpia la batimetría dejando línea de costa, sondajes y veriles.
- Una vez corregidos es pertinente exportar por separado linea de costa, sondajes y veriles con extensión 'xyz'.
- Lo anterior permite revisar por separado cada una de las variables involucradas y corregir posibles errores en los archivos para ser usados en el siguiente proceso.

Procedimiento en SMS:

- Los tres archivos generados en el proceso anterior son cargados en el software SMS.
- Se verifica que el programa lea adecuadamente línea de costa, sondajes y veriles.
- Luego se define el borde oceánico de la malla batimétrica, teniendo en cuenta la condición de aguas profundas: d/L > 1/2, donde d es la profundidad y $L = gT^2/2\pi$ es la longitud de ola.
- Es pertinente determinar los nodos necesarios para generar la malla, considerando mayor relajación en los bordes oceánicos y un mayor refinamiento en la zona costera.
- Se genera la malla teniendo en cuenta las siguientes características:
 - Condición de borde: Rectangular
 - N° de elementos: 1190
 - N° de nodos: 2229

La estabilidad de la malla batimétrica se corrobora corriendo una serie de tiempo de marea sinusoidal en MIKE3 FM. Si está bien representado el flujo y reflujo de la marea es un indicador de la estabilidad de la malla. En caso de no ocurrir lo anterior es pertinente volver al último punto. Un resumen de la metodología es presentada en la Figura A.1.



Figura A.1: Diagrama de flujo. Metodología de la obtención de malla batimétrica.

Fuente: Elaboración propia

A.2 DESCRIPCIÓN MODELO HYCOM

HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) es un Modelo de Circulación General del Oceáno (OGCM) (Bleck et al., 2002) que permite describir procesos físicos y termodinámicos a través de ecuaciones primitivas que considera coordenadas verticales isopícnicas híbridas y coordenadas horizontales como mallas rectilíneas y curvilíneas ortogonales. De acuerdo con la estructura vertical del modelo, en aguas profundas utiliza coordenadas z, en aguas someras coordenadas sigma y en aguas muy someras vuele a las coordenadas z (Bleck, 2002).

El modelo está basado en ecuaciones para las componentes de velocidades horizontales, ecuación de continuidad de masa, ecuaciones de conservación para variables termodinámicas de salinidad y temperatura. La resolusión de la grilla horizontal es de $1/12^{\circ}$ en longitud x $1/12^{\circ}$ latitud y la estructura vertical de 41 capas. La frecuencia temporal es de 3 horas (Bleck, 2002).

ANEXO B CIRCULACIÓN HIDRODINÁMICA A PAR-TIR DE *DATOS ADCP1*

Para un mejor análisis de la velocidad de la corriente, es pertinente considerar sus componentes ortogonales:

- Componente U: Weste Este, positiva si el flujo va hacia el Este.
- Componente V: Sur Norte, positiva si el flujo va hacia el Norte.

Para las cuales se realiza una comparación con los registros del ADCP1, permitiendo definir si éstas puedan estar afectas por la topografía del lugar, en particular de Punta Angamos.

Figura B.1: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componenete U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.2: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.3: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Fuente: Elaboración propia

Figura B.4: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.5: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.6: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Fuente: Elaboración propia

Respecto de la Figura B.1, Figura B.2 y Figura B.3, la componente U de la campaña de verano indicó que fue subestimada por el modelo, sin embargo las fluctuaciones medias fueron representadas visualmente. Las variaciones fueron atribuidas a un bajo aporte de la forzante marea por la influencia de onda larga. De acuerdo a las corrientes simuladas de la Tabla B.1 y Tabla B.2, la capa superficial, intermedia y de fondo tiende a fluir hacia el E-NE (primer cuadrante), S-SE (segundo) y S-SE (segundo), respectivamente. Los registros ADCP mostraron que la capa superficial, intermedia y de fondo tendieron a fluir hacia el cuarto cuadrante específicamente W-SW, S-SW y W-SW, respectivamente. Tanto los registros ADCP como la modelación indicaron que en el fondo de la columna de agua hubo un mayor movimiento del flujo superando las magnitudes medias de la superficie. Respecto de los gráficos Q-Q, la magnitudes de U y V de la capa superficial e intermedia fueron subestimadas mientras la de fondo se sobrestimó.

