



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS ECOLÓGICOS PROVOCADOS POR LAS EMISIONES LÍQUIDAS Y ADUCCIONES DE AGUA EN LA BAHÍA DE QUINTERO.

Ariel Eduardo González Acevedo

Julio 2020

**Evaluación de los efectos ecológicos provocados por las emisiones líquidas
y aducciones de aguas en la Bahía de Quintero.**

Ariel Eduardo González Acevedo

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Dr. Matías Quezada Labra
Profesor guía
Jefe del departamento de oceanografía
física y modelamiento matemático.
Ecotecnos S.A

Dr. Humberto Díaz Oviedo
Revisor
Docente Universidad de Valparaíso

Dr. Patricio Winckler Grez
Revisor
Docente Universidad de Valparaíso

DECLARACIÓN

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

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

AGRADECIMIENTOS

Tras la finalización de este importante proceso que cierra mi educación de pregrado quiero expresar mi gratitud hacia la gente que impacto durante esta fase.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, en específico, a mis padres quienes me permitieron realizar la educación superior y me apoyaron durante cada evento de esta etapa y a mis hermanos quienes siempre me brindaron ayuda cuando lo necesite.

Agradezco a mi polola Constanza quien me ha apoyado desde el día 1 de la universidad hasta ahora que culmina esta fase, con mucha paciencia y amor, dándome ánimo para llegar más lejos.

Es importante agradecer a los amigos con quienes compartimos buenos momentos que permitieron disfrutar esta fase, de los cuales puedo mencionar a: Galaz, Cammas, Bicet, Pope, Dangel, Danky, Cote y Gigi.

En especial, durante este proceso de la construcción de mi proyecto de titulación quiero agradecer a mi profesor guía Matías Quezada, quien me brindó su apoyo, conocimiento y una buena disposición para resolver mis dudas.

También agradezco el apoyo brindado al interior de la empresa Ecotecnos, quienes con palabras amables y aportes desde su conocimiento y experiencia han dado una valiosa ayuda para esta memoria. Donde me gustaría resaltar a Humberto Díaz, José Ribba, Felipe Galaz y Danitza Molina.

En esta memoria se emplearon muchos datos que fueron otorgados por múltiples servicios gubernamentales con mucha amabilidad, entre ellos me gustaría resaltar al Servicio Hidrológico Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) mediante su organismo Centro Nacional de Datos Oceanográficos de Chile (CENDHOC), Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) de la Armada de Chile, Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), Sernapesca y a los datos del Atlas de oleaje pertenecientes a la carrera Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso.

Finalmente, y no menos importante, le agradezco al Danish Hydraulic Institute (DHI), por permitirme emplear los modelos numéricos bajo una licencia estudiantil para la realización de esta tesis.

Contenido

1	Introducción	1
2	Objetivos	2
2.1	Objetivo general	2
2.2	Objetivos específicos	2
3	Alcances y limitaciones	3
4	Descripción del área de estudio	5
5	Marco teórico	16
5.1	Evaluación de descargas y tomas de agua	16
5.2	Hidrodinámica de ambientes costeros.....	20
5.3	Relación ecológica para modelación numérica	24
6	Materiales y metodología	27
6.1	Procesamiento de antecedentes para modelación numérica	28
6.2	Modelación numérica	45
6.3	Calibración y validación.....	61
6.4	Casos a evaluar	63
6.5	Metodologías de evaluación.....	64
7	Caracterización de antecedentes	78
7.1	Oceanografía física	78
7.2	Oceanografía química.....	80
7.3	Oceanografía biológica	82
7.4	Descargas y captaciones	82
8	Calibración, validación y caracterización de simulación año medio	85
8.1	Simulación de oleaje	86
8.2	Simulación hidrodinámica	89
8.3	Simulación ecológica	101
9	Explotación del modelo numérico.....	107
9.1	Evaluación de temperatura y salinidad	107
9.2	Evaluación de calidad de agua.....	116
9.3	Evaluación de organismos	121
9.4	Evaluación ambiental	169
10	Discusiones y recomendaciones.....	174
10.1	Antecedentes	174
10.2	Análisis en la evaluación	176

11	Conclusiones	185
11.1	Antecedentes	185
11.2	Características generales de las simulaciones numéricas.....	185
11.3	Análisis de evaluación.....	186
12	Referencias	190
13	Anexos	197
13.1	Anexo Alcances y limitaciones	198
13.2	Anexo Marco teórico	200
13.3	Anexo Metodología y materiales	201
13.4	Anexo Caracterización de antecedentes	206
13.5	Anexo Calibración y validación.....	245
13.6	Anexo Resultados	300
13.7	Anexo Discusión	305

Contenido de tablas

Tabla 4-1 Empresas que descargan y captan agua en la Bahía de Quintero.	8
Tabla 4-2 Distribución de la especie moluscos.	13
Tabla 4-3 Distribución de la especie peces.	13
Tabla 4-4 Distribución de la especie crustáceos.	14
Tabla 4-5 Distribución de la especie algas.	14
Tabla 4-6 Imágenes de especies más abundantes en la Bahía de Quintero. a) Jibia, b) Merluza común, c) Jurel, d) Sardina española, e) Camarón nailon, f) Huiro palo.	15
Tabla 5-1 Límites de descarga en agua marina dentro de la ZPL.	16
Tabla 6-1 Cartas náuticas usadas.	29
Tabla 6-2 Información recopilada de oceanografía física utilizados en la modelación numérica.	31
Tabla 6-3 Intervalos de información oceanográfica física utilizados en la modelación numérica.	32
Tabla 6-4 Información recopilada de oceanografía química utilizados en la modelación numérica.	37
Tabla 6-5 Intervalos de información oceanográfica química utilizados en la modelación numérica.	38
Tabla 6-6 Estado de la información por obtener, acerca descargas y aducciones.	44
Tabla 6-7 Variables del modelo ecológico.	54
Tabla 6-8 Procesos generales del modelo <i>Ecolab</i>	56
Tabla 6-9 Procesos en relación de los nutrientes.	57
Tabla 6-10 Procesos en relación de oxígeno disuelto.	58
Tabla 6-11 Funciones utilizadas en la producción primaria.	60
Tabla 6-12 Metodología de evaluación según la variable.	62
Tabla 6-13 Simulaciones realizadas.	63
Tabla 6-14 Casos térmicos a estudiar.	66
Tabla 6-15 Casos de estudio para variaciones salinas.	68
Tabla 6-16 Valores de referencia del índice trófico.	69
Tabla 6-17 Casos biológicos a estudiar.	70
Tabla 6-18 Información sobre los peces seleccionados en el proyecto Aconcagua.	73
Tabla 6-19 Captaciones a utilizar en la evaluación.	73
Tabla 6-20 Rangos de Relevancia ambiental (Rel) del componente.	75
Tabla 6-21 Variables e indicadores de valoración de la Magnitud del Impacto (MI).	76
Tabla 7-1 Lista de descargas y captaciones en la Bahía de Quintero.	83
Tabla 7-2 Datos de descarga promedios a utilizar en la modelación.	84
Tabla 7-3 Datos descarga y captación del proyecto Aconcagua.	84
Tabla 8-1 Resumen de los resultados en los procesos de calibración y validación.	85
Tabla 8-2 Configuración modelo hidrodinámico.	89
Tabla 8-3 Configuración modelo hidrodinámico, coeficientes relacionados con modelo termo-salino.	94
Tabla 8-4 Configuración de forzantes para modelación termo-salina.	94
Tabla 8-5 Selección de nutrientes para casos a modelar.	102
Tabla 8-6 Concentraciones de variables de organismos para simular.	102
Tabla 9-1 Resumen de superficie de plumas con respecto a bahía.	113
Tabla 9-2 Razón de variación de los coeficientes TRIX de las distintas simulaciones. ...	119
Tabla 9-3 Variación entre variables dependientes del coeficiente TRIX.	120

Tabla 9-4 Razón de variación respecto de la simulación natural de las variables acumuladas.....	121
Tabla 9-5 Tasa de succión inicial de individuos.....	164
Tabla 9-6 Mortalidad por arrastre en las distintas captaciones.....	165
Tabla 9-7 Pérdidas de adultos según el estadio de la especie anchovetas (<i>Engraulis ringens</i>).....	166
Tabla 9-8 Pérdidas de adultos según el estadio de la especie sardinas (<i>Strangomera bentincki</i>).....	167
Tabla 9-9 Masa correspondiente a los adultos perdidos por el total de captaciones durante la simulación anual.....	168
Tabla 9-10 Valorización del impacto de la variable temperatura.....	170
Tabla 9-11 Valoración del impacto sobre la variable plancton.....	170
Tabla 9-12 Valoración del impacto sobre la variable pesca.....	173
Tabla 13-1 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tp punto qnt-1_inv.....	209
Tabla 13-2 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp punto qnt-1_inv.....	209
Tabla 13-3 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp punto qnt-1_inv.....	210
Tabla 13-4 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tp punto qnt-1_ver.....	210
Tabla 13-5 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp punto qnt-1_ver.....	211
Tabla 13-6 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp punto qnt-1_ver.....	211
Tabla 13-7 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Tp Atlas durante el periodo de qnt-1_inv.....	212
Tabla 13-8 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1_inv.....	212
Tabla 13-9 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1_inv.....	213
Tabla 13-10 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Tp Atlas en el periodo de qnt-1_ver.....	213
Tabla 13-11 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1_ver.....	214
Tabla 13-12 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1_ver.....	214
Tabla 13-13 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tm punto qnt-5.....	215
Tabla 13-14 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tp, Atlas.....	215
Tabla 13-15 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp, Atlas.....	216
Tabla 13-16 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp, Atlas.....	216
Tabla 13-17 Espectro medio por estación. A) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera.....	220
Tabla 13-18 Lista de armónicos de la marea durante el año 2016.....	221
Tabla 13-19 Tabla de incidencia velocidad vs dirección viento.....	224
Tabla 13-20 Tabla de incidencia, capa superficial, punto qnt-1_inv.....	227
Tabla 13-21 Tabla de incidencia, capa intermedia, punto qnt-1_inv.....	227
Tabla 13-22 Tabla de incidencia, capa fondo, punto qnt-1_inv.....	227
Tabla 13-23 Tabla de incidencia, capa superficial, punto qnt-1_ver.....	228
Tabla 13-24 Tabla de incidencia, capa intermedia, punto qnt-1_ver.....	228
Tabla 13-25 Tabla de incidencia, capa fondo, punto qnt-1_ver.....	228
Tabla 13-26 Tabla de incidencia, capa superficial, punto qnt-4.....	229
Tabla 13-27 Tabla de incidencia, capa intermedia, punto qnt-4.....	229
Tabla 13-28 Tabla de incidencia, capa fondo, punto qnt-4.....	229
Tabla 13-29 Información de nutriente nitrato obtenida de la bibliografía recopilada.....	235
Tabla 13-30 Información de nutriente fosfato recopilada de la bibliografía.....	238
Tabla 13-31 Datos de biomasa de clorofila a biográficos.....	241
Tabla 13-32 Resumen de cálculo de biomasa de fitoplancton y clorofila a.....	242
Tabla 13-33 Información de temperatura en periodos de calibración y validación.....	269

Tabla 13-34 Información de salinidad en periodos de calibración y validación.	270
--	-----

Contenido de Figuras

Figura 4-1 Localización de la Bahía de Quintero.	6
Figura 4-2 Empresas ubicadas en la Bahía de Quintero.	7
Figura 4-3 Localización de caletas pesqueras de Quintero y AMERBs.	10
Figura 4-4 Toneladas desembarcadas por caletas.	11
Figura 4-5 Proporción de especies descargadas en cada caleta.	11
Figura 4-6 Toneladas desembarcadas por especies.	12
Figura 4-7 Toneladas desembarcadas por especies, excluyendo las jibias.	12
Figura 5-1 Malla computacional para simulación de oleaje.	23
Figura 5-2 Esquema de un modelo biológico.	25
Figura 5-3 Ciclo de nutrientes, izquierda ciclo del nitrógeno y derecha ciclo de fósforo.	25
Figura 6-1 Metodología del proyecto.	27
Figura 6-2 Sonatas de las cartas náuticas usadas.	28
Figura 6-3 Puntos con información de oceanografía física.	33
Figura 6-4 Estaciones de medición en proyecto Aconcagua.	38
Figura 6-5 Ubicación de puntos de salida del modelo HYCOM.	39
Figura 6-6 Puntos P.O.A.L. en la V región.	42
Figura 6-7 Malla para modelación de oleaje.	48
Figura 6-8 Esquema de la grilla vertical sigma.	51
Figura 6-9 Malla para modelación hidrodinámica.	52
Figura 6-10 Esquema resumen modelo <i>Ecolab</i> configuración <i>Eutrophication 2</i>	55
Figura 6-11 Funcionamiento nutrientes inorgánicos en <i>Ecolab Eutrophication 2</i>	57
Figura 6-12 Funcionamiento variable oxígeno disuelto en <i>Ecolab Eutrophication 2</i>	58
Figura 6-13 Puntos de extracción de secciones representativas de la bahía.	65
Figura 6-14 Historial fenómeno del Niño y diferencial de TSM en Valparaíso.	67
Figura 6-15 Estimación de la superficie de la bahía.	67
Figura 6-16 Esquema de ambientes oligotrófico y eutrófico.	68
Figura 6-17 Esquema del modelo AEL.	71
Figura 6-18 Jerarquización de impactos ambientales.	77
Figura 7-1 Posición de las descargas y tomas de agua en la Bahía de Quintero.	83
Figura 8-1 Parámetros de resumen de las forzantes de año medio oleaje.	88
Figura 8-2 Forzante de viento de año medio.	92
Figura 8-3 Forzante intercambio de calor para modelación año medio.	93
Figura 8-4 Forzante año medio de temperatura.	95
Figura 8-5 Forzante año medio de salinidad.	96
Figura 8-6 Distribución de corrientes de la simulación hidrodinámica.	98
Figura 8-7 Distribución de temperatura en simulación caso SA.	99
Figura 8-8 Distribución de salinidad en simulación caso SA.	100
Figura 8-9 Comportamiento base de la simulación ecológica.	103
Figura 8-10 Esquema teórico del ciclo anual del fitoplancton en la costa de Valparaíso.	104
Figura 8-11 Esquema resumen del modelo depredador-presa Lotka-Volterra.	105
Figura 9-1 Diferencial de temperatura entre el caso SA y caso SN.	109
Figura 9-2 Diferencial de temperatura entre el caso SN+D3 y caso SN.	110
Figura 9-3 Diferencial de temperatura entre el caso SN+D4 y caso SN.	111
Figura 9-4 Diferencial de temperatura entre el caso SD90_T y caso SN.	112

Figura 9-5 Diferencial de salinidad entre el caso SA+D13 y el caso SA.	115
Figura 9-6 Esquema del comportamiento general coeficiente TRIX.	116
Figura 9-7 Serie de tiempo de la integración de organismos al interior del dominio en el caso SA y SN.	123
Figura 9-8 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SA y SN.	124
Figura 9-9 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SA y SN.	125
Figura 9-10 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SA y SN. ...	126
Figura 9-11 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SN+D3 y SN.....	129
Figura 9-12 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SN+D3 y SN.	130
Figura 9-13 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SN+D3 y SN.	131
Figura 9-14 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SN+D3 y SN.	132
Figura 9-15 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SN+D4 y SN.....	133
Figura 9-16 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SN+D4 y SN.	134
Figura 9-17 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SN+D4 y SN.	135
Figura 9-18 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SN+D4 y SN.	136
Figura 9-19 Serie de tiempo de la integración de organismos al interior del dominio en el caso SD90_T y SN.....	139
Figura 9-20 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SD90_T y SN.	140
Figura 9-21 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SD90_T y SN.	141
Figura 9-22 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SD90_T y SN.	142
Figura 9-23 Serie de tiempo de la integración de organismos al interior del dominio en el caso SD90_P y SN.....	145
Figura 9-24 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SD90_P y SN.	146
Figura 9-25 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SD90_P y SN.	147
Figura 9-26 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SD90_P y SN.	148
Figura 9-27 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SD90_NTK y SN.	151
Figura 9-28 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos D90_NTK y SN.	152
Figura 9-29 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SD90_NTK y SN.	153
Figura 9-30 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SD90_NTK y SN.	154
Figura 9-31 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SA+D13 y SA.	157

Figura 9-32 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SA+D13 y SA.	158
Figura 9-33 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SA+D13 y SA.	159
Figura 9-34 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SA+D13 y SA.	160
Figura 9-35 Distribución de la producción media de fitoplancton en los casos de estudio.	162
Figura 9-36 Distribución de la producción media de zooplancton en los casos de estudio.	163
Figura 9-37 Superficie afectada por las captaciones.	164
Figura 9-38 Concentración de zooplancton en cada punto de captación.	165
Figura 9-39 Individuos, huevos y larvas, captados durante la simulación.	166
Figura 9-40 Toneladas desembarcadas en la Bahía de Quintero de los peces sardina (izquierda) y anchoveta (derecha).	168
Figura 9-41 Comparación de los diferenciales de temperatura entre los casos SA y Recuperación.	171
Figura 9-42 Diferenciales de concentración de plancton en los casos SA y Recuperación.	172
Figura 10-1 Variación de TSM a lo largo de Chile.	178
Figura 10-2 Esquemmatización del efecto de las descargas térmicas sobre el plancton.	181
Figura 13-1 Variación histórica de la salida del estero Campiche.	199
Figura 13-2 Comparación de datos de viento entre la Estación Meteorológica Principal y la Estación La Greda.	202
Figura 13-3 Comparación de datos de viento entre la Estación Meteorológica Principal y la Estación Junta de vecinos de Concón.	203
Figura 13-4 Validación de la variabilidad de la elevación superficial del mar. Recuadro superior construido mediante datos satelitales, recuadro inferior mediante simulación ..	205
Figura 13-5 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-1_inv.	217
Figura 13-6 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-1_ver.	217
Figura 13-7 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-2.	217
Figura 13-8 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-3.	218
Figura 13-9 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. En Atlas en periodo de qnt-1_inv.	218
Figura 13-10 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección en Atlas en periodo de qnt-1_ver.	218
Figura 13-11 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Información total de Atlas.	219
Figura 13-12 Espectro promedio entre los años 1980-2017.	219
Figura 13-13 Serie de tiempo desnivelación nivel del mar durante el año 2016.	221
Figura 13-14 Serie de tiempo de velocidad y dirección de viento, y distribución de velocidades de vientos, en la Estación principal de Quintero.	224
Figura 13-15 Datos de intercambio de calor en Estación Principal de Quintero.	225
Figura 13-16 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-1_inv.	230

Figura 13-17 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-1_ver.	230
Figura 13-18 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-2.	230
Figura 13-19 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-3.	231
Figura 13-20 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-4.	231
Figura 13-21 Comparación de mediciones de temperatura punto qnt-1.	232
Figura 13-22 Información CTD invierno, temperatura (izquierda) salinidad (derecha).	233
Figura 13-23 Información CTD verano, temperatura (izquierda) salinidad (derecha).	233
Figura 13-24 Variabilidad de temperatura superficial, V Región.	234
Figura 13-25 Información recopilada de nitrato.	236
Figura 13-26 Información recopilada de nitrito.	236
Figura 13-27 Información recopilada de amonio.	237
Figura 13-28 Información recopilada de fosfato.	239
Figura 13-29 Mediciones de DO durante la campaña de invierno (izquierda) y durante la campaña de verano (derecha).	240
Figura 13-30 Información recopilada de oxígeno disuelto.	240
Figura 13-31 Composición numérica de las taxa más abundantes identificados en la comunidad fitoplanctónica. En la izquierda la campaña de invierno y en la derecha la campaña de verano.	242
Figura 13-32 Composición numérica de los taxa más abundantes identificados en la comunidad zooplanctónica. En la izquierda la campaña de invierno y en la derecha la campaña de verano.	243
Figura 13-33 Gráfica caudales de descarga.	243
Figura 13-34 Gráfica temperaturas en descargas.	244
Figura 13-35 Gráfica Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) en descargas.	244
Figura 13-36 Gráfica fósforo en descargas.	244
Figura 13-37 Calibración modelo oleaje punto qnt-1, estación de invierno.	248
Figura 13-38 Validación modelo oleaje punto qnt-1, estación de verano.	249
Figura 13-39 Validación oleaje punto qnt-2.	250
Figura 13-40 Validación oleaje punto qnt-3.	251
Figura 13-41 Validación oleaje punto qnt-5.	252
Figura 13-42 Calibración de marea punto qnt-1, estación de invierno.	254
Figura 13-43 Validación de marea punto qnt-1, estación de verano.	255
Figura 13-44 Calibración corrientes de la componente U, en el punto qnt-1, estación de invierno.	258
Figura 13-45 Calibración corrientes de la componente V en el punto qnt-1, estación de invierno.	259
Figura 13-46 Validación de corrientes de la componente U, en el punto qnt-1, estación de verano.	260
Figura 13-47 Validación de corrientes de la componente V, en el punto qnt-1, estación de verano.	261
Figura 13-48 Validación corrientes de la componente U, en el punto qnt-2.	262
Figura 13-49 Validación corrientes de la componente V, en el punto qnt-2.	263
Figura 13-50 Validación corrientes de la componente U, punto qnt-3.	264
Figura 13-51 Validación corrientes de la componente V, en el punto qnt-3.	265
Figura 13-52 Validación corrientes de la componente U, punto qnt-4.	266
Figura 13-53 Validación corrientes de la componente V, en el punto qnt-4.	267
Figura 13-54 Calibración de temperatura en punto qnt-1_inv.	271
Figura 13-55 Validación de temperatura en punto qnt-1_ver.	271

Figura 13-56 Calibración de temperatura por CTD puntos E-1 a E-7.	274
Figura 13-57 Calibración de temperatura por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.	275
Figura 13-58 Validación de temperatura por CTD puntos E-1 a E-7.	276
Figura 13-59 Validación de temperatura por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.	277
Figura 13-60 Calibración de salinidad por CTD puntos E-1 a E-7.	278
Figura 13-61 Calibración de salinidad por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.	279
Figura 13-62 Validación de salinidad por CTD puntos E-1 a E-7.	280
Figura 13-63 Validación de salinidad por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.	281
Figura 13-64 Distribución de las variables temperatura y salinidad en las simulaciones de calibración y validación.	282
Figura 13-65 Elección año representativo del modelo HYCOM en periodo de invierno. .	284
Figura 13-66 Elección año representativo del modelo HYCOM en periodo de verano....	285
Figura 13-67 Distribución de las corrientes durante la simulación hidrodinámica.	286
Figura 13-68 Variación de variables del modelo ecológico al interior de la bahía en la capa superior.	289
Figura 13-69 Variación de variables del modelo ecológico al interior de la bahía en la capa intermedia.	290
Figura 13-70 Variación de variables del modelo ecológico al interior de la bahía en la capa fondo.	291
Figura 13-71 Distribución vertical de nutrientes.	293
Figura 13-72 Esquema del modelo depredador-presa Lotka-Volterra.	295
Figura 13-73 Distribución de la concentración de fitoplancton en Caso SA.	297
Figura 13-74 Componente W de la corriente en la simulación Caso SA.	298
Figura 13-75 Distribución de concentración de zooplancton en Caso SA.	299
Figura 13-76 Diferencial de salinidad entre los Casos SA y SN.	301
Figura 13-77 Gráfica coef. TRIX capa superior en distribución de puntos.	302
Figura 13-78 Gráfica coef. TRIX capa intermedia en distribución de puntos.	303
Figura 13-79 Gráfica coef. TRIX capa fondo en distribución de puntos.	304
Figura 13-80 Diferencial de componente w de la corriente entre los Casos SA y SN.	306
Figura 13-81 Diferencial de componente w de la corriente entre los Casos SD90_T y SN.	307
Figura 13-82 Diferencial de componente w de la corriente entre los Casos SN+D3 y SN.	308
Figura 13-83 Diferencial de componente w de la corriente entre los Casos SN+D4 y SN.	309
Figura 13-84 Diferencial de componente w de la corriente entre los Casos SA+D13 y SA.	310

RESUMEN

El presente estudio consistió en la evaluación de los efectos ocasionados por el conjunto de las descargas y aducciones de agua de mar instaladas en la bahía de Quintero, que afectan el medio marino.

La recopilación de datos oceanográficos (físicos, químicos y biológicos) y de las descargas y captaciones de la bahía, permitió la configuración de modelos numéricos para representar la hidrodinámica y un sistema ecológico simplificado correspondiente a la zona de estudio. Esta simulación fue modificada para la representación de los casos de estudio cuyo objetivo fue reflejar los efectos de las actividades antrópicas bajo las condiciones actuales y extremas, según lo establecido en este documento. Los efectos antrópicos fueron comparados contra la representación de la bahía sin descargas ni captaciones, según las variables temperatura, salinidad, calidad de agua y organismos (microorganismos).

En este estudio se demostró el incremento de la temperatura del agua de la bahía durante el año simulado, ocasionado por las descargas actuales. El diferencial de temperatura provocado en la bahía fue superior al incremento térmico característico por el fenómeno del Niño. A pesar que el modelo ecológico no estableció una tolerancia máxima de temperatura en los microorganismos, el impacto térmico reduce el material orgánico debido corrientes ascendentes, inducidas por la disminución de densidad (asociadas al aumento de temperatura), que expulsan organismos de parte de la columna de agua. Este fenómeno ocasionó un cambio en la calidad de agua con una tendencia hacia el estado oligotrófico respecto a la condición natural de la bahía, es decir, sin descargas.

El análisis de las captaciones instaladas en la actualidad culminó con una estimación de la cantidad de microorganismos capturados que pueden asociarse a peces ausentes en la bahía en un futuro próximo, que en esta memoria se centraron en las especies anchovetas (*Engraulis ringens*) y sardinas (*Strangomera bentincki*). La magnitud de estas pérdidas se asemejó a algunos de los valores en los registros de toneladas desembarcadas artesanalmente en la bahía de Quintero, lo cual permite asociar el impacto de las captaciones y el desembarco artesanal de las especies estudiadas, sin embargo, se requieren estudios más profundos para determinar si las captaciones generan daño sobre las especies analizadas en el corto o largo plazo.

Según las simulaciones realizadas, la norma D.S. N°90/ 2000, que limita ciertas características del efluente expulsado sobre cuerpos de agua, no evitó los impactos en la bahía de Quintero. La zona de estudio elegida fue ideal para este tipo de análisis, en relación a la gran cantidad de descargas y a la protección natural de sus costas, que dificulta el transporte de la alteración provocada por los efluentes. Esta normativa no considera ciertos aspectos como las descargas aledañas que pueden emplear los máximos valores de la norma, la salinidad, el caudal o la posición, cuya relevancia fue demostrada mediante modelaciones numéricas, por lo cual, se requirió de criterios sobre el cuerpo de agua que permitiera evaluar los impactos.

1 INTRODUCCIÓN

En la región de Valparaíso de Chile, al norte de la bahía con el mismo nombre, se localiza la bahía de Quintero, conocida como una de las costas más industrializadas del país, a pesar de las actividades pesqueras y turísticas que también se realizan en la zona. A mediados del siglo XX comienza la historia industrial de la bahía, por su topografía de llanura y cercanías al mar, que facilita la difusión de las emisiones gaseosas (Barrera, 2015). En otro aspecto, esta localización permite la instalación de obras portuarias, puesto que por su geografía resguarda la costa del oleaje reinante (dirección SO) y del oleaje proveniente del cuarto cuadrante, característico de las épocas estivales. Algunas de las empresas, que se emplazaron en la bahía, aprovechan esta ubicación para realizar sus trabajos u obras, las que han alterado las condiciones naturales del medio, ya sea aire, suelo o agua, requiriendo estudios que identifiquen y estimen estos efectos.

Esta memoria se centra en los impactos sobre el ambiente marino por causa de las múltiples descargas y captaciones en la bahía propiedad de distintas empresas, las cuales, por si solas cumplen con las normativas correspondientes. La legislación vigente corresponde a la norma primaria, Decreto Supremo del Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia N°90 (2000), cuya función es la delimitación de las magnitudes en ciertos parámetros de los efluentes sobre cuerpos de agua. Ahora bien, este marco legal nacional no obliga el estudio del impacto combinado con las descargas aledañas y se desentiende de las magnitudes de las alteraciones sobre el cuerpo de agua, a causas de los efectos combinados o sinérgicos de dichos efluentes. Considerando que la protección geográfica de esta bahía dificulta el intercambio de agua hacia zonas de mar abierto, las descargas cobran mayor importancia, pues sus efluentes permanecen más tiempo en el sector favoreciendo las alteraciones de las características del cuerpo de agua.

Para las tomas de aguas en el mar no se presenta alguna normativa que limite sus características.

A raíz de lo mencionado, se propone como objetivo la evaluación de los efectos en la bahía causado por la totalidad de las descargas y captaciones. Para este estudio se realiza una simulación numérica en la bahía de Quintero de la hidrodinámica y una representación ecológica, que depende del transporte generado por las corrientes. A esta simulación de la bahía, se agregan las representaciones numéricas de las descargas y captaciones presentes en dicho sector. Con estos modelos se obtienen escenarios modificables y medibles que permiten evaluar las posibles alteraciones en la bahía. El cambio provocado por la descarga es evaluado según las propiedades del cuerpo de agua, la temperatura y salinidad, la calidad de agua y en las concentraciones de microorganismos, mientras que, las captaciones son evaluadas sobre los microorganismos capturados y su implicancia sobre peces adultos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar, mediante modelos numéricos, los efectos de las descargas y aducciones de agua de mar en la bahía de Quintero sobre la calidad de agua y comunidades biológicas (microorganismos).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener y procesar los datos de campo o simulados para realizar la modelación hidrodinámica.
- Simular mediante modelos matemáticos las características hidrodinámicas de la bahía de Quintero, bajo forzantes naturales.
- Obtener o estimar la información de las descargas y captaciones realizadas sobre la bahía.
- Simular mediante modelos matemáticos las características hidrodinámicas de la bahía de Quintero, bajo los efectos de las descargas y aducciones de agua.
- Obtener datos de nutrientes y organismos, que permitan establecer un sistema ecológico que interactúe con las alteraciones de la bahía.
- Simular la distribución espacial de nutrientes, fitoplancton y zooplancton en toda la bahía.
- Evaluar la variación de temperatura y salinidad en el medio marino producto de las descargas en la bahía.
- Evaluar la condición de calidad de agua en la bahía de Quintero.
- Evaluar las variaciones de plancton por las alteraciones ambientales causadas por las descargas.
- Evaluar el impacto biológico asociado a las tomas de agua instaladas en la bahía.

3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los modelos numéricos fueron una de las principales herramientas para desarrollar esta memoria, por ello, gran parte de las limitaciones correspondieron a éstos. La calidad de las simulaciones numéricas es dependiente de los datos utilizados para el forzamiento de los fenómenos a describir y de la información que caracterice la realidad y permita la evaluación de la simulación. Esta memoria no consideró, en ningún caso, la medición de datos de campo, solo recopilación y su posterior procesamiento, que permitió revelar las limitantes en la información obtenida (capítulo 6.1). En cuanto a las características de las descargas y captaciones, las fuentes de información fueron los organismos gubernamentales, la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), La Armada de Chile mediante su organismo Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Directemar), Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), donde las empresas declaran su información sobre las descargas y captaciones asociadas a sus proyectos. Esta información fue bastante limitada, por lo tanto, se debieron realizar una serie de supuestos para el cumplimiento de los objetivos de esta memoria.

Según el modelo numérico elegido, se establece la capacidad de describir los fenómenos mediante las ecuaciones que lo componen. En esta memoria se eligió trabajar con los modelos MIKE 21, MIKE 3 y MIKE Eco Lab, pertenecientes a la empresa DHI, que fueron facilitados mediante un convenio estudiantil.

Para los modelos de oleaje e hidrodinámicos se despreció el transporte de sedimento al interior del dominio, por lo cual se modeló con una batimetría constante. La costa se estableció según lo conformado naturalmente, es decir, no se consideraron las estructuras de la bahía, como los muelles. Al establecer la costa cerrada, se omitió el aporte del estero Campiche a la bahía, lo que fue posible por la breve apertura durante los últimos años (anexo 13.1.1). Como el estero Campiche consiste en un cuerpo de agua de volumen importante, su descarga puede implicar efectos sobre la temperatura y salinidad de la bahía, además de ciertos efectos en los organismos, según las concentraciones de nutrientes y material orgánico, disueltos en el agua.

Por la ausencia de datos se decidió omitir las entradas y salidas de agua mediante los fenómenos precipitación y evaporación, respectivamente, aunque es posible suponer que estos fenómenos no presentan grandes cambios en las características del cuerpo de agua frente a la escala espacial de la bahía y a la ventana temporal analizada, de un año.

Las forzantes de la simulación hidrodinámica fueron realizadas a partir de los datos recopilados de los fenómenos generadores de la hidrodinámica, los cuales fueron promediados con el fin de obtener la variación media anual de cada fenómeno, como se describió con mayor detalle en el capítulo 6. Este procedimiento se realizó debido a la ausencia de información con una detallada variación espacio-temporal para cada fenómeno, sin embargo, se obtuvo una gran cantidad de datos de varios años en intervalos constantes que permitieron el cálculo del promedio. Esta aproximación permitió describir las tendencias generales de la hidrodinámica de la bahía y, con ello, el transporte producido que se requirió para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

En el modelo ecológico fue utilizado el módulo *Eutrophication Model 2*, el cual propone la utilización de variables, correspondientes a nutrientes y organismos, junto a los procesos que las relacionan, como una simplificación al sistema biológico marino de la bahía, que permitió su resolución mediante ecuaciones. El sistema natural real resultó ser de mayor complejidad por la convivencia de múltiples especies bajo una cadena trófica, cuyas relaciones pueden cambiar según ciertas condiciones ambientales. Por otro lado, las

especies en un ambiente marino pueden presentar distintas tolerancias ante los cambios en el medio, que pueden conllevar la migración o muerte de estas especies, cuyas acciones no fueron representadas por el modelo numérico.

De forma similar, el modelo simuló una pequeña parte de los nutrientes, simplificando las reacciones químicas asociadas a sus transformaciones. Sobre las fuentes de los nutrientes del sistema, fueron despreciados la atmósfera, fondo marino y desechos de organismos de mayor tamaño, a causa de falta de datos.

El estudio se centró en la simulación de un sistema ecológico, simplificado, con organismos que interactúan con forzantes como la hidrodinámica, luz, nutrientes y temperatura. Por tanto, los impactos encontrados se relacionaron a estos parámetros, aunque no se descartó ni afirmó que la bahía de Quintero estuviera impactada por la introducción antropogénica de sustancias químicas (como pueden ser carbón, hidrocarburos, cloro, etc.).

4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La descripción del área de estudio se centró en tres puntos: la geografía y morfología (que afecta la hidrodinámica simulada), las industrias (como uno de los agentes que alteran la calidad de agua) y los antecedentes de la pesca artesanal en la bahía (identificando esta actividad como principal damnificado de la alteración de calidad de agua en la bahía).

4.1.1 GEOGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La bahía de Quintero se ubica en Chile, en la Región de Valparaíso, entre las latitudes $32^{\circ}44'-32^{\circ}47'$ [S] y longitudes $71^{\circ}28'-71^{\circ}32'$ [O], como se muestra en la Figura 4-1. La bahía se encuentra entre las comunas de Quintero y Puchuncaví.

La morfología de la bahía consiste en un valle rodeado por terrenos elevados tal como, la península Los Molles por el sur y, al norte, el accidente geográfico donde se localiza la punta de Horcón y punta Ventanilla. A causa de las elevaciones y de la penetración hacia el mar de estas puntas, el valle se encuentra resguardado de las componentes norte y sur de los fenómenos del viento y oleaje. Es importante mencionar que el oleaje reinante en Chile proviene del SW, mientras que, durante la época estival el frente del cuarto cuadrante adquiere importancia (SHOA, 2019). Por esta razón la protección de la bahía se torna tan eficiente y permite su utilización como puerto.

4.1.2 INDUSTRIA EN LA BAHÍA DE QUINTERO

En la actualidad, la bahía de Quintero se encuentra industrializada, no obstante, en un comienzo las comunas de Quintero y Puchuncaví focalizaban sus esfuerzos en el sector de la agronomía y pesca, además de ser un balneario para la sociedad de Santiago. Esto cambia con el comienzo de la actividad industrial en el año 1952, año en que la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) se instaló con un muelle petrolero. En 1964 se emplaza la empresa ENAMI en la bahía y, junto a ellos, la empresa CHILECTRA con una termoeléctrica de carbón, como apoyo al sistema eléctrico nacional. En ese tiempo se justificó la localización de la termoeléctrica por la topografía de llanura y los vientos provenientes del mar, que disminuirían la contaminación aérea (Middleton y Mallette, 1957) (Barrera, 2015). En 1965 se publica el Plan Regulador Intercomunal de Valparaíso (PRVI), que define las comunas de Ventanas y Quintero como localidades industriales, que pueden provocar daños hacia la propiedad y salud pública fuera de las áreas de trabajo (Barrera, 2015).

En la actualidad, se han instalado múltiples empresas en la bahía (Figura 4-2), sin embargo, este estudio se centró en las empresas que podrían alterar la calidad de agua de la bahía (Tabla 4-1). Las descargas más usuales son producto de las termoeléctricas, que capturan el agua de mar para condensar el vapor utilizado en la generación de energía, elevando la temperatura del agua de mar que luego se desecha hacia el mar (Ministerio de Energía, 2016). En contraste, las regasificadoras usan agua de mar para elevar la temperatura del gas licuado y volverlo a su estado gaseoso, disminuyendo la temperatura del agua que se descarga al mar (GAC S.A., 2013).

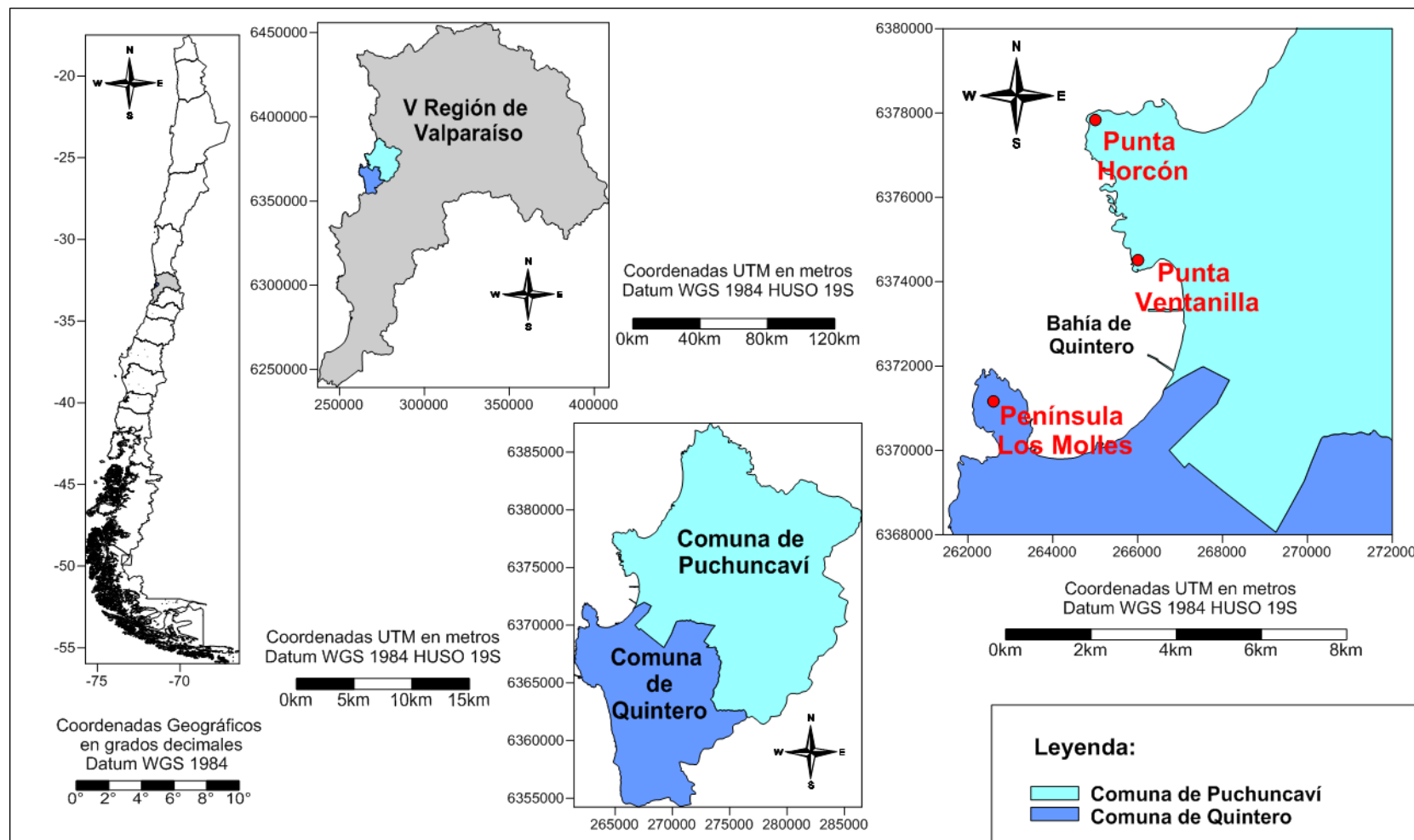


Figura 4-1 Localización de la Bahía de Quintero.

Fuente: Elaboración propia.

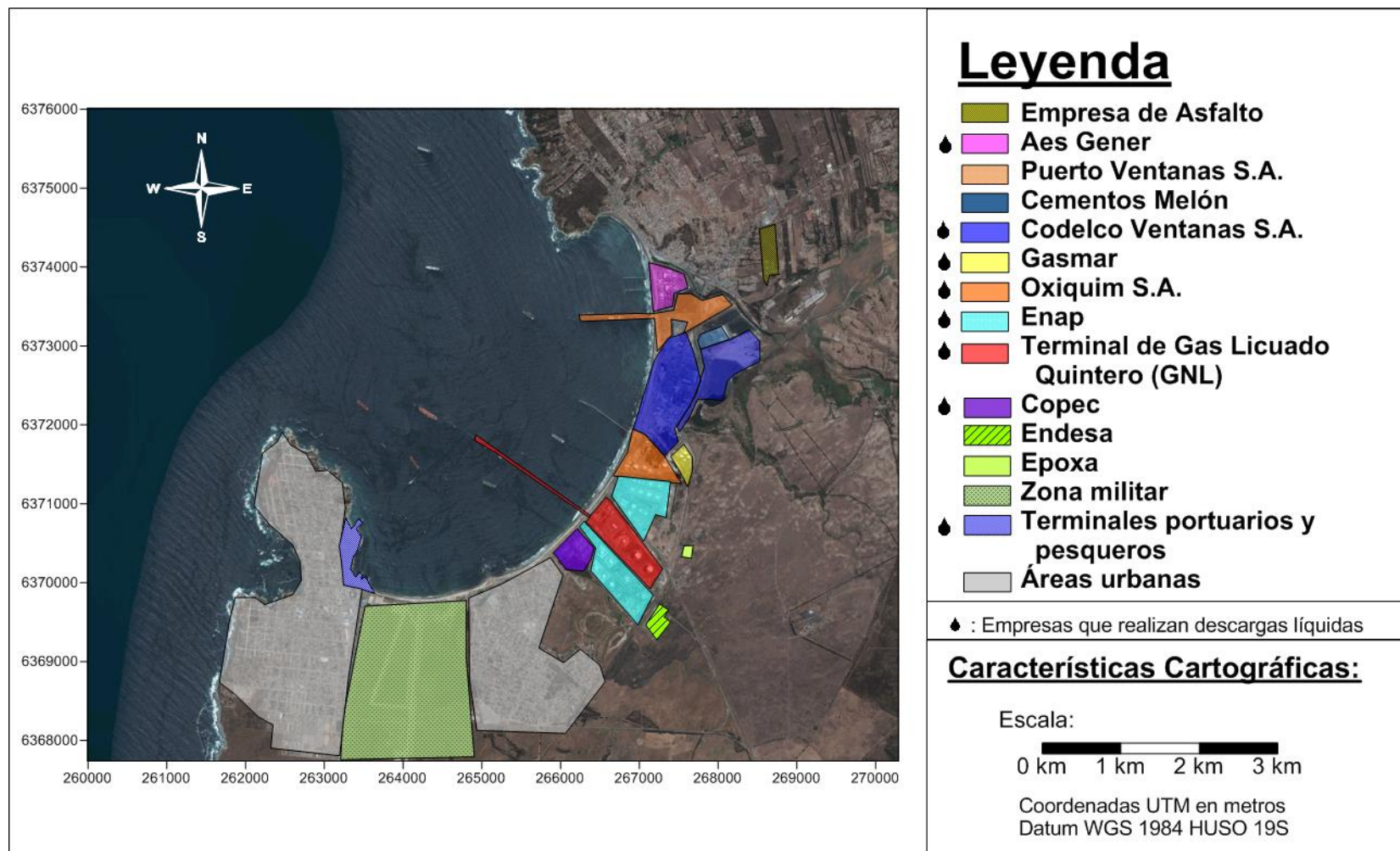


Figura 4-2 Empresas ubicadas en la Bahía de Quintero.

Fuente: Elaboración propia, con información aportada del Programa para la Recuperación Ambiental y Social, PRAS (https://pras.mma.gob.cl/desarrollo_historico_ventanas visitada el 23 de noviembre del 2018).

Tabla 4-1 Empresas que descargan y captan agua en la Bahía de Quintero.

Nº	Empresa	Identificación	Tipo de empresa	Tipo de descarga	¿Incluye captación de agua?	¿Dentro de la ZPL?
1	CODELCO DIVISIÓN VENTANAS S.A.	CODELCO	Empresa productora de cobre	Descarga de RILES	✗	✓
2	ENAP REFINERÍAS S.A.	ENAP	Refinería de hidrocarburos	Descarga de RILES	✗	✗
3	GASMAR S.A	GASMAR	Importación y venta de GLP	Descarga de agua utilizada para la presurización y enfriamiento de GLP	✓	✗
4	TERMINAL DE GAS NATURAL LICUADO (GNL) QUINTERO S.A.	GNL QUINTERO	Recepción y regasificación de GNL	Descarga de agua utilizada para la presurización y enfriamiento de GNL	✓	✗
5	PESQUERA QUINTERO S.A.	PESQUERA QUINTERO	Descarga y manejo de productos pesqueros	Descarga de RILES	✗	✓
6	COMPAÑÍA DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.	COPEC	Planta de lubricantes	Descarga de RILES	✗	✗
7	CENTRAL TERMOELÉCTRICAS CAMPICHE S.A.	Campiche	Termoeléctrica	Descarga de agua utilizada para enfriamiento de la termoeléctrica	✓	✓
8	CENTRAL TERMOELÉCTRICAS NUEVA VENTANAS	Nueva Ventanas	Termoeléctrica	Descarga de agua utilizada para enfriamiento de la termoeléctrica	✓	✓
9	AES GENER S.A.	Ventanas N°1	Termoeléctrica	Descarga de agua utilizada para enfriamiento de la termoeléctrica	✓	✓
10		Ventanas N°2	Termoeléctrica	Descarga de agua utilizada para enfriamiento de la termoeléctrica	✓	✓
11	EMPRESAS SERVICIOS SANITARIOS DE VALPARAÍSO S.A. (ESVAL)	ESVAL	Servicios sanitarios	Descarga de aguas servidas	✗	✗

Leyenda:
✓ : Sí ✗ : No

Fuente: Elaboración propia con información de los organismos públicos SISS, DIRECTEMAR, SEA y SMA.

Las descargas pueden variar la temperatura del cuerpo de agua obligando la migración de algunas especies marinas (Ministerio de Energía, 2016). El resto de las descargas en Quintero corresponden a la descarga de residuos industriales (RILES) y una descarga de aguas servidas, las cuales, pueden modificar parámetros físicos-químicos del agua. Se debe tener en consideración las sustancias contenidas en los efluentes que pueden alterar las comunidades biológicas, como son: los nutrientes, nitrógeno (N) o fósforo (P); metales y otras sustancias químicas (ej.: antifouling).

En la Tabla 4-1 se señala las empresas que captan agua marina para usos industriales. Estas captaciones producen los efectos de arrastre y atrapamiento, que afectan a las comunidades marinas según el tipo de captación (Ministerio de Energía, 2016), y eventualmente, modifican la cantidad de organismos en la columna de agua.

4.1.3 LA PESCA EN LA BAHÍA DE QUINTERO

En los comienzos de las comunas de Quintero y Puchuncaví, la actividad económica predominante era la pesca. Durante la década de 1940, los productos más frecuentes eran el congrio, la jaiba y los recursos bentónicos, como el loco y la macha. En los inicios de la industria comienza la captura de la merluza, que aumenta las capturas de pescados. La pesca realizada en la bahía tenía los objetivos de comercio y de autoconsumo (Barrera, 2015).

Actualmente se localizan cuatro caletas de pescadores dentro de la bahía: Ventanas, Loncura, El Embarcadero y El Manzano. A pesar de la cercanía, se excluyeron las caletas El Papagayo y de Horcón de los análisis realizados en este estudio, debido a su separación de la bahía por la morfología, que impiden una interacción directa (Figura 4-3). En las cercanías de la bahía de Quintero se localizan cuatro Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos¹ (AMERB), como se muestra en la Figura 4-3. Estas se ubican en las puntas que rodean la bahía, con cierta distancia de la zona industrial.

Para analizar el potencial de pesca de la bahía, se obtuvo la información de las toneladas desembarcadas artesanalmente entre los años 2000-2017, por medio del organismo estatal Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA), el cual constituye la fuente oficial de información estadística de pesca y desembarcos. Estos datos son anuales y se separan por la caleta y los grupos: peces, moluscos, algas y crustáceos. Esta información es analizada a continuación.

La Figura 4-4 muestra el desembarco de toneladas totales y por cada caleta en la bahía. En el año 2009 comienza un aumento notorio en las toneladas desembarcadas, en especial, en las caletas El Embarcadero y El Manzano. En el año 2015 se obtuvo el máximo registro de toneladas desembarcadas, con un total de 29,655 [Ton]. En cuanto a los grupos, en las caletas, El Embarcadero y El manzano, predominan el desembarco del grupo moluscos con una amplia mayoría, por sobre el 90%, dejando al grupo peces en segundo lugar. Por otro lado, en la caleta Loncura predomina el grupo Peces y en la caleta Ventanas el grupo Algas (Figura 4-5).

¹ “Régimen de acceso que asigna derechos de explotación exclusiva a organizaciones de pescadores artesanales, mediante un plan de manejo y explotación basado en la conservación de los recursos bentónicos presentes en sectores geográficos previamente delimitados” (Ley General de Pesca y Acuicultura, DS. N° 430/2019)

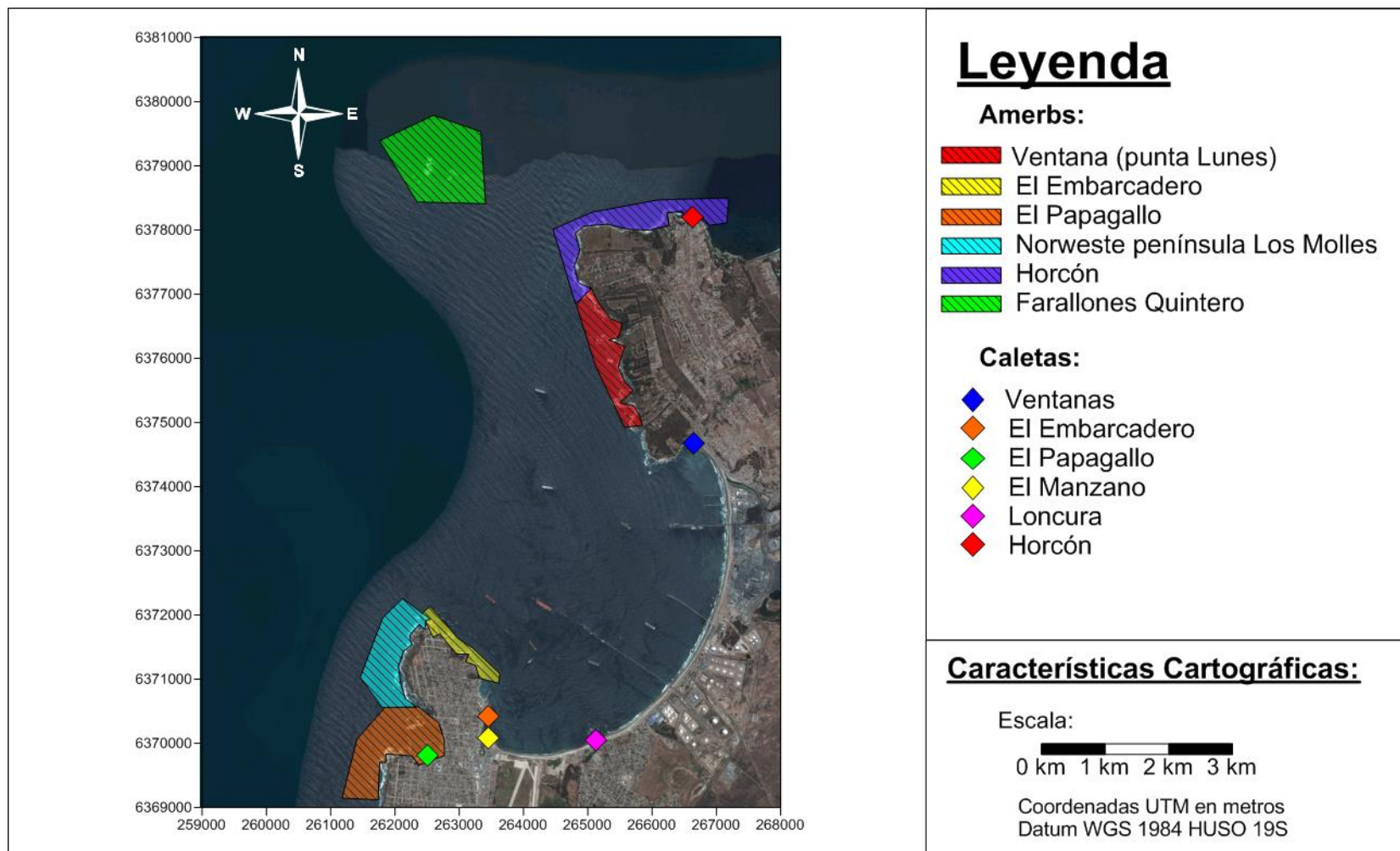


Figura 4-3 Localización de caletas pesqueras de Quintero y AMERBs.

Fuente: Elaboración propia, con información del Decreto 652 (1997).

Al analizar los grupos desembarcados en las caletas, es posible notar el predominio de los moluscos, siendo el 85.39% del registro (Figura 4-6). El predominio del grupo moluscos comienza el año 2009 (Figura 4-6) y al interior de éste, predomina la especie jibia (Tabla 4-6) con un 99% del grupo (Tabla 4-2). Como una especie constituye sobre el 80% de los desembarcos totales, se decidió replicar la Figura 4-6 excluyendo a la jibia en la Figura 4-7. En esta figura se señala el predominio del grupo peces hasta el año 2009, cuando se volvieron más relevantes los grupos crustáceos y algas.

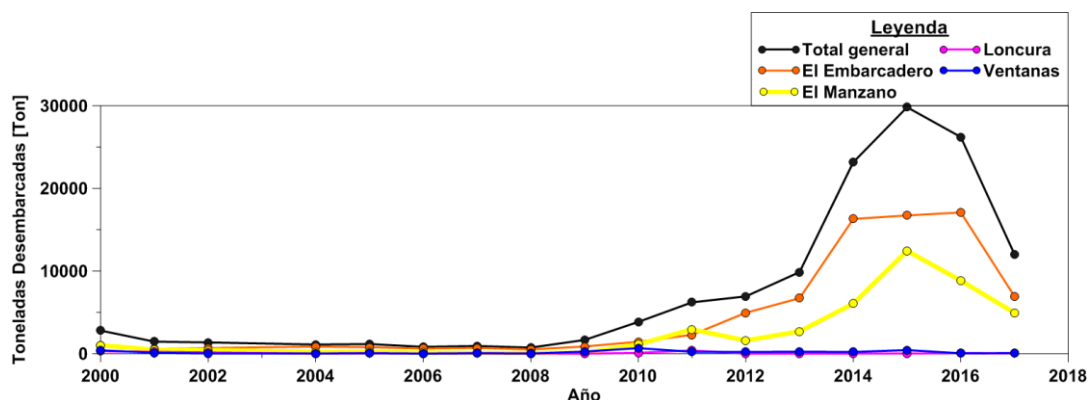


Figura 4-4 Toneladas desembarcadas por caletas.
Fuente: Elaboración propia, con información de Sernapesca.

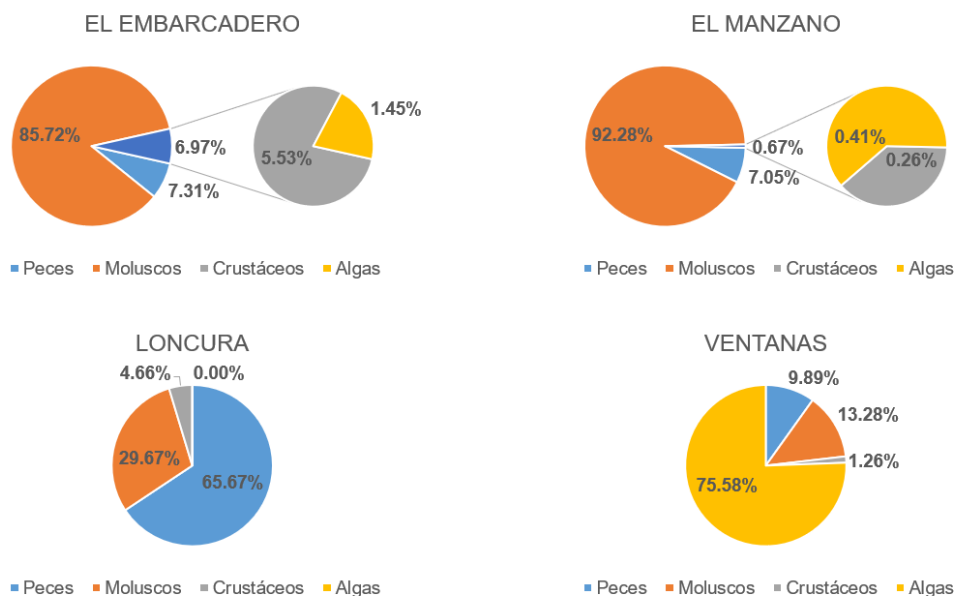


Figura 4-5 Proporción de especies descargadas en cada caleta.
Fuente: Elaboración propia, con información de SERNAPESCA.

En la Figura 4-6 y Figura 4-7, se tienen tres marcas que señalan las instalaciones de la termoeléctrica Campiche y la instalación de la planta de lubricantes Copec, GNL Quintero y la termoeléctrica Nueva Ventanas. El objetivo de estas marcas es conocer los eventos de las curvas de desembarque por especies desde el inicio de las descargas. Bajo ningún caso se asegura que alguna de estas emisiones sea responsable de la variación en las capturas;

solo se confirma la coincidencia temporal. Adicionalmente se puede advertir que desde el comienzo de la serie de tiempo ya existían descargas en la bahía. Entre las coincidencias mostradas en las figuras se tiene:

- En la Figura 4-6 coincide la instalación de la empresa GNL y la termoeléctrica Nueva Ventanas con el aumento del desembarque de moluscos (jibia).
- La Figura 4-7 exhibe una disminución del desembarco de peces hasta el año 2004. Luego la serie se mantiene casi constante hasta la instalación de la termoeléctrica Nueva Ventanas, donde alcanza su valor mínimo.
- Después de la instalación de la termoeléctrica Campiche y la planta de lubricantes Copec, el desembarco de crustáceos y algas adquieren importancia hasta superar el desembarco de peces (Figura 4-7).

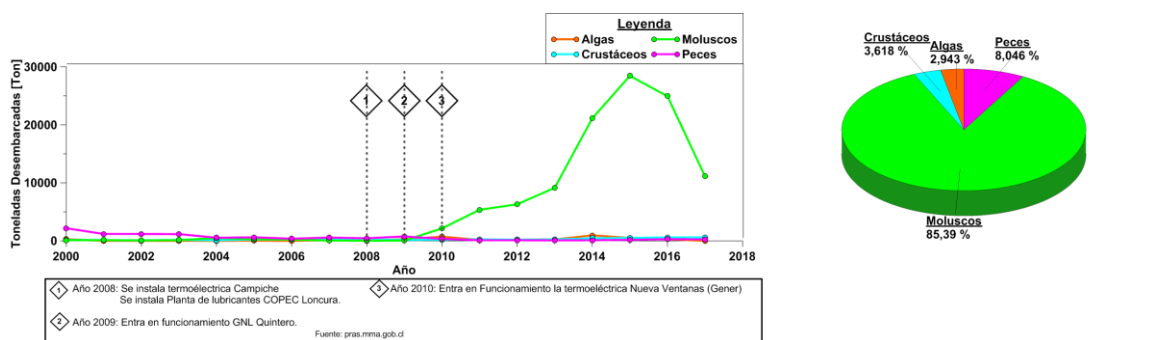


Figura 4-6 Toneladas desembarcadas por especies.
Fuente: Elaboración propia, con información de SERNAPESCA.

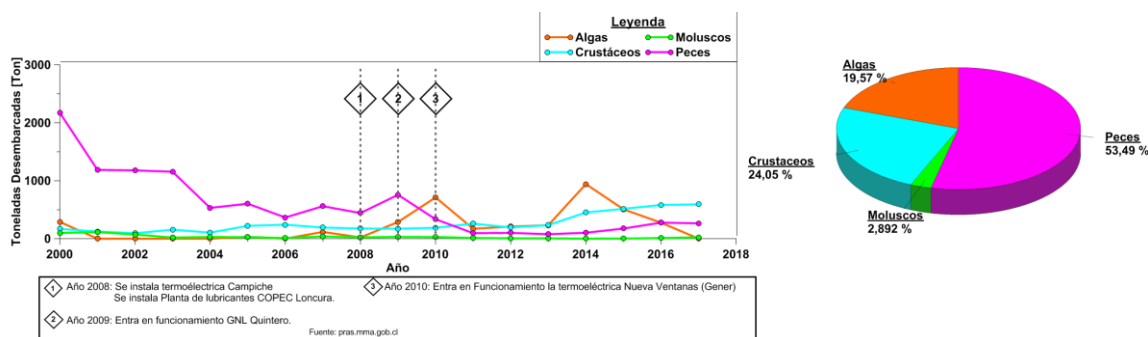


Figura 4-7 Toneladas desembarcadas por especies, excluyendo las jibias.
Fuente: Elaboración propia, con información de SERNAPESCA.

Desde la Tabla 4-2 a la Tabla 4-5 se muestran las distintas especies dentro de cada grupo en los desembarques totales. Como ya fue mencionado, el grupo de los moluscos es el predominante en la bahía, siendo la jibia la más desembarcada con un 99,09 % (Tabla 4-2). El segundo grupo más importante son los peces, (cuya estadística se muestra en la Tabla 4-3) donde se presenta la merluza común como el pez más capturado, seguido por el jurel y la sardina española. Se debe mencionar que, la merluza tiene relevancia desde los comienzos de la industria, en comparación al congrio, que era la pesca principal en 1940 (Barrera, 2015) y ahora es menor del 4% de los peces desembarcados. Finalmente, en los grupos de los crustáceos y algas, las especies más desembarcadas son el camarón nailon y el huiro palo, respectivamente (Tabla 4-4 y Tabla 4-5). Las especies mencionadas fueron ilustradas en la Tabla 4-6.

Tabla 4-2 Distribución de la especie moluscos.

Nombre común	Nombre científico	Total [Ton]	%
Jibia o Calamar rojo	<i>Dosidicus gigas</i>	109,610.38	99.09%
Picoroco	<i>Austromegabalanus psittacus</i>	192.75	0.17%
Loco	<i>Concholepas concholepas</i>	64.15	0.06%
Lapa	<i>Fissurella spp.</i>	182.12	0.16%
Lapa negra	<i>Fissurella latimarginata</i>	153.65	0.14%
Calamar	<i>Loligo gahi</i>	37.21	0.03%
Piure	<i>Pyura Chilensis</i>	77.00	0.07%
Caracol tégula	<i>Tegula atra</i>	65.18	0.06%
Erizo	<i>Loxechinus albus</i>	46.30	0.04%
Otros		191.89	0.17%
Total		110,620.62	100.00%

Fuente: Elaboración propia, con información de SERNAPESCA.

Tabla 4-3 Distribución de la especie peces.

Nombre común	Nombre científico	Total [Ton]	%
Merluza común	<i>Merluccius gayi gayi</i>	2,677.81	25.71%
Jurel	<i>Trachurus murphyi</i>	2,309.30	22.17%
Sardina española	<i>Sardinops sagax</i>	1,499.58	14.40%
Sardina común	<i>Strangomera bentincki</i>	1,063.58	10.21%
Sierra	<i>Thyrstites atun</i>	419.64	4.03%
Bacalao de profundidad	<i>Dissostichus eleginoides</i>	415.30	3.99%
Caballa	<i>Scomber japonicus</i>	311.44	2.99%
Reineta	<i>Brama australis</i>	288.37	2.77%
Vidriola, Palometa, Dorado o Toremo	<i>Seriola lalandi</i>	269.50	2.59%
Congrio negro	<i>Genypterus maculatus</i>	201.49	1.93%
Congrio colorado	<i>Genypterus chilensis</i>	133.92	1.29%
Cojinoba del norte	<i>Seriola violacea</i>	92.13	0.88%
Palometa	<i>Trachinotus ovatus</i>	57.31	0.55%
Machuelo o Tritre	<i>Ethmidium maculatum</i>	1.00	0.01%
Otros		673.78	6.47%
Total		10,414.08	100.00%

Fuente: Elaboración propia, con información de SERNAPESCA.

Tabla 4-4 Distribución de la especie crustáceos

Nombre común	Nombre científico	Total [Ton]	%
Camarón nailon	<i>Heterocarpus reedi</i>	3,828.62	81%
Gamba	<i>Haliporoides</i> <i>Diomedeae</i>	519.28	11%
Jaiba peluda o Pachona	<i>Cancer setosus</i>	141.61	3%
Jaiba mora	<i>Homalaspis plana</i>	79.69	2%
Langostino amarillo	<i>Cervimunida Johni</i>	60.00	1%
Jaiba marmola	<i>Cancer edwardsi</i>	31.74	1%
Otros		70.71	1%
Total		4,731.64	100%

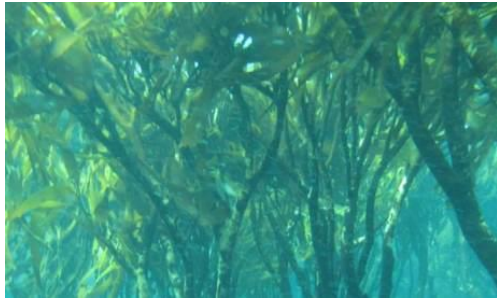
Fuente: Elaboración propia, con información de SERNAPESCA.

Tabla 4-5 Distribución de la especie algas.

Nombre común	Nombre científico	Total [Ton]	%
Huiro Palo	<i>Lessonia trabeculata</i>	3,515.57	59%
Chascón o Huiro negro	<i>Lessonia berteorana/</i> <i>Lessonia spicata</i>	2,138.58	36%
Algas Enteromorpha	<i>Ulva spp.</i>	36.00	1%
Luga cuchara o Corta	<i>Sarcothalia crispata</i>	129.00	2%
Otros		120.60	2%
Total		5,939.75	100.00%

Fuente: Elaboración propia, con información de SERNAPESCA.

Tabla 4-6 Imágenes de especies más abundantes en la Bahía de Quintero. a) Jibia, b) Merluza común, c) Jurel, d) Sardina española, e) Camarón nailon, f) Huiro palo.

a) 	b) 
c) 	d) 
e) 	f) 

Fuente: www.subpesca.cl .

5 MARCO TEÓRICO

5.1 EVALUACIÓN DE DESCARGAS Y TOMAS DE AGUA

Con el fin de establecer, someramente, la buena práctica en los estudios de evaluación ambiental de descargas y tomas de agua de mar, se realizó una búsqueda de proyectos y antecedentes en este ámbito. Para ello, se investigó acerca del marco legal vigente, en conjunto con los estudios que fueron realizados bajo esta normativa y de estudios que apliquen metodologías que permitan evaluar el estado de la calidad de agua.

5.1.1 Normativa chilena actual

Bajo la ley General de bases del medio ambiente N° 19,300 (1994), artículo 10, letra O, los proyectos que incluyan descargas en algún cuerpo de agua deben someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental. Si, además, cumple con alguna característica explicitada en las letras del artículo 11, se debe realizar un estudio de impacto ambiental. Este tipo de estudio contiene una predicción y evaluación del impacto ambiental, según lo nombrado en el artículo 12 letra D, que es analizado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). En el caso de las descargas, se debe demostrar el cumplimiento de la norma primaria, Decreto Supremo del Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia N°90 (2000), en adelante D.S. N°90/ 2000, el cual establece límites en la composición de las descargas dependiendo del cuerpo de agua y en el caso del mar, según la ubicación de la descarga con respecto a la Zona de Protección Litoral² (ZPL). En la Tabla 5-1 se señalan los parámetros relevantes para esta memoria, que se limitan en las descargas dentro de la ZPL, mientras que fuera, estos parámetros no se encuentran limitados.

Tabla 5-1 Límites de descarga en agua marina dentro de la ZPL.

Tabla N°4: ³ Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral			
Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo Permissible
Fósforo	mg/L	P	5
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
Temperatura	°C	T	30

Fuente: Elaboración propia, con información del D.S. N°90/ 2000 (2000).

La normativa anteriormente mencionada establece límites sobre características de los efluentes descargados, sin embargo, no existen normativas nacionales que limiten las alteraciones en el cuerpo de agua, como tampoco se presentan exigencias sobre las metodologías aplicadas en las evaluaciones. El profesional encargado del estudio debe establecer una metodología de evaluación y, también, puede someterse a alguna normativa

² “...corresponde a la franja de playa, agua y fondo de mar adyacente a la costa continental o insular, delimitada por una línea superficial imaginaria, medida desde la línea de baja marea de sicigia, que se orienta paralela a ésta y que se proyecta hasta el fondo del cuerpo de agua, fijada por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante...” (DS. N°90/2000)

³ La numeración corresponde a la establecida en el D.S. N°90/ 2000.

internacional para identificar el impacto. En el caso particular de las plantas desaladoras que descargan salmueras pueden aplicar la “Directriz para la evaluación ambiental en proyectos de plantas desaladoras” (DIRINMAR, 2015), la cual no es oficial ni exigible legalmente sobre la evaluación de los proyectos. Esta directriz sugiere realizar la evaluación del impacto ambiental de desaladoras mediante modelaciones numéricas, para simular los efectos de difusión y advección con respecto a la hidrodinámica, junto a las descargas aledañas que puedan provocar sinergia. Esta directriz también somete limitaciones sobre las captaciones de las desaladoras, como límites sobre la velocidad de succión y la instalación de rejillas que evite la captura de la fauna de interés.

Para los proyectos de las termoeléctricas, se dispone de la “Guía de buenas prácticas en el uso de agua para refrigeración de centrales termoeléctricas” (Ministerio de Energía, 2016) que identifica los impactos causados hacia los organismos marinos, por las descargas térmicas y químicas. Estas producen su muerte o migración, y por las captaciones, por sus efectos de atrapamiento o arrastre, que afectan tanto a la macrofauna como al plancton. En esta guía se aconseja evaluar el impacto de las captaciones mediante modelos demográficos o de mortalidad condicional.

5.1.2 Estudios en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA)

La ley 19,300 (1994) obliga a los proyectos que incluyan descargas en cuerpos de agua a realizar estudios de línea de base ambiental. Estos estudios carecen de una pauta formalmente establecida, por tanto, se realizó una recopilación de ellos en búsqueda de similitudes y en puntos relevantes.

En los estudios recopilados, todas las descargas fueron evaluadas mediante modelos numéricos en dos fases, el campo cercano y el lejano. El campo cercano consiste en la estimación de la dilución causada por la mecánica del difusor del emisario, que genera turbulencia en el chorro. A pesar de ser la difusión más eficiente, ésta ocurre en una pequeña ventana de tiempo y espacio. Para la realización de este análisis es necesario conocer la composición de la columna de agua, que se suele obtener con mediciones de CTD y posteriormente determinar la profundidad donde el chorro de agua equilibra su momento con el cuerpo receptor, es decir, desde donde comienza la mezcla causada por la hidrodinámica con sus procesos de advección-difusión, fenómeno denominado campo lejano.

En la simulación del campo lejano se requiere el conocimiento de la hidrodinámica del medio, por lo cual se pueden identificar dos casos para emplear este tipo de estudio. El primer caso consiste en realizar mediciones de corrientes de tipo euleriana dentro de una gran ventana de tiempo, con el fin de identificar los casos hidrodinámicos con menor difusión, para modelar y determinar la trayectoria y concentración de la pluma en los casos extremos (IGD Chile S.A., 2008; Ecogestión ambiental Ltda., 2016; Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE, 2009; Ecotecnos S.A., 2010; INGEX Ltda., 2008; PRDW Aldunate Vásquez, 2010; GAC S.A., 2009). Para el segundo caso, se obtiene la hidrodinámica con una simulación espacial (2D o 3D) de la zona de estudio a partir de modelos numéricos y datos de los fenómenos físicos que la generan (Ej.: viento, marea u oleaje). El resultado esperado es una hidrodinámica más completa, que aumentará la confianza de los cálculos de la trayectoria y concentraciones de la pluma generada (POCH, 2008; Costasur Ltda., 2009; PRDW Aldunate Vásquez Ltda., 2009; Ecotecnos S.A., 2015(a); Ecotecnos S.A., 2015(b); Ecotecnos S.A., 2017(a); Ecotecnos S.A., 2018). Es

importante mencionar que la simulación hidrodinámica debe calibrarse y validarse con mediciones de corrientes de tipo euleriana.

En cuanto a los estudios sinérgicos, fue encontrado el estudio “Modelación numérica de campo cercano y campo lejano de la dispersión de pluma salina del proyecto Planta desalinizadora y suministro de agua industrial” (Ecotecnos S.A., 2015(a)). Para este estudio se simuló dos descargas salinas mediante un modelo numérico, a fin de evaluar el aumento de la salinidad total en el cuerpo de agua. Finalmente, se concluyó que la salinidad aumentada en el cuerpo de agua, por ambas descargas, es menor a la variación anual natural, disminuyendo la relevancia del impacto ambiental.

Entre los estudios recolectados, se encontró el “Proyecto Aconcagua” que realiza dos estudios asociados a las captaciones: el estudio “Modelación numérica de los efectos de la captación sobre el plancton” (Ecotecnos S.A., 2017(b)) donde se realizaron experimentos mediante modelos numéricos, para determinar la capacidad de captación de plancton. Este experimento consistió en la inyección de una concentración representativa de plancton para determinar el área de captación de la toma de agua. Mientras, el otro estudio, “Estimación de la pérdida de adultos equivalentes asociados a la captación de aguas marinas” (Ecotecnos S.A., 2017(c)) se centra en un modelo demográfico que relaciona la pérdida de ictioplancton en forma de huevos y larvas, en pérdidas de especies adultas, relevantes para la pesca.

5.1.3 Estudios de calidad de agua

Los estudios de calidad de agua tienen el objetivo de evaluar las variables físicas, químicas o biológicas mediante análisis estadísticos de muestreos o de modelaciones numéricas, cerciorando la seguridad para humanos y organismos, que habitan el cuerpo de agua (Karydis & Kitsiou, 2013). En relación a los objetivos del proyecto, este punto se centra en las alteraciones por descargas o captaciones, los efectos que pueden provocar y cómo evaluarlos. Las descargas se vuelven relevantes por las diferencias en las características entre el flujo descargado y el medio receptor, y las alteraciones que pueda provocar. Entre estas propiedades se encuentran la temperatura, la salinidad y las concentraciones de sustancias como nutrientes, metales y otros químicos, que pueden provocar efectos en los organismos.

Los aumentos de la temperatura afectan la calidad de agua, al disminuir la dilución de nutrientes y oxígeno, lo que puede alterar la base de la cadena trófica (Miri & Chouikhi, 2004). En los organismos, se puede asociar los aumentos de temperatura con aumentos de la producción, aunque cada organismo posee una tolerancia distinta a la variación de temperatura. Cuando este límite es superado, ocurre la migración de organismos o, en el caso que tenga poca o nula movilidad, su muerte. Las especies que toleran o se adaptan a las variaciones de temperatura, se convierten en las especies predominantes (Lin, Zou, & Huang, 2018; Seaby & Henderson, 2007; Wen-Tseng, Pei-Kai, Tien-Hsi, Jian-Hwa, & Hung-Yen, 2015; Keun-Hyung *et al.*, 2012).

Debido a la dependencia de la densidad del mar con la salinidad, las variaciones salinas pueden provocar aumentos en la turbiedad, lo que dificulta la fotosíntesis de las algas al impedir la penetración de la luz (Miri & Chouikhi, 2004). De manera similar con la temperatura, los organismos toleran ciertos rangos de salinidad y los valores altos de esta propiedad pueden provocar la migración o muerte, según la especie (Lattemann & Höpner, 2007; Miri & Chouikhi, 2004; Roberts, Johnston, & Knott, 2010).

En términos de la calidad de agua, los nutrientes más relevantes son el nitrógeno y fósforo, debido a su relación con la producción primaria de la cadena trófica y la ocurrencia del fenómeno eutrofización (Ji, 2008; Sehested Hansen, Keul, Tomfeldt Sørensen, Erichsen, & H. Andersen, 2007; Baird & Associates, 2006; Xu, Yu, Zhao, & Li, 2012). Los incrementos de la concentración de estos nutrientes pueden aumentar la producción de organismos, aunque en gran parte de los cuerpos de agua son más relevantes los aumentos de fósforo por sobre nitrógeno (Ministry of the Environment of Ontario, 2010). Según el crecimiento de los organismos, se puede elevar el gasto de oxígeno hasta llegar a un estado de hipoxia en las aguas, razón por la cual pueden generarse muertes de organismo (Lim, Díaz, Hong, & Schaffner, 2006; Sato *et al.*, 2016).

Otras sustancias relevantes para el cuerpo marino, son las concentraciones de metales y químicos como el cloro, las cuales en ciertas magnitudes son tóxicas para la vida marina (Miri & Chouikhi, 2004; Keun-Hyung *et al.*, 2012).

Para la evaluación de descargas, ya sean térmicas (Cardoso-Mohedano *et al.*, 2015; Abbaspour, Javis, Moghini, & Kayhan, 2005), salinas (Malcangio & Petrillo, 2009), de nutrientes (Sehested Hansen *et al.*, 2007; Baird & Associates, 2006; Xu *et al.*, 2012; Garde, Sehested Hansen, & Murray, 2008) u otras, se suelen emplear modelos numéricos. La utilización de esta metodología permite simular los efectos de advección y difusión que provocan el transporte de las descargas. En la actualidad, se han desarrollado modelos numéricos que simulan un ambiente biológico simplificado, que interactúa con la hidrodinámica simulada y las variables alteradas por las descargas (Sehested Hansen *et al.*, 2007; Baird & Associates, 2006; Xu *et al.*, 2012; Garde *et al.*, 2008; Erichsen, Møhlenberg, Closter, & Sandberg, 2010; Liungman & Moreno Arancibia, 2010; Schuchert, Kregting, Pritchard, Savidge, & Elsässer, 2016). El resultado esperado son las distribuciones de organismos y nutrientes dentro de un dominio numérico.

En específico, para la evaluación de la calidad de agua, existen metodologías a base de información de organismos y nutrientes. Éstas consisten en la selección de puntos de muestreos, donde se cuantifican los parámetros de interés y se determina el estado del cuerpo de agua (Gómez Jakobsen, 2015; Ferreira *et al.*, 2011). Xu *et al.* (2012) realizaron un estudio con una simulación numérica de la hidrodinámica de un lago y la comunidad ecológica que allí habita, dentro del cual ocurren descargas. El estudio culminó con una evaluación de índices biológicos con datos simulados.

Según los procesos industriales lo requieran, es posible instalar tuberías de captaciones con el fin de acercar el agua marina hacia tierra donde se puede emplear para distintos procesos. Así como las descargas, las captaciones también provocan efectos sobre la calidad de agua, en específico sobre los organismos que allí habitan. Los fuertes caudales que generan pueden captar especies cercanas produciéndoles daño o la muerte de estos organismos (Seaby & Henderson, 2007; Lattemann & Höpner, 2007; Watereuse Association, 2011). La evaluación de este impacto se hace compleja debido a la dificultad de medición de organismos captados. Por ello, se han ideado métodos demográficos, que asocian las pérdidas de larvas captadas con la pérdida de organismos adultos (Ehrler *et al.*, 2002).

Otro tópico importante a resaltar, son las múltiples descargas ubicadas en un mismo cuerpo de agua. El conjunto de descargas puede provocar efectos distintos en su grupo, asociando un fenómeno de sinergia. Purnama & Shao (2015) realizaron un análisis de los efectos de dos descargas aledañas mediante modelos numéricos. El estudio logró demostrar que la concentración de la mezcla entre las plumas, es dependiente a la distancia de las descargas que la generan, obteniéndose distintos estados de sinergia.

En otro estudio (CEA, 2013), analizó mediante modelos numéricos todas las descargas en la bahía de Quintero, identificando así el estado alterado con respecto a su temperatura y concentraciones de metales.

Según lo establecido, la mayor parte de los estudios recopilados se realizaron con modelos numéricos para la estimación del impacto en el medio acuático. El uso de esta herramienta permite conocer la interacción de múltiples variables ante distintas situaciones, y con ello evaluar las alteraciones sobre el medio de forma continua en el tiempo. Lo anterior es complejo y costoso de obtener mediante mediciones *in situ* del cuerpo de agua.

5.2 HIDRODINÁMICA DE AMBIENTES COSTEROS

La simulación de la hidrodinámica en la costa requiere la implementación de ecuaciones que describen el comportamiento del fluido, en un modelo matemático. Estas ecuaciones describen la transmisión de energía desde los fenómenos que fuerzan la hidrodinámica. Para esta memoria, con la inclusión de efluentes líquidos sobre el cuerpo de agua, se hace especialmente necesaria la ecuación de advección y difusión, la cual, describe el transporte de sustancias en un flujo.

5.2.1 ECUACIONES GENERALES DE FLUIDOS EN MOVIMIENTOS

La representación de la hidrodinámica se logra mediante la implementación de las ecuaciones de continuidad, momentum y las ecuaciones de Navier- Stokes (González *et al.*, 2001) que implican las primeras dos ecuaciones.

Como se mostró en Kundu, Cohen, & Dowling (2012), la ecuación de conservación de la masa representa el principio básico de la física, que niega la creación y desaparición de la materia y solo acepta la transformación de ésta. Lo anterior, lleva a definir un volumen material, $V(t)$, cuya cantidad de materia será constante como se muestra en la ecuación 5-1.

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(x, t) dV = 0 \quad 5-1$$

Sobre la ecuación 5-1 se aplica el teorema de transporte de Reynolds y el teorema de divergencia de Gauss, resultando la ecuación 5-2, que es conocida como la ecuación de continuidad, expresándose en la dirección x_i (representando las direcciones x, y y z).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad 5-2$$

Luego, al suponer una densidad constante dentro de la trayectoria del flujo y un fluido incompresible, la ecuación 5-2 se reduce a la ecuación 5-3.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad 5-3$$

Kundu *et al.* (2012) mostraron la ecuación de conservación del momentum a partir de la segunda ley de Newton, relacionando los términos de fuerzas volumétricas (b) y de fuerzas superficiales (f), aplicadas sobre un volumen $V(t)$, que se encuentra cubierto por una

superficie $A(t)$, (ecuación 5-4). Al considerar una trayectoria de densidad constante en un fluido incompresible, se obtiene la ecuación 5-5. Esta ecuación relaciona la aceleración de un volumen de fluido afectada por campos de fuerzas volumétricas (ρb_j) y de fuerzas superficiales ($\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}$) sobre el volumen de fluido.

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(x, t) u(x, t) dV = \int_{V(t)} \rho(x, t) b dV + \int_{A(t)} f(n, x, t) dA \quad 5-4$$

$$\rho \frac{Du_j}{Dt} = \rho b_j + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij}) \quad 5-5$$

En la ecuación 5-6 se presenta una forma simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes, que es utilizada como la ecuación de gobierno del movimiento para fluidos newtonianos incompresibles (Niño, 2013(a)). Esta ecuación utiliza propiedades del fluido como la densidad (ρ) y la viscosidad dinámica (μ), además de variables que definen el flujo, como la presión piezométrica ($\hat{p}$) y la velocidad ($\vec{v}$), donde la presión piezométrica está compuesta por la presión termodinámica y la presión hidrostática.

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \left\{ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right\} = -\nabla \hat{p} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad 5-6$$

En García (1996), Kundu **et al.** (2012) y Niño (2013(a)), se afirmó que la ecuación 5-6 es capaz de definir el movimiento de flujos laminares como turbulentos, hasta ciertos valores del número de Reynolds; después se hace complejo su resolución. Por ello, se establecen las RANS, que resuelven la ecuación de Navier-Stokes al introducir la velocidad como una componente media del flujo más las fluctuaciones, como se muestran en la ecuación 5-7, donde u_i , representa la velocidad instantánea del flujo en la dirección i , $\bar{u}_i$ la velocidad local media y u'_i las fluctuaciones con respecto a la media temporal. Esta separación es conocida como descomposición de Reynolds, la que puede emplearse ante otras variables como la presión.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad 5-7$$

Al utilizar la ecuación de continuidad (ecuación 5-3) con la descomposición de la ecuación 5-7, sobre la ecuación de Navier-Stokes (ecuación 5-6), se obtiene la ecuación 5-8.

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial (-\rho \overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} \quad 5-8$$

En la ecuación 5-8 aparece el término $\overline{\rho u'_j u'_i}$, llamado esfuerzos de Reynolds (τ_{tij}), que corresponde al flujo turbulento de momentum. El término anterior, es una incógnita de la ecuación, aunque Niño (2013(a)) establece una dependencia con la viscosidad de remolino o *eddy viscosity* (μ_t) y con la viscosidad de remolino cinemática ($\nu_t = \mu_t / \rho$). La estimación de esta última variable se logra mediante la ecuación de corriente turbulenta que puede ser simulada por medio modelos de cero, una o dos ecuaciones.

5.2.2 FORZANTES GENERALES DE FLUIDOS EN MOVIMIENTOS DE FLUIDOS

Los principales fenómenos que fuerzan la hidrodinámica en el medio marítimo son la marea, el viento, el oleaje y los gradientes de densidad (González *et al.*, 2001). Estos fenómenos son brevemente descritos a continuación.

Marea: Este fenómeno consiste en las variaciones del nivel del mar, que pueden ser producidas por variables astronómicas y meteorológicas (Kamphuis, 2000). Los efectos astronómicos dominan la generación de la hidrodinámica (González *et al.*, 2001). La marea astronómica consiste en ascensos y descensos del nivel del mar, de manera oscilatoria con dependencia de los cuerpos celestes, que afectan las aguas por su atracción gravitacional, y la fuerza centrífuga de la Tierra (UNICAN, 2000; Kamphuis, 2000), mientras que, la marea meteorológica son variaciones del nivel debido a eventos meteorológicos, como puede ser el viento y la presión atmosférica (Kamphuis, 2000).

Viento: El viento corresponde a los movimientos de la atmósfera, a causa de los diferenciales de temperatura, y por ende de densidad. Esto se debe a una recepción distinta de la radiación solar, por la forma de la Tierra, y de la aceleración de Coriolis provocada por la rotación de la Tierra (C.E.M, 2002). Por otro lado, en escalas dimensionales más pequeñas, los campos de viento se encuentran principalmente afectados por los diferenciales térmicos de las superficies dando origen a fenómenos como la brisa marina, que ocurren por las distintas temperaturas alcanzadas por la tierra y el agua durante el día, y, además, por la rugosidad en las superficies generando turbulencias que afectan tanto la dirección como la magnitud del viento (Ahrens, 2013). La energía contenida en el viento es transferida hacia el mar mediante los tensores de esfuerzo del viento (Stewart, 2008).

Olas: El oleaje corresponde a oscilaciones generadas por la combinación de las fuerzas del viento y la gravedad aplicadas sobre la superficie del mar, las cuales se caracterizan por un periodo entre los 3-30 [s] (UNICAN, 2000). El oleaje que se propaga hacia la costa sufre transformaciones en sus características al ser afectado por el fondo (Holthuijsen, 2007). Esto provoca una variabilidad espacial, según la batimetría, lo que hace necesario una simulación de la propagación para su caracterización al interior de la zona de estudio. Como el oleaje es un fenómeno irregular y aleatorio, se suele representar como la energía (E) de múltiples ondas regulares, con cierta frecuencia (f) y dirección (θ), cuya representación se denomina espectro de oleaje ($E(f, \theta)$) (Goda, 2000). Esta representación permite estimar las variaciones en el tiempo (t) y espacio (x, y). La evolución de la densidad de energía de cada componente (f, θ) puede obtenerse integrando la ecuación de energía por la trayectoria que sigue la velocidad de grupo ($\frac{dx}{dt} = C_{gx}$; $\frac{dy}{dt} = C_{gy}$) de la onda (ecuación 5-9).

$$\frac{dE(f, \theta; t, x, y)}{dt} = S(f, \theta; t, x, y) \quad 5-9$$

La ecuación 5-9, corresponde a una descripción lagrangiana del fenómeno, resolviendo solo una trayectoria. La solución dentro de un área, corresponde a una visión euleriana, que requiere la implementación de una malla numérica (Figura 5-1), compuesta de una división

del área en múltiples elementos numéricos ($\Delta x, \Delta y$). Sobre cada elemento se aplica el principio de conservación de energía, dentro de un intervalo (Δt), que incluye la generación, disipación y transformación de la energía. La implementación de la ecuación 5-9 sobre una grilla computacional, termina con la ecuación 5-10, que muestra el término fuente, $S(f, \theta; t, x, y)$, con el cual se incluye los ingresos y salidas de energía.

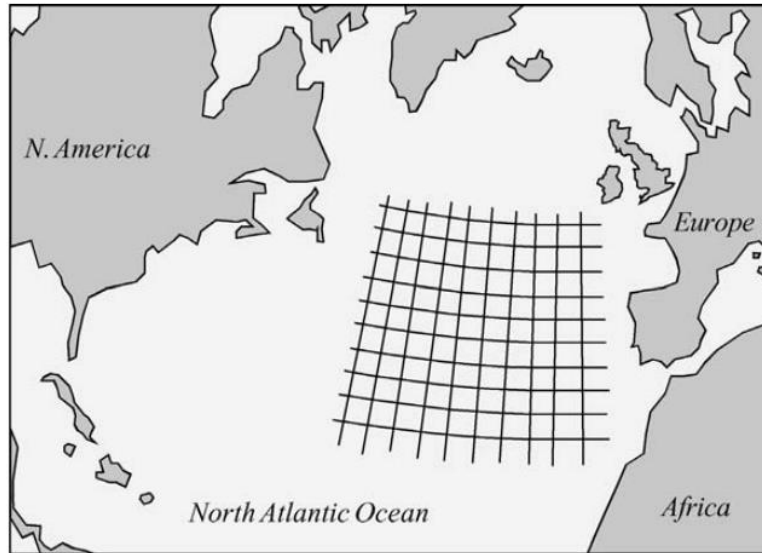


Figura 5-1 Malla computacional para simulación de oleaje.

Fuente: (Holthuijsen, 2007).

$$\frac{\partial E(f, \theta; t, x, y)}{\partial t} + \frac{\partial (C_{gx} E(f, \theta; t, x, y))}{\partial x} + \frac{\partial E(C_{gy}(f, \theta; t, x, y))}{\partial y} = S(f, \theta; t, x, y) \quad 5-10$$

Al obtener el oleaje en la zona de interés, se estima su aporte hacia la hidrodinámica mediante los tensores de radiación.

Gradiente de densidades: A pesar que algunas ecuaciones establecidas anteriormente se simplificaron con el supuesto de flujos con densidad constantes, es posible representar la condición baroclínica por medio de la ecuación de estado, que permite calcular la densidad a partir de las variables temperatura y salinidad (Fofonoff & Millard, 1983).

5.2.3 ECUACIÓN DE ADVECCIÓN-DIFUSIÓN

La hidrodinámica dentro del cuerpo de agua se relaciona con el fenómeno del transporte, el cual involucra las concentraciones o magnitudes de contaminantes, nutrientes, organismos o ciertas variables del fluido como la temperatura y salinidad (Jorgensen & Bendoricchio, 2001). Los términos representativos del transporte son descritos en la ecuación 5-11, donde en su lado izquierdo se muestra la variación local de masa de un constituyente y a su proceso de advección, que consiste en el desplazamiento de una concentración (C) a través de un flujo. Los términos en la derecha representan el proceso de difusión, los cuales ocurren a partir de una escala microscópica y ocasionan el

movimiento de una sustancia desde una mayor concentración, hacia zonas de menor concentración (Jorgensen & Bendoricchio, 2001; Ji, 2008). En Niño (2013(a)) se modela la difusión a partir de la ley de Fick, la cual expresa un flujo másico con respecto al gradiente de concentración y al coeficiente de difusión molecular (D).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u_i C)}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_i} \quad 5-11$$

La ecuación anterior es aplicable para flujos laminares como turbulentos, aunque se vuelve inexacta para flujos con un alto número de Reynolds. Para estos casos, se aplica la descomposición de Reynolds (ecuación 5-7) sobre las variables de velocidad y concentración. Con esto se llega a la ecuación 5-12, la cual presenta una nueva variable a la derecha de la ecuación, que se encuentra relacionado al transporte turbulento. Sobre este último término, aparece el coeficiente de difusión turbulenta (D_{ti}), al hacer una analogía con la ley de Fick, quedando la ecuación 5-13.

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{C})}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial(\bar{u}'_i \bar{C}')}{\partial x_i \partial x_i} \quad 5-12$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{C})}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial D_{ti} \bar{C}'}{\partial x_i \partial x_i} \quad 5-13$$

Las ecuaciones mostradas representan el transporte en la dirección i , sin embargo, es relevante mencionar que en la mezcla vertical cobra una mayor importancia la turbulencia creada por los fenómenos que producen la hidrodinámica y que es transmitida por la columna de agua mediante los tensores de esfuerzos. Este proceso se relaciona con la estratificación, de manera que, una alta estratificación dificulta la mezcla.

5.3 RELACIÓN ECOLÓGICA PARA MODELACIÓN NUMÉRICA

Para simular comunidades ecológicas en ambientes acuáticos, es necesario construir un modelo con las variables más relevantes del sistema y los procesos que las relacionan. Franks (2002) seleccionó las algas, zooplancton y nutrientes como sus principales variables, mientras Jorgensen & Bendoricchio (2001), propusieron el modelo mostrado en la Figura 5-2, que agrega la variable detritus. En esta relación las variables se cuantifican en biomasa, que se transfieren mediante los procesos que unen las variables.

Las algas son la base de la cadena alimenticia marina, debido a que son las encargadas del proceso de la fotosíntesis o producción primaria, que convierte el dióxido de carbono y nutrientes, bajo ciertas condiciones de luz y temperatura, en oxígeno, clorofila a y material orgánico denominado biomasa (Riley & Chester, 1989). Las algas pueden clasificarse como fijas (vegetación bentónica) y flotantes (plancton) y de cada uno se desprenden diversos grupos (Ji, 2008).

Dentro de la cadena trófica, entre el fitoplancton y los invertebrados marinos, se encuentra el zooplancton (Riley & Chester, 1989). A pesar de su ubicación en la cadena trófica, según la especie del zooplancton, éste se puede alimentar de bacterias, fitoplancton e inclusive otros zoopláctones (Woelfl, Caputo, García Chicote, & de Los Ríos, 2018). Por simplicidad,

los modelos suelen asignar la dieta del zooplancton únicamente al fitoplancton, estableciendo su relación mediante la depredación o el proceso denominado pastoreo (*grazing*) (Figura 5-2). El zooplancton se compone por especies que permanecen toda su existencia como zooplancton (holoplancton) y otras que una parte de su ciclo de vida están en el plancton (meroplancton), como son los huevos y larvas de peces. A diferencia del fitoplancton, el zooplancton tiene capacidad de movilidad en el agua, lo que le permite evitar la sedimentación, aunque es, igualmente, transportado por la hidrodinámica del cuerpo de agua (Riley & Chester, 1989; Ji, 2008).

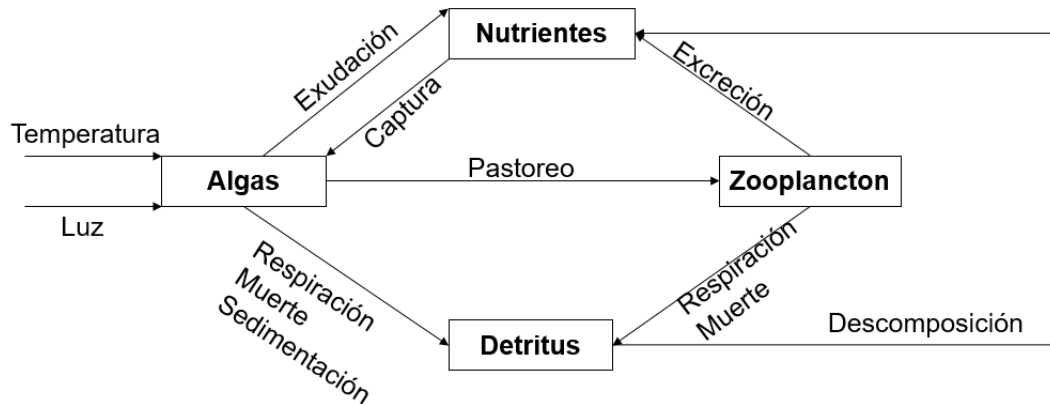


Figura 5-2 Esquema de un modelo biológico.

Fuente: (Jorgensen & Bendricchio, 2001).

La existencia de organismos en el cuerpo de agua, provoca la acumulación de residuos orgánicos, denominado detritus, el cual corresponde a organismos muertos y sus excreciones. Este material inerte es consumido por bacterias, las cuales, tras procesarlo, liberan nutrientes al medio (Riley & Chester, 1989). Como se representa en la Figura 5-2, la simulación del detritus consiste en una variable que aumenta por las pérdidas de biomasa del fitoplancton y zooplancton, mediante los procesos de respiración y muerte, y en el caso del fitoplancton, se agrega el proceso de sedimentación.

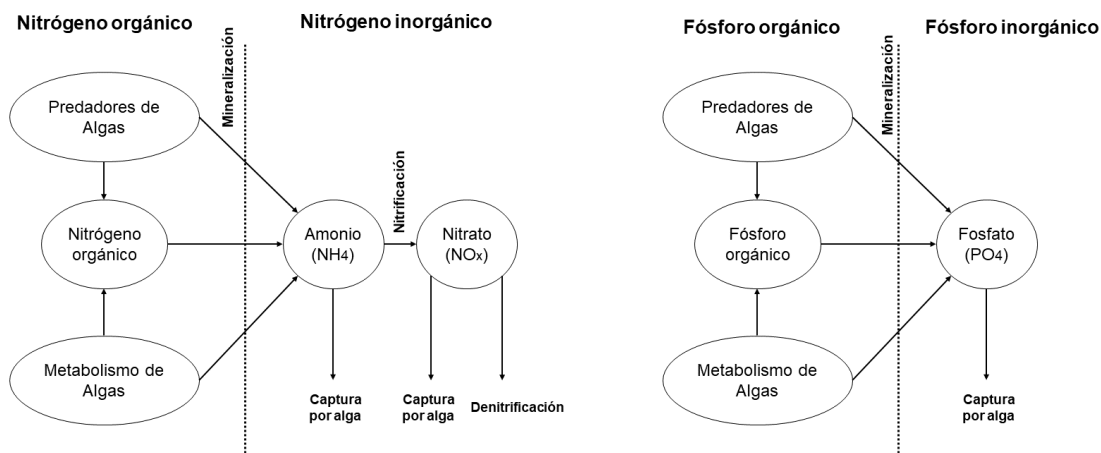


Figura 5-3 Ciclo de nutrientes, izquierda ciclo del nitrógeno y derecha ciclo de fósforo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ji (2008).

Los principales nutrientes necesarios para el crecimiento de organismos se encuentran compuestos de nitrógeno o fósforo. Estos nutrientes se relacionan con el resto de las variables como es señalado en la Figura 5-2, mientras sufren transformaciones entre los distintos estados como se muestra, de forma simplificada, en la Figura 5-3 (Riley & Chester, 1989; Ji, 2008).

Entre los requerimientos para la producción de algas, se encuentra el consumo de nutrientes, en especial el nitrógeno y el fósforo. Los aumentos en estos nutrientes, pueden provocar aumentos en la producción. Estos nutrientes se encuentran en variadas formas dentro del cuerpo de agua, una de las cuales corresponde a los residuos de material orgánico o el ya nombrado detritus. Ciertas bacterias existentes en el cuerpo marino son capaces de descomponer este material y transformarlo en nutriente inorgánico, como fosfato (PO_4^-) en el caso del fósforo, y amonio (NH_4^+) con el nitrógeno (Figura 5-3). El nitrógeno total Kjeldahl (NKT) cuantifica el nitrógeno en esta fase, es decir, reúne las concentraciones de nitrógeno orgánico (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminos, etc.) y amonio.

Dentro del ciclo del nitrógeno, gracias a las bacterias, se produce la nitrificación, que transforma el amonio en nitrito (NO_2^-), nutriente inestable que pasa rápidamente a nitrato (NO_3^-). La transformación a nutrientes inorgánicos (NH_4^+ , NO_3^- y PO_4^-) se vuelve relevante dado que son los estados de nutrientes consumibles por las algas, y con este proceso se cierra el ciclo de ambos nutrientes como se muestra en la Figura 5-3.

Entre los nutrientes disueltos en el mar, las concentraciones de fósforo suelen ser las limitantes del crecimiento de las algas, a pesar del bajo consumo realizado. Esto se debe a que la concentración de fósforo es baja en comparación al nitrógeno, nutriente que es fácilmente soluble y abundante en la atmósfera, que puede ingresar al mar por ciertas algas, a diferencia del fósforo, con difícil solubilidad y fuentes limitadas. Por tanto, los aumentos naturales o artificiales de la concentración de fósforo, suelen implicar aumentos en la producción de algas, con posibilidades de ocurrencias del fenómeno de eutrofización.

En cuanto al oxígeno disuelto, se debe mencionar que, la principal fuente es la fotosíntesis debido a las algas. Por otro lado, se tiene el fenómeno de la reaireación, que consiste en la incorporación de oxígeno desde la atmósfera. Debido a las características de la reaireación y la posición superficial de las algas flotantes, por la cercanía con la luz solar, se tiene mayor concentración de oxígeno disuelto en la superficie, siendo la mezcla vertical la encargada del transporte de oxígeno en esta dirección. El oxígeno es de vital importancia para los organismos marinos, por el metabolismo relacionado y las reacciones químicas asociadas a los nutrientes, como por ejemplo la nitrificación.

El comportamiento biológico y químico anteriormente mencionado es representado en los modelos numéricos mediante ecuaciones paramétricas, que describen las concentraciones de las variables simuladas.

6 MATERIALES Y METODOLOGÍA

El desarrollo del presente estudio fue ejecutado según el diagrama de flujo señalado en la Figura 6-1. En este esquema se establecieron en cuadros rojos los insumos, mientras que, en cuadros negros los procesos que utilizaron dichos insumos y, finalmente, en cuadros azules los resultados obtenidos de los procesos ejecutados. Nótese que, en algunas ocasiones los resultados fueron utilizados como insumos para otros procesos.

La memoria comenzó con la recopilación de antecedentes de datos de batimetría, oceanográficos (físicos, químicos y biológicos) y las características de las descargas y captaciones, oficialmente declaradas y en actual operación en la bahía. Con esta información como insumo, se realizó un procesamiento de antecedentes, con el fin de realizar una caracterización de éstos y preparar la información para el uso en los modelos numéricos, los cuales se sometieron a los procesos de calibración y validación.

Los procesos de calibración y validación consistieron en la comprobación y ajustes sobre la simulación, con el fin de verificar la representación del fenómeno estudiado. En la simulación hidrodinámica se realizó un contraste de las componentes vectoriales de la velocidad (U y V) y, además, sobre las forzantes que generaron las corrientes, como fueron el oleaje, marea, temperatura y salinidad del agua. En las variables ecológicas, a causa de la baja cantidad de mediciones disponibles, se debió contrastar el comportamiento simulado con lo descrito en la bibliografía consultada.

Los casos a simular, correspondieron a la modelación de distintas combinaciones de descargas y captaciones, sobre una hidrodinámica simulada con el promedio entre años de las forzantes. Esta simulación hidrodinámica fue referida en el documento como caso medio. Sobre estos resultados se aplicaron evaluaciones térmicas, salinas, de calidad de agua y de organismos. En esta última variable, se analizaron los impactos provocados por las descargas y captaciones.

La metodología anteriormente señalada fue detallada a continuación.

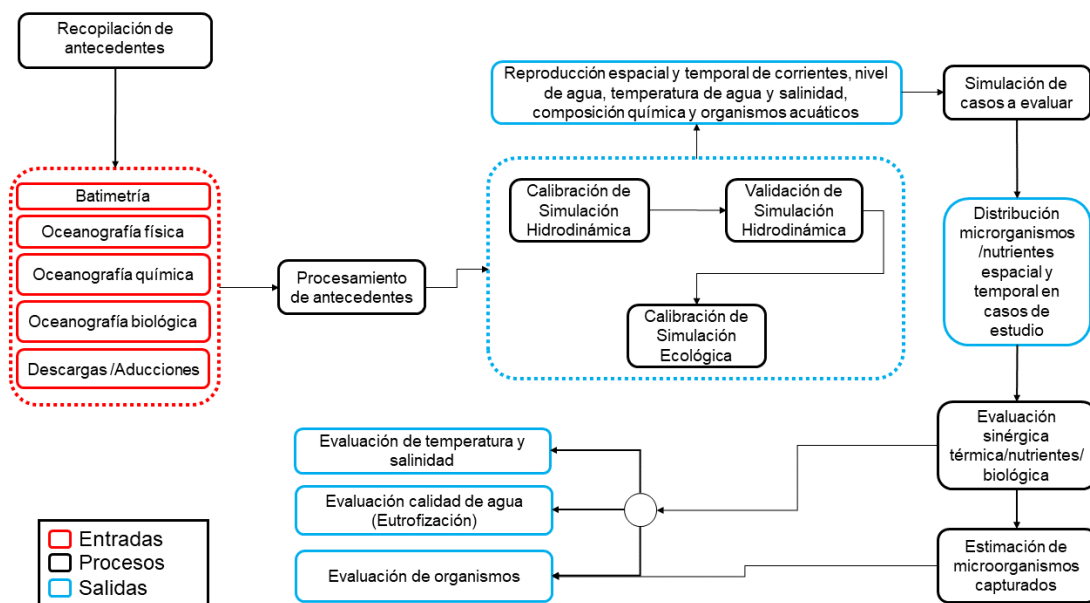


Figura 6-1 Metodología del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

6.1 PROCESAMIENTO DE ANTECEDENTES PARA MODELACIÓN NUMÉRICA

En este punto se detallaron las fuentes de la información y las metodologías empleadas en las simulaciones, la que corresponden a los casos de calibración, validación y, además, el caso medio, cuya función fue la obtención de los resultados necesarios para el cumplimiento de los objetivos de la memoria.

Según la cantidad de información encontrada y su variabilidad temporal se realizaron distintas caracterizaciones de los datos cuya metodología fue descrita en este apartado.

6.1.1 BATIMETRÍA

La batimetría fue obtenida a partir de las cartas náuticas digitales del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Se seleccionaron aquellas mostradas en la Tabla 6-1 y que se representan en la Figura 6-2. La información batimétrica fue necesaria para la construcción del dominio del modelo que permitió la representación numérica del fondo marino.

La carta N°4321 fue la principal para la construcción de la grilla utilizada en la simulación hidrodinámica, mientras que, las cartas N°4320 y 4000, permitieron la construcción de la grilla numérica hasta aguas profundas, que fue empleada para la propagación de oleaje.

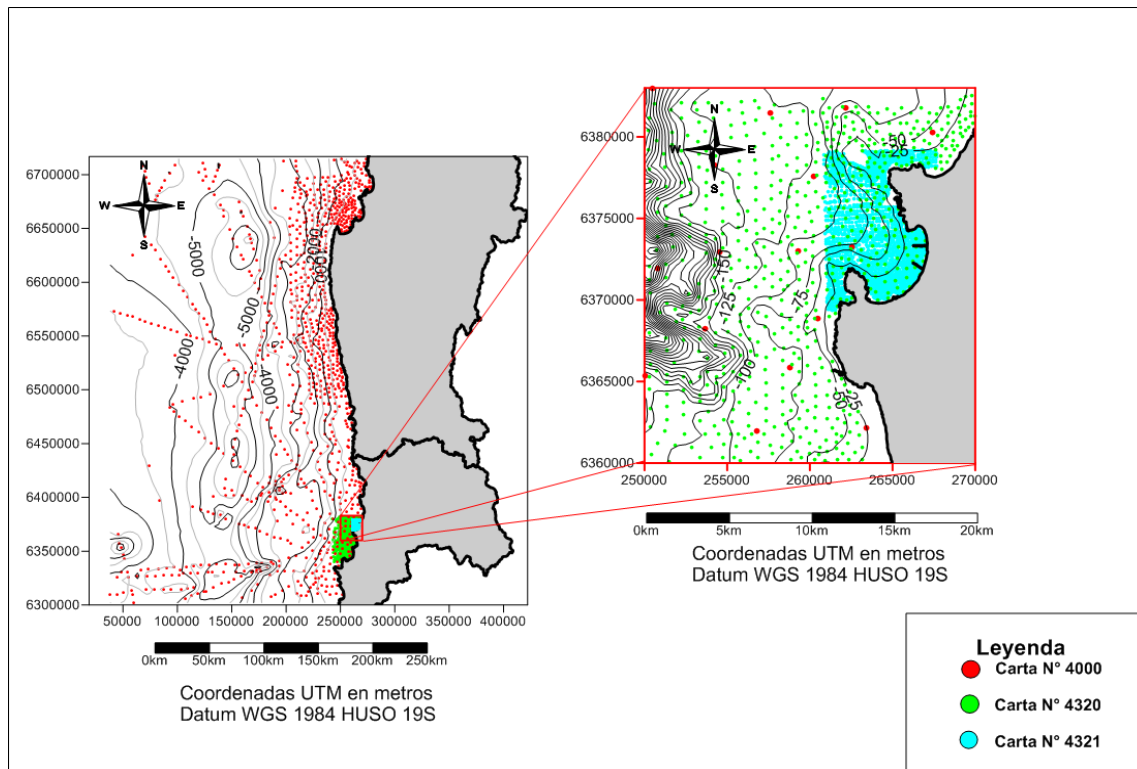


Figura 6-2 Sondas de las cartas náuticas usadas.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-1 Cartas náuticas usadas.

N°	Nombre	Escala 1:
4000	Bahía de Coquimbo a Bahía de Valparaíso	500.000
4320	Bahía de Quintero a Valparaíso	50.000
4321	Bahía de Quintero	10.000

Fuente: Catálogo de cartas y publicaciones Náuticas Pub. SHOA 3000 (SHOA, 2015).

6.1.2 OCEANOGRAFÍA FÍSICA

Los datos recopilados de oceanografía física fueron clasificados en la Tabla 6-2. Entre esta información se presentaron las variables físicas como el oleaje, marea, corrientes y fenómenos meteorológicos, en este último se encuentran: el viento, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y cobertura por nubes.

Los datos de oceanografía física fueron medidos en estaciones fijas, mostradas en la Figura 6-3, con los instrumentos: mareógrafo, estación meteorológica, Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) y boya. Se dispuso, además, de información de oleaje en aguas profundas a partir del modelo numérico Wavewatch III V4.18.

De los instrumentos mencionados, el ADCP es el único que tiene la capacidad de medir varios fenómenos de forma simultánea (marea, oleaje y corrientes).

La caracterización de los datos y su utilización en los modelos numéricos fue descrita a continuación para cada una de las variables.

➤ Oleaje

Como se estableció en la Tabla 6-2 y localizó en la Figura 6-3, los datos de oleaje obtenidos fueron medidos con distintos instrumentos y en distintas ventanas de tiempo. En los puntos qnt-1, qnt-2 y qnt-3, localizados en la costa de la bahía, se midió el oleaje con ADCP mediante los parámetros de resumen: altura de ola significativa (H_s), periodo peak (T_p), dirección peak (D_p) y dirección media (D_m). En las afueras de la bahía se obtuvieron mediciones de oleaje mediante una boya, en un punto que se denominó qnt-5, en el cual solo se midió los parámetros de resumen altura de ola significativa (H_s) y periodo medio (T_m).

Adicionalmente, se complementó la información de oleaje medido in situ con bases de datos numéricos obtenidos mediante el modelo Wavewatch III v.4.18, el cual fue ejecutado durante el proyecto “Atlas de Oleaje para Chile” (Universidad de Valparaíso, 2016). Esta simulación estableció información de oleaje en aguas profundas, válida para la Región de Valparaíso, mediante espectros bidimensionales, con una discretización de 29 frecuencias y 24 direcciones (cada 15 [°]). Estos datos son referidos en adelante como “datos Atlas”. La información de oleaje recopilada se encuentra con un time-step de tres horas, según la equivalencia a un estado de mar.

Según se esquematizó en la Tabla 6-3, las mediciones en el punto qnt-1 se realizaron durante dos campañas, de un mes cada una, correspondiente al invierno y verano. La primera comenzó el 20 de agosto del 2016 hasta el 22 de septiembre del mismo año y la segunda, desde el 24 de enero del 2017 hasta el 28 de febrero del mismo año. El punto qnt-2 fue medido durante un mes, aproximadamente, desde el 17 de febrero del 2014 hasta el 14 de marzo del mismo año. El punto qnt-3 se midió durante tres meses, aproximadamente, desde el 02 de enero del año 2012 hasta el 10 de abril del mismo año.

El punto qnt-5 contiene mediciones durante siete meses, desde el 22 de enero de 1982 hasta el 02 de agosto de 1982. Finalmente, los datos Atlas, provenientes de una simulación numérica, contiene información durante 37 años, desde el 01 de enero del 1980 hasta el 31 de diciembre del 2017.

Con la información recopilada, se realizó la caracterización del medio para conocer la variabilidad de sus parámetros de resumen y poder utilizarlos en la simulación numérica. Esta caracterización se realizó sobre los parámetros de resumen, H_s , T_p y D_p , mediante tablas de incidencia y gráficas de distribución conjunta de las variables H_s y T_p según la D_p . El análisis principal se realizó en el punto qnt-1, por contener mediciones en las estaciones de invierno y verano, y fueron contrastados con los datos Atlas en los mismos intervalos, verificando la variabilidad de los parámetros de resumen durante la propagación. Se realizaron caracterizaciones, también, en el punto qnt-5, solo con una tabla de incidencia por la ausencia de la dirección, con la finalidad de conocer la magnitud de los parámetros en las afueras de la bahía. La caracterización de los puntos qnt-2 y qnt-3 se realizó mediante gráficos de distribución de las variables H_s y T_p según la D_p , para la verificación del comportamiento del oleaje, en la costa en distintos intervalos de tiempo. Por último, se realizó una caracterización de los datos Atlas para establecer el comportamiento del oleaje en aguas profundas.

Para el conocimiento del aporte del oleaje a la hidrodinámica en la zona de estudio, se realizó una simulación numérica del oleaje, propagándolo hacia la bahía. Para este objetivo se utilizaron los datos Atlas como forzantes del modelo, debido a su localización en aguas profundas y su larga duración. Para los ajustes del modelo en el proceso de calibración se utilizó el punto qnt-1 durante la estación de invierno (qnt-1_inv) para el contraste de información. En el proceso de validación se compararon los resultados del modelo con las mediciones en el punto qnt-1_ver, mientras que, los puntos qnt-2 y qnt-3, fueron utilizados para una verificación en otros intervalos de tiempo. El punto qnt-5 adquirió relevancia para el proceso validación por su posición, en las fueras de la bahía, por lo que fue comentado en detalle.

Debido al cambio estacional de la dirección de los frentes de oleaje, en Chile, y al resguardo geográfico de la bahía, se realizó la propagación a partir de los espectros de oleaje, en vez de la utilización de los parámetros de resumen. La implementación de los datos de oleaje como forzantes del caso medio, se calculó al promediar, entre años, cada espectro correspondiente a cada estado de mar durante un año.

Tabla 6-2 Información recopilada de oceanografía física utilizados en la modelación numérica.

Instrumento	Identificación	Intervalo de mediciones	Δt [s]	Tipo de información				Fuente
				Oleaje	Marea	Info. Meteo.	Corrientes	
Modelo	Wavewatch III v4.18	01-01-1980// 31-12-2017	10800	✓				Atlas de Oleaje. Proyecto Universidad de Valparaíso
Mareógrafo	Estación de Quintero	27-03-2013// Actualidad	60		✓			Sea level station monitoring facility (IOC)
Estación Meteorológica	Estación Principal de Quintero	01-02-2012// Actualidad	3600			✓		Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)
	Estación La Greda	18-09-2009// Actualidad	3600			✓		Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)
	Estación Junta de Vecinos de Concón	28-02-2006// Actualidad	3600			✓		Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)
ADCP	qnt-1_inv	20-08-2016// 22-09-2016	10800 (Oleaje) // 600 (Marea, Corrientes)	✓	✓		✓	SEIA. "Proyecto Aconcagua"
	qnt-1_ver	24-01-2017// 28-02-2017	10800 (Oleaje) // 600 (Marea, Corrientes)	✓	✓		✓	SEIA. "Proyecto Aconcagua"
	qnt-2	17-02-2014// 14-03-2014	10800 (Oleaje) // 600 (Marea, Corrientes)	✓	✓		✓	SEIA. "Proyecto Terminal Multipropósito OXIQUM, Bahía de Quintero"
	qnt-3	02-01-2012// 10-04-2012	10800 (Oleaje) // 600 (Marea, Corrientes)	✓	✓		✓	OXIQUM
	qnt-4	02-08-2008// 16-09-2008	600				✓	CENDHOC
Boya	qnt-5	22-01-1982// 02-08-1982	10800	✓				CENDHOC

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-3 Intervalos de información oceanográfica física utilizados en la modelación numérica.

Datos		01-01-1980	22-01-1982	02-08-1982	28-02-2006	02-08-2008	16-09-2008	18-09-2009	02-01-2012	01-02-2012	10-04-2012	27-03-2013	17-02-2014	14-03-2014	20-08-2016	22-09-2016	24-01-2017	28-02-2017	31-12-2017	Actualidad
Oleaje	Wavewatch III v4.18																			
	qnt-1_inv (ADCP)																			
	qnt-1_ver (ADCP)																			
	qnt-2 (ADCP)																			
	qnt-3 (ADCP)																			
Marea	qnt-5 (boya)																			
	Estación de Quintero (IOC)																			
	qnt-1_inv (ADCP)																			
	qnt-1_ver (ADCP)																			
	qnt-2 (ADCP)																			
Estación meteorológica	qnt-3 (ADCP)																			
	Estación Principal de Quintero																			
	Estación La Greda																			
Corrientes	Estación Junta de Vecinos de Concón																			
	qnt-1_inv (ADCP)																			
	qnt-1_ver (ADCP)																			
	qnt-2 (ADCP)																			
	qnt-3 (ADCP)																			
	qnt-4 (ADCP)																			

Nota: Los intervalos presentados en la tabla son referenciales, no se encuentran a escala.

Fuente: Elaboración propia.

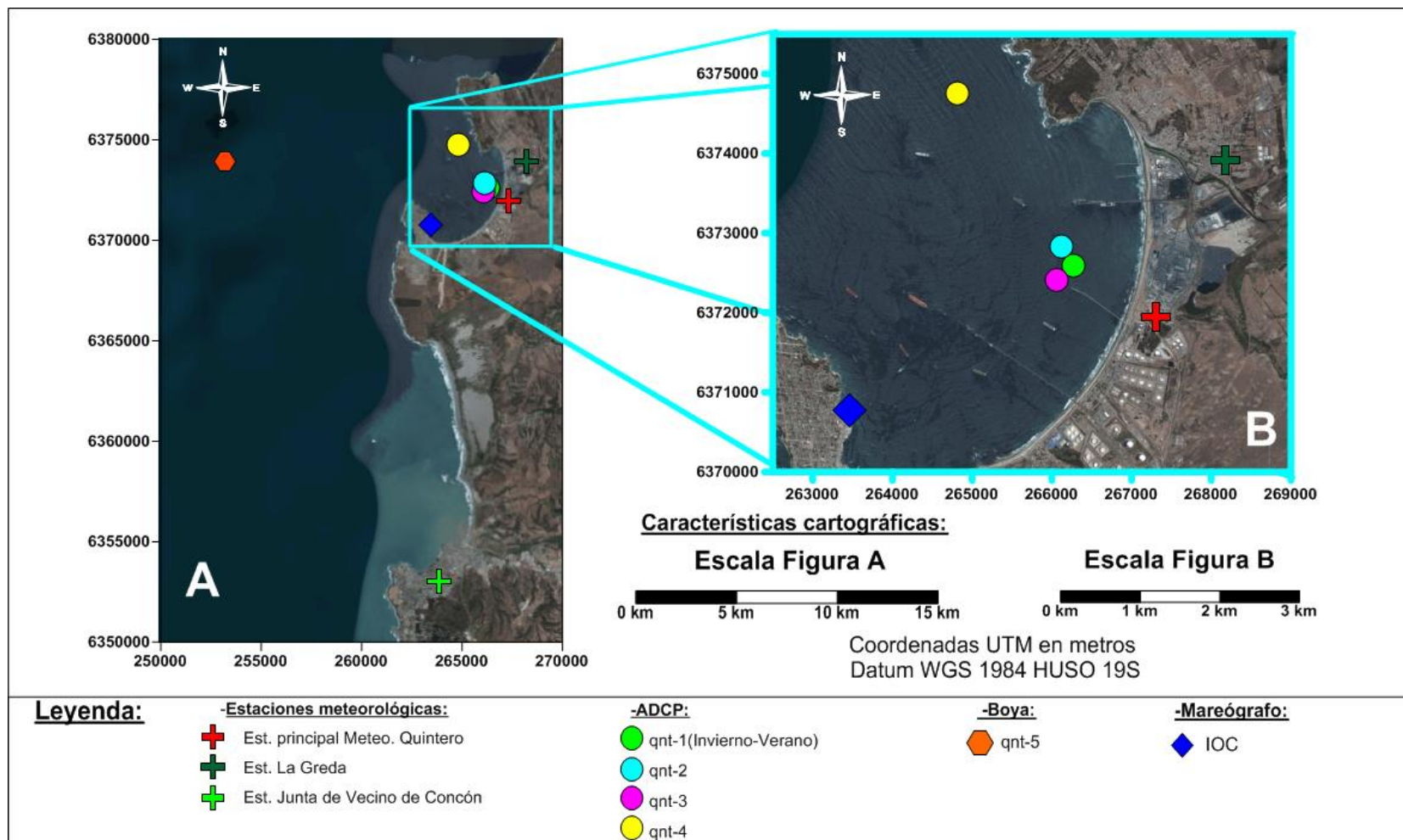


Figura 6-3 Puntos con información de oceanografía física.

Fuente: Elaboración propia.

➤ Marea

La información de marea necesaria para las simulaciones correspondió a las desnivelaciones de la columna de agua, la cual puede provocar flujos en la bahía. Para cumplir este objetivo, se recopilaban los datos desde un mareógrafo en el *Sea level station monitoring facility* (IOC, 1985), que en adelante fue denominado datos IOC, y las mediciones de ADCP (Tabla 6-2), en los puntos qnt-1, qnt-2 y qnt-3 (Figura 6-3). Se debe mencionar que, estos puntos se ubicaron en la costa de la bahía, sin embargo, como la marea corresponde a un fenómeno oscilatorio con una amplia longitud, la variación entre distintos puntos al interior de la bahía se asumió como despreciable. Gracias a esto, fue posible la utilización de mediciones costeras para forzar el dominio.

Las mediciones de los datos IOC comenzaron desde el 27 de marzo del 2013 hasta la actualidad, en intervalos de un minuto, mientras que, las mediciones en los puntos qnt-1, qnt-2 y qnt-3 se realizaron cada 10 minutos, en las mismas fechas que las mediciones de oleaje (Tabla 6-3).

Debido al comportamiento oscilatorio del fenómeno, las magnitudes extremas de las desnivelaciones se asemejaron entre los distintos años recopilados. Por lo anterior, se decidió elegir un año aleatorio entre los datos IOC para caracterizar el fenómeno de la marea y construir la forzante para el caso medio, seleccionándose el año 2016 por la continuidad de la información y al contener las mediciones realizadas en el punto qnt-1 en la estación de invierno. La caracterización se realizó con la estimación de los armónicos del año 2016 mediante la rutina T_Tide (Pawlowicz, Beardsley, & Lentz, 2002) con la finalidad de definir el régimen de marea, según el coeficiente de Courtier (SHOA, 1992) mostrado en la ecuación 6-1 y, además, se estimaron los valores no-armónicos, pleamar máxima, bajamar máxima, nivel medio del mar y NRS, el último fue estimado según la ecuación 6-2 (SHOA, 2003).

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} = \begin{cases} 0.00 - 0.25 & \text{marea semidiurna} \\ 0.25 - 1.50 & \text{marea mixta semidiurna} \\ 1.50 - 3.00 & \text{marea mixta diurna} \\ < 3.00 & \text{marea diurna} \end{cases} \quad 6-1$$

$$NRS = Z_0 - (M_2 + S_2 + N_2 + K_1 + O_1) \quad 6-2$$

Donde:

NRS: nivel de reducción de sonda

Z_0 : nivel medio del mar referido al cero instrumental del período de registro

M_2 : semiamplitud, constituyente lunar principal semidiurno

N_2 : semiamplitud, constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno

S_2 : semiamplitud, constituyente solar principal semidiurno

K_1 : semiamplitud constituyente lunisolar declinacional diurno

O_1 : semiamplitud constituyente lunar declinacional diurno

La construcción de la forzante de marea para las simulaciones se debió realizar mediante una serie de tiempo de desnivelaciones con la ayuda de los armónicos encontrados, con la finalidad de eliminar el ruido de la serie, que pudo perjudicar la estabilidad del modelo. Este

procedimiento dejó solo el aporte astronómico sobre la marea, despreciando los meteorológicos, de menor magnitud y con un comportamiento más errático.

La evaluación de los procesos de calibración y validación fue realizada con las mediciones en el punto qnt-1, debido a que en este sitio se midieron las desnivelaciones de la columna de agua representadas desde el NRS en las estaciones de invierno y verano. En este análisis se consideró relevante la representación del residuo entre la medición y el modelo para determinar la magnitud del fenómeno de marea no representado, es decir, la marea meteorológica.

➤ **Datos meteorológicos**

La información meteorológica necesaria para realizar las simulaciones en esta memoria consistió en el viento (velocidad y dirección), temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y cobertura por nubes. La información del viento fue necesaria como forzante de la hidrodinámica y el resto de las variables se emplearon para el intercambio de calor entre la interfaz mar-atmósfera.

Esta información fue recopilada desde el Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire (SINCA, 2009), en adelante SINCA. Este organismo gubernamental posee una serie de estaciones meteorológicas a lo largo de Chile, siendo la más cercana la denominada estación meteorológica Principal de Quintero (Figura 6-3). Es importante destacar que, para efectos de la simulación hidrodinámica y en el afán de comparar datos numéricos con las mediciones de correntometría disponible en los nodos qnt-3 y qnt-4, fue necesario complementar la información meteorológica provista por la estación Principal de Quintero con antecedentes provenientes desde las estaciones la Greda y Junta de Vecinos, a fin de completar el gap temporal (Tabla 6-3). En el anexo 13.3.1 se contrastaron los datos de las dos estaciones anteriores con la estación meteorológica principal y se verificó que la distancia entre ellas no provoca grandes diferencias en sus magnitudes y direcciones. Entre la información necesaria para la simulación hidrodinámica, no fue posible recopilar mediciones de la cobertura por nubes, por lo cual fue estimada con un valor constante de 70%, correspondiente al valor por defecto del modelo.

En la Tabla 6-3 se ilustró que las mediciones de la estación principal de Quintero comenzaron el 01 de febrero del 2012 hasta la actualidad, mientras que, la estación de La Greda comenzó el 18 de septiembre del 2009 hasta la actualidad. La estación Junta de vecinos de Concón comenzó sus mediciones el 28 de febrero del 2006 hasta la actualidad. Todas las estaciones midieron los parámetros meteorológicos con un intervalo de una hora. Con el fin de caracterizar las variables meteorológicas, se analizaron las series de tiempo en la estación meteorológica Principal de Quintero. En la variable viento, agregó un análisis de sus magnitudes, mediante una tabla de incidencia y una gráfica de distribución de la velocidad con respecto a la dirección.

Las forzantes del caso medio fueron construidas con la información de la estación meteorológica Principal de Quintero, al promediar los datos de cada intervalo de medición que constituye un año, entre los años recopilados.

➤ **Corrientes**

La información de corriente recopilada correspondió a las mediciones en los puntos qnt-1, qnt-2, qnt-3 y qnt-4, como se muestra en la Tabla 6-2.

Los datos obtenidos en los puntos qnt-1, qnt-2 y qnt-3 fueron medidos durante el mismo intervalo de tiempo que el oleaje (Tabla 6-3), pero con frecuencias de muestreo de diez minutos. En el caso del punto qnt-4, que solo presentó mediciones de corrientes, su muestreo comenzó el 02 de agosto del 2008 hasta el 16 de septiembre del mismo año, con intervalos de diez minutos.

Debido a su variación vertical y su medición por capas, la caracterización de los datos de corrientes se realizó sobre las capas superior, intermedia y fondo, con la finalidad de hacer un análisis simplificado. La caracterización se centró en las mediciones en el punto qnt-1, debido a sus datos durante las estaciones de invierno y verano, y en el punto qnt-4, por su localización en las afueras de la bahía. Este estudio se realizó mediante gráficos de distribución de velocidades según la dirección y tablas de incidencia. Los puntos qnt-2 y qnt-3 fueron utilizados para ahondar en los análisis realizados en el punto qnt-1, mediante gráficos de distribución de velocidades según la dirección.

La hidrodinámica representada con las forzantes seleccionadas para el proceso de calibración fue contrastada con los datos de corrientes medidos en el punto qnt-1 durante la estación de invierno, mientras que, las simulaciones del proceso de validación fueron contrastadas con las mediciones de corrientes en los puntos qnt-1_ver, qnt-2, qnt-3 y qnt-4, según corresponda. Se debe mencionar que, el punto qnt-4 permitió evaluar la simulación en la entrada de la bahía, a diferencia de los otros puntos que se localizan en la costa.

6.1.3 OCEANOGRAFÍA QUÍMICA

En la información recopilada de este capítulo se encuentran las variables temperatura, salinidad y nutrientes del agua de mar. La distribución de estas variables en el espacio es dependiente del transporte que pueda causar la hidrodinámica, sin embargo, la densidad que es relevante para las corrientes es dependiente de estas mismas variables. Para esta memoria, el objetivo de esta información fue establecer la calidad de agua para la simulación ecológica.

Tabla 6-4 Información recopilada de oceanografía química utilizados en la modelación numérica.

Instrumento	Identificación	Intervalo de mediciones	Δt [s]	Tipo de información				Fuente
				Temperatura	Salinidad	Oxígeno disuelto	Nutrientes	
Modelo	HYCOM	01-01-2014 // 01-01-2018	3600	✓	✓			Modelo HYCOM
CTD	Estaciones proyecto Aconcagua	Mediciones puntuales	-	✓	✓	✓		SEIA. "Proyecto Aconcagua"
Termistor	SHOA	01-01-2002//Actualidad	-	✓				SHOA.
Toma de muestras	Estaciones proyecto Aconcagua	Mediciones puntuales	-				✓	SEIA. "Proyecto Aconcagua"
	P.O.A.L.	Mediciones puntuales	-			✓	✓	Programa de Observación del Ambiente Litoral realizado por DIRECTEMAR
ADCP	qnt-1_inv	20-08-2016//22-09-2016	600	✓				SEIA. "Proyecto Aconcagua"
	qnt-1_ver	24-01-2017//28-08-2017	600	✓				SEIA. "Proyecto Aconcagua"

Fuente: Elaboración propia.

En la información recopilada (Tabla 6-4) se presentaron algunos parámetros con mediciones puntuales, es decir, mediciones de un instante en cierta posición (X, Y, Z) del cuerpo de agua. Este tipo de medición fue realizada con el instrumento CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) y mediante tomas de muestras de agua. El CTD puede medir ciertos parámetros de la columna de agua durante el descenso o ascenso del instrumento, mientras que, las tomas de muestras consisten en la captura de un volumen de agua para ser procesadas en laboratorio.

Tabla 6-5 Intervalos de información oceanográfica química utilizados en la modelación numérica.

Datos		01-01-2002	01-01-2014	20-08-2016	22-09-2016	24-01-2017	28-02-2017	01-01-2018	Actualidad
Temperatura y Salinidad*	HYCOM								
	qnt-1_inv (ADCP)								
	qnt-1_ver (ADCP)								
	SHOA								

*: Los datos provenientes del HYCOM son los únicos datos de la tabla con información de la salinidad del agua
Nota: Los intervalos presentados en la tabla son referenciales, no se encuentran en escala
Fuente: Elaboración propia.

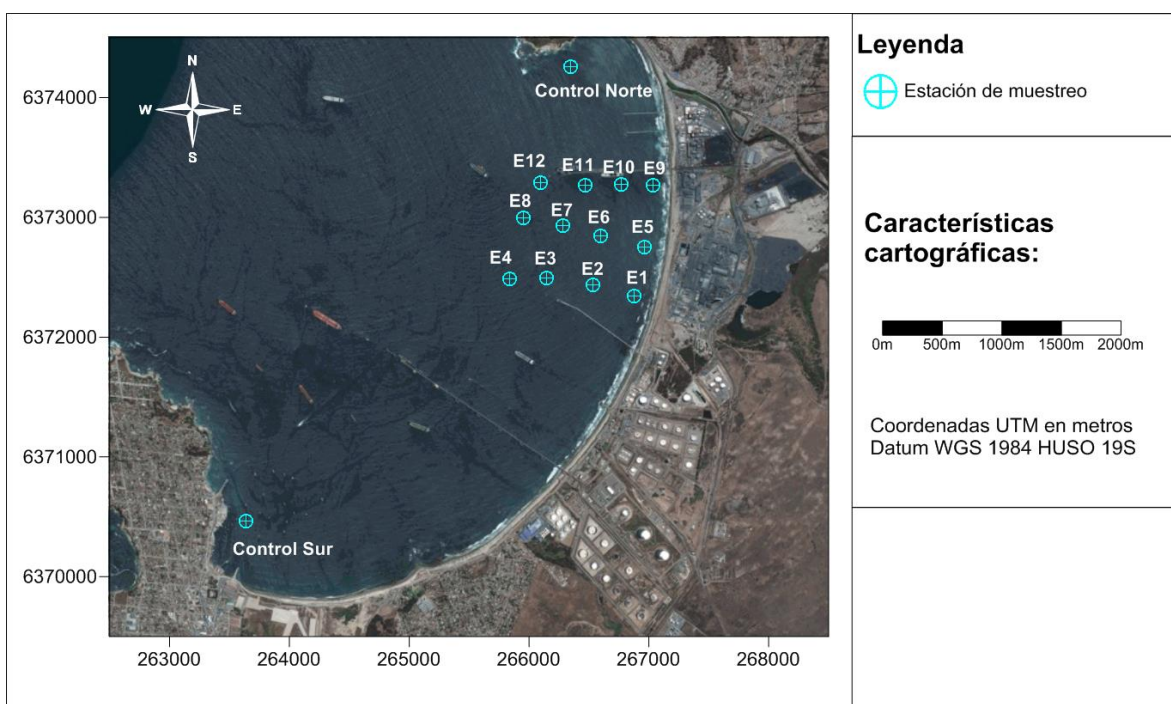


Figura 6-4 Estaciones de medición en proyecto Aconcagua.

Fuente: Elaboración propia.

El tipo de medición anteriormente nombrado fue realizado en la línea base del proyecto Aconcagua (SGA, 2017), en adelante proyecto Aconcagua, el cual es una de las fuentes de información utilizada para esta memoria. En el proyecto Aconcagua se utilizaron CTD y muestras de agua en los puntos señalados en la Figura 6-4. Estos puntos se concentraron en la costa, al norte de la bahía, con la excepción de los puntos de control, que se establecieron en zonas alejadas, donde no se esperaba algún impacto. Estos puntos también fueron utilizados para la descripción de variables biológicas que fueron estudiadas en la línea base y utilizadas en esta memoria, como se describió en el capítulo 6.1.4. En la Tabla 6-4 se presentó información de fuentes aparte del proyecto Aconcagua, los cuales fueron descritos a continuación.

➤ **Temperatura y salinidad del agua**

Los datos de temperatura y salinidad del agua se obtuvieron mediante mediciones con ADCP, Termistor y CTD, según se señaló en la Tabla 6-4. El ADCP y el Termistor fueron utilizados para la medición de la temperatura del agua, aunque el ADCP midió la temperatura del fondo marino en el punto qnt-1 señalado en la Figura 6-3 y el termistor (SHOA) midió la temperatura superficial del mar, en adelante TSM. A diferencia de los anteriores, el CTD fue utilizado en el proyecto Aconcagua para medir la temperatura y salinidad de la columna de agua en los puntos señalados en la Figura 6-4. Además de las mediciones, se recopiló datos de temperatura y salinidad a partir de un modelo de circulación global denominado HYCOM, con el cual se simuló el transporte de la temperatura y salinidad a través de un dominio horizontal y vertical, liberando su información a través de su sitio web (www.hycom.org). Debido a la amplia discretización horizontal se cuenta con solo dos nodos cercanos a la zona de estudio, que fueron señalados en la Figura 6-5. En el anexo 13.3.2 se realizó una breve descripción del modelo para mayor detalle. En la Tabla 6-5 se ilustraron los intervalos de datos recopilados de temperatura, donde se presentaron mediciones mediante ADCP en los mismos intervalos que se obtuvieron las variables físicas en el punto qnt-1, además se obtuvieron las mediciones del termistor que se realizan desde enero del 2002 hasta la actualidad. En el caso del modelo HYCOM, se obtuvo una simulación, con una misma configuración constante del modelo, desde el 01 de enero del 2014 hasta el 01 de enero del 2018. Para este estudio también se obtuvieron las mediciones de CTD de temperatura y salinidad, que fueron realizadas en campañas de invierno y verano, durante el año 2016 y 2017, respectivamente. Estas últimas mediciones no fueron indicadas en la Tabla 6-5 debido a su característica instantánea.

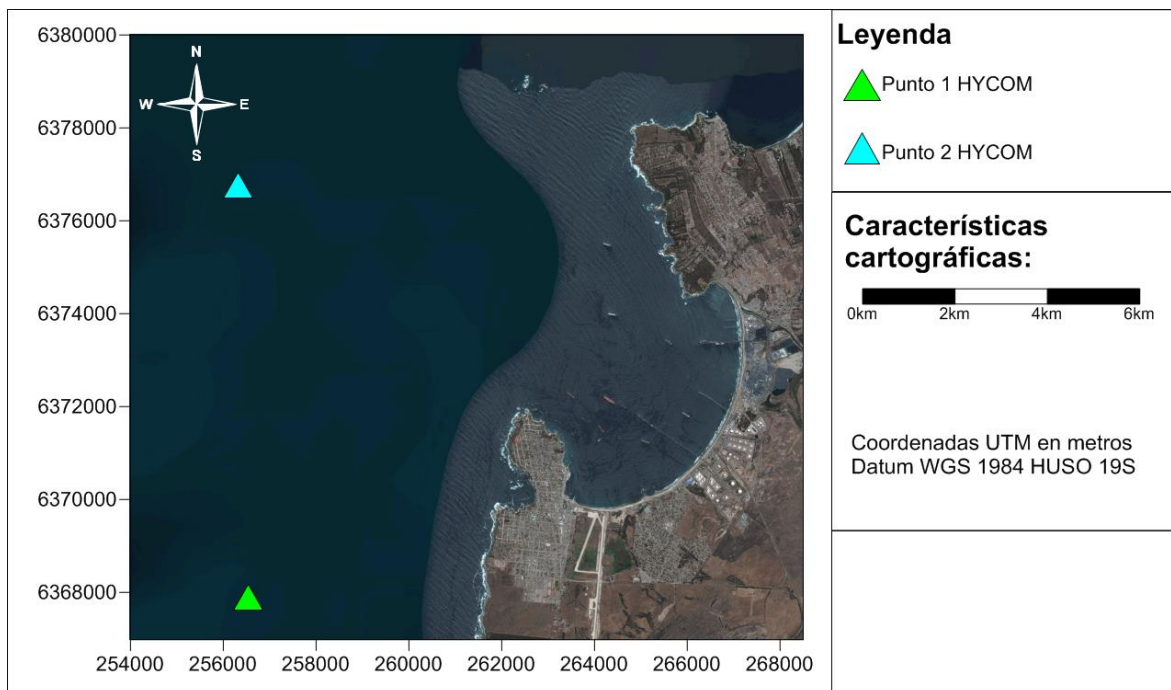


Figura 6-5 Ubicación de puntos de salida del modelo HYCOM.

Fuente: Elaboración propia.

La caracterización de esta información consistió en la realización de gráficas de los datos recopilados como serie de tiempo, con la finalidad de conocer la variabilidad de sus magnitudes. En el caso de las mediciones por CTD, como fueron mediciones puntuales se graficaron los parámetros por la profundidad en cada punto de muestreo, entregando la variación de las magnitudes al interior de la bahía durante las campañas.

Los datos de TSM fueron utilizados para contrastar los datos del modelo HYCOM en la superficie y evaluar la capacidad del modelo para representar el estado térmico del agua.

Las forzantes de las simulaciones, de calibración, validación y explotación de los distintos casos de estudio, fueron construidas a partir de los datos de la HYCOM, gracias a su disposición de datos fuera de la bahía, con variaciones en el tiempo y en la vertical. Al tener dos nodos con datos, se decidió realizar una interpolación lineal sobre una transecta, correspondiente al borde oeste del dominio que fue forzado con esta información. El time-step inicial de la serie de datos, fue utilizado para la construcción de una condición inicial, mediante una interpolación desde los nodos de extracción hacia el dominio del modelo. Aun sabiendo que este procedimiento no entregaría una condición inicial capaz de representar la realidad de forma fidedigna, el objetivo de este proceso fue conseguir un diferencial de las variables en el dominio, que facilite su transporte durante los primeros *time-steps*.

Los datos de CTD y ADCP, al ser medidos al interior de la bahía, fueron utilizados como información para comparar la simulación durante el proceso de calibración en la estación de invierno y de validación en verano.

La simulación del caso medio utilizó datos de temperatura y salinidad desde la HYCOM. Debido a la dificultad de descargar grandes volúmenes de información, se utilizó un año extraído del modelo. La selección de este año se realizó con la información superficial de las variables en los meses enero y julio de los últimos cinco años, como los meses representativos de las estaciones de verano e invierno, respectivamente. El año escogido como forzante fue el correspondiente a los meses con mayor similitud al promedio entre los meses de los últimos cinco años.

➤ **Nutrientes**

La información de nutrientes (Tabla 6-4) se recopiló desde mediciones puntuales durante el proyecto Aconcagua y en el Programa de Observación del Ambiente Litoral de la Directemar (www.directemar.cl), en adelante P.O.A.L. Este programa consiste en campañas de mediciones de características en cuerpos de agua, a lo largo de Chile. En las cercanías de las zonas de estudio se tienen las estaciones Quintero, Concón, Valparaíso y Playa Ancha (Figura 6-6). Además de esta información, se realizó una búsqueda bibliográfica con el fin de obtener unos valores representativos de nutrientes en aguas marinas.

Como se detalla en el capítulo 6.2.3, el modelo ecológico necesita datos de los nutrientes: nitrato, nitrito, amonio, fósforo inorgánico y oxígeno disuelto (DO), para su funcionamiento. Las variables anteriores cumplieron la función de establecer la calidad de agua, sobre la cual interactuaron los organismos.

El proyecto Aconcagua se realizó como una medición puntual en campañas de invierno, durante el año 2016 y en verano, en el año 2017. El P.O.A.L. contiene una gran cantidad de información de nutrientes en el mar, cuyas mediciones comenzaron en el año 1993 hasta la actualidad. A pesar de su gran volumen, estas mediciones presentaron algunas irregularidades, tales como: falta de regularidad en los intervalos de mediciones entre

campañas consecutivas, los distintos nutrientes medidos por campaña y el desconocimiento en las metodologías utilizadas en cada campaña. Este último punto fue corregido en el año 2013, cuando se establecieron los métodos de medición en los cuerpos de agua marinos. Por esto se decidió utilizar los datos desde el año 2013 en adelante.

Se debe mencionar que, los nutrientes, en adelante, fueron considerados por la concentración de los átomos de nitrógeno y fósforo, según corresponda, en vez de la concentración de la molécula, con la excepción del oxígeno disuelto.

La información recopilada fue caracterizada con el fin de determinar las magnitudes que puede alcanzar las concentraciones de los nutrientes en las aguas marinas. Los datos provenientes del P.O.A.L. fueron esquematizados mediante gráficos de dispersión y se contrastaron con los valores máximos y mínimos de los datos del proyecto Aconcagua y la información bibliográfica. En los datos del proyecto Aconcagua se analizaron por separado las campañas de invierno y verano.

Se aplicó un análisis adicional en los datos de oxígeno disuelto del P.O.A.L., el cual consistió en la exclusión de las mediciones realizadas durante eventos del Niño, pues este fenómeno podría provocar reducciones en la concentración del DO (Prado & Sievers, 1987), generándose valores atípicos que pueden ocasionar una subestimación de los análisis del DO.

El modelo numérico puede emplear datos de nutrientes como forzante, desde los bordes del dominio, o condición inicial, sin embargo, la poca cantidad de información requirió tomar una serie de supuestos:

- Las forzantes de nutrientes en el modelo fueron omitidas, por tanto, se excluyeron los ingresos de nutrientes por los bordes del dominio.
- Las condiciones iniciales, se construyeron con un valor constante igual al promedio de los datos del P.O.A.L., sin importar el tiempo, localización ni profundidad de la medición. Entre los datos del P.O.A.L. encontrados, se excluyó la estación de Quintero, con la intención de utilizar los valores de nutrientes no afectados por las descargas.

Según la metodología establecida, se asumió una concentración inicial de nutrientes constante en el dominio, con la cual los organismos simulados interactuaron según el transporte generado por la hidrodinámica, despreciando los incrementos de la concentración de nutrientes desde el exterior del dominio.

La baja cantidad de datos impidió la realización de los procesos de calibración y validación mediante un contraste de las magnitudes simuladas, por ello, se debió comparar el comportamiento simulado con la conducta identificada por la bibliografía. Este procedimiento se describe en el capítulo 6.3.

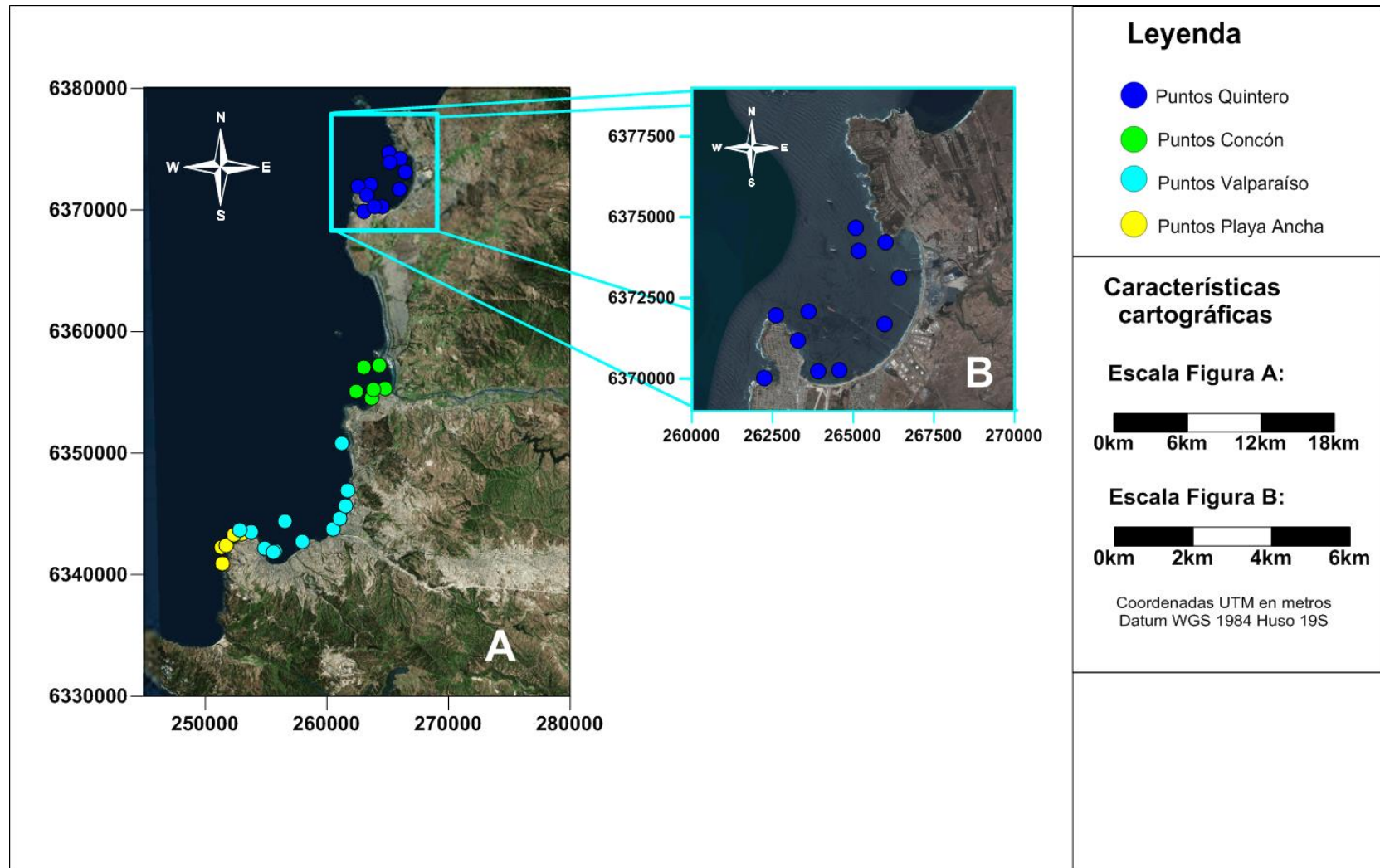


Figura 6-6 Puntos P.O.A.L. en la V región.
Fuente: Elaboración propia.

6.1.4 OCEANOGRAFÍA BIOLÓGICA

Como se establecerá posteriormente en el capítulo 6.2.3, las variables biológicas que utiliza el modelo son: fitoplancton, clorofila a, zooplancton, detritus y vegetación bentónica. Estas variables se incluyen en el modelo como concentración de biomasa, información que no es usualmente medida ni publicada. Debido a esto, se realizó una búsqueda de información y metodologías para establecer un valor característico de cada variable. La escasa información de los organismos conllevó, como en la variable nutrientes, a desistir en la construcción de forzantes y solo optar por la realización de condiciones iniciales constantes en el dominio, que interactuaron con las otras variables simuladas. Las metodologías para establecer el valor de las variables fueron las descritas a continuación:

- **Vegetación bentónica:** Como la bahía de Quintero carece de un fondo marino duro, necesario para el crecimiento de la vegetación bentónica, se asumió su ausencia y, por lo tanto, se simuló un sistema ecológico sin esta variable (concentración igual a cero).
- **Fitoplancton-Clorofila:** En las mediciones cuantitativas de fitoplancton se suele informar sobre las cantidades de individuos (abundancia) y las especies (taxa) sobre cierto volumen medido, haciendo análisis sobre la distribución de estos parámetros en el cuerpo de agua. Este tipo de mediciones fue realizado en la línea base del proyecto Aconcagua en las estaciones presentadas en la Figura 6-4, durante las campañas de invierno y verano. Además de esta información, se recopilaban datos de biomasa de clorofila a en cuerpos de agua marinos, principalmente en la bahía de Valparaíso.

Para la determinación del valor característico de biomasa de fitoplancton a emplear como condición inicial, se decidió utilizar el promedio de los datos de biomasa de clorofila a, ya que esta información fue recopilada en distintos tiempos y locaciones. Con esta información se obtuvo la biomasa de fitoplancton mediante la relación propuesta por Desortová (1981), que estableció una equivalencia entre biomasa de clorofila a y biomasa de fitoplancton, asumiendo que la mayor parte de las algas son diatomeas.

Adicionalmente, los datos del proyecto Aconcagua fueron utilizados para comparar el orden de magnitud encontrado. Para cumplir este objetivo se utilizó la relación establecida por Alvial & Avaria (1982), la cual relaciona la abundancia de fitoplancton y biomasa de clorofila a, y luego, se aplicó la metodología anterior para obtener la correspondiente biomasa de fitoplancton.

Según se establece en el capítulo 6.2.3, el modelo ecológico requiere de la biomasa de fitoplancton separada según la concentración interna de los nutrientes carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P). Esta proporción fue determinada según la relación de Redfield (Libes, 2009), la cual estableció que la composición interna de los nutrientes en el fitoplancton se encuentra en la relación 106 C: 16 N: 1P. Esta relación se utilizó considerando que la biomasa determinada corresponde a la porción de carbono, para así, determinar la porción de nitrógeno y fósforo.

- **Zooplancton:** Como sucede con el fitoplancton, el zooplancton suele estimarse mediante análisis cuantitativos como la abundancia y la taxa, siendo pocos los estudios de biomasa. Para esta variable se recurrió a la información medida en Escribano & Fuentes (2012), donde se cuantificó la biomasa de zooplancton, de la taxa copépodos en las costas de Concepción y Antofagasta.

Se debe mencionar que, en la recopilación de antecedentes se despreció la metodología de medición de biomasa de zooplankton, que puede ser: peso seco, peso húmedo, entre algunas.

- **Detritus:** Al no encontrarse bibliografía que midiera o estimara el detritus en la zona de estudio, se decidió asumir una concentración inicial de biomasa igual a 0 [mg/L]. Este supuesto implicó una simulación desde un escenario simplificado donde no hay material orgánico inerte, por tanto, la variable detritus comenzó a generarse, en el modelo, desde que los organismos configurados en la condición inicial comenzaron a morir. Lo anterior corresponde a un escenario inicial e irreal que busca permitir la evaluación de los cambios de esta variable durante la simulación, así como es detallado más adelante.

6.1.5 DESCARGA Y CAPTACIONES

La inclusión de las descargas y captaciones en las simulaciones numéricas requirió una investigación sobre las características de estas estructuras. Esta información provino desde los organismos gubernamentales, Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), La Armada de Chile mediante su organismo Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Directemar), Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Los parámetros necesarios para realizar la simulación, según los objetivos de esta memoria, son las coordenadas (X, Y), su profundidad (Z), los caudales (descargas y aducción), la temperatura, la salinidad y la concentración de los nutrientes N y P. Como se estableció en la Tabla 6-6, solo parte de la información fue conseguida a partir de las fuentes oficiales de datos, por ello, se debió realizar una serie de supuestos, los cuales se explicaron en detalle en el presente capítulo.

Tabla 6-6 Estado de la información por obtener, acerca descargas y aducciones.

Información necesaria	Estado
Coordenadas (x, y)	✓
Profundidad (z)	✗
Caudal de descarga	✓
Caudal de aducción	✗
Temperatura	P
Salinidad	✗
Concentración de NTK	P
Concentración de P	P
Leyenda: ✓ Obtenido ✗ Todos Faltantes P Algunos obtenidos	

Fuente: Elaboración propia.

- Las profundidades de las descargas y captaciones se asumieron en el fondo marino. Este supuesto se tornó lógico para las descargas, pero puede variar en las captaciones.

- A pesar que los caudales de descargas fueron conocidos, los caudales de captaciones no fueron informados y debieron estimarse. Dado que no es posible conocer el consumo de agua y asociarlo al caudal captado, fue estimado según el caudal descargado, asumiendo la continuidad entre la succión y la descarga.
- La información de temperatura fue obtenida para gran parte de las descargas, en los casos ausentes, se consideraron que no provocaban un diferencial térmico en la bahía.
- La salinidad de los efluentes no fue informada para ninguna descarga, aunque no hay alguna empresa en la zona caracterizada por alterar la salinidad (por ejemplo, desalinizadoras). Para la simulación de esta variable se asumió que los procesos industriales no afectaban su magnitud, por tanto, los efluentes que provinieran desde captaciones, mantendrían la misma magnitud que el cuerpo de agua. En el caso que la descarga no se estuviera relacionada con alguna toma de agua, se consideró como agua dulce, es decir, con una salinidad igual a cero.
- La concentración de los nutrientes que contenían nitrógeno se redujo solo a la concentración de NTK, que correspondió al nitrógeno orgánico, el cual fue concordante con los límites establecidos en el D.S. N°90/ 2000.
- Las concentraciones del contenido de P y NTK, fue informado en algunas de las descargas. Para los efluentes sin esta información se decidió utilizar la misma metodología que la salinidad. Por tanto, si el efluente provenía desde una toma de agua, no alteraría la concentración del cuerpo de agua, en cambio, si la descarga no se relacionaba con una captación, se asumió un efluente con concentración de P y NTK iguales a cero.

La información obtenida fue caracterizada mediante gráficas de dispersión con respecto al tiempo, comparándose contra los datos de las otras descargas. Para la inclusión de esta información en el modelo, se decidió calcular la media de las variables requeridas, independiente de la cantidad de datos registrados.

Entre las descargas y captaciones incluidas, en un caso de estudio especial, se agregó la descarga y captación del proyecto Aconcagua, la cual, no ha sido instalada en la actualidad, pero posee los permisos ambientales aprobados. El proyecto Aconcagua consiste en la instalación de una desalinizadora, la cual descargará salmuera en el cuerpo de agua.

Las magnitudes de los efluentes se describen en el capítulo 7.4, donde se muestran los valores a utilizar en la modelación.

6.2 MODELACIÓN NUMÉRICA

El objetivo de la modelación numérica fue conseguir una representación del posible comportamiento de la bahía, que permitiera evaluar los efectos de las múltiples descargas y captaciones en la zona de estudio. Para cumplir esto, se decidió utilizar algunos de los modelos pertenecientes al Danish Hydraulic Institute (DHI), los cuales realizan la simulación mediante las ecuaciones de gobierno y junto a la información de los fenómenos que afectan la zona de estudio. Los cálculos que se realizaron para la obtención de la simulación, se efectuaron en los nodos de los elementos triangulares que conformaron la grilla numérica, al interior del dominio. Los modelos elegidos permitieron utilizar elementos flexibles de tamaño variable que optimizó la capacidad computacional disponible, al establecer elementos más finos en la zona de estudio.

En los siguientes puntos se describieron los modelos utilizados y cómo fueron implementados para representar el oleaje, la hidrodinámica y el ambiente ecológico en la bahía de Quintero.

6.2.1 SIMULACIÓN OLAJE

La simulación del oleaje tuvo por objetivo su propagación desde aguas profundas a la zona de estudio, para estimar el aporte del oleaje sobre la hidrodinámica en la zona de interés. Para esta tarea se seleccionó el modelo *MIKE 21*, en su módulo *Spectral waves (MIKE 21 SW)*, este permite la simulación del crecimiento, decaimiento y transformación del oleaje Sea y Swell dentro y fuera de la costa. Adicionalmente, realiza el cálculo de los tensores de radiación de manera que puedan ser utilizado directamente por el modelo hidrodinámico elegido, para crear los campos de corrientes inducidos por el oleaje.

El modelo Mike 21 SW tiene la capacidad de resolver los siguientes fenómenos:

- Crecimiento de la ola por acción del viento.
- Interacción no lineal entre olas.
- Disipación por *White-capping*.
- Disipación por fricción de fondo.
- Refracción y *Shoaling* por variaciones de profundidad.
- Disipación por profundidad (rotura de ola).
- Interacción ola-corriente.
- Efecto de la variación temporal del nivel de agua

La resolución de estos fenómenos se consigue con la ecuación de gobierno denominada ecuación de balance de la acción de ola (Komen *et al.*, 1994; Young, 1999) (DHI (a), 2017), la cual fue presentada previamente en el capítulo 5.2.2, específicamente en la ecuación 5-10. Este modelo fue empleado con la finalidad de propagar el oleaje de aguas profundas hacia la costa, por esta razón fueron más relevantes para su representación los fenómenos asociados a los cambios de profundidad como la refracción y *shoaling*.

Para determinar la propagación del oleaje es necesario obtener el campo de velocidades del mismo y la energía de transferencia a lo largo del océano. Para dicho propósito el modelo emplea las ecuaciones 6-3, 6-4 y 6-5, las cuales expresan los términos de velocidad del grupo de olas en las cuatro dimensiones (c_x, c_y, c_σ y c_θ , donde x y y son las coordenadas cartesianas horizontales; $\sigma = 2\pi f$, la frecuencia angular y θ la dirección del oleaje). En estas ecuaciones se emplean las variables t que es el tiempo; s que es la coordenada espacial de la dirección de la ola; m que es la coordenada perpendicular a s ; $\vec{U}$ vector velocidad de corriente; $\vec{k}$ vector número de ola, con magnitud k y dirección θ y d como la profundidad.

$$(c_x, c_y) = \frac{\partial \vec{x}}{\partial t} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad 6-3$$

$$c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad 6-4$$

$$c_\theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad 6-5$$

Luego, mediante las ecuaciones 6-6, 6-7 y 6-8 se determinaron los tensores de radiación, los cuales fueron necesarios para implementar el aporte del oleaje sobre la hidrodinámica. En estas ecuaciones se presenta g como la aceleración de gravedad y f_{u2} , f_{pp} , f_{uv} y f_{v2} son los flujos de energía que se definen en concordancia con las ecuaciones 6-9, 6-10, 6-11 y 6-12, donde $E(f, \theta)$, es la densidad de energía de una ola con frecuencia f y dirección θ .

$$S_{xx} = \frac{1}{2} g (f_{u2} + f_{pp}) \quad 6-6$$

$$S_{xy} = \frac{1}{2} g (f_{uv}) \quad 6-7$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2} g (f_{v2} + f_{pp}) \quad 6-8$$

$$f_{pp} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) E(f, \theta) df d\theta \quad 6-9$$

$$f_{u2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos^2 \left(\frac{3}{2}\pi - \theta \right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) E(f, \theta) df d\theta \quad 6-10$$

$$f_{uv} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos \left(\frac{3}{2}\pi - \theta \right) \sin \left(\frac{3}{2}\pi - \theta \right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) E(f, \theta) df d\theta \quad 6-11$$

$$f_{v2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sin^2 \left(\frac{3}{2}\pi - \theta \right) \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) E(f, \theta) df d\theta \quad 6-12$$

El modelo mencionado fue empleado en la grilla numérica presentada en la Figura 6-7, cuyo objetivo fue la propagación el oleaje desde aguas profundas a la zona de estudio. Esta grilla fue diseñada con un ancho y largo que permitiese excluir la sombra numérica de la zona de estudio, es decir, disminuir o eliminar la incertidumbre provocada por la propagación de datos de oleaje de aguas profundas desde bordes que se encontrasen en aguas intermedias o someras y que, por lo tanto, no logran representar de manera correcta el fenómeno.

Debido a lo anterior, para el diseño de la grilla se realizó una caracterización de los parámetros de resumen de los datos Atlas, identificando el mayor periodo peak de 24 [s], implicando que, desde los 500 [m] se denominó aguas profundas para todos los datos de oleaje recopilados. Por esto, como se indicó en la Figura 6-7, el borde oeste del dominio se localizó a profundidades mayores de 500 [m]. Por otro lado, según los datos de oleaje recopilados se presentaron direcciones peaks desde los 210 [°] a los 345 [°]. Estas direcciones se representaron en la Figura 6-7 con respecto al punto qnt-1, el cual fue el principal punto de calibración y validación, indicando junto con la intercepción del veril de los 500 [m] la zona exenta de sombra numérica. La geografía también otorgó una protección de la sombra numérica: por el sur gracias a la punta Curaumilla y, más cerca de la zona de estudio, por la playa de Ritoque, mientras que, por el norte se protegió por la punta Horcón. Esta grilla, además, se debió diseñar para concordar con los nodos de la grilla mostrada en la Figura 6-9, sobre la cual se realizó la simulación hidrodinámica. El objetivo de esta tarea fue la obtención del oleaje en los bordes del dominio para realizar una simulación en la grilla

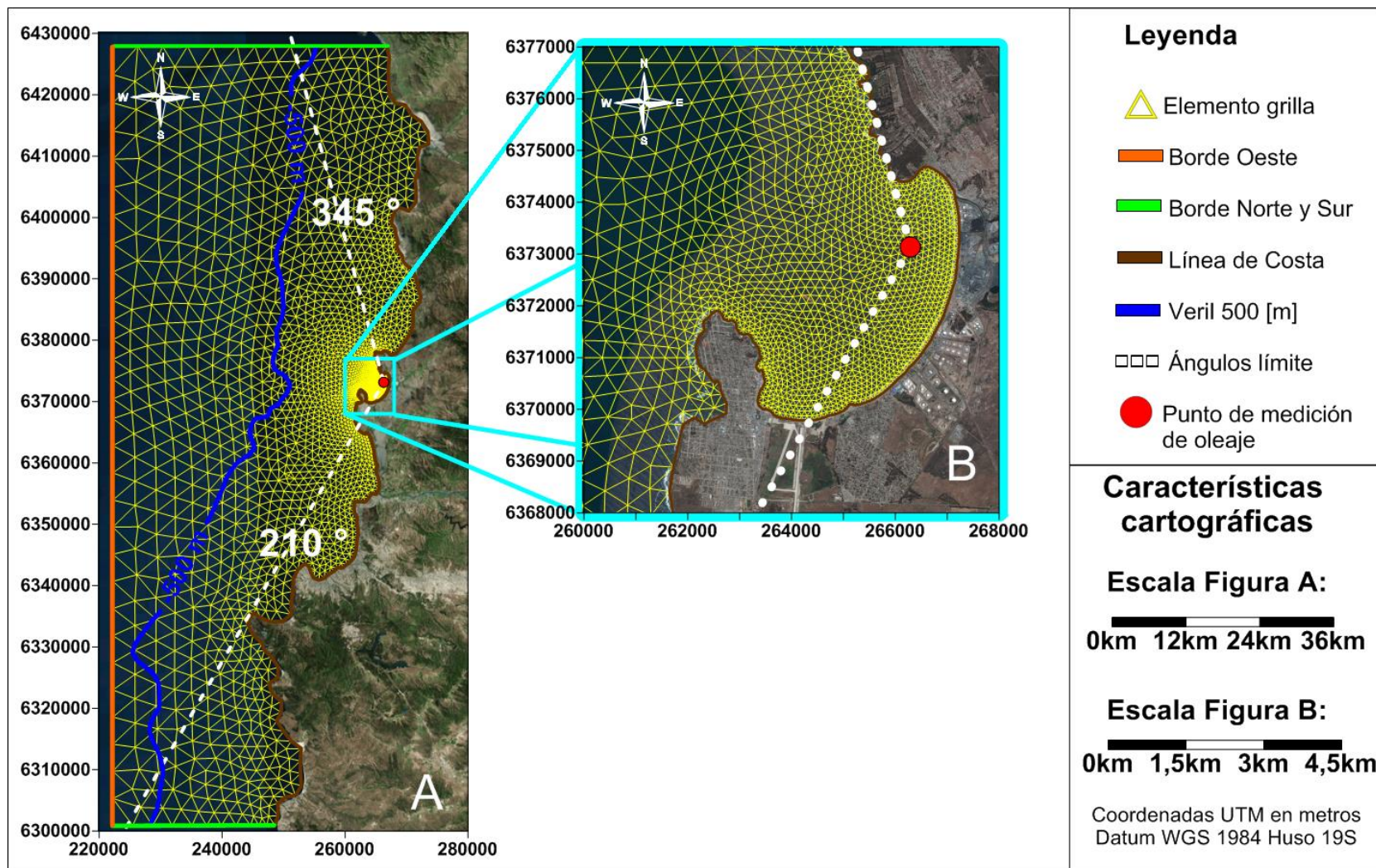


Figura 6-7 Malla para modelación de oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

de la Figura 6-9 y determinar los tensores de radiación en el dominio, que fueron utilizados en la simulación hidrodinámica.

Se debe mencionar que, como el oleaje en el borde de la grilla (Figura 6-9) fue conocido, no se produjeron sombras numéricas en esta simulación, y también por el forzamiento que se realizó considerando condiciones de borde espacial y temporalmente variables.

6.2.2 SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA

La hidrodinámica de la bahía se simuló a partir de la información de los tensores de radiación del oleaje, el viento, la marea, la temperatura y la salinidad del agua. En forma adicional, se incluyó información meteorológica que permitió representar el intercambio de calor del agua con la atmósfera (temperatura ambiental). El modelo numérico utilizado, donde se implementó la información recopilada, fue el modelo *MIKE 3 Flow model* en su módulo *Hydrodynamics and transport* que es utilizado para la simulación de flujos en tres dimensiones afectados por variaciones de densidad y forzantes externas en estuarios, bahías o zonas costeras. Éste se encuentra basado en la solución numérica de las *RANS* para fluido incompresible aplicando los supuestos de *Boussinesq* y la presión hidrostática. Este modelo utiliza como ecuaciones de gobierno la ecuación de continuidad (ecuación 6-13) y las ecuaciones de conservación de momentum en las direcciones x e y (ecuaciones 6-14 y 6-15) con la finalidad de describir los movimientos de los fluidos.

En estas ecuaciones se presentan las variables t como tiempo; x, y y z como las coordenadas cartesianas; u, v y w como las componentes vectoriales de las velocidades; η como la elevación de la superficie; d como la profundidad de agua estática; $h = \eta + d$ como la profundidad de agua total; f como el parámetro de Coriolis, donde $f = 2\Omega \sin \phi$, con Ω como la velocidad angular de la rotación de la Tierra y ϕ como la latitud geográfica; g como la aceleración de gravedad; ρ como la densidad del agua; ρ_0 como la densidad de agua referencial; S_{xx}, S_{xy} y S_{yy} como las componentes de los tensores de radiación; ν_t como la viscosidad turbulencia vertical; S es la magnitud de la descarga debido a un punto de emisión con u_s y v_s como las componentes de velocidad de las descargas; F_u y F_v como las componentes de esfuerzo horizontal en las direcciones x e y, respectivamente.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad 6-13$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \\ = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + F_u \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad 6-14$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial z} \\ = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + F_v \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad 6-15$$

En las ecuaciones 6-16 y 6-17 se desarrollan los términos de esfuerzos horizontales, donde se tiene A como la viscosidad de remolino horizontal.

$$Fu = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad 6-16$$

$$Fv = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad 6-17$$

Para la resolución de las ecuaciones anteriores se recurre a las condiciones de borde superficial (ecuación 6-18) y de fondo (ecuación 6-19), donde se incluyen los términos τ_{sx}, τ_{sy} y τ_{bx}, τ_{by} , que corresponden a las componentes x e y de los esfuerzos del viento y los provocados por la fricción de fondo, respectivamente.

En $z = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad 6-18$$

En $z = -d$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad 6-19$$

Otra ecuación utilizada por el modelo es la ecuación de estado (UNESCO, 1981) (DHI, 2017(b)), que permite evaluar las variaciones de densidad con respecto a las variaciones de temperatura y salinidad simuladas.

En las ecuaciones 6-20 y 6-21 se señaló la ecuación de transporte, empleada en las variables temperatura (T) y salinidad (s). En estas ecuaciones se muestran las variables D_v como el coeficiente de difusión turbulento vertical; $\hat{H}$ como el término intercambio de calor con la atmósfera; T_s y s_s como la temperatura y salinidad proveniente de alguna fuente; F_T, F_s como los términos de difusión horizontal que se encuentran definidos en la ecuación 6-22, que se encuentra dependiente al coeficiente de difusión horizontal (D_h). Como se muestra en la ecuación 6-23, los coeficientes de difusión horizontal y vertical son estimados con respecto a la viscosidad de remolino vertical y horizontal sobre el número de Prandtl (σ_T).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \quad 6-20$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad 6-21$$

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) \right) \right] (T, s) \quad 6-22$$

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T}, \quad D_v = \frac{v_t}{\sigma_T} \quad 6-23$$

Las ecuaciones anteriormente nombradas fueron utilizadas sobre la grilla numérica señalada en la Figura 6-9, para simular la hidrodinámica en la zona de estudio. El diseño

de esta grilla consistió en lograr un tamaño de elemento que permitiera ubicar solo una captación o descarga por elemento y permitir la correcta representación de los fenómenos costeros, siempre y cuando, la ejecución de los cálculos requiriese un tiempo computacional factible. Como se señala en la Figura 6-9, el oleaje fue forzado por los tres bordes marcados en el modelo *MIKE 21 SW*, para luego, emplearse en el modelo *MIKE 3 FM* los correspondientes tensores de radiación en cada nodo del dominio. Las variaciones del nivel del mar, junto a la variación de temperatura y salinidad del mar fueron forzadas desde el borde Oeste, a diferencia del viento y la información meteorológica, que fue considerada constante al interior del dominio, pero variable en el tiempo, ya que no se obtuvo la variación espacial de esta información en la zona de estudio.

Para la simulación de la hidrodinámica en tres dimensiones se debió definir una grilla vertical. El modelo utilizado permite establecer una grilla vertical de tipo sigma (Figura 6-8), es decir que la columna de agua se dividió en el mismo número de elementos, variando el tamaño de los elementos según la batimetría que se deba representar. Al ejecutar el modelo se tomó la decisión de dividir la malla en diez capas, considerándolo como un número suficiente de capas para definir la zona costera, pero no tan elevado para aumentar demasiado el tiempo computacional de la ejecución.

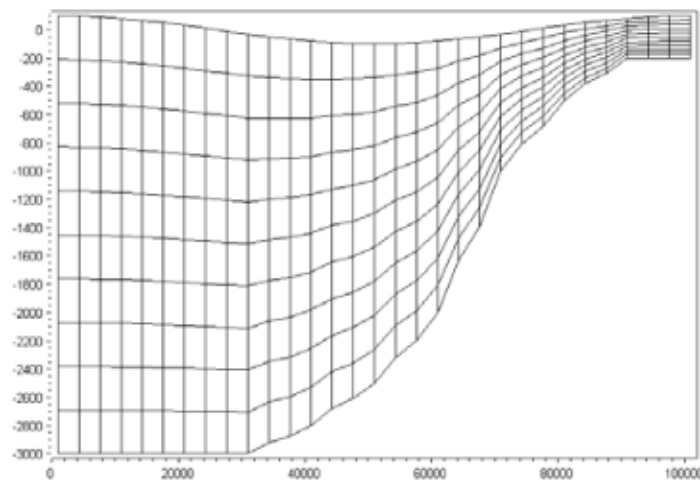
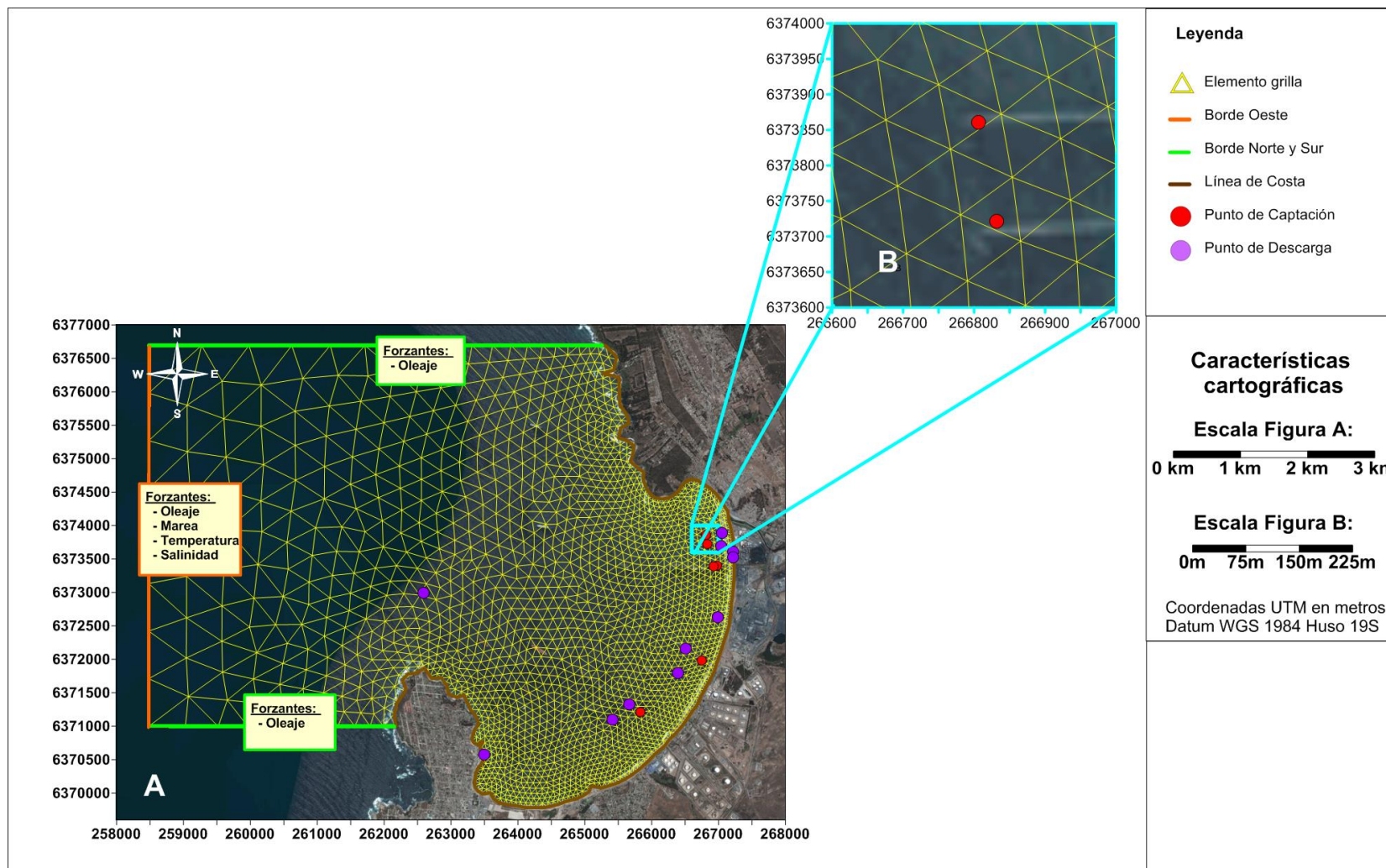


Figura 6-8 Esquema de la grilla vertical sigma.

Fuente: (DHI, 2017(b)).

Para la simulación de las descargas se utilizó la opción *Jet Sources* dentro del modelo *MIKE 3*, que permite simular la difusión del campo cercano y campo lejano durante la simulación hidrodinámica. Según los objetivos de esta memoria, se requirió concentrarse en los efectos acumulativos a escala de bahía, correspondientes a los efectos de la difusión del campo lejano, mientras que, la difusión de campo cercano ocurrió solo en las cercanías de las descargas, en una escala tan pequeña que no se visualizó en los resultados y, por tanto, no se describieron en esta memoria, pero cuyos efectos se incluyeron en los resultados obtenidos.



6.2.3 SIMULACIÓN ECOLÓGICA

La simulación ecológica en ambientes marinos hace necesario el conocimiento previo de la hidrodinámica del cuerpo de agua, pues es ella la principal forzante del transporte de cada constituyente química/ biológica. Para la simulación ecológica se seleccionó el modelo *Mike Eco Lab*, el cual trabajó sobre la malla numérica empleada en la simulación hidrodinámica (Figura 6-9), donde se resolvió la ecuación 6-24 en cada elemento, la cual muestra la concentración (c) de cierta sustancia en un instante (t) dependiente de la advección (AD_c) producto de la hidrodinámica simulada sobre la sustancia, además de los procesos ($P_c(t)$) que sufre la sustancia según lo configurado en *Eco Lab* (Figura 6-10).

$$c(t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} (P_c(t) + AD_c) + \partial t \quad 6-24$$

Para la representación del ambiente marino se utilizó la configuración *Eutrophication Model 2* en el modelo seleccionado, el cual utiliza las variables (Tabla 6-7) que fueron descritas a continuación:

- **Fitoplancton:** Esta variable corresponde a las algas microscópicas que cumplen con la producción primaria en el ambiente marino. El modelo seleccionado separa esta especie en tres variables, según la composición interna de los nutrientes: carbono, nitrógeno y fósforo (bajo la respectiva nomenclatura PC, PN y PP). La variable clorofila a (Cha) se incluye como un producto directo de la variable fitoplancton.
- **Zooplancton:** Esta variable representa la producción secundaria en el ambiente marino y un depredador del fitoplancton. El modelo simula esta variable por la concentración interna de carbono, con la nomenclatura ZC.
- **Detritus:** Esta variable acumula el material inerte en el ambiente marino procedente de los organismos que, en este modelo, corresponde al fitoplancton y zooplancton. Este material puede convertirse en nutrientes inorgánico a partir de ciertos procesos y condiciones. Como en la variable fitoplancton, el detritus se separa según su concentración interna en los nutrientes: carbono, nitrógeno y fósforo (bajo la respectiva nomenclatura DC, DN y DP).
- **Nutrientes:** Este grupo incluye distintas variables necesarias para el crecimiento de los organismos, directamente de la producción primaria. En el modelo utilizado se simulan los nutrientes nitrato, amonio y fósforo (con la nomenclatura N3, NH y IP), además se incluye en este grupo el oxígeno disuelto (DO), que es generado, principalmente, por la producción primaria y empleado por todos los organismos simulados y en procesos químicos.
- **Vegetación bentónica:** Esta variable se definió con la nomenclatura BC y corresponde a las algas arraigadas al fondo marino, que también cumplen la función de productores primarios. En el capítulo 6.1.4 se estableció que, debido a características de la zona de estudio, esta variable fue despreciada en esta memoria, por lo cual, se excluyó de este análisis.

Estas variables son cuantificadas según su concentración de biomasa que, en el modelo, es transferida entre otras variables mediante los procesos esquematizados en la Figura 6-10 y representados con sus correspondientes ecuaciones en la Tabla 6-8.

Tabla 6-7 Variables del modelo ecológico.

N°	Componentes	Unidad
1	Fitoplancton C (PC)	mg C/ L
2	Fitoplancton N (PN)	mg N/ L
3	Fitoplancton P (PP)	mg F/ L
4	Zooplancton C (ZC)	mg C/ L
5	Detritus C (DC)	mg C/ L
6	Detritus N (DN)	mg N/ L
7	Detritus P (DP)	mg F/ L
8	Clorofila (Ch)	mg C L
9	Nitrato (N3)	mg N/ L
10	Amonio Total (NH)	mg N/ L
11	Fósforo inorgánico (IP)	mg F/ L
12	Oxígeno disuelto (DO)	mg / L
13	Vegetación Bentónica C (BC)	mg C/ L

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI *EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description* (DHI, 2017(c)).

El modelo establece la ecuación de producción de fitoplancton con dependencia de las variables luz, temperatura y nutrientes, además de la misma concentración de fitoplancton, mientras que, las reducciones de biomasa fitoplanctónica se producen por los procesos de muerte, respiración, sedimentación y pastoreo.

La producción del zooplancton se constituye de las variables pastoreo, que es dependiente del fitoplancton, y por el proceso asimilación, mientras que, las pérdidas de biomasa ocurren por los procesos de respiración y muerte.

Como el detritus corresponde a los residuos orgánicos, el modelo representa los incrementos de esta variable como una porción del fitoplancton muerto, la totalidad del zooplancton muerto y las excreciones del zooplancton, que se traducen como el fitoplancton pastoreado, pero no asimilado. Las pérdidas de biomasa del detritus ocurren por los procesos sedimentación que, de manera similar al fitoplancton, se transfiere biomasa hacia los sedimentos que componen el lecho, y del proceso mineralización, el cual considera la transferencia de la concentración hacia la variable nutriente.

En la variable sedimento, como se mencionó, los aumentos de biomasa ocurren por el proceso sedimentación, de las variables fitoplancton y detritus, y sus pérdidas mediante el proceso denominado liberación de nutrientes, que dirige a la biomasa hacia la variable nutrientes.

El comportamiento señalado en la Figura 6-10 corresponde solo a las variables compuestas de carbono. Para las variables compuestas de nitrógeno y fósforo ocurren ligeras diferencias en su comportamiento.

En el fitoplancton las variables compuestas de nitrógeno y fósforo incrementan su concentración mediante el proceso de captura de nutrientes y las pérdidas de las concentraciones ocurren en la razón PN/PC o PP/PC según corresponda, de los procesos que reducen la biomasa de carbono en el fitoplancton (PC).

Como fue mostrado, el zooplancton se representa en el modelo solo por su porción interna de carbono, sin embargo, se simula un aporte de nitrógeno y fósforo al ambiente, mediante el proceso de respiración y los residuos depositados, los cuáles se calcularon a partir de los procesos asociada al ZC, con constantes que representan su aporte de nitrógeno o fósforo al ambiente marino.

Para el detritus, la variable compuesta de nitrógeno (DN) y fósforo (DP) se incrementan por las correspondientes variables de fitoplancton muerto y el residuo de zooplancton del mismo nutriente. Los procesos que disminuyen la concentración son los mismos que afectan la variable compuesta de carbono (DC), pero en una magnitud en la razón DN/DC o DP/DC, según corresponda.

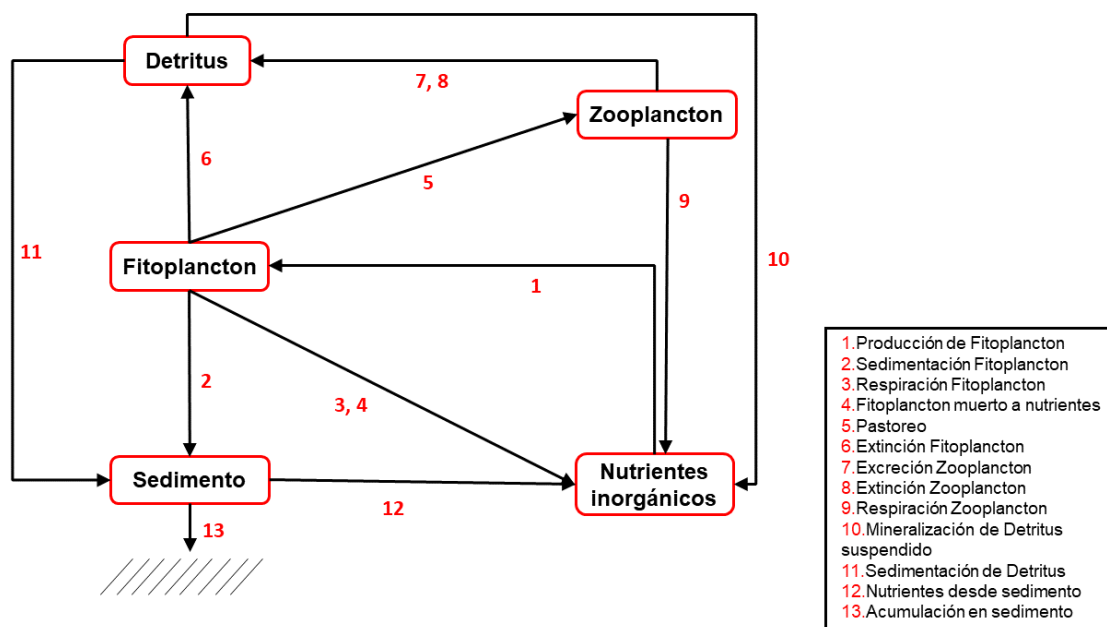


Figura 6-10 Esquema resumen modelo Ecolab configuración Eutrophication 2.

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description (DHI, 2017(c)).

La biomasa en la variable nutriente sufre los procesos esquematizados en la Figura 6-11 y representado por las ecuaciones de la Tabla 6-9. En este modelo se descompone la variable nutriente en fosfato, amonio y nitrato. Los nutrientes fosfato y amonio incrementan su concentración por los procesos respiración de organismos, mineralización del detritus, liberación de nutrientes del sedimento y la mineralización inmediata de parte del fitoplancton muerto. La biomasa de los nutrientes se reduce por la captura del fitoplancton, que utilizan para su crecimiento.

El amonio sufre el proceso adicional nitrificación, el cual representa el proceso químico de la transformación de amonio a nitrato, siendo ésta la única entrada de concentración a la variable nitrato, aunque también es consumida por el fitoplancton.

En el modelo utilizado representa los incrementos del oxígeno disuelto por medio de la fotosíntesis de la producción primaria y la reaeración desde la atmósfera, como se refleja en la Figura 6-12 y se establece en la Tabla 6-10. El oxígeno disuelto es utilizado en los procesos internos de los organismos (fitoplancton y zooplancton), en la descomposición del material orgánico (fitoplancton y detritus al morir) y en la conversión del amonio a nitrato, durante el proceso de nitrificación.

Tabla 6-8 Procesos generales del modelo Ecolab.

Var.	Ecuación				
PC	Producción $\mu F(I)F(T)F(N,P) PC$	-Muerte $-deac F(T) PC$	-Respiración $-rphc F(T) PC$	-Pastoreo $-kgrb F2(T) F(PC) F(DO) ZC$	-Sedimentación $-\frac{1}{2} ksp PC \left(\frac{pnma}{\frac{PN}{PC}} + \frac{ppma}{\frac{PP}{PC}} \right) + ksp2 PC^2$
ZC	Producción $Pastoreo * vefo$	-Respiración $-refo * Pastoreo + kgrz ZC F2(T)$			-Muerte $-Kd1 * ZC + Kd2 * ZC^2$
DC	Generación $(1 - vm)depc + ekzc + dezc$		-Sedimentación $-Ud/dz*DC$		-mineralización $-\mu m F3(T) F(DO) DC$
Sed	Generación $(sed + sep)$		Liberaciones nutrientes $-rs) * dz$		
Leyenda					
PC Fitoplancton ZC Zooplancton DC Detritus Sed Sedimentos $kgrb$ máximo pastoreo ksp rango de sedimentación de fitoplancton $ksp2$ coagulación que provoca sedimentación $pnma, ppma$ máx. concentración intracelular de N o P $vefo$ Fracción de fitoplancton asimilado $refo$ respiración debida la acción dinámica $kgrz$ metabolismo basal de zooplancton		$kd1, kd2$ rango de muerte zooplancton primer y segundo orden μ rango de crecimiento de fitoplancton μm máxima mineralización de detritus vm fracción de fitoplancton muerto que se mineraliza directamente $depc$ fitoplancton muerto $ekzc$ excreción de zooplancton $dezc$ zooplancton muerto Ud rango de sedimentación de detritus dz vertical discretización sed sedimentación de detritus sep sedimentación de fitoplancton $deac$ rango de muerte de fitoplancton			
		rs mineralización desde sedimento $rphc$ rango de respiración de fitoplancton $F(DO)$ Función de dependencia de oxígeno disuelto $F(I)$ Función de dependencia de luz $F(N, P)$ Función de dependencia de nutrientes $F1(T)$ Función de dependencia de temperatura de fitoplancton $F2(T)$ Función de dependencia de temperatura de zooplancton $F3(T)$ Función de dependencia de temperatura de detritus			

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description (DHI, 2017(c)).