Tabla B.1: Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016.

Capa	Serie	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
	ADCP1	6.00	-0.76	-0.93	-1.57	-4.67	2.80
Superficial	Simulado	2.23	0.06	0.30	-1.94	-1.40	1.78
	ADCP1	4.81	-2.10	-2.24	-2.34	-5.25	0.95
Intermedia	Simulado	1.87	0.06	0.26	-2.64	-1.15	1.49
	ADCP1	4.26	-1.14	-1.45	-4.96	-3.87	1.41
Fondo	Simulado	1.63	0.16	0.32	-2.06	-0.89	1.43

Fuente: Elaboración propia

Tabla B.2: Medidas de tendencia central de la componente V de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de $Datos \ ADCP1$ y registrada por $Datos \ ADCP1$ para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016.

Capa	Serie	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
	ADCP1	6.27	-0.88	-0.91	2.59	-4.55	2.73
Superficial	Simulado	2.62	-0.17	0.12	-2.65	-1.80	1.89
	ADCP1	4.83	-2.88	-2.98	-6.09	-6.10	0.33
Intermedia	Simulado	2.08	-0.44	-0.28	-3.82	-1.82	1.18
	ADCP1	4.06	-1.00	-1.08	-3.72	-3.69	1.54
Fondo	Simulado	1.85	-0.48	-0.39	-3.37	-1.77	0.94

Fuente: Elaboración propia

Figura B.7: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componenete U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.8: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.9: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.10: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.11: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura B.12: Circulación hidrodinámica a partir de *Datos ADCP1* (en cobre) y registros de *Datos ADCP1* (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la componente U de la campaña de invierno concerniente a la capa de fondo, intermedia y superficial de la Figura B.7, Figura B.8y Figura B.9, respectivamente, se observó una leve sobrestimación en relación hacia donde se dirigió el flujo al igual que la V de la la Figura B.10, Figura B.11 y Figura B.12 y su respectiva capa de fondo, intermedia y superficial. Considerando las medidas de tendencia resumidas en la Tabla B.3 y Tabla B.4 de sus respectivas componente U y V, las corrientes presentaron un comportamiento homogéneo en la columna de agua tendiendo a fluir hacia el primer cuadrante E-SE (Componente U y V positivos, siendo U de mayor magnitud). Respecto de los gráficos Q-Q, la magnitudes de U de la capa superficial se sobrestimó mientras la intermedia y de fondo fueron subestimadas.

Tabla B.3: Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.

Capa	Serie	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
	ADCP1	4.48	-1.16	-1.08	-1.59	-4.11	1.90
Superficial	Simulado	2.21	1.32	1.40	-1.16	-0.05	2.87
	ADCP1	4.16	-0.52	-0.72	1.10	-3.43	2.17
Intermedia	Simulado	1.95	1.17	1.22	-0.22	-0.03	2.50
	ADCP1	4.22	-1.23	-1.59	-1.60	-4.28	1.36
Fondo	Simulado	1.76	1.10	1.13	-1.36	-0.01	2.27

Fuente: Elaboración propia

Tabla B.4: Medidas de tendencia central de la componente V de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de *Datos ADCP1* y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.