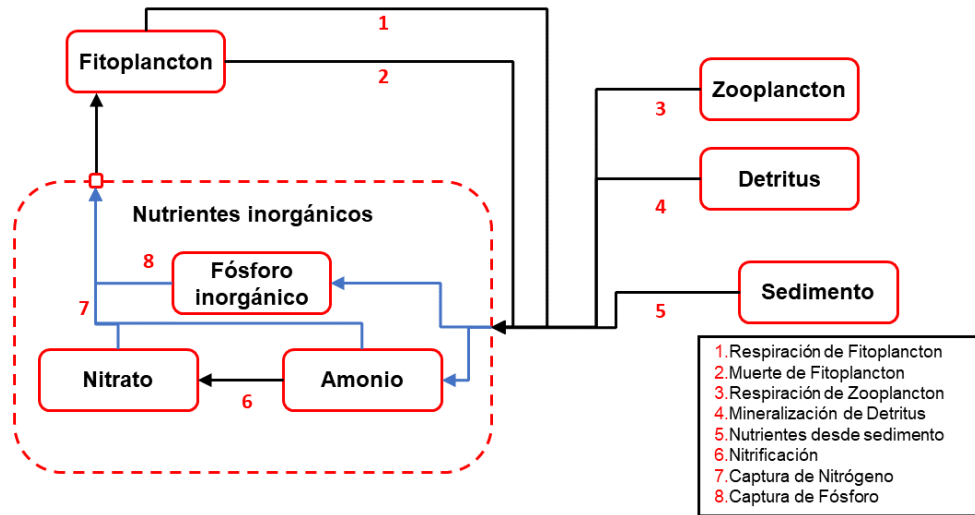


Figura 6-11 Funcionamiento nutrientes inorgánicos en Ecolab Eutrophication 2.

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description (DHI, 2017(c)).

Tabla 6-9 Procesos en relación de los nutrientes.

Var.	Ecuación		
PO ₄	Mineralización $repp + redp + rezp + vm depp + resp$	-Captura $-uppp$	
NH ₄	Mineralización $repn + redn + rezn + vm depn + rsnh$	-Captura $-upnh$	-Nitrificación $-rnit$
NO ₃	Nitrificación $rnit$	+Desde sedimento $rsn3$	-Captura $-upn3$
Leyenda PO₄ Fosfato NH₄ Amonio NO₃ Nitrato redp, redn mineralización de detritus de P, N rezn, rezn Respiración de zooplancton compuesto de P o N vm fracción de fitoplancton muerto que se mineraliza directamente depp, depn fitoplancton muerto compuesto de P o N uppp, upnh, upn3 Captura de nutrientes (PO₄, NH₄ y NO₃) por el fitoplancton resp, rsnh, rsn3 Liberación de nutrientes (PO₄, NH₄ y NO₃) desde sedimento rnit Nitrificación			

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description (DHI, 2017(c)).

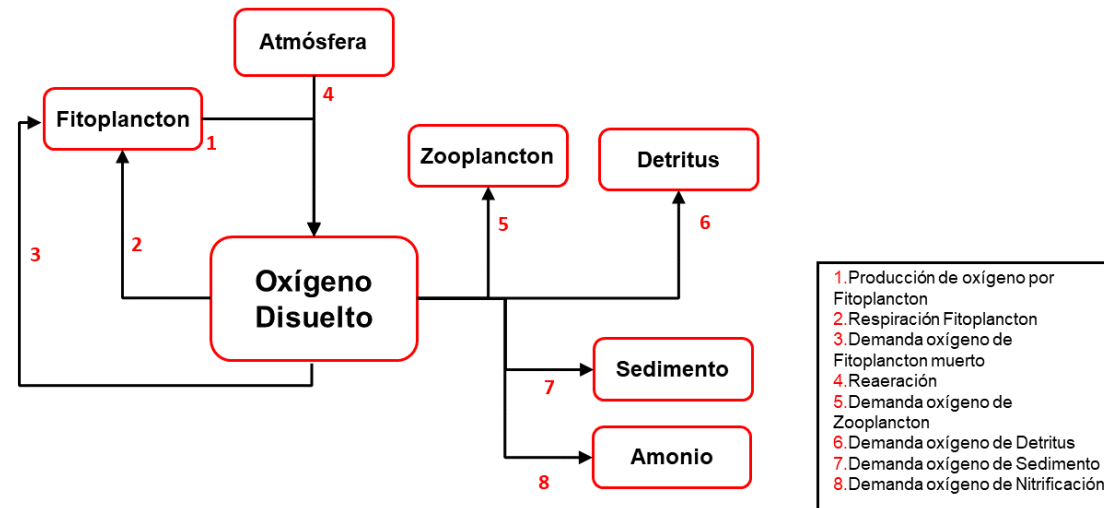


Figura 6-12 Funcionamiento variable oxígeno disuelto en Ecolab Eutrophication 2.

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description (DHI, 2017(c)).

Tabla 6-10 Procesos en relación de oxígeno disuelto.

Var.	Ecuación					
DO	Fitoplancton $odpc - orpc - opcd$	-Detritus $-oddc$	Zooplancton $-odzc$	Sedimento $-odsc$	Atmósfera $+rear$	Nitrificación $-orni$
Leyenda						
DO Oxígeno disuelto odpc producción oxígeno orpc respiración de oxígeno opcd demanda de oxígeno de fitoplancton muerto oddc demanda de oxígeno de detritus odzc demanda de oxígeno de zooplancton odsc demanda de oxígeno desde sedimento rear reaeración orni demanda de oxígeno por la nitrificación						

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description (DHI, 2017(c)).

Según se ha establecido, el modelo ecológico interactúa con el medio mediante la hidrodinámica que produce el transporte de las variables y, adicionalmente, como se estableció en la Tabla 6-8, el proceso producción del fitoplancton depende de variables del medio como luz y temperatura, además de los nutrientes del medio. Esta dependencia se expresa mediante ecuaciones en el modelo numérico que fueron mostradas en la Tabla 6-11.

La función de la luz se expresa por una serie de constantes que representan la eficiencia del fitoplancton en la utilización de la luz y la variable *ipar* que incorpora la radiación solar en cada elemento del dominio, la cual puede disminuir por pérdidas de la transparencia del agua a causa de las variables clorofila a o detritus.

La variable temperatura está presente en gran parte de las variables, mediante la función mostrada en la Tabla 6-11, la cual es una ecuación con una constante (θ) bajo el potencial de la diferencia de la temperatura del agua del elemento numérico y una temperatura referencial (20 [°C] por defecto). La constante, θ , puede tomar distintos valores según la variable relacionada (fitoplancton, zooplancton y detritus), siempre mayores que uno. El comportamiento de esta función dificulta la representación de los organismos, pues se presenta tolerancias a temperaturas elevadas, además de la misma respuesta ante la temperatura en una misma especie de organismos.

La dependencia a los nutrientes corresponde a la capacidad de crecimiento del fitoplancton, según la concentración interna contra la máxima concentración que puede contener. En la Tabla 6-11 se muestra la dependencia a constantes que indican la máxima y mínima concentraciones al interior del fitoplancton. En esta memoria se decidió establecer las mínimas concentraciones con los valores por defecto del modelo, mientras que, las máximas concentraciones fueron configuradas según las relaciones señaladas por Redfield (Libes, 2009).

El modelo ecológico utilizado en esta memoria, Eco Lab, permitió caracterizar las descargas mediante las variables señaladas en la Tabla 6-7. Según la información encontrada, en algunas descargas se declararon las concentraciones de NTK y fósforo, las cuales fueron introducidas en el modelo como detritus de nitrógeno, en el caso del NTK por su composición orgánica, y la concentración de fósforo como fósforo inorgánico (fosfato), ante la ausencia de mayor información. Para el detritus en las otras componentes (DC y DP), el resto de los nutrientes simulados y la clorofila a, que no fueron declarados, se les aplicó el mismo criterio utilizado para la salinidad. Los efluentes también debieron caracterizarse con las variables fitoplancton y zooplancton, para lo cual se estableció una concentración igual a cero, ya que se asume que las operaciones industriales pueden dañar a estos organismos (Ingleton *et al.*, 2007; Ministerio de energía, 2016), en los casos que las descargas provengan desde tomas de agua, mientras que, si la descarga no proviene del mar, se asumió la ausencia de organismos desde antes de la opción industrial, debido a la ausencia de información.

Tabla 6-11 Funciones utilizadas en la producción primaria.

Variable	Ecuación
Luz	$F(I) = [1 - \exp\left(\frac{-\alpha \text{ ipar}}{\mu PC}\right)]$
Temperatura	$F(T) = \theta^{(T-20)}$
Nutrientes	$F(N, P) = \frac{2}{\frac{1}{myn} + \frac{1}{myp}}$ $myn = \frac{\frac{PN}{PC} - pnmi}{pnma - pnmi}$ $myp = \frac{(\frac{PP}{PC} - pnmi)(kc + ppma - ppmi)}{(pnma - pnmi)(kc + \frac{PP}{PC} - ppmi)}$
Leyenda α: pendiente inicial en la producción en la curva de irradiación. ipar: radiación fotosintética promedio disponible para cada capa. μPC: máximo rango de crecimiento de fitoplancton de carbón. θ: coeficiente de crecimiento por temperatura. myn, myp: función de nitrógeno y fósforo de fitoplancton $pnma, pnmi$: máximo y mínimo contenido interno de nitrógeno en las algas. $ppma, ppmi$: máximo y mínimo contenido interno de fósforo en las algas. kc: constante de saturación media para fósforo en fitoplancton PC, PN, PP: concentración de fitoplancton en sus nutrientes, carbón, nitrógeno y fósforo.	

Fuente: Elaboración propia a partir de DHI *EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description* (DHI, 2017(c)).

6.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

El proceso de calibración consistió en los ajustes sobre el modelo numérico, con el fin de acercar el comportamiento y magnitud de la simulación al fenómeno real, medido instrumentalmente. Por otro lado, en la validación se vuelve a contrastar con datos medidos en otra ventana de tiempo u otros puntos en el espacio, en la búsqueda de evaluar los ajustes utilizados en la calibración.

Para la realización de estos procesos fue necesaria la disposición de datos medidos de los fenómenos estudiados, durante una ventana de tiempo representativa, no obstante, para esta memoria no fue posible conseguir mediciones prolongadas para todos los fenómenos. La ausencia de información, de algunas variables, fue solucionada al cambiar las metodologías de contraste según la duración y tipo de información disponible. Las metodologías utilizadas en esta memoria se detallan a continuación:

- **Comparación cuantitativa:** Esta metodología entregó un análisis objetivo al centrarse en cálculos, que requirieron un volumen representativo de información. Este análisis se realizó mediante dos herramientas estadísticas, el error cuadrático medio (RMS) y el coeficiente de correlación (R^2), presentados en las ecuaciones 6-25 y 6-26, respectivamente. Donde O_i , representa el dato medido en el instante i ; $\bar{O}$, el promedio de los datos medidos, P_i el dato simulado en el instante i ; $\bar{P}$, el promedio de los datos simulados; N , la totalidad de datos a analizar.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [O_i - P_i]^2}{N}} \quad 6-25$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \left[\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \right]} \right\}^2 \quad 6-26$$

Para esta memoria se estableció el criterio para aprobar la representación del fenómeno por el modelo, como las simulaciones que consiguieran un RMS , menor al valor de la desviación estándar (DS), de la magnitud del fenómeno medido y, además, un valor de R^2 mayor a 0.9 [-].

- **Comparación visual:** Esta metodología consistió en los análisis visuales entre gráficas, donde se buscaron similitudes entre los comportamientos de las curvas o la pertenencia dentro de ciertos rangos establecidos por las mediciones. Con la suficiente cantidad de información fue posible construir series de tiempo que pudieran ser comparadas, además de gráficos Cuantil-Cuantil (Q-Q), que permitieron evaluar la relación entre las magnitudes de las mediciones y simulaciones.
- **Comparación bibliográfica:** Este análisis buscó comparar las simulaciones con comportamientos teóricos establecidos mediante documentos científicos que describieran los fenómenos a representar.

Las variables que fueron simuladas mediante los modelos se les aplicó al menos alguna de las anteriores metodologías.

Tabla 6-12 Metodología de evaluación según la variable.

Variable	Metodología (tipo de comparación)
Oleaje	Cuantitativo y visual
Marea	Cuantitativo y visual
Corrientes	Cuantitativo y visual
Salinidad del agua	Visual
Temperatura del agua	Cuantitativo y visual
Nutrientes	Bibliográfico
Organismos (fitoplancton y zooplancton)	Bibliográfico

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 6-12, para las variables físicas oleaje, marea y corrientes se consiguió la suficiente información para realizar una comparación cuantitativa y visual. La calibración y validación de estos fenómenos fueron contrastados con las mediciones realizadas en las locaciones y tiempos establecidos en el capítulo 6.1.

El análisis del oleaje se realizó mediante los principales parámetros de resumen: altura de ola (H_s), periodo peak (T_p) y dirección media (D_m). Se utilizó la dirección media en vez de la dirección peak (D_p), debido a una mayor concordancia con las mediciones⁴. El análisis cuantitativo de esta información fue realizado a partir de los cuantiles de los datos simulados y medidos. La aplicación de los cuantiles fue necesaria debido a la procedencia de los datos Atlas, desde un modelo numérico con presencia de incertidumbres, las cuales podrían aumentar con la solución de las ecuaciones que representan la propagación del oleaje hacia la costa.

El fenómeno de la marea fue analizado con respecto a la desnivelación del agua simulado y medido, desde el NRS. Este parámetro fue comparado mediante un análisis dato-dato, a causa de la baja variación con respecto al tiempo de sus principales componentes astronómicas.

Para las corrientes se evaluaron las componentes horizontales de la velocidad de las partículas de agua (U y V), ya que estas fueron las variables utilizadas por el modelo para efectuar los cálculos en la simulación. La comparación de datos fue realizada mediante los cuantiles calculados desde los datos simulados y medidos, debido a que el fenómeno de la corriente ocurre con una variación temporal del orden de segundos, siendo complejo lograr una comparación dato-dato satisfactoria.

Se debe mencionar que, para el cumplimiento de los objetivos de esta memoria fue necesaria la recreación del comportamiento de la hidrodinámica en un nivel general, para describir las tendencias en el transporte de las corrientes. Cabe destacar que representar las escalas turbulentas del flujo, requiere de modelos numérico avanzados y un mayor recurso computacional.

Las simulaciones de las variables temperatura y salinidad fueron contrastadas con mediciones de CTD, las cuáles, debido a su característica instantánea, se decidió realizar una comparación visual al contrastar el valor medido contra la variación simulada en la misma profundidad. El objetivo de esta metodología fue demostrar que la magnitud medida fue conseguida durante el periodo simulado en la misma profundidad.

⁴ Como se describe en adelante, esto pudo deberse a una incorrecta representación de la bimodalidad en las direcciones del espectro, por parte de los datos Atlas, o a debilidades del modelo, en representar la variación de la dirección del oleaje al acercarse a la costa

Adicionalmente, se realizó una comparación cuantitativa para la variable temperatura del agua con el empleo de los datos medidos por un ADCP desde el lecho marino. Este análisis fue realizado mediante los cuantiles de los datos medidos y simulados, ya que al ser una variable transportable por la hidrodinámica muestra una variabilidad temporal similar a las corrientes.

Los análisis de las variables nutriente y organismos debieron realizarse mediante una comparación bibliográfica a causa de los intervalos amplios y erráticos entre mediciones o, en algunos casos, mediciones en una campaña única. Para evaluar la representación se decidió analizar la simulación durante un año completo bajo las condiciones ambientales del caso medio, con la finalidad de buscar el comportamiento estacional de las variables del modelo ecológico, descrito en la bibliografía recopilada.

Para la variable nutriente fue posible verificar el orden de magnitud de la simulación gracias al volumen de información encontrada.

6.4 CASOS A EVALUAR

Considerando la configuración óptima obtenida durante el proceso de calibración y validación se realizaron las simulaciones descritas en la Tabla 6-13, que permitieron resolver los objetivos de esta memoria, y así, dar conocimiento del actual impacto y del comportamiento de la bahía ante otras situaciones de descargas.

Tabla 6-13 Simulaciones realizadas.

N	Simulaciones	Identificación
1	Simulación Actual	SA
2	Simulación Natural	SN
3	Simulación Descarga N. Ventanas	SN+D3
4	Simulación Descarga Campiche	SN+D4
5	Simulación Temperatura máxima D.S. N°90/ 2000	SD90_T
6	Simulación Concentración Fósforo Máxima D.S. N°90/ 2000	SD90_P
7	Simulación Concentración NTK Máxima D.S. N°90/ 2000	SD90_NTK
8	Simulación Descarga Aconcagua	SA+D13

Fuente: Elaboración propia.

Las simulaciones descritas en la Tabla 6-13 se realizaron con la hidrodinámica del caso medio, la cual representa el comportamiento característico de las corrientes durante un año en la bahía de Quintero. En los casos señalados se emplearon distintas configuraciones de descargas y captaciones que provocaron ciertas alteraciones en las aguas de la bahía, las que se describen a continuación:

- **Caso SA:** En este caso se incluyeron todas las descargas instaladas actualmente en la bahía de Quintero con los datos recopilados y los supuestos empleados, según lo mencionado. Esta configuración fue denominada como Simulación Actual (SA).
- **Caso SN:** A diferencia del caso SA, en el caso Simulación Natural, se omitieron todas las descargas y captaciones. Debido a que las forzantes de la hidrodinámica no se encuentran influenciadas por factores antropogénicos provenientes de la bahía, fue posible aseverar que este caso corresponde a una condición prístina de la bahía. La

cualidad anterior permitió cuantificar el diferencial de las características de la bahía de los distintos casos de estudio, al ser contrastados con el caso SN.

- **Caso SN+D3 y SN+D4:** Con el objetivo de conocer el impacto que puede causar las descargas individualmente, se eligió realizar dos simulaciones con los efluentes de la termoeléctrica Nueva Ventanas (SN+D3) y de la termoeléctrica Campiche (SN+D4), las cuales correspondieron a las descargas con los mayores caudales en la bahía y, además, entre las mayores temperaturas.
- **Caso SD90_T, SD90_P y SD90_NTK:** Cada uno de estos casos consistió en simular la alteración provocada al establecer las características máximas permitidas en el D.S. N°90/ 2000 para cada descarga instalada en la bahía. Estos casos de estudio se realizaron con la finalidad de conocer los impactos máximos en la bahía de Quintero según la normativa actual, con los efluentes actuales. Las características elegidas fueron la temperatura (Caso SD90_T), fósforo (Caso SD90_P) y NTK (Caso SD90_NTK), ya que estas fueron las únicas variables que podrían ser resueltas por los modelos numéricos empleados. Los valores máximos fueron presentados en la Tabla 5-1, los cuáles delimitan las descargas al interior de la ZPL, aunque algunas de las descargas analizadas se presentaron fuera de este límite, se configuraron con los mismos valores, siendo relevante considerar que estas descargas pueden emitir magnitudes superiores bajo la normativa nacional.
- aunque hay descargas fuera de este límite se configuraron con los mismos valores, a pesar que, legalmente, pueden descargar con magnitudes mayores.
- **Caso SA+D13:** Este caso de estudio consistió en la inclusión del efluente del Proyecto Aconcagua sobre las descargas configuradas en el caso SA. Como fue mencionado, el Proyecto Aconcagua aún no se ha instalado en la bahía, pero se encuentra aprobado en el SEA, por lo cual, esta simulación representa una condición futura de la bahía. Por otro lado, este efluente será la primera descarga con una elevada salinidad en la bahía.

6.5 METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN

En este punto se detallaron las metodologías utilizadas sobre los casos de estudio (Tabla 6-13) con el fin de cuantificar el impacto ambiental. Para el análisis de los casos de estudio se debió establecer métodos para estudiar las simulaciones anuales. En esta memoria se utilizaron tres métodos:

1. El análisis de la distribución de una variable, se realizó al promediar la variable en cada elemento del dominio durante el año medio y en cada estación del año, teniendo en claro que, el comienzo de la simulación ocurre en verano y se analizó hasta la primavera. Como las estaciones analizadas se extrajeron de una simulación anual, según la variable analizada, los resultados dependen de las condiciones ambientales de la estación y del tiempo simulado. Los resultados se analizaron sobre el promedio de las diez capas de la columna y en las capas superficial, intermedia y fondo.
2. El análisis temporal de una variable, se estudió con respecto a los puntos señalados en la Figura 6-13, que se distribuyen al interior de la bahía, desde donde se extrajo información que permitió un análisis temporal y espacial.
3. En los análisis de los organismos simulados se agregó la contabilización de la producción de algunas variables en la bahía. Para esto, se asumió el dominio como

un volumen de control dividido en sus elementos, realizando una sumatoria de la variable analizada en cada elemento.

En algunos análisis para cuantificar la variación provocada en un caso de estudio desde un caso base (generalmente el caso SN) se estimó la diferencia del caso simulado contra el caso base y se dividió por el correspondiente valor del caso base, cálculo que se denominó como razón de variación.

Estos métodos se aplicaron en los distintos casos de simulación, con el fin de evaluarlos según los parámetros del fluido: temperatura, salinidad, la calidad de agua y la concentración de plancton, según se detalló en este capítulo.

La evaluación del impacto producido por las captaciones se realizó con respecto a la captura de zooplancton mediante el modelo de la pérdida del adulto equivalente. Esto se realizó en el caso SA, ya que en este caso se establece una configuración de captaciones que no es alterado, excepto en el caso SA+D13, el cual agrega una captación, sin embargo, como los modelos empleados no simulan las tomas de agua, no afectaría a las otras captaciones y su análisis implicaría solo agregar las capturas ocasionadas por la toma de agua del proyecto Aconcagua (D13) a las capturas estimadas del caso SA, haciéndose innecesario el estudio.

Finalmente, el estudio culmina con la evaluación del impacto ambiental provocado por la totalidad de las descargas y captaciones, el cual fue valorizado mediante el Índice de Calificación del Impacto (ICI) para determinar la significancia de estos impactos. Este análisis solo se realizó sobre los efectos provocados en el caso SA, ya que este caso buscó caracterizar las alteraciones actuales en la bahía, en contraste, del resto de los casos que se realizaron para conocer la resistencia de la bahía.

A continuación, se describieron las evaluaciones realizadas sobre las variables temperatura, salinidad, calidad de agua y organismos.

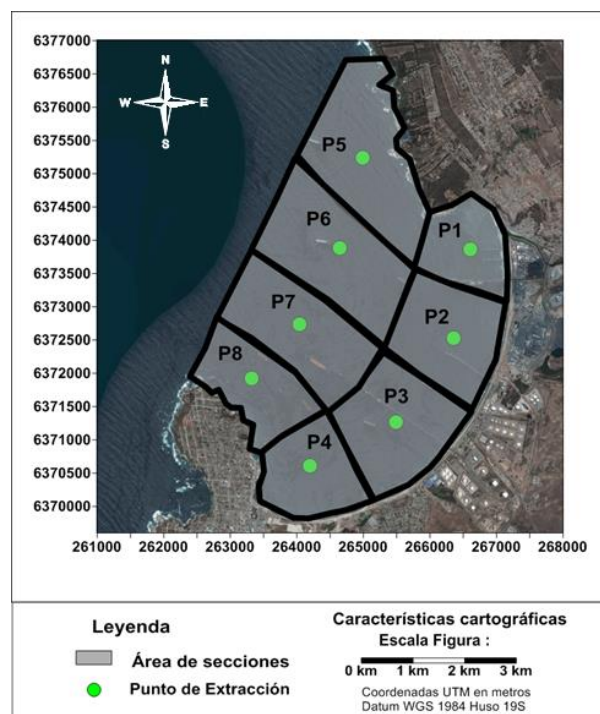


Figura 6-13 Puntos de extracción de secciones representativas de la bahía.

Fuente: Elaboración propia.

6.5.1 EVALUACIÓN DE TEMPERATURA Y SALINIDAD

Entre los parámetros del fluido evaluados se presentó el impacto térmico, en el cual se analizaron las diferenciales de temperatura de las simulaciones realizadas con respecto a la temperatura del caso SN. En adelante estas diferenciales fueron referidas como plumas térmicas.

En la Tabla 6-14 se señalaron los casos de estudio, donde se analizaron distintas combinaciones de descargas térmicas.

Tabla 6-14 Casos térmicos a estudiar.

N	Casos Térmico
1	$SA - SN$
2	$(SN + D3) - SN$
3	$(SN + D4) - SN$
4	$SD90_T - SN$

Fuente: Elaboración propia.

Las plumas térmicas generadas en los casos analizados (Tabla 6-14) fueron caracterizadas mediante isotermas que definieron la forma y superficie de la pluma. Las magnitudes de las isotermas empleadas fueron algunos diferenciales térmicos relevantes que ocurrieron durante algún fenómeno del Niño, que se seleccionaron en este capítulo. La asociación fue realizada con el fenómeno del Niño debido a que es un evento que provoca alteraciones térmicas que puede ocasionar cambios en la vida marina. (Landaeta, Schrebler, Bustos, Letelier, & Balbontín, 2009; Escribano & Hidalgo, 2000).

La aparición del fenómeno del Niño se determina mediante el cálculo de las anomalías de temperatura superficial, en el sector delimitado por las coordenadas 5 [°N]- 5 [°S], 120 [°O]- 170 [°O] (origin.cpc.ncep.noaa.gov). En la Figura 6-14 se muestra mediante una serie de tiempo las anomalías de TSM desde el año 1949 hasta la actualidad, registrados en la zona de control. Según la magnitud de la anomalía de TSM se puede determinar un fenómeno del Niño con la ocurrencia de variaciones de 0.5 [°C], durante cinco periodos de análisis consecutivos (promedio entre tres meses). Por otro lado, las anomalías sobre los 2 [°C] se denominaron como eventos extremos (www.shoa.cl) y las máximas variaciones ocurrieron con un diferencial de 2.6 [°C].

Debido a que las anomalías de TSM se encuentran referidas a una zona alejada de las costas chilenas, en la Figura 6-14 se incluyeron las anomalías de TSM en la costa de Valparaíso, según la información de temperatura mensual histórica medida por el organismo SHOA (www.shoa.cl), comprobando la concordancia de los eventos extremos con las anomalías de TSM en la costa de la bahía de Valparaíso en magnitudes similares, lo cual permite la utilización de los diferenciales térmicos en esta memoria.

Según la relevancia mencionada en los diferenciales térmicos, se eligieron las anomalías de TSM de 0.5 [°C], 2 [°C] y 2.6 [°C] como indicadores de diferenciales térmicos importantes, cuya ocurrencia puede causar repercusiones en el ambiente ecológico marino y que fueron buscados en los resultados de los casos de estudio como isotermas que definieron las respectivas plumas térmicas. Se debe agregar que, según ANZECC (1992), se estima que aumentos de temperaturas sobre los 2 [°C] pueden provocar daños a los organismos.

Las isotermas que representaron los diferenciales térmicos seleccionados (0.5 [°C], 2 [°C] y 2.6 [°C]) describieron superficies, las cuales, para contextualizar el impacto térmico

respecto a la bahía, se decidió contrastar su área con la superficie de la bahía, la cual se estimó en 1975 [ha], según lo señalado en la Figura 6-15.

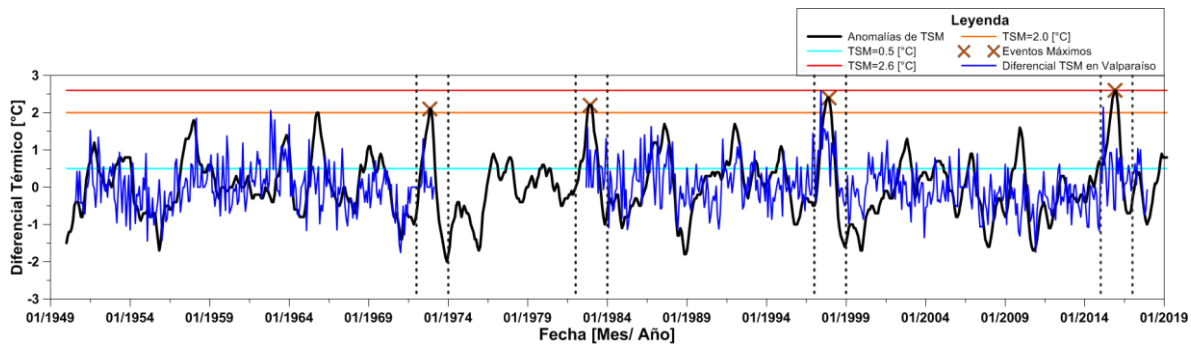


Figura 6-14 Historial fenómeno del Niño y diferencial de TSM en Valparaíso.

Fuente: <https://www.noaa.gov/>; www.shoa.cl.

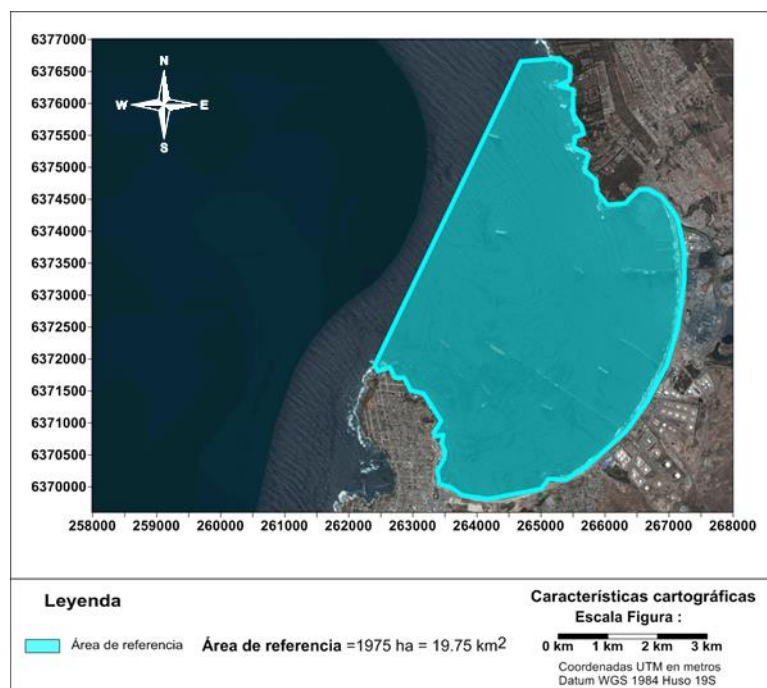


Figura 6-15 Estimación de la superficie de la bahía.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis salino se realizó solo en los casos SA y SA+D13 que muestran las distintas combinaciones de descargas salinas empleadas en esta memoria.

La evaluación se realizó según el criterio de ANZECC (1992), el cual establece que las variaciones en la salinidad deben ser menores del 5 [%] con respecto a las condiciones bases, por lo cual, se realizaron las razones de variación según se muestra en la Tabla 6-15. En el caso SA se analiza con respecto al caso SN, a diferencia del caso SA+D13, que se analiza con respecto al SA, correspondiente a su situación base.

Tabla 6-15 Casos de estudio para variaciones salinas.

N	Casos Salinos
1	$\frac{SA-SN}{SN} * 100$
2	$\frac{SA+D13-SA}{SA} * 100$

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación y visualización de las superficies que conforman la pluma térmica y de la verificación de la evaluación salina, se promediaron sus magnitudes para realizar el análisis de la distribución de estas variables, según se estableció en el comienzo del capítulo.

6.5.2 EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

Para la evaluación de la calidad de agua se utilizó el índice trófico (TRIX), propuesto por Vollenweider, Giovanardi, Montanari, & Rinaldi (1998), que permite cuantificar la calidad del agua marina mediante una serie de parámetros y caracterizar el agua entre un estado oligotrófico (aguas de bajo contenido de nutrientes, poca producción de organismos y aguas transparentes) o un estado eutrófico (aguas productivas de organismos por su alto contenido de nutrientes, con alta turbiedad) (Figura 6-16).

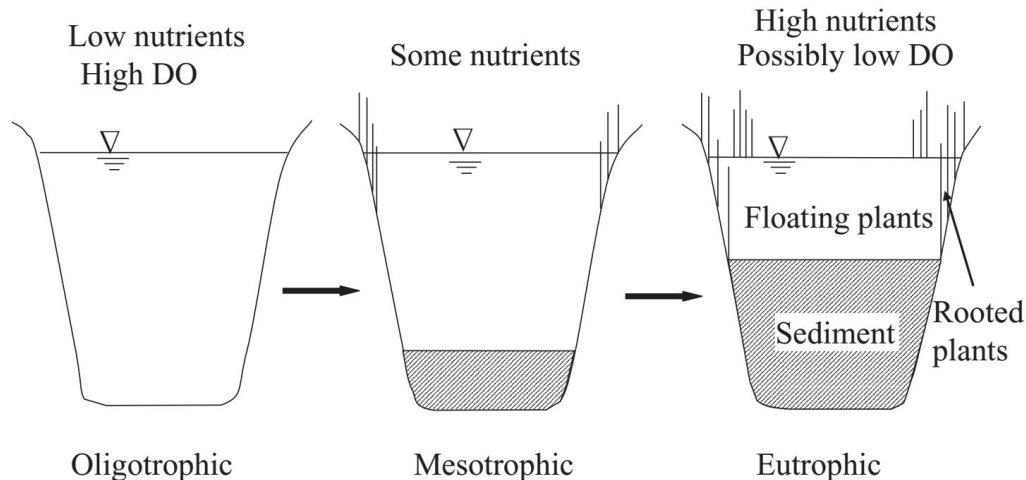


Figura 6-16 Esquema de ambientes oligotrófico y eutrófico.

Fuente: (Hydrodynamics and water quality-Modeling rivers, lakes, and estuaries, 2008).

El índice TRIX se calcula según se muestra en la ecuación 6-27, a partir de las variables clorofila a (chl a) y el porcentaje de desviación de la saturación de oxígeno (D%O2), que representan la productividad de organismos y, además, las variables nitrógeno inorgánico (DIN) y fósforo total (FT), que representan la concentración de nutrientes. El coeficiente TRIX puede tomar valores entre 0 y 10, siendo que, con valores menores a 4 indica una condición oligotrófica y con un valor mayor a 6 una condición eutrófica (Tabla 6-16).

$$TRIX = \frac{\log((chl\ a * D\%O_2 * DIN * FT) - 1.5)}{1.2} \quad 6-27$$

Tabla 6-16 Valores de referencia del índice trófico.

Condición	TRIX unidad
Oligotrófico	< 4
Eutrófico	> 6

Fuente: Pettine, Casentini, Fazi, Giovanardi, & Pagnotta (2007).

Para simplificar el análisis, se decidió estimar el coeficiente TRIX en los puntos mostrados en la Figura 6-13, permitiendo un análisis espacial y temporal, según lo mencionado en el segundo método en el comienzo de este capítulo.

Como fue mencionado, el coeficiente TRIX fue diseñado con los parámetros medidos en los mares europeos, por ello, puede presentarse incertidumbre en su uso para los mares chilenos. Debido a lo anterior se debe clarificar que, el uso del coeficiente TRIX no buscó determinar el estado de calidad de agua en las distintas simulaciones, sino los diferenciales de la calidad de agua de las simulaciones contra la condición natural (simulación caso SN), mediante la razón de variación antes señalada. La importancia de estas variaciones se centró en su magnitud por sobre su signo, porque para fines de esta memoria se vuelve igualmente perjudicial un acercamiento al estado oligotrófico como al eutrófico. Este supuesto se realiza por desconocimientos de las consecuencias exactas por las alteraciones de la calidad de agua, siendo el caso ideal un estado invariable.

Junto a la variación del índice TRIX, fueron estudiados los cambios de las variables que componen este índice respecto el caso SN, con el fin de identificar las variables que ocasionara una mayor variación en la calidad de agua para cada simulación.

6.5.3 EVALUACIÓN DE ORGANISMOS

Esta evaluación se centró en los análisis realizados sobre los organismos de la especie plancton, los cuales fueron simulados para cada caso de estudio, con sus respectivas configuraciones de descargas, para luego evaluar los diferenciales en sus concentraciones respecto a la condición base, caso SN. Por otro lado, se tiene el impacto de las captaciones, donde se cuantificó los organismos captados y se asociaron con la pérdida de futuros peces adultos.

➤ Alteración de organismos por descargas

El objetivo de este análisis fue cuantificar las variaciones de la producción de organismos a causas de las descargas en la bahía. Para ello, se analizaron las concentraciones de los organismos simulados, fitoplancton y zooplancton, aunque, como éstos mantuvieron una relación de presa-depredador, las concentraciones de biomasa se trasladaban entre estas variables. Por esto, se agregó la variable plancton, como la suma de la biomasa del fitoplancton y zooplancton, que representó la biomasa de los seres vivos simulados.

La cantidad de procesos que relacionaron estos organismos dificultaron su análisis, debiendo realizarse con varias metodologías, como fueron descritas a continuación.

- En primer lugar, se analizaron las variables al integrarlas en el dominio y en el tiempo simulado con el fin de conocer la producción final en cada caso simulado, respecto a las condiciones naturales de la bahía (caso SN) evaluado mediante la razón de

variación. Este análisis fue realizado para los organismos simulados, además para las variables producción de fitoplancton y zooplancton para identificar la causa de los cambios en la concentración de las variables que representaron los organismos.

- El siguiente estudio se realizó al integrar en el dominio las variables fitoplancton, zooplancton y plancton, resultando en series de tiempo de cada caso de estudio que debieron ser contrastadas con la serie de tiempo del caso SN, para identificar el instante donde se produjeron las diferencias en las concentraciones.
- Finalmente, siguiendo la primera metodología mencionada en el comienzo de este capítulo, se analizaron las distribuciones de las variables que representan los organismos en el dominio durante cada estación del año simulado, en los casos establecidos en la Tabla 6-17. Las razones de variaciones en las concentraciones fueron estimados respecto al caso SN, con excepción del caso SA+D13, el cual fue contrastado con su caso base (caso SA). De forma especial fueron analizadas las variables producción de fitoplancton y zooplancton, para las cuales se esquematizaron sus distribuciones en el dominio promediadas en la totalidad de la simulación, con el fin de identificar las zonas con mayor producción.

Tabla 6-17 Casos biológicos a estudiar.

N	Análisis Biológico
1	$\frac{SA-SN}{SN}$
2	$\frac{SN+D3-SN}{SN}$
3	$\frac{SN+D4-SN}{SN}$
4	$\frac{SD90_T-SN}{SN}$
5	$\frac{SD90_P-SN}{SN}$
6	$\frac{SD90_NTK-SN}{SN}$
7	$\frac{SA+D13-SA}{SA}$

Fuente: Elaboración propia.

➤ Captura de organismos:

El impacto ambiental de las tomas de agua se relacionó con los organismos captados en el ambiente marino y su relación hacia especies de uso comercial, de igual manera a como se ha realizado en diversos proyectos a lo largo de la costa chilena, por ejemplo, el proyecto Aconcagua (Ecotecnos S.A., 2017(c)). Esto se debe a que, el mayor impacto causado por las captaciones son las capturas de organismos sin movilidad propia (Ministerio de Energía, 2016).

Este estudio se realizó mediante el modelo demográfico pérdida del adulto equivalente (AEL), que fue utilizado en los estudios del proyecto Aconcagua. La elección de este modelo se realizó por la disposición de la mayor parte de la información necesaria. Este modelo consiste en la asociación de la pérdida de ictioplancton con baja movilidad, como huevos o larvas, con la pérdida de peces adultos (Goodyear, 1978). El número de ictioplancton se

relaciona con las pérdidas ocasionadas por la mortalidad natural, durante los estadios⁵ de vida, antes de llegar a ser un pez adulto, como se esquematiza en la Figura 6-17. La captura de fitoplancton por las tomas de agua es despreciada de los análisis, a causa que su magnitud es despreciable en relación de su producción.

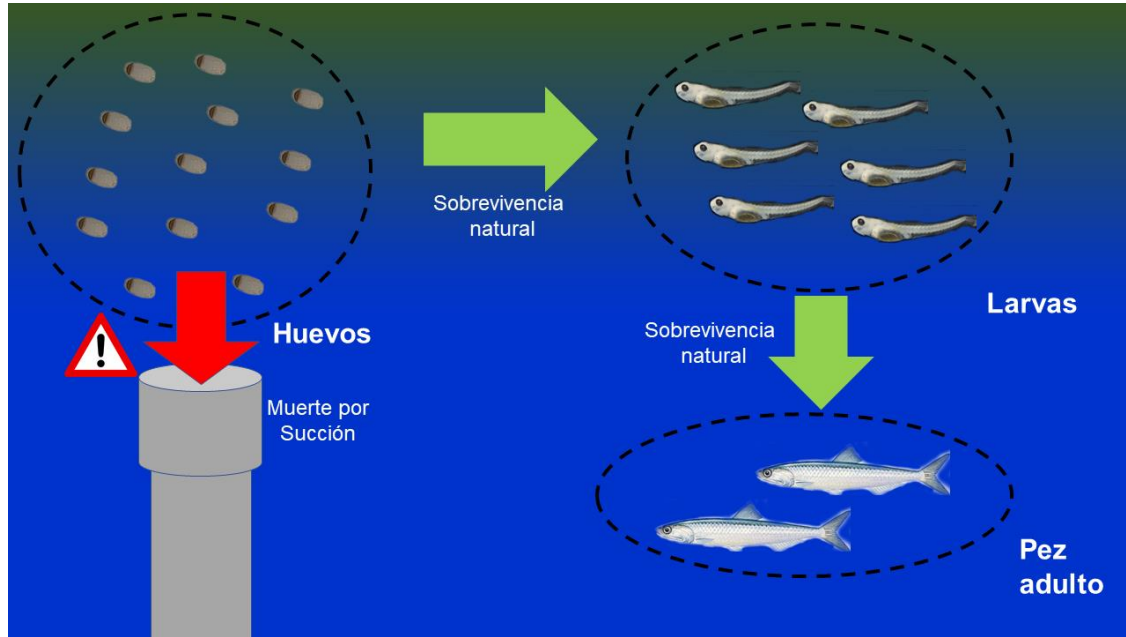


Figura 6-17 Esquema del modelo AEL.

Fuente: Elaboración propia.

En Prakash, Kolluru & Young (2014) se describe el modelo con la ecuación 6-28, donde se muestra que el modelo AEL equivale a la sumatoria, desde el estadio j hasta el n , de los individuos en ese estadio (E_j) por la sobrevivencia (S_j^n).

$$AEL = \sum_{j=1}^n E_j S_j^n \quad 6-28$$

$$S_j = e^{-z_j t_j} \quad 6-29$$

$$S_j^n = \prod_{l=j}^n S_l \quad 6-30$$

En la ecuación 6-29 se establece que la sobrevivencia para un estadio j (S_j) depende de la exponencial del producto de la mortalidad natural en el estadio j (z_l) y la duración del estadio j (t_l). La sobrevivencia del ictioplancton desde el estadio j hasta el estadio final n , se calcula siguiendo la ecuación 6-30 mediante la productoria en cada etapa de vida.

La metodología anteriormente descrita, considera que la totalidad del ictioplancton medido en el estadio j , acaba de comenzar el estadio. Este supuesto es conservador ante la posibilidad que parte del ictioplancton puede estar finalizando el estadio. Por ello,

⁵ En la RAE (<https://dle.rae.es/estadio>) se define estadio como “Período o fase de un proceso” y para efecto biológico marino se refiere a las etapas identificadas en especies animales.

EPRI (2004) propone la ecuación 6-31, la cual asume que el ictioplancton en el estadio j se encuentra en la mitad, de la duración del estadio. Como se muestra en la ecuación 6-32, la anterior metodología solo se aplica sobre el estadio en que es capturado el ictioplancton.

$$S_j^* = 2S_j e^{-\ln(1+S_j)} \quad 6-31$$

$$S_j^n = S_j^* \prod_{l=j+1}^n e^{-z_l t_l} \quad 6-32$$

En Nielsen, Ginn, Ziccardi, & Boehm (2005) se considera que los supuestos realizados son muy conservadores y, por ello, recomiendan una nueva formulación que es mostrada en la ecuación 6-33, donde se incluye el término m , que establece la mortalidad por arrastre. Este coeficiente se expresa en la ecuación 6-34, relacionando el caudal captado (Q) y al volumen de agua perturbada (V).

$$S_j^* = \frac{e^{-z_l t_l} \left(\frac{e^{-m t_l}}{m} + \frac{1}{m} \right)}{e^{-(z_l+m)t_l} \left(\frac{1}{z_l+m} - \frac{e^{m t_l}}{z_l} \right) - \left(\frac{1}{z_l+m} - \frac{1}{z_l} \right)} \quad 6-33$$

$$m = \frac{Q}{V} \quad 6-34$$

En esta memoria se decidió realizar los cálculos de la sobrevivencia mediante las metodologías mostradas en las ecuaciones 6-30 (AEL1) y 6-32, donde, en esta última, se implementaron las ecuaciones 6-31 (AEL2) y 6-33 (AEL3), resultando en tres métodos para estimar la sobrevivencia para el cálculo del AEL.

En estas ecuaciones se mostró la dependencia con una serie de parámetros correspondientes a cada estadio de vida y para cada especie a analizar. Debido a la gran cantidad de información necesaria, se recurrió a los datos biológicos recopilados en el proyecto Aconcagua, donde se estudiaron las especies anchoveta (*Engraulis ringens*) y la sardina común (*Strangomera bentincki*). Estas especies fueron seleccionadas por su interés comercial y su aparición, como huevos y larvas, en los muestreos realizados en las campañas de invierno y verano en las estaciones mostradas en la Figura 6-4.

En la Tabla 6-18 se resumieron las características de las especies estudiadas. Entre los datos recopilados, se presentaron la mortalidad de la especie en su estadio, duración de estadio y la abundancia de la especie en cierto estadio. Como la abundancia se obtuvo de los muestreos, se decidió utilizar los mayores valores para estimar las máximas pérdidas posibles. El parámetro efectividad del tamiz fue despreciado, según los estudios del proyecto Aconcagua, ya que debido al tamaño del ictioplancton, el tamiz no tiene efecto.

El modelo fue aplicado sobre cada una de las captaciones activas en la bahía, que son identificadas en la Tabla 6-19 junto a sus correspondientes caudales, los que fueron estimados según lo establecido en el capítulo 6.1.5.

Tabla 6-18 Información sobre los peces seleccionados en el proyecto Aconcagua.

Parámetro	Descripción	<i>Engraulis ringens</i>	<i>Strangomera bentincki</i>	Unidades
Z huevos	Mortalidad Natural Huevos	0.689	0.98	(1/día)
Z Larvas	Mortalidad Natural Larvas	0.264	0.307	(1/día)
t huevos-larvas	Duración estadio Huevos a Larvas	3	4	días
t larvas-juvenil	Duración estadio Larvas a Juvenil	60	60	días
Abundancia máxima de huevos	Abundancia Estandarizada de Huevos	163,330	178,570	(Nº/1000 m³)
Abundancia máxima de larvas	Abundancia Estandarizada de Larvas	381	524	(Nº/1000 m³)
Efectividad del Tamiz	Razón de Organismos No Succionados	0,0	0,0	Adimensional

Fuente: (Ecotecnos S.A., 2017(c)).

Tabla 6-19 Captaciones a utilizar en la evaluación.

N	Id.	Nombre	Caudal [m³/d]
1	C1	VENTANAS 1	266,371
2	C2	VENTANAS 2	425,952
3	C3	NUEVA VENTANAS	899,424
4	C4	CAMPICHE	899,424
5	C6	GASMAR TOTAL	12,787
6	C9	GNL QUINTERO	354,240

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente m , que no se estimó en la Tabla 6-18, fue variable en cada captación, debido a su dependencia al caudal captado y al volumen perturbado, pero no de la especie. Esta última variable fue compleja de estimar, por ello, se simplifica al utilizar el volumen donde fue realizado el muestreo, según lo mencionado en Nielsen *et al.* (2005). Debido a esta simplificación, se estimó un volumen perturbado igual para cada captación.

La estimación de los individuos captados por estadio (E_j) se realizó con el caudal de captación y la abundancia de cada especie en cada estadio. Para establecer la relación del modelo AEL con la simulación ecológica, se asumió que la abundancia seleccionada en la Tabla 6-18 es constante en todo el dominio durante la condición inicial de la simulación ecológica. Durante la simulación, se supuso que la relación entre el zooplancton simulado y la abundancia de ictioplancton fue constante, por tanto, la concentración de ictioplancton desarrolló una curva similar al zooplancton en el periodo simulado, es decir, variaron de forma equivalente.

Esta metodología tuvo el único objetivo de cuantificar el impacto acumulado de las captaciones instaladas en la bahía, por tanto, fue aplicado solo en la simulación del caso SA, la cual incluye todas las captaciones instaladas en la actualidad.

Para la evaluación de la cantidad de peces perdidos se optó por contrastarse con la información estadística de la pesca artesanal en la bahía, la cual se estima mediante las toneladas desembarcadas anualmente por el organismo gubernamental Sernapesca.

6.5.4 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Los proyectos poseedores de las descargas y captaciones instaladas en la bahía de Quintero han realizado las evaluaciones de impacto ambiental, en los casos que se consideraron necesarias, sin embargo, estas evaluaciones solo consideraron los impactos del propio proyecto, despreciando las alteraciones por proyectos aledaños. Lo anterior hace necesario evaluar los impactos causados por la totalidad de las descargas y captaciones instaladas. Este análisis solo fue realizado en el caso SA, el cual representa las descargas y captaciones instaladas actualmente en la bahía de Quintero.

Entre los impactos estudiados asociados a las descargas, se encontraron los diferenciales térmicos y de concentraciones de organismos, mientras que, sobre las captaciones se analizaron las pérdidas de adulto equivalente. Las diferenciales salinas no fueron evaluadas debido a que su estudio se realizó a partir de varios supuestos, así tampoco, se analizaron los impactos de la calidad de agua, pues sus variaciones afectarían a los organismos, que sí fueron estudiados. La evaluación de impacto ambiental se realizó mediante la metodología de valorización y jerarquización empleada en la EIA "Planta desalinizadora y suministro de agua industrial" (Arcadis Chile, 2015), denominada índice de Calificación del Impacto (*ICI*), que se presentó en la ecuación 6-35, cuyo objetivo es la valorización del impacto con respecto a la Relevancia ambiental (*Rel*), que representa el nivel de importancia del componente ambiental, y a la Magnitud del Impacto (*MI*), que depende de las características del impacto que se señaló en la ecuación 6-36.

$$ICI = MI * Rel \quad 6-35$$

$$MI = (Ca * ((Ex + Du + Rev + Int + Sin) * Cer)) \quad 6-36$$

Donde:

MI = Magnitud del Impacto

Ca = Carácter

Ex = Extensión

Du = Duración

Rev = Reversibilidad

Int = Intensidad

Sin = Sinergia/ Acumulación

Cer = Certidumbre

La magnitud de la *Rel* se calculó según la descripción señalada en la Tabla 6-20 y los parámetros que conformaron la *MI* se estimaron como se describió en la Tabla 6-21. El valor de estas variables se determinó según los resultados en los casos de estudio, a excepción de la variable reversibilidad, la cual se analizó realizando una simulación adicional. Esta simulación se realizó a partir de condiciones iniciales construidas con los valores en el término de la simulación del caso SA, excluyendo las descargas y captaciones, con el objetivo de evaluar la evolución en el tiempo de las variables en la bahía y verificar la recuperación (según la cercanía a los valores del caso SN). Esta metodología se empleó sobre los parámetros simulados, temperatura, salinidad y nutrientes, mientras que, la concentración de organismos mantuvo la condición inicial (la cual fue utilizada en todos los casos de estudio). Las concentraciones de los organismos tuvieron un tratamiento especial, ya que esta variable, a diferencia del resto, no mostraba un comportamiento cíclico anual, es decir, los valores del comienzo y final de la simulación mostraron una gran diferencial en

sus magnitudes, inclusive en el caso SN. Los análisis de la reversibilidad fueron realizados en los puntos de extracción seleccionados en la Figura 6-13. Se debe recalcar que la metodología mencionada solo evaluó la reversibilidad natural, ya que el estudio de actividades correctoras sobre los impactos ocurridos se tornaría complejos respecto a los objetivos de esta memoria.

Es importante mencionar que, como se evaluaron los resultados de análisis en la bahía, el valor *ICI* representa la condición de la bahía.

El valor del *ICI* obtenido fue evaluado según la jerarquización del impacto presentada en la Figura 6-18.

Tabla 6-20 Rangos de Relevancia ambiental (Rel) del componente.

Rango	Jerarquía	Descripción
3	Alta	▪ Recurso/componente escasamente representado (baja abundancia); ▪ Recurso/componente que contiene una alta proporción de especies o componentes singulares o amenazados; ▪ Recurso/componente que provee servicios ambientales relevantes que le permiten interactuar con el resto del sistema o componente ambiental; ▪ Recurso/componente que presenta restricciones para su intervención, dada su baja capacidad de resiliencia y/o alta fragilidad; ▪ Recurso/componente que se encuentra al límite de su capacidad de utilización racional, ya sea porque se encuentra con concentraciones de latencia o saturación o porque su tasa de regeneración/disponibilidad se encuentra cercana a la utilización actual; ▪ Recurso/componente que posee un régimen de protección oficial; ▪ Recurso/componente que posee una alta valoración por parte de los grupos humanos dado que posee un uso actual y no cuenta con alternativas de reemplazo; ▪ Se considera que la relevancia es alta cuando el recurso/componente es utilizado con fines culturales o económicos por comunidades tradicionales, un grupo humano indígena y/o un grupo vulnerable.
2	Moderada	▪ Recurso/componente con una abundancia y/o representatividad aceptable; ▪ Recurso/componente con baja proporción de especies o componentes singulares y/o amenazadas; ▪ Recurso/componente que provee servicios ambientales que no se consideran críticos; ▪ Recurso/componente que posee una capacidad de resiliencia aceptable y/o no posee alta fragilidad; ▪ Recurso/componente que es valorado por el grupo humano al poseer un uso actual, pero que posee alternativas de reemplazo; ▪ Se considera que la relevancia es moderada cuando el recurso/componente fue recientemente utilizado con fines culturales o económicos por comunidades tradicionales, un grupo humano indígena y/o un grupo vulnerable.
1	Baja	▪ Recurso/componente abundante y/o altamente representado; ▪ Recurso/componente que no contiene especies o componentes singulares o amenazadas; ▪ Recurso/componente que no provee servicios ambientales relevantes; ▪ Recurso/componente que no posee condiciones que restrinjan su intervención; ▪ Recurso/componente que posee una escasa valoración del grupo humano y/o no posee un uso actual

Fuente: (Arcadis Chile, 2015).

Tabla 6-21 Variables e indicadores de valoración de la Magnitud del Impacto (MI).

Variables	Descripción	Indicadores	Rango	
Carácter (Ca)	Define el sentido del cambio producido por una obra o actividad del proyecto sobre el ambiente.	Positivo: se refiere a un impacto benéfico sobre el medio ambiente.	Positivo	+
		Negativo: se refiere a un impacto adverso sobre el medio ambiente que implica un deterioro o degradación de la situación de línea de base.	Negativo	-
Extensión (Ex)	Define el área afectada por el impacto	Extenso: cuando el impacto se manifiesta abarcando una superficie equivalente o mayor a una subcuenca o comuna o su emplazamiento intercepta, con una superficie significativa de dos o más subcuencas o comunas.	Extenso	3
		Local: cuando el impacto se manifiesta abarcando una superficie mayor a una hectárea y menor a una subcuenca o comuna.	Local	2
		Puntual: cuando el impacto se manifiesta abarcando una superficie menor a 1 hectárea.	Puntual	1
Duración (Du)	Indica el tiempo que permanecerá el impacto desde su aparición.	Largo plazo: cuando el impacto tiene un tiempo de duración superior a 5 años	Largo plazo	3
		Mediano plazo: cuando el impacto tiene un tiempo de duración entre 1 a 5 años	Mediano plazo	2
		Corto plazo: cuando el impacto tiene un tiempo de duración menor a 1 año	Corto plazo	1
Reversibilidad (Rev)	Evalúa la capacidad que tiene el impacto de ser revertido naturalmente o mediante acciones correctoras.	Irreversible: el impacto no se revierte en forma natural al finalizar la acción que lo genera y tampoco puede ser revertido mediante acciones correctoras.	Irreversible	3
		Parcialmente reversible: el impacto no se revierte de manera natural después de finalizada la acción que lo genera, pero puede ser revertido al menos parcialmente, mediante acciones correctoras.	Parcialmente reversible	2
		Reversible: el impacto se revierte en forma natural una vez finalizada la acción que lo genera.	Reversible	1
Intensidad (In)	Expresa la fuerza de la fuente de impacto, considerando el potencial de alteración que es capaz de generar.	Alta: grado de alteración mayor que implica la eliminación del componente ambiental o el cambio total de su condición basal.	Alto	3
		Media: grado de alteración moderado que implica cambios parciales en la condición basal del componente.	Medio	2
		Baja: grado de alteración menor en que el componente ambiental se mantiene en su condición basal.	Bajo	1
Acumulación/ Sinergia (Sin)	Indica la forma de interacción con otros efectos	Sinérgico: se establece cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes, supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente. De la misma forma, incluye el tipo de efecto cuyo modo de acción induce con el tiempo la aparición de nuevos efectos.	Sinérgico	3

Tabla 6-21 Variables e indicadores de valoración de la Magnitud del Impacto (MI). Continuación.

		Acumulativo: se establece cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes provoca una incidencia ambiental equivalente a la suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente.	Acumulativo	2
		Simple: corresponden a efectos que se manifiestan sólo en un componente ambiental o cuyo modo de acción es individual, no produciendo efectos acumulativos.	Simple	1
Certidumbre del Impacto	Expresa el nivel de certeza de que el impacto se manifieste. Se fundamenta, según corresponda, en el juicio experto, y/o antecedentes documentados, y/o los resultados de un modelo predictivo	Alta: cuando existe alta probabilidad de la manifestación del impacto.	Alta	1.0
		Media: cuando existe una probabilidad media de la manifestación del impacto.	Media	0.5
		Baja: cuando existe baja probabilidad de que la manifestación del impacto es remota.	Baja	0.1

Fuente: (Arcadis Chile, 2015).

Rango ICI			Tipo	Jerarquización (Je)
-45.0	-36.1	Negativo	- Alto	- Significativo
-36.0	-27.1		- Medio / Alto	- Significativo
-27.0	-18.1		- Medio	-
-18.0	-9.1		- Medio / Bajo	-
-9.0	-0.5		- Bajo	-
0.5	9.0	Positivo	+ Bajo	+
9.1	18.0		+ Medio / Bajo	+
18.1	27.0		+ Medio	+
27.1	36.0		+ Medio / Alto	+ Significativo
36.1	45.0		+ Alto	+ Significativo

Figura 6-18 Jerarquización de impactos ambientales.

Fuente: (Arcadis Chile, 2015).

7 CARACTERIZACIÓN DE ANTECEDENTES

En el capítulo actual se presentó una breve caracterización oceanográfica, a partir de los análisis realizados en el anexo 13.4 con los datos necesarios para simular la bahía de Quintero, con el objetivo de entregar conocimiento de los fenómenos asociados a la simulación hidrodinámica y ecológica en la bahía de Quintero.

7.1 OCEANOGRAFÍA FÍSICA

7.1.1 OLEAJE

Según la caracterización de los datos de oleaje (anexo 13.4.1), se obtuvieron los siguientes resultados:

Según los datos medidos en el punto qnt-1, las magnitudes de las H_{m0} fueron semejantes en ambas campañas, encontrándose entre los intervalos 0.0- 0.5 [m] y 1.5- 2.0 [m] con el intervalo más frecuente de 0.5- 1.0 [m]. Durante los correspondientes intervalos temporales de las campañas de medición en el punto qnt-1, los datos Atlas presentaron las mayores H_{m0} en la estación de invierno con un intervalo máximo de 4.0- 4.5 [m], mientras que, la estación de verano presentó un intervalo máximo de 3.5- 4.0 [m]. Por otro lado, el intervalo más frecuente fue mayor durante la estación de verano con 2.5- 3.0 [m], en comparación con la estación de invierno, cuyo intervalo más frecuente fue de 2.0- 2.5 [m]. Se debe resaltar la reducción de la H_{m0} al propagarse hacia el interior de la bahía debido a los fenómenos costeros.

En el análisis de todos los datos Atlas, localizados en aguas profundas, se encontraron H_{m0} entre los intervalos 0.5- 1.0 [m] y 6.5- 7.0 [m], con una tendencia en el intervalo 2.0- 2.5 [m]. El punto qnt-5, en las afueras de la bahía presentó intervalos de H_{m0} desde 0.5- 1.0 hasta 4.5- 5.0 [m], con un predominio en el intervalo 1.0-1.5 [m].

El T_p registrado en el punto qnt-1 demostró la ocurrencia de los mayores periodos durante la estación de verano, con el intervalo 12- 14 [s] como el más frecuente, mientras que, durante la estación de invierno el intervalo predominante fue de 10- 12 [s], ocurriendo los mayores periodos durante la estación de verano. Con los datos Atlas, durante la misma ventana temporal de cada campaña, se evidenciaron incongruencia en los intervalos mínimos, máximos y más frecuente, al compararse con los datos medidos en el punto qnt- 1, siendo que el T_p debería permanecer constante. Esto demostró algunas deficiencias en la simulación del oleaje de los datos Atlas.

En el punto qnt-5 se presentó el intervalo más frecuente de T_m con 8-10 [s] y al analizarse la totalidad de los datos Atlas predominó el intervalo de T_p con 12- 14 [s]. Esto verificó que los periodos más frecuentes no presentaron cambios drásticos durante los años recopilados.

La D_p medida en el punto qnt-1 en ambas campañas presentó direcciones exclusivamente desde el cuarto cuadrante, con la D_p más frecuente desde la dirección NO en la estación de invierno y en la estación de verano se presentó un predominio desde la dirección ONO. Durante los mismos intervalos de las campañas anteriores, los datos Atlas mostraron un predominio desde el tercer cuadrante y con una mayor frecuencia desde la dirección SO,

en ambas campañas. Los datos anteriores reflejaron la rotación del oleaje de aguas profundas causado por la morfología de la bahía, al adentrarse al interior de la bahía. En la totalidad de los datos Atlas se obtuvo un oleaje proveniente desde el tercer y cuarto cuadrante, con un predominio desde la dirección SO.

7.1.2 MAREA

En el anexo 13.4.2 se realizó la caracterización del fenómeno de la marea medido durante el año 2016, contenido en los datos IOC.

Mediante el análisis de los armónicos se encontraron las constituyentes con mayores magnitudes, los cuales fueron M2, K1, S2, O1 y N2, con valores de 41.15 [cm], 15.24 [cm], 13.80 [cm], 10.49 [cm] y 9.83 [cm], respectivamente. Con el valor de los armónicos pudo identificarse el régimen mixto semidiurno en la costa de Quintero.

En el análisis no-armónico, desde el cero instrumental, se identificó la plea máxima con un valor de 3.116 [m] y la baja mínima con un valor de 1.048 [m]. El nivel medio del mar correspondió a 1.951 [m], desde el cero instrumental, y 0.905 [m] más abajo se estimó el NRS, por tanto, a 1.046 [m] desde el cero instrumental.

7.1.3 DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos medidos en la estación principal de Quintero fueron analizados en detalle en el anexo 13.4.3 de donde se extrae como comportamiento general:

La magnitud del viento presentó una tendencia oscilatoria anual, produciéndose los mayores valores a comienzos de la primavera y las menores magnitudes en la estación de otoño. Los valores más frecuentes se encontraron en el intervalo 0-2 [m/s] y las máximas magnitudes superaron los 10 [m/s], con una escasa frecuencias de aparición.

La dirección del viento presentó un predominio entre las direcciones E-O coincidente con la ubicación del mar y la tierra, respectivamente, lo que permitió asociarlo al fenómeno de la brisa marina. Hacia la tierra se presentaron direcciones centradas hacia el E, mientras que, hacia el mar ocurrió una mayor dispersión en las direcciones, registrándose con una alta frecuencia las direcciones O, OSO, SO y SSO.

La oscilación anual presentada en la magnitud del viento ocurrió con una fase similar en el parámetro temperatura del aire y radiación solar, con valores entre 0 [°C] hasta los 26 [°C] y desde los 0 [W/m²] hasta los 1315 [W/m²], respectivamente.

La humedad relativa medida en la estación presentó una notable tendencia en el 80 [%], con variaciones entre 40-100 [%].

7.1.4 CORRIENTES

Según el estudio de los datos de corrientes recopilados (anexo 13.4.4), se llegó a las siguientes conclusiones:

Las corrientes medidas en la campaña de invierno y verano, en el punto qnt-1, registraron los mismos rangos de velocidades, desde el intervalo 0-25 [mm/s] hasta el intervalo 175-200 [mm/s]. Los intervalos 25- 50 [mm/s] y 50- 75 [mm/s] fueron los más frecuentados en ambas estaciones en toda la columna de agua. Las direcciones de las corrientes registradas no reflejaron una conducta uniforme en la columna de agua. De forma similar, las

mediciones en los puntos qnt-2 y qnt-3 no presentaron una clara tendencia en toda la columna de agua, aunque las magnitudes visualizadas fueron similares que en el punto qnt- 1.

En el punto qnt-4, que se encontraba en las afueras de la bahía, presentó una tendencia en un mayor intervalo de velocidades de corrientes (75- 100 [mm/s]) en la capa superficial, aunque el intervalo más frecuente bajo su magnitud en las capas más bajas. En este punto se evidenció una ligera tendencia hacia el primer y segundo cuadrante y en la capa de fondo adquirió mayor fuerza hacia el segundo cuadrante.

En general se mostraron mayores magnitudes en la capa superficial y menores valores en la capa de fondo, lo que pudo explicarse a la directa interacción de la capa superficial con el viento, como fuente de energía, y en el fondo, donde se produjo fricción por el suelo marino que disminuyó la energía de las corrientes. Este comportamiento se evidencia de mejor forma en el punto qnt-4, debido a la mayor profundidad, se dificultó la transferencia de la energía, al facilitarse su dispersión, a través de la columna de agua.

7.2 OCEANOGRAFÍA QUÍMICA

7.2.1 TEMPERATURA Y SALINIDAD

La caracterización de las variables temperatura y salinidad se realizó en el anexo 13.4.5, donde se utilizaron las mediciones realizadas con los instrumentos ADCP, CTD y termistor. Las mediciones con ADCP (fondo marino) y CTD (columna de agua) se realizaron en fechas similares, debido a su utilización en el proyecto Aconcagua, aunque la medición de ADCP se realizó durante un mes en cada campaña (invierno y verano), a diferencia del CTD que fueron mediciones durante un instante en cada campaña (invierno y verano).

Las mediciones utilizando el ADCP presentaron una baja variación en la temperatura durante la campaña de invierno, con una tendencia en los 12 [°C], en contraste, en la campaña de verano se evidenciaron grandes variaciones diarias de temperatura, registrando entre los 13 [°C] hasta los 17 [°C].

Las mediciones de CTD permitieron caracterizar las variables temperatura y salinidad del mar a través de la columna de agua, durante ambas campañas. La temperatura medida en la campaña de invierno presentó valores entre los 12 [°C] hasta los 14 [°C] en la superficie y en el fondo, ocurrió una clara tendencia a los 12 [°C]. En la campaña de verano se presentaron temperaturas superficiales entre los 17 a 18.5 [°C], mientras que, en el fondo variaron entre 14 a 16.5 [°C].

En los puntos de control utilizados en las mediciones de CTD se demostró durante la estación de invierno una baja variación entre los puntos norte y sur (CN y CS, respectivamente), mientras que, en la estación de verano se registraron mayores temperaturas en el punto CS, siendo el punto con menores profundidades.

A través del instrumento termistor se obtuvo un registro de las TSM medias de la región de Valparaíso, que mostraron una oscilación estacional de temperaturas, con una variación media mensual histórica entre 12 y 16 [°C] y, en contraste, la media mensual presentó valores entre los 11 hasta los 17 [°C]. Por otro lado, los valores mensuales de TSM presentaron los valores extremos entre 11 [°C] y 20 [°C].

7.2.2 NUTRIENTES

La caracterización de los nutrientes se realizó en el anexo 13.4.6 a partir de los datos recopilados del P.O.A.L., del proyecto Aconcagua y de la bibliografía consultada. De esta información se extrajo para cada nutriente analizado los valores más significativos y el valor medio, que fue utilizado para la simulación ecológica.

Nitrato-Nitrito: En el nitrato se obtuvo el máximo valor de nitrógeno de nitrato en los datos Aconcagua, en su campaña de verano, con 0.84 [mg/L] y el mínimo correspondió a un dato recopilado desde la bibliografía con 0.0013 [mg/L] (Prado & Sievers, 1987). En general, los mayores valores pertenecieron a las mediciones de la campaña de verano durante el proyecto Aconcagua y en los menores valores se encontraron las mediciones en la campaña de invierno del proyecto Aconcagua y los datos bibliográficos recopilados. Los datos P.O.A.L. se encontraron, aproximadamente, entre los rangos establecidos por los datos del proyecto Aconcagua en su campaña de verano. Estos valores promediaron un valor de 0.53 [mg/L].

Las concentraciones de nitrito, a diferencia del nitrato, no pudieron ser encontrados en la bibliografía consultada, además en las mediciones del proyecto Aconcagua se encontraron bajo los límites de detección. La media de estos valores fue de 0.0033 [mg/L] que, al ser considerado el nitrato por el modelo numérico como la suma entre el nitrato y nitrito, demostró ser poco relevante.

La baja concentración del nitrito puede explicarse por su inestabilidad molecular que facilita su transformación hacia el nitrato (Ji, 2008).

Amonio: Este nutriente fue encontrado bajo los límites de detección en las mediciones de ambas campañas del proyecto Aconcagua y tampoco fue encontrada información bibliográfica de este nutriente. En los datos provenientes del P.O.A.L. se promedió un valor de 0.013 [mg/L] de amonio.

Fósforo inorgánico: Analizado en su forma de fosfato, como la forma más abundante en el ambiente marino. Debido a que este nutriente no fue analizado en los datos Aconcagua, solo se contó con los datos P.O.A.L. y bibliográficos recopilados. Los valores extremos correspondieron a la bibliografía recopilada, el mayor valor fue de 0.112 [mg/L] (Sievers & Vega, 2000), mientras que, el menor valor fue de 0.003 [mg/L] (Alvial & Avaria, 1981). Las mediciones del P.O.A.L. se mantuvieron cercanas al menor valor bibliográfico encontrado, con una media de 0.0125 [mg/L].

Oxígeno disuelto: Para la variable oxígeno disuelto se utilizaron los datos del P.O.A.L. y de las mediciones del proyecto Aconcagua, en este caso, mediante un CTD durante las campañas de invierno y verano. El máximo valor se midió en la campaña de verano con un valor de 11 [mg/L] y el menor valor con 4.5 [mg/L] durante la campaña de invierno. En los datos P.O.A.L. se mostró una alta variación de valores, presentándose concentraciones de oxígeno disuelto bajo la máxima medición del proyecto Aconcagua, pero también se registraron valores bajo a la mínima medición en estos datos. Los datos P.O.A.L. seleccionados presentaron un valor medio de 7.98 [mg/L] de oxígeno disuelto.

7.3 OCEANOGRAFÍA BIOLÓGICA

Entre los datos relacionados con organismos solo se analizaron el fitoplancton, zooplancton y clorofila a, ya que no se encontraron datos en las referencias disponibles sobre el detritus y vegetación bentónica. En el anexo 13.4.7 se realizó en detalle el análisis de los datos de organismos recopilados, en búsqueda de valores representativos para las aguas chilenas. A continuación, se resumieron los rasgos más relevantes de los datos utilizados en esta memoria.

Para la variable clorofila a se realizó una recopilación de información bibliográfica, entre los cuales, la mayor concentración de clorofila a registrada fue de 7.86 [mg/m³] (Palma, Henríquez, & Ojeda, 2009) y la mínima correspondió a 1.14 [mg/m³] (desde la misma bibliografía), con los valores recopilados se obtuvo una concentración media de 3.24 [mg/m³]. Esta concentración de clorofila a equivalió a una concentración de biomasa de fitoplancton de 0.619 [mg/L], según lo establecido en Desortová (1981).

Entre los datos del proyecto Aconcagua se realizaron mediciones de la abundancia fitoplanctónica en ambas campañas, evidenciando un notable predominio de la taxa diatomeas con una concentración de 72,528.57 [cél/L] y 434,497.93 [cél/L], en la campaña de invierno y verano, respectivamente. Según las equivalencias utilizadas en el anexo 13.4.7, se determina su correspondencia a biomasa fitoplanctónica fueron de 0.3879 [mg/L] y 0.5112 [mg/L]. Con los datos anteriores se verificó el orden de magnitud con la estimación de la biomasa fitoplanctónica determinada con los datos bibliográficos de clorofila a.

Mediante la relación de Redfield (Libes, 2009) se obtuvieron las concentraciones de nitrógeno y fósforo del fitoplancton en la bahía que, al determinarse la biomasa (de carbono) de fitoplancton en 0.619 [mg/L], se obtuvo una concentración de 0.1044 [mg/L] y de 0.0065 [mg/L], correspondiente al nitrógeno y fósforo.

En el proyecto Aconcagua se realizaron mediciones de la abundancia de zooplancton, revelando la importancia de la taxa copépodos en ambas mediciones, siendo la más abundante en la campaña de verano y la segunda en la campaña de invierno, después de la taxa de ictioplancton. La relevancia en las concentraciones de copépodos permitió la utilización del estudio de Escribano & Fuentes (2012), donde se realizaron mediciones de biomasa en copépodos en distintos puntos de Chile, los cuales al promediarse se obtuvo un valor de 0.056 [mg/L].

7.4 DESCARGAS Y CAPTACIONES

Tras la recopilación de antecedentes, al interior de la bahía de Quintero se reconocieron 12 descargas, de las cuales, seis de ellas se relacionaban con una toma de agua desde el mar, como se muestra en la Tabla 7-1. Por otro lado, solo seis efluentes se encontraron al interior de la ZPL.

En la Figura 7-1 se señalaron las ubicaciones de las descargas y captaciones al interior de la bahía de Quintero, donde fue posible visualizar una mayor concentración de descargas en el norte de la bahía. En esta ilustración se incluyeron la descarga y captación del proyecto Aconcagua, la cual aún no ha sido construida, pero cuya evaluación ambiental se encuentra aprobada. Los efectos del proyecto Aconcagua se incluyó solo en un caso de estudio (SA+D13), como se estableció en metodología.

Las características de los efluentes, según los datos recopilados, fueron descritas en el anexo 13.4.8. Esta información fue promediada en el tiempo, con la finalidad de construir la Tabla 7-2 que permitiera caracterizar las descargas y emplearlas en las simulaciones posteriores.

Tabla 7-1 Lista de descargas y captaciones en la Bahía de Quintero.

N°	Identificación	Descarga	Captación	ZPL
1	VENTANAS 1	D1	C1	Dentro
2	VENTANAS 2	D2	C2	Dentro
3	NUEVA VENTANAS	D3	C3	Dentro
4	CAMPICHE	D4	C4	Dentro
5	CODELCO	D5	-	Dentro
6	GASMAR TOTAL	D6	C5	Fuera
7	ENAP	D7	-	Fuera
8	BAÑO MODULAR GNL	D8	-	Fuera
9	GNL QUINTERO	D9	C6	Fuera
10	PESQUERA QUINTERO	D10	-	Dentro
11	COPEC	D11	-	Fuera
12	ESVAL	D12	-	Fuera

Fuente: Elaboración propia.

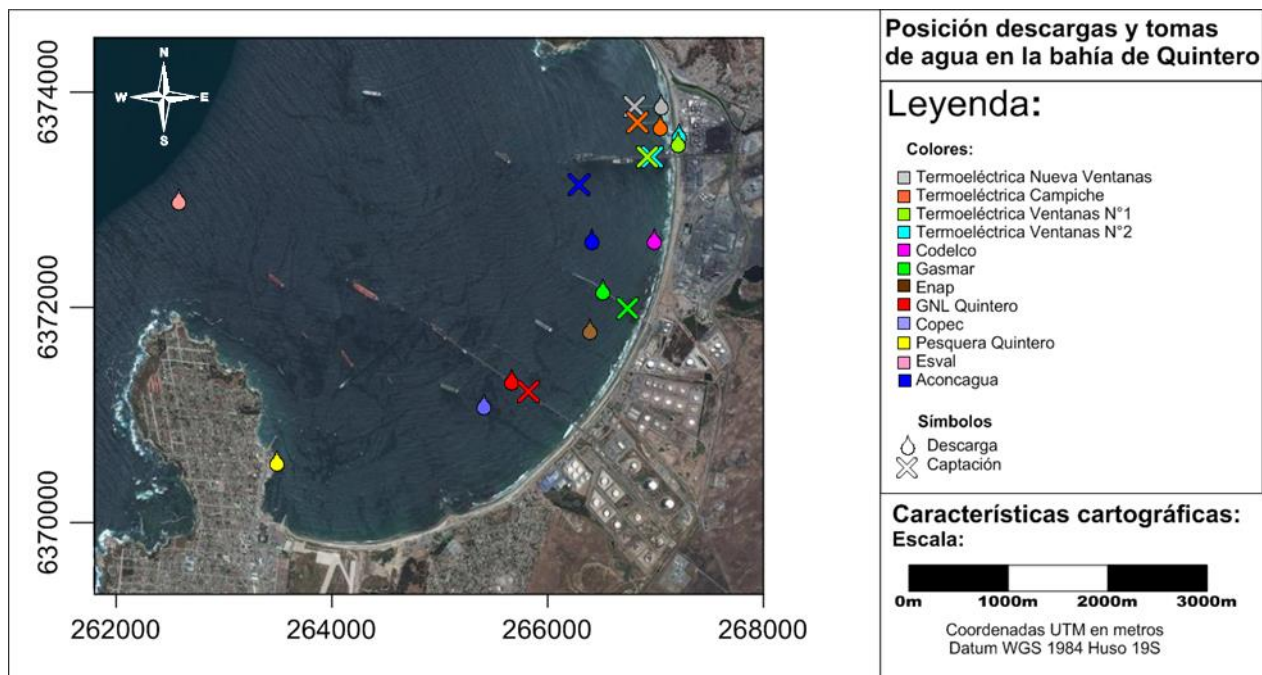


Figura 7-1 Posición de las descargas y tomas de agua en la Bahía de Quintero.

Fuente: Elaboración propia.

Los efluentes con mayores caudales correspondieron Campiche y Nueva Ventanas (ambas con 10.42 [m³/s]), seguidas por los efluentes Ventanas 2, GNL y Ventanas 1 (4.9 [m³/s], 4.1 [m³/s] y 3.08 [m³/s], respectivamente).

En cuanto a la temperatura de los efluentes, los mayores valores promedios correspondieron a los efluentes Ventanas 1 y 2 (26.15 [°C] y 25.17 [°C], respectivamente), y después, Nueva Ventanas (23.35 [°C]), Campiche (22.16 [°C]) y Codelco Ventana (21.19 [°C]). Por otro lado, las descargas Esval y GNL, baños modulares, presentaron las menores temperaturas descargadas en la bahía (14.48 [°C] y 14.62 [°C], respectivamente). Es relevante mencionar que, los efluentes con mayores temperaturas se localizaron en la zona norte de la bahía y provienen de termoeléctricas.

Las mayores concentraciones promedio de NTK y fósforo en los efluentes correspondieron a las descargas de GNL baño modular (57.92 [mg/L]) y Esval (6.8 [mg/L]), respectivamente. Es notorio que fueron pocas las descargas que informaron acerca su concentración de nutrientes, por lo cual, se desarrollaron los supuestos establecidos en la metodología. En la variable salinidad se debió emplear los supuestos en todos los efluentes, a causa de la ausencia de datos.

En la Tabla 7-3 se presentaron las características del efluente del Proyecto Aconcagua que fueron incluido solo en el caso de estudio SA+D13, ya que en la actualidad no se encuentra funcionando. En este efluente se consideró un caudal de 1.36 [m³/s], con una elevada salinidad de 72.3 [PSU] al ser un efluente que proviene de una planta desalinizadora. El resto de las características analizadas en esta memoria no fueron detalladas, por lo tanto, se aplicaron los supuestos establecidos en la metodología.

Tabla 7-2 Datos de descarga promedios a utilizar en la modelación.

Id.	Nombre	Caudal [m³/s]	T[°C]	NTK [mg/L]	P[mg/L]	Salinidad [PSU]	Aducción
D1	VENTANAS 1	3.08	26.15	*	*	*	x
D2	VENTANAS 2	4.93	25.17	*	*	*	x
D3	NUEVA VENTANAS	10.42	23.35	*	*	*	x
D4	CAMPICHE	10.42	22.16	*	*	*	x
D5	CODELCO	9.89 * 10 ⁻³	21.18	3.18	0	0	
D6	GASMAR TOTAL	0.15	*	*	*	*	x
D7	ENAP	1.29 * 10 ⁻²	18.71	0	0	0	
D8	BAÑO MODULAR GNL	2.1 * 10 ⁻⁵	14.63	57.92	5.55	*	x
D9	GNL QUINTERO	4.10	*	*	*	*	x
D10	PESQUERA QUINTERO	4.56 * 10 ⁻³	*	1.61	0.04	0	
D11	COPEC	3.12 * 10 ⁻⁴	18.20	0	0	0	
D12	ESVAL	5.89 * 10 ⁻²	14.48	0	6.80	0	

*: Tales características no generarán variaciones en el cuerpo de agua receptor.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-3 Datos descarga y captación del proyecto Aconcagua.

Id.	Nombre	Caudal [m³/s]	T[°C]	NTK [mg/L]	P [mg/L]	SALINIDAD[PSU]	Aducción Caudal [m³/s]
D13	ACONCAGUA	1.36	*	*	*	72.3	1.44 (2)

*: Tales características no generarán variaciones en el cuerpo de agua receptor.
(2): Se realiza tal caudal mediante dos tuberías.

Fuente: Elaboración propia.

8 CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SIMULACIÓN AÑO MEDIO

En este capítulo fueron presentados de forma breve los resultados de los procesos de calibración y validación que en el anexo 13.5 fueron desarrollados en detalle. El objetivo de estos procesos fue la verificación de las capacidades de los modelos numéricos para representar el comportamiento hidrodinámico y de la calidad de agua en la bahía de Quintero. Este capítulo fue separado según los modelos utilizados (oleaje, hidrodinámico y ecológico), los cuales interactúan entre sí.

En la Tabla 8-1 se mostraron los resultados de la comparación cuantitativa realizada en los procesos de calibración y validación. Según lo mencionado en la metodología, algunas variables no pudieron ser contrastadas con valores y debieron realizarse otro tipo de verificaciones, como por ejemplo la salinidad. En las variables resultantes de la simulación ecológica tampoco fue posible realizar un contraste cuantitativo, por lo cual se comparó el comportamiento simulado con la información bibliográfica. Para esto se realizó una simulación anual con el fin de analizar el comportamiento estacional de estas variables.

Una vez demostrado la capacidad de los modelos en la representación de los fenómenos, se prosiguió con la construcción de las forzantes para la simulación del año medio. Esta simulación buscó representar la hidrodinámica característica de un año en la bahía de Quintero.

Tabla 8-1 Resumen de los resultados en los procesos de calibración y validación.

			R^2	RMS	DS
Oleaje	qnt-1 inv	H_{m0}	0.96 [-]	0.11 [m]	0.30 [m]
		T_p	0.98 [-]	1.26 [s]	2.30 [s]
		D_m	0.84 [-]	4.01 [°]	6.70 [°]
	qnt-1 ver	H_{m0}	0.99 [-]	0.10 [m]	0.20 [m]
		T_p	0.97 [-]	1.96 [s]	3.30 [s]
		D_m	0.95 [-]	4.69 [°]	9.10 [°]
	qnt-2	H_{m0}	0.98 [-]	0.11 [m]	0.23 [m]
		T_p	0.94 [-]	2.28 [s]	2.66 [s]
		D_m	0.94 [-]	5.69 [°]	9.70 [°]
	qnt-3	H_{m0}	0.97 [-]	0.14 [m]	0.23 [m]
		T_p	0.95 [-]	2.47 [s]	2.79 [s]
		D_m	0.96 [-]	4.28 [°]	8.49 [°]
	qnt-5	H_{m0}	0.99 [-]	0.36 [m]	0.61 [m]
		T_m	0.99 [-]	0.99 [s]	1.65 [s]
Marea	qnt-1 inv	Desn.	0.98 [-]	0.09 [m]	0.37 [m]
	qnt-1 ver	Desn.	0.99 [-]	0.08 [m]	0.37 [m]
Corrientes	qnt-1 inv	U sup.	0.99 [-]	9.33 [mm/s]	65.48 [mm/s]
		U int.	0.99 [-]	14.39 [mm/s]	41.23 [mm/s]
		U fondo	0.99 [-]	8.39 [mm/s]	43.12 [mm/s]
		V sup.	0.99 [-]	4.09 [mm/s]	55.45 [mm/s]
		V int.	0.99 [-]	14.75 [mm/s]	41.56 [mm/s]
		V fondo	0.99 [-]	4.98 [mm/s]	36.49 [mm/s]

Tabla 8-1 Resumen de los resultados en los procesos de calibración y validación. Continuación.

	qnt-1 ver	U sup.	0.99 [-]	33.66 [mm/s]	70.33 [mm/s]
		U int.	0.99 [-]	26.95 [mm/s]	42.41 [mm/s]
		U fondo	0.98 [-]	17.73 [mm/s]	52.66 [mm/s]
		V sup.	0.99 [-]	12.07 [mm/s]	47.53 [mm/s]
		V int.	0.98 [-]	9.00 [mm/s]	46.13 [mm/s]
		V fondo	0.99 [-]	2.89 [mm/s]	34.99 [mm/s]
	qnt-4	U sup.	0.98 [-]	55.15 [mm/s]	87.64 [mm/s]
		U int.	0.99 [-]	31.45 [mm/s]	58.43 [mm/s]
		U fondo	0.99 [-]	15.10 [mm/s]	42.64 [mm/s]
		V sup.	0.99 [-]	26.27 [mm/s]	77.73 [mm/s]
		V int.	0.99 [-]	25.43 [mm/s]	55.49 [mm/s]
		V fondo	0.99 [-]	22.20 [mm/s]	40.89 [mm/s]
	qnt-2	U sup.	0.97 [-]	37.60 [mm/s]	76.21 [mm/s]
		U int.	0.98 [-]	35.13 [mm/s]	49.88 [mm/s]
		U fondo	0.98 [-]	24.17 [mm/s]	44.20 [mm/s]
		V sup.	0.97 [-]	19.56 [mm/s]	50.16 [mm/s]
		V int.	0.96 [-]	17.93 [mm/s]	38.56 [mm/s]
		V fondo	0.97 [-]	16.30 [mm/s]	31.88 [mm/s]
	qnt-3	U sup.	0.99 [-]	15.58 [mm/s]	69.96 [mm/s]
		U int.	0.99 [-]	18.35 [mm/s]	45.90 [mm/s]
		U fondo	0.98 [-]	13.25 [mm/s]	58.09 [mm/s]
		V sup.	0.99 [-]	13.05 [mm/s]	57.80 [mm/s]
		V int.	0.99 [-]	11.81 [mm/s]	50.72 [mm/s]
		V fondo	0.99 [-]	10.12 [mm/s]	41.00 [mm/s]
Temperatura	qnt-1 inv	T	0.94 [-]	0.11 [°C]	0.28 [°C]
	qnt-1 ver	T	0.90 [-]	0.29 [°C]	0.82 [°C]

Leyenda

R^2 : Coeficiente de correlación
 RMS : Error cuadrático medio
 DS : Desviación estándar
 H_{m0} : Altura significativa del oleaje
 T_p : Periodo peak del oleaje
 T_m : Periodo medio del oleaje
 D_m : Dirección media del oleaje
 $Desn.$: Desnivelación de la columna de agua.
 U : Componente u de la corriente
 V : Componente v de la corriente
 $sup.$: Variable en la capa superficial de la columna de agua.
 $int.$: Variable en la capa intermedia de la columna de agua.
 $fondo$: Variable en la capa de fondo de la columna de agua.
 T : Temperatura del agua

Fuente: Elaboración propia.

8.1 SIMULACIÓN DE OLEAJE

Según lo mencionado en la metodología, el punto de contraste de datos fue el punto qnt-1 ubicado en la costa, cuya evaluación cuantitativa se presenta en la Tabla 8-1 y se describe

a continuación. La calibración realizada durante la estación de invierno el punto qnt-1 se obtuvo la H_{m0} con un RMS igual a 0.11 [m], menor a su DS de 0.30 [m] y con un R^2 de 0.96 [-], cumpliendo los criterios en esta memoria, al igual que en la validación durante la estación de verano, con un RMS 0.10 [m], menor a su DS de 0.20 [m] y con un R^2 de 0.99 [-]. En los resultados presentados en el anexo 13.5.1 se ilustró que durante la estación de invierno la H_{m0} fue subestimada, al contrario de la estación de verano donde se sobrestimó.

El T_p simulado en el punto qnt-1, durante la estación de invierno (calibración) presentaron un RMS igual a 1.26 [s], menor a su DS de 2.30 [s] y su R^2 0.98 [-] y en la estación de verano (validación) se obtuvo un valor de 1.96 [s] contra una DS de 3.30 [s] y su R^2 0.97 [-], cumpliendo los criterios establecidos para esta memoria. Las series de tiempo (anexo 13.5.1) concuerdan con una ligera sobrestimación de los valores.

En la simulación del oleaje en el punto qnt-1 durante el invierno (calibración) se representó la D_m con un RMS 4.01 [°] contra una DS 6.70 [°] y un R^2 0.84 [-], el cual se consideró aprobado a pesar del valor del R^2 , por su cercanía a 0.90 y el comportamiento de la D_m , manteniéndose en los valores medios. En verano (validación), el RMS alcanzó un valor de 4.69 [°] frente una DS 9.10 [°] y un R^2 0.95 [-], cumpliendo el criterio establecido.

Según se mostró en la Tabla 8-1, los puntos qnt-2 y qnt-3, presentaron resultados similares a los obtenidos en el punto qnt-1, verificando las capacidades del modelo que permite la representación del comportamiento general del oleaje.

Finalmente, en el punto qnt-5 (Tabla 8-1) la representación de la H_{m0} produjo un RMS igual a 0.36 [m], frente a una DS de 0.61 [m] y un R^2 igual a 0.99 [-]. Por otro lado, el T_m generó un RMS de 0.99 [s], contra una DS de 1.65 [s] y un R^2 0.99 [-]. Los resultados señalados anteriormente demostraron el cumplimiento del criterio en el punto qnt-5, verificando la simulación del oleaje en una zona libre de efectos geográficos y escasos impactos por el fondo marino, por tanto, se evaluaron principalmente los datos Atlas.

Los resultados de las comparaciones de los datos medidos en los distintos puntos contra las simulaciones realizadas permitieron verificar satisfactoriamente la capacidad del modelo numérico para representar la propagación del oleaje hacia el interior de la bahía de Quintero. Es importante mencionar que, aunque los resultados de las direcciones del oleaje simulado cumplieron con los criterios establecidos, fue notoria las pérdidas de los valores extremos en el interior de la bahía, lo cual, puede relacionarse con la baja discretización de las direcciones de los espectros en los datos Atlas, la cerrada geografía de la bahía de Quintero y la ocurrencia del fenómeno de difracción que no es representado completamente por el modelo numérico utilizado en esta memoria.

El cumplimiento de los criterios establecidos sobre las simulaciones permitió justificar la utilización del modelo numérico escogido y el uso de los datos Atlas como forzantes de la simulación. La construcción de la forzante del oleaje para la simulación del caso medio requirió la utilización de los espectros bidimensionales, en vez de los parámetros de resumen, ya que de esta forma es posible representar la aparición del oleaje, simultáneamente, desde el tercer y cuarto cuadrante. Esta simulación requirió calcular el espectro medio de cada estado de mar que compone un año, entre los distintos años contenidos en los datos Atlas. En la Figura 8-1 se representaron los parámetros de resumen de cada estado de mar en aguas profundas, con la finalidad de facilitar la visualización. La H_s registrada se encontró entre los 2.0- 3.0 [m], mientras el T_p entre los 12- 16 [s] y las D_p ente 220- 240 [°]. Es relevante mencionar que, las D_p se encontraron en su totalidad en el tercer cuadrante, omitiendo el aporte del cuarto cuadrante, lo cual reafirmó la necesidad de realizar la propagación a partir de los espectros de oleaje.

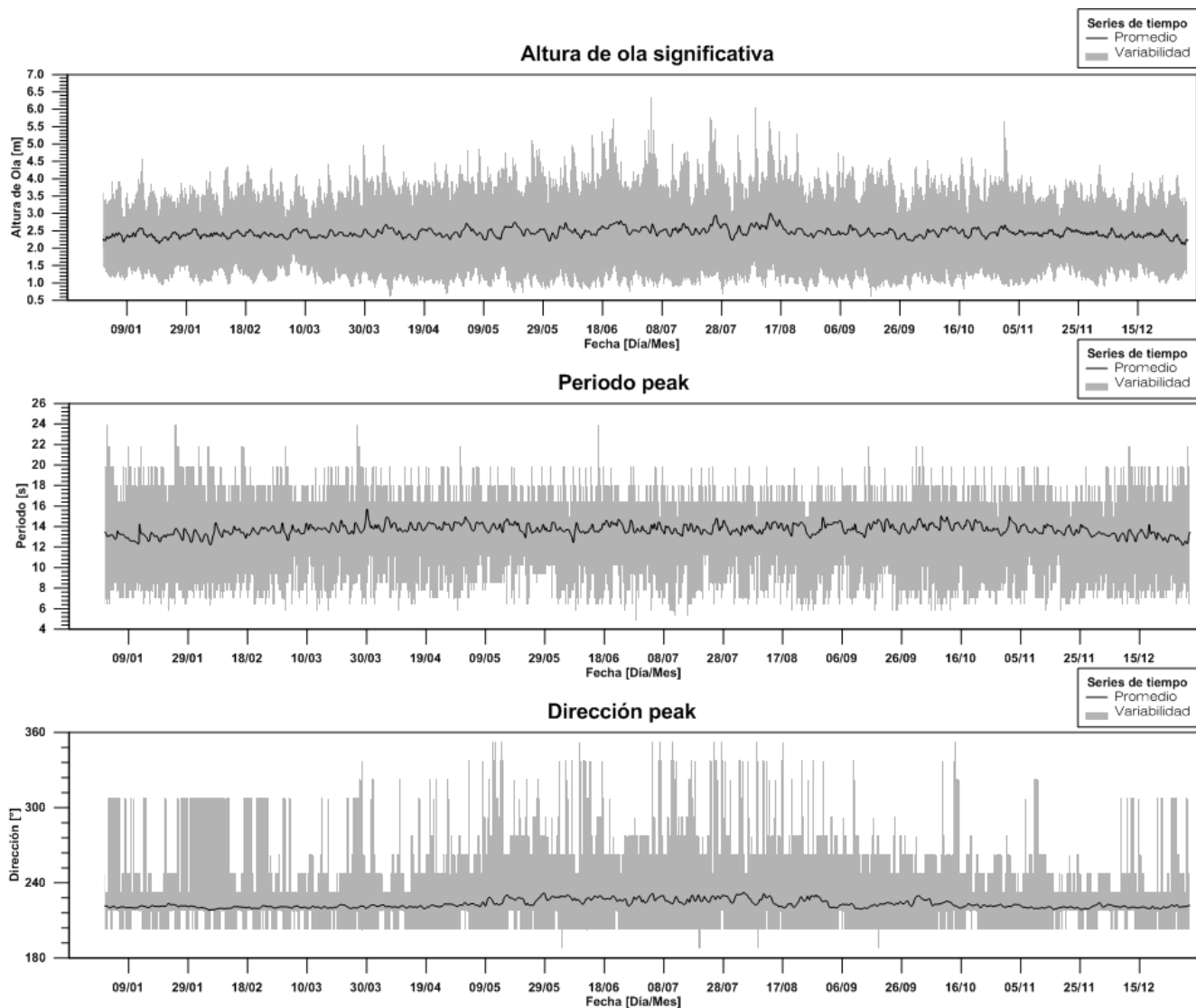


Figura 8-1 Parámetros de resumen de las forzantes de año medio oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

8.2 SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA

La simulación hidrodinámica fue realizada mediante el modelo numérico *Mike 3 Hydrodynamics*, el cual fue forzado por los fenómenos de marea, viento, temperatura y salinidad del agua, además del oleaje que fue simulado adicionalmente. Este modelo fue configurado según lo establecido en la Tabla 8-2 y se evaluó su semejanza con los fenómenos representados al contrastar los resultados de las simulaciones con las mediciones de las variables marea, corrientes (componentes U y V), la temperatura y salinidad del agua producidos en las simulaciones.

Tabla 8-2 Configuración modelo hidrodinámico.

Configuración	Valor	Unidad
<i>Horizontal Eddy Viscosity [Smargorinski formulation]</i>	0.28	[-]
<i>Vertical Eddy Viscosity [Log law formulation]</i>	1.8 E-6 - 0.4	[m ² /s]
<i>Bed resistance [Roughness height]</i>	0.5	[m]
<i>Wind friction</i>	0.0069025	[-]
<i>Time-step</i>	600	[s]
Nº de Courant	0.8	[-]

Fuente: Elaboración propia.

En este capítulo fueron resumidos los resultados de los procesos de calibración y validación de los fenómenos asociados a la simulación hidrodinámica, que se desarrollaron en mayor detalle en el anexo 13.5. Además, en este capítulo fueron presentadas las correspondientes forzantes que permitieron realizar la simulación del caso medio. Finalmente, se dio una breve caracterización de la simulación hidrodinámica del caso medio, la cual fue empleada en la simulación ecológica.

Marea: La marea fue evaluada mediante las mediciones de las desnivelaciones del nivel del mar, con respecto al nivel NRS, en el punto qnt-1, siendo presentados los valores del contraste en la Tabla 8-1. Durante la simulación de invierno (calibración) en el punto qnt-1 se produjo un *RMS* 0.09 [m], que frente a una *DS* de 0.37 [m] y, además, con el R^2 0.98[-] se demostró el cumplimiento del criterio establecido. En la estación de verano (validación) la simulación obtuvo un valor de *RMS* igual a 0.08 [m], notablemente menor a la correspondiente *DS* 0.37 [m] y con el R^2 igual a 0.99 [-] se verificó la capacidad del modelo numérico para representar el fenómeno. Se debe mencionar que, esta comparación de datos se realizó mediante un análisis dato-dato, lo que indicó una excelente representación del fenómeno, haciendo innecesario la comprobación en los otros puntos. En el anexo 13.5.2 se ilustró el residuo entre los datos medidos y simulados, donde se reflejó una subestimación en ambas simulaciones (invierno y verano), lo que podría relacionarse a las desnivelaciones de la marea meteorológica que no se representa en estas simulaciones. Según lo establecido en la metodología, la forzante de la marea del caso medio se puede construir con la señal de marea de cualquier año, debido a su característica oscilatoria, manteniendo magnitudes similares entre las desnivelaciones. Por tanto, fue escogido el año

2016 de forma arbitraria para la construcción de la forzante, considerando que durante este año se realizó la simulación de invierno asociada al punto qnt-1. La marea de este año fue caracterizada en el anexo 13.4.2.

Corrientes: Como se mencionó en la metodología, las corrientes fueron evaluadas según las componentes ortogonales de la velocidad de las corrientes (U y V) en la capa superficial, intermedia y fondo, principalmente en el punto qnt-1, cuya cuantificación se resume en la Tabla 8-1 y se describe a continuación. Durante la estación de invierno (calibración), en la componente U, se obtuvo un R^2 igual a 0.99 [-] en las tres capas, mientras que, los valores del *RMS* presentados fueron de 9.33 [mm/s], 14.39 [mm/s] y 8.39 [mm/s], en las capas superficial, intermedia y de fondo, respectivamente. Estos últimos fueron menores a sus correspondientes *DS*, 65.48 [mm/s], 41.23 [mm/s] y 43.12 [mm/s], aprobando el criterio de evaluación. En el caso de la componente V, el R^2 fue igual a 0.99 [-] en las tres capas analizadas y el *RMS* obtuvo un valor de 4.09 [mm/s], 14.75 [mm/s] y 4.98 [mm/s], en la capa superficial, intermedia y fondo, respectivamente. Considerando que estos valores fueron menores a sus correspondientes *DS*, 55.45 [mm/s], 41.56 [mm/s] y 36.49 [mm/s], con lo cual se pudo considerar aprobado el criterio.

En la simulación correspondiente a la estación de verano (validación) se presentó una simulación de la componente U de la corriente que produjeron un R^2 igual a 0.99 [-] en la capa superficial e intermedia, mientras que, en la capa de fondo se obtuvo un valor de 0.98 [-]. Los valores de *RMS* obtuvieron valores iguales a 33.63 [mm/s], 26.95 [mm/s] y 17.73 [mm/s], en la capa superficial, intermedia y fondo, respectivamente. Estos valores, a pesar de que fueron mayores que en la simulación de invierno, fueron menores a las magnitudes de las correspondientes *DS* 70.33 [mm/s], 42.41 [mm/s] y 52.66 [mm/s]. En la componente V se presentaron R^2 en la capa superior y de fondo iguales a 0.99 [-] y en la capa intermedia igual a 0.98 [-]. Los *RMS* de la capa superior, intermedia y fondo fueron iguales a 12.07 [mm/s], 9.00 [mm/s] y 2.89 [mm/s], respectivamente. Como estos valores fueron menores a sus correspondientes *DS* 47.53 [mm/s], 46.13 [mm/s] y 34.99 [mm/s], se verificó la configuración del modelo y su capacidad de representar la hidrodinámica al interior de la bahía.

Según se estableció en la Tabla 8-1, las comparaciones de datos en los puntos qnt-2 y qnt-3, en las respectivas simulaciones cumplieron, también, con los criterios establecidos en la metodología, lo cual aumenta la seguridad de las simulaciones en las costas de la bahía de Quintero.

La simulación asociada al punto qnt-4 fue especialmente relevante por su ubicación en las afueras de la bahía, verificando las capacidades del modelo en otra sección del dominio. A pesar de lo anterior, se debe recordar que esta simulación se realizó con información meteorológica desde otra estación (anexo 13.5.3). Según lo mostrado en la Tabla 8-1, la componente U en esta simulación obtuvo un valor de R^2 igual a 0.98 [-] en la capa superficial, mientras en la capa intermedia y de fondo fue de 0.99 [-]. El *RMS* en esta componente fue de 9.33 [mm/s], 14.39 [mm/s] y 8.39 [mm/s], menor a su correspondiente *DS*, 65.48 [mm/s], 41.23 [mm/s] y 43.12 [mm/s], lo que confirma el cumplimiento el criterio de evaluación. En la componente V en esta simulación presentó un valor de R^2 igual a 0.99 [-] en las tres capas analizadas. El *RMS* resultante de la simulación fue de 26.27 [mm/s], 25.43 [mm/s] y 22.2 [mm/s] en las capas superficial, intermedia y fondo, respectivamente. De forma que, estos valores fueron menores a sus correspondientes *DS*, iguales a 77.73 [mm/s], 55.49 [mm/s] y 40.89 [mm/s]. Con esto se confirmó el cumplimiento de los criterios

establecidos y se verificaron las capacidades del modelo en las afueras de la bahía de Quintero.

Datos meteorológicos: Como se estableció en la metodología, los datos de vientos utilizados correspondieron a información extraída de las estaciones meteorológicas, la cual fue considerada constante en el dominio. Por esto no fueron necesarios los procesos de calibración y validación sobre los datos, al provenir de mediciones, aunque se debe recalcar que, el caso ideal habría sido el empleo de campos de viento variable al interior del dominio. A pesar de lo anterior, los resultados favorables de la hidrodinámica en el contraste de datos, permitió aceptar el empleo de los datos meteorológicos, como forzante de la hidrodinámica simulada.

Para la forzante del caso medio se promedió la información recopilada de la estación meteorológica principal de Quintero, durante cada time-step (de una hora) que constituye un año. La forzante construida fue mostrada en la Figura 8-2, donde se representó el comportamiento oscilatorio con una disminución durante el otoño y un incremento en primavera. En la gráfica de la distribución de las velocidades con respecto a las direcciones, se señaló que las mayores velocidades ocurrieron en las cercanías de la dirección O, aunque en este caso, se concentró una cantidad importante energía en el segundo cuadrante. En la Figura 8-3 se mostraron las forzantes del caso medio relacionadas con el intercambio de calor con la atmósfera. Las variables temperatura del aire y radiación solar representaron la oscilación anual mostrada, con los mayores valores en las estaciones de verano-primavera. En contraste, la humedad relativa presentó una tendencia marcada en el 80 [%].

Temperatura y salinidad: Es importante recalcar que, las variables temperatura y salinidad afectan a la hidrodinámica por su dependencia con la densidad y, a su vez, la hidrodinámica produce el transporte de estas variables. Para la correcta inclusión de las variables temperatura y salinidad en la simulación hidrodinámica se realizaron los ajustes establecidos en la Tabla 8-3. Por otro lado, en los procesos de calibración y validación, para mejorar su cercanía a las mediciones, se determinaron los coeficientes a aplicar sobre las forzantes de estas variables provenientes del modelo HYCOM, cuyos valores fueron señalados en la Tabla 8-4.

Las variables temperatura y salinidad del agua al interior de la bahía dependieron de las forzantes construidas a partir de las salidas del modelo HYCOM, pero también fueron afectadas por los efluentes simulados al interior de la bahía.

Los procesos de calibración y validación para la variable temperatura del agua en el fondo marino, fueron realizados sobre el punto qnt-1 durante las estaciones de invierno y verano, respectivamente. En la Tabla 8-1 se presentó que durante la estación de invierno (calibración) en el punto qnt-1 se produjo un R^2 igual a 0.94 [-] y un RMS igual a 0.11 [°C] menor a su correspondiente DS de 0.28 [°C], que demostró el cumplimiento de los requerimientos establecidos. El contraste de datos durante la estación de verano (validación) generó un R^2 igual a 0.9 [-] y un RMS igual a 0.29 [°C], frente a una DS de 0.82 [°C], con lo cual se cumplió el criterio que permitió culminar el proceso de validación.

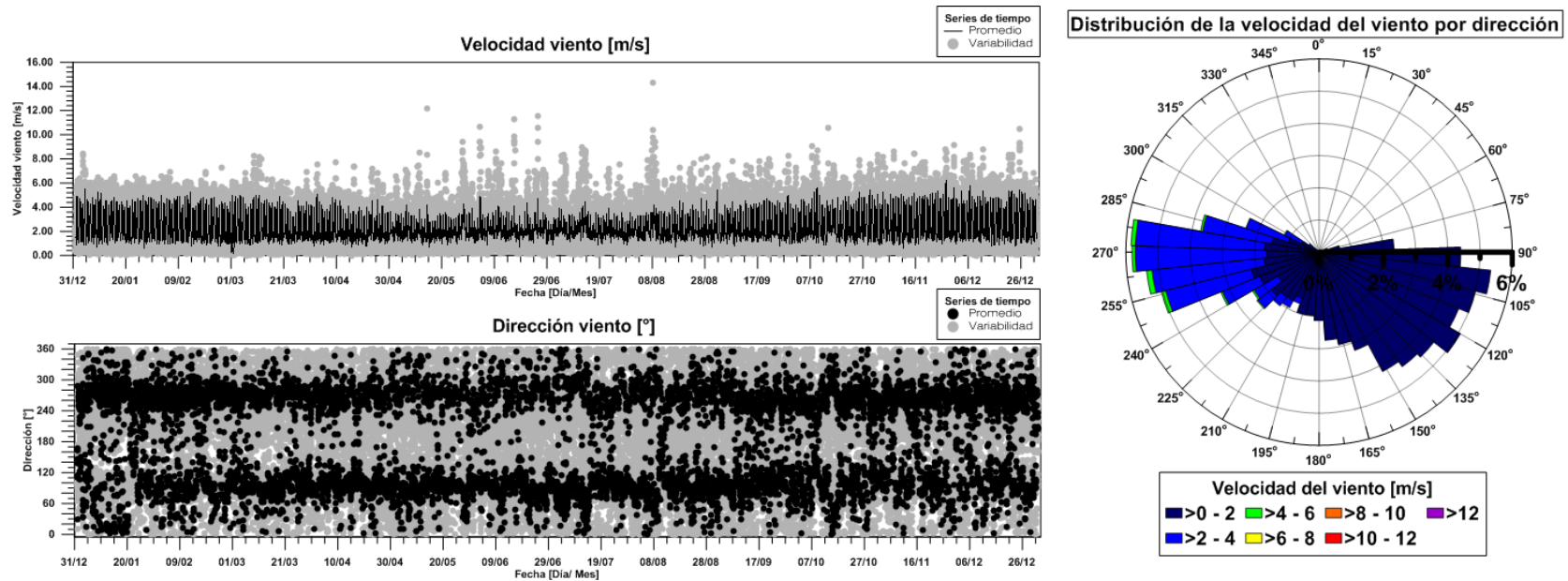


Figura 8-2 Forzante de viento de año medio.

Fuente: Elaboración propia.

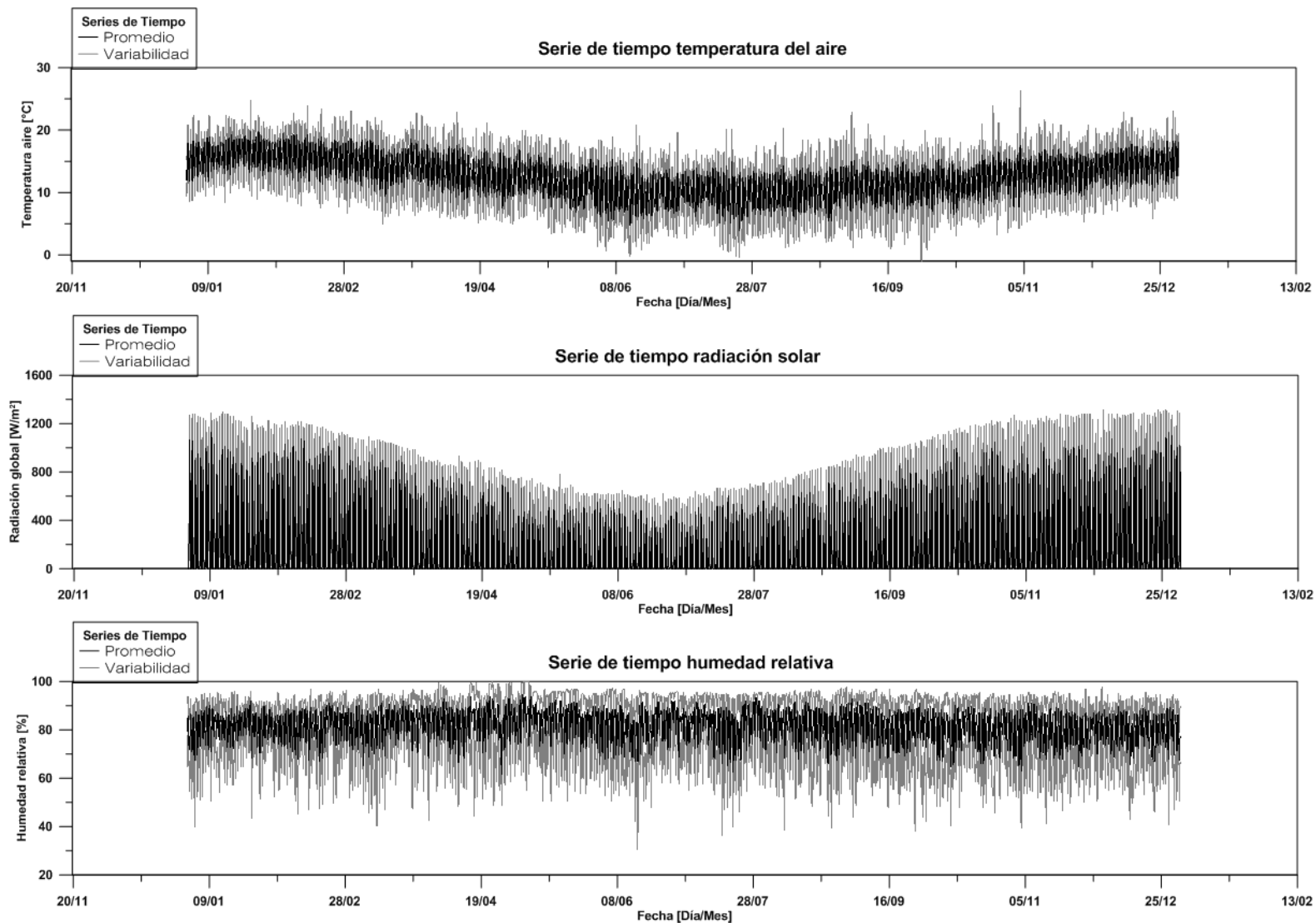


Figura 8-3 Forzante intercambio de calor para modelación año medio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-3 Configuración modelo hidrodinámico, coeficientes relacionados con modelo termo-salino.

Configuración	Valor	Unidad
Dispersión horizontal [<i>Scaled eddy viscosity formulation</i>]	1	[-]
Dispersión vertical [<i>Scaled eddy viscosity formulation</i>]	0.1	[-]

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-4 Configuración de forzantes para modelación termo-salina.

	Temperatura [°C]	Salinidad [PSU]
Invierno	-0.5	+0.25
Verano	-2.4	0

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de calibración y validación se desarrolló con mayor detalle en el anexo 13.5.4 y junto a éste se realizó una comparación visual entre el rango simulado de las variables de temperatura y salinidad del mar contra las mediciones de CTD. Este análisis culminó con el cumplimiento de los criterios en los procesos de calibración y validación, es decir, en este caso, las variables medidas por el CTD ocurrieron en el rango simulado. Se debe mencionar que, se cumplieron los criterios satisfactoriamente, aunque en la simulación de calibración, en los puntos más cercanos al norte de la bahía se presentó una leve sobrestimación en la temperatura que podría relacionarse a una sobrestimación de la temperatura de las descargas al no considerar su variación en el tiempo. Junto con esto, se presentaron las dificultades de la amplia discretización espacial en la información simulada (HYCOM) para la construcción de las forzantes y la consideración de variables meteorológicas constantes en el dominio provenientes de mediciones en tierra, que complejiza la representación del intercambio de calor entre la interfaz agua-aire. A pesar de lo anterior, las simulaciones realizadas cumplieron los criterios establecidos demostrando la validez de la representación de las variables temperatura y salinidad del agua, permitiendo su utilización en el caso medio.

Para la construcción de las forzantes de las variables temperatura y salinidad del mar, a partir del modelo HYCOM, se eligió la temperatura del año 2015 y la salinidad del año 2016, debido a la complejidad de la descarga de datos desde el sitio del HYCOM, según lo establecido en el anexo 13.5.4. Estas forzantes fueron representadas en la Figura 8-4 y Figura 8-5 para las variables temperatura y salinidad del agua, respectivamente. Estos datos se presentaron en distintas profundidades, seleccionándose solo algunos de los datos disponibles para facilitar la comprensión de los datos. En los datos presentados se aplicaron los coeficientes de ajustes determinados en los procesos de calibración y validación que se establecieron en la Tabla 8-4.

En la Figura 8-4 se incluyó la TSM con la media histórica que permitió verificar la correcta representación de la temperatura del mar superficial. En la temperatura de las forzantes (Figura 8-4) se reveló una variación entre los 13 a 18 [°C] en la superficie y en el fondo marino ocurrió un rango entre los 7 a 12 [°C]. Los datos de salinidad del mar (Figura 8-5) presentaron valores entre 34.3 a 34.5 [PSU] en la superficie y en el fondo entre los 34.5 a 34.9 [PSU].

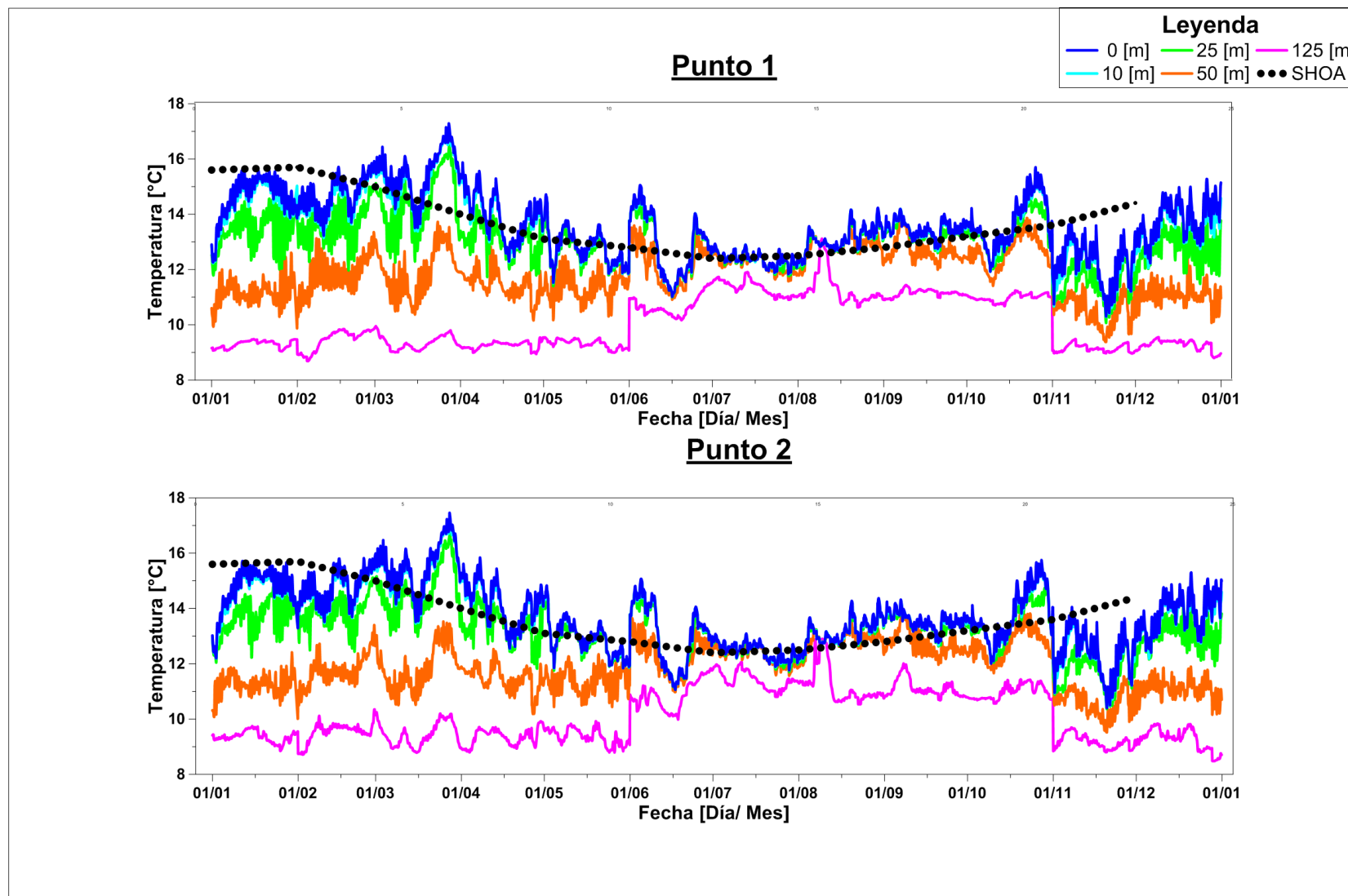


Figura 8-4 Forzante año medio de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

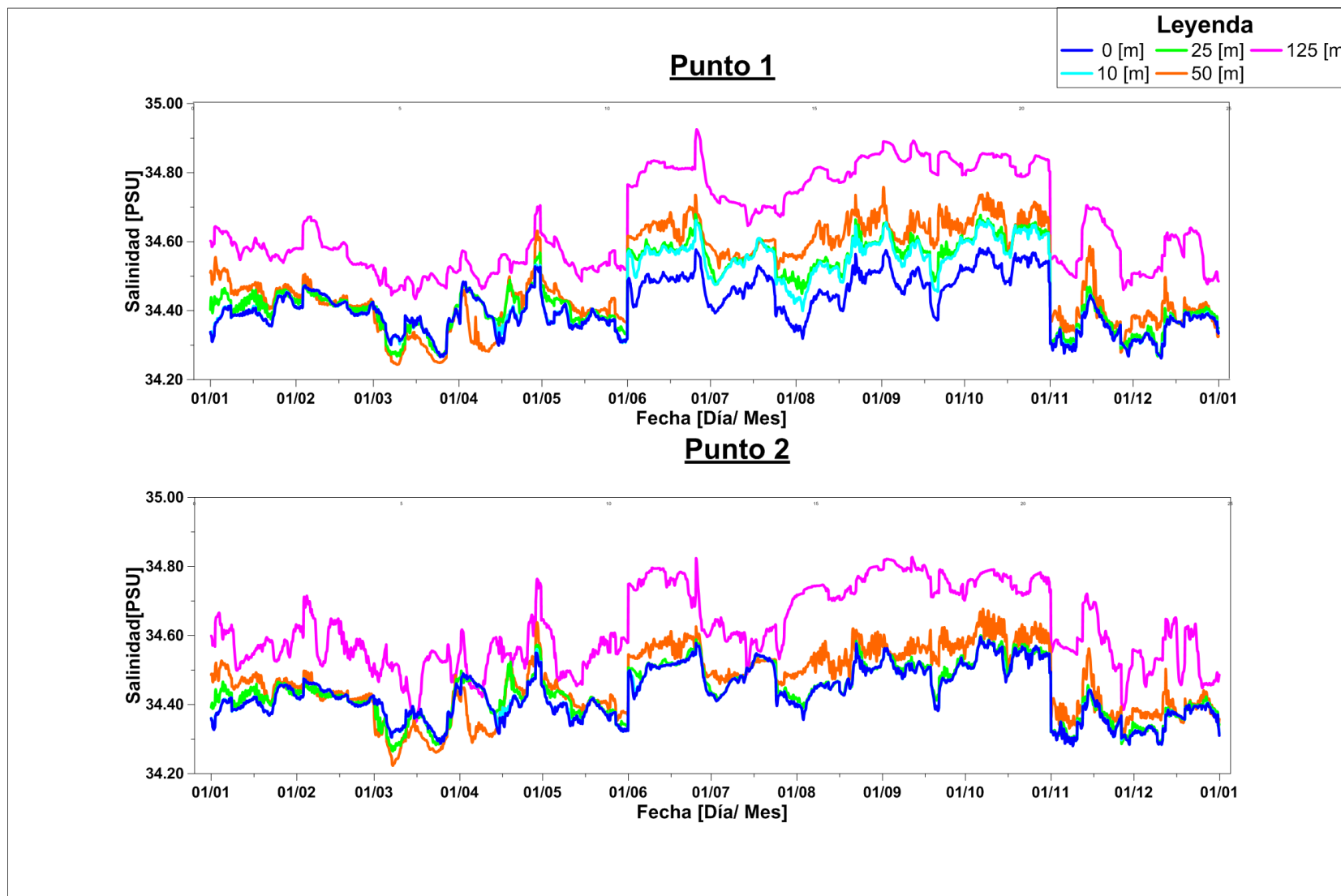


Figura 8-5 Forzante año medio de salinidad.
Fuente: Elaboración propia.

Caracterización hidrodinámica: El principal resultado del proceso de calibración y validación fue la obtención de la configuración del modelo hidrodinámico que permitió la representación de ésta en la bahía de Quintero. Esta configuración fue empleada en la simulación del caso medio, donde se utilizó los datos de las forzantes construidas junto a las características de descargas y captaciones actuales, la cual fue denominada en el capítulo 6.4 como caso Simulación Actual (SA). Este análisis se centró en entregar el comportamiento, en rasgos generales, de las variables corrientes, temperatura y salinidad durante la simulación del caso medio, que fueron empleados posteriormente en el modelo ecológico.

En la Figura 8-6 se esquematizó el comportamiento medio de la hidrodinámica durante la simulación de un año. Se ilustró solo la hidrodinámica media anual, ya que el comportamiento medio de las distintas estaciones presentó diferencias despreciables (anexo 13.5.5). Para la representación se ilustró la capa superficial, intermedia y fondo, junto al promedio de la columna de agua. El comportamiento al interior de la bahía, se caracterizó por una tendencia de la dirección hacia el norte de la bahía y, en el sector norte, se produjo una vorticidad que cambió la dirección de las corrientes hacia el sur y luego provoca la salida del flujo de la bahía. La entrada del flujo proviene desde el sur, predominando en las cercanías de la península Los Molles.

Las mayores velocidades se presentaron en las cercanías de los accidentes geográficos, que penetran hacia el mar, entre ellos resaltaron, la península Los Molles, los accidentes geográficos desde la punta de Horcón hasta la punta Ventanilla y en la caleta Loncura, al interior de la bahía. En estos puntos se presentaron magnitudes de corrientes máximas de 0.5 [m/s]. En las afueras de la bahía, se mostró una tendencia de la corriente hacia el sur, como se ilustró en la capa de fondo e intermedia, mientras que, la capa superficial señaló una tendencia hacia la dirección este, lo que pudo deberse a la interacción directa de la capa superficial con el viento.

En la Figura 8-7 y Figura 8-8 se presentaron las distribuciones de las variables temperatura y salinidad del agua, respectivamente, bajo el análisis de la distribución de variables establecido en la metodología. En la variable temperatura, se visualizaron magnitudes entre 9.5 [°C] hasta 19 [°C], aunque ocurrieron incrementos sobre los 24 [°C] en las cercanías de las descargas, que no alcanzaron ser visualizables en los esquemas. En todos los promedios mostrados en la figura se señaló una elevación de la temperatura en la zona norte de la bahía, donde se acumularon los efluentes provenientes de las termoeléctricas en la bahía. Es posible notar que, en la capa de fondo se consiguieron mayores temperaturas, pero con una menor superficie, en comparación con los resultados de la capa superficial, donde se ilustró una superficie mayor, pero con menores temperaturas, lo que pudo deberse a la difusión vertical al descargarse un efluente con una alta boyantez. Las elevadas temperaturas en el norte de la bahía se caracterizaron con temperaturas mayores a los 16 [°C], con un centro que supera los 17[°C].

En las afueras de la bahía, las mayores temperaturas ocurrieron durante el verano, con magnitudes cercanas a los 15 [°C], en la capa superficial, en contraste, en la misma locación durante el invierno, que solamente alcanzaron los 12 [°C]. En la capa de fondo, durante toda la simulación, los sectores más profundos mantuvieron temperaturas cercanas a los 9.5 [°C].

Promedio entre Capas



Capa Superior



Capa Intermedia



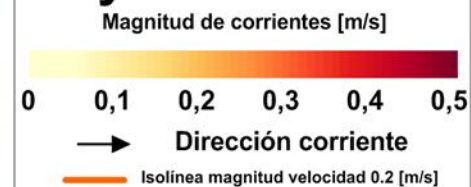
Capa Fondo



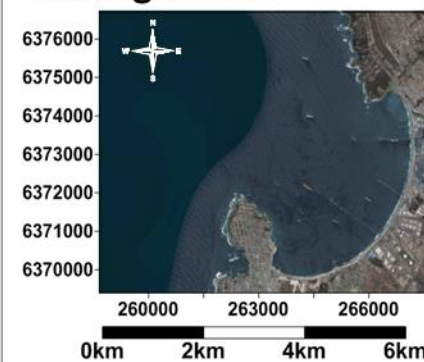
Título

Distribución de Corrientes en promedio anual de la simulación hidrodinámica.

Leyenda



Características cartográficas



Coordenadas UTM en metros
Datum WGS 1984 Huso 19S

Figura 8-6 Distribución de corrientes de la simulación hidrodinámica.
Fuente: Elaboración propia.

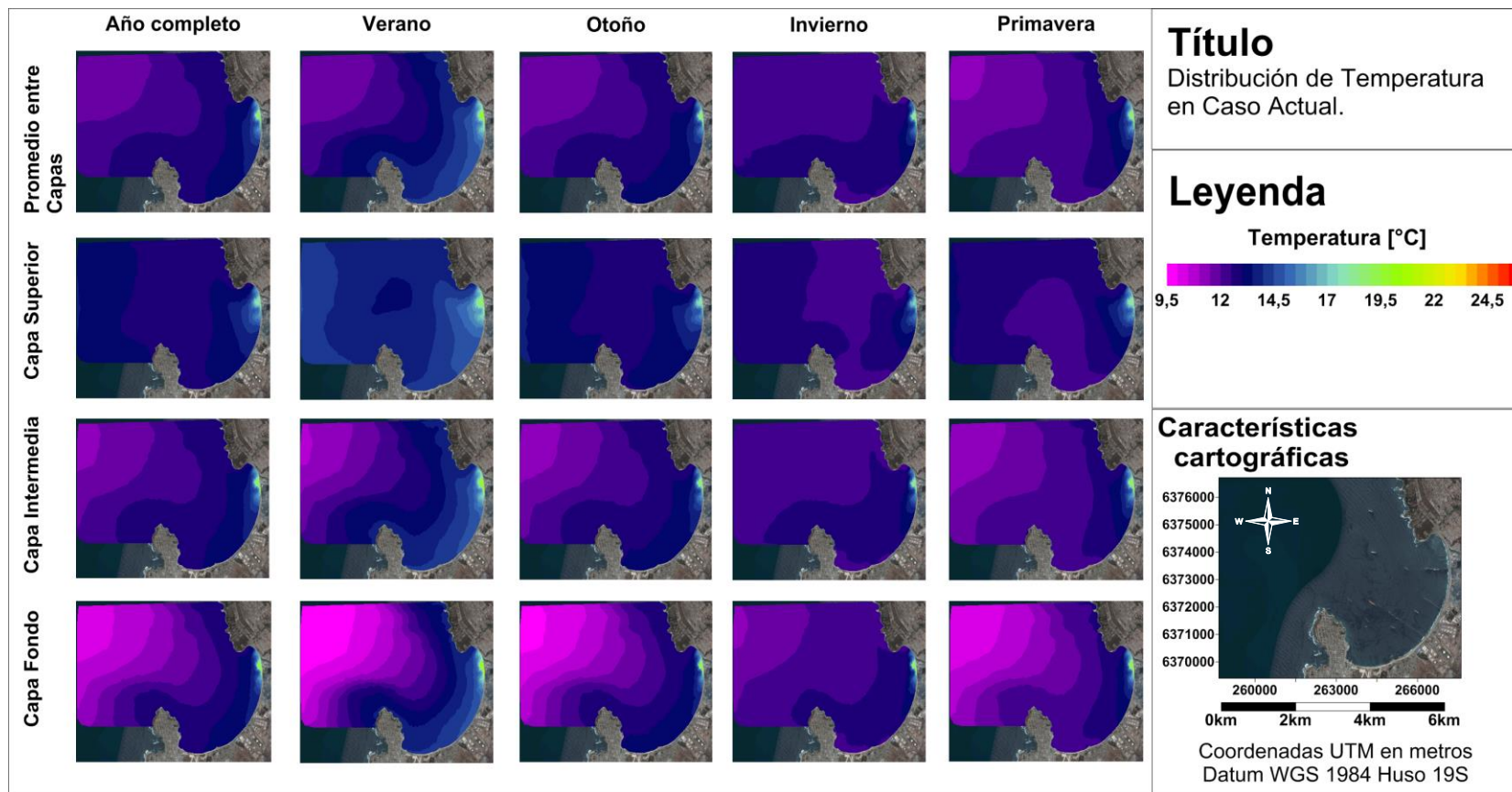


Figura 8-7 Distribución de temperatura en simulación caso SA.
Fuente: Elaboración propia.

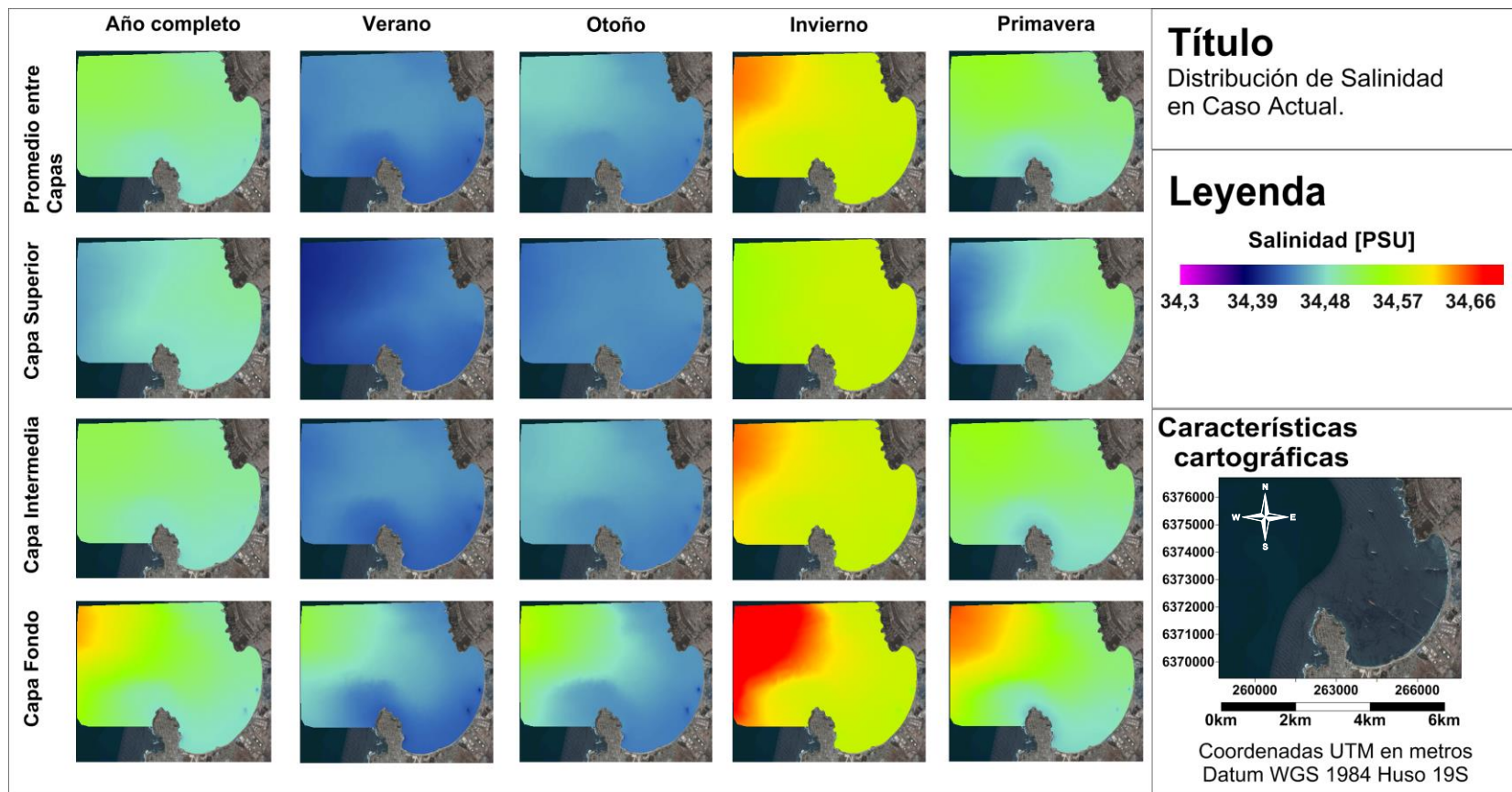


Figura 8-8 Distribución de salinidad en simulación caso SA.
Fuente: Elaboración propia.

En la variable salinidad señalada en la Figura 8-8 se registraron magnitudes entre 34.39 a 34.66 [PSU]. La salinidad simulada mostró incrementos en su magnitud con la profundidad, alcanzando los mayores valores en la capa de fondo durante la estación de invierno, lo cual es esperable de acuerdo al mayor peso que el fluido genera. En la estación de invierno los valores de la salinidad se encontraron entre 34.57 a 34.66 [PSU] y en contraste, en la estación de verano la salinidad presentó valores entre 34.39 a 34.57 [PSU]. Se debe mencionar que, según la información recopilada sobre las descargas salinas fue insuficiente y, por tanto, se debieron realizar supuestos se establecieron algunos efluentes con una salinidad de 0 [PSU], pero coincidentemente con un bajo caudal. Estas bajas salinidades son visualizables en la costa de la bahía durante la estación de verano y otoño en la capa de fondo. Las descargas con mayores caudales fueron configuradas con una salinidad igual al medio debido a que, coincidentemente, se relacionaron con tomas de agua (capítulo 6.1.5).

La distribución de las variables temperatura y salinidad del mar producidas en el caso medio mantuvieron un comportamiento similar al presentado en las simulaciones de calibración y validación (anexo 13.5.4), tanto en la distribución en el dominio como en la columna de agua. Así también, las magnitudes presentadas en el caso medio fueron semejantes a las obtenidas en las simulaciones de calibración y validación, en sus correspondientes estaciones y, por tanto, se mantuvo el orden de magnitud verificado con datos medidos.

8.3 SIMULACIÓN ECOLÓGICA

La simulación ecológica se realizó mediante el modelo *Mike Eco Lab*, el cual fue implementado con las variables nutrientes y organismos recopilados, en conjunto a la hidrodinámica simulada anteriormente. Los promedios de las variables de nutrientes y organismos fueron empleadas como condiciones iniciales construidas con los datos medios señalados en la Tabla 8-5 para los nutrientes y en la Tabla 8-6 para los organismos.

La escasa información encontrada de nutrientes y organismos al interior de la bahía requirió verificar las conductas simulada de las variables con respecto al comportamiento establecido en la bibliografía consultada. Para esto se decidió realizar una simulación anual, con la hidrodinámica característica de la bahía correspondiente al caso medio, y así, representar las principales características anuales de las variables de la simulación ecológica. La cantidad de información sobre los nutrientes permitió evaluar el orden de magnitud simulado.

El análisis de las variables simuladas se realizó sobre puntos al interior de la bahía, como se detalló en el anexo 13.5.6. De este estudio se extrajo que la conducta de las variables fue similar en los distintos puntos de la bahía, cambiando la magnitud de estos. Debido a esta razón se decidió resumir el comportamiento según su variable como se señaló en la Figura 8-9. En esta ilustración se mostró, con curvas negras, el comportamiento del fitoplancton (PC) junto a las curvas que representaron las variables amonio, nitrato, fosfato, zooplancton, detritus y oxígeno disuelto (bajo la nomenclatura NH_4 , NO_3 , PO_4 , ZC , DC y DO , respectivamente). A continuación, fue presentado un breve resumen acerca del comportamiento de las variables simuladas.

En primer lugar, el nutriente amonio presentó oscilaciones al inicio de la estación de verano, debido al consumo del fitoplancton y a la biomasa que se transfirió hacia los nutrientes inmediatamente tras la muerte del fitoplancton. Después de la reducción abrupta del fitoplancton, el detritus incrementó su biomasa y se mineralizó, aumentando la

concentración del amonio. En las estaciones de otoño e invierno, el amonio se redujo paulatinamente debido a la reducción de material orgánico y la continua transferencia hacia el nitrato, mediante la nitrificación. En primavera, con el incremento de la concentración de fitoplancton se produjeron oscilaciones en el amonio nuevamente y tras la reducción abrupta del fitoplancton volvió a incrementarse el amonio.

Tabla 8-5 Selección de nutrientes para casos a modelar.

Nutrientes	Unidad [mg/L]
Nitrato (NO_3)	0.530
Nitrito (NO_2)	0.003
$\text{NO}_3 + \text{NO}_2$	0.533
Amonio	0.013
Fosfato	0.013
DO	7.985

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-6 Concentraciones de variables de organismos para simular.

Biomasa	Unidad [mg/L]
PC	0.691
PN	0.104
PP	0.007
CH a	0.003
ZC	0.056
DC	0.000

Fuente: Elaboración propia.

El nitrato y el fosfato presentaron conductas similares entre sí, de donde, en la estación de verano ocurrió una disminución ocasionada por el consumo del fitoplancton hacia estos nutrientes. Con la reducción del fitoplancton, estos nutrientes comenzaron a acumularse a partir de la mineralización del detritus o material orgánico inerte. Es importante mencionar que, aunque el detritus debió transformarse en amonio antes de llegar a nitrato, la pendiente de crecimiento en las estaciones de otoño e invierno, fueron semejantes, lo que permitió notar la velocidad en que ocurrió la nitrificación. Una vez que se incrementó el fitoplancton, el nitrato y fosfato se redujo abruptamente, debido a su consumo. Este comportamiento se asemejó al descrito por Prado & Sievers (1987), en la bahía de Quintero, con una reducción de nutrientes en primavera por el incremento de fitoplancton durante un evento de surgencia.

El oxígeno disuelto se incrementó durante los incrementos de fitoplancton (verano y primavera), concordante con lo visto en Prado & Sievers (1987). Esta relación respondió a la capacidad de producir oxígeno del fitoplancton. En las estaciones de otoño e invierno el oxígeno disuelto se incrementó de forma leve, pero a causa de la reducción de organismos y procesos consumidores de oxígeno.

La variable detritus presentó incrementos de biomasa durante las estaciones de verano y primavera asociadas a los incrementos de fitoplancton y zooplancton. En las estaciones de otoño e invierno se demostró una reducción ocasionada por la disminución del material orgánico y la mineralización del detritus.

Comportamiento base en la simulación ecológica

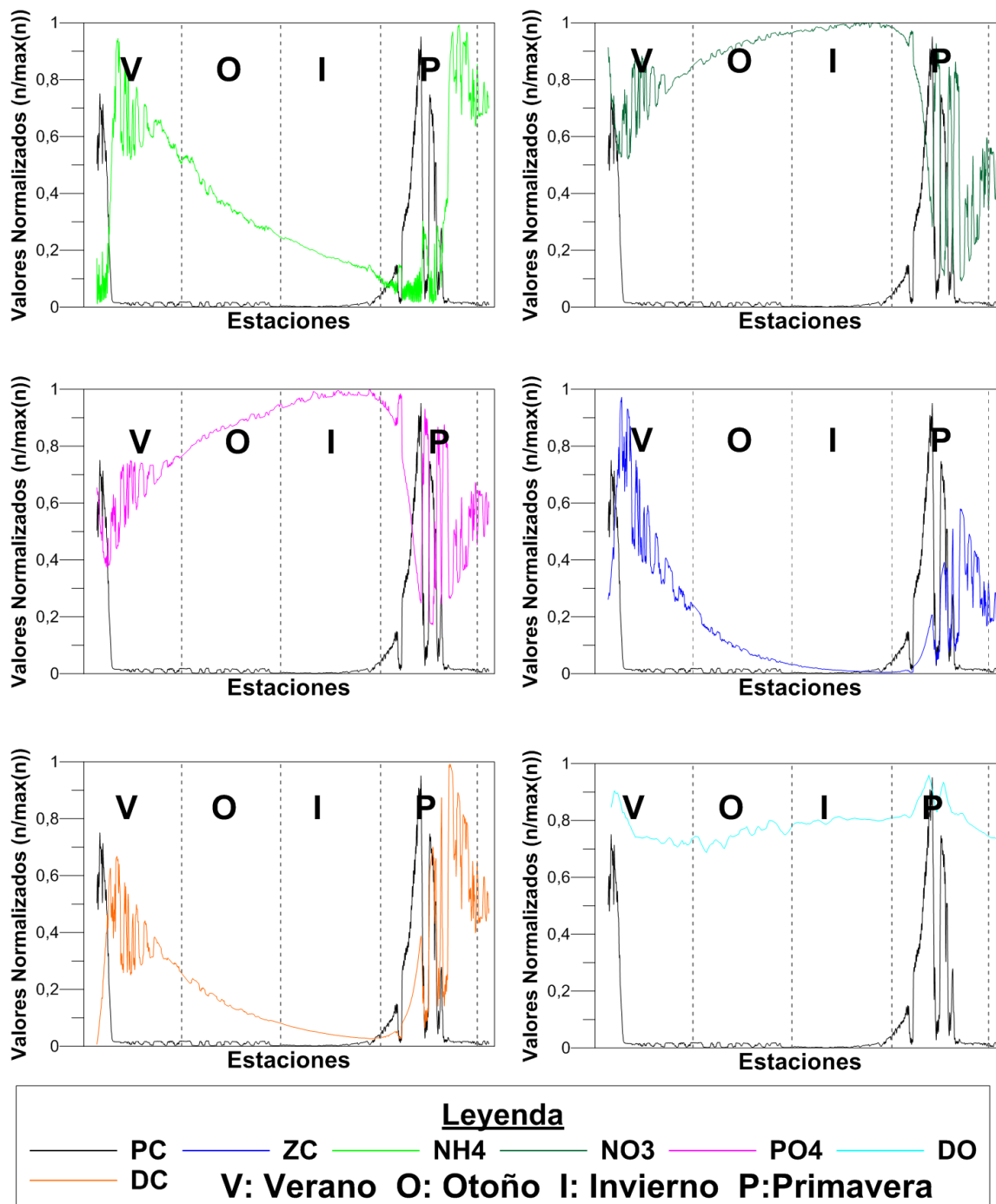


Figura 8-9 Comportamiento base de la simulación ecológica.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis sobre la variabilidad vertical de los nutrientes realizado en el anexo 13.5.6, los nutrientes nitrato y fosfato presentaron mayores valores en el fondo y menores en la superficie, lo que concordó con la bibliografía consultada (Prado & Sievers, 1987; Sievers & Vega, 2000; Silva & Valdenegro, 2003; Santander, Herrera, & Merino, 2003). Esto se asoció a la mayor producción (relacionado con la alimentación) del fitoplancton en la superficie donde recibió una mayor cantidad de radiación solar. Asimismo, debido a la capacidad productiva de oxígeno disuelto por el fitoplancton, se registraron mayores concentraciones en la superficie, coincidente con la bibliografía recolectada (Prado & Sievers, 1987; Sievers & Vega, 2000; Silva & Valdenegro, 2003; Santander *et al.*, 2003). En el amonio se encontraron mayores valores en la capa intermedia, lo que pudo deberse a las variables relacionadas, el nitrato y detritus cuyas distribuciones fueron descendente y ascendente, respectivamente.

El fitoplancton simulado durante un año presentó un comportamiento similar al esquema simplificado del ciclo anual del fitoplancton propuesto en Avaria *et al.* (1988) (Figura 8-10), ya que la simulación logró representar las concentraciones más importantes durante las estaciones de verano y primavera, el incremento durante la estación de primavera y la ocurrencia de las menores concentraciones durante la estación de invierno, aunque la duración de las concentraciones altas de fitoplancton fueron menores.

El comportamiento señalado en la Figura 8-10 representó la ocurrencia de un fenómeno de surgencia, ocasionado por aumentos en la magnitud del viento desde la dirección SW (Avaria *et al.*, 1988), lo que provocó una inestabilidad en la columna ascendiendo los nutrientes (Avaria S. P., 1975) y dispersión de la nubosidad que elevó la radiación solar, fomentando la producción primaria (Avaria S. P., 1975). Como se mencionó en el anexo 13.5.6, la simulación realizada presentó incrementos en los nutrientes (nitrato y fosfato), antes del incremento de la concentración de fitoplancton, además las forzantes meteorológicas fueron configuradas con incrementos de la magnitud del viento y de radiación solar durante los comienzos de la primavera, lo cual permitió asociar la simulación del incremento del fitoplancton, durante la estación de primavera, con un evento de surgencia.

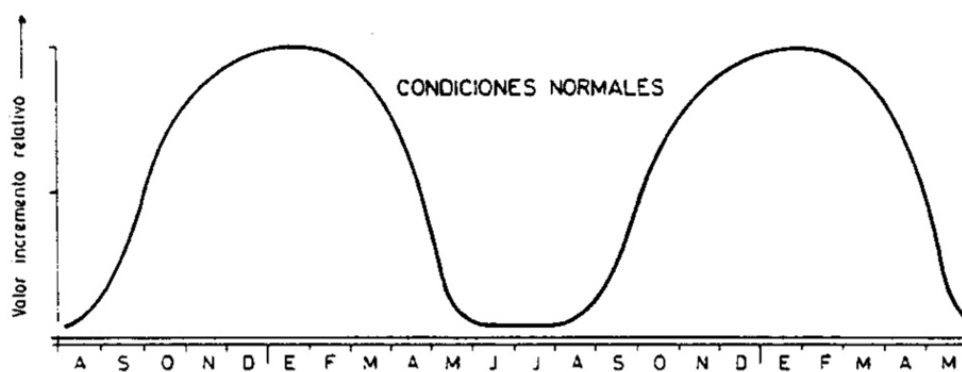


Figura 8-10 Esquema teórico del ciclo anual del fitoplancton en la costa de Valparaíso.

Fuente: (Avaria, Muñoz, & Braunn, 1988).

El fitoplancton (anexo 13.5.6) simulado se concentró principalmente en la superficie, disminuyendo con la profundidad, de igual forma que la bibliografía consultada (Avaria S.

P., 1975; Avaria & Muñoz, 1982; Alvial & Avaria, 1982), esto es debido a la necesidad del sol para la fotosíntesis.

La distribución horizontal del fitoplancton simulado (anexo 13.5.6) se concentró principalmente en la península Los Molles y entre la punta ventanilla y la punta Horcón, locaciones donde la componente vertical de la corriente adquirió grandes magnitudes, permitiendo el movimiento de los nutrientes en la columna de agua. En los sectores mencionados se ubican los AMERBs Noroeste península Los Molles, El embarcadero, El Papagayo y Ventana (Figura 4-3), donde debería ocurrir una alta actividad de material orgánico. La concentración de nutrientes en la península Los Molles concordó con lo mencionado en IFOP (2016), donde se estableció el sector oeste de la península como un sistema de surgencia. Las características anteriores, junto a las variables nutrientes, fitoplancton y las condiciones meteorológicas, permitieron suponer que se logró representar un evento de surgencia, al menos en sus consecuencias, como se detalló con mayor detenimiento en el anexo 13.5.6. Se debe mencionar que, para la certeza de una simulación fidedigna de la surgencia costera se requiere de un estudio más profundo, lo cual se aleja de los objetivos de esta memoria.

La variable zooplancton incrementó su concentración durante la estación de verano, debido al agresivo pastoreo realizado sobre el fitoplancton, hasta que éste último alcanzó la concentración mínima que, por configuración del modelo, impidió el pastoreo. Como el zooplancton era incapaz de alimentarse, se redujo progresivamente hasta la estación de primavera, cuando el fitoplancton incrementó su concentración, gracias a la reducción del zooplancton y buenas condiciones productivas en el ambiente, lo que permitió el reinicio del proceso pastoreo. La estación de primavera culminó con el fitoplancton en su concentración mínima, tras haber sido devorado por el zooplancton, el cual comenzó a reducirse por inanición, nuevamente. Como se explicó con mayor detalle en el anexo 13.5.6, la relación desfasada y oscilatoria entre el fitoplancton y zooplancton correspondió a una relación simplificada presa-depredador semejante al modelo de Lotka-Volterra (Asencio, 2017) que se esquematizó en la Figura 8-11.

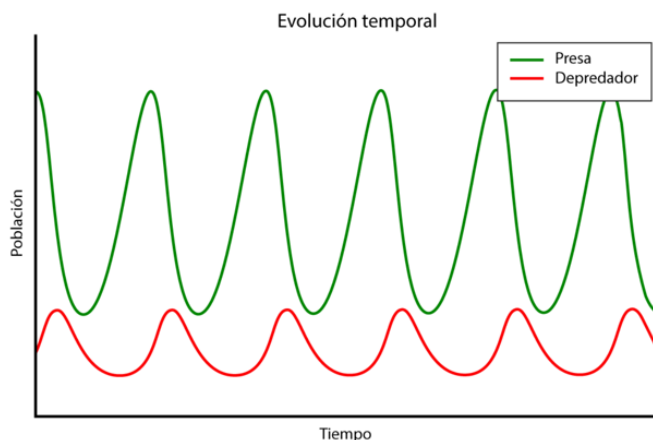


Figura 8-11 Esquema resumen del modelo depredador-presa Lotka-Volterra.

Fuente: (Asencio, 2017).

La distribución vertical del zooplancton presentó mayores magnitudes en la superficie, reduciéndose hacia el fondo, debido al seguimiento por el fitoplancton, aunque el

zooplancton alcanzó concentraciones relevantes a mayores profundidades que el fitoplancton (anexo 13.5.6). Las concentraciones del zooplancton se enfocaron en locaciones del dominio similares que el fitoplancton, y al igual que éste último, en el norte de la bahía se generó una reducción de la concentración ocasionada por las elevadas temperaturas del sector, debido a las causas detalladas en el capítulo 10.2.1.

Según la bibliografía consultada, la simulación fue capaz de representar varios aspectos del comportamiento general de las variables analizadas, permitiendo verificar la correcta simulación del ambiente ecológico en la bahía. Por otro lado, la simulación numérica presentó algunas debilidades en su representación, la más importante identificada correspondió al empleo de las especies fitoplancton y zooplancton como taxa únicas con características y tolerancias iguales para cada especie. Esta debilidad en la simulación provocó el abrupto pastoreo del zooplancton que redujo la concentración del fitoplancton a su valor mínimo y, en consecuencia, la concentración de zooplancton disminuyó por inanición. Como los organismos empleados en el modelo fueron transportados por la hidrodinámica, el fitoplancton no pudo escapar ni defenderse de la depredación.

El zooplancton simulado se asoció con la taxa de copépodos o microzooplánctones (DHI, 2017(c)), los cuales presentan una dieta, principalmente, herbívora (fitoplancton), aunque, en el ambiente marino, el zooplancton puede presentar variaciones en su dieta según las condiciones que se someta. En las estaciones de verano y primavera debido a la abundancia de las diatomeas, los copépodos muestran exclusividad por esta taxa y en las estaciones de otoño e invierno se reducen las diatomeas y, en algunos casos, cambian su dieta por la taxa predominante, dinoflagelados (Vargas, Escribano, & Poulet, 2006; Vargas, Martínez, Escribano, & Lagos, 2010). Junto con lo anterior, en ambientes con baja actividad primaria, el zooplancton se vuelve omnívoro alimentándose de otros copépodos, para sobrevivir (Riley & Chester, 1989; Valdés, Escribano, & Vergara, 2017).

Según lo mencionado anteriormente, en algunas ocasiones cambia la taxa predominante del fitoplancton, lo que permite la permanencia de la producción primaria. Este cambio puede deberse según las condiciones ambientales, bajo el fenómeno denominado sucesión de especies, que permite el predominio de la especie que pueda adaptarse a las características del medio (Avaria S. , 1971; Avaria & Orellana, 1975; Margalef, 1978; Avaria & Muñoz, 1982; Santander *et al.*, 2003). La surgencia costera es uno de los fenómenos que puede provocar cambios en la taxa predominante, permitiendo la abundancia de las diatomeas (Avaria & Orellana, 1975; Margalef, 1978; Santander *et al.*, 2003). El fitoplancton modelado en este estudio podría interpretarse como la taxa de diatomeas, pues el incremento de esta variable pudo asociarse a la representación de un evento de surgencia y, además, al corresponder a la presa directa del zooplancton simulado, el cual representó la taxa copépodos.

En conclusión, una representación fidedigna del ambiente marino es compleja de simular por la gran cantidad de procesos que relaciona a los organismos y nutrientes, cuya resolución requeriría un enorme esfuerzo computacional siendo inviable realizarla. Por ello, los resultados conseguidos mediante modelos con especies únicas (de fitoplancton y zooplancton) se aproximaron satisfactoriamente al comportamiento biológico descrito en la bibliografía consultada, verificando la calibración conceptual del modelo. Junto con esto se debe recalcar que, el objetivo de esta simulación fue la obtención de un ambiente marino representativo que responda ante las alteraciones provocadas por las características de los distintos efluentes en la bahía, siendo innecesario un modelo que represente la totalidad de especies en la bahía.

9 EXPLORACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

En este capítulo fueron presentados los resultados de las evaluaciones aplicadas en las simulaciones de los distintos casos de estudios diseñados para el cumplimiento de los objetivos de esta memoria. Como fue mencionado en la metodología, las evaluaciones fueron divididas según las variables analizadas, temperatura, salinidad, calidad de agua, organismos; esta última analizada en los impactos causados por las descargas y captaciones. Finalmente, se aplicó la metodología de evaluación ambiental sobre los impactos térmicos, en los organismos y los efectos de las captaciones, con la finalidad de cuantificar el impacto producido.

9.1 EVALUACIÓN DE TEMPERATURA Y SALINIDAD

9.1.1 DESCARGA TÉRMICA

La evaluación del impacto térmico consistió en la comparación de la superficie de la bahía (Figura 6-15) contra la superficie de las plumas térmicas, delimitadas por las isotermas que representan los diferenciales térmicos que fueron asociadas a la ocurrencia del fenómeno del Niño (diferencial de 0.5 [°C]), a un evento extremo (diferencial térmico de 2[°C]) y el mayor evento del fenómeno del Niño registrado (diferencial térmico de 2.6 [°C]).

En la Tabla 9-1 se resumieron los resultados de los coeficientes de las plumas térmicas con diferenciales de 0.5, 2 y 2.6 [°C] en los distintos casos de estudio simulados. Estos resultados fueron esquematizados desde la Figura 9-1 hasta la Figura 9-4, donde se presentaron las plumas térmicas medias, según lo establecido en la metodología. Se debe mencionar que, para facilitar la identificación de la pluma térmica se esquematizaron los diferenciales térmicos desde los 0.1 [°C] hasta los 14.9 [°C].

En la Figura 9-1 se esquematizaron los diferenciales de temperatura del caso SA respecto al caso SN. En las ilustraciones señaladas se presentaron diferenciales desde 0.1 [°C] en la mayor parte de la bahía durante toda la simulación, concentrándose los mayores diferenciales en el norte de la bahía. La isoterma de 0.5 [°C] se extendió desde el norte de la bahía hasta las cercanías del muelle de la empresa GNL Quintero durante toda la simulación y en toda la columna de agua. A lo largo de la simulación fue posible observar una tendencia en las capas superior e intermedia, de la pluma térmica desplazándose hacia la dirección NO, de la bahía. Debido a la posición de las descargas en el fondo marino, las ilustraciones en la capa de fondo registraron menores superficies, pero con mayores diferenciales térmicos, en comparación a las capas superficiales que, debido a la dispersión a través de la columna de agua, las temperaturas disminuyeron incrementándose las superficies de las plumas térmicas.

En la Tabla 9-1 se cuantificaron las plumas térmicas provocadas por el caso SA. La pluma térmica con un diferencial de 0.5 [°C] cubrió un máximo de 22.13 [%], de la superficie en la bahía, durante la primavera y un mínimo del 4.71 [%], durante el verano en la capa de fondo. El promedio entre capas en la media anual, mostró una superficie del 13.06 [%] de la bahía. La isoterma de 2 [°C] alcanzó un máximo de 3.59 [%] de la bahía, en la capa superficial durante la estación de primavera, y una superficie mínima de 1.52 [%] en la capa de fondo de la estación de verano, mientras que, el promedio anual en el promedio de capas

registrado fue de 2.13 [%]. Las diferenciales térmicas sobre los 2.6 [°C] produjeron una superficie máxima de 2.23 [%], en la capa superficial de la estación de primavera, con una superficie mínima de 1.06 [%], en la capa de fondo de la estación de verano y el promedio anual entre las capas, mostró una superficie de 1.47 [%].

En la Figura 9-2 y Figura 9-3 se ilustraron las correspondientes simulaciones con las descargas Nueva Ventanas y Campiche, denominadas en esta memoria como casos SN+D3 y SN+D4. Debido a la similitud en la configuración de las descargas, las plumas describieron comportamientos semejantes. En ambos casos los diferenciales térmicos se concentraron en el norte la bahía, extendiéndose hacia el sur. La magnitud de 0.1 [°C] alcanzó hasta el muelle GNL y el diferencial térmico de 0.5 [°C] se extendió hasta las cercanías de las instalaciones Codelco Ventanas. Por el norte de la bahía, se mantuvo la tendencia durante toda la simulación del desplazamiento de las plumas hacia la dirección NO.

La Tabla 9-1 presentó las máximas superficies correspondientes a 4.86 [%] y 4.05 [%] de la superficie de la bahía con un fenómeno del Niño (> 0.5 [°C]), durante la estación de primavera, en los casos SN+D3 y SN+D4, respectivamente. Las mínimas superficies, abarcaron un 2.53 [%] y 2.03 [%], en los casos SN+D3 y SN+D4, respectivamente, durante la estación de invierno. En cambio, el promedio anual entre capas, cubrieron una superficie de 3.59 [%] y 2.94 [%], en los casos correspondientes a SN+D3 y SN+D4. Las máximas superficies, con un diferencial térmico sobre los 2 [°C], ocurrieron en la capa intermedia, en la estación de primavera, con 0.56 [%] y 0.35 [%], y las mínimas superficies, se identificaron en la capa superficial en la estación de verano con 0.25 [%] y 0.06 [%], en los casos SN+D3 y SN+D4, respectivamente. La media anual en el promedio de capas produjo superficies de 0.41 [%] en el caso SN+D3 y 0.26 [%] en el caso SN+D4. Los diferenciales térmicos sobre los 2.6 [°C], no ocurrieron en todas las capas. En el promedio anual, entre las capas verticales, presentaron superficies de 0.15 [%] y 0.10 [%], en los casos SN+D3 y SN+D4, respectivamente.

En la Figura 9-4 fueron graficados los diferenciales térmicos del caso SD90_T. En esta simulación la diferencial térmica de 0.1 [°C] se ilustró en casi la totalidad de la bahía, logrando salir de ésta por el norte, hacia la punta Horcón. La isoterma de 0.5 [°C] se localizó desde el norte de la bahía, hasta el sur, alcanzando la zona militar de Quintero, por otro lado, fue notoria la tendencia hacia la dirección NO de la isoterma. En las cercanías de la descarga GNL Quintero, se produjeron isotermas hasta los 1.5 [°C].

En las estimaciones de la Tabla 9-1 se obtuvo para el diferencial de 0.5 [°C] una superficie de hasta 43.85 [%] de la bahía, en la capa superficial durante la estación de invierno, mientras que, la mínima superficie, cubrió una superficie de 14.08 [%], en la capa de fondo durante la estación de verano. La media anual sobre el promedio entre capas, presentó una superficie de 30.08 [%]. La pluma por sobre los 2 [°C], cubrieron las mayores superficies, en la capa superficial de la estación de invierno con 7.14 [%] y las mínimas, en la capa de fondo en la estación de verano, con 2.22 [%], mientras que, el promedio anual, sobre la media de capas verticales, registraron una superficie de 3.5 [%]. Las isotermas del diferencial de 2.6 [°C], alcanzaron una superficie máxima de 4.96 [%] en la capa superficial en la estación de primavera y la mínima superficie ocurrió en la capa de fondo de la estación de verano, con una superficie del 1.77 [%] y el promedio anual entre la media de las capas verticales, cubrió una superficie del 2.68 [%] de la superficie de la bahía.

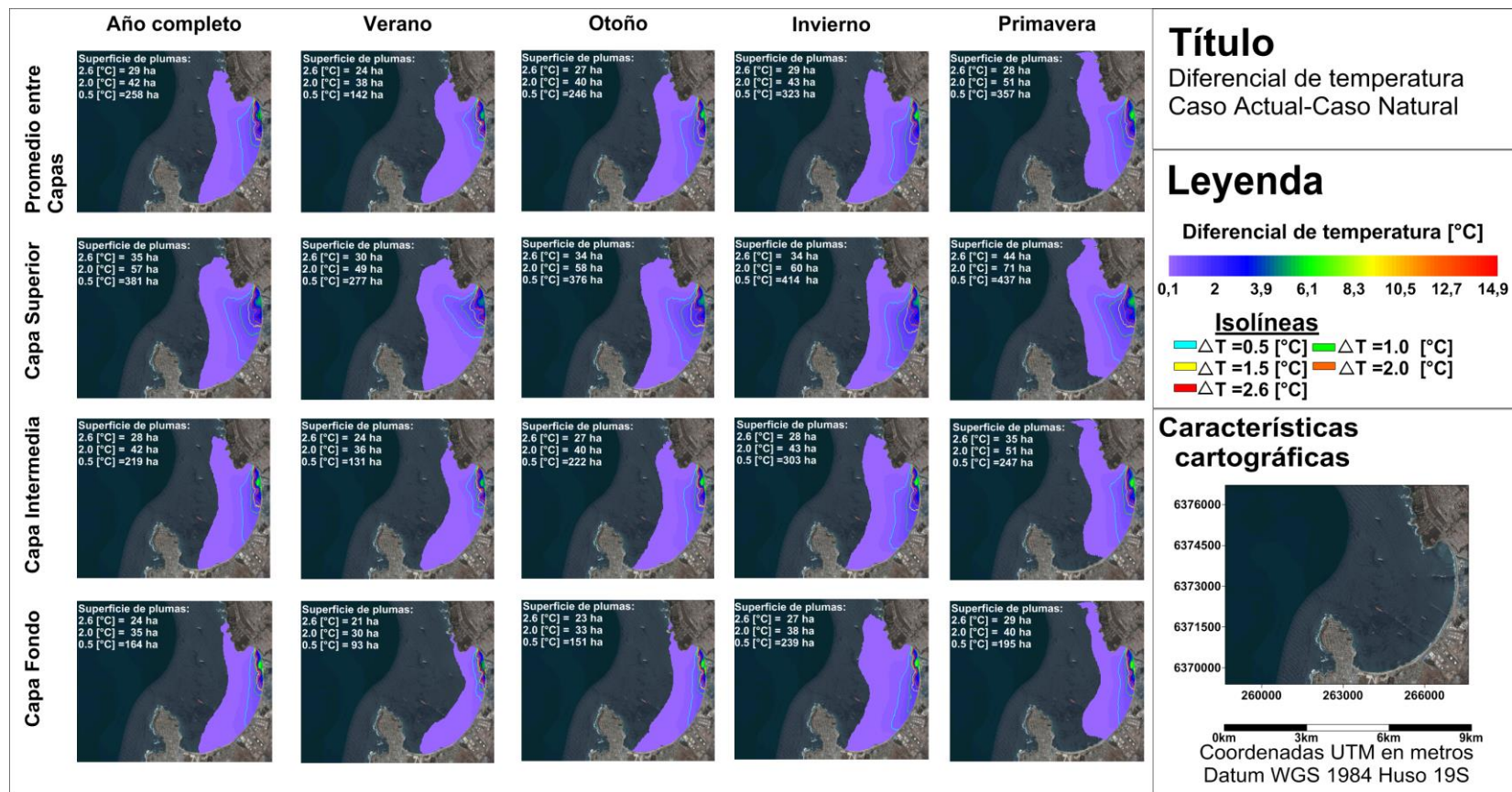


Figura 9-1 Diferencial de temperatura entre el caso SA y caso SN.
Fuente: Elaboración propia.

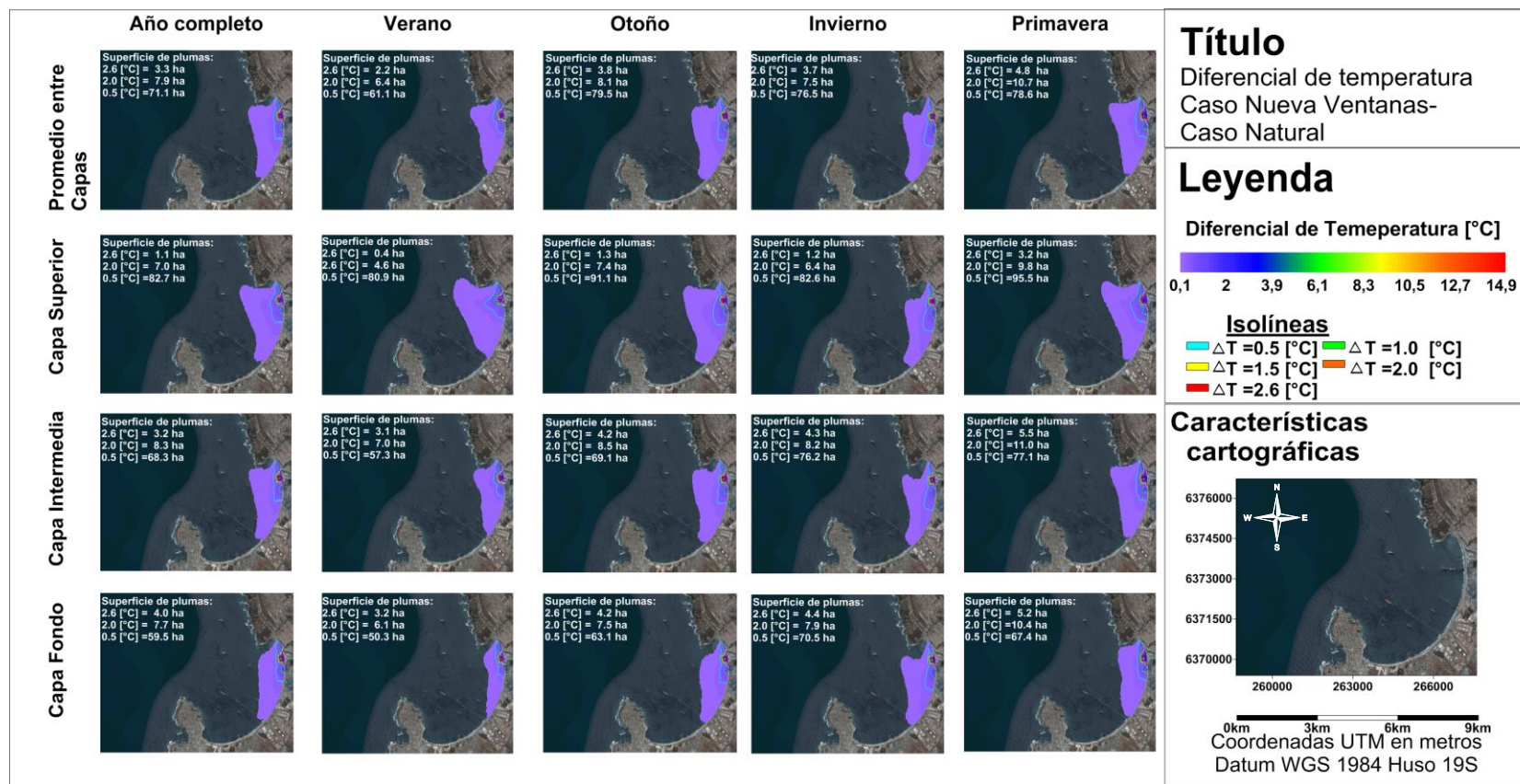


Figura 9-2 Diferencial de temperatura entre el caso SN+D3 y caso SN.
Fuente: Elaboración propia.

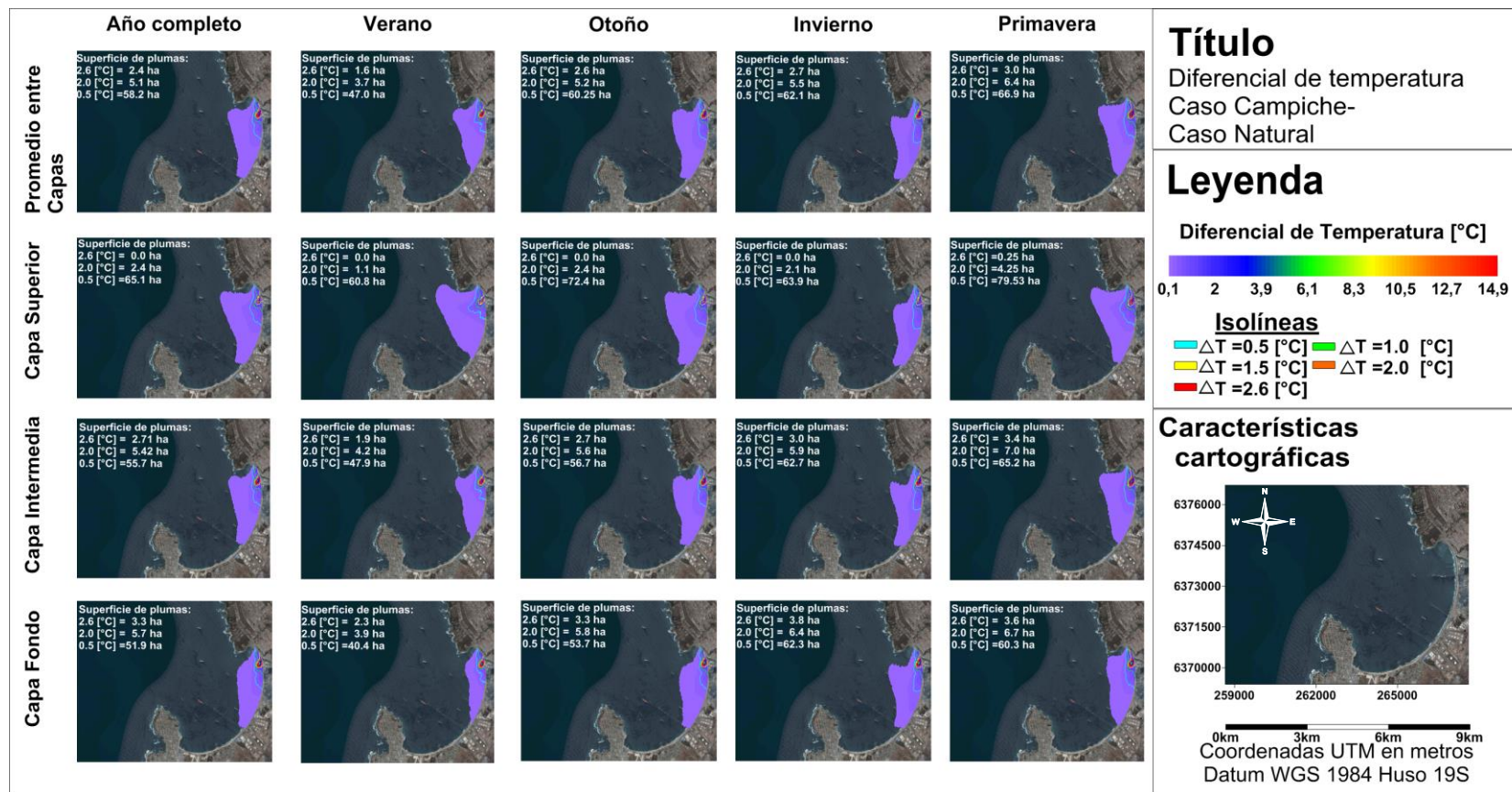


Figura 9-3 Diferencial de temperatura entre el caso SN+D4 y caso SN.
Fuente: Elaboración propia.

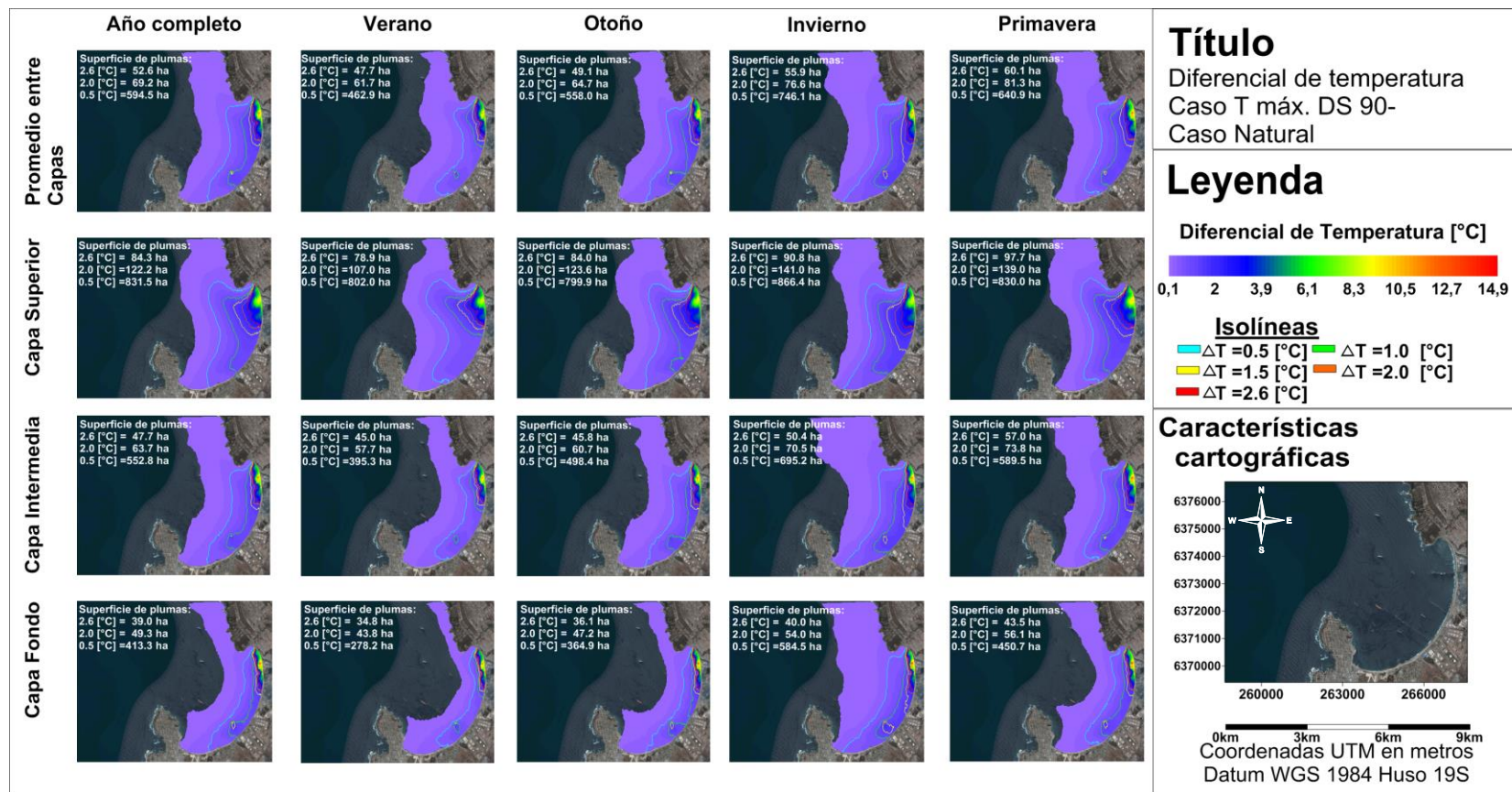


Figura 9-4 Diferencial de temperatura entre el caso SD90_T y caso SN.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-1 Resumen de superficie de plumas con respecto a bahía.

		T= 0.5 [°C]					T= 2 [°C]					T= 2.6 [°C]				
		AC	V	O	I	P	AC	V	O	I	P	AC	V	O	I	P
SA-SN	Promedio entre capas	13.06%	7.19%	12.46%	16.35%	13.97%	2.13%	1.92%	2.03%	2.18%	2.58%	1.47%	1.22%	1.37%	1.47%	1.82%
	Capa Superior	19.29%	14.03%	19.04%	20.96%	22.13%	2.89%	2.48%	2.94%	3.04%	3.59%	1.77%	1.52%	1.67%	1.72%	2.23%
	Capa Intermedia	11.09%	6.63%	11.24%	15.34%	12.51%	2.13%	1.82%	2.03%	2.18%	2.58%	1.42%	1.22%	1.37%	1.42%	1.77%
	Capa de Fondo	8.30%	4.71%	7.65%	12.10%	9.87%	1.77%	1.52%	1.67%	1.92%	2.03%	1.22%	1.06%	1.16%	1.37%	1.47%
SN+D3-SN	Promedio entre capas	3.59%	3.09%	4.00%	3.90%	4.00%	0.41%	0.30%	0.41%	0.35%	0.56%	0.15%	0.10%	0.20%	0.20%	0.25%
	Capa Superior	4.20%	4.10%	4.61%	4.20%	4.86%	0.35%	0.25%	0.35%	0.30%	0.51%	0.05%	0.00%	0.05%	0.05%	0.15%
	Capa Intermedia	3.44%	2.89%	3.49%	3.85%	3.90%	0.41%	0.35%	0.41%	0.41%	0.56%	0.15%	0.15%	0.20%	0.20%	0.25%
	Capa de Fondo	2.99%	2.53%	3.19%	3.54%	3.39%	0.41%	0.30%	0.41%	0.41%	0.51%	0.20%	0.15%	0.20%	0.20%	0.25%
SN+D4-SN	Promedio entre capas	2.94%	2.38%	3.04%	3.14%	3.39%	0.26%	0.19%	0.26%	0.28%	0.32%	0.10%	0.10%	0.15%	0.15%	0.15%
	Capa Superior	3.29%	3.09%	3.65%	3.24%	4.05%	0.12%	0.06%	0.12%	0.11%	0.22%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Capa Intermedia	2.84%	2.43%	2.89%	3.19%	3.29%	0.27%	0.21%	0.28%	0.30%	0.35%	0.15%	0.10%	0.15%	0.15%	0.15%
	Capa de Fondo	2.63%	2.03%	2.73%	3.14%	3.04%	0.29%	0.20%	0.29%	0.32%	0.34%	0.15%	0.10%	0.15%	0.20%	0.20%
SD90_T-SN	Promedio entre capas	30.08%	23.44%	28.25%	37.77%	32.46%	3.50%	3.12%	3.28%	3.88%	4.12%	2.68%	2.43%	2.48%	2.84%	3.04%
	Capa Superior	42.08%	40.61%	40.51%	43.85%	42.03%	6.19%	5.42%	6.26%	7.14%	7.04%	4.25%	4.00%	4.25%	4.61%	4.96%
	Capa Intermedia	28.00%	20.00%	25.22%	35.19%	29.87%	3.17%	2.92%	3.07%	3.57%	3.74%	2.43%	2.28%	2.33%	2.53%	2.89%
	Capa de Fondo	20.91%	14.08%	18.48%	29.62%	22.84%	2.50%	2.22%	2.39%	2.73%	2.84%	1.97%	1.77%	1.82%	2.03%	2.18%

Leyenda:

AC: año completo, V: Verano, O: Otoño, I= Invierno, P= Primavera

Nota: Las escalas de colores de las superficies se establecen según el caso de simulación (caso SA-SN, SN+D3-SN, SN+D4-SN y SD90_T-SN)

Fuente: Elaboración propia.

9.1.2 DESCARGA SALINA

Para la simulación de la salinidad descargada en la bahía de Quintero, se debió realizar supuestos por la ausencia de esta información. Como se vio en la metodología, ciertas descargas se consideraron con salinidad de 0 [PSU], mientras otras, se asumieron con la misma salinidad del medio natural. El resultado de estos supuestos, sobre el caso SA, produjo diferenciales de salinidad despreciables, como se demostró en el anexo 13.6.1.

En el caso SA+D13 ocurrieron variaciones importantes de salinidad, al incluirse la descarga proveniente de una desalinizadora (Proyecto Aconcagua). En la Figura 9-5 se esquematizaron los diferenciales de salinidad del caso SA+D13, con respecto al caso SA como una condición base. En todas las capas se muestran diferenciales salinos por sobre el 0.1 [%], con respecto a la condición base. En las plumas salinas descritas fue notoria la tendencia de un desplazamiento hacia la dirección NO, saliendo de la bahía en las cercanías de la punta Ventanilla. Durante la simulación en la capa intermedia y, además, en la capa superficial, en las estaciones de verano y otoño, se presentaron diferenciales salinas superiores al 0.2 [%]. En la capa de fondo, durante toda la simulación se produjeron diferenciales salinos por sobre el 5 [%], aunque en una superficie muy acotada.

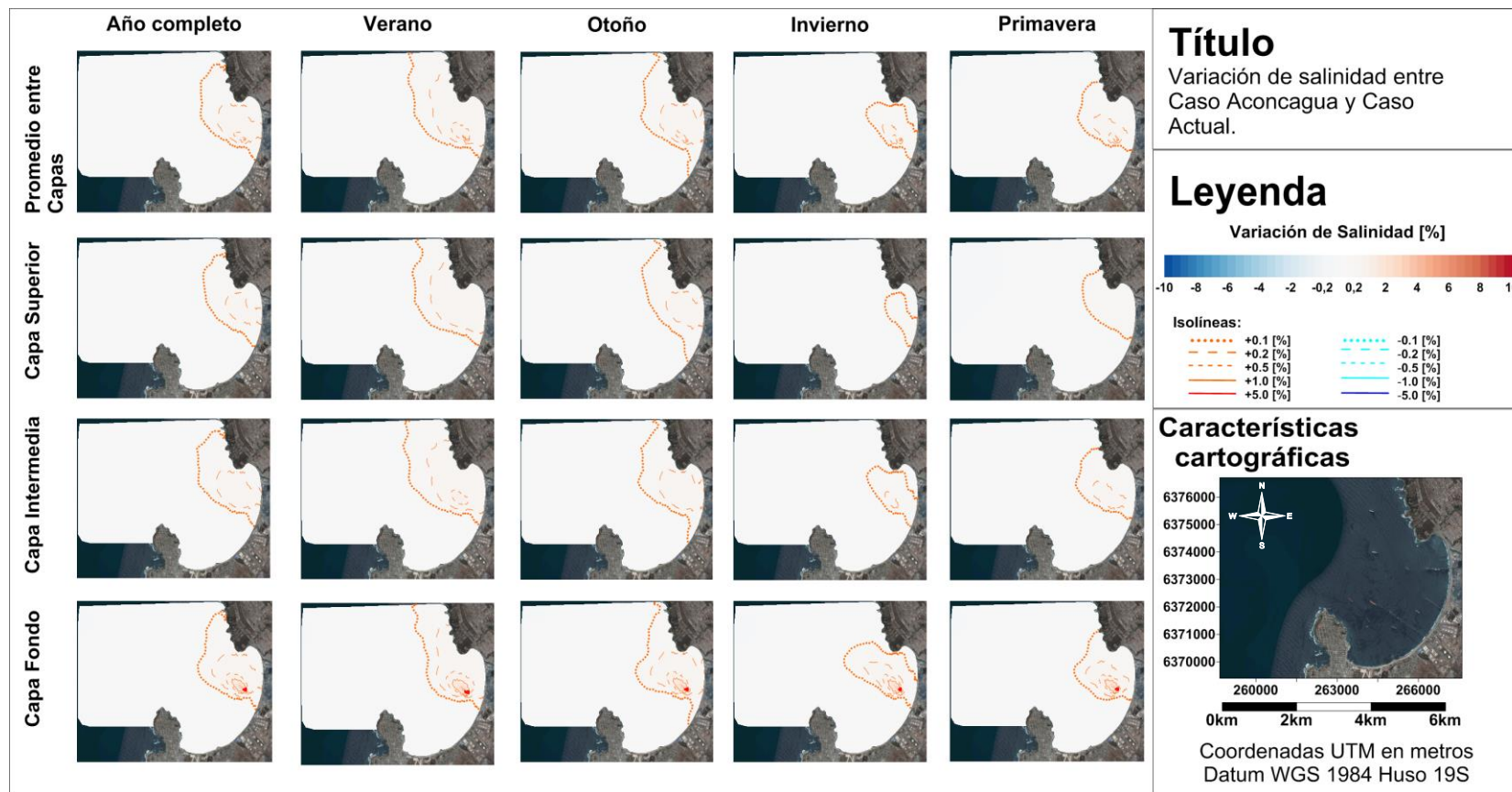


Figura 9-5 Diferencial de salinidad entre el caso SA+D13 y el caso SA.
Fuente: Elaboración propia.

9.2 EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

Como se mencionó en la metodología, esta evaluación se realizó mediante el coeficiente TRIX, que utiliza variables asociadas a organismos y nutrientes para cuantificar el estado de la calidad del agua. El objetivo del uso de este coeficiente fue cuantificar su variación, desde los valores estimados en el caso SN, contra cada caso de explotación. Este análisis se realizó sobre los puntos distribuidos en la Figura 6-13, los cuales describieron un comportamiento semejante entre los puntos y en las distintas simulaciones, pero con diferentes magnitudes, como se presentó en el anexo 13.6.2. Para facilitar el análisis se estableció el comportamiento general del coeficiente TRIX durante la simulación con la Figura 9-6, el cual consistió en incrementos en el inicio y final de la estación verano, al igual que, el final de la estación de invierno y comienzo de la estación de primavera. Las reducciones del coeficiente TRIX se produjeron a mediados de la estación de verano y primavera, a parte del final de la estación de otoño. Es importante notar que los mayores incrementos en las estaciones de verano y primavera concordaron con los mayores valores de fitoplancton, variable que se encuentra asociada a la magnitud de clorofila a. Los incrementos durante el final de verano y primavera se debieron al aumento de los nutrientes inorgánicos, mientras que, la reducción del coeficiente TRIX desde mediados de otoño hasta el invierno fue causado por la reducción de la desviación de la saturación de oxígeno. Se debe recalcar que según se señaló en la Figura 9-6, los incrementos del coeficiente TRIX, a partir de los valores del caso SN, se consideraron como un acercamiento al estado eutrófico, mientras que, las reducciones implicaron una tendencia hacia el estado oligotrófico.



Figura 9-6 Esquema del comportamiento general coeficiente TRIX.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9-2 se presentaron la media en el tiempo del diferencial porcentual de los coeficientes TRIX, con respecto a los valores del caso SN, por otro lado, en la Tabla 9-3 se señaló la relación media, de las distintas variables que conforman el coeficiente TRIX, en los casos simulados con respecto al caso SN, con el fin de esquematizar el aporte de cada variable en el coeficiente TRIX, en cada punto.

El caso SA, con las descargas actuales, presentó en la Tabla 9-2 un predominio de valores negativos, implicando una tendencia hacia el estado oligotrófico, con respecto al caso SN, con excepción del punto 4 (punto cercano a la caleta El Embarcadero), en la capa de fondo que obtuvo un pequeño valor positivo. En la media de los puntos se presentaron variaciones de -2.7 [%], -2.03 [%] y -2.33 [%], en la capa superficial, intermedia y fondo, respectivamente. Las mayores magnitudes ocurrieron en el punto 2 (punto cercano al muelle Oxiquim) con -6.50 [%], en la capa superficial, en el punto 1 (punto más norteño cercano a la empresa Aes Gener) con -4.97 [%] y -6.09 [%], en las capas intermedia y fondo, respectivamente. En cambio, las menores magnitudes se registraron en el punto 8 (punto más cercano a la península Los Molles) con 0.73 [%], en la capa superficial, en el punto 7 (al norte del punto 8, en la entrada de la bahía) con -0.37 [%], en la capa intermedia, y en el punto 3 (punto cercano al muelle de la empresa GNL Quintero) con -0.16 [%], en la capa de fondo.