Capa	Serie	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
	ADCP1	4.44	-1.30	-1.27	-5.17	-4.38	1.82
Superficial	Simulado	2.79	1.16	1.33	1.05	-0.49	3.10
	ADCP1	3.74	-1.98	-2.00	-0.10	-4.35	0.44
Intermedia	Simulado	2.35	0.95	1.07	-1.55	-0.48	2.62
	ADCP1	3.70	-0.84	-0.75	-1.36	-3.34	1.65
Fondo	Simulado	2.16	0.86	0.94	-1.42	-0.47	2.39

Fuente: Elaboración propia

ANEXO C CIRCULACIÓN HIDRODINÁMICA A PAR-TIR DE REGISTROS HISTÓRICOS

De acuerdo a la modelación de la condición estival, observando la componente U de la capa de fondo, intermedia y superficial en la Figura C.1 Figura C.2 Figura C.3, respectivamente, se determinó que las corrientes no tienden a fluir hacia E-W con tanta predominancia, sin embargo, la componente V presentó mayores fluctuaciones del flujo hacia N-S, como los mostraron las series de tiempo de la Figura C.4 Figura C.5 Figura C.6. Concerniente a las medidas de tendencia, la Tabla C.1 y Tabla C.2 indicaron que la capa superficial, intermedia y de fondo tendieron a fluir hacia N-NE, E-NE y E-SE, respectivamente, denotando que las corrientes cerca del fondo marino fluyeron al segundo cuadrante mientras el resto de la columna de agua lo hizo hacia el primero. Respecto de los gráficos Q-Q, la magnitudes de U de la columna de agua fueron subestimadas, mientras V fue subestimada en la capa superficial e intermedia y la de fondo se sobrestimó.

Tabla C.1: Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016.

Capa	Serie $[cm/s]$	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	ADCP1	6.00	-0.76	-0.93	-1.57	-4.67	2.80
Supernetai	Simulado	ADCP1 6.00 -0.76 -0.93 -1.57 -4.67 Simulado 1.99 1.76 1.84 0.86 0.39 ADCP1 4.81 -2.10 -2.24 -2.34 -5.25 Simulado 1.70 1.46 1.51 1.15 0.31 ADCP1 4.26 -1.14 -1.45 -4.96 -3.87	0.39	3.22			
Intermedia	ADCP1	4.81	-2.10	-2.24	-2.34	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.95
memedia	Simulado	1.70	1.46	1.51	1.15		2.65
Fondo	ADCP1	4.26	-1.14	-1.45	-4.96	-3.87	1.41
Polido	Simulado	1.49	1.29	1.31	-0.17	0.28	2.29

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.2: Medidas de tendencia central de la componente V de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de verano 2016.

Capa	Serie $[cm/s]$	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	ADCP1	6.27	-0.88	-0.91	2.59	-4.55	2.73
Supernetai	Simulado	DE Mediana Media Moda P25 P75 6.27 -0.88 -0.91 2.59 -4.55 2.73 3.18 2.48 2.53 -3.35 0.42 4.58 4.83 -2.88 -2.98 -6.09 -6.10 0.33 2.68 0.61 0.57 -4.92 -1.15 2.26 4.06 -1.00 -1.08 -3.72 -3.69 1.54 2.48 -0.28 -0.34 -4.26 -1.93 1.26					
Intermodia	ADCP1	4.83	-2.88	-2.98	-6.09	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.33
memeura	Simulado	2.68	0.61	Media Moda P25 P -0.91 2.59 -4.55 2. 2.53 -3.35 0.42 4. -2.98 -6.09 -6.10 0. 0.57 -4.92 -1.15 2. -1.08 -3.72 -3.69 1. -0.34 -4.26 -1.93 1.	2.26		
Fondo	ADCP1	4.06	-1.00	-1.08	-3.72	-3.69	1.54
rondo	Simulado	2.48	-0.28	-0.34	-4.26	-1.93	1.26

Fuente: Elaboración propia

Figura C.1: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.2: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.3: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Fuente: Elaboración propia

Figura C.4: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.5: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.6: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña verano 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Fuente: Elaboración propia