Como se estableció en la Tabla 9-3, en el caso SA, la variable con mayor variación fue la clorofila a que se redujo, en una mayor magnitud en los puntos cercanos al norte de la bahía, comportamiento presentado en las capas analizadas. La variable saturación de oxígeno mostró ligeros incrementos, también en los puntos cercanos al norte de la bahía. Según se estableció en la Tabla 9-2, los casos con descargas individuales, SN+D3 y SN+D4, en su mayor parte, redujeron el valor de los coeficientes TRIX, acercándose al estado oligotrófico, como en el caso SA, aunque con menor magnitud. En el promedio entre puntos, se registraron valores de -0.85 [%], -0.77 [%] y -1.23 [%] en las correspondientes capas superficial, intermedia y fondo, de la simulación del caso SN+D3, mientras que, en el caso SN+D4, se tuvieron valores de -0.75 [%], -0.72 [%] y -1.17 [%], en las capas superficial, intermedia y fondo, respectivamente. Las mayores variaciones coincidieron en los puntos analizados del caso SN+D3 y SN+D4 (en adelante se presentaron los valores en este orden), estos ocurrieron en el punto 1 de la capa superior, con los valores -1.83 [%] y -1.66 [%], en el punto 1 de la capa intermedia, con los valores -1.71 [%] y 1.60 [%], y en el punto 2 de la capa de fondo, con los valores -2.56 [%] y -2.35 [%]. Las menores reducciones, también coincidieron entre los casos SN+D3 y SN+D4, se produjeron en el punto 8 de la capa superficial, -0.37 [%], en ambos casos, en el punto 4 de la capa intermedia, con los valores -0.25 [%] y -0.23 [%], y en el punto 4 de la capa de fondo, con los valores -0.22 [%] y -0.23 [%]. Se debe notar la clara reducción del coeficiente TRIX hacia la capa de fondo, en estos casos.

En la Tabla 9-3 se presentó, de forma semejante al caso SA, reducciones de la variable clorofila a en los puntos norteño e incrementos de la variable desviación de la saturación de oxígeno, aunque, en ambos con una menor magnitud que el caso SA.

En el caso SD90_T el coeficiente TRIX disminuyó en los puntos analizados (Tabla 9-2), con excepción del punto 4 en la capa de fondo. Los promedios entre los puntos alcanzaron valores de -4.78 [%], -3.70 [%] y -3.60 [%], en las capas superior, intermedia y fondo, respectivamente. Las mayores magnitudes se produjeron en el punto 2 de la capa superficial, con un valor de -10.09 [%], en el punto 1 de la capa intermedia, con un valor de 8.44 [%], y en el punto 1 de la capa de fondo con un valor de 9.80 [%]. Las menores variaciones se registraron en el punto 8 en las tres capas analizadas, en la capa superior con un valor de -1.54 [%], en la capa intermedia con un valor de -0.23 [%] y en la capa de fondo con un valor de 0.19 [%].

En el caso SD90_T, según se señaló en la Tabla 9-3, la clorofila a es la variable más alterada en toda la columna de agua, reduciéndose con respecto al caso SN, con mayores magnitudes en los puntos norteños de la bahía, aunque se registraron incrementos en el

sur de la bahía. La variable desviación de la saturación de oxígeno presentó distintos comportamientos en la columna de agua, incrementos en la capa superficial y en la capa intermedia y fondo se redujo su magnitud. Se debe mencionar que, los comportamientos de los casos SA y SD90_T presentaron semejanzas, aunque este último presentó mayores magnitudes.

En la Tabla 9-2 se estableció el caso SD90_P, a diferencia del caso SA, con un predominio en los incrementos en el coeficiente TRIX, lo que indicó un cambio de la calidad de agua hacia la eutrofización. En la media de los puntos analizados se encontraron valores de 23.24 [%], 22.07[%] y 19.15[%], correspondientes a las capas superficial, intermedia y fondo, respectivamente. Las mayores variaciones se produjeron en el punto 1 de la capa superior, con un valor de 28.34 [%], en el punto 3 de la capa intermedia, con un valor de 25.01 [%], y en el punto 3 de la capa de fondo con un valor de 23.41 [%]. Las menores variaciones se generaron en el punto 8 de la capa superior con un valor de 19.31 [%], en el punto 2 de la capa intermedia con un valor de 20.49 [%] y en el punto 2 de la capa de fondo con un valor de 16.36 [%].

En la Tabla 9-3, en el caso SD90_P, se presentaron tales magnitudes en los incrementos del fósforo, que impidió visualizar las variaciones de las otras variables. El incremento del fósforo total ocurrió de mayor forma en los puntos norteños en la capa superior, mientras los menores incrementos ocurrieron en la capa de fondo. Es posible notar que, los incrementos del fósforo total de los puntos 1 y 2 (ubicados al norte de la bahía) registraron las mayores magnitudes, a pesar de esto, el coeficiente TRIX aumentó de mayor forma en los puntos 3 y 4 (ubicados al sur de la bahía). Lo anterior ocurrió por las características del caso SD90_P, donde además de las descargas con altas concentraciones de fósforo, se tuvieron descargas con elevadas temperaturas, las cuales fueron presentadas en el caso SA, por ello, como se presentó anteriormente, los puntos 1 y 2 sufrieron una reducción importante de clorofila a que no pudo ser visualizado en la Tabla 9-3, pero que disminuyó de forma importante el incremento del coeficiente TRIX. Por otro lado, los puntos 3 y 4 experimentaron la menor reducción de clorofila a, como se presenció en el caso SA, lo que provocó un mayor incremento del coeficiente TRIX.

De forma similar al caso SD90_P, en el caso SD90_NTK (Tabla 9-2) se mostraron incrementos de los coeficientes TRIX, en todos los puntos, asociado a una tendencia a un estado eutrófico. En el promedio de los puntos se tuvieron incrementos de 9.08 [%], 9.98 [%] y 9.44 [%], correspondientes a las capas superior, intermedia y fondo. Las mayores variaciones ocurrieron en el punto 8 de la capa superior y la capa intermedia, con valores de 11.16 [%] y 11.71 [%], respectivamente, y en el punto 4 de la capa de fondo, con un valor de 12.31 [%]. Las menores fluctuaciones ocurrieron en el punto 1 de la capa superior y la capa intermedia, con valores de 6.08 [%] y 7.47 [%], respectivamente, y el punto 1 de la capa de fondo, con un valor de 5.98 [%]. Es notorio que, a diferencia de los otros casos, las mayores variaciones se produjeron en los puntos cercanos al sur de la bahía.

La Tabla 9-3 evidenció un comportamiento de las variables similares en las tres capas analizadas, donde la reducción de la variable clorofila a siguió siendo relevante en el norte de la bahía, mientras que, en la variable desviación de la saturación de oxígeno incrementó su magnitud en todos los puntos analizados como también el nitrógeno inorgánico.

En la Tabla 9-2 predominaron las magnitudes negativas en el caso SA+D13, aunque los valores fueron menores que el caso SA, suceso bastante importante, pues, como ha sido mencionado, el caso SA+D13 incluyó la configuración de descargas del caso SA junto a una descarga adicional. La media entre los puntos analizados presentó los valores de -1.38 [%], -0.88 [%] y -1.03 [%], correspondientes a la capa superficial, intermedia y fondo.

Las mayores variaciones ocurrieron en el punto 2 de la capa superficial, con un valor de - 4.75 [%], en el punto 1 de la capa intermedia y de la capa fondo, con valores de -2.79 [%] y 3.78 [%], respectivamente. Las menores variaciones ocurren en el punto 4 de la capa superficial y capa intermedia, con unos valores de -0.22 [%] y 0.02 [%] y en el punto 3, con un valor de 0.12 [%].

El caso SA+D13 demostró disminuciones de la variable clorofila a (Tabla 9-3), respecto al caso SN, en los puntos norteños, aunque en una magnitud bastante menor que el caso SA.

Tabla 9-2 Razón de variación de los coeficientes TRIX de las distintas simulaciones.

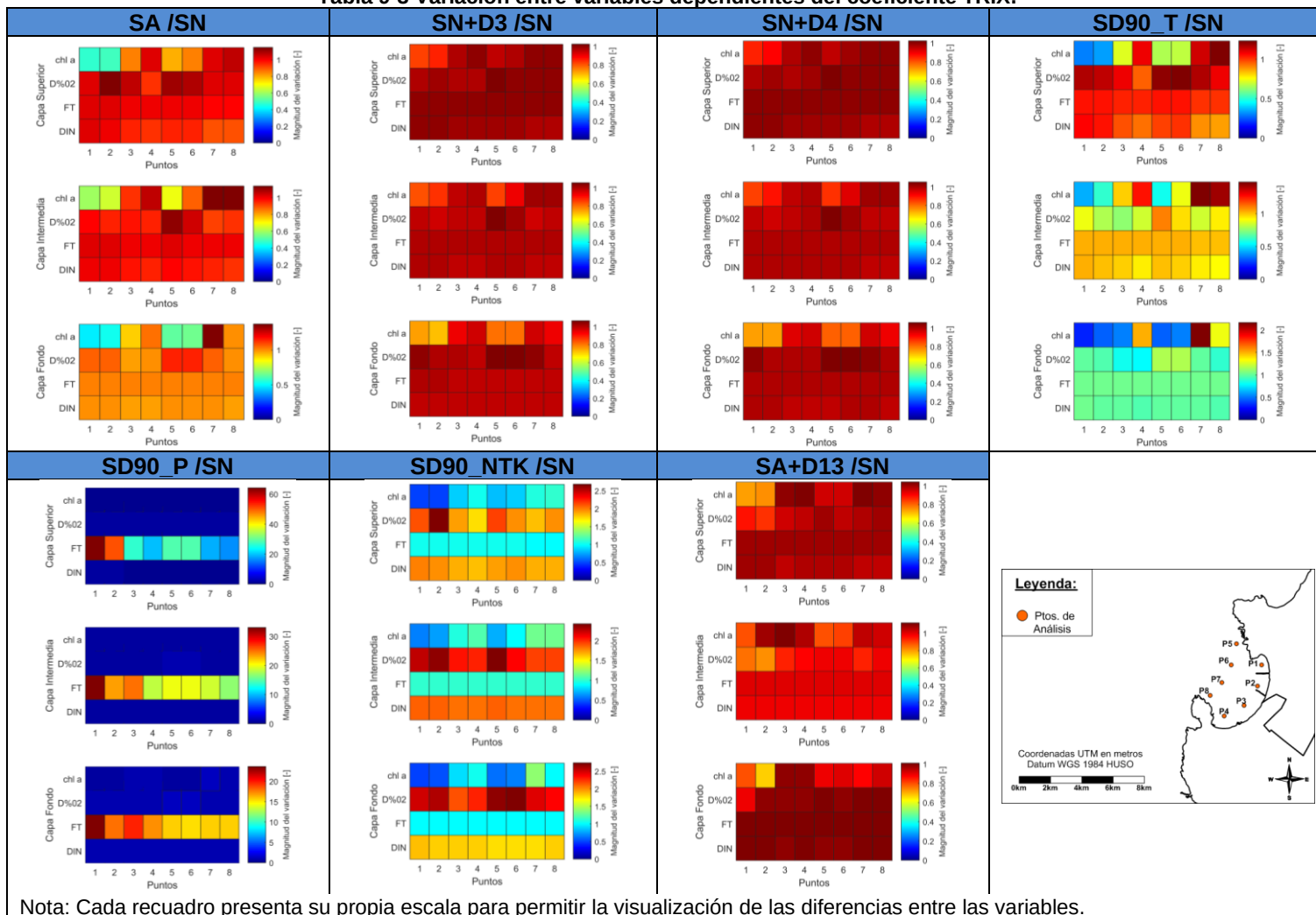
	Capa Superior								
Δ/SN [%]	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio
SN	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SA	-6.14%	-6.50%	-2.09%	-1.38%	-1.93%	-1.65%	-1.17%	-0.73%	-2.70%
SN+D3	-1.83%	-1.79%	-0.66%	-0.51%	-0.54%	-0.58%	-0.50%	-0.37%	-0.85%
SN+D4	-1.66%	-1.50%	-0.56%	-0.45%	-0.47%	-0.53%	-0.45%	-0.37%	-0.75%
SD90_T	-9.39%	-10.09%	-5.18%	-2.82%	-3.80%	-3.59%	-1.82%	-1.54%	-4.78%
SD90_P	28.34%	26.22%	22.72%	20.39%	24.15%	24.58%	20.24%	19.31%	23.24%
SD90_NTK	6.08%	7.45%	9.03%	9.76%	9.48%	9.40%	10.31%	11.16%	9.08%
SA+D13	-3.56%	-4.75%	-0.39%	-0.22%	-0.74%	-0.82%	-0.28%	-0.24%	-1.38%

	Capa Intermedia								
Δ/SN [%]	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio
SN	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SA	-4.97%	-4.61%	-1.42%	-0.62%	-2.68%	-1.05%	-0.37%	-0.55%	-2.03%
SN+D3	-1.71%	-1.68%	-0.43%	-0.25%	-1.07%	-0.48%	-0.26%	-0.28%	-0.77%
SN+D4	-1.60%	-1.53%	-0.40%	-0.23%	-0.99%	-0.43%	-0.26%	-0.28%	-0.72%
SD90_T	-8.44%	-7.45%	-4.14%	-1.86%	-4.46%	-2.44%	-0.59%	-0.23%	-3.70%
SD90_P	23.30%	20.49%	25.01%	20.90%	20.68%	22.50%	22.99%	20.72%	22.07%
SD90_NTK	7.47%	8.56%	10.49%	11.23%	8.85%	10.08%	11.49%	11.71%	9.98%
SA+D13	-2.79%	-1.76%	0.25%	0.02%	-1.41%	-1.01%	-0.23%	-0.14%	-0.88%

	Capa Fondo								
Δ/SN [%]	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio
SN	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SA	-6.09%	-5.00%	-0.16%	0.39%	-3.05%	-2.72%	-1.71%	-0.30%	-2.33%
SN+D3	-2.22%	-2.56%	-0.44%	-0.22%	-1.04%	-1.56%	-1.19%	-0.63%	-1.23%
SN+D4	-2.25%	-2.35%	-0.42%	-0.23%	-0.97%	-1.44%	-1.14%	-0.59%	-1.17%
SD90_T	-9.80%	-6.24%	-1.47%	0.80%	-5.31%	-4.53%	-2.47%	0.19%	-3.60%
SD90_P	19.20%	16.36%	23.41%	21.35%	17.29%	17.19%	18.42%	20.01%	19.15%
SD90_NTK	5.98%	7.33%	11.68%	12.31%	8.43%	8.49%	9.58%	11.72%	9.44%
SA+D13	-3.18%	-1.01%	0.12%	-0.22%	-0.75%	-1.16%	-1.27%	-0.77%	-1.03%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-3 Variación entre variables dependientes del coeficiente TRIX.



Nota: Cada recuadro presenta su propia escala para permitir la visualización de las diferencias entre las variables.

Fuente: Elaboración propia.

9.3 EVALUACIÓN DE ORGANISMOS

9.3.1 EVALUACIÓN DE IMPACTO SOBRE ORGANISMOS POR DESCARGAS

Como fue establecido en la metodología, los organismos simulados en los distintos casos de estudio fueron contrastados con el caso SN, es decir una simulación sin los efectos de las descargas ni captaciones, para identificar las alteraciones generadas por las características de las descargas en cada caso de estudio. Las variables analizadas fueron los organismos simulados, fitoplancton y zooplancton, junto a la suma de ambas concentraciones, que representa la totalidad de organismos vivos bajo el nombre de plancton y, en algunos casos, las producciones de fitoplancton y zooplancton, con la finalidad de visualizar la variación de la biomasa en los distintos casos según el tiempo y espacio.

Tabla 9-4 Razón de variación respecto de la simulación natural de las variables acumuladas.

Δ/SN [%]	Fitoplancton	Zooplancton	Plancton	Producción Fitoplancton	Producción Zooplancton
SN	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SA	1.73%	-10.57%	-3.70%	-1.77%	-14.93%
SN+D3	2.57%	-3.87%	-0.27%	2.08%	-3.85%
SN+D4	2.93%	-3.64%	0.03%	2.53%	-3.37%
SD90_T	3.38%	-19.22%	-6.60%	-8.01%	-21.06%
SD90_P	-8.44%	14.42%	1.65%	-0.24%	10.48%
SD90_NTK	3.34%	-10.69%	-2.85%	-0.14%	-14.97%
SA+D13	0.09%	-5.15%	-2.23%	-1.78%	-2.79%

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 9-4 presentó los análisis de la producción neta, donde el caso SA obtuvo incrementos solo en la concentración de fitoplancton del 1.73 [%]. Por otro lado, la concentración de zooplancton, de plancton y las producciones de fitoplancton y zooplancton redujeron sus magnitudes en 10.57 [%], 3.7 [%], 1.77 [%] y 14.93 [%], respectivamente. El comportamiento entre el fitoplancton, zooplancton y sus producciones fue analizado en detalle en el capítulo 10.2.1.

En la Figura 9-7 se mostraron las concentraciones de los organismos simulados integrados en el dominio de los casos SA y SN. Las concentraciones de los organismos (PC, ZC y plancton) del caso SA se registraron ligeramente menores, manteniendo el mismo comportamiento desde el inicio de la simulación, en la estación de verano, hasta la estación de invierno. En las variables fitoplancton y plancton, tras la reducción de biomasa en la estación de otoño, en la primavera se generaron tres incrementos, el primero de ellos fue similar en ambas simulaciones, aunque con menor magnitud en el caso SA, en el segundo y más importante, el caso SA superó la biomasa ligeramente y el tercer incremento fue

bastante mayor en el caso SA. Los dos primeros aumentos de fitoplancton concordaron con aumentos en la concentración de zooplancton, los cuales fueron menores en el caso SA, después de estos incrementos, las concentraciones de zooplancton en ambos casos simulados se igualaron.

El análisis de la distribución de las razón de variación de los organismos en el dominio y estaciones se realizó en la Figura 9-8 para el plancton, Figura 9-9 para el fitoplancton y Figura 9-10 para el zooplancton.

La distribución de plancton (Figura 9-8) mostró, durante la media de la simulación completa y en toda la columna de agua, leves incrementos, respecto al caso SN, en las cercanías de la península Los Molles con disminuciones notables en el norte de la bahía. En la estación de verano se redujo el plancton en el norte de la bahía y a lo largo de la costa, a diferencia del oeste, donde se produjeron ligeros incrementos. Las estaciones de invierno y otoño ilustraron pérdidas en todo el dominio, localizándose los mayores valores en el norte de la bahía. En la estación de primavera se presentaron incrementos relevantes de plancton centrados en las cercanías de la península Los Molles, que se extendieron en gran parte del dominio, con excepción del norte de la bahía y en la capa de fondo, donde predominaron las pérdidas en gran parte del dominio.

En el fitoplancton simulado (Figura 9-9) presentó un comportamiento semejante al plancton, aunque con mayores magnitudes, ubicándose, en la media anual, incrementos de biomasa en el oeste del dominio, con reducciones de biomasa en el norte de la bahía, una conducta que se mantuvo en gran parte de la columna de agua, con excepción de la capa de fondo, donde los incrementos solo se mantuvieron en el sur de la bahía, al este de la península Los Molles. En las estaciones de verano y otoño se presentaron incrementos de biomasa, principalmente, en las cercanías de la península Los Molles, mientras que, gran parte del dominio sufrió pérdidas de fitoplancton, donde los menores valores se ubicaron en el norte de la bahía. El comportamiento anterior se diferenció en la capa de fondo, donde, en gran parte del dominio, ocurrieron ligeros incrementos de biomasa, con reducciones solamente en el norte de la bahía. En la estación de invierno se presentaron pérdidas de biomasa en todo el dominio y capas, ocurriendo las mayores disminuciones en el norte de la bahía. En la estación de primavera se presentaron incrementos en gran parte del dominio y en toda la columna de agua, alcanzándose hasta tres veces de la concentración del fitoplancton en comparación del caso SN. El incremento de biomasa ocurrió con mayor magnitud en la península Los Molles, en contraste, la reducción de biomasa en el norte de la bahía permaneció en todas las capas.

El zooplancton ilustrado en la Figura 9-10 mostró en la media anual pérdidas en todo el dominio y capas, con una máxima pérdida en el norte de la bahía. En la estación de verano se presentaron algunas zonas con leves incrementos de zooplancton en el oeste de la bahía en la mayoría de las capas, aunque en la capa de fondo se presentaron variaciones negativas solo en el norte de la bahía. Desde la estación de otoño hasta primavera solo se registraron reducciones de la concentración de zooplancton, ocurriendo las mayores magnitudes en la estación de primavera en el norte de la bahía.

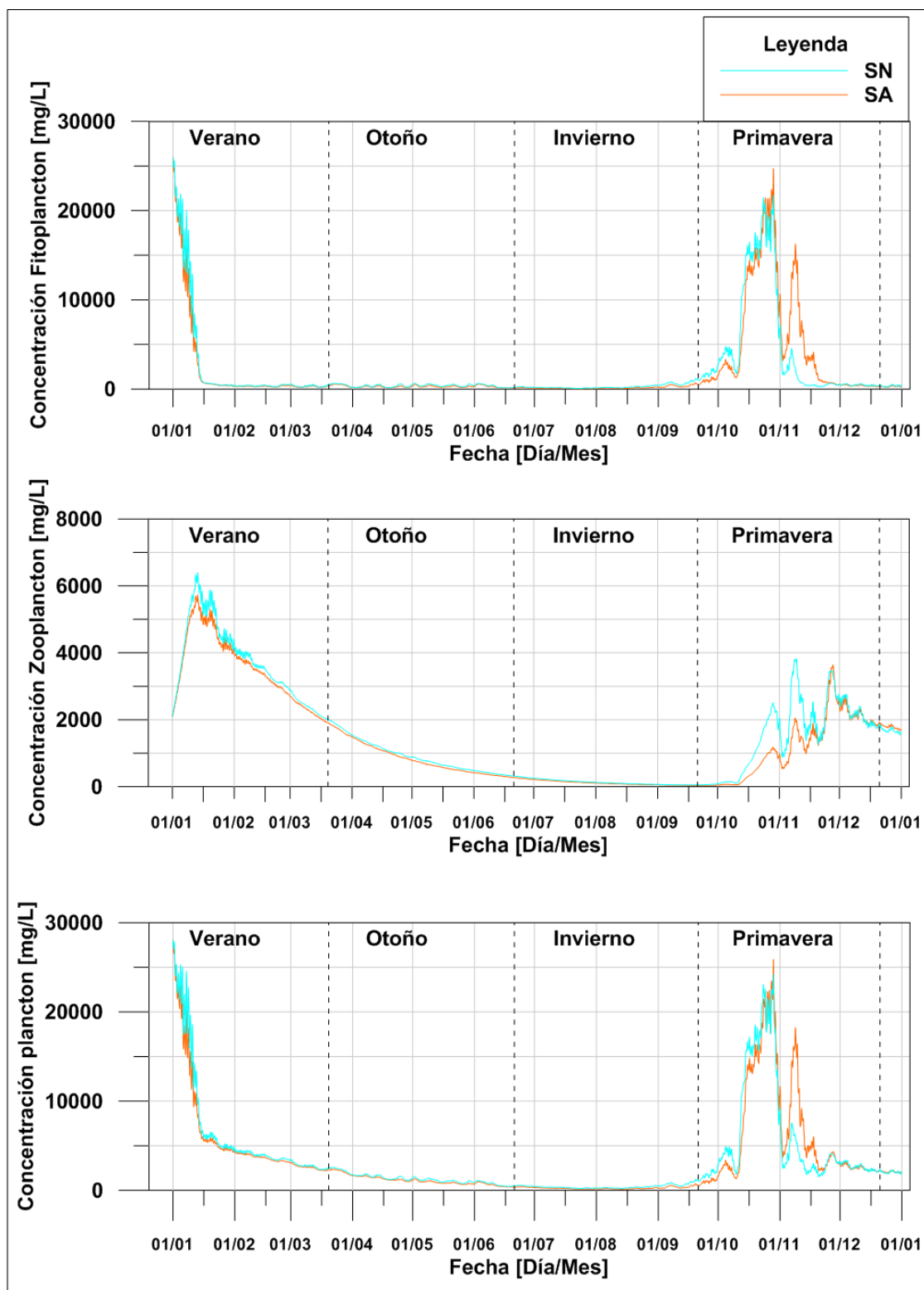


Figura 9-7 Serie de tiempo de la integración de organismos al interior del dominio en el caso SA y SN.
Fuente: Elaboración propia.

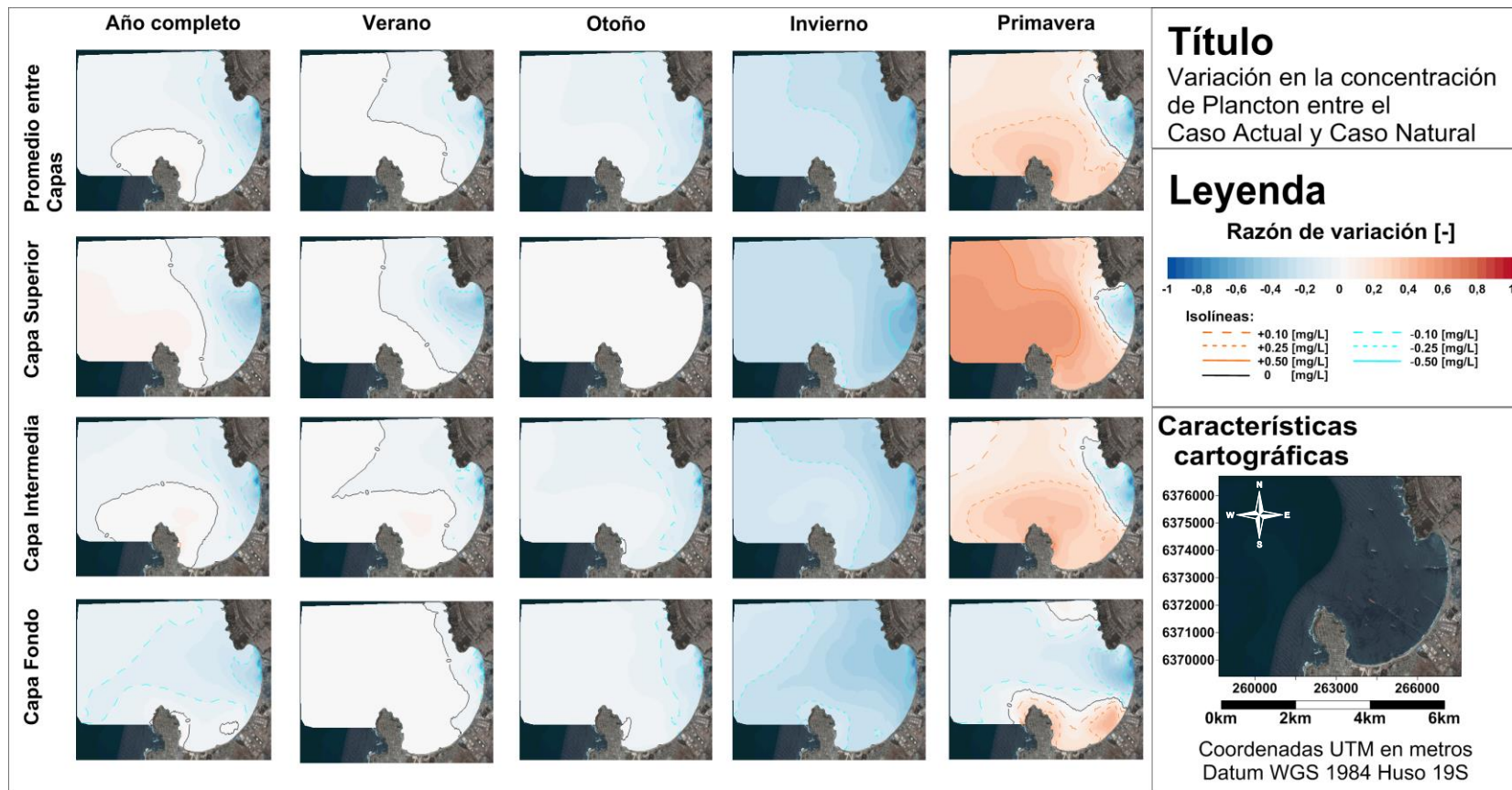


Figura 9-8 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SA y SN.

Fuente: Elaboración propia.

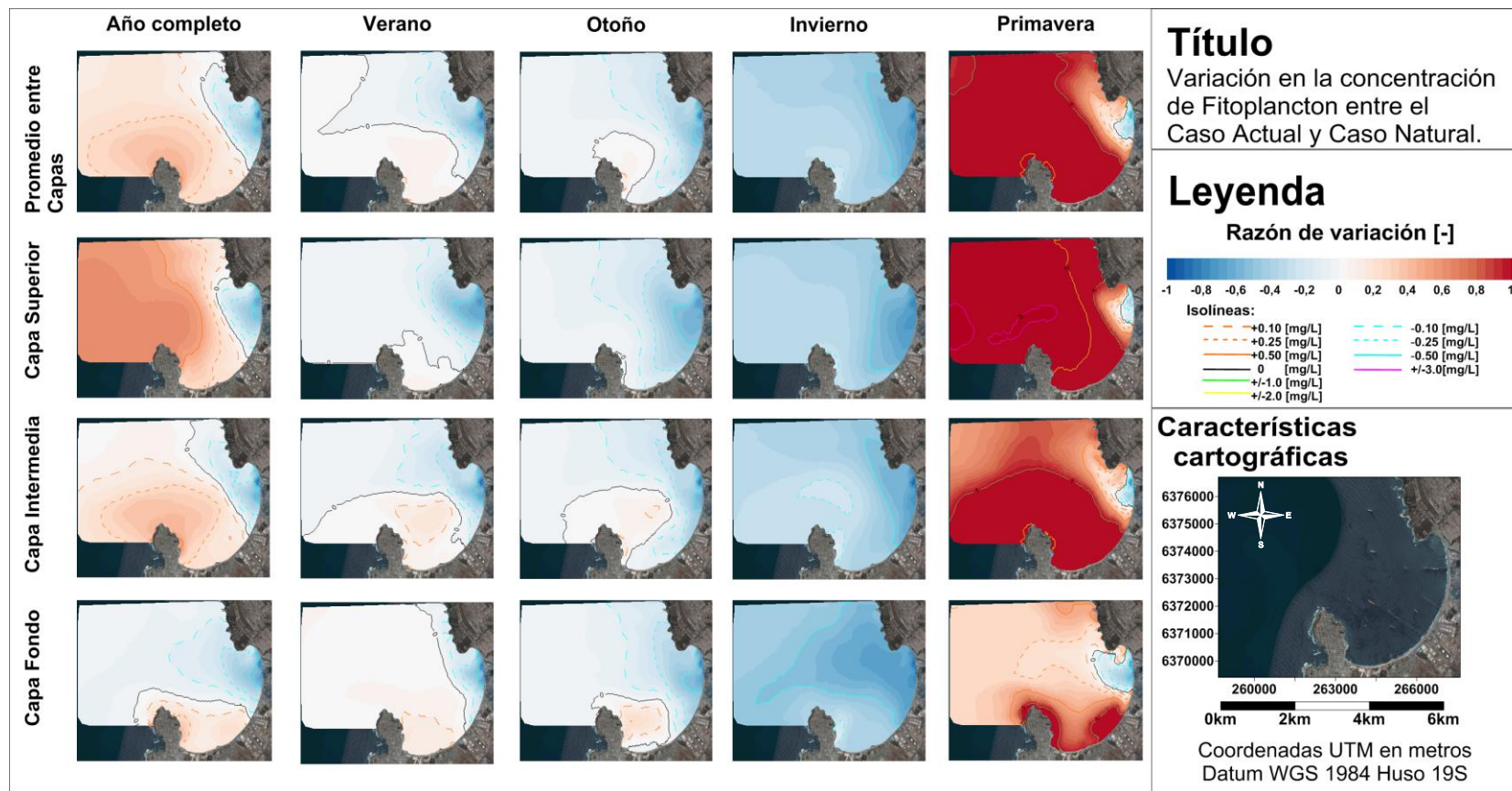


Figura 9-9 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SA y SN.
Fuente: Elaboración propia.

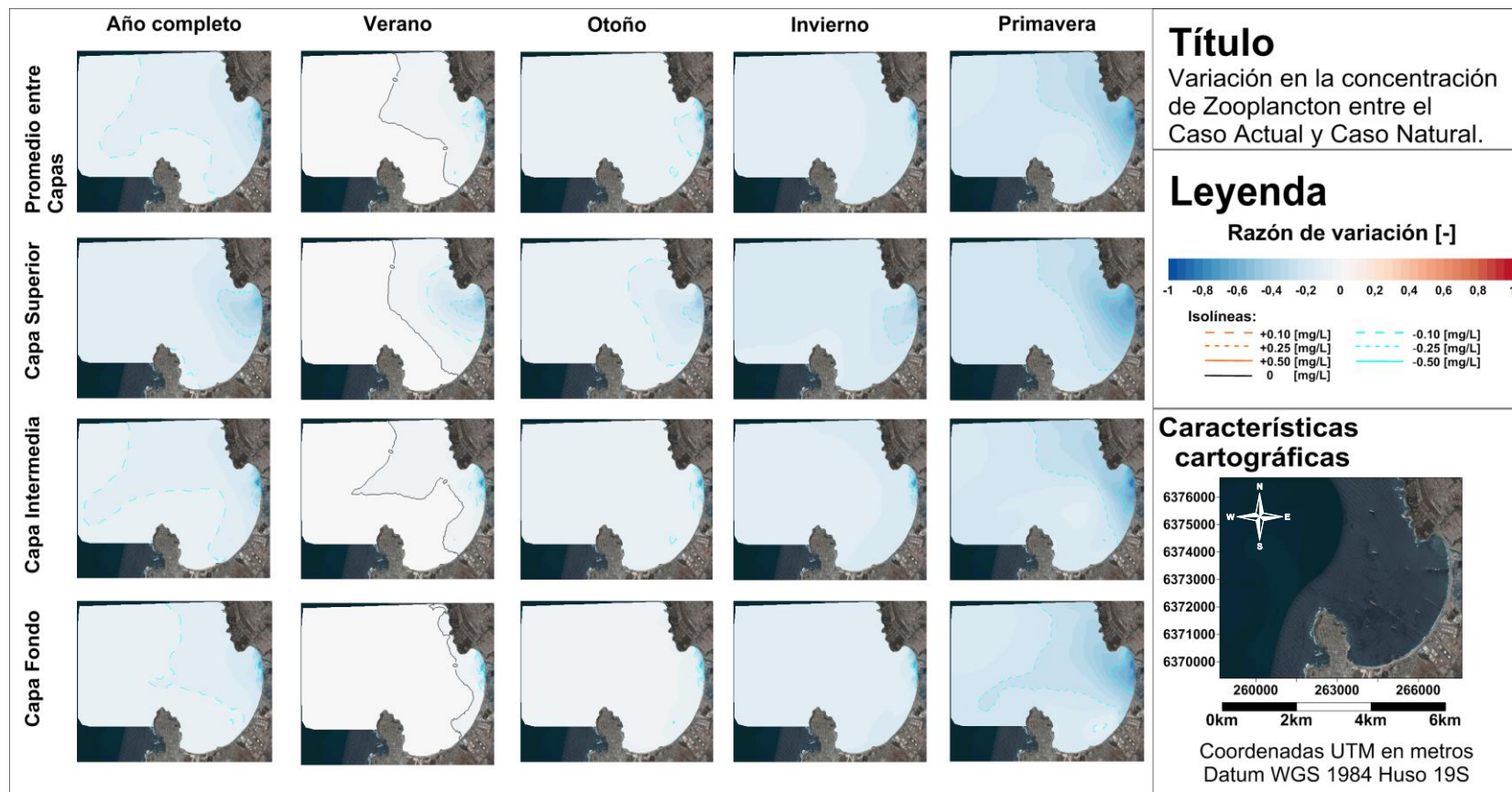


Figura 9-10 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SA y SN.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9-4 se presentaron las concentraciones netas de las variables ecológicas alteradas por las descargas individuales, en las simulaciones SN+D3 y SN+D4, utilizándose este orden en adelante para presentar los resultados. En la integración en el tiempo y el dominio se experimentó un incremento en las variables fitoplancton en de 2.57 [%] y 2.93 [%] y su producción, 2.08 [%] y 2.53 [%]. En estas simulaciones disminuyeron las variables zooplancton, en 3.87 [%] y 3.64 [%], y su producción en 3.85 [%] y 3.37 [%]. En la variable plancton, su concentración se redujo en 0.27 [%] para el caso SN+D3, mientras que, en el caso SN+D4 aumento levemente en 0.03 [%]. Las justificaciones de este comportamiento se discutieron en el capítulo 10.2.1.

En la Figura 9-11 y la Figura 9-15 se esquematizaron las variables de organismos (PC, ZC y plancton) integradas en el dominio de los casos SN+D3 y SN+D4, respectivamente. En ambos casos de estudio se presenciaron comportamientos similares, por lo tanto, fueron descritos una vez los resultados, entendiendo que fueron válidos para ambos casos de estudio. Desde la estación de verano hasta la estación de invierno, se presentaron comportamientos similares entre los casos SN+D3 y SN+D4 con el caso SN, aunque con valores ligeramente menores. En la estación de primavera las concentraciones de fitoplancton y plancton fueron similares en los casos SN+D3 y SN+D4 con al caso SN durante el primer incremento, mientras que, en el segundo incremento los casos SN+D3 y SN+D4 superan levemente al caso SN y en el tercer incremento superaron el caso SN con una magnitud importante. En el zooplancton se mostraron menores concentraciones en los dos primeros incrementos por parte de los casos SN+D3 y SN+D4 y luego el diferencial desapareció manteniéndose en valores similares.

Las distribuciones de variables en el espacio y estaciones fueron ilustradas en la Figura 9-12 y la Figura 9-16, para la variable plancton, en la Figura 9-13 y la Figura 9-17 para la variable fitoplancton y en la Figura 9-14 y la Figura 9-18 para la variable zooplancton, correspondientes a los casos SN+D3 y SN+D4. Como se visualizó en las ilustraciones ambos casos presentaron resultados similares, por tanto, se analizaron en conjunto, entendiéndose que se refirieron a ambos casos.

La variable plancton (Figura 9-12 y Figura 9-16) en general disminuyó su biomasa, respecto al caso SN, según la media anual a través de las capas. En la estación de verano se señalaron leves incrementos en el oeste del dominio y reducciones hacia la costa de la bahía, con los mayores valores en el norte de la bahía. En las estaciones de otoño e invierno se produjeron reducciones de la concentración de plancton en todo el dominio y columna de agua. En la estación de primavera, se ilustró el incremento de biomasa en gran parte del dominio y la columna de agua, con excepción de la capa de fondo, donde disminuyeron las concentraciones de plancton en gran parte de la zona de estudio, y en el norte de la bahía, que ocurrieron reducciones de biomasa en toda la columna de agua.

En la media anual, en gran parte de la columna de agua, el fitoplancton (Figura 9-13 y Figura 9-17) presentó leves incrementos de biomasa en el oeste del dominio y disminuciones hacia el norte de la bahía, con excepción de la capa de fondo, donde la reducción de biomasa ocurrió en todo el dominio. Durante la estación de verano, otoño e invierno, se visualizó un predominio en la reducción de la biomasa fitoplanctónica, cuyas máximas disminuciones se localizaron en el norte de la bahía. En las estaciones de verano y otoño se presentaron sectores con leves incrementos, casi despreciables, en las cercanías de la península Los Molles. En la estación de invierno, la concentración de fitoplancton fue menor en los casos SN+D3 y SN+D4, en totalidad del dominio. En la estación de primavera predominaron los incrementos de biomasa en todo el dominio, salvo en pequeños puntos al norte de la bahía, cuya dimensión aumentó en la capa de fondo.

En la variable zooplancton (Figura 9-14 y Figura 9-18) se presentó una tendencia a la reducción de la biomasa en la media simulada en toda la columna de agua, lo cual coincidió con las estaciones desde otoño hasta primavera, entre las cuales, la estación primavera reveló las mayores reducciones de concentración de zooplancton. Solo en la estación de verano se visualizaron leves incrementos de la biomasa en el oeste de la bahía, con reducciones que predominaron en el norte de la bahía.

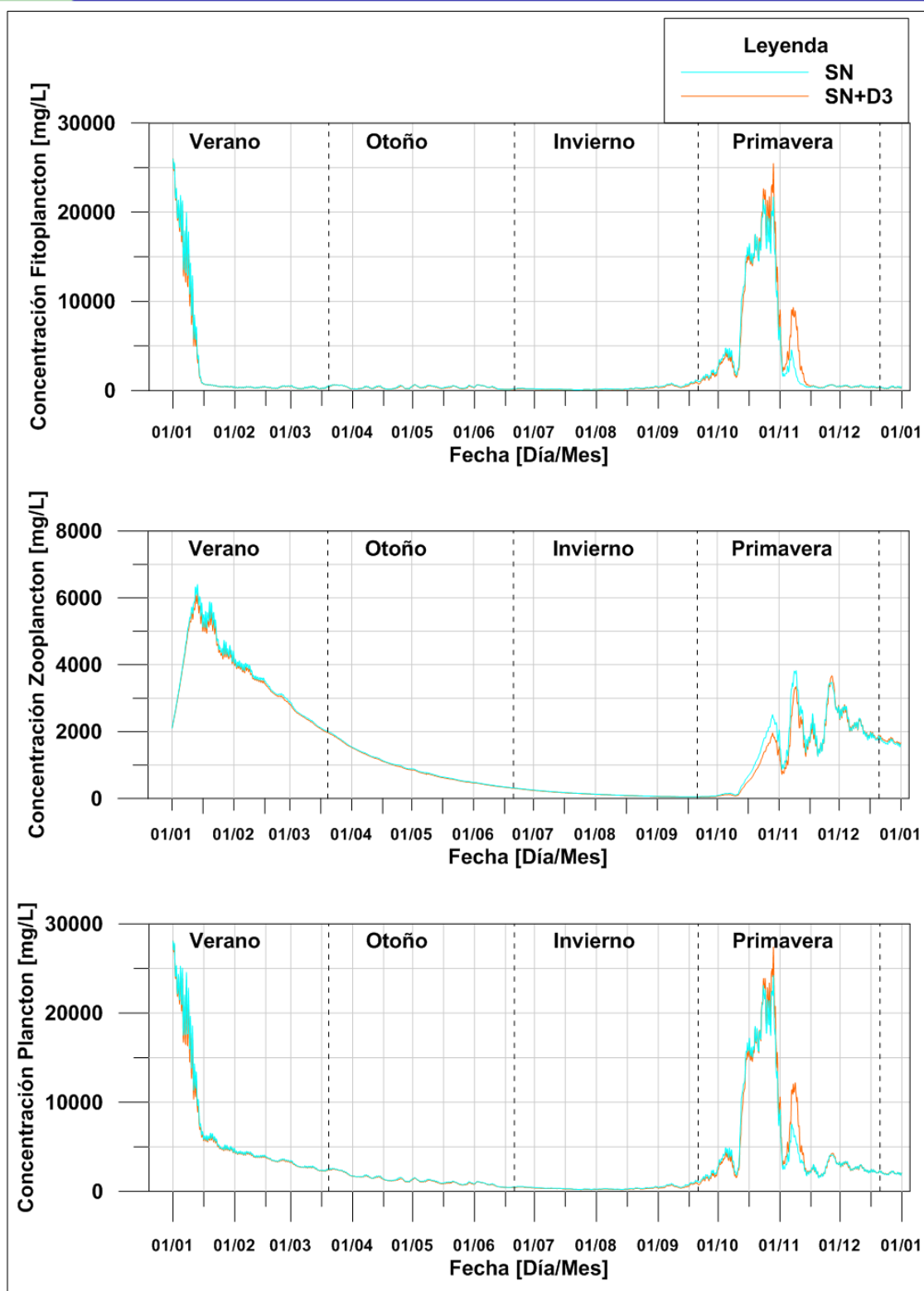


Figura 9-11 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SN+D3 y SN.
Fuente: Elaboración propia.

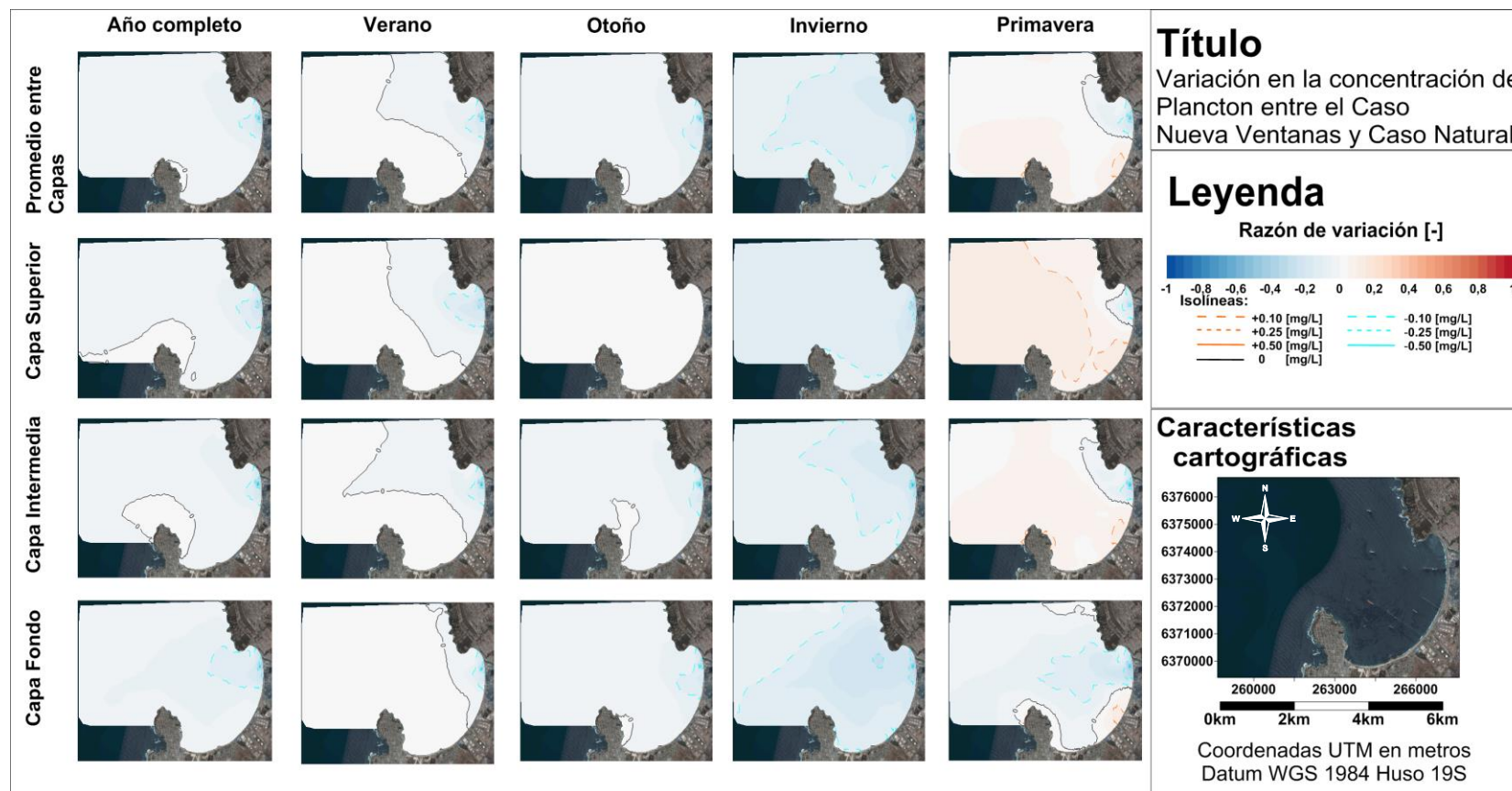


Figura 9-12 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SN+D3 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

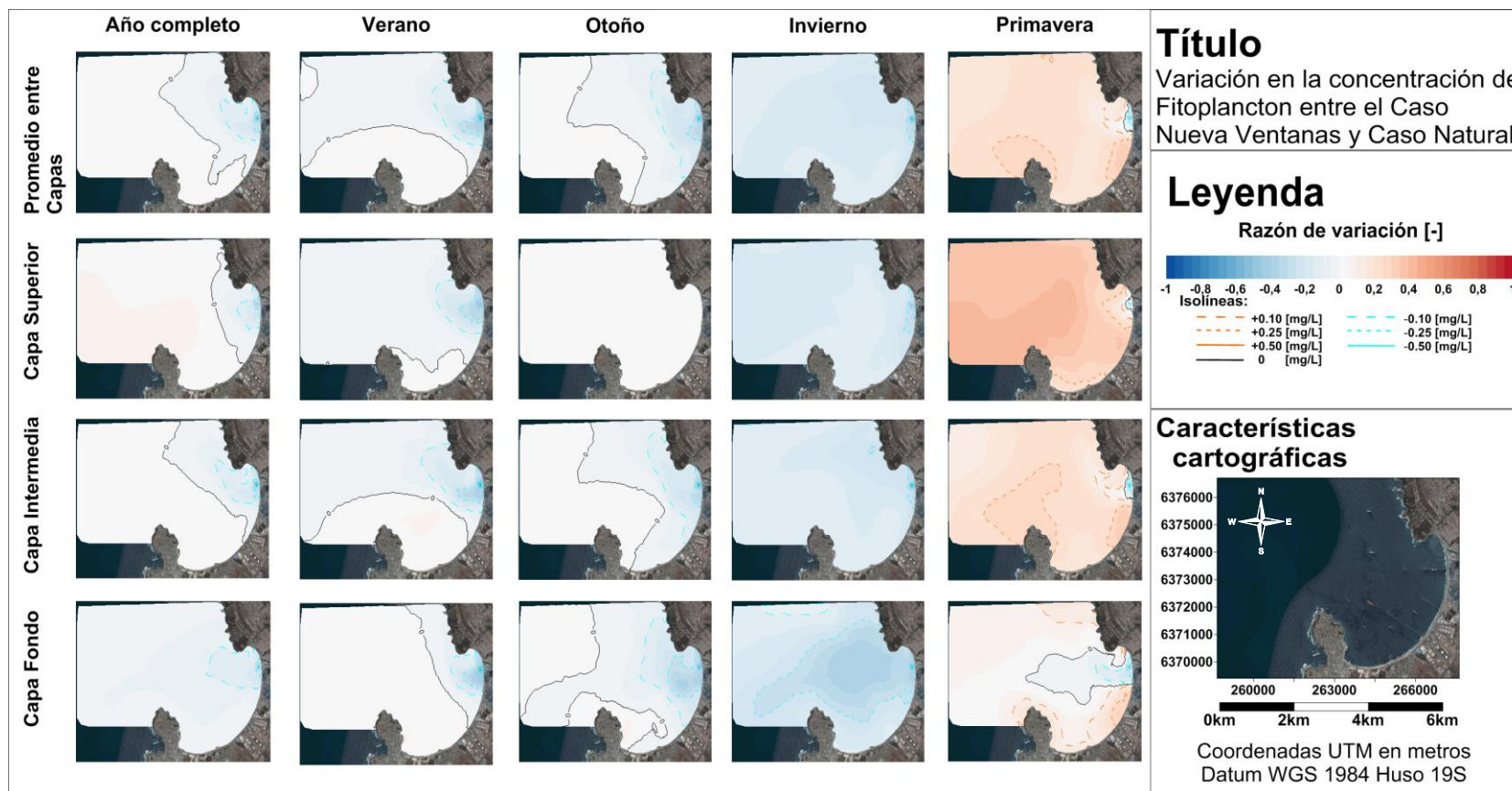


Figura 9-13 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SN+D3 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

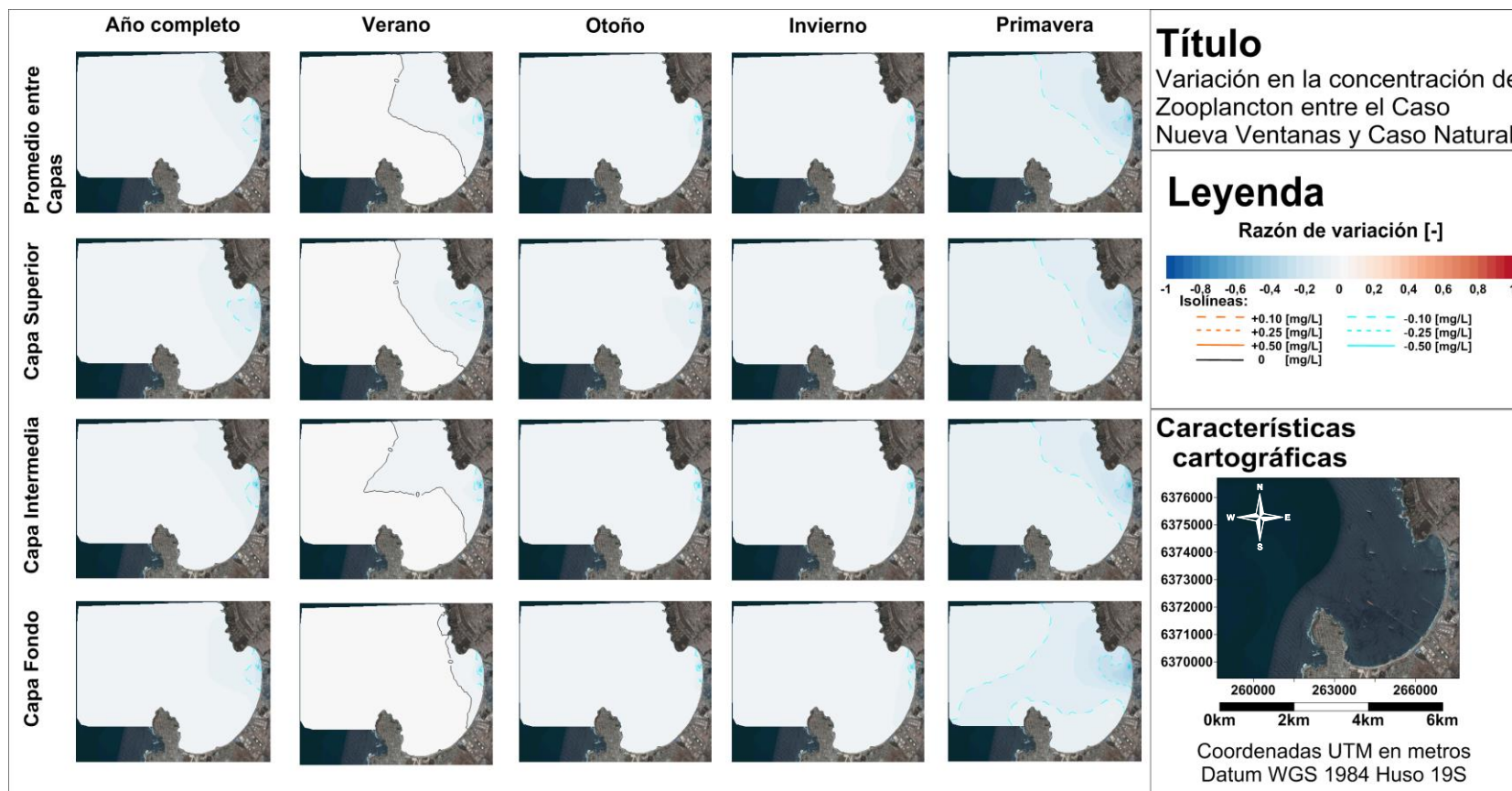


Figura 9-14 Diferencia en concentraciones de zooplankton entre los casos SN+D3 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

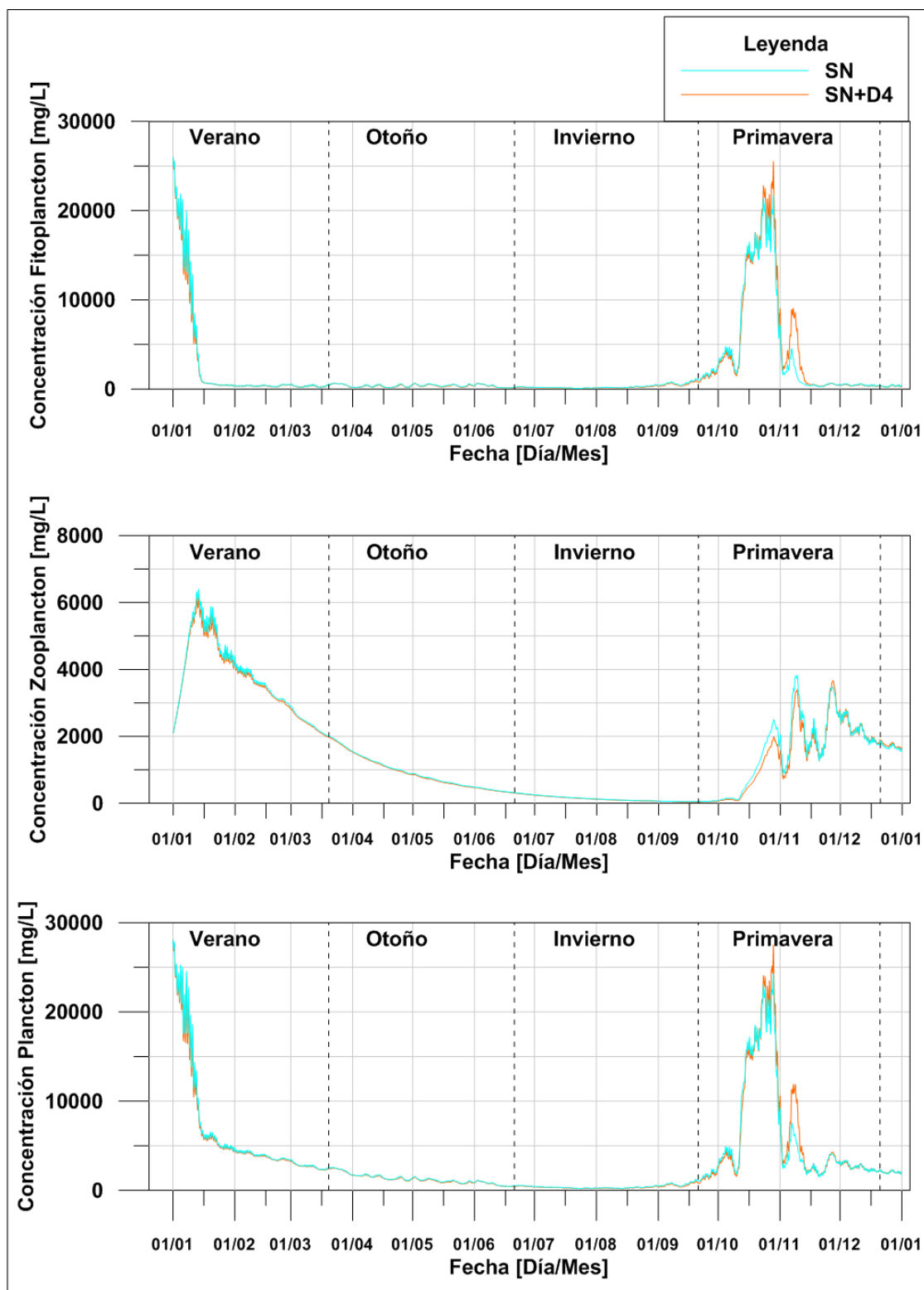


Figura 9-15 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SN+D4 y SN.
Fuente: Elaboración propia.

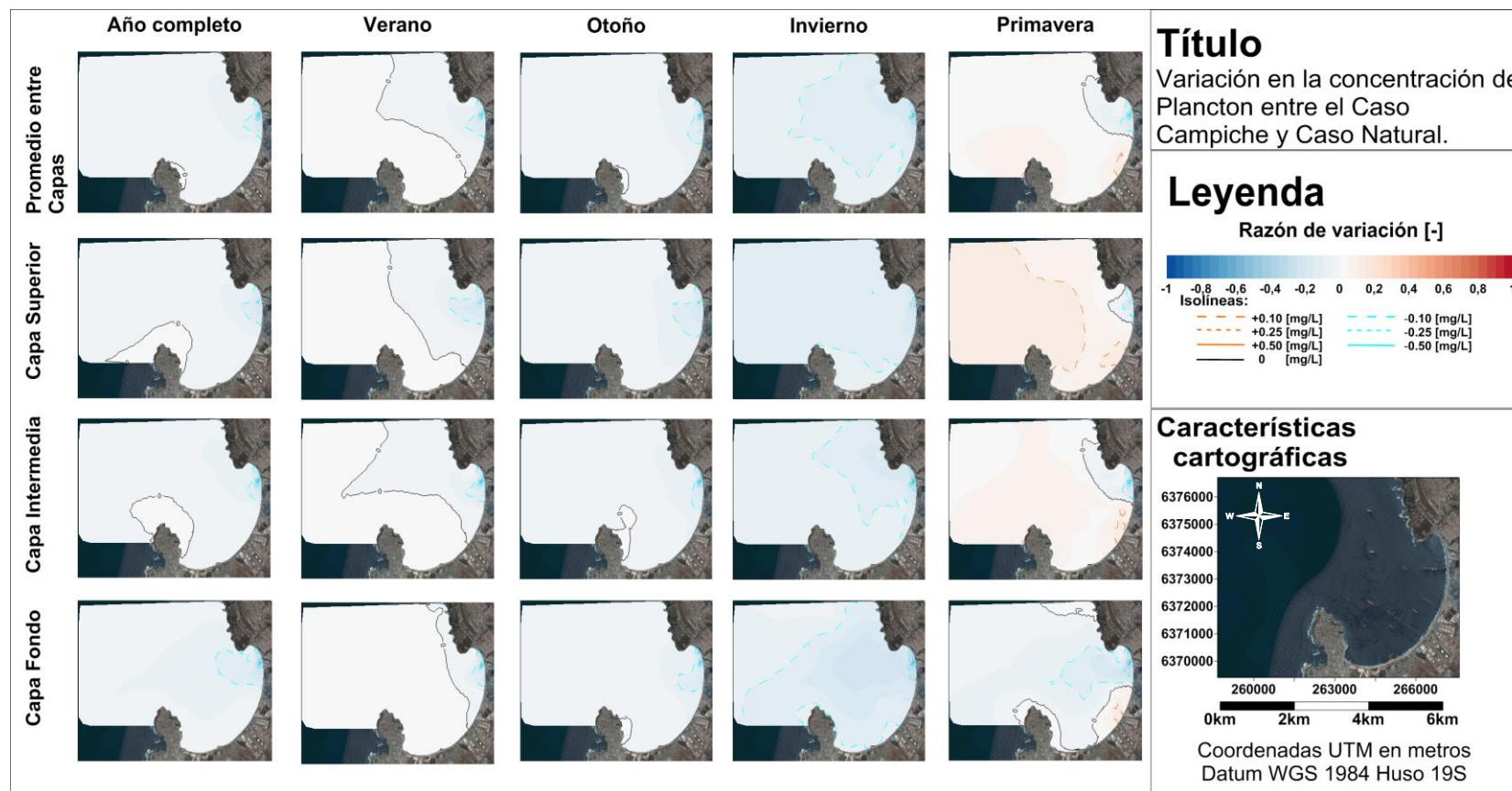


Figura 9-16 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SN+D4 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

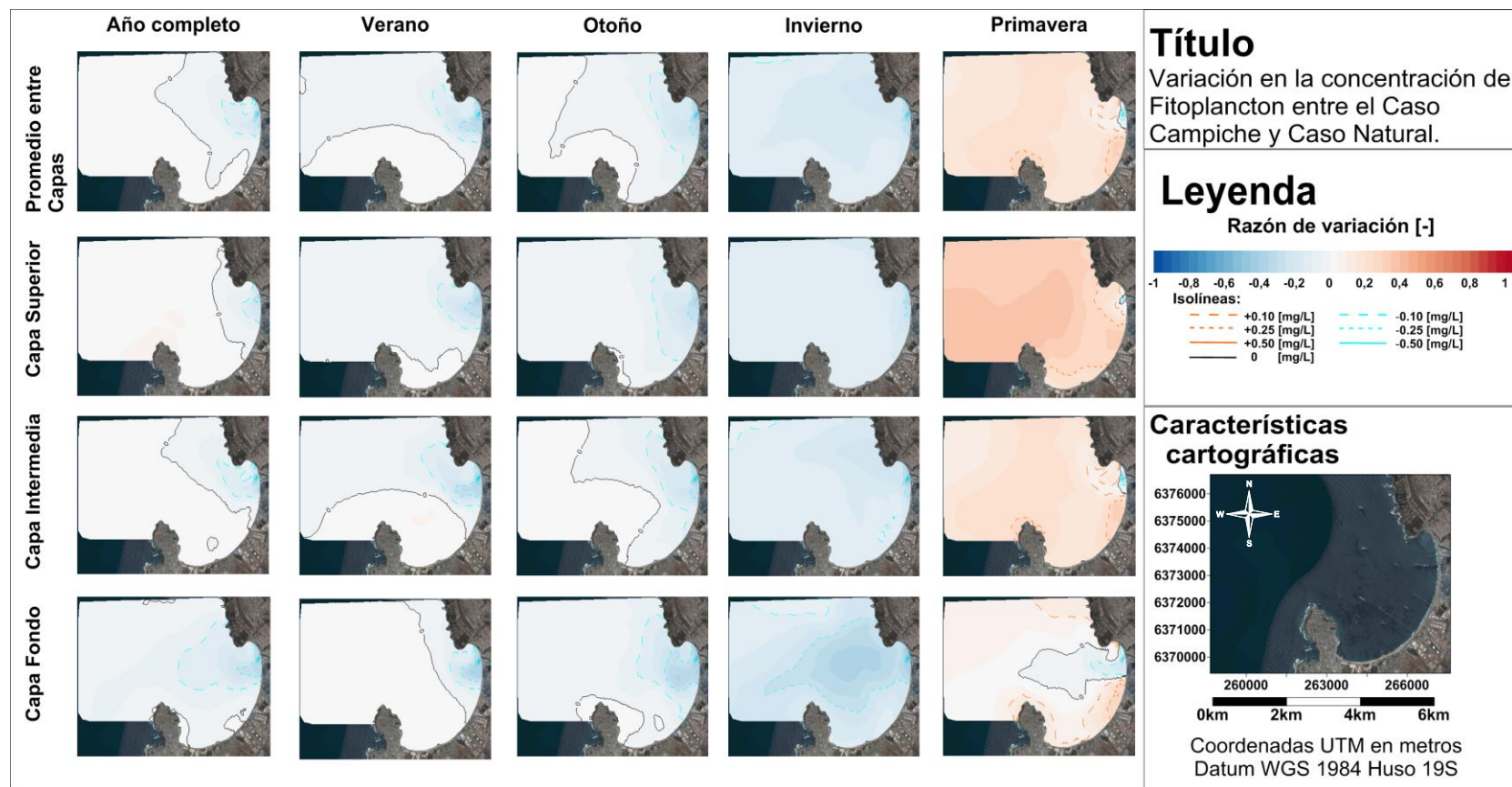


Figura 9-17 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SN+D4 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

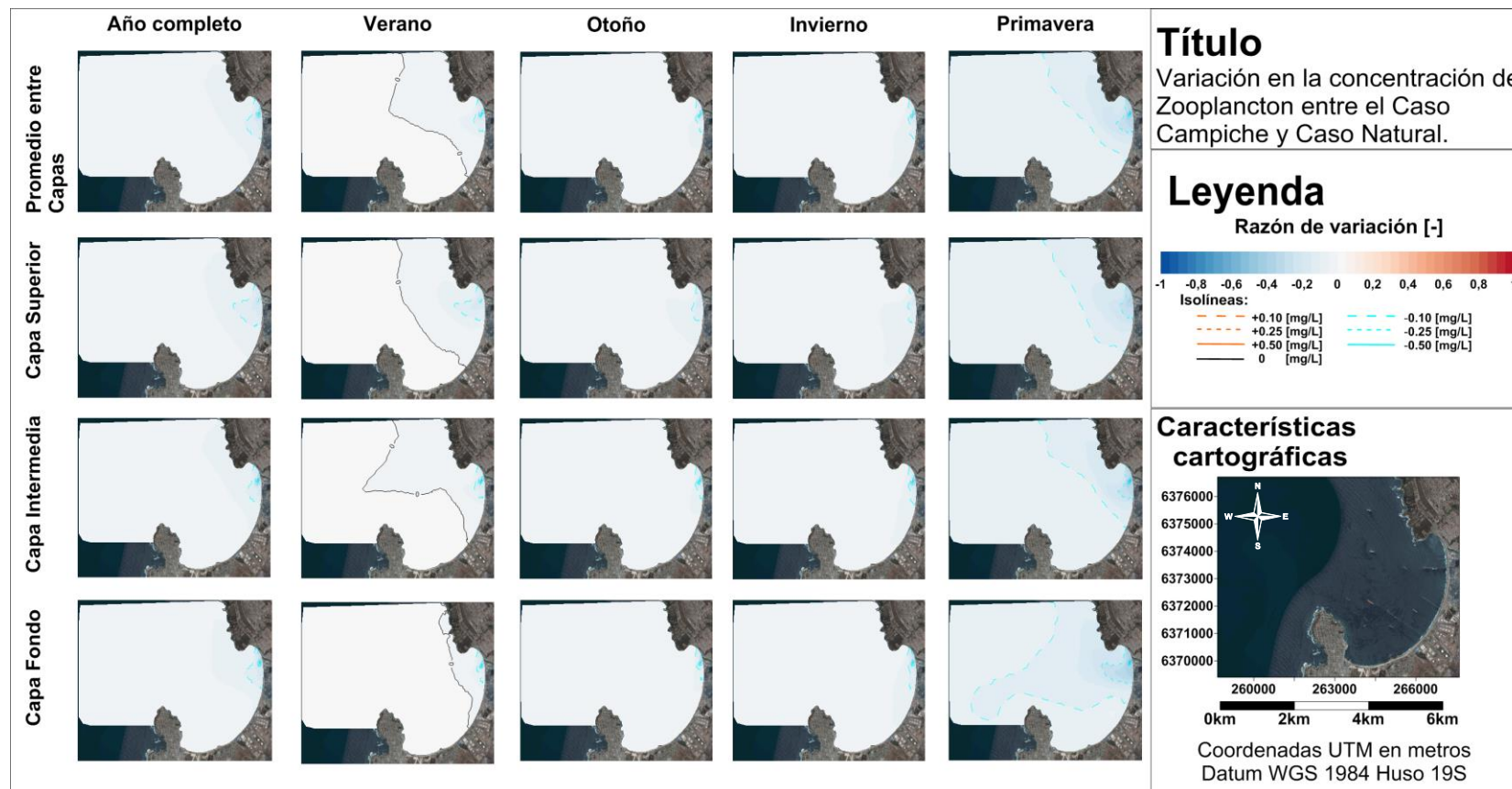


Figura 9-18 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SN+D4 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

En la simulación SD90_T, las variables integradas en el dominio y tiempo, respecto al caso SN, evidenciaron incrementos en la concentración de fitoplancton en 3.38 [%]. Las variables zooplancton, plancton y producciones de fitoplancton y zooplancton se redujeron en 19.22 [%], 6.60 [%], 19.22 [%] y 21.06 [%], respectivamente. La justificación de este comportamiento fue analizada en el capítulo 10.2.1.

La Figura 9-19 representó la integración de la biomasa en el dominio, de las variables asociadas a los organismos (PC, ZC y plancton) en el caso SD90_T y SN. Como se presentó en las variables fitoplancton y plancton, el comportamiento fue semejante entre los casos SD90_T y SN desde la estación verano hasta la estación invierno. En las variables fitoplancton y plancton, durante la estación de primavera, el caso SD90_T presentó las concentraciones más bajas en los primeros dos incrementos, sin embargo, en el tercer incremento, el caso SD90_T alcanzó los mayores valores y, luego, registró otros aumentos que no se visualizaron en el caso SN.

En la variable zooplancton, la serie de tiempo de biomasa del caso SN fue replicada en el caso SD90_T, con una menor magnitud, desde la estación de verano hasta la estación de invierno. En la estación de primavera fue notable la baja biomasa obtenida en el caso SD90_T, con una alteración en el comportamiento de la variable.

En la Figura 9-20, la Figura 9-21 y la Figura 9-22, se ilustraron las distribuciones espaciales durante la media de las estaciones del caso SD90_T con respecto al caso SN, para las variables plancton, fitoplancton y zooplancton, respectivamente.

La variable plancton (Figura 9-20), presentó una media anual con tendencias a las pérdidas de biomasa en la costa, en toda la columna de agua y en la zona norte del dominio, mientras que, en las capas intermedia y fondo se incrementó la biomasa en los alrededores de la península Los Molles y en la capa superior, se ilustró el sector fuera de la bahía con incrementos de biomasa. La estación de verano presentó ligeros incrementos de la concentración de plancton en las afueras de la bahía, a diferencia de la costa en la bahía donde se presentaron reducciones de las concentraciones con mayores magnitudes en la zona norte de la bahía. Durante las estaciones de invierno y otoño predominó la reducción de la biomasa en gran parte del dominio y columna de agua, con las mayores magnitudes de pérdida de plancton en la estación de otoño, localizándose en el norte de las menores concentraciones. En la estación de primavera se ilustró un gran incremento del plancton, con excepción de la capa de fondo, donde solo ocurren aumentos en el sector de la península Los Molles. En la capa superficial e intermedia aumentó la biomasa del plancton, centrándose en la península Los Molles, aunque son notorias las pérdidas de biomasa en el sector norte de la bahía. Se debe mencionar que, en la capa superior se registraron incrementos de biomasa hasta de 2 veces de lo simulado en el caso SN.

En la variable fitoplancton, según lo ilustrado en la Figura 9-21, la media de la simulación presentó un predominio del incremento de la biomasa en toda la columna de agua, con los mayores valores fuera de la bahía, alcanzando una razón de variación de 2 veces lo simulado durante el caso SN. En las estaciones de verano e invierno se presentó una tendencia a la pérdida de la biomasa en la costa de la bahía que disminuye en la profundidad, apareciendo incrementos de biomasa en el centro de la bahía y en las cercanías de la península Los Molles. Es importante resaltar la capa de fondo durante la estación de verano, donde predominaron los incrementos de la concentración de fitoplancton, aunque permanecieron las pérdidas en gran parte de la costa de la bahía. La estación de otoño se distinguió por su predominio en las pérdidas de fitoplancton, con sus mayores pérdidas en la zona norte de la bahía y las menores reducciones en el sector cercano a la península Los Moles. En la estación de primavera se produjo un notable

incremento del fitoplancton en gran parte del dominio en las tres capas, con excepción de una reducida zona en el sector norte de la bahía. Es necesario resaltar que, la capa superficial en primavera alcanzó una variación positiva, 13 veces mayor a lo estimado en el caso SN, lo cual fue concordante con lo señalado en la Figura 9-19, en la estación de primavera donde se presentaron incrementos de biomasa en el caso SD90_T cuando la biomasa del caso SN se mantuvo mínima.

La Figura 9-22 ilustró la distribución de la variable zooplancton, donde en la media de la simulación predominó la pérdida de biomasa en gran parte del dominio, con los mayores valores en la zona norte de la bahía. En la estación de verano se ilustraron leves incrementos de la biomasa, en la capa superior e intermedia hacia el oeste del dominio y en la capa de fondo, solo en las cercanías de la península Los Molles. Desde la estación de invierno hasta la primavera se experimentaron pérdidas en la biomasa de zooplancton, con sus mayores reducciones en la estación de primavera, localizándose las mayores disminuciones en el norte de la bahía.

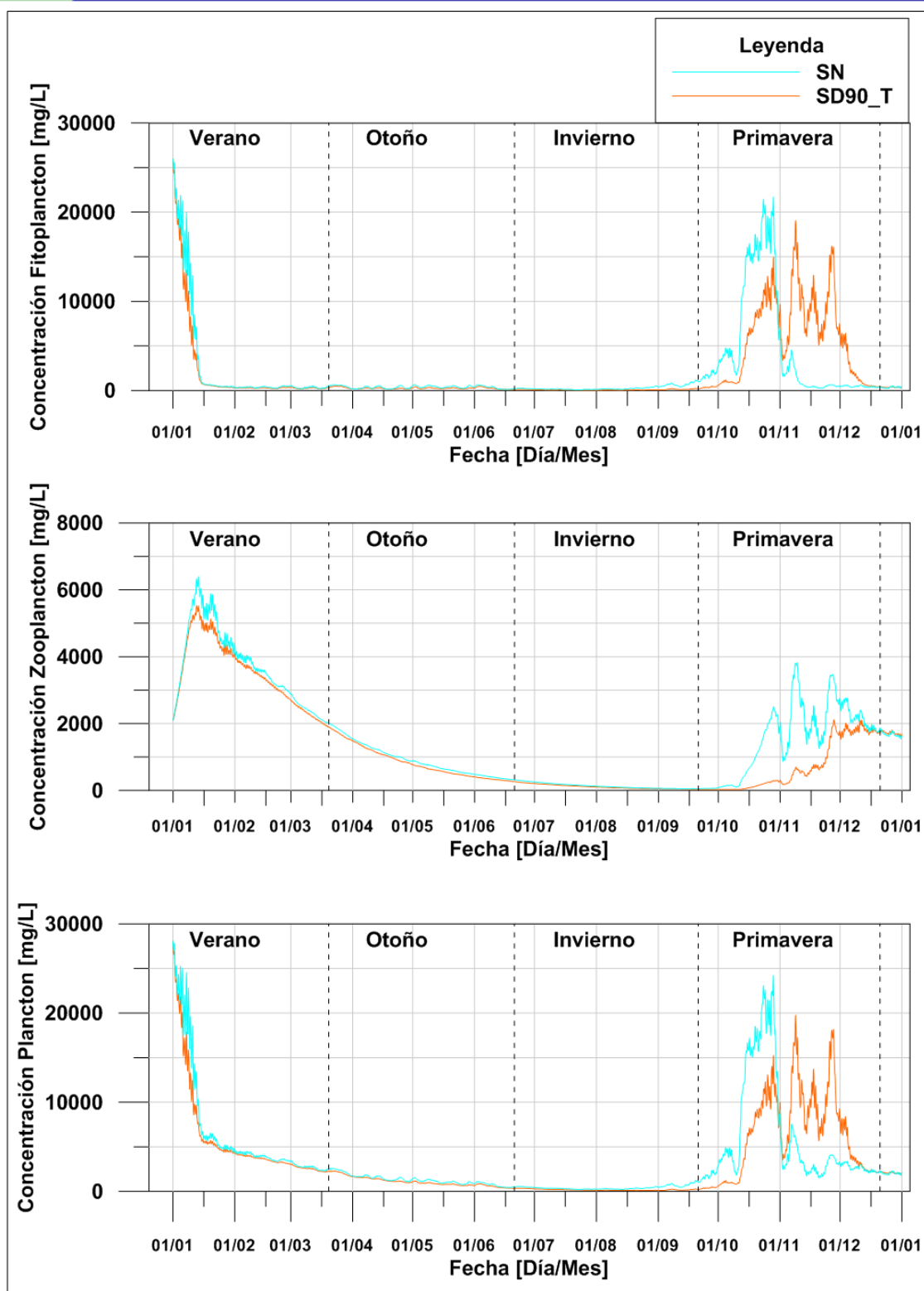


Figura 9-19 Serie de tiempo de la integración de organismos al interior del dominio en el caso SD90_T y SN.

Fuente: Elaboración propia.

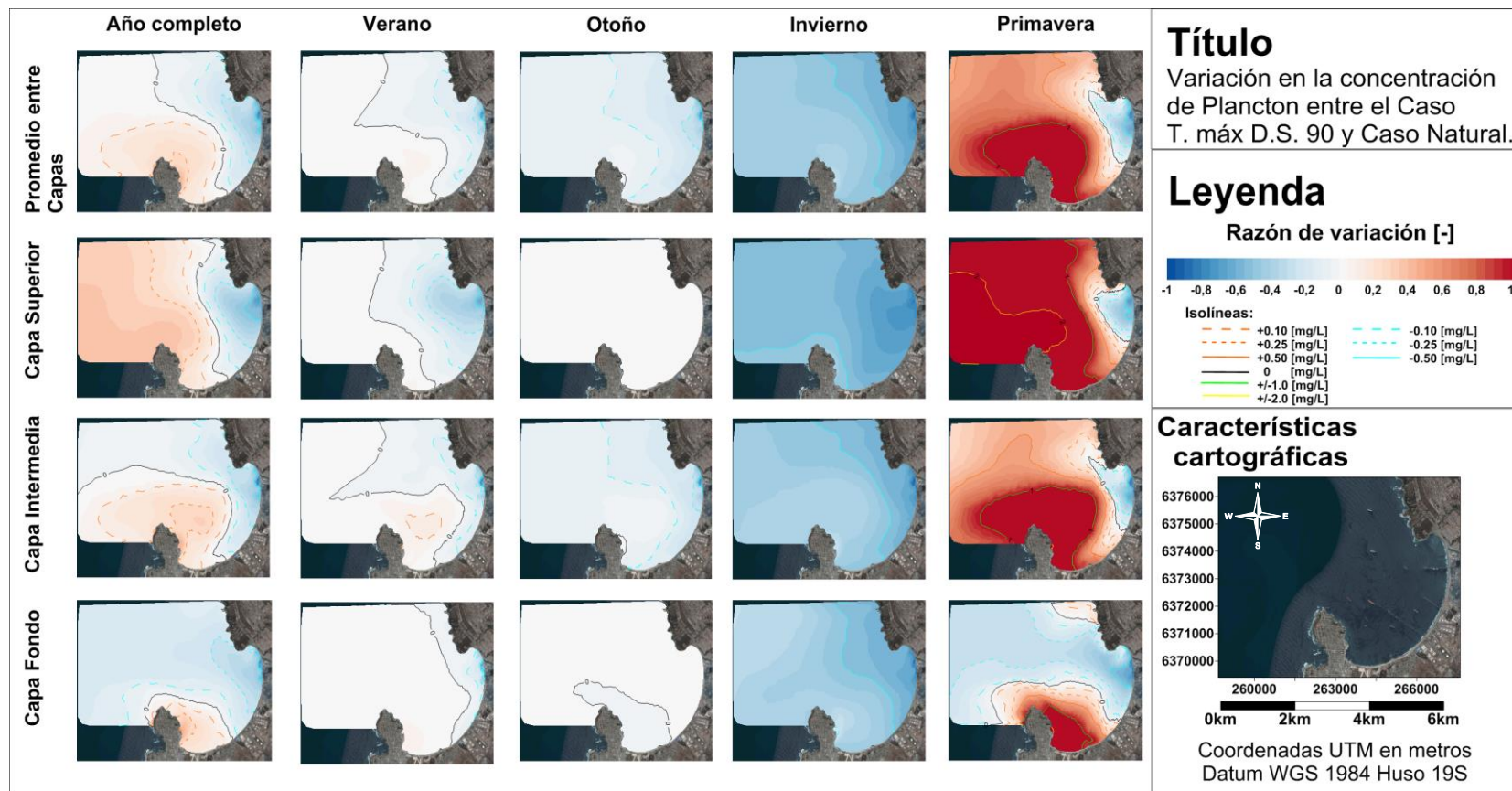


Figura 9-20 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SD90_T y SN.

Fuente: Elaboración propia.

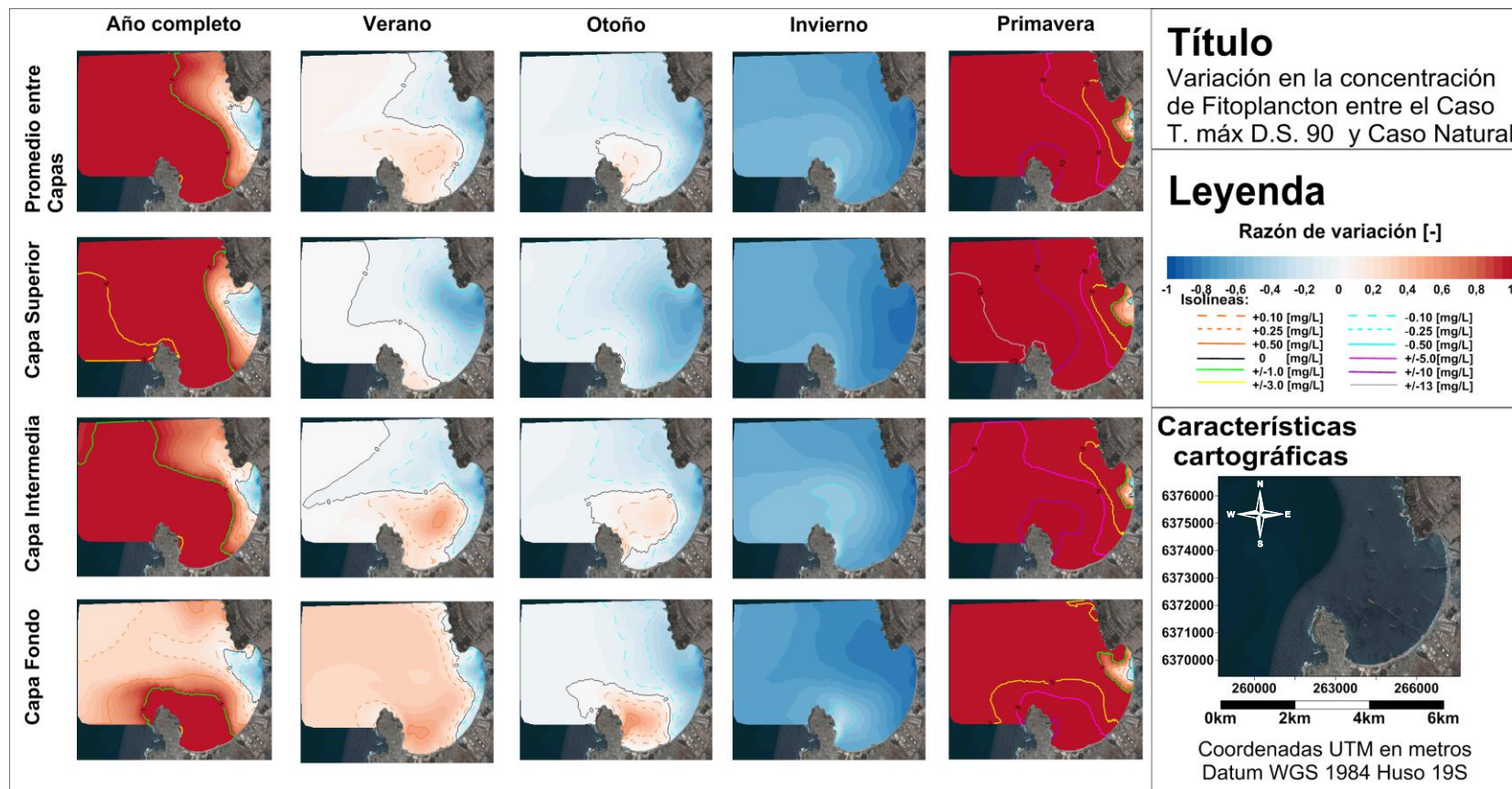


Figura 9-21 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SD90_T y SN.
Fuente: Elaboración propia.

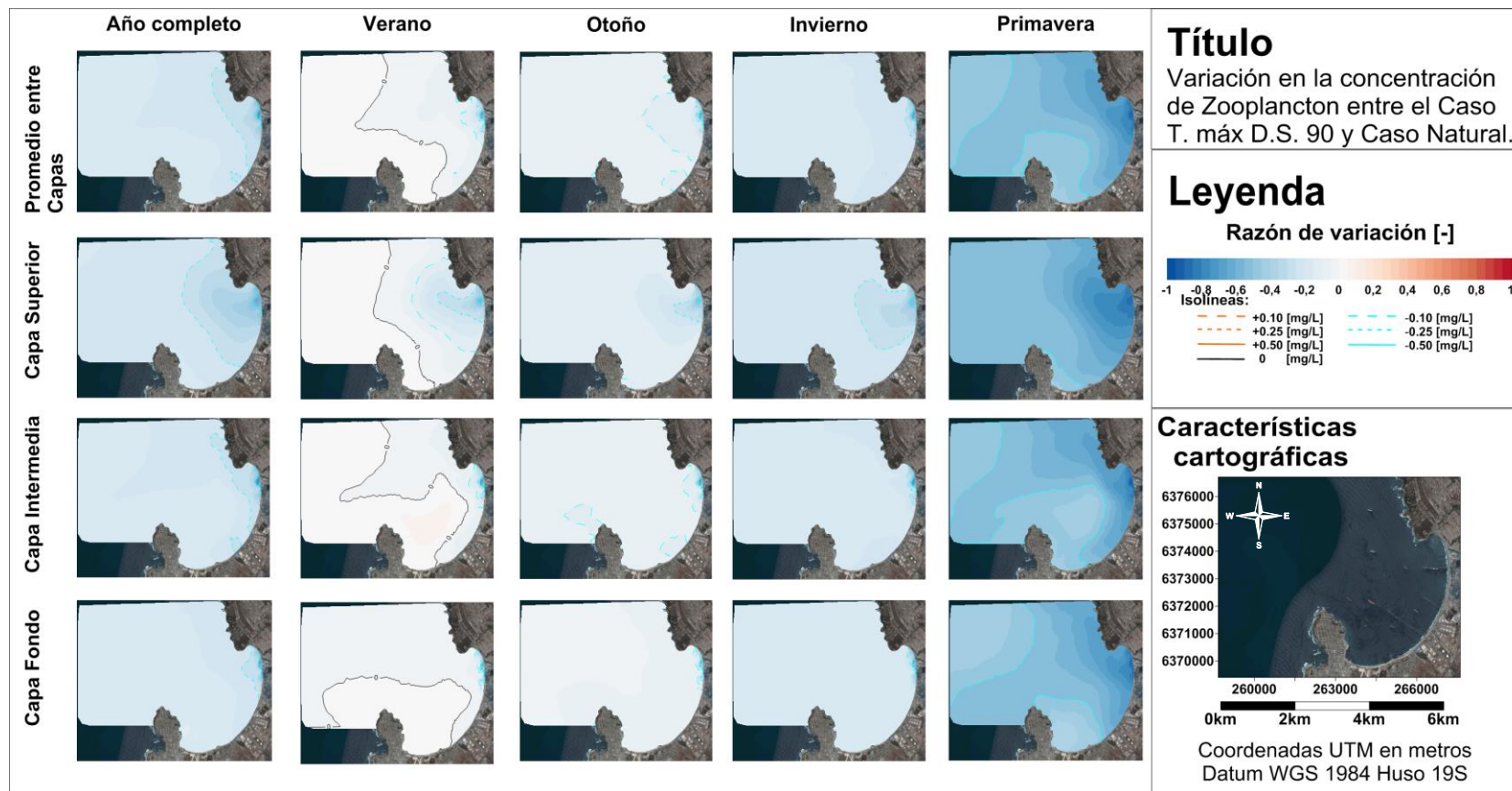


Figura 9-22 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SD90_T y SN.

Fuente: Elaboración propia.

La integración de variables del caso SD90_P, en el dominio y tiempo, contra los resultados del caso SN, resultó con una reducción de las variables fitoplancton y su producción en 8.44 [%] y 0.24 [%], respectivamente. Las variables zooplancton, plancton y la producción de zooplancton registraron incrementos en sus valores, iguales a 14.42 [%], 1.65 [%] y 10.48 [%], respectivamente. Este comportamiento que cambió lo visto en el caso SA, fue discutido en el capítulo 10.2.1.

La Figura 9-23 ilustró los organismos en los casos SD90_P y SN integrados al interior del dominio. Desde la estación de verano hasta el invierno se reveló que el comportamiento del fitoplancton y plancton simulado en el caso SD90_P se asemejó a la simulación SN. Durante la estación de primavera las variables fitoplancton y plancton experimentaron varios incrementos de biomasa, manteniéndose magnitudes semejantes en ambos casos. En el primer aumento de biomasa, el caso SD90_P registró menores concentraciones, aunque en los siguientes incrementos el caso SN quedó con concentraciones ligeramente menores. En la variable zooplancton presentó una alta similitud entre los casos SD90_P y SN, aunque el caso SD90_P estableció valores levemente menores hasta el 1 de noviembre, cuando se incrementó notablemente la concentración de zooplancton, manteniendo un comportamiento similar al caso SN, pero con mayores concentraciones. Se debe notar que, en la variable plancton se mantuvo cierta biomasa al final de la simulación, a diferencia del fitoplancton, lo cual correspondió a la biomasa proveniente del zooplancton.

La distribución espacial durante las estaciones de las variables plancton, fitoplancton y zooplancton fueron ilustradas en la Figura 9-24, la Figura 9-25 y la Figura 9-26, respectivamente. La variable plancton señalada en la Figura 9-24 presentó, en la media anual a través de la columna de agua, reducciones de la biomasa en la zona norte de la bahía, mientras que, hacia la zona oeste del dominio ocurrieron incrementos de la biomasa. En la estación de verano se reveló un comportamiento similar en toda la columna de agua, donde en un pequeño sector en el norte de la bahía se redujo la concentración de plancton, a diferencia del resto del dominio, donde ocurrieron incrementos. En las estaciones de otoño e invierno predominaron las pérdidas de la biomasa en toda la columna de agua y en, aproximadamente, todo el dominio, con las mayores reducciones en la zona norte de la bahía y con una mayor magnitud en la estación de invierno. Durante la estación de primavera, en las capas analizadas, se presentó un comportamiento similar al ocurrido en la estación de verano, pero con mayor magnitud, en especial, en las cercanías de la península Los Molles.

La Figura 9-25 que presenta las distribuciones de concentración de fitoplancton en el dominio, muestra en la media anual un comportamiento semejante en la columna de agua con un predominio en las pérdidas en la mayor parte del dominio, localizándose en la zona norte de la bahía las mayores pérdidas. Durante las estaciones de verano y otoño, en la columna de agua, se ilustró el predominio de las pérdidas de biomasa de fitoplancton, con excepción en ciertas zonas cercanas a la península Los Molles, solo en la capa de fondo durante la estación verano se produjeron leves incrementos de biomasa en gran parte del dominio. En la estación de invierno se ilustraron pérdidas de biomasa de fitoplancton en todo el dominio y en toda la columna de agua, con las mayores magnitudes de reducción en la zona norte de la bahía. En la estación de primavera, la capa superficial e intermedia redujo su biomasa en el sector norte de la bahía junto a incrementos de la biomasa importantes en el resto del dominio. En contraste, en la capa de fondo se redujo la biomasa en gran parte del dominio, con incrementos localizados en el sur de la bahía.

La distribución del zooplancton se representó en la Figura 9-26, donde en el promedio anual se incrementó la biomasa zooplanctónica en gran parte del dominio, con excepción de la

zona norte de la bahía. En la estación de verano se presentaron incrementos de biomasa en gran parte del dominio y en la zona norte se produjo una disminución de la biomasa, cuya superficie disminuyó con la profundidad. Durante las estaciones de otoño e invierno se redujo la biomasa de zooplancton en todo el dominio, cuyos mínimos se ubicaron en la zona norte de la bahía. En la estación de primavera, de forma similar a la estación de verano, aumentó la biomasa de zooplancton en gran parte del dominio, aunque con una mayor magnitud, concentrándose la biomasa en las cercanías de la península Los Molles. Como en la estación de verano, en la zona norte de la bahía ocurrieron reducciones de la biomasa, aunque en esta estación la superficie se mantuvo similar entre las capas analizadas.

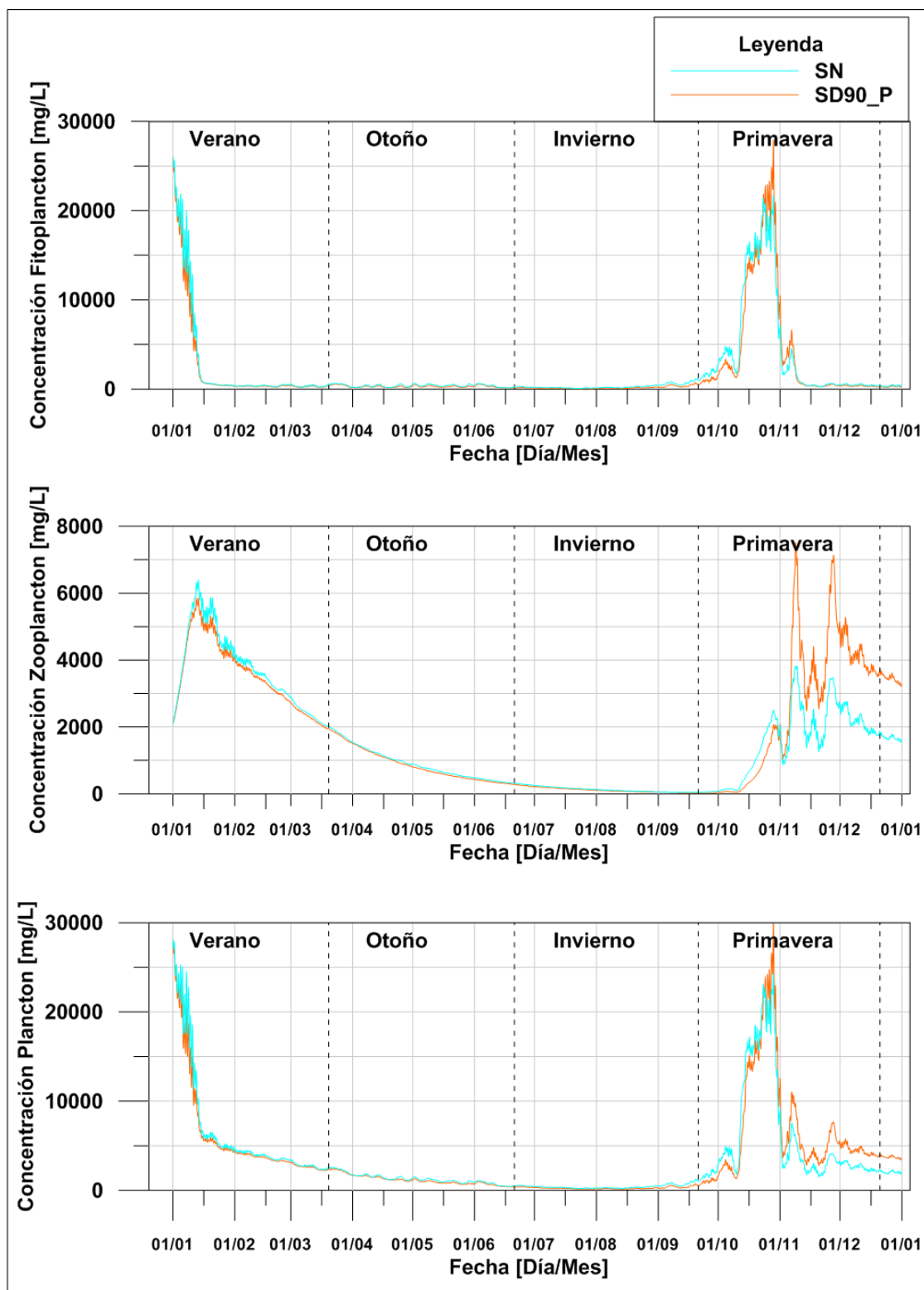


Figura 9-23 Serie de tiempo de la integración de organismos al interior del dominio en el caso SD90_P y SN.

Fuente: Elaboración propia.

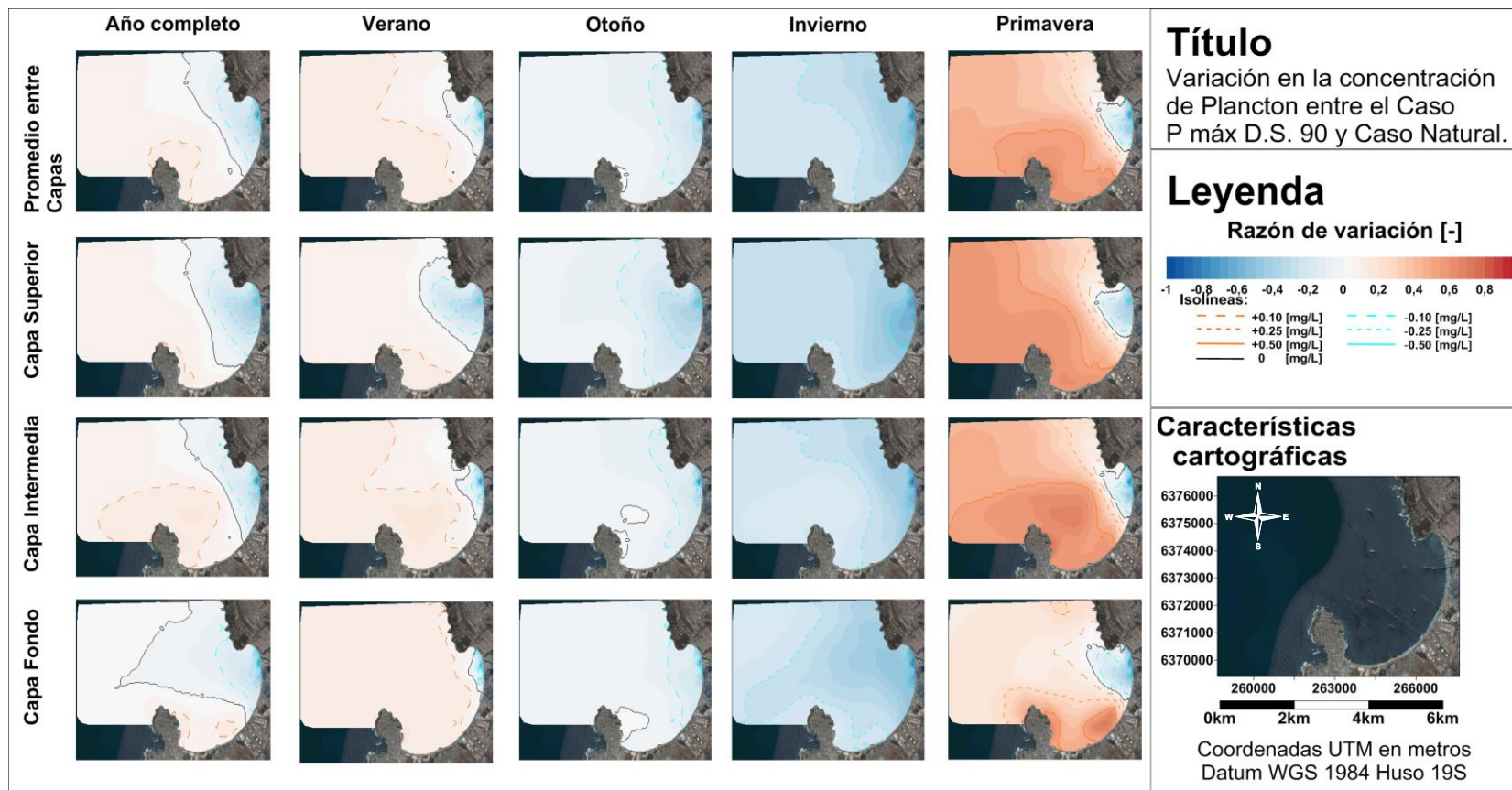


Figura 9-24 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SD90_P y SN.
Fuente: Elaboración propia.

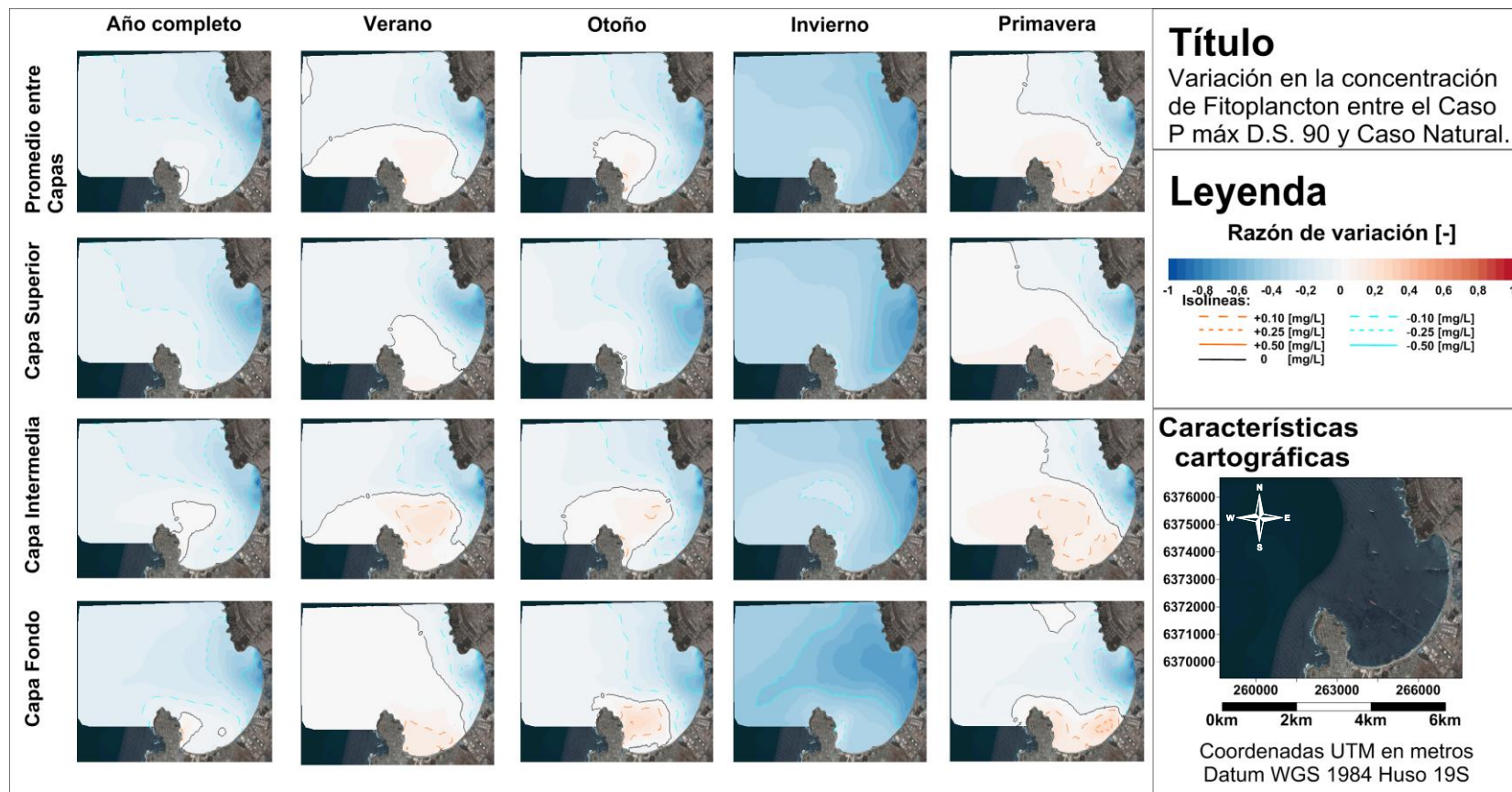


Figura 9-25 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SD90_P y SN.

Fuente: Elaboración propia.

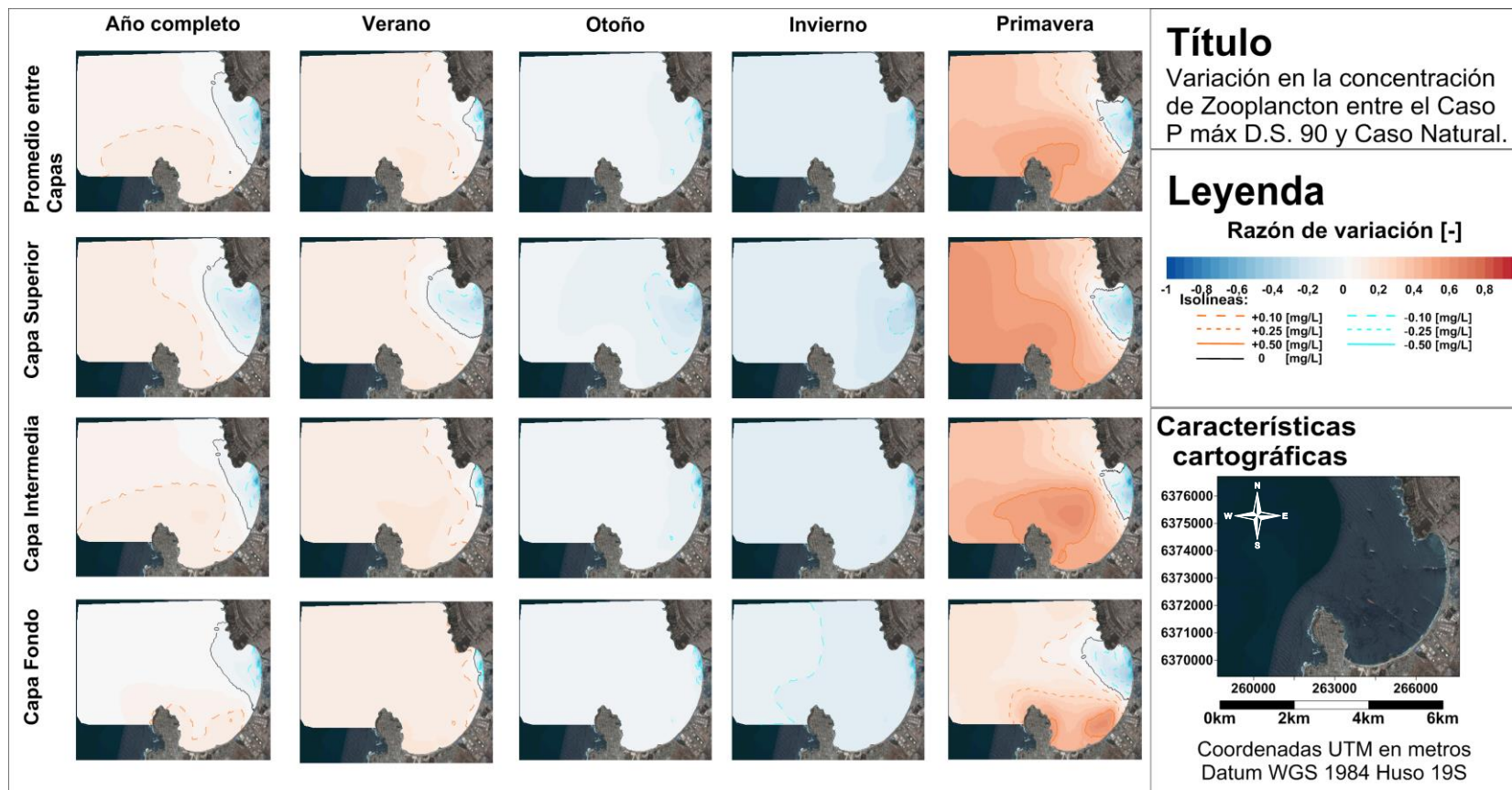


Figura 9-26 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SD90_P y SN.

Fuente: Elaboración propia.

En la simulación del caso SD90_NTK, la integración en el dominio y el tiempo, respecto al caso SN produjo un incremento en el fitoplancton de 3.34 [%]. Las variables zooplancton, plancton y producción de fitoplancton y zooplancton disminuyeron sus valores en 10.69 [%], 2.85 [%], 0.14 [%] y 14.97 [%], respectivamente. Este comportamiento fue semejante al caso SA, cuya justificación se realizó en el capítulo 10.2.1.

En la Figura 9-27 se presentó la serie de tiempo resultante de la integración espacial de las variables fitoplancton, zooplancton y plancton. El comportamiento de la variable plancton presentó una similitud al fitoplancton. En este comportamiento, desde la estación verano hasta invierno, se presentaron similitudes entre la simulación del caso SD90_NTK y el caso SN. La estación de primavera que resaltó por los incrementos de biomasa, presentó una menor biomasa en el caso SD90_NTK durante el primer incremento, mientras que, en los siguientes dos aumentos de biomasa la magnitud de este caso superó al caso SN, en especial en el último aumento de biomasa. Al igual que el plancton y fitoplancton, el zooplancton mantuvo un comportamiento semejante en los casos SD90_NTK y SN, desde la estación de verano hasta el invierno, aunque con una menor magnitud en el caso SD90_NTK. En la estación de primavera el caso SD90_NTK se volvió notoriamente menor, hasta el final de la estación, cuando las magnitudes de los casos analizados se igualaron. Las ilustraciones de las distribuciones de las variables organismos en el dominio durante la media de las estaciones del caso SD90_NTK, se ilustraron en la Figura 9-28, para el plancton, Figura 9-29, para el fitoplancton y en la Figura 9-30, para el zooplancton. La variable plancton presentada en la Figura 9-28, ilustró en la media anual, zonas con incrementos de biomasa, en la capa superficial, hacia el oeste del dominio y en la capa intermedia en las cercanías de la península Los Molles, mientras en la capa de fondo, fue evidente la tendencia a la reducción de biomasa en el dominio. Durante la estación de verano se reveló una marcada disminución de la concentración de plancton en el norte de la bahía, con ligeros incrementos hacia el oeste del dominio, en las capas analizadas. En la capa de fondo se mostraron leves incrementos en gran parte del dominio, con excepción de la zona norte de la bahía. Entre las estaciones otoño e invierno, predominaron las reducciones de biomasa del plancton, con los valores más bajos en la estación de invierno en la zona norte de la bahía. La estación de primavera registró incrementos de biomasa con excepción de la zona norte de la bahía, con mayores valores en las cercanías de la península Los Molles. En la capa de fondo predominó la pérdida de biomasa, aunque en el sur de la bahía hubo aumentos de biomasa.

La variable fitoplancton ilustrada en la Figura 9-29, mostró en la media anual incrementos de biomasa hacia el oeste del dominio y variaciones negativas en el norte de la bahía, con excepción en la capa de fondo, que redujo su biomasa en gran parte del dominio. En la estación de verano se presentó la capa superficial con disminuciones de biomasa en gran parte del dominio e incrementos en el sur de la bahía, cuya superficie se incrementó con la profundidad. Las estaciones de otoño e invierno mostraron un comportamiento semejante a través de la columna de agua, donde predominaron las disminuciones de la concentración de fitoplancton. La estación de primavera se caracterizó por los grandes incrementos de biomasa, principalmente en el oeste del dominio, aunque permanecieron las reducciones de biomasa en el norte de la bahía, con una superficie aproximadamente constante a través de la columna de agua.

La distribución de la variable zooplancton presentada en la Figura 9-30 reveló un predominio en la media anual a través de la columna de agua de variaciones negativas de la biomasa, cuyas mayores magnitudes se localizaron en el norte de la bahía. El dominio en la estación de verano se encontró dividido en zonas hacia el este con reducciones de biomasa y zonas

con ligeros incrementos de la biomasa hacia el oeste del dominio. Este comportamiento se presentó en las capas superficial e intermedia y en la capa de fondo solo se produjo una pequeña zona en el norte de la bahía con pérdidas de concentración de zooplancton. Desde la estación de otoño hasta la estación de primavera ocurrieron reducciones de biomasa en todo el dominio y en toda la columna de agua, con las mayores pérdidas en la estación de primavera y hacia el norte de la bahía.

Con los resultados señalados se puede ver cierta similitud en la conducta del caso SD90_NTK y el caso SA, con diferencias en valores señalados en la Tabla 9-4.

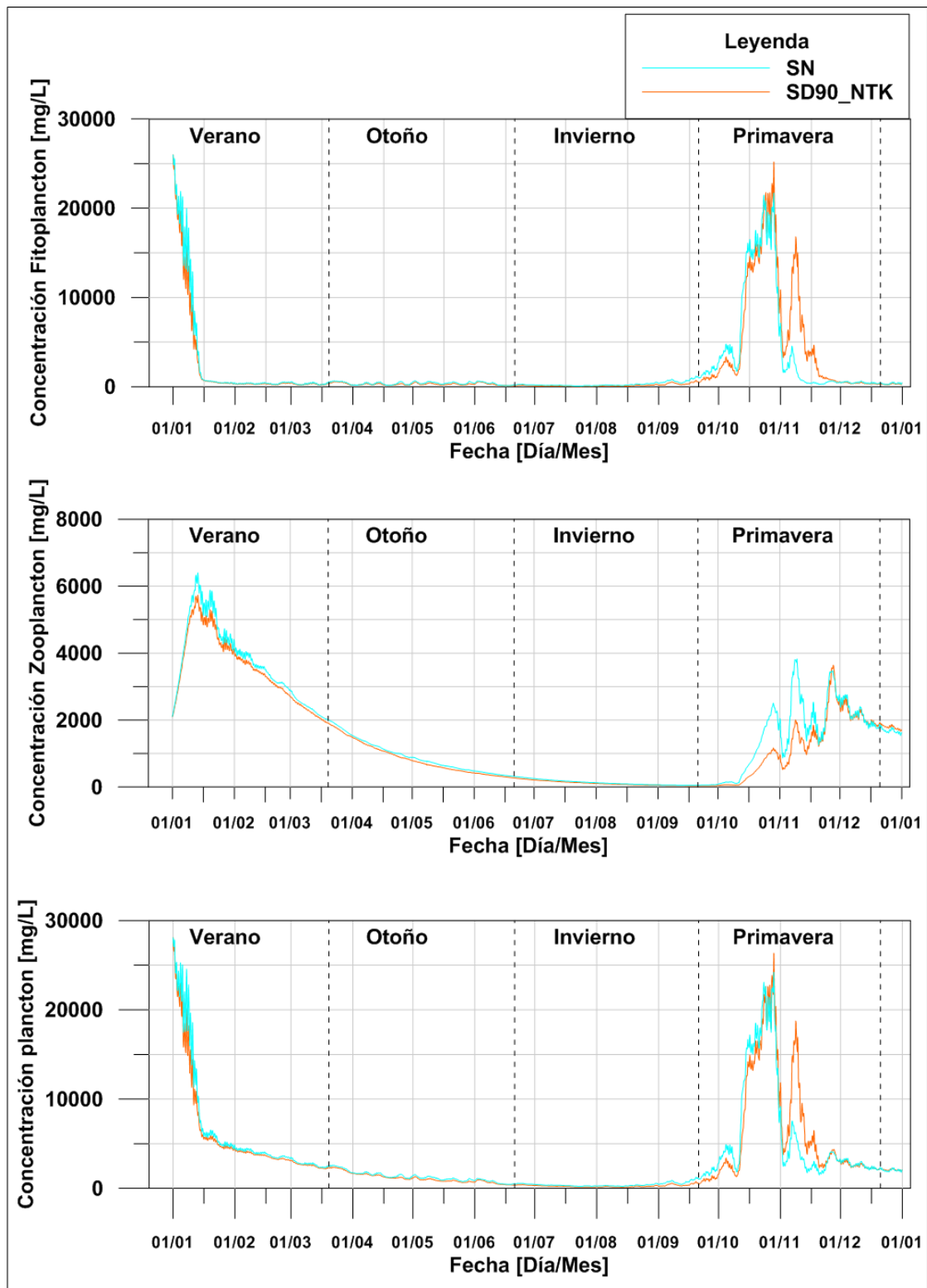


Figura 9-27 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SD90_NTK y SN.
Fuente: Elaboración propia.

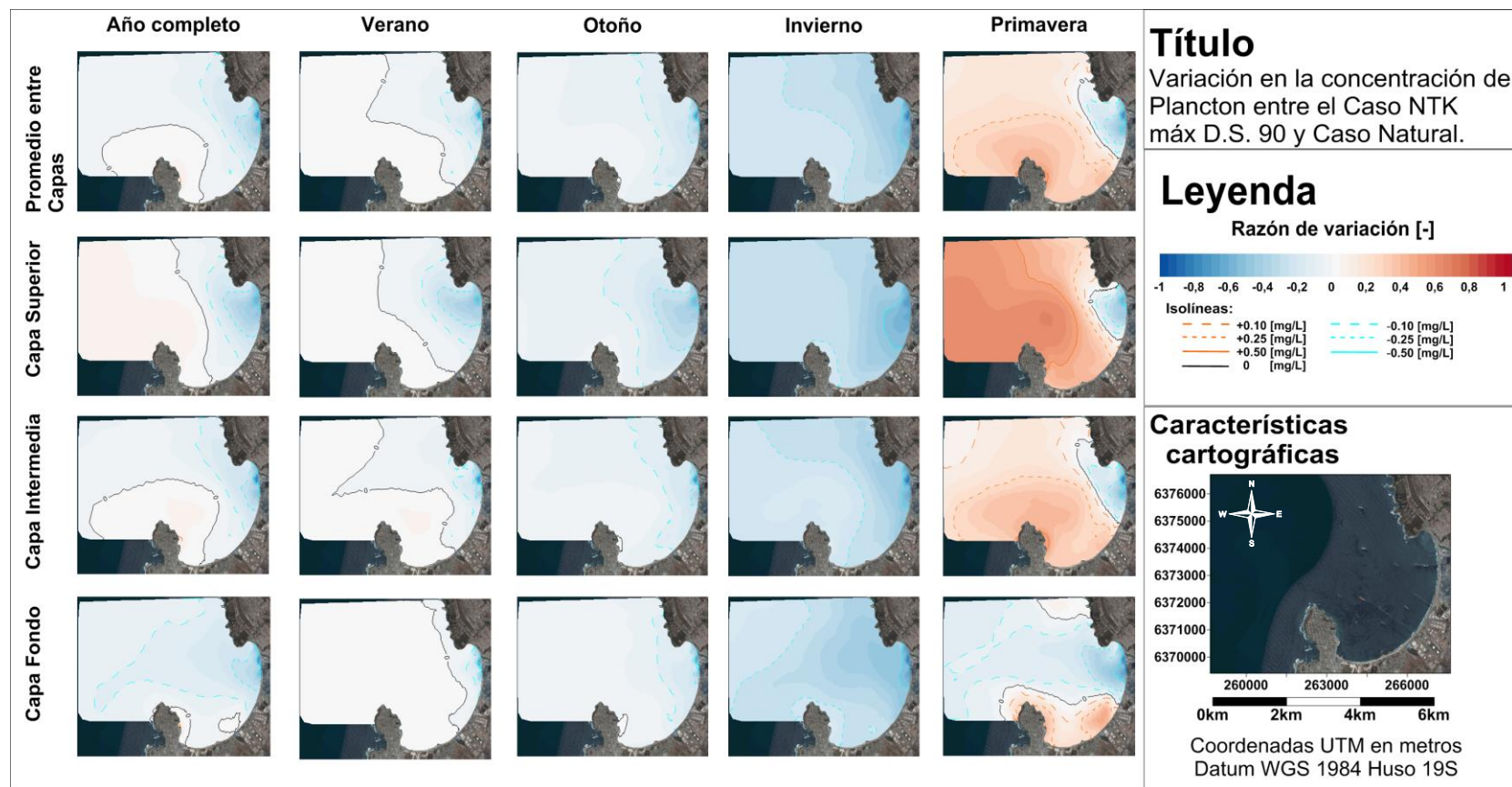


Figura 9-28 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos D90_NTK y SN.
Fuente: Elaboración propia.

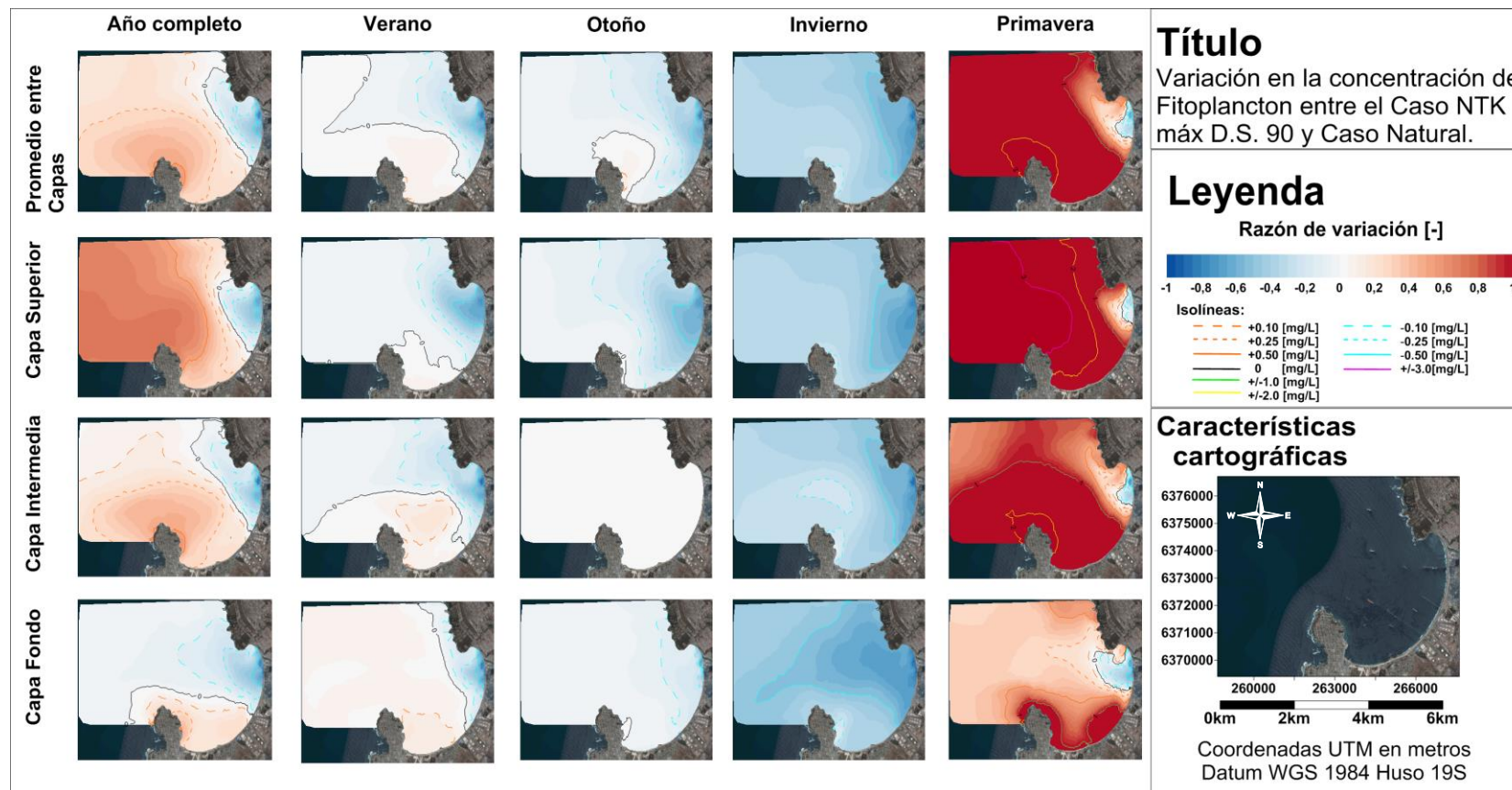


Figura 9-29 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SD90_NTK y SN.

Fuente: Elaboración propia.

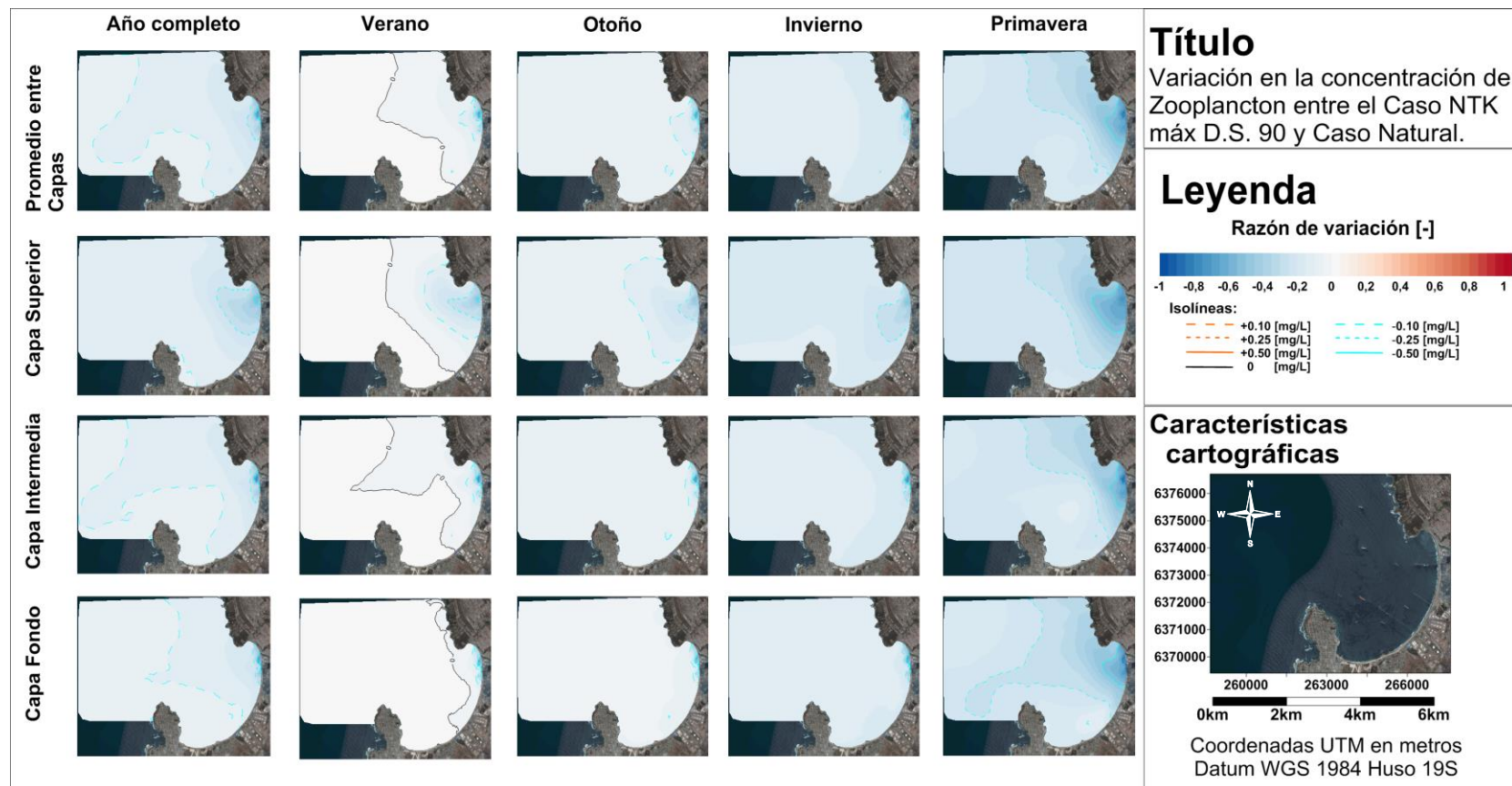


Figura 9-30 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SD90_NTK y SN.

Fuente: Elaboración propia.

El caso SA+D13 al someterse en una integración espacial y temporal (Tabla 9-4), respecto al caso SN, se registró un incremento en el fitoplancton igual a 0.09 [%]. Las variables zooplancton, plancton y producciones de fitoplancton y zooplancton se disminuyeron en 5.15 [%], 2.23 [%], 1.78 [%] y 2.79 [%], respectivamente. El comportamiento señalado fue similar al correspondiente del caso SA, aunque con menores magnitudes, lo cual fue muy relevante considerando que el caso SA+D13 incluyó una descarga. La justificación de este comportamiento se detalló en el capítulo 10.2.1.

En adelante se analizaron las variables simuladas en el caso SA+D13 contra el caso SA, como su caso base.

La Figura 9-31 donde se presentó la integración en el dominio de las variables relacionadas con los organismos, revelaron conductas semejantes entre las variables fitoplancton y plancton. Desde la estación de verano hasta la estación de invierno las concentraciones de los casos SA+D13 y SA se asemejaron. En la estación de primavera, durante el primer incremento de biomasa, el caso SA+D13 superó ligeramente al caso SA, aunque en los siguientes dos incrementos de biomasa el caso SA fue mayor al caso SA+D13.

La variable zooplancton mostró un comportamiento semejante entre los casos SA+D13 y SA, desde la estación de verano hasta la estación de invierno, con magnitudes levemente menores en las concentraciones SA. En la estación de primavera se presentaron mayores concentraciones de zooplancton en la simulación del caso SA+D13, hasta el 1 de diciembre cuando se igualaron las concentraciones.

Las distribuciones de las variables de organismos, del caso SA+D13 contra el caso SA, integradas en las estaciones fueron presentadas en la Figura 9-32, para la variable plancton, la Figura 9-33, para la variable fitoplancton, y Figura 9-34, para la variable zooplancton.

La variable plancton (Figura 9-32) señaló en la media anual incrementos de biomasa en la mayor parte del dominio y en las tres capas analizadas, ocurriendo los mayores incrementos en la capa de fondo. En la estación de verano el dominio se dividió hacia el este donde se incrementaba la concentración de plancton y en el oeste donde ocurrieron leves reducciones. La superficie con incrementos se redujo con la profundidad. En las estaciones de otoño e invierno predominaron los incrementos de biomasa en toda la columna de agua, generándose los mayores valores en la estación de invierno, en el norte de la bahía. En la estación de primavera, en la capa superficial se ilustró una gran zona con reducciones de la biomasa ubicada en el oeste del dominio. En la capa intermedia y de fondo predominó el incremento de la biomasa en gran parte del dominio, siendo la capa de fondo hacia el norte de la bahía, donde ocurrieron las mayores magnitudes.

En la Figura 9-33 se presentó la distribución de la variable fitoplancton, donde en la media anual se registró una tendencia en el incremento de la biomasa en gran parte del dominio en las tres capas analizadas, cuyos mayores valores se localizaron en el norte de la bahía. Durante la estación de verano se presentó en la capa superficial incrementos en la mayor parte del dominio y con la profundidad aparecieron zonas de reducción de la biomasa, hasta la capa de fondo donde predominó la variación negativa de biomasa en el oeste del dominio. De forma similar, en la estación de otoño se establecieron incrementos de biomasa en todo el dominio, en la capa superficial y en la capa intermedia y de fondo aparecieron zonas cercanas a la península Los Molles donde se redujeron levemente la biomasa. En la estación de invierno predominó el aumento de la biomasa en todo el dominio, en las tres capas analizadas, centrándose las mayores magnitudes al interior de la bahía, aunque en la capa intermedia y fondo se mostraron incrementos alrededor de punta Ventanilla. Durante la estación de primavera ocurrieron zonas con reducciones e incrementos de la

concentración de fitoplancton, presentándose las mayores magnitudes en la capa fondo hacia el norte de la bahía.

La distribución de la variable zooplancton fue ilustrada en la Figura 9-34, donde en la media anual se identificaron aumentos de la biomasa en gran parte del dominio y a través de la columna de agua. En la estación de verano se redujo la biomasa en el oeste del dominio e incrementó al interior de la bahía. Desde la estación de otoño predominó el aumento de la biomasa en todo el dominio, incrementándose con el paso de las estaciones, hasta la estación de primavera, donde se evidenció el aumento de zooplancton en el norte de la bahía.

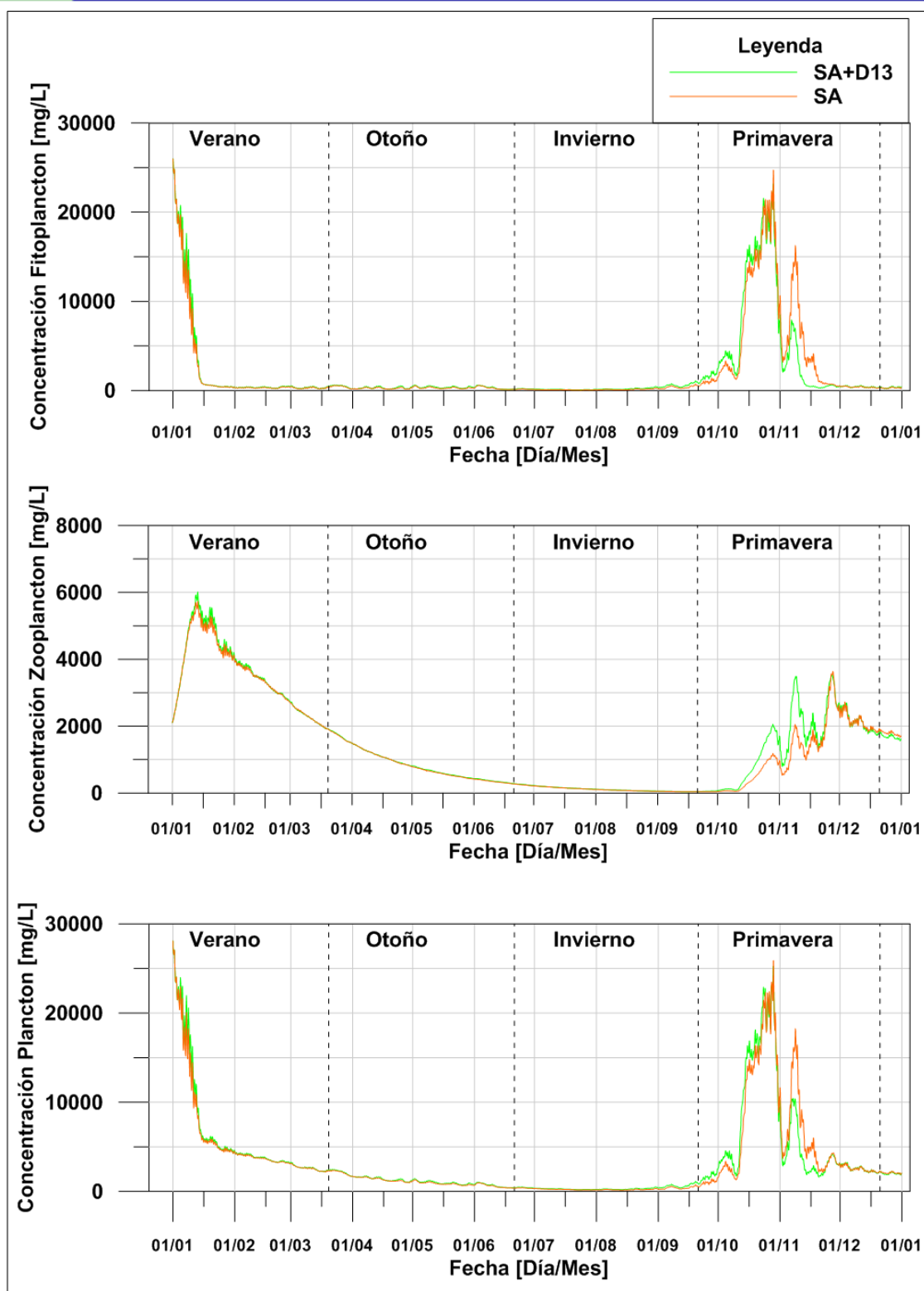


Figura 9-31 Serie de tiempo de la integración de organismos en el dominio en el caso SA+D13 y SA.
Fuente: Elaboración propia.

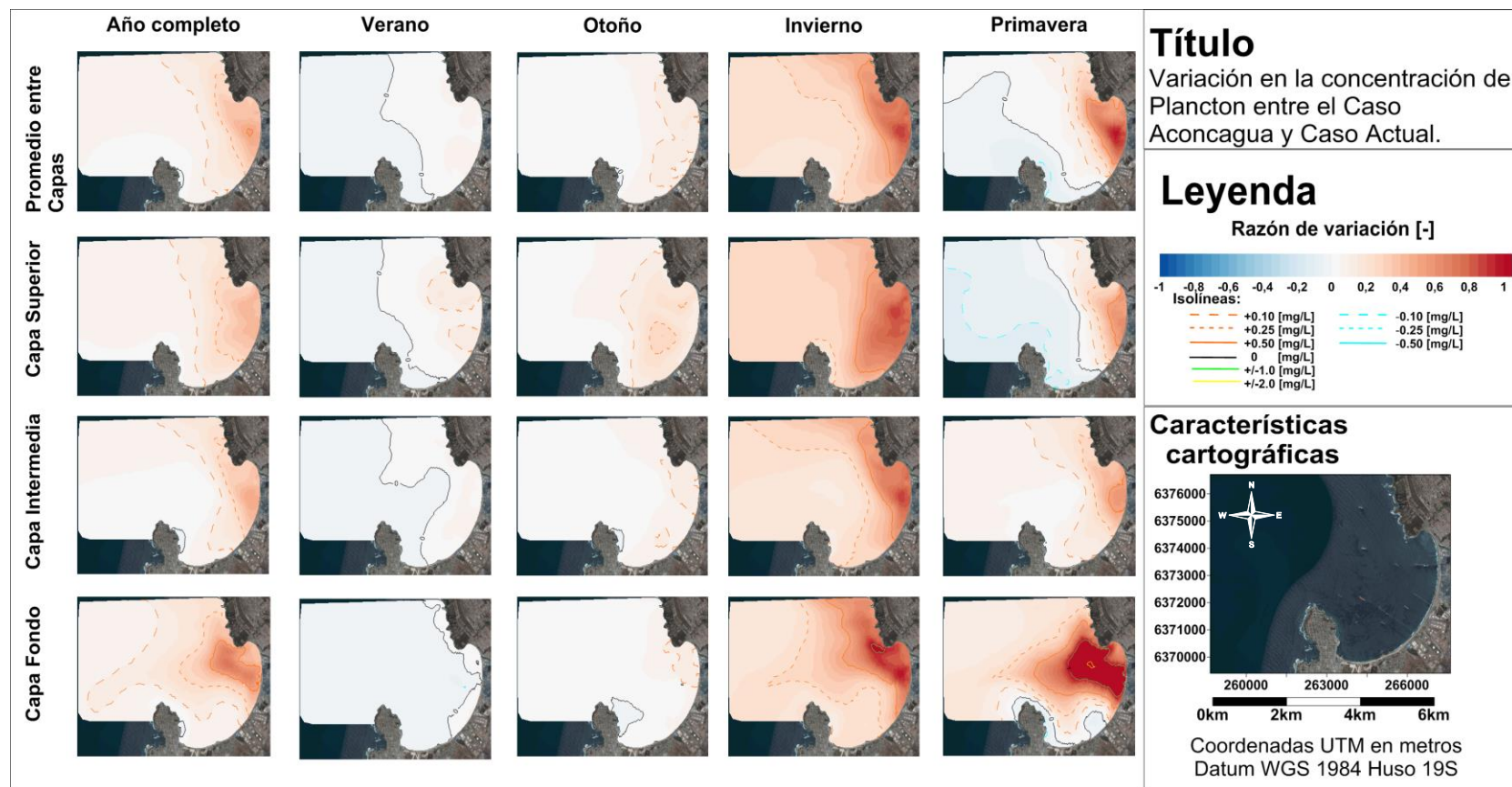


Figura 9-32 Diferencia en concentraciones de organismos entre los casos SA+D13 y SA.

Fuente: Elaboración propia.

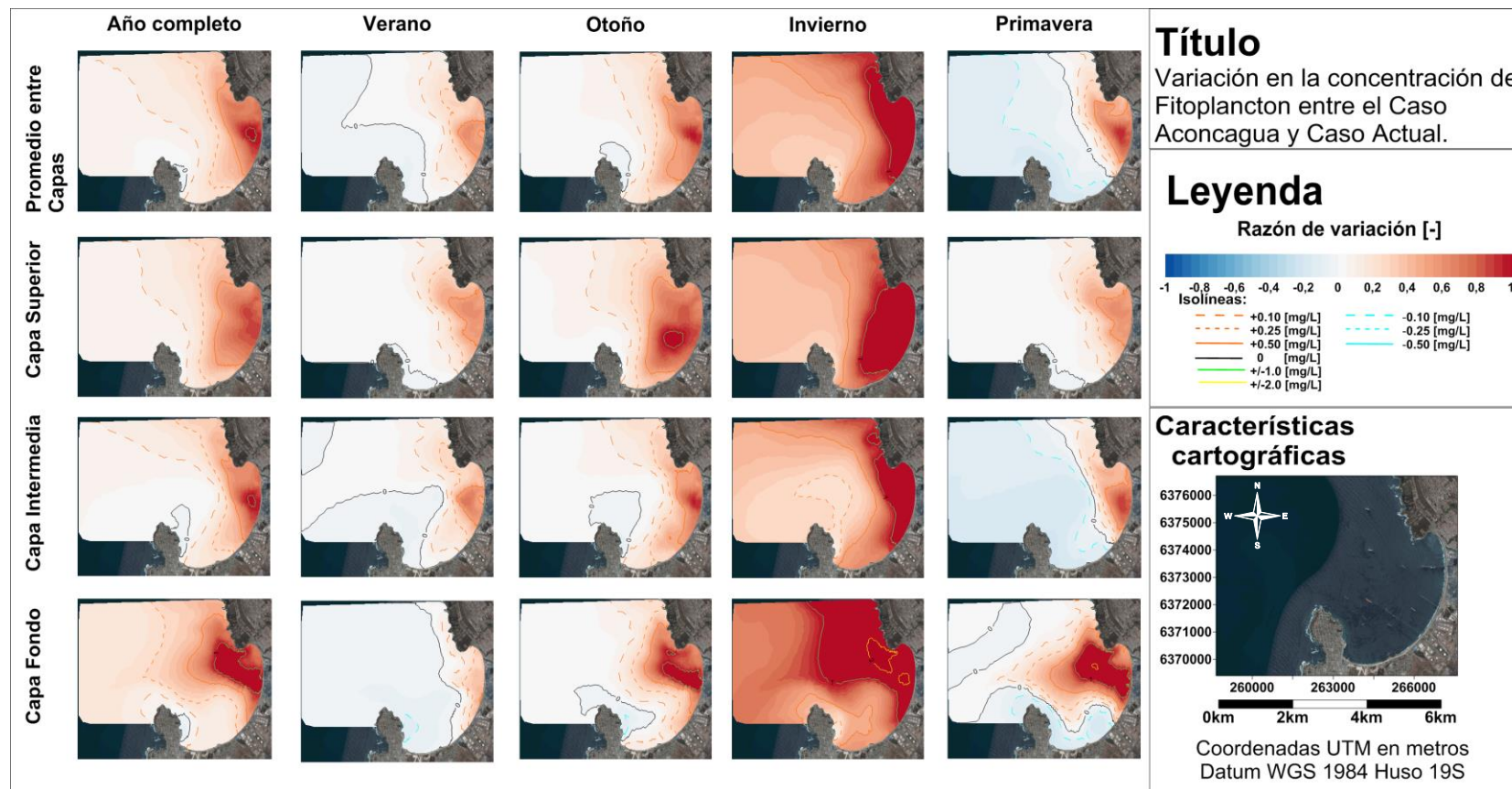


Figura 9-33 Diferencia en concentraciones de fitoplancton entre los casos SA+D13 y SA.
Fuente: Elaboración propia.

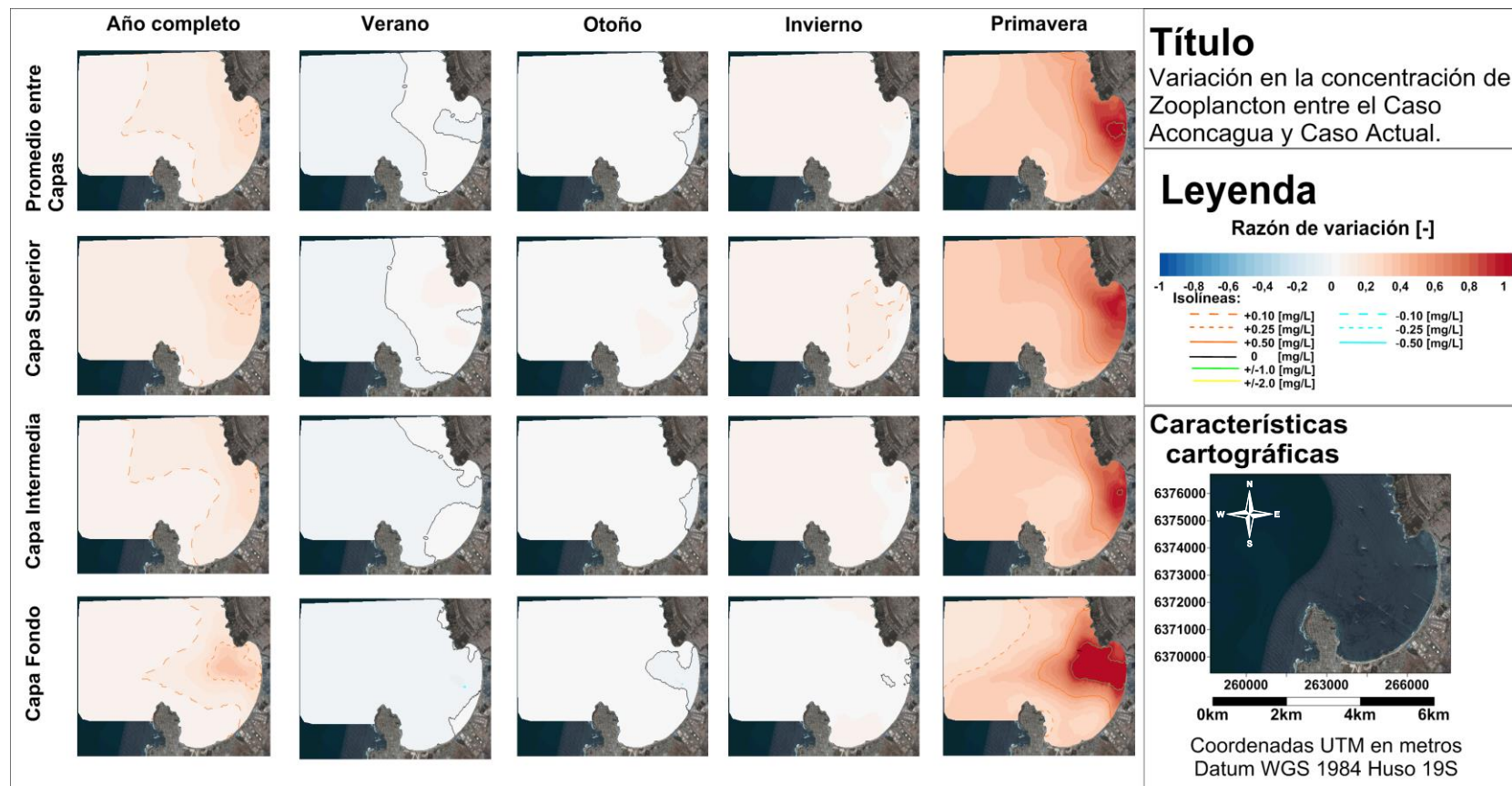


Figura 9-34 Diferencia en concentraciones de zooplancton entre los casos SA+D13 y SA.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9-35 y Figura 9-36 ilustraron los promedios anuales de las producciones de fitoplancton y de zooplancton, respectivamente, para cada simulación realizada. En una visión generalizada, se puede notar que, la producción de fitoplancton ocurrió, principalmente, en las aguas superficiales, mientras que, la producción de zooplancton fue relevante también en la capa intermedia, con los mayores valores en la capa superficial. La producción de fitoplancton en el caso SN se presentó con mayores magnitudes desde la península Los Molles hasta punta Horcón, pasando por los sectores costeros. Las magnitudes se resaltaron de mayor forma en la península Los Molles y punta Ventanilla. El caso SA se diferenció del caso SN, por incrementos en la producción en la península Los Molles y una reducción en el norte de la bahía. Los casos con descargas unitarios, SN+D3 y SN+D4, se ocurrieron ligeros incrementos en comparación al caso SN, siendo más notorios en el sur de la bahía. El caso SD90_T se presentó un comportamiento similar al caso SA, con incrementos en la producción cercana a la península Los Molles y una menor producción en el sector norte de la bahía. Los casos SD90_NTK y SD90_P presentaron producciones de fitoplancton semejantes a las producidas en el caso SA, tanto en conducta como en magnitud. En el caso SA+D13 se ilustró un comportamiento con mayor similitud al caso SN, con respecto al caso SA, al homogeneizarse la producción en la bahía, pero también el valor de producción en la península Los Molles disminuye acercándose al caso SN.

La producción de zooplancton simulado en el caso SN presentó mayores valores en la capa superficial, en las afueras de la bahía, mientras que, en la capa intermedia, las mayores magnitudes se encontraron en la península Los Molles y en los alrededores de la punta Ventanilla. El caso SA, se diferenció respecto al caso SN por una reducción en la producción en el norte de la bahía, en la capa superficial, al igual que la capa intermedia, reduciéndose los incrementos entre punta Ventanilla y punta Horcón. En los casos con descargas unitarias, SN+D3 y SN+D4, se redujo la producción en el norte de la bahía en la capa superficial e intermedia, en comparación del caso SN, pero en menor magnitud que el caso SA. En el caso SD90_T, al igual que el caso SA, disminuyó la producción en el norte de la bahía en la capa superficial e intermedia, aunque alcanzó valores ligeramente menores. El caso SD90_P, en contraste al caso SN, se incrementó la producción de zooplancton hacia el oeste del dominio y en el sur de la bahía, manteniéndose una reducción al norte de la bahía, por otro lado, en la capa intermedia se incrementó la producción en la península Los Molles y en el norte de la punta Ventanillas. El caso SD90_NTK se asemejó al caso SA tanto en la distribución de la producción como en la magnitud. El caso SA+D13 en comparación con el caso SN presentó reducciones de la biomasa en el norte de la bahía, más notablemente en la capa superior, sin embargo, se debe resaltar que, en contraste al caso SA, fue notable el aumento de la producción en la capa superficial e intermedia en la zona norte de la bahía.

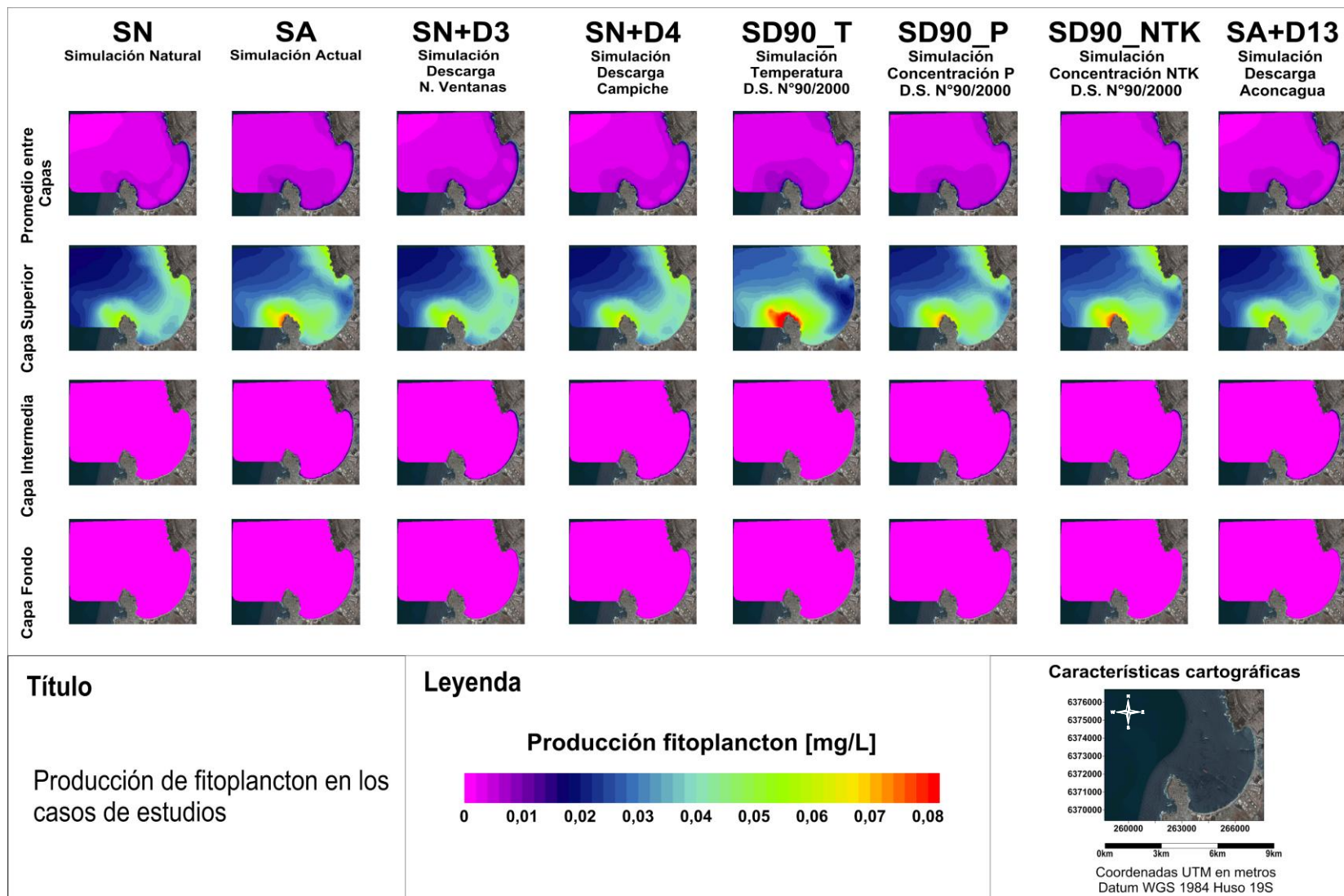


Figura 9-35 Distribución de la producción media de fitoplancton en los casos de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

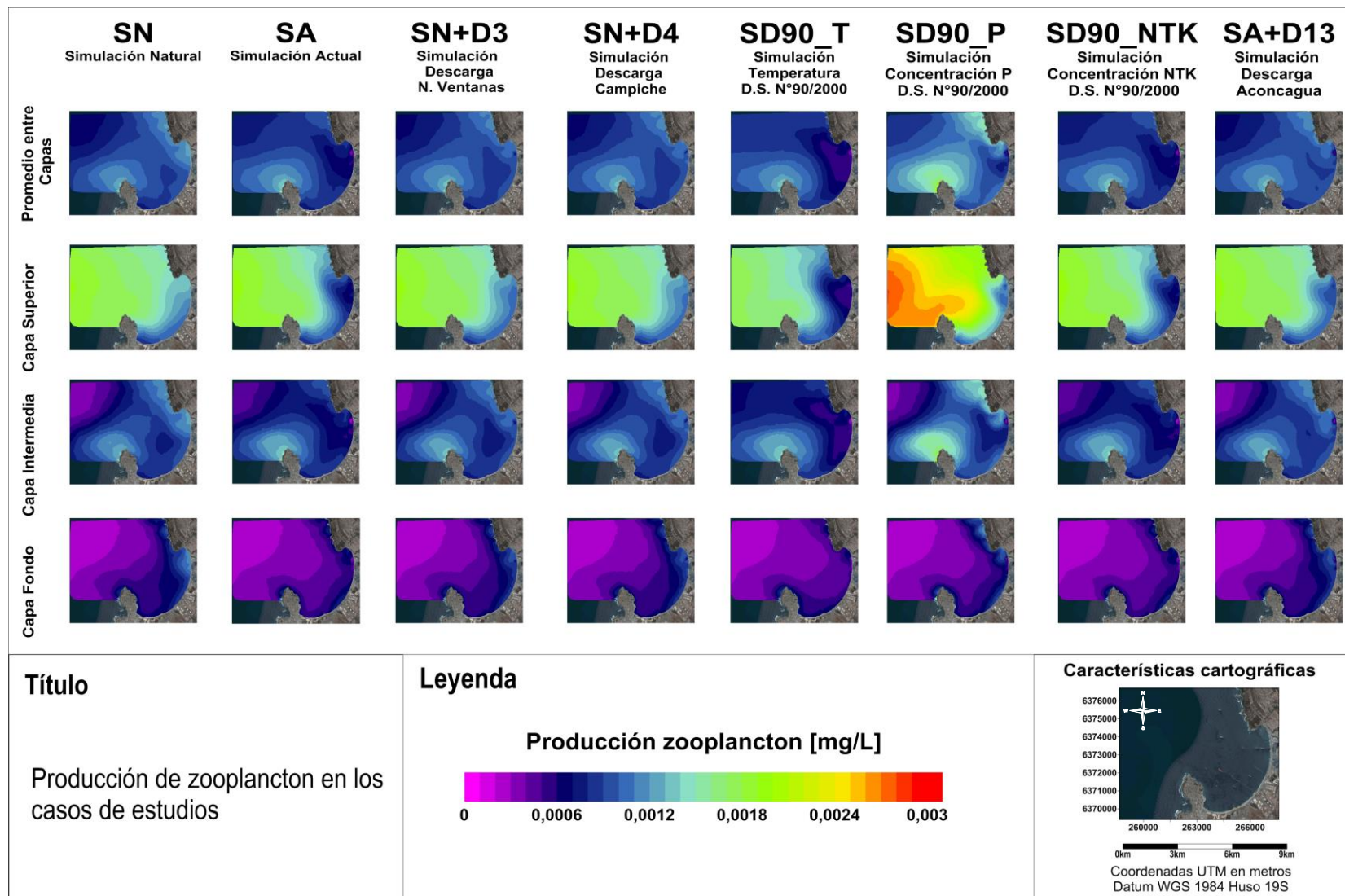


Figura 9-36 Distribución de la producción media de zooplancton en los casos de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

9.3.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LOS ORGANISMOS POR CAPTACIONES

Según los datos recopilados de abundancia de ictioplancton para cada especie analizada (Tabla 6-18) y los caudales de captación, se estimaron las tasas de individuos succionados por día (E_i) en cada toma de agua, como se señaló en la Tabla 9-5. Estos datos correspondieron a la tasa de succión en el comienzo de la simulación y fue cambiado posteriormente según los individuos presentes en las cercanías de la captación, los cuales, a su vez, dependieron de la concentración de zooplancton simulado en los mismos espacios.

Tabla 9-5 Tasa de succión inicial de individuos.

Et [ind. /d]			Anchoveta (<i>Engraulis ringens</i>)		Sardina común (<i>Strangomera bentincki</i>)	
N	Id.	Nombre	Huevos	Larvas	Huevos	Larvas
1	C1	VENTANAS 1	43,506,375,430	101,487,351	47,565,869,470	139,578,404
2	C2	VENTANAS 2	69,570,740,160	162,287,712	76,062,248,640	223,198,848
3	C3	NUEVA VENTANAS	146,902,921,920	342,680,544	160,610,143,680	471,298,176
4	C4	CAMPICHE	146,902,921,920	342,680,544	160,610,143,680	471,298,176
5	C6	GASMAR TOTAL	2,088,500,710	4,871,847	2,283,374,590	6,700,388
6	C9	GNL QUINTERO	57,858,019,200	134,965,440	63,256,636,800	185,621,760

Fuente: Elaboración propia.

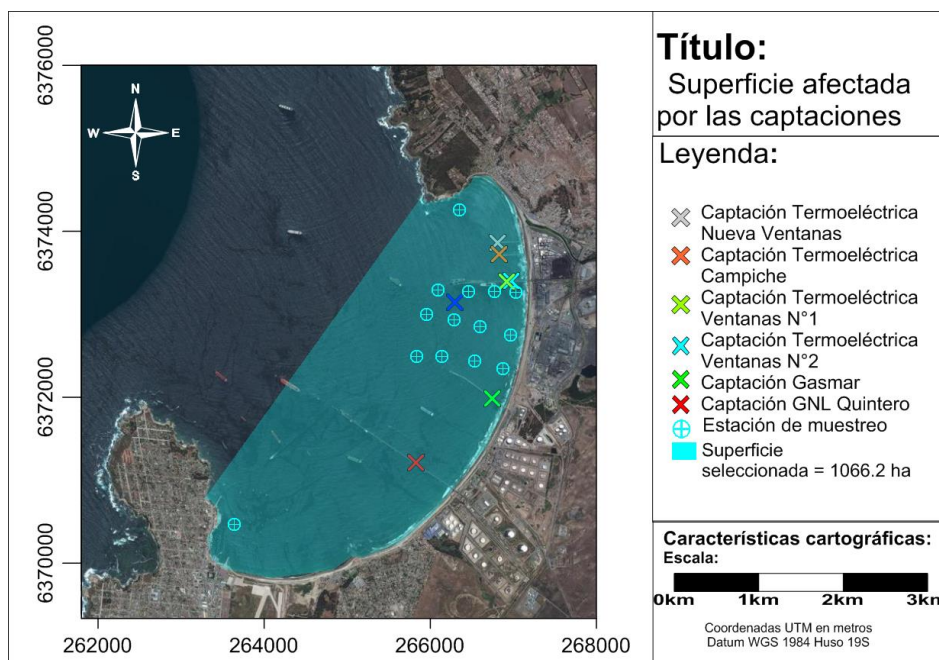


Figura 9-37 Superficie afectada por las captaciones.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de la mortalidad por arrastre (m) se seleccionó la superficie mostrada en la Figura 9-37, la cual cubre la superficie de la bahía afectada por las captaciones. Esta superficie se estimó, según lo establecido en Nielsen *et al.* (2005), como el área donde se realizaron los estudios para la estimación del ictioplancton. A causa de que los datos de ictioplancton para esta memoria correspondieron a las mediciones realizadas en los puntos señalados en la Figura 6-4, los cuales se distribuyeron principalmente en la zona norte de la bahía, pero incluyeron puntos de control en los extremos norte y sur de ésta, se decidió seleccionar la superficie completa de la bahía. Se debe agregar que, al interior de la bahía, se distribuyeron también las captaciones, como se ilustró en la Figura 9-37. Finalmente, el área seleccionada correspondió a un valor de 1066.2 [ha] que, al asumir una profundidad constante, se estimó un volumen de 266.5 [hm³]. Con estos valores, en la Tabla 9-6 se establecieron las mortalidades por arrastre para cada captación.

Tabla 9-6 Mortalidad por arrastre en las distintas captaciones.

N	Id.	Nombre	m [1/d]
1	C1	VENTANAS 1	0.00100
2	C2	VENTANAS 2	0.00160
3	C3	NUEVA VENTANAS	0.00337
4	C4	CAMPICHE	0.00337
5	C6	GASMAR TOTAL	0.00005
6	C9	GNL QUINTERO	0.00133

Fuente: Elaboración propia.

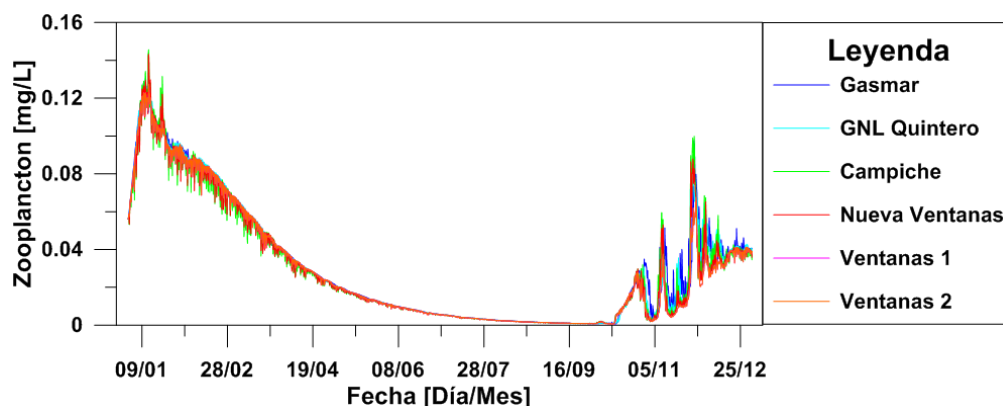


Figura 9-38 Concentración de zooplancton en cada punto de captación.

Fuente: Elaboración propia.

Según lo establecido en el capítulo 6.5.3, el cambio de la tasa de succión de individuos durante la simulación se estimaría a partir de la tasa de succión inicial (Tabla 9-5) y la variación de concentración de zooplancton durante la ventana de tiempo simulada en los sitios donde se ubican las tomas de agua. Como el supuesto empleado en esta memoria indica que las tomas de agua se ubican en el fondo marino, se extrajeron las concentraciones de zooplancton en los elementos numéricos (de la grilla de simulación) más cercanos al fondo marino. En la Figura 9-38 se representan las concentraciones de zooplancton en cada punto de captación, de donde se puede notar una baja diferencia en concentraciones entre los distintos sitios. Es importante mencionar que la menor penetración de luz en estos sectores, provoca una baja producción de vida marina.

Al asumir caudales constantes y la tasa de succión inicial indicada en la Tabla 9-5 para cada captación que variará según el correspondiente cambio de concentración de zooplancton señalado en la Figura 9-38, se obtuvo un número de individuos capturados durante el periodo simulado por cada toma de agua de las especies y estadios analizados según es mostrado en la Figura 9-39. Según lo mencionado, la variabilidad de concentración del zooplancton entre los puntos de captaciones fue baja y, por ello, el caudal de succión fue fundamental, resaltando así las captaciones de Campiche y Nueva Ventanas. Los individuos capturados tanto en las especies anchovetas y sardinas, mantuvieron un orden de magnitud de mil millones de huevos (E+10) y cien millones de larvas (E+09).

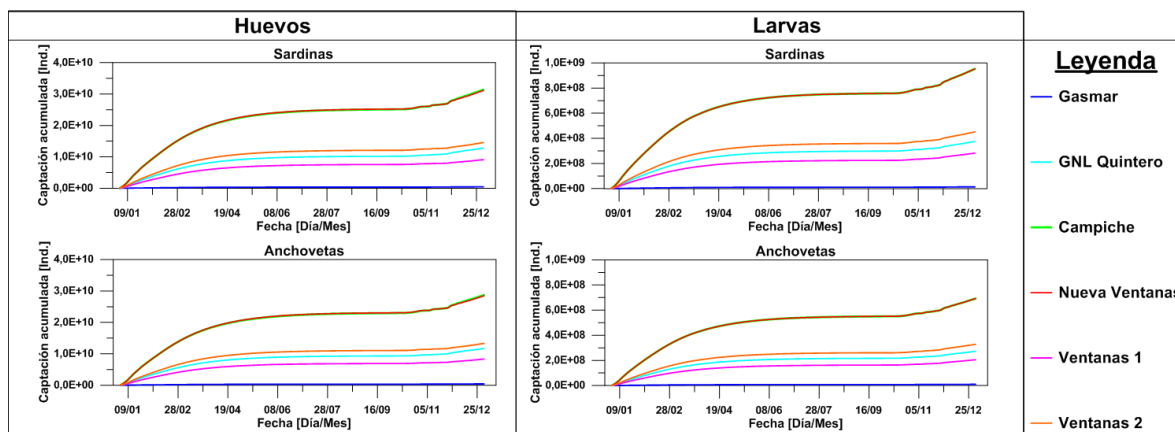


Figura 9-39 Individuos, huevos y larvas, captados durante la simulación.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-7 Pérdidas de adultos según el estadio de la especie anchovetas (*Engraulis ringens*).

N	Id.	Nombre	Huevos [individuos]			Larvas [individuos]		
			AEL 1	AEL2	AEL 3	AEL 1	AEL2	AEL 3
1	C1	VENTANAS 1	139	247	486	26	51	3,167
2	C2	VENTANAS 2	223	395	777	41	82	5,015
3	C3	NUEVA VENTANAS	476	844	1,660	88	175	10,424
4	C4	CAMPICHE	480	852	1,674	88	177	10,513
5	C6	GASMAR TOTAL	7	13	5	1	3	163
6	C9	GNL QUINTERO	95	347	682	36	72	4,424
Total			1,520	2,698	5,303	280	560	33,706

Leyenda:

AEL 1: Pérdida del adulto según la mortalidad natural.

AEL 2: Pérdida del adulto según la mortalidad natural, con el supuesto que el primer estadio se encuentra en a la mitad de su vida.

AEL3: Pérdida del adulto según la mortalidad natural, con el cálculo sobre el primer estadio, relacionando con el coeficiente de arrastre.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-8 Pérdidas de adultos según el estadio de la especie sardinas (*Strangomera bentincki*).

N	Id.	Nombre	Huevos [individuos]			Larvas [individuos]		
			AEL 1	AEL2	AEL 3	AEL 1	AEL2	AEL 3
1	C1	VENTANAS 1	2	4	15	3	5	1,466
2	C2	VENTANAS 2	3	6	25	4	9	446
3	C3	NUEVA VENTANAS	6	12	53	9	18	1,466
4	C4	CAMPICHE	6	12	53	9	18	1,479
5	C6	GASMAR TOTAL	0	0	1	0	0	23
6	C9	GNL QUINTERO	3	5	22	4	8	623
Total			20	39	168	29	58	5,504

Leyenda:
 AEL 1: Pérdida del adulto según la mortalidad natural.
 AEL 2: Pérdida del adulto según la mortalidad natural, con el supuesto que el primer estadio se encuentra en a la mitad de su vida.
 AEL3: Pérdida del adulto según la mortalidad natural, con el cálculo sobre el primer estadio, relacionando con el coeficiente de arrastre.

Fuente: Elaboración propia.

Con la sumatoria de los individuos capturados en todas las tomas de agua al finalizar la simulación numérica, se aplicaron las metodologías de pérdidas de Adulto Equivalente seleccionadas, con las cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 9-7 y Tabla 9-8 para las especies anchoveta (*Engraulis ringens*) y sardinas (*Strangomera bentincki*), respectivamente. En las anchovetas se estimaron pérdidas con los métodos AEL1, AEL2 y AEL3 de 1520, 2698 y 5303 adultos a partir de los huevos y a partir de las larvas fueron 280, 560 y 33706 adultos. En las sardinas se estimaron pérdidas con los métodos AEL1, AEL2 y AEL3 de 20, 39 y 168 adultos, a partir de los huevos, y a partir de larvas 29, 58 y 5504 adultos. En resumen, como se señaló en la Tabla 9-9, según la metodología AEL 1 se estimaron pérdidas de 1800 anchovetas y 49 sardinas, en la metodología AEL 2, pérdidas de 3258 anchovetas y 98 sardinas y según la metodología AEL 3 se calcularon de 39009 anchovetas y 5672 sardinas perdidas.

Para permitir la evaluación de los individuos capturados (Tabla 9-7 y Tabla 9-8) con las toneladas desembarcadas artesanalmente en la bahía se debió estimar la masa para cada especie analizada en su etapa adulta. Para la especie anchoveta se tiene que el peso máximo de un adulto corresponde a 300 [g] (Bristow, 1992), mientras que, para la especie sardina se empleó la equivalencia con la especie *Sardinops sagax* con un peso máximo de 486 [g] (Hart, 1973). Con esta información se construyó la Tabla 9-9, donde se indica la masa correspondiente a las pérdidas estimadas, de las cuales, la anchoveta presentó la máxima pérdida bajo la metodología AEL3 con 11.7 [Ton] y la mínima captura se calculó con la metodología AEL1 con 0.54 [Ton], por otro lado, la máxima pérdidas de sardinas se estimó con la metodología AEL3 con 2.76 [Ton] y la mínima cantidad se calculó mediante el método AEL1 con un total de 0.2 [Ton]. Esta información fue contextualizada con los datos recopilados de las toneladas desembarcadas artesanalmente por año en la bahía de Quintero presentados en la Figura 9-40, donde para las anchovetas se registraron solo dos registros, de 0.79 [Ton] y 8.00 [Ton] y para las sardinas se presentaron desembarcos desde las 0.06 [Ton] hasta las 32.67 [Ton]. Con los datos recopilados y estimados es posible notar que para las anchovetas la masa perdida de adultos equivalentes mediante el método AEL3 supera los registros de desembarcos artesanales y los resultados mediante los métodos

AEL1 y AEL2 se encuentran cercanos al menor registro. En el caso de las sardinas, solo el resultado mediante el método AEL3 presenta magnitudes contrastables con los registros de desembarcos artesanales.

Los resultados obtenidos demuestran que la captura de pequeños organismos (ictioplancton) con tomas de agua pueden presentar un valor de impacto semejante a algunos de los datos de la actividad pesquera según los registros medidos en la bahía de Quintero y sobre las especies analizadas. Es importante notar que los desembarcos artesanales presentan una reducción en la captura de las especies estudiadas en la bahía, donde en la anchoveta deja de ser capturada después del año 2004 y en las sardinas ocurre una reducción abrupta en sus capturas hasta el año 2008, cuando dejan de ser desembarcadas hasta el año 2012, cuando se obtienen magnitudes que permanecen hasta la actualidad. En la presente memoria no es posible asegurar que la reducción en el desembarco artesanal fue ocasionada por las captaciones de agua de mar, debido a que la información desembarco artesanal depende de varios factores, de carácter administrativo que pueden afectar la actividad como las vedas, el interés económico hacia alguna especie, dificultad en la captura de cierta especie o a factores ambientales que puedan afectar a la especie misma como puede ser el cambio climático o alteraciones locales por descargas o tomas de agua. Por esta razón el impacto asociado a las tomas de agua debería ser evaluado mediante estudios más profundos que estimen la población de las especies en la bahía, lo cual es un tema complejo que escapa de los objetivos de esta memoria.

Tabla 9-9 Masa correspondiente a los adultos perdidos por el total de captaciones durante la simulación anual.

	Anchoveta (<i>Engraulis ringens</i>)		Sardinas (<i>Strangomera bentinckii</i>)	
	[ind.]	[Ton]	[ind.]	[Ton]
AEL 1	1,800	0.54	49	0.02
AEL2	3,258	0.97	97	0.05
AEL 3	39,009	11.7	5,672	2.76

Fuente: Elaboración propia.

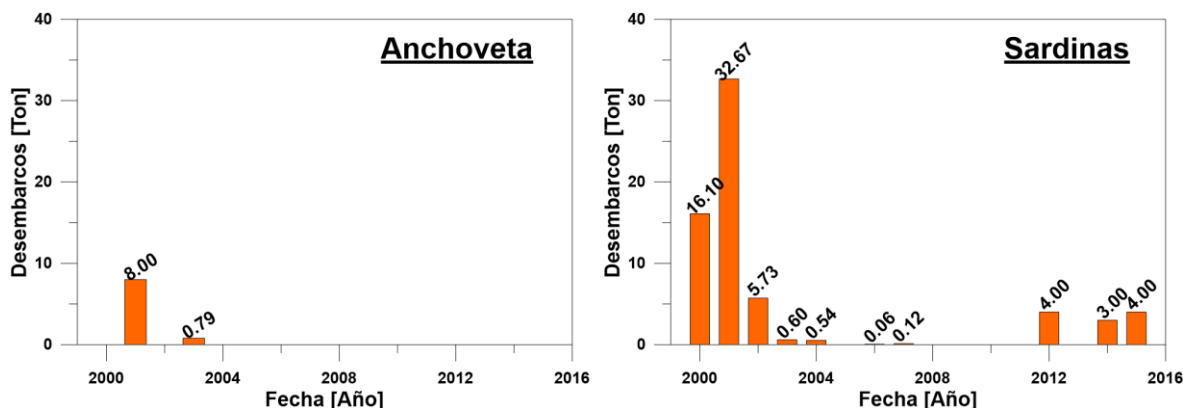


Figura 9-40 Toneladas desembarcadas en la Bahía de Quintero de los peces sardina (izquierda) y anchoveta (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

9.4 EVALUACIÓN AMBIENTAL

Como fue mencionado en la metodología, la evaluación ambiental se realizó con la finalidad de evaluar los impactos actuales en la bahía de Quintero, identificados en esta memoria, por lo que solo se analizó el caso SA. Las variables a evaluar fueron la temperatura y los organismos, como los impactos asociados a las descargas. El impacto sobre las captaciones fue evaluado respecto a los resultados de la metodología AEL. La salinidad no fue analizada por su baja alteración en la simulación SA, además de los varios supuestos empleados para esta variable y la calidad de agua tampoco, debido a su implicancia directa con los organismos, que ya fueron analizados.

9.4.1 IMPACTO POR DESCARGAS

La valorización de las variables afectadas en la descargas, temperatura y plancton (fitoplancton y zooplancton), se resumió en la Tabla 9-10 y la Tabla 9-11, respectivamente. La temperatura es una variable relevante en el ambiente marino, a causa que sus variaciones pueden implicar efectos sobre componentes, físicas, químicas y biológicas. Por otro lado, el plancton representa la base de la cadena trófica, en su producción primaria y secundaria, cuyos cambios pueden tener implicación en otras especies. Por esto, las variaciones de ambas variables se consideraron con un carácter (CA) "Negativo".

En el capítulo 9.1.1 se demostró que los diferenciales térmicos relevantes cubrieron superficies superiores a una hectárea, pero menores que el tamaño de las comunas aledañas. De igual forma el plancton, donde se mostraron variaciones en todo el dominio (capítulo 9.4.1) con mayores variaciones en el interior del dominio, lo que permitió establecer una extensión del impacto (EX) "Local" y a la escala de bahía.

Las simulaciones realizadas correspondieron a las características medias de la bahía correspondientes a un año, lo que permitió asumir que los efectos simulados permanecerán en el futuro, por lo cual, se asume su duración (DU) como "Largo plazo".

Para el conocimiento de la reversibilidad (Rev) se realizaron simulaciones adicionales (caso Recuperación), analizándose en los puntos señalados en la Figura 6-13, según lo establecido en la metodología. En la Figura 9-41 se presentaron los diferenciales de la variable temperatura simulada con respecto al caso SN, donde el caso SA presentó diferenciales sobre los 3 [°C] durante la simulación, por otro lado, en el caso Recuperación ocurrieron diferenciales térmicos relevantes solo durante el mes de enero, reduciéndose drásticamente.

Los diferenciales de la variable plancton (Figura 9-42) en el caso SA, produjeron dos diferenciales relevantes que correspondieron a los incrementos de verano y primavera, los cuales, en el caso Recuperación son de una magnitud bastante menor. Según estos resultados se establecieron las alteraciones como "Reversibles".

En las simulaciones de las variables temperatura y plancton fue notorio el cambio de las condiciones basales (caso SN), lo que permitió asignar una intensidad (In) "Media", en ambas variables.

En los casos de estudio, SN+D3 y SN+D4, se representaron los impactos de dos descargas distintas en forma individual, las cuales se encontraban entre el conjunto de descargas simuladas en el caso SA. Las magnitudes de los resultados presentados (acerca la alteración térmica y de organismos) no permitieron asumir un comportamiento sinérgico de las descargas, debiendo designar la variable sinergia (SI) como "Acumulativo".

En la certidumbre (Cer) del impacto de la variable térmica, independiente de los resultados del modelo, las cuatro descargas de termoeléctricas, con temperaturas sobre los 20 [°C], permitió pronosticar la ocurrencia de algún impacto (al menos durante el invierno) sin la necesidad de un modelo, por tanto, se estableció una certidumbre “Alta”. En la variable plancton se presentaron algunas incertidumbres en el resultado final, a causa de la simplificación de las especies por el modelo y las diferentes tolerancias de cada una, debiendo determinar la certeza como “Media”.

Finalmente, en cuanto a la Relevancia (REL) ambiental de las componentes, como la temperatura que fue una componente del agua, sobre la cual, dependen muchos comportamientos biológicos, reacciones químicas y efectos físicos, por lo tanto, se consideró una jerarquía “Alta”. En el plancton, aunque estos organismos se compongan de múltiples especies y se produzca el fenómeno de sucesión de especies ante cambios ambientales, se tiene evidencia bibliográfica de la selectividad entre las especies, lo que pudo aumentar la relevancia de ciertas especies, impidiendo que fueran totalmente reemplazables y, por tanto, se clasificaron con una jerarquía “Alta”.

En la variable temperatura (Tabla 9-10) se estimó un índice de calificación de impacto (ICI) igual a 30 [-] y en la variable plancton (Tabla 9-11) de 15 [-]. Estos valores, según la clasificación anteriormente mostrada (Figura 6-18) permitió establecer el impacto térmico como “Negativo Medio/ Alto”, indicando que fue significativo y, en contraste, el impacto del plancton se definió como “Negativo Medio/ Bajo”, lo que indicó que no es significativo.

Tabla 9-10 Valorización del impacto de la variable temperatura.

Actividad	Componente afectada	Valorización								
		CA	EX	DU	Rev	In	Sin	Cer	REI	ICI
Descarga	Temperatura	-1	2	3	1	2	2	1	3	-30
Leyenda: CA: Carácter; EX: Extensión; Du: Duración; In: Intensidad; Sin: Sinergia/ Acumulación; Cer: Certidumbre; REI: Relevancia ambiental del componente;										

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-11 Valoración del impacto sobre la variable plancton.

Actividad	Componente afectada	Valorización								
		CA	EX	DU	Rev	In	Sin	Cer	REI	ICI
Descarga	Plancton	-1	2	3	1	2	2	0.5	3	-15
Leyenda: CA: Carácter; EX: Extensión; Du: Duración; In: Intensidad; Sin: Sinergia/ Acumulación; Cer: Certidumbre; REI: Relevancia ambiental del componente; ICI: Índice de calificación del impacto.										

Fuente: Elaboración propia.

Diferenciales de temperatura

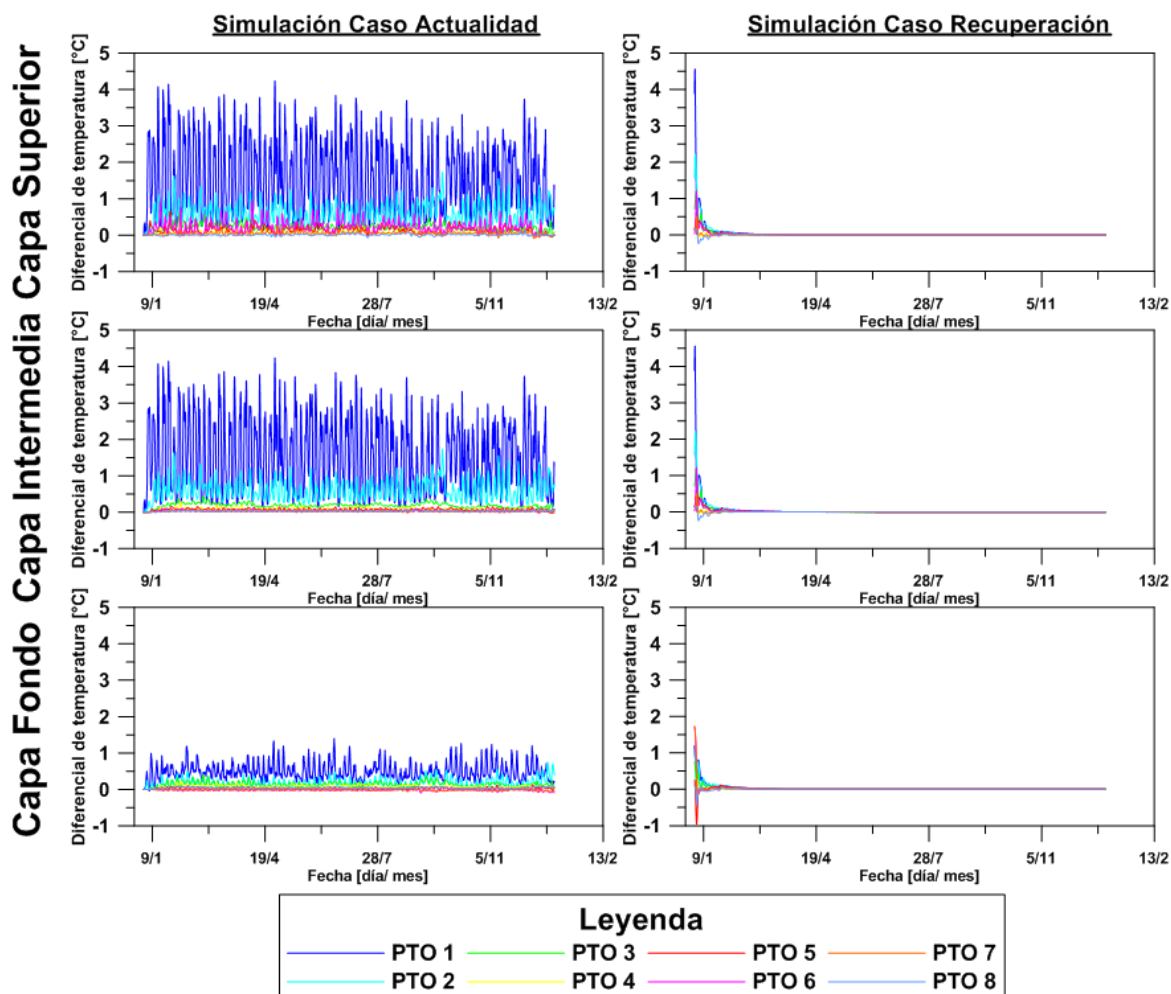


Figura 9-41 Comparación de los diferenciales de temperatura entre los casos SA y Recuperación.
 Fuente: Elaboración propia.

Diferenciales de concentraciones de plancton

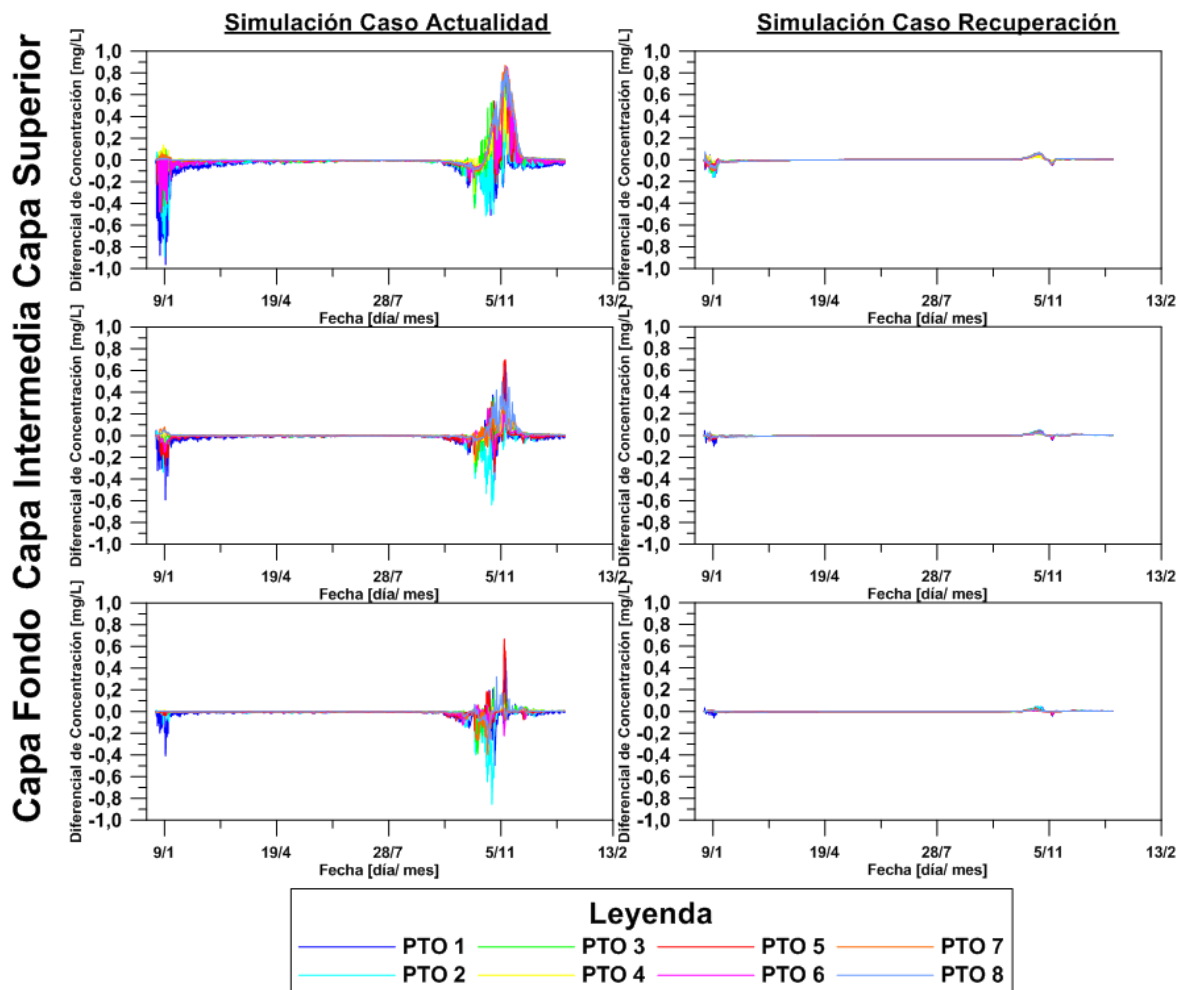


Figura 9-42 Diferenciales de concentración de plancton en los casos SA y Recuperación.
 Fuente: Elaboración propia.