Respecto de la modelación de condición invernal, se presentó un similar comportamiento que la estival, mayores fluctuaciones hacia N-S y un menor movimiento hacia E-W como lo indicaron las series de tiempo de la Figura C.7, Figura C.8 y Figura C.9 de la capa de fondo, intermedia y superficial, respectivamente de la componente U y la Figura C.10, Figura C.11 y Figura C.12 de las respectivas capas de la componente V. Respecto de los valores medios de la magnitud presentados en la Tabla C.3 y Tabla C.4, la capa intermedia y de fondo tendieron a fluir hacia E-NE, mientras la superficial lo hizo hacia N-NE. Respecto de los gráficos Q-Q, la magnitudes de U y V de la columna de agua fueron sobrestimadas.

Tabla C.3: Medidas de tendencia central de la componente U de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.

Capa	Serie	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
	ADCP1	4.48	-1.16	-1.08	-1.59	-4.11	1.90
Superficial	Simulado	2.09	1.50	1.53	-1.05	0.11	2.95
	ADCP1	4.16	-0.52	-0.72	1.10	-3.43	2.17
Intermedia	Simulado	1.81	1.26	1.27	0.47	0.09	2.48
	ADCP1	4.22	-1.23	-1.59	-1.60	-4.28	1.36
Fondo	Simulado	1.58	1.12	1.11	1.01	0.10	2.15

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.4: Medidas de tendencia central de la componente V de la velocidad de la corriente a partir de modelación hidrodinámica de registros históricos y registrada por *Datos ADCP1* para la capa superficial, intermedia y de fondo correspondiente a la campaña de invierno 2016.

Capa	Serie	DE	Mediana	Media	Moda	P25	P75
Superficial	ADCP1	4.44	-1.30	-1.27	-5.17	-4.38	1.82
	Simulado	3.37	1.85	1.94	-2.35	-0.23	3.99
Intermedia	ADCP1	3.74	-1.98	-2.00	-0.10	-4.35	0.44
Intermedia	Simulado	2.85	0.69	0.75	-2.19	-1.06	2.46
Fondo	ADCP1	3.70	-0.84	-0.75	-1.36	-3.34	1.65
FOIIdo	Simulado	2.61	0.14	0.17	-4.81	-1.49	1.81

Fuente: Elaboración propia

Figura C.7: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.8: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.9: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente U de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.10: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa de fondo de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.11: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa intermedia de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



Figura C.12: Circulación hidrodinámica a partir de registros históricos (en cobre) y registros de *Datos* ADCP1 (en azul), correspondiente a la capa superficial de la campaña invierno 2016 para componente V de la velocidad de la corriente a través de (a) serie de tiempo y (b) gráfico cuantil - cuantil.



ANEXO D FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Como resultado de lo descrito en el numeral 5.3.1.2 en la Figura D.1 y Figura D.2 se presentan las funciones de transferencia para los puntos P1 y P2, respectivamente. Observando la forma de las gráficas de P1 y P2, se infiere una propagación de oleaje muy similar, ya que ambos puntos se encuentran relativamente cerca, ver Figura 4.2.

En la Figura D.1a se presentan funciones de transferencia en el dominio de la altura de ola propagada en el punto FT1. Se observan dos comportamientos distintos, el primero asociado al oleaje proveniente desde el tercer cuadrante (270, 255, 240, 225, 210 y 195 [°]), son las direcciones de incidencia que llegan con menor energía al punto P1, a medida que el periodo aumenta también lo hace la altura de ola. El segundo comportamiento viene asociado a las direcciones del cuarto cuadrante (285, 300, 315, 330, 345 y 360 [°]), el oleaje llega con mayor energía al punto FT1 superando los 0.6 [m], a medida que aumenta el periodo aumenta (disminuye) la altura de ola para 315, 330 y 345 [°] (285, 300 y 360 [°]).