9.4.2 IMPACTO POR CAPTACIÓN

Las captaciones se evaluaron mediante el modelo AEL, que relaciona el ictioplancton captado con pérdidas de peces adultos. La relevancia de esta evaluación se relacionó con algún posible efecto sobre la pesca artesanal. Los coeficientes estimados fueron señalados en la Tabla 9-12.

Sobre los valores establecidos se definió la variable carácter (CA) como “Negativa”, ya que, independiente de la magnitud del impacto, se reduce el ictioplancton en la bahía.

Como las influencias de las captaciones hacia el cuerpo de agua ocurren solo en sus cercanías, se determinó su extensión (EX) como “Puntual”.

En cuanto a la duración del impacto (DU), se asumió como “Largo plazo”, pues todas las captaciones tuvieron planes de seguir funcionando, al menos, en los próximos cinco años. Como las captaciones afectaron solo el ictioplancton que se encontraba en las cercanías de la toma de agua, en cierto instante, la finalización de su funcionamiento detendrá el impacto, por ello se consideró como “Reversible” (Rev).

Para la variable Intensidad (In), debido a la incertidumbre de los datos de desembarco de las especies estudiadas, se dificultó establecer un valor base que permitiera comparar las estimaciones de los adultos perdidos por las captaciones, por lo tanto, se asumió como “Baja”.

En la sinergia (Sin), se asumió como “Simple”, a causa que este impacto no se relacionó con otras captaciones, debido a la distancia entre las tomas de agua.

La carencia de movilidad del ictioplancton en las cercanías de la toma de agua impidió su escape, por tanto, la certidumbre (Cer) se determinó como “Alta” en la ocurrencia del impacto.

La variable relevancia (REL) fue considerada “Alta”, a causa de la consecuencia de este impacto, que fue una reducción en la pesca por el ictioplancton capturado y como la pesca es el recurso económico de un grupo vulnerable (pescadores) fue posible esta descripción. Finalmente, el Índice de calificación del impacto (ICI) se estimó con un valor de -21 [-], jerarquizando las captaciones como un impacto “Negativo Medio” y, por tanto, no significativo.

Tabla 9-12 Valoración del impacto sobre la variable pesca.

Actividad	Componente afectada	Valorización								
		CA	EX	DU	Rev	In	Sin	Cer	REI	ICI
Captación	Pesca	-1	1	3	1	1	1	1	3	-21
Leyenda: CA: Carácter; EX: Extensión; Du: Duración; In: Intensidad; Sin: Sinergia/ Acumulación; Cer: Certidumbre; REI: Relevancia ambiental del componente; ICI: Índice de calificación del impacto.										

Fuente: Elaboración propia.

10 DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 ANTECEDENTES

En esta memoria las simulaciones han jugado un papel fundamental siendo usadas para la representación aproximada de la realidad, sin embargo, a pesar de simular correctamente los fenómenos marinos necesarios para cumplir los objetivos de esta memoria, los datos empleados para forzar los modelos y contrastar los resultados de las simulaciones, evidenciaron algunas falencias debido a la dificultad o costo en su obtención.

10.1.1 OCEANOGRAFÍA FÍSICA

La representación del oleaje en la bahía mediante modelos numéricos requirió información de oleaje en aguas profundas. En esta memoria se utilizaron los datos Atlas que provinieron de resultados de otro modelo numérico global. A pesar de la correcta representación de las alturas de olas significativas (H_{m0}) y periodos peak (T_p), la dirección media (D_m) fue representada con menor exactitud, lo que puede deberse a la gruesa discretización de las direcciones en los espectros bidimensionales de los datos Atlas o a debilidades en los modelos utilizados en la propagación de oleaje. En este estudio se emplearon de espectros bidimensionales como forzantes, para representar de forma correcta el oleaje proveniente del tercer o cuarto cuadrante y su interacción con los accidentes geográfico en el norte y el sur de la bahía. Para zonas protegidas como la bahía de Quintero es aconsejable la disposición de datos de oleaje en el interior y exterior de la bahía, de forma de verificar la correcta representación de la transferencia de energía ocasionada por los fenómenos de difracción y refracción a causa de la compleja geografía.

La medición de un punto de marea con un mareógrafo es suficiente para caracterizar el fenómeno e implementar la forzante para la su representación con el modelo numérico, debido a su comportamiento oscilatorio en un amplio periodo, que causa magnitudes similares al interior de la bahía.

En esta memoria se debió forzar el fenómeno del viento con valores constantes en el dominio a partir de los datos de una estación meteorológica situada en tierra. Debido a que uno de los principales forzantes de las corrientes es el viento, es aconsejable utilizar datos variables en el dominio, que pueden provocar variaciones en la hidrodinámica en el dominio. De forma similar, la temperatura del aire fue empleada constante en el dominio, obtenida desde la misma estación meteorológica en tierra, lo cual puede presentar incertidumbres en el intercambio de calor con la atmósfera que afectan la temperatura y salinidad superficial del agua.

Por último, la hidrodinámica representada en la bahía presentó una notable variación espacial, por lo cual, es aconsejable la disposición de datos de corrientes en distintos puntos en el dominio para verificar la representación del fenómeno en distintas zonas del dominio, como fue realizado en esta memoria.

10.1.2 OCEANOGRAFÍA QUÍMICA

La obtención de la información de temperatura y salinidad del agua, a partir del modelo HYCOM fue bastante útil, a pesar de la amplia discretización espacial, considerando la complejidad de obtener mediciones de estas variables en aguas profundas y a través de la columna de agua, que puedan utilizarse como condición de borde. Para el contraste de la simulación de las variables temperatura y salinidad del mar es recomendable realizar mediciones en distintos puntos de la zona de estudio, mediante un enfoque euleriano, en distintas profundidades.

Una de las mayores dificultades para desarrollar este tipo de estudio son los datos químicos, ya que entre la información encontrada se tienen mediciones con amplios intervalos temporales (meses en algunos casos), lo que dificulta identificar el comportamiento del fenómeno a través del tiempo. Debido a esto es ideal la disposición de sistemas de monitoreos *on line* de los nutrientes, procurando registrar sus concentraciones en intervalos de tiempos cortos y constantes.

10.1.3 OCEANOGRAFÍA BIOLÓGICA

Como sucede con los nutrientes, estas variables son complejas y costosas de medir en cortos y constantes intervalos de tiempo, pero de gran importancia en este tipo de estudios. Para aumentar la rigurosidad en los análisis realizados es aconsejable disponer de muestreos en cortos intervalos de organismos al menos durante un año, con el fin de asociar la variabilidad de organismos con el cambio estacional y poder establecer con mayor veracidad un año típico.

Se debe agregar lo fundamental que sería incluir concentraciones de organismos o clorofila a al muestreo del P.O.A.L. o un sistema semejante, con registros en cortos y constantes intervalos de tiempo, permitiendo establecer series de tiempo entre nutrientes y organismos, que permitan asociarse a alteraciones físicas, cuya medición, comparativamente, es más sencilla.

10.1.4 DESCARGAS Y CAPTACIONES

A pesar de la recopilación de antecedentes realizada, no se obtuvieron la totalidad de las características de las descargas y captaciones. Entre esta información, para algunas de las descargas y captaciones en la bahía, se ausentaron las variables: caudal de captación, profundidad, temperatura, salinidad y concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo). La ausencia de esta información fue solucionada mediante una serie de supuestos que produjeron algunas incertidumbres, sin embargo, el contraste de datos verificó que la configuración utilizada permite representar de forma correcta los fenómenos estudiados.

Entre los aspectos adversos de los datos recopilados, se tienen las mediciones del nitrógeno en su forma NTK, la cual no es la forma más perjudicial, pues considera las formas de nitrógeno orgánico que deben sufrir procesos químicos para transformarse en nitrógeno inorgánico y ser consumido por las algas. Esta forma de medición puede deberse al D.S. N°90/ 2000, el cual reglamenta solo este parámetro asociado al nitrógeno. Por otro lado, la salinidad en los efluentes consultados no presentó la salinidad, lo cual puede deberse a su ausencia entre los parámetros normados por el D.S. N°90/ 2000.

La información de descargas fue recopilada, en su mayoría, de mediciones de autocontrol, los cuales se realizan en una amplia ventana temporal. Esto dificulta los procesos de calibración y validación, pues se debe desprestigiar las variaciones temporales durante las simulaciones, perdiendo en algunos casos, ciertos comportamientos ocasionados por las descargas.

10.2 ANÁLISIS EN LA EVALUACIÓN

10.2.1 ANÁLISIS TÉRMICOS Y SALINOS

Según los resultados de la evaluación de las descargas térmicas en esta memoria, es posible afirmar que en la actualidad (caso SA), respecto a las condiciones medias de la hidrodinámica, se produce un diferencial térmico semejante a un fenómeno del Niño (>0.5 [°C]) en gran parte de la bahía, respecto a la bahía sin descargas (caso SN). Este diferencial térmico describe una superficie centrada en el norte de la bahía, que se extiende hasta el muelle de la empresa GNL, hacia el sur y se transporta por la costa, pasando por la punta Ventanilla, con dirección hacia el NO. La localización de la pluma térmica en el norte de la bahía puede deberse a la elevada concentración de descargas de termoeléctricas cercanas a esa zona, las cuales consideran las mayores temperaturas y caudales de la bahía. Adicionalmente, la simulación del año medio presenta una vorticalidad ubicada en el norte de la bahía, fenómeno que permite una mayor permanencia de los volúmenes de agua. Según los análisis realizados en la memoria, al promediar la columna de agua y la simulación anual, se obtiene el 13.0 [%] de la superficie de la bahía con un impacto térmico equivalente a un fenómeno del Niño (>0.5 [°C]), un 2.0 [%] donde ocurre un fenómeno del Niño extremo (>2 [°C]) y 1.5 [%] de la superficie equivalente al mayor fenómeno del Niño registrado (>2.6 [°C]).

La alteración térmica en el norte de la bahía concuerda con los resultados de CEA (2013), donde se demuestra una elevada ocurrencia en el incremento de 1 [°C] en esta zona. Por otro lado, la experiencia social reconoce los resultados de esta memoria al denominar este sector (Ventanas), como las “Las termas”, por sus tibias aguas agradables para el baño (The Clinic Online, 2012).

Los casos de estudio SN+D3 y SN+D4, correspondientes a simulaciones con distintas descargas individuales, pertenecientes a la termoeléctrica Nueva Ventanas (D3) y Campiche (D4), respectivamente. Estas descargas fueron seleccionadas por poseer los mayores caudales registrados (10.4 [m³/s] en ambas) y temperaturas relevantes (23.4 [°C] en D3 y 22.2 [°C] en D4), entre las descargas de la bahía. En los casos simulados, a pesar de considerar solo una descarga, se produjeron superficies con un fenómeno de Niño presente (>0.5 [°C]), en la media de la columna de agua durante la simulación anual con 3.6 [%] y 2.9 [%], en los casos SN+D3 y SN+D4, respectivamente. Por otro lado, también se registraron superficies con la equivalencia de fenómenos de Niño extremos (>2.0 [°C]), con 0.41 [%] y 0.26 [%] y el máximo fenómeno del Niño registrado (>2.6 [°C]), con 0.15 [%] y 0.10 [%], en los casos SN+D3 y SN+D4, respectivamente. Al estimar la relación entre la superficie generada en el caso SA con un fenómeno del Niño presente (>0.5 [°C]) contra las respectivas áreas en los casos SN+D3 y SN+D4, se obtienen 27.5 [%] y 22.51 [%], respectivamente. Se debe tener en cuenta que, a pesar que las descargas simuladas en los casos SN+D3 y SN+D4, presenten características similares, la distancia entre ellas y el diferencial térmico entre sus efluentes (1.2 [°C]), provocó una diferencia de 0.7 [%] entre las

superficies impactadas. Lo que comprueba la importancia en la temperatura del efluente y la ubicación de la descarga.

El caso SD90_T consistió en configurar la temperatura de los efluentes en la bahía de Quintero al máximo valor permitido, según la normativa D.S. N°90/ 2000 (30 [°C]), sin considerar su posición con su correspondiente ZPL, manteniendo sus caudales y el resto de sus características constantes. En esta simulación se incrementa la superficie impactada, en la media de la columna de agua durante el año simulado, estimando un 30 [%] de la bahía con un fenómeno del Niño ($>0.5[^\circ\text{C}]$), un 3.5 [%] con un fenómeno del Niño extremo y un 2.68 [%] del fenómeno del Niño máximo registrado. Con respecto al caso SA, se puede estimar que la superficie impactada ($>0.5[^\circ\text{C}]$) incrementa en 230 [%] en el caso SD90_T, lo cual cubre gran parte de la bahía, hasta la zona militar en la bahía por el sur y sobrepasando la península Ventanillas en la dirección NO. El desplazamiento de la pluma térmica alcanza la localización del AMERBs Ventanas, situación grave al considerar que algunos organismos carecen de movilidad, impidiendo su escape.

Es importante recordar que, a pesar que estos impactos pertenecen a un caso ficticio, según la normativa chilena, se encuentran dentro del marco legal y, además, las descargas que se ubican fuera del ZPL no presentan un límite en la temperatura del efluente según la norma, siendo posibles impactos térmicos mayores manteniéndose en la legalidad.

Esto revela debilidades en el D.S. N°90/ 2000 al establecer la temperatura del efluente como restricción, en vez del impacto térmico producido. Lo anterior se complejiza en un país como Chile con 6435 [km] de costa, cuya variación térmica varía en las distintas latitudes como se evidencia en la Figura 10-1, donde se analiza la variabilidad de TSM en distintos puntos costeros y se evidencia, por ejemplo, un diferencial térmico entre los valores medios de Arica y Ancud de 5 [°C], aproximadamente.

Por esta razón puede ser aconsejable establecer restricciones sobre el diferencial térmico producido en el cuerpo de agua. En apoyo de lo anterior, los resultados del caso SD90_T, presentó una distribución semejante al resultado del caso SA, demostrando la importancia en parámetros como la ubicación de la descarga, su caudal y los patrones de la hidrodinámica en sus cercanías, que permiten el transporte de la pluma térmica. Estos factores no son mencionados en la norma actual.

En la evaluación del impacto salino se demostró que en la actualidad (caso SA) no se presentan impactos salinos, según la metodología establecida que considera impacto a variaciones sobre el 5 [%] de la salinidad de la situación base (ANZECC, 1992). La ausencia de diferenciales salinos importantes fue esperable a causa del desconocimiento de la salinidad en algunos efluentes, por lo cual se asumió ciertas descargas con la misma salinidad del medio y otras con una salinidad igual a 0 [PSU], las cuales coincidieron con bajos caudales.

En contraste, el caso SA+D13, que se caracteriza por la adición de una descarga con elevada salinidad, presentó diferenciales importantes de esta variable, produciendo una pluma desplazada con una tendencia hacia la dirección NO, alcanzando el AMERBs Ventanas, aunque en bajas magnitudes. Sin embargo, el criterio establecido define impacto salino solo en la capa de fondo en una superficie reducida. Es importante mencionar que, la pluma salina descrita coincide en su dirección y en el bajo impacto ambiental con los resultados de las simulaciones de la línea base del proyecto (Ecotecnos S.A., 2017(a)).

Cabe mencionar que, los impactos térmicos y salinos se evaluaron con respecto a diferenciales térmicos asociados al fenómeno del Niño y a normas extranjeras, respectivamente, no obstante, esto revela la necesidad de definir criterios para establecer la ocurrencia de estos impactos. Se aconseja que los criterios elegidos correspondan a

diferenciales de temperatura y salinidad que relacionen los límites con la tolerancia de la fauna o vegetación nativa en la zona, de forma similar a lo recomendado en ANZECC (1992), donde se aconseja asociar el diferencial térmico límite con la tolerancia de una especie relevante de la zona.

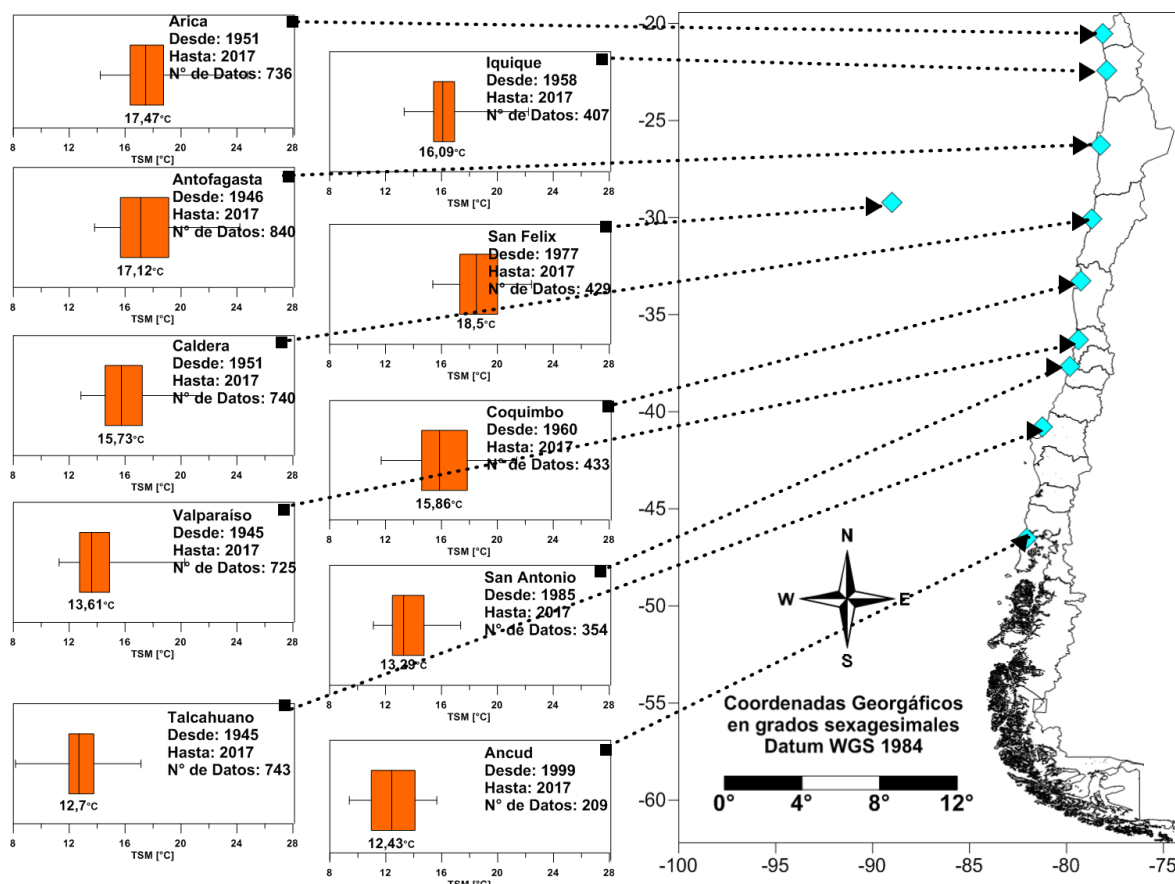


Figura 10-1 Variación de TSM a lo largo de Chile.
Fuente: Elaboración propia.

10.2.2 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

Según los criterios establecidos en esta memoria, mediante el coeficiente TRIX empleado en los puntos analizados al interior de la bahía y en las capas verticales, en la actualidad (caso SA) se identifica una tendencia hacia un estado oligotrófico, con respecto al caso SN. En el análisis de las variables que constituyen el coeficiente TRIX, se identifica que las mayores variaciones corresponden a la reducción de la clorofila a en los puntos localizados al norte de la bahía. Esta ubicación concuerda con la disminución de las variables fitoplancton y zooplancton, y con la zona con mayores diferenciales térmicos, cuya relación se explica en el capítulo 10.2.3.

En los casos con descargas individuales SN+D3 y SN+D4, correspondiente a las termoeléctrica Nueva Ventanas (D3) y Campiche (D4) se presentan tendencias hacia el estado oligotrófico, con respecto al caso SN, en ambos casos. Concordante con el caso

SA, pero en menor intensidad, ocurre una reducción en el norte de la bahía de las concentraciones de clorofila a y de los organismos simulados.

El caso SD90_T que considera la configuración de todas las descargas con la temperatura máxima permitida por el D.S. N°90/ 2000, presenta una tendencia hacia el estado oligotrófico, con respecto al caso SN. En este caso se producen efectos semejantes al caso SA, pero con una mayor intensidad, en específico, una reducción del coeficiente TRIX y de la concentración de la clorofila a en el sector norte de la bahía, coincidente con el sector con mayor diferencial térmico en este caso de estudio.

El caso SD90_P que considera la adición a cada efluente de la bahía la concentración máxima de fósforo según D.S. N°90/ 2000 (5 [mg/L]), presenta una tendencia hacia el estado eutrófico con respecto al caso SN, a diferencia del resto de los casos. En el análisis de las variables que constituyen el coeficiente TRIX se evidencia un elevado incremento del fósforo, cuyo incremento superó al resto con creces. Se debe mencionar que los incrementos de fósforo aumentan en el norte de la bahía, lo que puede deberse a la concentración de descargas y a los mayores caudales localizados en el norte de la bahía. En el caso SD90_P se registran los mayores incrementos del coeficiente TRIX en el sur de la bahía, de forma contraria a las mayores concentraciones de fósforo. Esto se debe a la configuración térmica del caso SA, que se mantuvo en el caso SD90_P, cuyo efecto consiste en la reducción de la clorofila a en el sector norte de la bahía, reduciendo el coeficiente TRIX en esta zona, lo suficiente para que predomine la magnitud de los coeficientes en el sur.

El caso SD90_NTK considera la inclusión de la concentración máxima de NTK permitida por el D.S. N°90/ 2000 (50 [mg/L]) sobre la configuración del caso SA. Este caso, al igual que el caso SD90_P, presenta un incremento hacia el estado eutrófico con respecto al caso SN. Los incrementos del coeficiente TRIX del caso SD90_NTK son bastante menores en comparación al caso SD90_P, aunque la concentración de NTK en el efluente es mayor que la concentración de fósforo en el caso SD90_P. Lo anterior puede deberse a la mayor concentración de nitrógeno en la bahía en la situación base (caso SN) y a la constitución orgánica de la variable NTK, lo que implica la necesidad de procesos químicos para su transformación a las formas inorgánicas del nitrógeno (amonio o nitrito) que son cuantificadas para el coeficiente TRIX y son consumibles por las algas. En el análisis de las variables que conforman el coeficiente TRIX resaltan las reducciones de la clorofila a en el norte de la bahía, el incremento de la desviación de la saturación de oxígeno disuelto con ligeros incrementos en el norte de la bahía e incrementos en la concentración de nitrógeno inorgánico de forma similar en todos los puntos analizados. La reducción de clorofila a concuerda con los efectos del caso SA, que permanecieron en el caso SD90_NTK, mientras que, el notable incremento de la desviación de saturación de oxígeno puede deberse a la ocurrencia de los procesos químicos para la conversión del NTK a las formas inorgánicas de nitrógeno, las cuales consumen oxígeno, además se acentúa en las zonas donde hay reducción de clorofila a, lo que se relaciona con la ausencia de producción primaria y la generación de oxígeno disuelto y, por último, el incremento de la concentración inorgánico demuestra la ocurrencia del proceso de conversión a nitrógeno inorgánico.

El caso SA+D13, cuya característica principal es la inclusión de una descarga proveniente de una desalinizadora (Proyecto Aconcagua) en la configuración del caso SA, muestra un predominio hacia el estado oligotrófico, con respecto al caso SN, aunque con magnitudes menores que el caso SA. El impacto medio sobre las tres capas analizadas se reduce en la mitad, aproximadamente, con respecto al caso SA. En el análisis de las variables que conforman el coeficiente TRIX, resaltan las reducciones de la clorofila a en el norte de la

bahía, aunque de menor forma que el caso SA. En resumen, se puede visualizar un acercamiento al estado SN desde el caso SA, por la inclusión de una descarga, esencialmente salina. Esta discusión se encuentra relacionada por los organismos simulados y por ello se realiza en detalle en el capítulo 10.2.3.

Para los análisis realizados acerca la calidad del agua se empleó una fórmula configurada para las aguas del mediterráneo, por ello se decidió realizar los análisis sobre las variaciones en los casos de estudio con respecto al caso base (caso SN), evaluando la variación ocasionada por las descargas. Sin embargo, no se encontró un indicador de la calidad de agua para las costas chilenas, herramienta bastante relevante para cuantificar las alteraciones desde las cuales comienzan a ocurrir riesgos para la vida marina y permita considerar una bahía saturada.

10.2.3 ANÁLISIS DE ORGANISMOS

Según los resultados exhibidos en esta memoria, se demuestra que en el caso SA (representación de la actualidad en la bahía), en comparación con el caso SN, en una visión global (integración en el dominio y tiempo), el fitoplancton se incrementa, a pesar de una reducción en su producción. En contraste el zooplancton y su producción se reducen, al igual que el plancton. Esta última variable representa el conjunto de los organismos simulados e implica el estado de los organismos en el caso SA. Se debe mencionar que, como la producción de fitoplancton se redujo, el incremento de la variable fitoplancton se debió a la disminución del zooplancton y, con ello, la reducción del proceso de pastoreo. Gracias a los análisis realizados, se demuestra que los mayores incrementos del fitoplancton ocurrieron a mediados de la primavera, cuando el zooplancton se encontraba bajo por la menor concentración de fitoplancton, lo que permitió que el fitoplancton creciera por las altas condiciones de nutrientes, temperatura y radiación solar, hasta que el zooplancton alcanzó concentraciones suficientes para consumir abruptamente el fitoplancton.

En los casos SN+D3 y SN+D4, con descargas individuales pertenecientes a las termoeléctricas Nueva Ventanas (D3) y Campiche (D4), las variables integradas muestran incrementos de fitoplancton, concordantes con la producción de fitoplancton. En la variable zooplancton se reduce su concentración junto con su producción. Por otro lado, la variable plancton presenta bajas disminuciones en el caso SN+D3 y un incremento de la biomasa, casi despreciable, en el caso SN+D4. Esto indica que la alteración del caso SN+D4 fue menor que el caso SN+D3. Es relevante resaltar que, en los casos individuales el incremento de fitoplancton aumentó, aproximadamente, en 50 [%] con respecto al caso SA, mientras que, la reducción de zooplancton disminuyó en 70 [%], aproximadamente.

El caso SD90_T presenta un incremento del fitoplancton con una reducción de la producción del fitoplancton. En la variable zooplancton ocurre una reducción de la concentración y en su producción. Por otro lado, los organismos simulados representados por la variable plancton, se reducen con respecto al caso SN. Es posible notar que, el comportamiento de las variables simuladas se asemeja al del caso SA, pero con diferentes magnitudes, donde el fitoplancton aumenta sobre un 90 [%] y el zooplancton se reduce sobre un 80 [%], con respecto al caso SA. En la integración de las variables en el dominio del caso SD90_T, se comprueba un incremento del fitoplancton a mediados de la primavera, causado por la ausencia de zooplancton, este incremento alcanza tal magnitud que modifica el comportamiento general en la serie de tiempo a finales de la simulación.

Las mayores reducciones del plancton en los casos SA y SD90_T ocurren en el norte de la bahía, coincidente con los mayores incrementos térmicos representados con la simulación. A pesar que se evidencia una relación inversa entre el aumento de temperatura y la concentración de organismos, las ecuaciones que describen la producción del fitoplancton y zooplancton indican una dependencia directa con la temperatura. Esto se cumple en los casos unitarios SN+D3 y SN+D4, donde se incrementa la producción de fitoplancton, sin embargo, las concentraciones de fitoplancton y zooplancton presentan variaciones negativas en el norte de la bahía, respecto al caso SN.

El fenómeno que afecta a los organismos simulados ocurre a causa de la hidrodinámica afectada por las descargas térmicas ubicadas en la bahía, ya que el diferencial térmico alcanza tal magnitud que generan una variación importante de la densidad, produciendo una corriente ascendente por el aumento de boyantez de las parcelas de agua cercanas a la descarga. Lo anterior se comprueba en el anexo 13.7.1, donde se esquematiza el diferencial del componente vertical (w) de las corrientes, en los distintos casos de estudios con distintas combinaciones de descargas térmicas, contra el caso SN, demostrándose corrientes ascendentes importantes en las cercanías a las zonas de descargas, las cuales aumentan con mayores diferenciales térmicos. Como el fitoplancton y gran parte de las especies de zooplancton carecen de movilidad dependen de la hidrodinámica para su transporte, y el predominio de corrientes ascendentes durante la simulación genera volúmenes de agua sin organismos, como se representa en la Figura 10-2.

Según se verifica de forma más clara en la producción de las variables fitoplancton y zooplancton, la producción primaria se concentra en la superficie por su dependencia hacia la luz, en contraste, la producción secundaria al no depender de la luz, permite una mayor distribución en la columna de agua y, por ello, el zooplancton se encuentra más afectado a las corrientes ascendentes.

A pesar de la reducción de biomasa en el norte de la bahía, la producción de fitoplancton presenta incrementos en los casos SA, SN+D3, SN+D4 y SD90_T, en comparación del caso SN, en la península Los Molles y en el norte de la punta Ventanillas, lo que puede deberse a la reducción de zooplancton que causó incrementos en el fitoplancton, que fue acumulado en estas zonas por las mayores magnitudes de la hidrodinámica y, donde, no se encuentran afectas por los efectos térmicos.

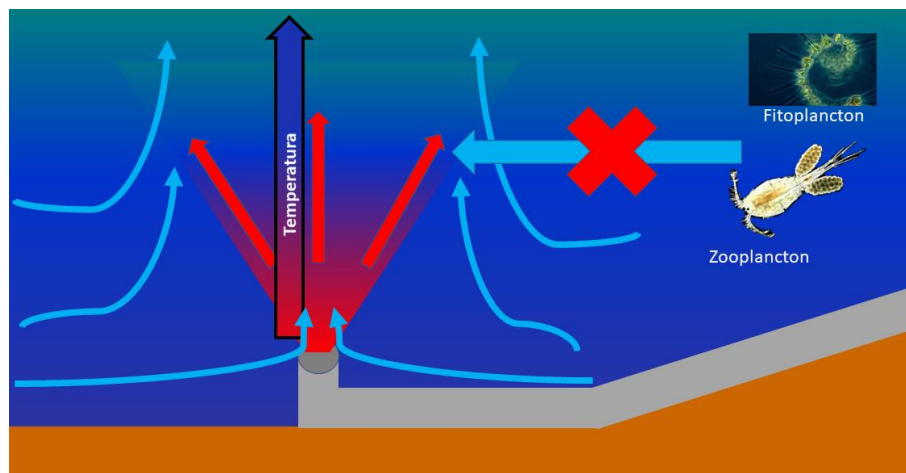


Figura 10-2 Esquemización del efecto de las descargas térmicas sobre el plancton.
Fuente: Elaboración propia.

El caso SD90_P ilustra una reducción de biomasa en el norte de la bahía, evidenciando los efectos térmicos del caso SA. A pesar de esto, la concentración de fitoplancton disminuye al igual que su producción, aunque esta última presenta magnitudes bajas. El zooplancton y su producción incrementan sus magnitudes, respecto al caso SN. Esto provoca incrementos importantes en la concentración del plancton, a diferencia de los otros casos. En el caso SD90_P se diferencia del caso SA por las descargas de elevadas concentraciones de fósforo, variable que no afecta al zooplancton directamente, por lo tanto, los incrementos de zooplancton se debieron a un aumento de fitoplancton por una mayor disponibilidad de nutriente, que fue inmediatamente depredado, por lo cual no fue registrado en las variables de concentración o producción del fitoplancton. Debido a que el incremento ocurrió desde la producción primaria hacia la producción secundaria, se registraron incrementos en la variable plancton.

El caso SD90_NTK, a diferencia del caso SD90_P, que también incluye una gran concentración de nutrientes, presenta una conducta de las variables orgánicas semejantes al caso SA. La variable fitoplancton incrementa su concentración, aunque reduce su producción con respecto al caso SN. En contraste, la variable zooplancton disminuye su concentración y producción. Por último, la variable plancton disminuye su biomasa en comparación al caso SN. Al analizar el caso SD90_NTK junto al caso SA, se indica que las magnitudes de zooplancton y su producción son semejantes en ambos casos de estudio, sin embargo, la producción de fitoplancton experimenta un ligero incremento, que provoca incrementos en la concentración en el fitoplancton y plancton.

La diferencia en el comportamiento de los organismos entre el caso SD90_P y SD90_NTK, radica en que el NTK corresponde la forma orgánica del nitrógeno, el cual debe transformarse en formas inorgánicas (amonio y nitrato) mediante procesos químicos, para ser consumido por los organismos y, además, las concentraciones de nitrógeno suelen abundar en los cuerpos de agua, siendo menos relevante para un incremento acelerado en comparación al fósforo, que escasea en los cuerpos de agua.

El caso SA+D13 que consistió en la inclusión de la descarga salina correspondiente al proyecto Aconcagua a la configuración del caso SA. En el análisis de las variables acumuladas con respecto del caso SN, se presenta un leve incremento del fitoplancton. En las variables zooplancton y en las producciones de fitoplancton y zooplancton se registraron reducciones en sus magnitudes, lo cual provoca la disminución de la concentración del plancton. El comportamiento de estas variables se relaciona con el caso SA, pero con una menor magnitud, indicando que la inclusión de la descarga del proyecto Aconcagua disminuyó los efectos en los organismos.

La causa de este fenómeno corresponde a la inclusión de la descarga salina (D13), la cual provoca corrientes descendentes por el incremento de la densidad por la alteración de la salinidad como se comprueba en el anexo 13.7.1. Estas corrientes descendentes contrarrestan las corrientes ascendentes causadas por los incrementos térmicos del caso SA.

Es importante mencionar que, a pesar que los resultados del modelo numérico muestran una “corrección” al impacto ambiental del caso SA sobre los organismos, se debe tener en cuenta que los incrementos de salinidad pueden ocasionar daño a los organismos marinos que no son considerados por el modelo, ya que los organismos simulados no son directamente dependientes a la salinidad.

En los cálculos del modelo pérdidas del adulto equivalente (AEL) se obtuvieron diferenciales en sus resultados según el método empleado, siendo AEL 3 el más conservador, con la mayor cantidad de adultos perdidos y, en contraste, el método AEL 1 presenta las menores

pérdidas. Es importante recalcar que este modelo presentó algunas incertidumbres por los supuestos realizados:

- En primer lugar, se tiene la información histórica de las distintas especies de peces en los estadios que conforman su vida. Esta información es dependiente de las investigaciones realizadas hacia las distintas especies, permitiendo discrepancias según los autores.
- La abundancia de ictioplancton en las cercanías de la captación, por la complejidad y costo en su obtención, se suele utilizar como un valor constante, despreciando la variación natural del ictioplancton. En esta memoria para corregir esta situación se decidió asumir que el ictioplancton presenta el mismo comportamiento del zooplancton herbívoro simulado, para esto se consideró el valor de la abundancia recopilada (Proyecto Aconcagua) como un valor inicial, que varió proporcionalmente en el tiempo con el zooplancton simulado.
- Por último, el método AEL 3 requiere la estimación del volumen afectado por la captación, el cual fue estimado según lo recomendado, sin embargo, es aconsejable que la estimación de este volumen se asocie al caudal de captación, lo cual requiere un estudio complejo.

Tras las estimaciones de adultos perdidos por las captaciones el resultado muestra que en las anchovetas el método AEL3 superó el mayor registro de desembarco artesanal, mientras los otros dos métodos (AEL2 y AEL1) presentaron resultados cercanos al menor valor de desembarcos, aunque para la anchoveta solo se presentaron dos registros. En las sardinas solo el método AEL3 estima magnitudes que se encuentran dentro del rango de desembarcos artesanales. Esto indica que el impacto de pérdidas de adultos por las tomas de agua ocurre en magnitudes semejantes a algunos de los datos de desembarcos artesanales registrados.

Es importante mencionar que en el registro de desembarcos artesanales de ambas especies se puede notar una reducción en el tiempo, de donde las anchovetas no son registradas después del año 2004 y en las sardinas se señala una reducción en sus valores hasta el año 2008, cuando se dejan de registrar hasta el 2012 cuando vuelven los registros. Coincidente con la reducción de estas especies, en el capítulo 4.1.3 se presentaron reducciones en el tiempo en los peces desembarcados artesanalmente, siendo reemplazado por el desembarco de la jibia. En esta memoria no se puede asegurar que las captaciones o descargas sean las causas de la reducción de desembarcos de peces, junto a las especies analizadas ni del aumento en la extracción de jibia, pues la información de las toneladas desembarcadas depende de varios factores como pueden ser las vedas, interés económico por especies, dificultad en la captura de cierta especie, o a efectos ambientales asociados al cambio climático, entre algunos. La causa de este fenómeno identificado y del impacto de las captaciones sobre la pesca y hacia las poblaciones de las especies analizadas, en el corto o largo plazo, deben ser estudiadas en investigaciones más específicas, las cuales escapan los objetivos de esta memoria.

10.2.4 EVALUACIÓN DE IMPACTOS

Con la realización de la jerarquización de los impactos, asociados a las descargas, se considera la alteración de la temperatura como un impacto negativo Medio/ Alto, siendo significativo, en contraste, las variaciones del plancton se establecieron como un impacto negativo Medio/ Bajo, por tanto, no significativo. En el impacto de las captaciones, según

los resultados del modelo AEL, se considera un impacto “Negativo Medio”, por tanto, no significativo. Entre las variables dependientes de la evaluación de impactos, se tuvieron los siguientes comentarios:

Carácter: En el medio marino, siendo un ambiente con múltiples variables que complejizan las predicciones, se debieron asumir cualquier alteración de sus condiciones basales como un impacto negativo.

Extensión: La extensión del impacto de las descargas es limitado por la geografía de la bahía, que dificultan el intercambio de masas de agua. Esto último también facilita el aumento de las magnitudes en los impactos al interior de la bahía.

Duración: Esta variable fue considerada como “largo plazo”, ya que la simulación del caso medio corresponde a las cualidades medias de la hidrodinámica producida a partir de las forzantes de la hidrodinámica que se construyeron con fuentes de datos que representan un periodo largo de estos fenómenos. Lo anterior, corresponde de mejor forma a la hidrodinámica, pero en los datos de nutrientes y organismos fue menor la cantidad de datos recopilados, generando una leve incertidumbre en el análisis del plancton.

Reversibilidad: Según los impactos simulados en esta memoria, todos son reversibles, aunque se debe notar que, el impacto térmico en la bahía de Quintero, ha ocurrido durante varios años y de forma continua, lo cual podría haber afectado a los organismos habitantes en la bahía y las especies que allí habitan, requiriendo análisis en el sitio de estudio. Al considerar los efectos térmicos sobre organismos, también es posible la ocurrencia de efectos por el cambio climático, para lo cual se aconseja realizar estudios, también, en bahías cercanas donde no haya descargas térmicas, con la finalidad de aislar la alteración producida por las descargas térmicas.

Intensidad: Este aspecto es complejo de estimar mediante los estudios realizados, pues en los organismos “un cambio total de su condición basal” podría interpretarse como el cambio de especies habitantes en la bahía, lo cual no representan los modelos empleados.

Acumulación/ Sinergia: Esta variable fue obtenida bajo supuestos, ya que para la total certeza de este aspecto se deben realizarse distintas simulaciones con cada una de las descargas identificadas, para establecer los efectos individuales y contrastarse con las alteraciones grupales. Este tipo de estudio requiere demasiado tiempo y se aleja de los objetivos de esta memoria, por ello se utiliza una aproximación con los casos individuales, SN+D3 y SN+D4.

Certidumbre del impacto: Esta característica es una de las más importantes en el valor numérico final. En los organismos es complejo obtener una certeza alta hacia su relación de los impactos pues la tolerancia y reacción ante los cambios ambientales es variable en las distintas especies, sin embargo, las corrientes ascendentes simuladas pueden afectar a gran parte de estas especies al depender del transporte hidrodinámico, por ello, es aconsejable realizar una investigación en terreno acerca como son afectadas las especies habitantes en la bahía por este impacto.

Relevancia ambiental del componente: Esta variable fue estimada con una jerarquía “Alta”, ya que las variables seleccionadas, para la realización de esta memoria, fueron escogidas por su importancia en el ambiente marino.

11 CONCLUSIONES

11.1 ANTECEDENTES

Los datos recopilados sobre la oceanografía física fueron suficientes para describir la hidrodinámica de la bahía y contrastar las simulaciones. En los procesos de calibración y validación se cumple la concordancia entre la simulación y los datos recopilados.

La información recopilada de la temperatura y salinidad del agua desde el modelo numérico HYCOM permite representar de forma aceptable las magnitudes de estas variables al interior de la bahía, según el contraste de datos realizados.

Los datos químicos provenientes del P.O.A.L. permiten establecer rangos de variación de los nutrientes y valores representativos que fueron empleados en esta memoria y la información bibliográfica encontrada, acerca de los organismos, permite la estimación de valores típicos de sus concentraciones, además de describir su conducta general. La simulación ecológica realizada, la cual interactúa con los resultados del modelo hidrodinámico, representa de buena forma el comportamiento descrito en la bibliografía, bajo las limitantes del modelo empleado. A pesar de verificar la representación del sistema ecológico, se debe recalcar que el empleo de mediciones químicas y biológicas con pequeñas ventanas de tiempo, permitirían un mayor acercamiento al comportamiento real del ambiente marino.

Los datos recopilados de las descargas y captaciones en la bahía describen de forma aceptable el comportamiento medio de éstas, como se comprueba en la verificación de datos. Sin embargo, la recopilación de la variación, en pequeñas ventanas de tiempo, de las principales características en las descargas y captaciones, permitiría conocer de forma más certera la alteración real producida en la bahía.

11.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

La simulación del caso medio de la hidrodinámica fue realizada con la finalidad de conocer el comportamiento general de las corrientes en la bahía. En el interior de la bahía, cercano a la costa se presenta una corriente con tendencia hacia la dirección N y en el norte de la bahía se produce una vorticidad que permite la salida de las masas de agua hacia el NO de la bahía, en las cercanías de la punta Ventanilla. Las mayores concentraciones de energía se produjeron en los accidentes geográficos, la península Los Molles y entre la zona de la punta Horcón y punta Ventanilla. En el interior de la bahía, se presenta un accidente geográfico cercano de la caleta Loncura donde se concentra la energía.

Con la representación de las descargas y captaciones de la bahía (caso SA) se identificaron importantes incrementos en las temperaturas al norte de la bahía, manteniéndose al interior de la bahía los incrementos más relevantes, durante la simulación. La magnitud de los incrementos de temperatura provocó reducciones en la densidad del agua, ocasionando corrientes ascendentes, que tuvieron efecto sobre los organismos simulados. Como los organismos simulados dependen de la hidrodinámica para su principal desplazamiento, el

predominio de corrientes ascendentes les impide posicionarse en parte de la columna de agua.

Las estimaciones realizadas sobre la concentración de salinidad en los efluentes resultaron con bajas alteraciones de esta variable en el cuerpo de agua.

El modelo ecológico describió de buena manera una relación depredador-presa entre el zooplancton y fitoplancton, de forma que ambos organismos presentaron un comportamiento similar, con un desfase (atrasado) en el zooplancton, debido a su cualidad de depredador. La conducta general representada consiste en incrementos de la biomasa orgánica durante las estaciones de verano y primavera, mientras que, en las estaciones de invierno y primavera se reducen sus concentraciones. El fitoplancton se reduce de forma súbita debido a la agresiva depredación del zooplancton. Esto ocurre por la debilidad del modelo numérico que representa ambas especies como una taxa, en cada una, lo cual impide la selectividad en la elección de presas y la utilización de otras fuentes de alimento que permite la sobrevivencia. La realización de un modelo numérico más completo impediría su resolución debido a la capacidad computacional necesaria para resolver todos los procesos relacionados. A pesar de esto, la capacidad de interactuar los organismos con el resto de las variables ambientales simuladas permite emplear la simulación ecológica como herramienta de evaluación.

Los incrementos de los nutrientes y vientos cercano a la estación de primavera, además de las elevadas concentraciones y magnitudes de la componente vertical de la corriente (w) en los alrededores de la península Los Molles (IFOP, 2016), permite asociar una semejanza entre el comportamiento simulado y un evento de surgencia, aunque para tener la certeza se requiere estudios más detallados que no contempla los objetivos de esta memoria.

11.3 ANÁLISIS DE EVALUACIÓN

Se decidió separar las conclusiones de los análisis según el caso de estudios realizados en esta memoria, como se presenta a continuación.

11.3.1 CASO SITUACIÓN ACTUAL (SA)

Mediante las simulaciones realizadas sobre la bahía de Quintero, considerando las descargas y captaciones instaladas en la actualidad (caso SA), se presentan importantes diferenciales térmicos al interior de la bahía, con respecto a la simulación de la zona de estudio sin efluentes (caso SN), las magnitudes son equivalentes a eventos del fenómeno del Niño. Según los cálculos realizados, en promedio durante la simulación, el 13 [%] de la bahía presenta un fenómeno del Niño (>0.5 [°C]), mientras que, en un 2.0 [%] donde ocurre un fenómeno del Niño extremo (>2 [°C]) y 1.5 [%] de la superficie equivalente al mayor fenómeno del Niño registrado (>2.6 [°C]).

Los incrementos de temperatura causan las corrientes ascendentes que reducen la concentración de fitoplancton, principalmente en el norte de la bahía, y, por ende, de la clorofila a , lo cual reduce el coeficiente $TRIX$ relacionado con una tendencia hacia el estado oligotrófico con respecto al caso SN.

La reducción de organismos en el norte de la bahía, afectan la producción de fitoplancton y, en especial, el zooplancton, el cual ocupa una mayor porción en la columna de agua. La reducción del zooplancton como depredador, permite incrementos en la concentración de

fitoplancton, aunque en la variable plancton (suma de ambas variables), se revela una reducción general de la biomasa.

El análisis de las captaciones en la bahía fue realizado solo en el caso SA, debido a que este caso de estudio representa de mejor forma la realidad actual de la bahía. A causa que el modelo numérico empleado no representa los efectos de las tomas de agua sobre los sistemas ecológicos, se extrajeron las concentraciones de los organismos en las ubicaciones de las captaciones para evaluarse sus impactos mediante el modelo de pérdidas de adultos equivalentes. Con los resultados obtenidos se determina que las pérdidas ocasionadas por las captaciones, de anchovetas y de las sardinas (en las sardinas solo bajo la metodología AEL3), ocurrieron en magnitudes cercanas a algunos de los registros de toneladas de desembarque artesanal en la bahía de Quintero, de las respectivas especies. Esto indica que ambas actividades pueden presentar valores semejantes, sin embargo, que las pérdidas de adultos por las tomas de agua tengan algún efecto negativo sobre las poblaciones de las especies o sobre la pesca artesanal debe ser determinado en estudios específicos y más profundos, pues la información de las toneladas desembarcadas artesanalmente se puede asociar a distintos factores como vedas, interés económico por cierta especie, cambio climático, entre algunas.

La evaluación de impactos fue realizada solo en este caso de estudio, por su cercanía a las características actuales de la bahía. Según el análisis realizado, se identifica el impacto térmico como “significativo”, lo cual concuerda con la superficie abarcada y las grandes magnitudes presentadas al interior de la bahía. En los efectos efectuados sobre el plancton, la calificación lo determina como “no significativo”. Al comparar los resultados por variables, con las correspondientes del impacto térmico, se revela que esta calificación se relaciona con la variable “certidumbre”. A pesar que, son representados los principales comportamientos de las variables ecológicas, la complejidad de los procesos naturales impide evaluar la certidumbre con el máximo valor.

El impacto asociado a las captaciones es calificado como “no significativo”, debido a la pequeña superficie que afecta, actúa en forma individual y, según los estudios, de baja intensidad por no alterar los valores basales de la bahía en forma relevante.

11.3.2 CASOS DESCARGAS UNITARIAS (SN+D3 Y SN+D4)

Los casos con solo las descargas de Nueva Ventanas (D3) y Campiche (D4), tuvieron la finalidad de evaluar las alteraciones que pueden provocar sobre la bahía las descargas individuales con mayores caudales.

En ambos casos se identifica importantes diferenciales térmicos, respecto a la simulación de caso SN, instalados en el norte de la bahía durante las simulaciones. Las magnitudes son semejantes en ambos casos, alcanzando diferenciales superiores a las características de un fenómeno del Niño (>0.5 [°C]), los cuales cubren cerca sobre el 20 [%] de la superficie impactada en el caso SA, en ambos casos. En pequeñas porciones, también se encuentran superficies con diferenciales térmicos asociados a eventos del Niño extremos (>2.0 [°C]) y al mayor evento del Niño (2.6 [°C]).

La calidad de agua en estos casos de estudio presenta una tendencia hacia el estado oligotrófico respecto al caso SN, ocasionado principalmente por reducción en la clorofila a, de forma similar al caso SA. La reducción de la clorofila a se debe a las corrientes ascendentes ocasionadas por los diferenciales térmicos, que reducen las concentraciones de los organismos.

Las menores magnitudes de las corrientes ascendentes permiten incrementar la producción de fitoplancton, por su dependencia hacia los incrementos de temperatura y por la reducción de zooplancton, variable que ocupa mayor espacio de la columna de agua. El análisis integrado del dominio permite identificar que el caso SN+D3 reduce levemente la concentración del plancton y el caso SN+D4 produce un pequeño incremento. Esto responde a la menor temperatura del efluente (D4) y a las distintas posiciones en la bahía.

11.3.3 CASO ELEVACIÓN MÁXIMA DE TEMPERATURA (SD90_T)

El caso SD90_T que representó el caso hipotético, donde todos los efluentes en la bahía de Quintero se configuraron con las máximas temperaturas permitida en el D.S. N°90/ 2000 (30 [°C]).

El diferencial térmico, respecto al caso SN, cubre, aproximadamente, la totalidad de la bahía, incrementando la superficie media de ocurrencia del fenómeno del Niño (>0.5 [°C]) en un 230 [%] en comparación al caso SA.

Los efectos térmicos sobre los organismos responden de forma similar que en el caso SA. La clorofila a disminuye más en esta simulación, produciendo el mayor acercamiento hacia el estado oligotrófico, respecto al caso SN.

Lo anterior concuerda con la menor magnitud en la producción de organismos, que provocan menores concentraciones de zooplancton en el análisis integrado y, por ende, un incremento en el fitoplancton.

Es relevante mencionar que, estos impactos ocurrieron bajo el cumplimiento de la norma D.S. N°90/ 2000, identificando la debilidad de esta normativa ante los efectos acumulativos de descargas en bahías cerradas. Por otro lado, este estudio se realiza en la zona central de Chile, cuyos valores de temperatura del agua son mayores que en el sur del país y menores que el norte, por ello, los impactos podrían ser mayores en el sur con la misma configuración, demostrando que la normativa no representa la realidad del país.

11.3.4 CASO ELEVACIÓN MÁXIMA DE CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO (SD90_P)

El caso SD90_P consistió en la inclusión de las descargas actuales en la bahía de Quintero (caso SA) con la concentración máxima permitida de fósforo, según el D.S. N°90/ 2000 (5 [mg/L]). A causa que comienza desde el caso SA, este caso incluye los efectos térmicos ya estudiados sobre la bahía.

La calidad del agua tiende hacia un estado eutrófico en los puntos analizados debido a la acumulación del nutriente fósforo. El incremento de esta variable ocurre en magnitudes mayores que el resto de las variables asociadas a la estimación de la calidad del agua.

En la simulación de organismos se obtiene un incremento notable en el zooplancton, lo cual se debió al aumento en el pastoreo por incrementos de fitoplancton. Es importante mencionar que, los incrementos de zooplancton no son necesariamente beneficiosos para el ambiente.

11.3.5 CASO ELEVACIÓN MÁXIMA DE CONCENTRACIÓN DE NTK (SD90_NTK)

En el caso SD90_NTK se simula la bahía de Quintero con todas las descargas actuales, a las cuales, se les agregaron las concentraciones máximas de NTK, según se establece en el D.S. N°90/ 2000 (50 [mg/L]). Como solo fue agregada la concentración de NTK, en esta simulación se incluyeron los efectos térmicos presentados en el caso SA.

La calidad de agua representada, desde el caso SN, se evidencia una tendencia hacia el estado eutrófico debido al incremento de nutrientes relacionados con el nitrógeno, a pesar de la reducción de la clorofila ocasionada por los diferenciales térmicos. La variación del coeficiente TRIX, es menor que el caso SD90_P, debido a que el NTK debe transformarse a su forma inorgánica para ser contabilizado.

Sobre los organismos, en comparación con el caso SA, se evidencia un ligero incremento en la producción de fitoplancton, el cual se debe al incremento de nutrientes que permite el crecimiento. La magnitud de incremento es notablemente menor, que el caso SD90_P, debido a la cantidad de nitrógeno en el ambiente, por lo cual, el nitrógeno no es el nutriente limitante bajo esta configuración.

11.3.6 CASO INCLUSIÓN DESCARGA PROYECTO ACONCAGUA (SA+D13)

El caso SA+D13, consistió en la inclusión al caso SA, la descarga del proyecto Aconcagua, la cual corresponde a los RILES desde una desalinizadora. Este proyecto aún no ha sido instalado en la bahía de Quintero aún, pero fue estudiado con la finalidad de analizar los efectos futuros al incluir una descarga en la bahía. Las descargas salinas sobrepasaron los límites establecidos en ANZECC (1992) en la capa de fondo, aunque en una superficie mínima.

Tanto en las variaciones de la calidad de agua y organismos se evidencia un acercamiento desde los valores mostrados en el caso SA hacia los resultados del caso SN. Esto se produce por los incrementos en la densidad asociado a los aumentos en la salinidad que provoca una corriente principalmente descendente. Como las alteraciones en la simulación ecológica del caso SA, se debe a la corriente ascendente ocasionada por las descargas térmicas, una corriente principalmente descendente permite una reducción en los efectos. En la práctica, no es posible establecer la instalación de descargas salinas para solucionar los efectos de las descargas térmicas, ya que la variación en la salinidad puede inferir daños en los organismos habitantes, que el modelo ecológico escogido en esta memoria no aborda.

12 REFERENCIAS

- Asencio, J. O. (2017). *Trabajo de fin grado: Modelo depredador-presa Lotka-Volterra*. San Cristóbal de la Laguna: Universidad de la Laguna, Facultad de Ciencias, Sección de Biología.
- Abbaspour, M., Javis, A. H., Moghini, P., & Kayhan, K. (2005). *Modeling of thermal pollution in coastal area and its economical and environmental assessment*. International journal environmental science and technology.
- Alvial, A. M., & Avaria, S. P. (1981). *Proliferación de Primavera del fitoplancton en la bahía de Valparaíso. I. Condiciones meteorológicas y oceanográficas*. Universidad de Valparaíso, Instituto Oceanología. Viña del Mar: Revista de Biología Marina.
- Alvial, A. M., & Avaria, S. P. (1982). *Proliferación de primavera del fitoplancton en la bahía de Valparaíso. II. Dinámica de las comunidades*. Universidad de Valparaíso, Instituto de oceanología. Viña del Mar: Revista de Biología Marina.
- ANZECC. (1992). *Australian and New Zeland guidelines for fresh and marine water Quality*. Camberra: Australian and New Zeland Environment and conservation council.
- Arcadis Chile. (2015). *EIA Planta desalinizadora y suministro de agua industrial*. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- Avaria, S. (1971). *Variaciones mensuales del fitoplancton en la bahía de Valparaíso, entre Julio de 1963 y Julio de 1966*. Valparaíso: Revista de Biología Marina.
- Avaria, S. P. (1975). *Estudios de ecología fitoplantónica en la bahía de Valparaíso II. Fitoplancton 1970-1971*. Universidad de Valparaíso, Instituto de oceanología. Viña del Mar: Revista de Biología Marina.
- Avaria, S. P., & Muñoz, P. S. (1982). *Producción actual, biomasa y composición espedífica del fitoplancton de la bahía de Valparaíso en 1979*. Universidad de Valparaíso, Instituto de oceanología. Revista de Biología Marina.
- Avaria, S., & Orellana, E. (1975). *Estudios de ecología fitoplantónica en la bahía de Valparaíso. III. Fitoplancton 1972-73*. Universidad de Valparaíso, Instituto de oceanología. Viña del Mar: Revista de Biología Marina.
- Avaria, S., Muñoz, P., & Braunn, M. (1988). *El fitoplancton frente a península Los Molles Valparaíso, Chile (32° 45' S) y su relación con "El Niño" 1982-83*. Universidad de Valparaíso, Instituto de oceanología. Viña del Mar: Revista Biología Marina.
- Baird & Associates. (2006). *Lake Simcoe hydrodynamic and water quality model*. Lake Simcoe region conservation authority, Oakville, Ontario.
- Barrera, G. R. (2015). *Tesis de Magister en Geografía: Historia Ambiental de la Generación Termoeléctrica en Ventanas: La producción ecológica de la compensación económica*. Santiago: Universidad de Chile- Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Bleck, R. (2002). *An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic- Cartesian coordinates*. Los Alamos National Laboratory.
- Bristow, P. (1992). *The illustrated encyclopedia of fishes*. London: Chancellor Press.
- C.E.M. (2002). *Coastal Engineering Manual*. Washington: U.S. Army Corps Engineers.
- Cardoso-Mohedano, J. G., Bernardello, R., Sanchez-Cabeza, J. A., Ruiz-Fernández, A. C., Alonso-Rodríguez, R., & Cruzado, A. (2015). *Thermal impact from a thermoelectric power plant on a tropical coastal lagoon*. Water air soil pollut.
- CEA. (2013). *Análisis de riesgo ecológico por sustancias potencialmente contaminantes en el aire, suelo y agua, en las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví*. Centro de Ecología Aplicada.

- Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE. (2009). *Modelación de descarga de efluente en emisario submarino Norske Skog Bio Bio*. Servicio de Evaluación Ambiental. Universidad de Concepción.
- Costasur Ltda. (2009). *Estudio de modelación dinámica pluma descarga salmuera-Proyecto planta desaladora sector bahía Flamenco Región de Atacama*. Servicio de Evaluación Ambiental.
- D.S. N° 90. (2000). Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Santiago, Chile: Ministerio general de la Secretaría General de la Presidencia.
- Decreto 652. (19 de Diciembre de 1997). Establece áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos para la V región. Deja sin efecto decreto que indica. Santiago: Ministerio de economía, fomento y reconstrucción; Subsecretaria de pesca.
- Desortová, B. (1981). *Relationship between Chlorophyll-a Concentration and Phytoplankton Biomass in Several Reservoirs in Czechoslovakia*. Institute of Landscape Ecology Czechoslovak, Academy of Sciences. Czechoslovakia: Hydrobiological Laboratory .
- DHI. (2017(a)). *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. Denmark: DHI Software.
- DHI. (2017(b)). *MIKE 3 Flow Model Hydrodynamics Module Scientific Documentation*. Denmark: DHI Software.
- DHI. (2017(c)). *EUTROPHICATION MODEL 2 Eco Lab Template Scientific Description*. Denmark: DHI software.
- DIRINMAR. (2015). Directrices para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima . Valparaíso, Chile: DIRECTEMAR.
- Ecogestión ambiental Ltda. (2016). *Modelación pluma de descarga de RILES empresa pesquera operaciones costeras*. Servicio de Evaluación Ambiental. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- Ecotecnos S.A. (2010). *Modelación del campo cercano de la pluma salina- Proyecto planta desaladora para el Valle de Copiapó*. Servicio de Evaluación Ambiental. Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): Santiago.
- Ecotecnos S.A. (2015(a)). *Modelación numérica de campo cercano y campo lejano de la dispersión de pluma salina del proyecto "Planta desalinizadora y suministro de agua industrial"*. Servicio de Evaluación Ambiental. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- Ecotecnos S.A. (2015(b)). *Modelación numérica de campo cercano y campo lejano de la dispersión de pluma salina, planta desaladora Pisagua*. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- Ecotecnos S.A. (2017(a)). *Modelación numérica de Campo cercano y campo lejano de la dispersión de la pluma salina*. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- Ecotecnos S.A. (2017(b)). *Modelación numérica de los efectos de la captación sobre el plancton*. Servicio de Evaluación Ambiental. Santiago: Servicio de Impacto Ambiental (SEIA).
- Ecotecnos S.A. (2017(c)). *Estimación de la pérdida de adultos equivalentes asociados a la captación de aguas marinas*. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- Ecotecnos S.A. (2018). *MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA PLUMA TERMOSALINA, CENTRAL VENTANAS 3 Y PLANTA DESALADORA VENTANAS 3*. Viña del Mar: Servicio de evaluación ambiental (SEA).

- Ehrler, C., Steinbeck, J., Laman, E., Hedgepeth, J., Skalski, J., & Mayer, D. (2002). *A process for evaluating adverse environmental impacts by cooling-water system entrainment at a California power plant*. The Scientific World Journal.
- EPRI. (2004). *Extrapolating impingement and entrainment losses to equivalent adults and production foregone*. California: Electric power research institute Inc.
- Erichsen, A. C., Møhlenberg, F., Closter, R. M., & Sandberg, J. (2010). *Models for transport and fate of carbon, nutrients and radionuclides in the aquatic ecosystem at Øregrundsgrepen*. DHI.
- Escribano, R., & Fuentes, M. (2012). *Zooplankton time series in the coastal zone off Chile: Variation in upwelling and responses of the copepod community*. Universidad de Concepción, Center for Oceanographic Research in the Eastern South Pacific (COPAS). Progress in Oceanography.
- Escribano, R., & Hidalgo, P. (2000). *Influence of El Niño and La Niña on the population dynamics of Calanus chilensis in the Humboldt Current ecosystem of northern Chile*. ICES Journal of Marine Science.
- Ferreira, J., Andersen, J., Borja, A., Bricker, S., Camp, J., Cardoso da Silva, M., Claussen, U. (2011). *Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive*. Estuarine, Coastal and Shelf Science.
- Fofonoff, N. P., & Millard, R. C. (1983). *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*. Paris: UNESCO technical papers in marine science.
- Franks, P. J. (2002). NPZ Models of plankton dynamics: Their construction, coupling to physics, and application. *Journal of oceanography* Vol. 58, 379-387.
- GAC S.A. (2009). *Estudios de Dilución en Campo Cercano. Proyecto de Abastecimiento de Agua para la Minería del Valle de Copiapó*. Servicio de Evaluación Ambiental.
- GAC S.A. (2013). *Estudio de impacto ambiental proyecto Terminal de Gas Natural Licuado (GNL) en Quintero*. Servicio de evaluación ambiental.
- García, M. H. (1996). *Hidrodinámica ambiental*. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.
- Garde, K., Sehested Hansen, I., & Murray, C. (2008). *Analysis of the changes in N and P discharge from Ryaverket*. Hørsholm: DHI.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. Tokyo: World Scientific.
- Gómez Jakobsen, F. J. (2015). *Tesis Doctoral: Evaluación del estado de eutrofización del mar Alborán mediante el empleo combinado de imágenes de satélite y de muestreos in situ*. Universidad de Málaga, Departamento de Física Aplicada II, Málaga.
- González, M., Gyssels, P., Mader, J., Borja, Á., Galparonso, I., & Uriarte, A. (2001). *La modelización numérica de la dispersión de productos de desecho vertido desde explotaciones de acuicultura: una herramienta para la adecuada gestión medioambiental del sector*. Santander, España: Publicación, VIII Congreso Nacional de Acuicultura.
- Goodyear, P. C. (1978). *Entrainment impact estimates using the equivalent adult approach*. Michigan: Office of biological services fish and wildlife Service U.S Department of the Interior.
- Hart, J. (1973). *Pacific fishes of Canada. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge : Cambridge university press.

- IFOP. (2016). *Determinación de los impactos en los recursos hidrobiológicos y en los ecosistemas marinos presentes en el área de influencia del derrame de hidrocarburo de Bahía Quintero, V Región*. Valparaíso: Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.
- IGD Chile S.A. (2008). *Simulación del efluente para emisario submarina de piscicultura SKYSAL Punta Arenas*. Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- INGEX Ltda. (2008). *Diseño del emisario submarino Soc. Emisario Coronel S.A. Punta Puchoco*. Servicio de Evaluación Ambiental.
- Ingleton, T., Kobayashi, T., Sanderson, B., Patra, B., Macinnis-Ng, C., Hindmarsh, B., & Bowling, L. C. (2007). *Investigations of the temporal variation of cyanobacterial and other phytoplanktonic cell at the offtake of a large reservoir, and their survival following passage through it*. Springer Science.
- IOC. (1985). www.ioc-sealevelmonitoring.org. (UNESCO, Editor)
- Ji, Z. G. (2008). *Hydrodynamics and water quality-Modeling rivers, lakes, and estuaries*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Jorgensen, S. E., & Bendricchio, G. (2001). *Fundamentals of ecological modelling*. Denmark: ELSEVIER.
- Kamphuis, J. W. (2000). *Introduction to coastal engineering and management*. Kingston: World Scientific Publishing.
- Karydis, M., & Kitsiou, D. (2013). *Marine water quality monitoring: A review*. Marine pollution bulletin.
- Keun-Hyung, C., Young-Ok, K., Joon-Baek, L., Soon-Young, W., Man-Woo, L., Pyung-Gang, L., Ho-Young, S. (2012). *Thermal impacts of a coal power plant on the plankton in an open coastal water environment*. Journal of marine science and technology.
- Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2012). *Fluid mechanics fifth edition*. Oxford: Elsevier.
- Landaeta, M., Schrebler, K., Bustos, C., Letelier, J., & Balbontín, F. (2009). *Temporal fluctuations of nearshore ichthyoplankton off Valparaíso, central Chile, during the ENSO cycle 1997-2000*. Valparaíso: Revista de Biología Marina y Oceanografía.
- Lattermann, S., & Höpner, T. (2007). *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination*. Desalination.
- Ley N° 19300. (1994). Ley sobre bases generales del medio ambiente. Santiago, Chile: Ministerio secretario general de la presidencia.
- Libes, S. M. (2009). *Introduction into marine biogeochemistry*. San Diego: El Sevier.
- Lim, H.-S., Díaz, R. J., Hong, J.-S., & Schaffner, L. C. (2006). *Hypoxia and benthic community recovery in Korean coastal waters*. Marine pollution bulletin.
- Lin, J., Zou, X., & Huang, F. (2018). *Effects of the thermal discharge from an offshore power plant on plankton and macrobenthic communities in subtropical China*. Elsevier.
- Liungman, O., & Moreno Arancibia, P. (2010). *Developing a 3D coupled hydrodynamic and ecological model to be used in coastal management*. DHI, Copenhagen.
- Malcangio, D., & Petrillo, A. (2009). *Modeling of brine outfall at the planning stage of desalination plants*. Desalination.
- Margalef, R. (1978). *Phytoplankton communities in upwelling areas The example of NW Africa*. Barcelona: Departamento de Ecología, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona.
- Metzger, E. J., Chassignet, E. P., Cummings, J. A., Hurlburt, H. E., Smedstad, O. M., & Wallcraft, A. J. (2006). *Global Ocean Prediction Using HYCOM*.

- Ministerio de energía. (2016). *Guía de buenas prácticas en el uso de agua para refrigeración de centrales termoeléctricas*. Gobierno de Chile, División de desarrollo sustentable, Santiago.
- Ministry of the Environment of Ontario. (2010). *Lakeshore capacity assessment handbook: Protecting water quality in inland lakes on Ontario's precambrian shield*. Ontario: Ministry of the Environment of Ontario.
- Miri, R., & Chouikhi, A. (2004). *Ecotoxicological marine impacts from seawater desalination plants*. Desalination.
- Nielsen, D. R., Ginn, T. C., Ziccardi, L. M., & Boehm, P. D. (2005). *An evaluation of the approaches used to predict potential impacts of open loop LNG vaporization systems on fishery resources of the Gulf of Mexico*. Washington: The Center for Liquefied Natural Gas.
- Niño, Y. (2013(a)). *Flow and transport equations in surface waters*. Santiago: Departamento de Ingeniería civil de la Universidad de Chile.
- Niño, Y. (2013(b)). *Response of stratified water body to wind surface set-up and interfacial displacement*. Hidrodinámica Ambiental.
- Palma, A. T., Henríquez, L. A., & Ojeda, P. F. (2009). *Phytoplanktonic primary production modulated by coastal geomorphology in a highly dynamic environment of central Chile*. Universidad de Valparaíso. Viña del Mar: Revista de Biología Marina y Oceanografía.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE*. Computers and Geosciences.
- Pettine, M., Casentini, B., Fazi, S., Giovanardi, F., & Pagnotta, R. (2007). *A revision of TRIX for trophic status assessment in the light of the European Water Framework Directive: Application to Italian coastal waters*. Roma, Italia: Marine Pollution Bulletin.
- POCH. (2008). *Modelación pluma dilución- Proyecto Planta procesadora de recursos hidroiológicos puerto de Maistre, canal Señoret*. Servicio de Evaluación Ambiental.
- Prado, R., & Sievers, H. (1987). *Distribución de características físicas y químicas frente a península Los Molles, Chile (32° 45'S) y su relación con su fenómeno "El Niño" 1982/83*. Valparaíso: Revista de Biología marina.
- Prado-Fiedler, R. (2009). *Winter and summer distribution of dissolved oxygen, PH and nutrients at the heads of fjords in Chilean Patagonia with possible phosphorus limitation*. Valparaíso: Revista de biología marina y oceanografía.
- Prakash, S., Kolluru, V., & Young, C. (2014). *Evaluation of the Zone of Influence and Entrainment Impacts for an Intake Using a 3-Dimensional Hydrodynamic and Transport Model*. Journal of marine science and engineering.
- PRDW Aldunate Vásquez. (2010). *Evaluación de pluma de descarga de agua salada en el medio marino- Proyecto planta desalinizadora Minera Candelaria*. Servicio de Evaluación Ambiental.
- PRDW Aldunate Vásquez Ltda. (2009). *Estudio del sistema difusor y dilución en el medio marino- Proyecto Emisario Submarino Planta Celulosa Valdivia*. Servicio de Evaluación Ambiental.
- Purnama, A., & Shao, D. (2015). *Modeling brine discharge dispersion from two adjacent desalination outfalls in coastal waters*. Desalination.
- Riley, J., & Chester, R. (1989). *Introducción a la química marina*. AGT EDITOR.
- Roberts, D., Johnston, E., & Knott, N. (2010). *Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies*. Water Research.

- Rodríguez, L. (1987). *Observaciones sobre el fitoplancton y temperatura*. Valparaíso: Revista de Biología marina.
- Rodríguez, L., Zárate, O., & Oyarce, E. (1986). *Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la bahía de Mejillones del Sur*. Valparaíso: Revista biología marina.
- Santander, E., Herrera, L., & Merino, C. (2003). *Fluctuación diaria del fitoplancton en la capa superficial del océano durante la primavera de 1997 en el norte de Chile (20°18'S): II. Composición específica y abundancia celular*. Iquique: Revista de Oceanografía y física.
- Sato, M., Horne, J., Parker-Stetter, S., Essington, T., Keister, J., Moriarty, P., . . . Newton, J. (2016). *Impacts of moderate hypoxia on fish and zooplankton prey distributions in a coastal fjord*. Marine Ecology Progress Series.
- Schuchert, P., Kregting, L., Pritchard, D., Savidge, G., & Elsässer, B. (2016). *Using coupled hydrodynamic biogeochemical models to predict the effects of tidal turbine arrays on phytoplankton dynamics*. Biogeosciences.
- Seaby, R., & Henderson, P. (2007). *Entrainment, impingement and thermal impacts at Indian point nuclear power station*. Pisces Conservation Ltd.
- Sehested Hansen, I., Keul, N., Tomfeldt Sørensen, J., Erichsen, A., & H. Andersen, J. (2007). *Baltic Sea oxygen maps*. DHI Water- Environment- Health.
- SGA. (2017). *Proyecto Aconcagua*. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- SHOA. (1992). *Glosario de mareas y corrientes*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- SHOA. (1999). *Publicación 3202 Instrucciones oceanográficas N°2*. Valparaíso: Servicio hidrográfico y oceanográfico de la armada de Chile.
- SHOA. (2003). *Instrucciones Oceanográficas N°5: Especificaciones Técnicas para la Ejecución de Sondaje*.
- SHOA. (2015). *Catálogo de cartas y publicaciones Náuticas Pub. SHOA 3000*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfica de la Armada de Chile.
- SHOA. (2019). *Publicación 3201 Instrucciones oceanográficas N°1*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile 2019.
- Sievers, H., & Vega, S. (2000). *Respuesta físico-química de la bahía de Valparaíso a la surgencia generada en punta Curaumilla y el fenómeno El Niño*. Valparaíso: Revista de Biología Marina y Oceanografía.
- Silva, N., & Valdenegro, A. (2003). *Evolución de un evento de surgencia frente a punta Curaumilla, Valparaíso*. Valparaíso: Investigación Marina.
- SINCA. (2009). *Sistema de Información Nacional de Calidad de aire*. (M. d. Chile, Editor) Recuperado el 14 de Junio de 2018, de www.sinca.mma.gob.cl
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction to physical oceanography*. Texas: Department of oceanography Texas A & M University.
- The Clinic Online. (23 de Febreri de 2012). Recuperado el 2019, de The Clinic: <https://www.theclinic.cl/2012/02/23/banistas-de-las-termas-de-ventanas-se-exponen-a-aguas-ultra-contraminadas/>
- UNICAN. (2000). *Documento de Referencia Vol 1 Dinámicas*. Cantabria: Ministerio de Medio Ambiente Dirección general de Costas.
- Universidad de Valparaíso. (2016). *Atlas de Oleaje para Chile*. Obtenido de oleaje.uv.cl
- Valdés, V., Escribano, R., & Vergara, O. (2017). *Scaling copepod grazing in a coastal upwelling system: the importance of community size structure for phytoplankton C flux*.

- Vargas, C. A., Escribano, R., & Poulet, S. (2006). *Phytoplankton food quality determines time windows for succesful zooplankton reproductive pulses*. Ecological society of America.
- Vargas, C. A., Martínez, R. A., Escribano, R., & Lagos, N. A. (2010). *Seasonal relative influence of food quantity, quality and feeding behaviour on zooplankton grow regulation in coastal food web*. Journal of the marine biological association of the United Kingdom.
- Vollenweider, R. A., Giovanardi, F., Montanari, G., & Rinaldi, A. (1998). *Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a Troohic scale, turbidity and generalized water quality index*. Cesenatico: Environmetrics.
- Wallcraft, A., & Metzger, E. (2009). *Software Design Description for the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) Version 2.2*. Ocean Dynamics and Prediction Branch Oceanography Division.
- Watereuse Association. (2011). *Desalination Plant Intakes Impingement and entrainment impacts and solutions*. Watereuse Association.
- Wen-Tseng, L., Pei-Kai, H., Tien-Hsi, F., Jian-Hwa, H., & Hung-Yen, H. (2015). *Phytoplankton communities impacted by thermal effluents off two coastal nuclear power plants in subtropical areas of northern Taiwan*. Terrestrial atmospherc and oceanic sciences.
- Woelfl, S., Caputo, L., García Chicote, J., & de Los Ríos, P. (2018). *Manuales para la bioindicación: Zooplancton*. Ministerio del Medio Ambiente , Santiago, Chile.
- Xu, M. J., Yu, L., Zhao, Y. W., & Li, M. (2012). *The simulation of shallow reservoir eutrophication based on MKE21: a case study of Douhe reservoir in North China*. Beijing: ELSEVIER.

13 ANEXOS

13.1 ANEXO ALCANCES Y LIMITACIONES

13.1.1 VARIACIÓN HISTÓRICA DE LA APERTURA DEL ESTERO CAMPICHE



Figura 13-1 Variación histórica de la salida del estero Campiche.
Fuente: Elaboración propia.

13.2 ANEXO MARCO TEÓRICO

13.3 ANEXO METODOLOGÍA Y MATERIALES

13.3.1 COMPARACIÓN DE DATOS DE VIENTO ENTRE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

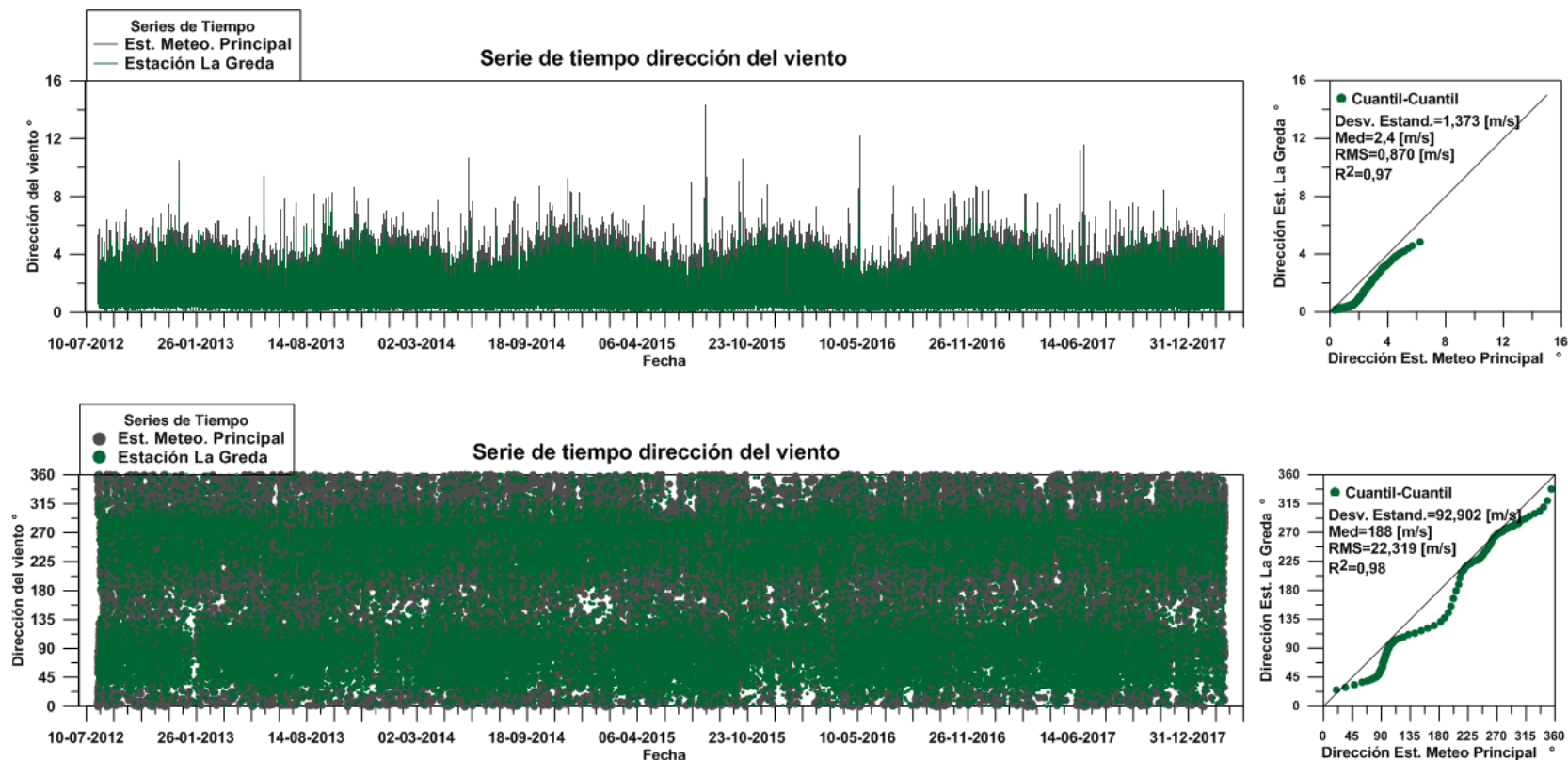


Figura 13-2 Comparación de datos de viento entre la Estación Meteorológica Principal y la Estación La Greda.

Fuente: Elaboración propia.

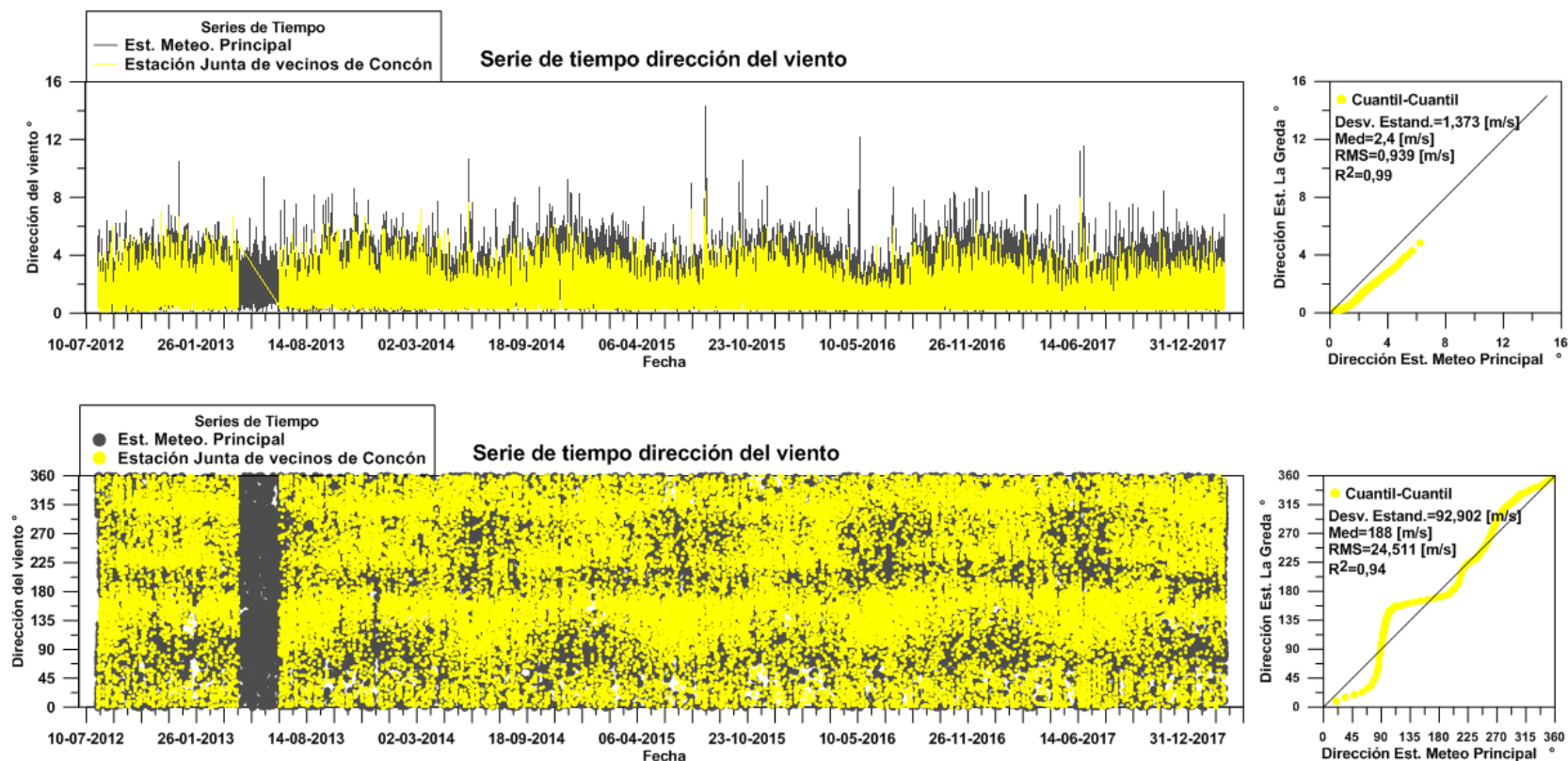


Figura 13-3 Comparación de datos de viento entre la Estación Meteorológica Principal y la Estación Junta de vecinos de Concón.

Fuente: Elaboración propia.

13.3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HYCOM

El modelo *HYCOM* (*HYbrid Coordinate Ocean Model*) es un modelo de circulación general oceánica que fue desarrollado mediante la colaboración de la Universidad de Miami, la Universidad del Estado de Florida, el Laboratorio Nacional Los Álamos, el Laboratorio de Investigación Naval, entre otros. Este modelo emplea las ecuaciones primitivas de momentum, continuidad y termodinámica, como ecuaciones de gobierno (Bleck, 2002), las cuales son representadas en las ecuaciones 13-1, 13-2 y 13-3. Estas ecuaciones fueron descritas sobre las coordenadas x, y, s , como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial v}{\partial t_s} + \nabla_s \frac{v^2}{2} + (\zeta + f)k \cdot v + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial v}{\partial p} + \nabla_s M - p \nabla_s \alpha \quad 13-1$$

$$= -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s v \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \quad 13-2$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) = \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \theta \right) + \mathcal{H}_\theta \quad 13-3$$

Donde:

$v = (u, v)$ vector de velocidad horizontal

p presión

θ represente de variables termodinámicas

$\alpha = \rho_{pot}^{-1}$ volumen potencial específico

$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x_s} - \frac{\partial u}{\partial y_s}$ velocidad relativa

$M = gz + p \alpha$ potencial de Montgomery

$gz = \phi$ geopotencial

f parámetro de Coriolis

k vector vertical unitario

ν coeficiente de la variable turbulencia viscosa difusiva

τ vector de esfuerzo inducido de viento y/o arrastre de fondo

$\mathcal{H}_\theta$ suma de términos fuentes

La ecuación de estado (ecuación 13-4) utilizada corresponde a una aproximación de la ecuación de estado de UNESCO (Wallcraft & Metzger, 2009). Para una presión de referencial, la densidad en unidades sigma es especificada en siete términos polinomiales para un potencial de temperatura (θ), y salinidad linear (S).

$$\sigma(\theta, S, p) = C_1(p) + C_2(p)\theta + C_3(p)S + C_4(p)\theta^2 + C_5(p)\theta S + C_6(p)\theta^3 + C_7(p)S\theta^2 \quad 13-4$$

En el estudio *Global Ocean Prediction using HYCOM* (Metzger et al, 2006) se realizó una simulación global con el modelo grillas de dimensión 1/12°, durante el periodo de octubre 1992 – mayo 2005 que fue contrastado con mediciones de la variabilidad de elevación

superficial del mar por medio de satélites, como se muestra en la Figura 13-4. Con esta metodología se demuestra la capacidad del modelo para simular los sistemas naturales en una escala global. Se debe mencionar que el modelo no simula los efectos cercanos a la línea del Ecuador, debido que esa zona se encuentra afectada por el fenómeno del Niño, el cual no se encuentra simulado.

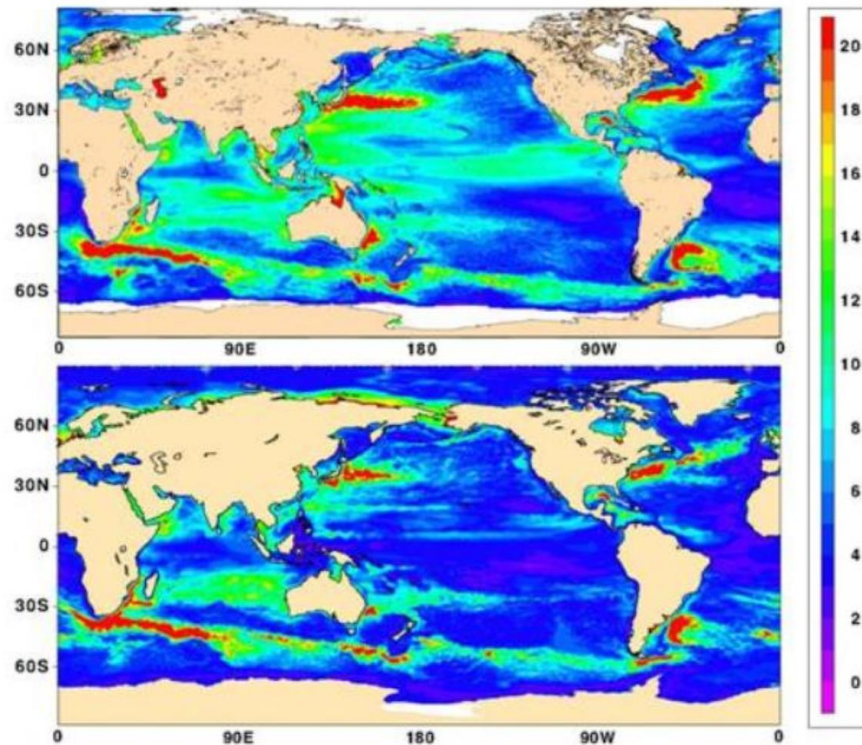


Figura 13-4 Validación de la variabilidad de la elevación superficial del mar. Recuadro superior construido mediante datos satelitales, recuadro inferior mediante simulación numérica.

Fuente: (Metzger et al, 2006).

13.4 ANEXO CARACTERIZACIÓN DE ANTECEDENTES

13.4.1 OLEAJE

En el interior de la bahía, en el punto qnt-1, se midieron las alturas significativas de olas (H_{m0}) con un predominio en el intervalo 0.5- 1.0 [m], tanto en las mediciones de invierno (Tabla 13-1 y Tabla 13-2) como en verano (Tabla 13-4 y Tabla 13-5). En ambas campañas se registraron H_{m0} desde el intervalo 0.0- 0.5 [m] hasta el 1.5- 2.0 [m]. Con los datos Atlas pudieron obtenerse las H_{m0} en aguas profundas durante las mediciones del punto qnt-1 en las estaciones de invierno y verano. En la campaña de invierno (Tabla 13-7 y Tabla 13-8), en los datos Atlas, se registraron H_{m0} desde el intervalo 1.0- 1.5 [m] hasta 4.0- 4.5 [m] con un predominio en el intervalo 2.0- 2.5 [m]. Durante la campaña de verano (Tabla 13-10 y Tabla 13-11) en los datos Atlas, se registraron H_{m0} entre los intervalos 1.5- 2.0 [m] y 3.5- 4.0 [m] con el intervalo 2.5- 3.0 [m], más frecuentado.

En el punto qnt-5, que se encuentra en las afueras de la bahía, se registraron H_{m0} entre los intervalos 0.5- 1.0 y 4.5- 5.0 [m], con un predominio en el intervalo 1.0-1.5 [m] (Tabla 13-13). En la totalidad de los datos Atlas, en aguas profundas, se mostraron H_{m0} (Tabla 13-14 y Tabla 13-15) desde el intervalo 0.5- 1.0 [m] hasta los 6.5- 7.0 [m], con un predominio en el intervalo 2.0- 2.5 [m].

La caracterización de esta información muestra la variación estacional ocurrida en los datos recopilados, donde en las mediciones costeras del punto qnt-1 presentaron H_{m0} similares en ambas campañas, aunque en los datos Atlas, durante las mismas fechas, se mostraron mayores H_{m0} en la estación de invierno, sin embargo, el intervalo más frecuente es mayor en la estación de verano.

La H_{m0} tuvo menores valores en las mediciones del punto qnt-1, en comparación con los datos Atlas en las mismas fechas, verificando los efectos costeros asociados a la interacción con el fondo marino.

El punto qnt-1 en la estación de invierno (Tabla 13-1 y Tabla 13-3) registró periodos peak (T_p) desde el intervalo 4- 6 [s] hasta los 20- 22 [s], con un predominio en el intervalo de 10- 12 [s] y en la estación de verano (Tabla 13-4 y Tabla 13-6) se midieron T_p entre los intervalos 6- 8 [s] hasta el 22- 24 [s], con una mayor frecuencia en el intervalo 12- 14 [s]. Durante los mismos intervalos de tiempo, en los datos Atlas, en la campaña de invierno (Tabla 13-7 y Tabla 13-9), se obtuvieron T_p desde el intervalo 6- 8 [s] hasta los 18- 20 [s], con un predominio en el intervalo 12- 14 [s]., mientras que, en la campaña de verano (Tabla 13-10 y Tabla 13-12) se registraron T_p entre los intervalos 6- 8 [s] hasta los 18- 20 [s], con mayor frecuencia en el intervalo 12-14 [s].

En la totalidad de los datos Atlas (Tabla 13-14 y Tabla 13-16) se registraron T_p entre los intervalos 2- 4 [s] y 22- 24 [s], con una elevada frecuencia en el intervalo 12- 14 [s].

En los datos medidos en el punto qnt-5 (Tabla 13-13) se registraron periodos medios T_m entre los intervalos 4- 6 [s] y 14- 16 [s], con un predominio en el 8-10 [s].

En los T_p , en las mediciones del punto qnt-1, se presentan valores mayores en las campañas de verano, en comparación con las campañas de invierno. En los datos Atlas, durante los mismos tiempos, se presentan los mismos intervalos de T_p para ambas campañas. Se debe mencionar que, al comparar los datos Atlas y mediciones del punto qnt-1, durante los mismos intervalos de tiempo, no coinciden los máximos, mínimos, ni rangos más frecuentes, lo cual se presume como deficiencias de la simulación de los datos Atlas.

La dirección peak (D_p) medida en el punto qnt-1 durante la estación de invierno (Tabla 13-2 y Tabla 13-3) muestra una tendencia desde la dirección NO, registrándose oleaje desde la dirección NO hasta el NNO y en la estación de verano (Tabla 13-5 y Tabla 13-6) el oleaje

proviene desde las direcciones O hasta la dirección NO, con un predominio desde la dirección ONO. En los mismos intervalos de tiempo, en los datos Atlas, durante la campaña de invierno (Tabla 13-8 y Tabla 13-9) las direcciones se distribuyen desde la dirección SSO hasta el NO, con un predominio en la dirección SO y en la campaña de verano (Tabla 13-11 y Tabla 13-12) se muestran oleaje desde el mismo rango de direcciones, con un predominio desde la dirección SO, también.

En el conjunto total de datos Atlas (Tabla 13-15 y Tabla 13-16) se tienen oleajes provenientes desde el tercer y cuarto cuadrante con una notable frecuencia desde la dirección SO.

Con esta información se comprueba el predominio del oleaje desde el tercer cuadrante, en aguas profundas, aunque en los datos Atlas se presentan una cantidad importante de estados de mar provenientes desde el cuarto cuadrante. A pesar del predominio del tercer cuadrante del oleaje en aguas profundas, en el punto qnt-1 se muestra un cambio de la dirección del oleaje, hacia el cuarto cuadrante, debido a los efectos costeros y a la interacción con la geografía.

En los gráficos de distribuciones de la H_{m0} y T_p por D_p se representan de forma gráfica las tendencias de los datos recopilados. En el punto qnt-1 se muestra una clara tendencia desde el cuarto cuadrante, tanto en la campaña de invierno (Figura 13-5) como en verano (Figura 13-6), aunque en la campaña de verano se presentó una mayor distribución en las direcciones con un acercamiento a la dirección O. Como se presentó en la Figura 13-9 y Figura 13-10, las magnitudes de H_{m0} y T_p fueron similares en los puntos qnt-2 y qnt-3 al punto qnt-1, demostrando valores semejantes en las zona costera en distintas ventanas de tiempo. En las direcciones se muestra una tendencia hacia el O en el punto qnt-2, que se ubica hacia el norte de punto qnt-1, en contraste, el punto qnt-3, que se localiza en las cercanías del punto qnt-1, muestra un predominio hacia el cuarto cuadrante.