En la Figura D.1b se presentan funciones de transferencia en el dominio de la dirección (diferencial) de la ola propagada en el punto FT1. Se aprecia que el oleaje propagado desde el cuarto cuadrante no presenta mayor variación de dirección, como sí ocurren con el oleaje que se propaga desde el tercer cuadrante. Para la propagación desde 360 y 345 [°] el oleaje llega con una menor dirección a P1, mientras que para 330 y 315 [°] casi no se presentan diferencias con que llega a P1 y para el resto, ya se empiezan a notar los efectos de la difracción producto de Punta Angamos, pues el oleaje llega con una mayor dirección a P1, además considerando que el punto se encuentra al este de la Punta. En cuanto al periodo, no se presenta un comportamiento tan variado en el diferencial de dirección a medida que empieza a aumentar, más bien presenta un comportamiento casi constante. Considerando la dirección que pierde mayor energía al propagarse, 195°, del gráfico se desprende que la ola llega con con 297° y 306° para periodos bajos y altos, respectivamente..

En la Figura D.1c se presentan funciones de transferencia en el dominio de la dirección de ola propagada en el punto FT1. Se observa que el rango de direcciones incidentes en FT1 es 293 - 358 [°] para un periodo peak de 6 [s] quedando en evidencia la existencia de Punta Angamos que provoca difracción en el oleaje propagado desde el tercer cuadrante, quedando la Bahía expuesta al cuarto cuadrante. A medida que el periodo peak, las direcciones reducen el rango llegando a 306 - 333 [°].





Fuente: Elaboración propia

Figura D.2: Funciones de transferencia para el punto FT2 (a) en el dominio del coeficiente de agitación, (b) en el dominio del coeficiente de dirección y (c) en el dominio de las direcciones con que llegan al punto de FT2.



En la Figura D.2a se presentan funciones de transferencia en el dominio de la altura de ola propagada en el punto FT2. Se observa que las direcciones se agrupan en dos grupos,

el primero asociado a aquellas propagaciones provenientes del cuarto cuadrante (315, 330, 345 y 360 [°]) presentando mayor energía en la altura de ola, superando 0.8 [m]. El grupo asociado a aquellas direcciones provenientes del tercer y parte del cuarto cuadrante (195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 y 300 [°]) presentan menores energía en la altura de ola, no superando 0.5 [m].

En la Figura D.2b se presentan funciones de transferencia en el dominio de la dirección (diferencial) de la ola propagada en el punto P2. De acuerdo con el gráfico, se observa que la propagación desde 360 y 345 [°] el oleaje llega prácticamente con la misma dirección a P1 y para el resto, ya se empiezan a notar los efectos de la difracción producto de Punta Angamos, pues el oleaje llega con una mayor dirección a P1, además considerando que el punto se encuentra en una zona resguardada dentro de la Bahía. De acuerdo con el oleaje que disipa mayor energía al propagarse es aquel proveniente desde 195°, pues llega con 300° y 318°, para periodos bajos y altos, respectivamente.

En la Figura D.2c se presentan funciones de transferencia en el dominio de la dirección de ola propagada en el punto P2. Se aprecia que el oleaje que presenta menos variabilidad direccional en su propagación proviene de 360°, disminuyendo la dirección a medida que aumenta el periodo sobre 16 [s]. De acuerdo con 345°, éste llega con una dirección de 340 [°] a FT2, mientras que 330 y 315 [°] presentan muy poca variación direccional aumentando levemente con un mayor periodo. La baja variabilidad que presentan estas tres direcciones se asocia a que no presentan ningún tipo de obstáculo en su camino a P2. Con respecto al resto de direcciones, provenientes en su mayoría desde el tercer cuadrante, el oleaje llega en un rango de 294 - 304 [°] para periodo de 6 [s] y agrupándose en torno a los 320 [°] en periodo de 24 [s]. Este agrupamiento de direcciones tanto para periodos bajos como altos se asocia al fenómeno dominante en el proceso de propagación que es la difracción.