En la Figura 13-9 y Figura 13-10 se muestran las gráficas de distribución de H_{m0} y T_p por D_p , de los datos Atlas durante los intervalos de medición en el punto qnt-1, en las campañas de invierno y verano, respectivamente. En estas figuras se muestran mayores H_{m0} y magnitudes similares de T_p , en comparación con las mediciones en el punto qnt-1, pero con una D_p desde el tercer cuadrante. Es importante destacar que, durante la estación de invierno la dispersión de las direcciones fue mayor que en el verano. En la totalidad de los datos Atlas (Figura 13-11) se visualizan magnitudes similares en los parámetros H_{m0} y T_p , que los datos medidos durante las mediciones en el punto qnt-1, también con un predominio desde el tercer cuadrante.

Con el análisis de los espectros bidimensionales de los datos Atlas fue posible determinar la distribución de su energía. En la Figura 13-12 se muestra un espectro promediado por cada estado de mar en los datos Atlas. En esta ilustración es posible notar el predominio de la energía desde el tercer cuadrante con una pequeña porción de energía en el cuarto cuadrante. En la Tabla 13-17 el cálculo del promedio fue separado por las correspondientes estaciones, lo cual permitió identificar el predominio del cuarto cuadrante durante las estaciones de verano y primavera, siendo que en las estaciones de invierno y otoño la energía se focaliza solo en el tercer cuadrante. Este comportamiento es concordante con la conducta normal del oleaje en Chile (SHOA, 2019).

Tabla 13-1 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tp punto qnt-1 inv.

Tp [s]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00 – 0.50	0.50 – 1.00	1.00 – 1.50	1.50 – 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.00	3.00 – 3.50	3.50 – 4.00	4.00 – 4.50	4.50 – 5.00	5.00 – 5.50	5.50 – 6.00	6.00 – 6.50	6.50 – 7.00			
2.0 – 4.0															0	0.00	100.00
4.0 – 6.0	1	1													2	0.76	99.24
6.0 – 8.0	1	8	1												10	4.55	95.45
8.0 – 10.0	1	30	7												38	18.94	81.06
10.0 – 12.0	1	58	18	3											80	49.24	50.76
12.0 – 14.0	3	45	21	2											71	76.14	23.86
14.0 – 16.0		31	6												37	90.15	9.85
16.0 – 18.0	5	16	1	1											23	98.86	1.14
18.0 – 20.0		2													2	99.62	0.38
20.0 – 22.0		1													1	100.00	0.00
22.0 – 24.0															0	100.00	0.00
24.0 – 26.0															0	100.00	0.00
Total	12	192	54	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	264		
A [%]	4.55	77.27	97.73	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	95.45	22.73	2.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-2 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp punto qnt-1 inv.

Dp [°]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00 – 0.50	0.50 – 1.00	1.00 – 1.50	1.50 – 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.00	3.00 – 3.50	3.50 – 4.00	4.00 – 4.50	4.50 – 5.00	5.00 – 5.50	5.50 – 6.00	6.00 – 6.50	6.50 – 7.00			
N															0	0.00	100.00
NNE															0	0.00	100.00
NE															0	0.00	100.00
ENE															0	0.00	100.00
E															0	0.00	100.00
ESE															0	0.00	100.00
SE															0	0.00	100.00
SSE															0	0.00	100.00
S															0	0.00	100.00
SSO															0	0.00	100.00
SO															0	0.00	100.00
OSO															0	0.00	100.00
O															0	0.00	100.00
ONO															0	0.00	100.00
NO	8	167	50	4											229	86.74	13.26
NNO	4	25	4	2											35	100.00	0.00
Total	12	192	54	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	264		
A [%]	4.55	77.27	97.73	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	95.45	22.73	2.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-3 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp punto qnt-1 inv.

Dp [°]	Tp [s]												Total	A [%]	C [%]
	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	10.0-12.0	12.0-14.0	14.0-16.0	16.0-18.0	18.0-20.0	20.0-22.0	22.0-24.0	24.0-26.0			
N													0	0.00	100.00
NNE													0	0.00	100.00
NE													0	0.00	100.00
ENE													0	0.00	100.00
E													0	0.00	100.00
ESE													0	0.00	100.00
SE													0	0.00	100.00
SSE													0	0.00	100.00
S													0	0.00	100.00
SSO													0	0.00	100.00
SO													0	0.00	100.00
OSO													0	0.00	100.00
O													0	0.00	100.00
ONO													0	0.00	100.00
NO		1	5	35	71	64	33	18	1	1			229	86.74	13.26
NNO		1	5	3	9	7	4	5	1				35	100.00	0.00
Total	0	2	10	38	80	71	37	23	2	1	0	0	264		
A [%]	0.00	0.76	4.55	18.94	49.24	76.14	90.15	98.86	99.62	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	99.24	95.45	81.06	50.76	23.86	9.85	1.14	0.38	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-4 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tp punto qnt-1 ver.

Tp [s]	Hm0 [m]													Total	A [%]	C [%]
	0.00-0.50	0.50-1.00	1.00-1.50	1.50-2.00	2.00-2.50	2.50-3.00	3.00-3.50	3.50-4.00	4.00-4.50	4.50-5.00	5.00-5.50	5.50-6.00	6.00-6.50	6.50-7.00		
2.0-4.0														0	0.00	100.00
4.0-6.0														0	0.00	100.00
6.0-8.0	2	7												9	2.73	97.27
8.0-10.0		26												26	10.61	89.39
10.0-12.0	2	50	5											57	27.88	72.12
12.0-14.0	2	66	11											79	51.82	48.18
14.0-16.0	3	54	9											66	71.82	28.18
16.0-18.0		51	5											56	88.79	11.21
18.0-20.0		20	3											23	95.76	4.24
20.0-22.0	2	6	3											11	99.09	0.91
22.0-24.0	2	1												3	100.00	0.00
24.0-26.0														0	100.00	0.00
Total	13	281	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	330		
A [%]	3.94	89.09	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	96.06	10.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-5 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp punto qnt-1 ver.

Dp [°]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00 – 0.50	0.50 – 1.00	1.00 – 1.50	1.50 – 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.00	3.00 – 3.50	3.50 – 4.00	4.00 – 4.50	4.50 – 5.00	5.00 – 5.50	5.50 – 6.00	6.00 – 6.50	6.50 – 7.00			
N															0	0.00	100.00
NNE															0	0.00	100.00
NE															0	0.00	100.00
ENE															0	0.00	100.00
E															0	0.00	100.00
ESE															0	0.00	100.00
SE															0	0.00	100.00
SSE															0	0.00	100.00
S															0	0.00	100.00
SSO															0	0.00	100.00
SO															0	0.00	100.00
OSO															0	0.00	100.00
O	1	4													5	1.52	98.48
ONO	7	190	24												221	68.48	31.52
NO	5	87	12												104	100.00	0.00
NNO															0	100.00	0.00
Total	13	281	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	330		
A [%]	3.94	89.09	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	96.06	10.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-6 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp punto qnt-1 ver.

Dp [°]	Tp [s]												Total	A [%]	C [%]
	2.0 – 4.0	4.0 – 6.0	6.0 – 8.0	8.0 – 10.0	10.0 – 12.0	12.0 – 14.0	14.0 – 16.0	16.0 – 18.0	18.0 – 20.0	20.0 – 22.0	22.0 – 24.0	24.0 – 26.0			
N													0	0.00	100.00
NNE													0	0.00	100.00
NE													0	0.00	100.00
ENE													0	0.00	100.00
E													0	0.00	100.00
ESE													0	0.00	100.00
SE													0	0.00	100.00
SSE													0	0.00	100.00
S													0	0.00	100.00
SSO													0	0.00	100.00
SO													0	0.00	100.00
OSO													0	0.00	100.00
O			1	3	1								5	1.52	98.48
ONO			8	23	54	70	37	15	7	6	1		221	68.48	31.52
NO					2	9	29	41	16	5	2		104	100.00	0.00
NNO													0	100.00	0.00
Total	0	0	9	26	57	79	66	56	23	11	3	0	330		
A [%]	0.00	0.00	2.73	10.61	27.88	51.82	71.82	88.79	95.76	99.09	100.00	100.00			
C [%]	100.00	100.00	97.27	89.39	72.12	48.18	28.18	11.21	4.24	0.91	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-7 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Tp Atlas durante el periodo de qnt-1 inv.

Tp [s]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00-0.50	0.50-1.00	1.00-1.50	1.50-2.00	2.00-2.50	2.50-3.00	3.00-3.50	3.50-4.00	4.00-4.50	4.50-5.00	5.00-5.50	5.50-6.00	6.00-6.50	6.50-7.00			
2.0-4.0															0	0.00	100.00
4.0-6.0															0	0.00	100.00
6.0-8.0						2	1								3	1.14	98.86
8.0-10.0					4	2	1	5							12	5.68	94.32
10.0-12.0			3	22	13	11	8	1							58	27.65	72.35
12.0-14.0				9	44	15	13	11	2						94	63.26	36.74
14.0-16.0				9	13	18	9	3							52	82.95	17.05
16.0-18.0			5	5	2	5	16								33	95.45	4.55
18.0-20.0			8				4								12	100.00	0.00
20.0-22.0															0	100.00	0.00
22.0-24.0															0	100.00	0.00
24.0-26.0															0	100.00	0.00
Total	0	0	16	45	76	53	52	20	2	0	0	0	0	0	264		
A [%]	0.00	0.00	6.06	23.11	51.89	71.97	91.67	99.24	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	100.00	93.94	76.89	48.11	28.03	8.33	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-8 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1 inv.

Dp [°]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00-0.50	0.50-1.00	1.00-1.50	1.50-2.00	2.00-2.50	2.50-3.00	3.00-3.50	3.50-4.00	4.00-4.50	4.50-5.00	5.00-5.50	5.50-6.00	6.00-6.50	6.50-7.00			
N															0	0.00	100.00
NNE															0	0.00	100.00
NE															0	0.00	100.00
ENE															0	0.00	100.00
E															0	0.00	100.00
ESE															0	0.00	100.00
SE															0	0.00	100.00
SSE															0	0.00	100.00
S															0	0.00	100.00
SSO			2	8	5	6	7	4							32	12.12	87.88
SO			13	31	57	41	41	10	2						195	85.98	14.02
OSO				3	13	6	4	6							32	98.11	1.89
O			1	3	1										5	100.00	0.00
ONO															0	100.00	0.00
NO															0	100.00	0.00
NNO															0	100.00	0.00
Total	0	0	16	45	76	53	52	20	2	0	0	0	0	0	264		
A [%]	0.00	0.00	6.06	23.11	51.89	71.97	91.67	99.24	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	100.00	93.94	76.89	48.11	28.03	8.33	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-9 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1 inv.

Dp [°]	Tp [s]												Total	A [%]	C [%]
	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	10.0-12.0	12.0-14.0	14.0-16.0	16.0-18.0	18.0-20.0	20.0-22.0	22.0-24.0	24.0-26.0			
N													0	0.00	100.00
NNE													0	0.00	100.00
NE													0	0.00	100.00
ENE													0	0.00	100.00
E													0	0.00	100.00
ESE													0	0.00	100.00
SE													0	0.00	100.00
SSE													0	0.00	100.00
S													0	0.00	100.00
SSO				4	23	3		1	1				32	12.12	87.88
SO			3	8	29	71	43	30	11				195	85.98	14.02
OSO					1	20	9	2					32	98.11	1.89
O					5								5	100.00	0.00
ONO													0	100.00	0.00
NO													0	100.00	0.00
NNO													0	100.00	0.00
Total	0	0	3	12	58	94	52	33	12	0	0	0	264		
A [%]	0.00	0.00	1.14	5.68	27.65	63.26	82.95	95.45	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	100.00	98.86	94.32	72.35	36.74	17.05	4.55	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-10 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Tp Atlas en el periodo de qnt-1 ver.

Tp [s]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00-0.50	0.50-1.00	1.00-1.50	1.50-2.00	2.00-2.50	2.50-3.00	3.00-3.50	3.50-4.00	4.00-4.50	4.50-5.00	5.00-5.50	5.50-6.00	6.00-6.50	6.50-7.00			
2.0-4.0															0	0.00	100.00
4.0-6.0															0	0.00	100.00
6.0-8.0					2	7	2								11	3.33	96.67
8.0-10.0				2	5	13	23	3							46	17.27	82.73
10.0-12.0				3	14	9									26	25.15	74.85
12.0-14.0				4	39	49	21								113	59.39	40.61
14.0-16.0				5	17	24	23								69	80.30	19.70
16.0-18.0				18	5	19	3	6							51	95.76	4.24
18.0-20.0				3	6	4	1								14	100.00	0.00
20.0-22.0															0	100.00	0.00
22.0-24.0															0	100.00	0.00
24.0-26.0															0	100.00	0.00
Total	0	0	0	35	88	125	73	9	0	0	0	0	0	0	330		
A [%]	0.00	0.00	0.00	10.61	37.27	75.15	97.27	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	100.00	100.00	89.39	62.73	24.85	2.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-11 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1 ver.

Dp [°]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00 – 0.50	0.50 – 1.00	1.00 – 1.50	1.50 – 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.00	3.00 – 3.50	3.50 – 4.00	4.00 – 4.50	4.50 – 5.00	5.00 – 5.50	5.50 – 6.00	6.00 – 6.50	6.50 – 7.00			
N															0	0.00	100.00
NNE															0	0.00	100.00
NE															0	0.00	100.00
ENE															0	0.00	100.00
E															0	0.00	100.00
ESE															0	0.00	100.00
SE															0	0.00	100.00
SSE															0	0.00	100.00
S															0	0.00	100.00
SSO								1							1	0.30	99.70
SO				31	88	125	73	8							325	98.79	1.21
OSO															0	98.79	1.21
O															0	98.79	1.21
ONO															0	98.79	1.21
NO				4											4	100.00	0.00
NNO															0	100.00	0.00
Total	0	0	0	35	88	125	73	9	0	0	0	0	0	0	330		
A [%]	0.00	0.00	0.00	10.61	37.27	75.15	97.27	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	100.00	100.00	89.39	62.73	24.85	2.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-12 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp Atlas en el periodo de qnt-1 ver.

Dp [°]	Tp [s]												Total	A [%]	C [%]
	2.0 – 4.0	4.0 – 6.0	6.0 – 8.0	8.0 – 10.0	10.0 – 12.0	12.0 – 14.0	14.0 – 16.0	16.0 – 18.0	18.0 – 20.0	20.0 – 22.0	22.0 – 24.0	24.0 – 26.0			
N													0	0.00	100.00
NNE													0	0.00	100.00
NE													0	0.00	100.00
ENE													0	0.00	100.00
E													0	0.00	100.00
ESE													0	0.00	100.00
SE													0	0.00	100.00
SSE													0	0.00	100.00
S													0	0.00	100.00
SSO				1									1	0.30	99.70
SO			11	45	26	113	69	50	11				325	98.79	1.21
OSO													0	98.79	1.21
O													0	98.79	1.21
ONO													0	98.79	1.21
NO								1	3				4	100.00	0.00
NNO													0	100.00	0.00
Total	0	0	11	46	26	113	69	51	14	0	0	0	330		
A [%]	0.00	0.00	3.33	17.27	25.15	59.39	80.30	95.76	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	100.00	96.67	82.73	74.85	40.61	19.70	4.24	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-13 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tm punto qnt-5.

Tm [s]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00 – 0.50	0.50 – 1.00	1.00 – 1.50	1.50 – 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.00	3.00 – 3.50	3.50 – 4.00	4.00 – 4.50	4.50 – 5.00	5.00 – 5.50	5.50 – 6.00	6.00 – 6.50	6.50 – 7.00			
2.0 – 4.0															0	0.00	100.00
4.0 – 6.0			1												1	0.07	99.93
6.0 – 8.0		10	86	59	11	2									168	11.56	88.44
8.0 – 10.0		53	267	218	77	30	5	5	2						657	56.50	43.50
10.0 – 12.0		29	116	156	103	37	16	7	3						467	88.44	11.56
12.0 – 14.0		8	34	46	35	14	7	4	2	1					151	98.77	1.23
14.0 – 16.0			4	3	8	1				2					18	100.00	0.00
16.0 – 18.0															0	100.00	0.00
18.0 – 20.0															0	100.00	0.00
20.0 – 22.0															0	100.00	0.00
22.0 – 24.0															0	100.00	0.00
24.0 – 26.0															0	100.00	0.00
Total	0	100	508	482	234	84	28	16	7	3	0	0	0	0	1462		
A [%]	0.00	6.84	41.59	74.56	90.56	96.31	98.22	99.32	99.79	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
C [%]	100.00	93.16	58.41	25.44	9.44	3.69	1.78	0.68	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-14 Tabla incidencia de oleaje Hm0 vs Tp, Atlas.

Tp [s]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00 – 0.50	0.50 – 1.00	1.00 – 1.50	1.50 – 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.00	3.00 – 3.50	3.50 – 4.00	4.00 – 4.50	4.50 – 5.00	5.00 – 5.50	5.50 – 6.00	6.00 – 6.50	6.50 – 7.00			
2.0 – 4.0		1													1	0.00	100.00
4.0 – 6.0		1	23	87	25										136	0.12	99.88
6.0 – 8.0		7	44	365	1347	1191	303	20	3						3280	3.00	97.00
8.0 – 10.0		21	403	1051	1209	1468	1152	362	83	22	5	1			5777	8.07	91.93
10.0 – 12.0		96	2218	6782	6128	2473	658	181	60	21	18		3	2	18640	24.42	75.58
12.0 – 14.0		87	2830	11833	17003	12046	4382	1007	170	31	13	5	2		49409	67.78	32.22
14.0 – 16.0		70	1256	4688	6714	7476	4972	1929	474	104	34	9			27726	92.11	7.89
16.0 – 18.0		28	594	1912	2050	1324	905	564	286	51	28	1			7743	98.91	1.09
18.0 – 20.0		8	114	411	350	136	51	21	27	1	2				1121	99.89	0.11
20.0 – 22.0			2	58	33	3	5	4							105	99.98	0.02
22.0 – 24.0				14	4		1								19	100.00	0.00
24.0 – 26.0	1														1	100.00	0.00
Total	1	319	7484	27201	34863	26117	12429	4088	1103	230	100	16	5	2	113958		
A [%]	0.00	0.28	6.85	30.72	61.31	84.23	95.14	98.72	99.69	99.89	99.98	99.99	100.00	100.00			
C [%]	100.00	99.72	93.15	69.28	38.69	15.77	4.86	1.28	0.31	0.11	0.02	0.01	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-15 Tabla de incidencia de oleaje Hm0 vs Dp, Atlas.

Dp [°]	Hm0 [m]														Total	A [%]	C [%]
	0.00 – 0.50	0.50 – 1.00	1.00 – 1.50	1.50 – 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.00	3.00 – 3.50	3.50 – 4.00	4.00 – 4.50	4.50 – 5.00	5.00 – 5.50	5.50 – 6.00	6.00 – 6.50	6.50 – 7.00			
N				3	8	6	6	7	3		1				34	0.03	99.97
NNE															0	0.03	99.97
NE															0	0.03	99.97
ENE															0	0.03	99.97
E															0	0.03	99.97
ESE															0	0.03	99.97
SE															0	0.03	99.97
SSE															0	0.03	99.97
S					1		5								6	0.04	99.96
SSO	1	69	1109	3230	3191	1957	906	296	16	7	2				10784	9.50	90.50
SO		149	4351	19361	27564	21558	10097	3166	829	110	32	5	1		87223	86.04	13.96
OSO		87	1469	3551	3289	2031	1079	400	161	67	48	5	2		12189	96.73	3.27
O		13	391	695	621	423	212	133	36	28	6	4	1		2563	98.98	1.02
ONO			23	59	67	57	50	49	23	6	7	1			342	99.28	0.72
NO		1	141	286	91	32	24	10	6	6					597	99.81	0.19
NNO				16	31	53	50	27	29	6	4	1	1	2	220	100.00	0.00
Total	1	319	7484	27201	34863	26117	12429	4088	1103	230	100	16	5	2	113958		
A [%]	0.00	0.28	6.85	30.72	61.31	84.23	95.14	98.72	99.69	99.89	99.98	99.99	100.00	100.00			
C [%]	100.00	99.72	93.15	69.28	38.69	15.77	4.86	1.28	0.31	0.11	0.02	0.01	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-16 Tabla de incidencia de oleaje Tp vs Dp, Atlas.

Dp [°]	Tp [s]												Total	A [%]	C [%]
	2.0 – 4.0	4.0 – 6.0	6.0 – 8.0	8.0 – 10.0	10.0 – 12.0	12.0 – 14.0	14.0 – 16.0	16.0 – 18.0	18.0 – 20.0	20.0 – 22.0	22.0 – 24.0	24.0 – 26.0			
N		2	12	10	2	3	5						34	0.03	99.97
NNE													0	0.03	99.97
NE													0	0.03	99.97
ENE													0	0.03	99.97
E													0	0.03	99.97
ESE													0	0.03	99.97
SE													0	0.03	99.97
SSE													0	0.03	99.97
S			6										6	0.04	99.96
SSO	1	47	933	1015	2399	4396	1522	405	62	3		1	10784	9.50	90.50
SO		64	2102	3911	12040	38360	23414	6348	885	81	18		87223	86.04	13.96
OSO		9	46	290	2777	5790	2461	719	91	6			12189	96.73	3.27
O		1	42	320	1257	784	95	58	6				2563	98.98	1.02
ONO		3	22	118	119	21	31	14	14				342	99.28	0.72
NO		2	34	36	15	38	195	198	63	15	1		597	99.81	0.19
NNO		8	83	77	31	17	3	1					220	100.00	0.00
Total	1	136	3280	5777	18640	49409	27726	7743	1121	105	19	1	113958		
A [%]	0.00	0.12	3.00	8.07	24.42	67.78	92.11	98.91	99.89	99.98	100.00	100.00			
C [%]	100.00	99.88	97.00	91.93	75.58	32.22	7.89	1.09	0.11	0.02	0.00	0.00			

Fuente: Elaboración propia.

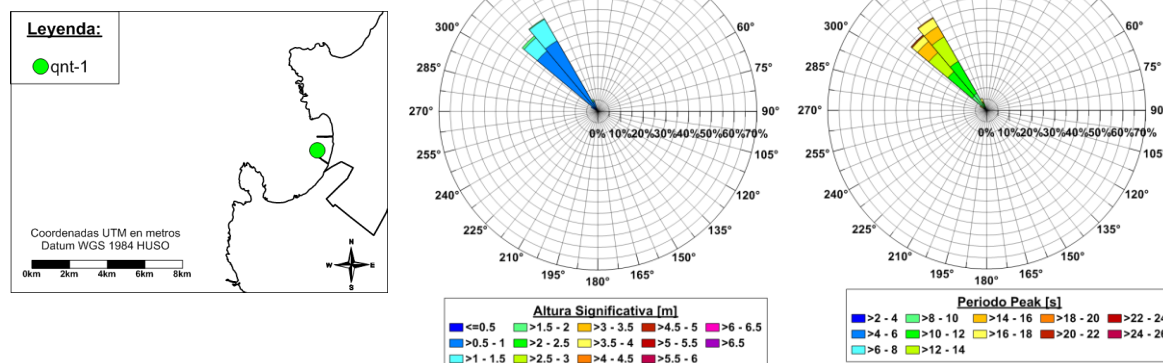


Figura 13-5 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-1_inv.
Fuente: Elaboración propia.

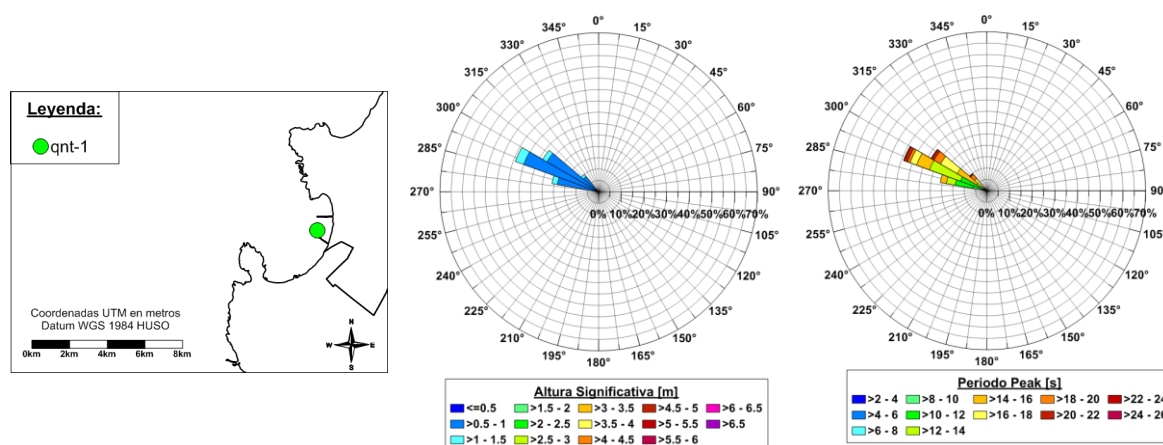


Figura 13-6 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-1_ver.
Fuente: Elaboración propia.

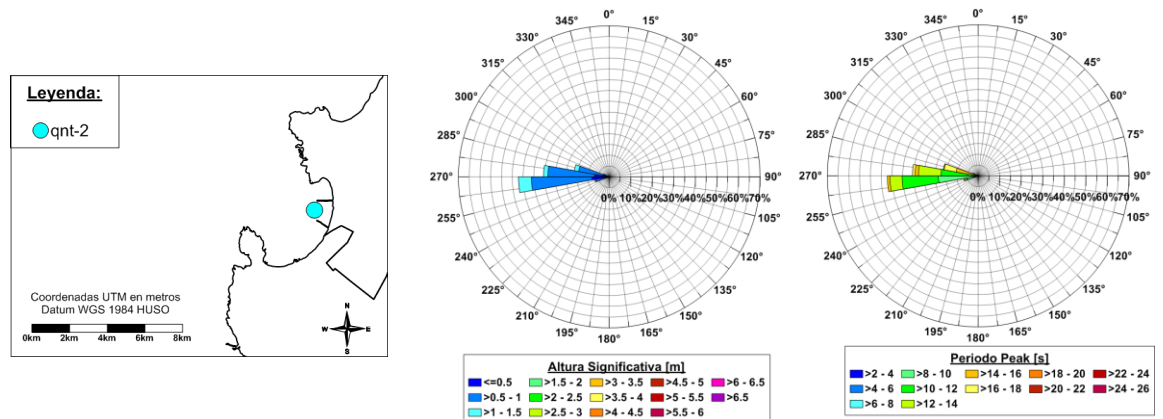


Figura 13-7 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-2.
Fuente: Elaboración propia.

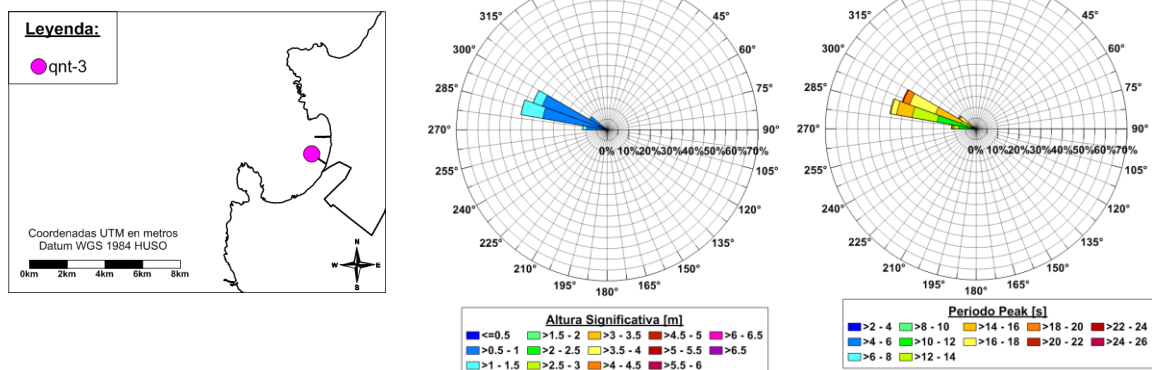


Figura 13-8 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Punto qnt-3.
Fuente: Elaboración propia.

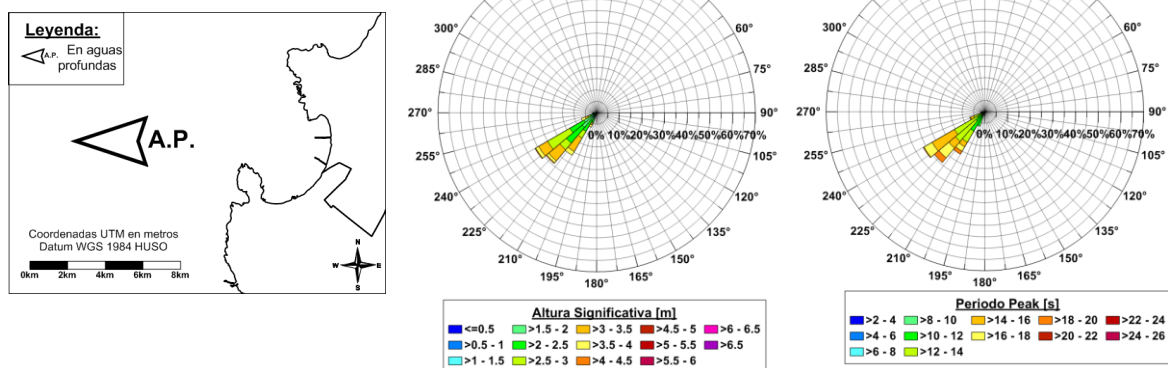


Figura 13-9 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. En Atlas en periodo de qnt-1_inv.
Fuente: Elaboración propia.

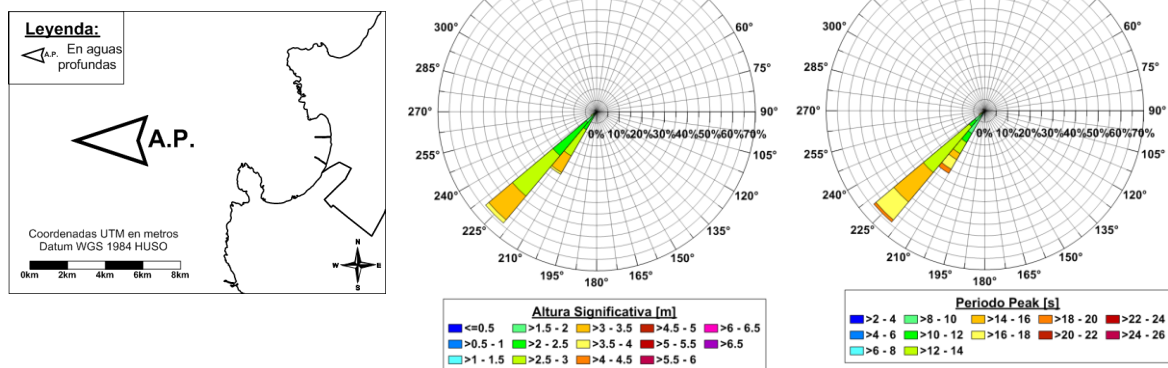


Figura 13-10 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección en Atlas en periodo de qnt-1_ver.
Fuente: Elaboración propia.

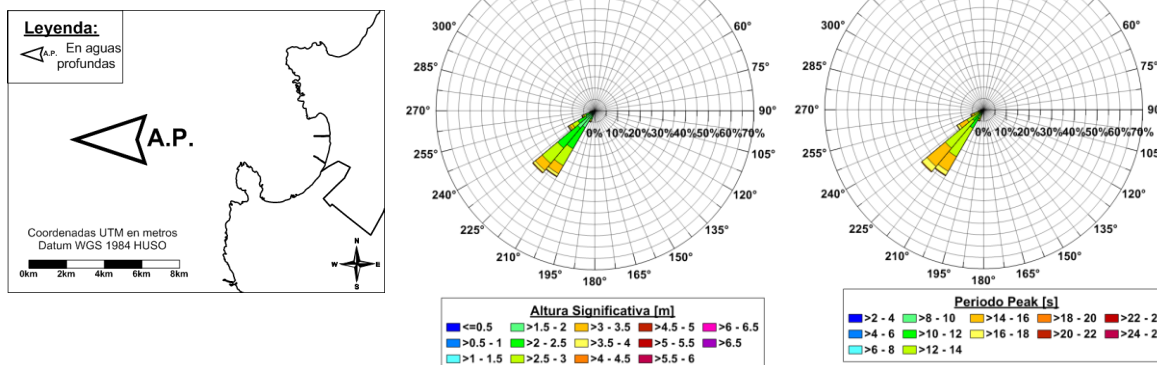


Figura 13-11 Distribución de las alturas significativas (izquierda) y periodos peak (derecha) por dirección. Información total de Atlas.

Fuente: Elaboración propia.

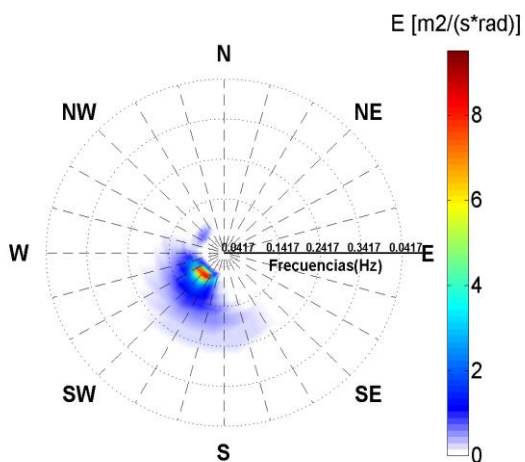


Figura 13-12 Espectro promedio entre los años 1980-2017.

Fuente: Elaboración propia.

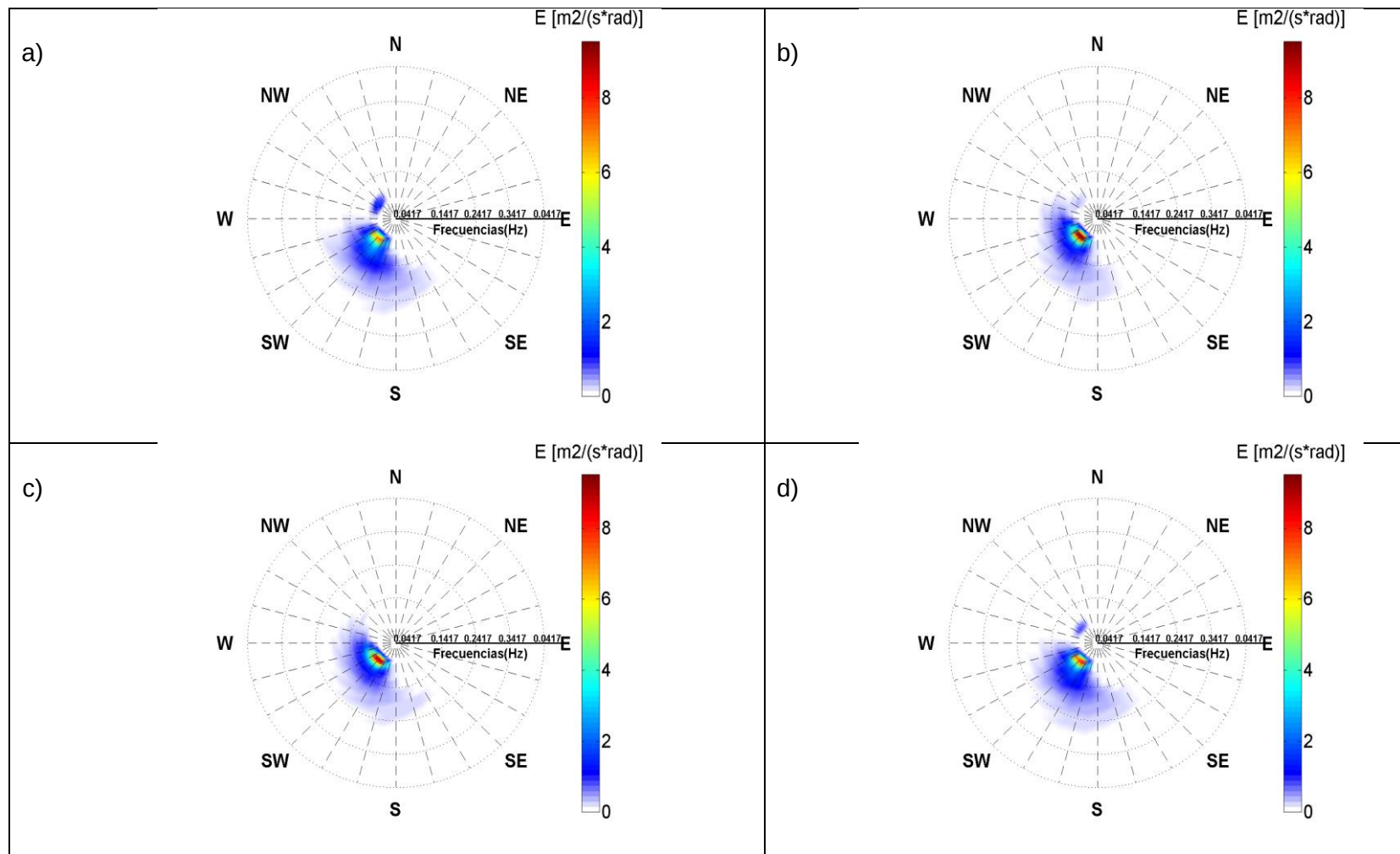


Tabla 13-17 Espectro medio por estación. A) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera.

Fuente: Elaboración propia.

13.4.2 MAREA

En la Tabla 13-18 se muestran los armónicos extraídos de la señal de marea durante el año 2016. Los armónicos con mayores magnitudes fueron *M2, *K1, *S2, *O1 y *N2, con valores correspondientes de 41.15 [cm], 15.24 [cm], 13.80 [cm], 10.49 [cm] y 9.83 [cm].

Según el valor de los armónicos, el coeficiente de Courtier es igual a 0.47 [-], lo que indica un régimen de marea mixta semidiurna.

En el análisis no armónico se estiman, desde el cero instrumental, una plea máxima de 3.116 [m], una baja mínima de 1.048 [m] y un nivel medio del mar de 1.951 [m]. Según se estableció en la metodología, se estima un NRS de 1.046 [m] desde el cero instrumental y 0.905 [m] desde el nivel medio del mar.

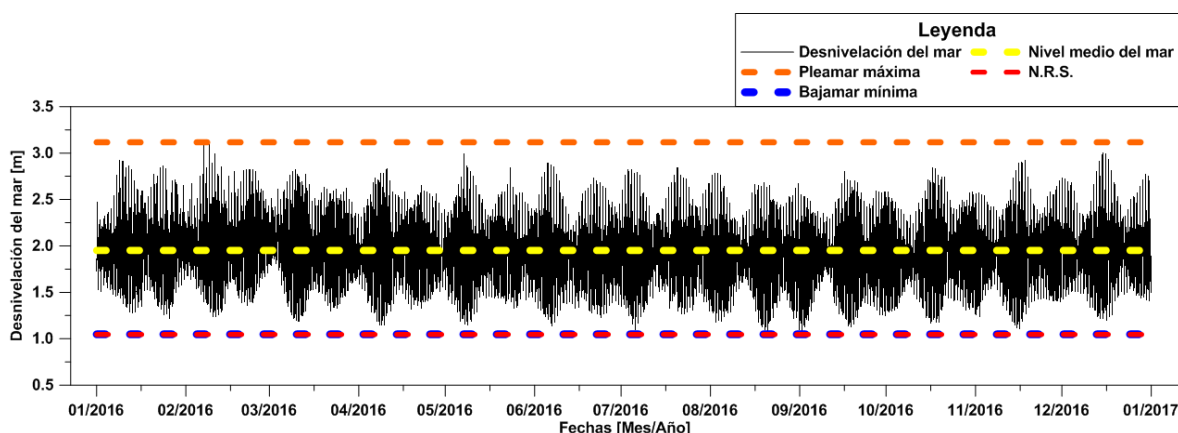


Figura 13-13 Serie de tiempo desnivelación nivel del mar durante el año 2016.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-18 Lista de armónicos de la marea durante el año 2016.

Constituyentes	Frecuencia [cph]	Amplitud [cm]	Constituyentes	Frecuencia [cph]	Amplitud [cm]
*SA	0.0001	5.32	*M2	0.0805114	41.15
SSA	0.0002	1.61	*H2	0.0806255	8.91
MSM	0.0013	0.35	MKS2	0.0807396	1.49
MM	0.0015	0.48	LDA2	0.0818212	0.79
MSF	0.0028	0.6	*L2	0.0820236	1.78
MF	0.0031	1.02	*T2	0.0832193	3.12
ALP1	0.0344	0.33	*S2	0.0833333	13.8
2Q1	0.0357	0.14	*R2	0.0834474	3.03
SIG1	0.0359	0.47	*K2	0.0835615	4.66
*Q1	0.0372	2.44	MSN2	0.0848455	0.42
RHO1	0.0374	0.65	ETA2	0.0850736	0.52
*O1	0.0387	10.49	MO3	0.1192421	0.17
TAU1	0.0390	0.22	*M3	0.1207671	0.33

BET1	0.0400	0.27	SO3	0.122064	0.07
NO1	0.0403	0.41	MK3	0.1222921	0.08
CHI1	0.0405	0.36	*SK3	0.1251141	0.25
*PI1	0.0414	1.41	MN4	0.1595106	0.07
*P1	0.0416	4.78	*M4	0.1610228	0.21
*S1	0.0417	1.33	SN4	0.1623326	0.06
*K1	0.0418	15.24	MS4	0.1638447	0.05
*PSI1	0.0419	1.12	MK4	0.1640729	0.12
PHI1	0.0420	0.2	S4	0.1666667	0.12
THE1	0.0431	0.53	SK4	0.1668948	0.15
J1	0.0433	1.01	2MK5	0.2028035	0.04
SO1	0.0446	0.22	2SK5	0.2084474	0.08
OO1	0.0448	1.04	2MN6	0.2400221	0.04
UPS1	0.0463	0.37	M6	0.2415342	0.01
OQ2	0.0760	0.14	2MS6	0.2443561	0.09
EPS2	0.0762	0.78	2MK6	0.2445843	0.02
2N2	0.0775	1.39	2SM6	0.2471781	0.03
*MU2	0.0777	2.05	MSK6	0.2474062	0.06
*N2	0.0790	9.83	3MK7	0.2833149	0.04
*NU2	0.0792	1.37	M8	0.3220456	0.02
*H1	0.0804	7.55			

Fuente: Elaboración propia.

13.4.3 DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos de velocidad y dirección del viento fueron graficados en la Figura 13-14, donde se incluye la información como serie de tiempo y una gráfica de distribución de la velocidad con respecto a la dirección. El comportamiento mostrado en la serie de tiempo revela una oscilación anual en las magnitudes, con aumentos en las estaciones de primavera y disminuciones en las estaciones de otoño. En la serie de tiempo de las direcciones del viento no se presencia alguna conducta resaltable a través del tiempo, aunque, al graficar la distribución de velocidades con respecto a las direcciones se muestra una tendencia entre las direcciones O y E. Según la posición de la estación meteorológica (Figura 6-3), desde el O, donde se encuentra el mar, se registraron las mayores magnitudes de velocidad, pero con una mayor variación de las direcciones. En contraste, desde el primer y segundo cuadrante, donde se encuentra la tierra, las mayores magnitudes de las velocidades se encuentran concentradas en direcciones cercanas al E. En la Tabla 13-19 se establece una tabla de incidencia con las variables velocidad y dirección del viento. El predominio de las velocidades se ubica en el intervalo 0-2 [m/s], mientras que las magnitudes superiores a 10 [m/s] ocurren con muy baja frecuencia. Se verifica el predominio de la dirección E, aunque en cantidades comparables se registran vientos desde las direcciones O, OSO, SO y SSO. La tendencia de la dirección del viento entre el E-O, puede deberse al fenómeno de la brisa marina.

En la Figura 13-15 se muestran las series de tiempo de las variables temperatura del aire, radiación solar y humedad relativa. De similar forma que la velocidad del viento, los parámetros temperatura del aire y radiación solar presentan una oscilación estacional con incrementos durante la primavera y disminuciones en el otoño. En estos parámetros se midieron valores entre los 0 [°C] hasta los 26 [°C] y desde los 0 [W/m²] hasta los 1315 [W/m²], respectivamente. Por otro lado, en la variable de la humedad relativa se muestra una tendencia en el 80 [%] con variaciones entre 40-100 [%].

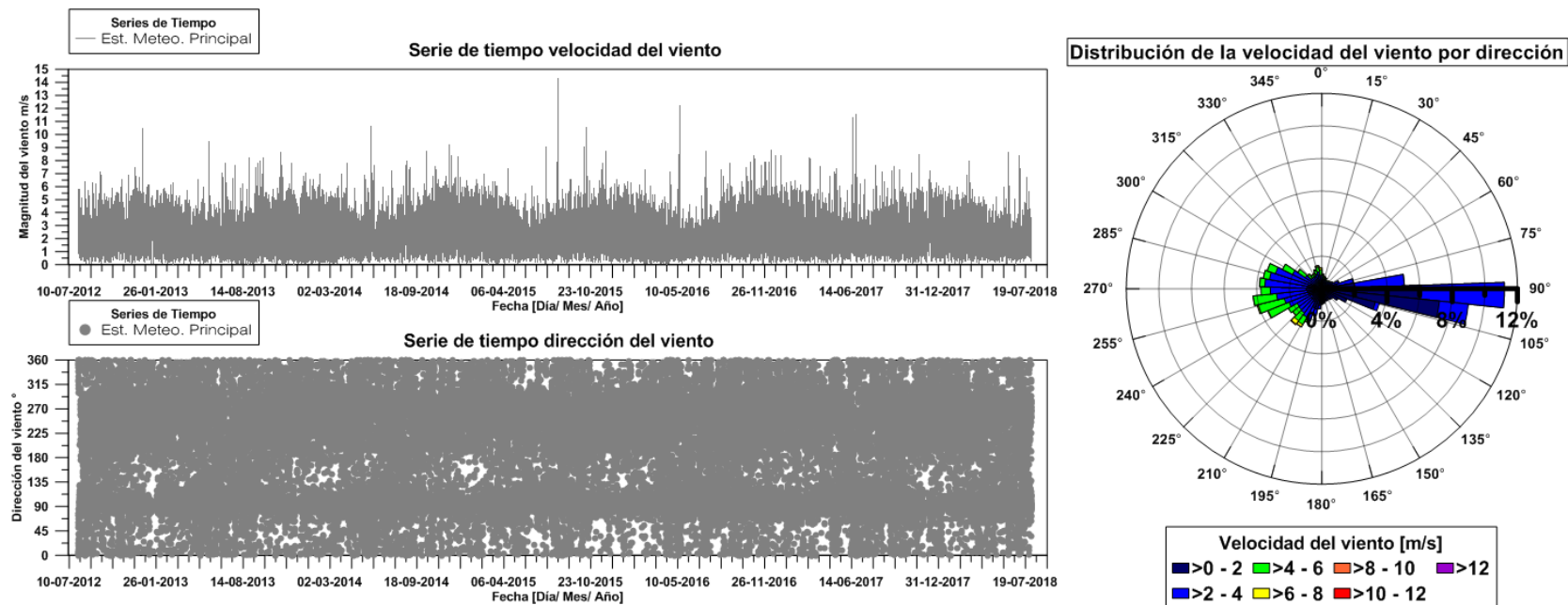


Figura 13-14 Serie de tiempo de velocidad y dirección de viento, y distribución de velocidades de vientos, en la Estación principal de Quintero.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-19 Tabla de incidencia velocidad vs dirección viento.

V [m/s]	Dirección [°]																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0.0 - 2.0	444	423	487	931	7156	3936	1226	1100	1336	1740	1198	1233	1366	1019	548	469	24612	47.00	53.00
2.0 - 4.0	728	368	346	812	5171	318	23	29	163	1066	1431	2111	3390	3015	948	912	20831	39.78	60.22
4.0 - 6.0	354	123	61	30	7				5	266	782	2101	944	793	501	276	6243	11.92	88.08
6.0 - 8.0	122	26	13	4						39	194	64	4	5	56	70	597	1.14	98.86
8.0 - 10.0	19	4	4							4	33				2	13	79	0.15	99.85
10.0 - 12.0	1	1									1			1	2	1	7	0.01	99.99
12.0 - 14.0				1													1	0.00	100.00
14.0 - 16.0															1		1	0.00	100.00
Total	1668	945	911	1778	12334	4254	1249	1129	1504	3115	3639	5509	5704	4833	2058	1741	52371		
A [%]	3.18	1.80	1.74	3.40	23.55	8.12	2.38	2.16	2.87	5.95	6.95	10.52	10.89	9.23	3.93	3.32			
C [%]	96.82	98.20	98.26	96.60	76.45	91.88	97.62	97.84	97.13	94.05	93.05	89.48	89.11	90.77	96.07	96.68			

Fuente: Elaboración propia.

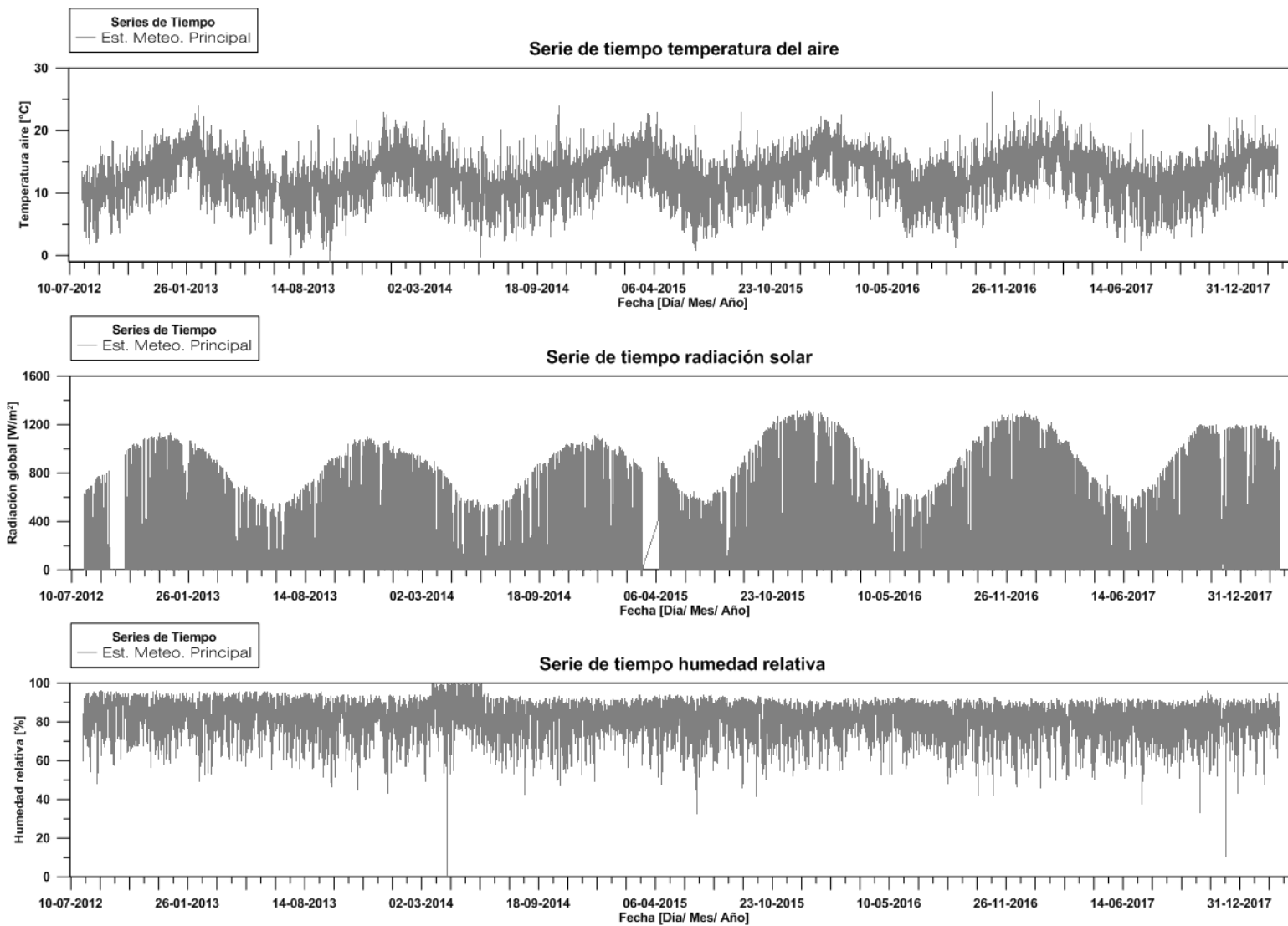


Figura 13-15 Datos de intercambio de calor en Estación Principal de Quintero.

Fuente: Elaboración propia.

13.4.4 CORRIENTES

Como fue mencionado en la metodología los datos de corrientes fueron caracterizados mediante tablas de incidencia y gráficas de distribución de las magnitudes de las corrientes por su dirección. Estos análisis se realizaron sobre las capas superficial, intermedia y fondo, para estudiar la columna de agua de una manera más simple.

Las corrientes del punto qnt-1, durante la estación de invierno, fueron caracterizadas en la Tabla 13-20, Tabla 13-21 y Tabla 13-22, donde en la capa superficial predominó una magnitud de 50- 75 [mm/s], mientras que, en la capa intermedia y fondo la magnitud más frecuente fue de 25- 50 [mm/s]. Estos dos intervalos de magnitudes fueron bastante relevantes en las tres capas analizadas. En toda la columna de agua (según el análisis de la capa superficial, intermedia y fondo) se presentaron corrientes entre los intervalos 0-25 [mm/s] y 175- 200 [mm/s]. Por otro lado, no se muestra una evidente tendencia en las direcciones registradas.

Las mediciones de las corrientes en el punto qnt-1, durante la estación de verano, se caracterizaron con la Tabla 13-23, Tabla 13-24 y Tabla 13-25, en las tres capas analizadas se presenta una mayor frecuencia en el intervalo 25- 50 [mm/s], siendo el intervalo 50- 75 [mm/s], el segundo intervalo con mayor frecuencia. Durante esta estación se registraron corrientes desde el intervalo 0- 25 [mm/s] hasta el intervalo 175- 200 [mm/s] en todas las capas analizadas. En las direcciones se ilustran ligeros predominios que cambian según la profundidad, en la capa superficial se generan tendencias hacia el O, en la capa intermedia hacia el S y en la capa de fondo predominan las corrientes entre las direcciones E-O.

En la Figura 13-16 y Figura 13-17 se ilustran las distribución de las corrientes en las distintas capas de las campañas de invierno y verano, en el punto qnt-1. En estas figuras se verifica la variabilidad de las direcciones, impidiendo establecer alguna tendencia con la información medida. Por otro lado, las magnitudes de las corrientes son semejantes entre las estaciones y en la columna, con valores ligeramente mayores en la capa superficial. Estas magnitudes fueron semejantes en las mediciones de los puntos qnt-2 y qnt-3, donde tampoco ocurrieron tendencias claras en las direcciones a través de la columna de agua.

El punto qnt-4 que se localiza en las afueras de la bahía, fue caracterizado mediante la Tabla 13-26, Tabla 13-27 y la Tabla 13-28, en las correspondientes capa superficial, intermedia y fondo. En la capa superficial predomina el intervalo 75- 100 [mm/s], en la capa intermedia el intervalo 50- 75 [mm/s] y en la capa de fondo el intervalo 25- 50 [mm/s]. De forma similar a las mediciones en el punto qnt-1, se registraron corrientes desde el intervalo 0-25 [mm/s] hasta el intervalo 175- 200 [mm/s]. En las direcciones se presenta una ligera tendencia en la capa superficial hacia el E, mientras que, en las capas intermedia y de fondo, predomina una dirección hacia el SE. En la Figura 13-20, se presenta la distribución de corrientes por las direcciones, donde se ilustra el comportamiento anterior.

Es importante resaltar que, en los puntos analizados se muestra mayores magnitudes en la capa superficial, la cual se reduce a través de la columna de agua, ubicándose los menores valores en la capa de fondo. Esto puede relacionarse al aporte energético del viento en la superficie y, en cambio, en el fondo la hidrodinámica es afectada por su rugosidad que provoca pérdidas en la energía. Este comportamiento se vuelve más evidente en el punto qnt-4 que se encuentra a mayor profundidad y permite una dispersión de la energía a través de la columna de agua.

Tabla 13-20 Tabla de incidencia, capa superficial, punto qnt-1 inv.

Tabla 20 Tabla de incidencia, capa superficial, punto qnt 1 - mV																			
	Dirección																		
V [mm/s]	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	Total	A [%]	C [%]
0 – 25	30	22	36	36	30	29	26	34	18	26	31	34	33	38	32	28	483	10.17	89.83
25 – 50	66	70	55	68	75	66	82	72	72	72	66	72	59	73	69	73	1110	23.36	76.64
50 – 75	65	57	77	70	95	92	108	73	71	57	71	65	85	72	73	62	1193	25.11	74.89
75 – 100	41	40	38	66	61	85	58	61	39	45	43	63	60	63	60	53	876	18.44	81.56
100 – 125	15	38	24	30	45	63	42	26	17	33	26	32	35	39	32	15	512	10.78	89.22
125 – 150	13	10	25	25	28	30	20	18	12	14	18	17	12	21	11	8	282	5.94	94.06
150 – 175	3	4	7	17	20	17	15	8	5	5	10	7	14	9	5	5	151	3.18	96.82
175 – 200	4	6	7	10	18	23	10	16	10	2	6	7	12	7	3	3	144	3.03	96.97
Total	237	247	269	322	372	405	361	308	244	254	271	297	310	322	285	247	4751		
A [%]	4.99	5.20	5.66	6.78	7.83	8.52	7.60	6.48	5.14	5.35	5.70	6.25	6.52	6.78	6.00	5.20			
C [%]	95.01	94.80	94.34	93.22	92.17	91.48	92.40	93.52	94.86	94.65	94.30	93.75	93.48	93.22	94.00	94.80			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-21 Tabla de incidencia, capa intermedia, punto qnt-1 inv.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	58	71	79	71	69	51	46	48	50	52	44	53	52	56	48	62	910	19.15	80.85
25 – 50	150	158	140	135	120	129	92	82	78	76	76	69	80	102	128	133	1748	36.79	63.21
50 – 75	79	92	101	108	79	91	67	71	47	34	42	48	65	88	93	85	1190	25.05	74.95
75 – 100	55	30	41	47	46	32	47	38	21	11	9	19	23	59	50	45	573	12.06	87.94
100 – 125	16	19	17	14	12	14	17	9	8	4	5	9	9	16	27	17	213	4.48	95.52
125 – 150	8	4	4	2	3	3	7	5	7	1	3		3	2	9	10	71	1.49	98.51
150 – 175	2	4			2	1		2	7	1			1	5	5	4	34	0.72	99.28
175 – 200				2					3				2	1		4	12	0.25	99.75
Total	368	378	382	379	331	321	276	255	221	179	179	198	235	329	360	360	4751		
A [%]	7.75	7.96	8.04	7.98	6.97	6.76	5.81	5.37	4.65	3.77	3.77	4.17	4.95	6.92	7.58	7.58			
C [%]	92.25	92.04	91.96	92.02	93.03	93.24	94.19	94.63	95.35	96.23	96.23	95.83	95.05	93.08	92.42	92.42			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-22 Tabla de incidencia, capa fondo, punto qnt-1 inv.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	46	51	43	74	57	73	45	74	63	67	69	60	51	54	61	57	945	19.89	80.11
25 – 50	83	103	131	122	141	136	100	109	104	117	129	115	126	104	87	89	1796	37.80	62.20
50 – 75	55	62	84	90	110	67	57	50	67	74	86	115	92	79	48	75	1211	25.49	74.51
75 – 100	15	23	15	39	47	34	13	19	23	40	55	51	54	39	33	31	531	11.18	88.82
100 – 125	12	4	4	11	11	7	3	4	5	7	17	27	23	29	12	10	186	3.91	96.09
125 – 150	1	1	2	1	3	1	2		1	1	1	6	7	9	7	10	53	1.12	98.88
150 – 175	1	1	1		3	1				1	2	1	2	4	3	1	21	0.44	99.56
175 – 200				1	1	1	1							1	1	2	8	0.17	99.83
Total	213	245	280	338	373	320	221	256	263	307	359	375	355	319	252	275	4751		
A [%]	4.48	5.16	5.89	7.11	7.85	6.74	4.65	5.39	5.54	6.46	7.56	7.89	7.47	6.71	5.30	5.79			
C [%]	95.52	94.84	94.11	92.89	92.15	93.26	95.35	94.61	94.46	93.54	92.44	92.11	92.53	93.29	94.70	94.21			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-23 Tabla de incidencia, capa superficial, punto qnt-1 ver.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	39	21	26	26	33	34	28	22	24	26	44	58	127	103	62	43	716	14.19	85.81
25 – 50	66	52	66	65	66	95	67	50	41	62	79	133	215	203	123	81	1464	29.01	70.99
50 – 75	56	66	48	61	71	63	78	64	41	66	58	137	206	151	89	80	1335	26.46	73.54
75 – 100	30	25	34	32	38	37	31	30	34	38	46	81	95	85	45	39	720	14.27	85.73
100 – 125	29	21	11	13	27	27	35	21	14	16	26	34	61	59	24	23	441	8.74	91.26
125 – 150	10	11	9	12	10	15	16	8	5	7	19	18	23	31	7	6	207	4.10	95.90
150 – 175	2	4	6	3	4	7	9	6	4	6	7	14	12	7	2	2	95	1.88	98.12
175 – 200	2	1		3	5	4	14	3	3	3	4	7	12	6	1		68	1.35	98.65
Total	234	201	200	215	254	282	278	204	166	224	283	482	751	645	353	274	5046		
A [%]	4.64	3.98	3.96	4.26	5.03	5.59	5.51	4.04	3.29	4.44	5.61	9.55	14.88	12.78	7.00	5.43			
C [%]	95.36	96.02	96.04	95.74	94.97	94.41	94.49	95.96	96.71	95.56	94.39	90.45	85.12	87.22	93.00	94.57			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-24 Tabla de incidencia, capa intermedia, punto qnt-1 ver.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	63	60	65	65	58	58	49	61	59	52	41	53	42	57	50	58	891	17.66	82.34
25 – 50	123	112	111	115	105	128	110	119	101	80	93	92	111	87	103	119	1709	33.87	66.13
50 – 75	94	87	92	73	83	125	109	91	71	61	33	55	76	93	80	82	1305	25.86	74.14
75 – 100	45	31	41	27	45	64	77	74	46	21	16	24	40	35	45	46	677	13.42	86.58
100 – 125	23	21	17	15	19	38	52	39	17	2	2	2	12	5	9	10	283	5.61	94.39
125 – 150	8	7	9	5	5	8	18	27	8	3			2	1	6	2	109	2.16	97.84
150 – 175	2	2	2	3	4	4	15	10	4				2		1		49	0.97	99.03
175 – 200	2	3		1	1		5	4						1	3	3	23	0.46	99.54
Total	360	323	337	304	320	425	435	425	306	219	185	226	285	279	297	320	5046		
A [%]	7.13	6.40	6.68	6.02	6.34	8.42	8.62	8.42	6.06	4.34	3.67	4.48	5.65	5.53	5.89	6.34			
C [%]	92.87	93.60	93.32	93.98	93.66	91.58	91.38	91.58	93.94	95.66	96.33	95.52	94.35	94.47	94.11	93.66			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-25 Tabla de incidencia, capa fondo, punto qnt-1 ver.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	33	44	59	52	60	71	69	50	63	50	41	52	40	58	43	53	838	16.61	83.39
25 – 50	82	77	93	130	139	178	139	114	94	94	90	107	129	115	91	89	1761	34.90	65.10
50 – 75	37	42	71	92	136	139	117	89	47	53	65	81	118	95	78	50	1310	25.96	74.04
75 – 100	14	14	17	36	69	74	54	38	22	19	23	41	89	82	42	28	662	13.12	86.88
100 – 125	2	4	7	14	30	34	18	7	6	6	5	18	65	52	13	7	288	5.71	94.29
125 – 150	2	3	5	6	9	8	5		1		2	5	36	27	8	1	118	2.34	97.66
150 – 175	1		2	2	5	6	2		1	1		3	10	18	3	1	55	1.09	98.91
175 – 200					2	2							2	8			14	0.28	99.72
Total	171	184	254	332	450	512	404	298	234	223	226	307	489	455	278	229	5046		
A [%]	3.39	3.65	5.03	6.58	8.92	10.15	8.01	5.91	4.64	4.42	4.48	6.08	9.69	9.02	5.51	4.54			
C [%]	96.61	96.35	94.97	93.42	91.08	89.85	91.99	94.09	95.36	95.58	95.52	93.92	90.31	90.98	94.49	95.46			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-26 Tabla de incidencia, capa superficial, punto qnt-4.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	23	20	24	15	22	41	14	19	23	19	13	15	23	24	17	22	334	5.19	94.81
25 – 50	55	47	60	53	60	45	58	60	65	45	53	72	59	51	59	68	910	14.15	85.85
50 – 75	71	83	56	70	68	78	80	66	67	78	80	69	64	66	68	65	1129	17.56	82.44
75 – 100	52	76	88	69	87	77	92	79	74	63	69	66	73	63	76	68	1172	18.22	81.78
100 – 125	45	80	73	69	69	75	69	72	64	51	54	44	47	48	42	52	954	14.83	85.17
125 – 150	46	50	59	49	54	55	66	41	44	45	52	36	49	35	36	42	759	11.80	88.20
150 – 175	20	39	49	41	40	37	37	29	22	22	19	24	27	19	15	11	451	7.01	92.99
175 – 200	23	41	86	95	128	79	54	35	28	19	30	32	25	17	14	16	722	11.23	88.77
Total	335	436	495	461	528	487	470	401	387	342	370	358	367	323	327	344	6431		
A [%]	5.21	6.78	7.70	7.17	8.21	7.57	7.31	6.24	6.02	5.32	5.75	5.57	5.71	5.02	5.08	5.35			
C [%]	94.79	93.22	92.30	92.83	91.79	92.43	92.69	93.76	93.98	94.68	94.25	94.43	94.29	94.98	94.92	94.65			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-27 Tabla de incidencia, capa intermedia, punto qnt-4.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	43	36	29	47	47	46	48	39	41	37	37	45	30	41	30	26	622	9.67	90.33
25 – 50	84	91	104	91	115	126	122	114	109	101	93	97	84	97	66	67	1561	24.27	75.73
50 – 75	50	110	98	111	113	129	147	134	119	118	107	98	95	71	66	71	1637	25.45	74.55
75 – 100	45	66	63	62	97	103	118	114	100	84	91	76	61	35	37	39	1191	18.52	81.48
100 – 125	27	33	40	42	47	77	91	76	75	52	33	41	30	16	14	15	709	11.02	88.98
125 – 150	12	19	24	32	38	51	49	43	33	26	16	13	11	4	9	5	385	5.99	94.01
150 – 175	3	7	16	15	31	22	19	24	15	9	5	10	4	1		1	182	2.83	97.17
175 – 200	3	2	5	23	28	24	15	14	8	7	9	2	1		1	1	144	2.24	97.76
Total	267	364	379	423	516	578	609	558	500	434	391	382	316	266	223	225	6431		
A [%]	4.15	5.66	5.89	6.58	8.02	8.99	9.47	8.68	7.77	6.75	6.08	5.94	4.91	4.14	3.47	3.50			
C [%]	95.85	94.34	94.11	93.42	91.98	91.01	90.53	91.32	92.23	93.25	93.92	94.06	95.09	95.86	96.53	96.50			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-28 Tabla de incidencia, capa fondo, punto qnt-4.

V [mm/s]	Dirección																Total	A [%]	C [%]
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO			
0 – 25	59	66	60	73	66	100	92	91	85	58	79	64	57	55	48	54	1107	17.21	82.79
25 – 50	71	80	109	129	181	236	217	204	184	150	123	108	87	92	69	105	2145	33.35	66.65
50 – 75	39	59	66	98	157	230	260	226	162	103	89	87	83	63	32	38	1792	27.87	72.13
75 – 100	20	17	16	35	77	143	137	117	68	29	32	29	28	30	12	12	802	12.47	87.53
100 – 125	4	3	7	11	26	61	87	52	18	23	10	9	14	6	5	1	337	5.24	94.76
125 – 150		2	5	4	10	29	39	36	17	3	2	6	3	1	2		159	2.47	97.53
150 – 175		1	2	1		7	14	11	5	3		1		2			47	0.73	99.27
175 – 200			1			6	13	18	4								42	0.65	99.35
Total	193	228	266	351	517	812	859	755	543	369	335	304	272	249	168	210	6431		
A [%]	3.00	3.55	4.14	5.46	8.04	12.63	13.36	11.74	8.44	5.74	5.21	4.73	4.23	3.87	2.61	3.27			
C [%]	97.00	96.45	95.86	94.54	91.96	87.37	86.64	88.26	91.56	94.26	94.79	95.27	95.77	96.13	97.39	96.73			

Fuente: Elaboración propia.

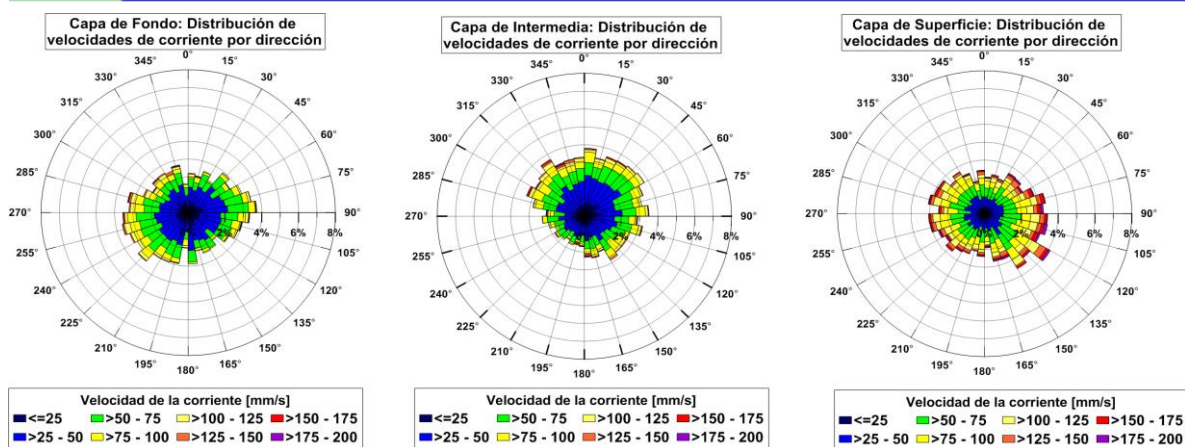


Figura 13-16 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-1_inv.
Fuente: Elaboración propia.

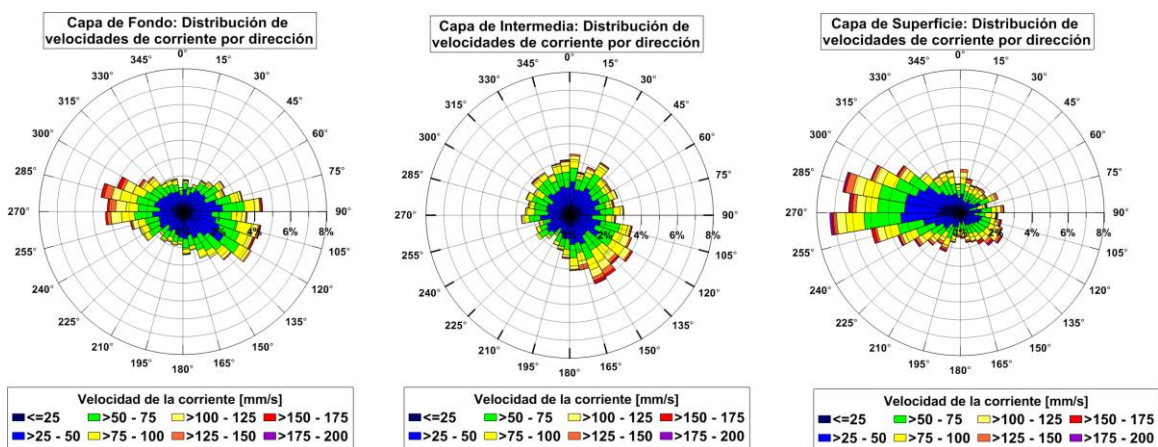


Figura 13-17 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-1_ver.
Fuente: Elaboración propia.

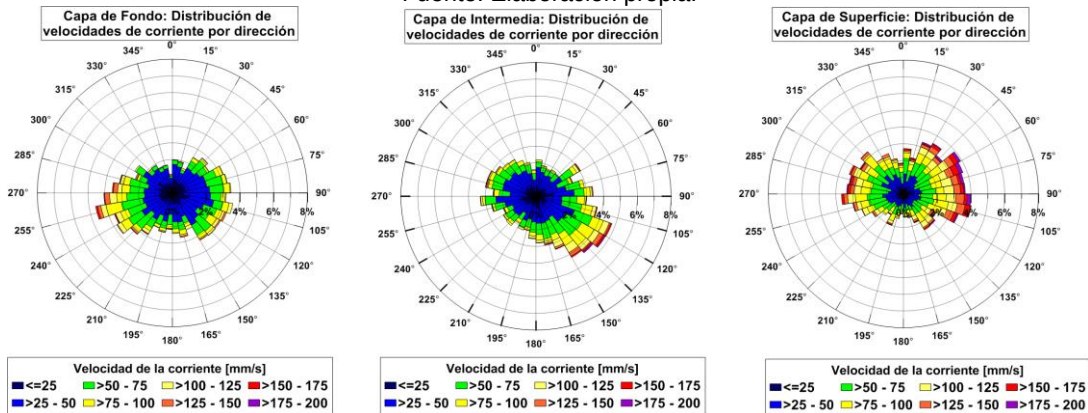


Figura 13-18 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-2.
Fuente: Elaboración propia.

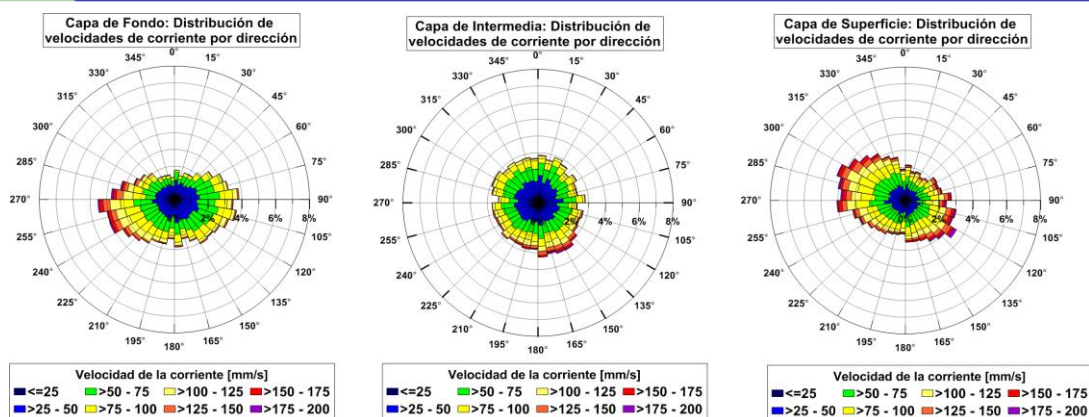


Figura 13-19 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-3.

Fuente: Elaboración propia.

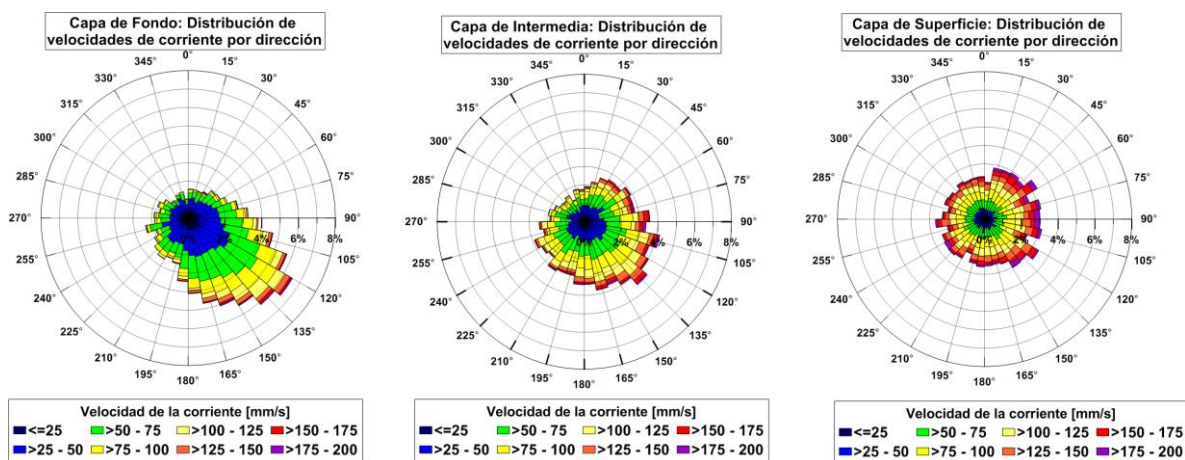


Figura 13-20 Distribución de velocidades de corriente por dirección, en el punto qnt-4.

Fuente: Elaboración propia.

13.4.5 TEMPERATURA Y SALINIDAD

Las mediciones obtenidas por el ADCP entregaron datos de temperatura del fondo marino en el punto qnt-1, durante las campañas de invierno y verano. En la Figura 13-21 se ilustraron las series de tiempo de ambas campañas, donde se muestra una variación de temperatura desde los 11 [°C] hasta los 13 [°C] durante la campaña de invierno. En la campaña de verano se registró una variación desde los 13 [°C] hasta los 17 [°C]. Esta información evidencia un diferencial térmico máximo en la columna de agua de 2 [°C], durante la estación de invierno y de 4 [°C] durante la estación de verano. Con relación a lo anterior, en la campaña de verano se registraron mayores diferenciales térmicos durante el día, a diferencia de la campaña de invierno, donde fueron imperceptibles.

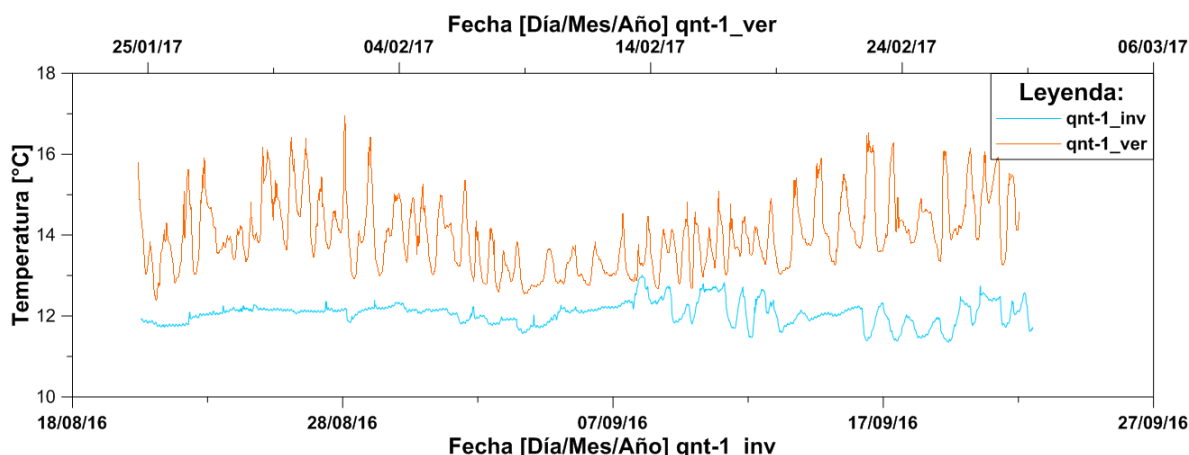


Figura 13-21 Comparación de mediciones de temperatura punto qnt-1.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13-22 y Figura 13-23 se presentaron las distribuciones verticales de las variables temperatura y salinidad, mediante los CTD en las campañas de invierno y verano, respectivamente.

En la campaña de invierno se obtuvieron temperaturas que variaron desde los 12 hasta los 14 [°C], con una tendencia de 12 [°C] en el fondo marino. En la campaña de verano se presentaron temperaturas que variaron desde los 17 a 18.5 [°C] en la superficie y entre los 14 a 16.5 [°C] en el fondo marino. En los puntos fuera de la bahía, en la estación de invierno se presentaron temperaturas semejantes en el punto de control sur (CS) y norte (CN), mientras que, en la campaña de verano se presentaron mayores temperaturas en el punto CN, en comparación al punto CS, siendo menores las profundidades del punto CN.

La salinidad medida, durante la estación de invierno, presentó magnitudes entre los valores 34.55 a 34.8 [PSU] en la superficie, con una tendencia de 34.55 [PSU] en el fondo marino. Durante la campaña de verano se midieron las salinidades en la capa superficial con valores entre 34.4 a 34.45 [PSU], mientras en el fondo marino, se midieron salinidades entre los 34.4 hasta los 34.6 [PSU]. En los puntos fuera de la bahía se muestran similitudes entre los puntos CN y CD en las campañas de invierno y verano, además sus valores se encuentran cercanos a las mediciones de los otros puntos.

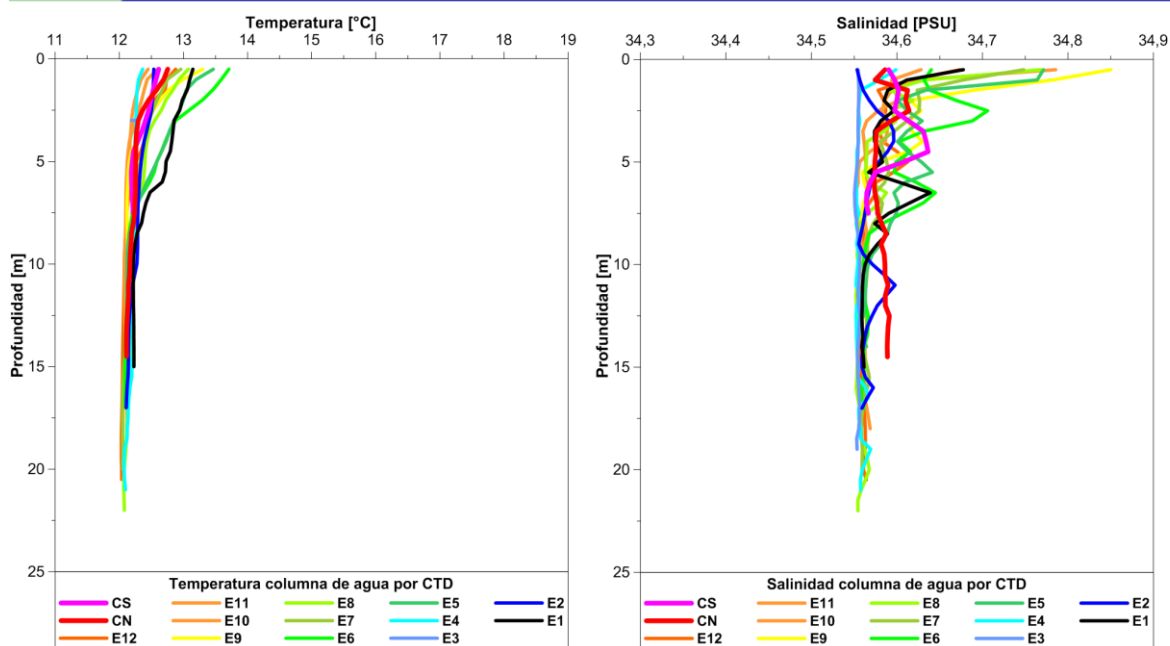


Figura 13-22 Información CTD invierno, temperatura (izquierda) salinidad (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

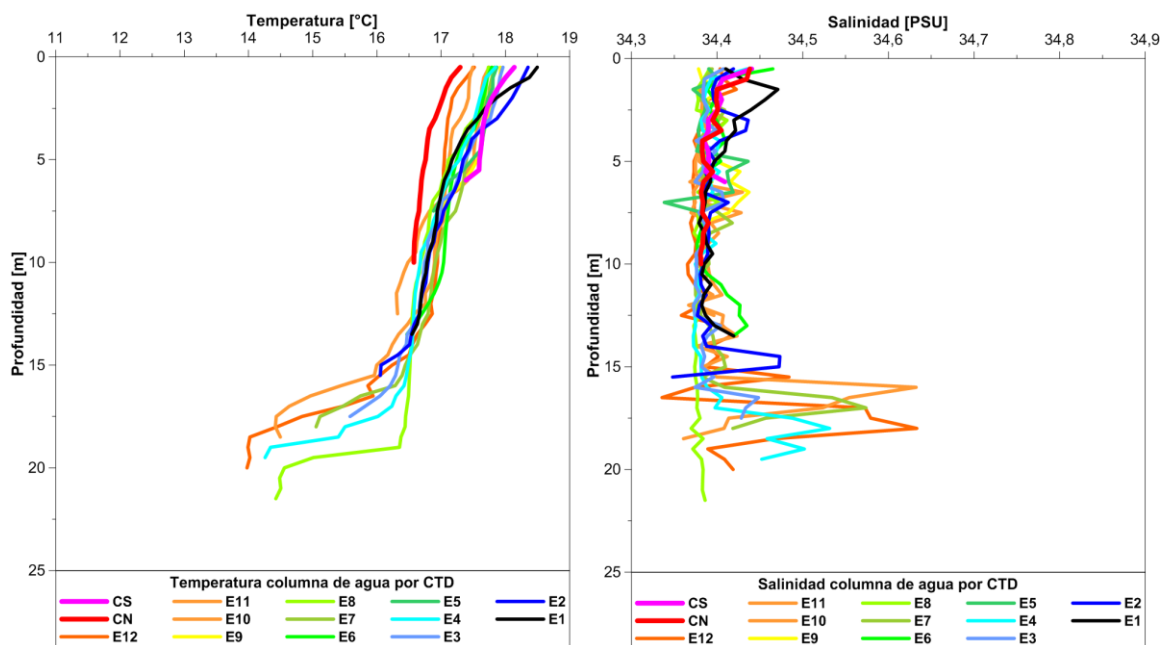


Figura 13-23 Información CTD verano, temperatura (izquierda) salinidad (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13-24 se registraron la TSM correspondiente a la región de Valparaíso mediante el promedio histórico mensual (mediante puntos naranjos) y al promedio mensual (línea negra), junto a este último se muestra los valores máximos y mínimos. En este registro de demuestra una variación estacional, donde los valores medios históricos presentan valores entre los 12 hasta los 16 [°C], contra el valor medio mensual que varía

entre los 11 hasta los 17 [°C]. El menor valor de TSM se encuentra cercano a los 11 [°C], mientras que el mayor valor es aproximadamente de 20 [°C].

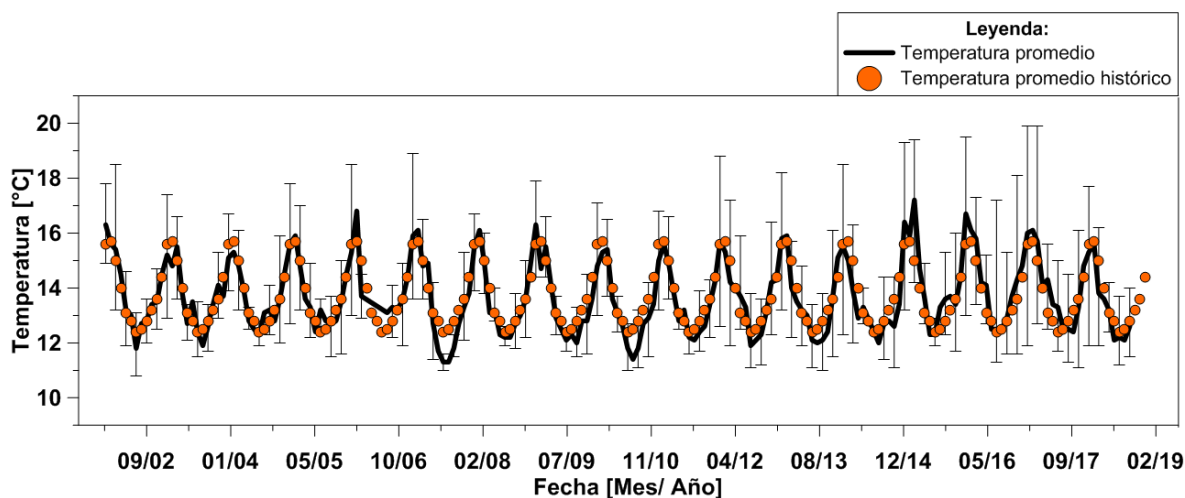


Figura 13-24 Variabilidad de temperatura superficial, V Región.
Fuente: Elaboración propia.

Es posible notar cierta concordancia entre la distinta información medida. Durante la medición en la campaña de invierno con ADCP (en el fondo), se presenta una tendencia en los 12 [°C], de igual forma en las mediciones de CTD hacia las mayores profundidades, en la campaña de invierno. Este ejercicio no puede realizarse con las mediciones de CTD durante la campaña de verano, ya que se evidenciaron grandes variaciones en poca profundidad, lo que puede corresponder a una mala manipulación instrumental. A pesar que, las mediciones por CTD presentaron datos de la temperatura superficial, no es posible comparar mediciones instantáneas con valores promediados mensualmente, por esto, solo se puede afirmar que los valores registraron entre los datos medios de TSM, aunque las mediciones de la campaña de verano superan la media de TSM, pero siguen siendo menores que los máximos registrados.

13.4.6 NUTRIENTES

En el punto actual se realiza un análisis de la información de nutrientes recopilada mediante distintas fuentes, con la finalidad de obtener un valor característico de cada nutriente en ambientes marinos.

Nitrato-Nitrito: En la Tabla 13-29 se presentan los valores máximos y mínimos de la concentración de nitrato por cada bibliografía consultada, donde el mayor valor se encuentra en la fila B4, con un valor de 0.39 [mg/L], en contraste, el valor mínimo se ubica en la fila B3, con una concentración de 0.0013 [mg/L]. Esta información se presenta en la Figura 13-25, junto a los datos del proyecto Aconcagua, que muestra las concentraciones durante el verano, entre los valores 0.36 a 0.84 [mg/L], mientras en invierno los valores son menores, encontrándose entre los 0.084 a 0.24 [mg/L]. Los valores de nitrato en los datos del P.O.A.L. se localizan cercanos a los datos de la campaña de verano del proyecto Aconcagua.

Del promedio de los valores de nitrato en los datos P.O.A.L. se obtiene un valor de 0.53 [mg/L].

La recopilación de datos del nutriente nitrito se representa en la Figura 13-26. En las mediciones del proyecto Aconcagua se encontraron mediciones bajo el límite de detección, igual a 0.006 [mg/L] que fue señalado en la figura. Los datos del P.O.A.L. presentaron un valor de 0.003 [mg/L] con mayor frecuencia, terminando con un valor medio de 0.0033 [mg/L].

Es posible señalar que la concentración de nitrito es casi despreciable frente a la magnitud de nitrato, por otro lado, el modelo ecológico seleccionado interpreta el nitrato como la suma del nitrato con el nitrito, lo que hace las concentraciones más irrelevantes.

El diferencial entre las concentraciones de estos nutrientes puede deberse a la inestabilidad de la molécula nitrito, transformándose en nitrato con facilidad (Ji, 2008).

Tabla 13-29 Información de nutriente nitrato obtenida de la bibliografía recopilada.

Identificación	Bibliografía	Nitrato [mg/L]	
		Máximo	Mínimo
B1	Respuesta físico-química de la bahía de Valparaíso a la surgencia generada en punta Curaumilla y el fenómeno El Niño (Sievers & Vega, 2000)	0.16	0.003
B2	Proliferación de Primavera del fitoplancton en la bahía de Valparaíso. I. Condiciones meteorológicas y oceanográficas (Alvial & Avaria, 1981)	0.20	0.0014
B3	Distribución de características físicas y químicas frente a península Los Molles, Chile (32° 45'S) y su relación con su fenómeno "El Niño" 1982/83(Prado & Sievers, 1987)	0.22	0.0013
B4	Evolución de un evento de surgencia frente a punta Curaumilla, Valparaíso (Silva & Valdenegro, 2003)	0.39	0.028
B5	Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la bahía de Mejillones del Sur (Rodríguez, Zárate, & Oyarce, Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la bahía de Mejillones del Sur, 1986)	0.30	0.066
B6	Winter and summer distribution of dissolved oxygen, PH and nutrients at the heads of fjords in chilean patagonia with possible phosphorus limitation (Prado-Fiedler, 2009)	0.38	0.02

Fuente: Elaboración propia.

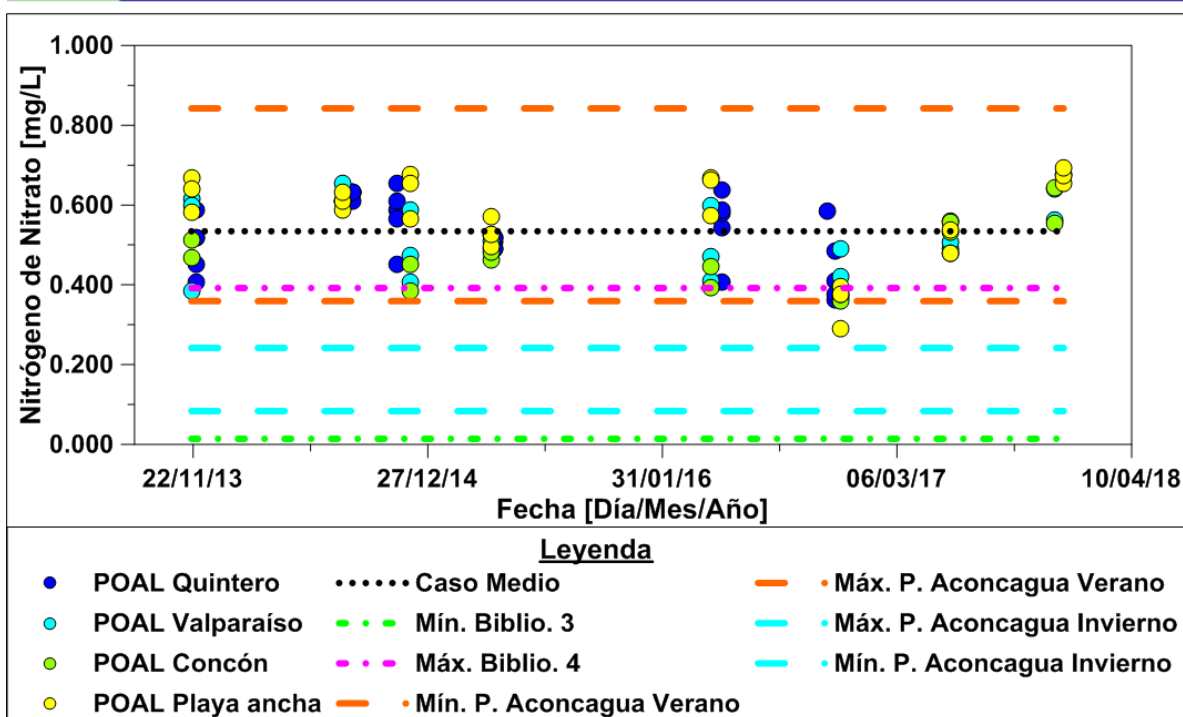


Figura 13-25 Información recopilada de nitrato.
Elaboración propia.

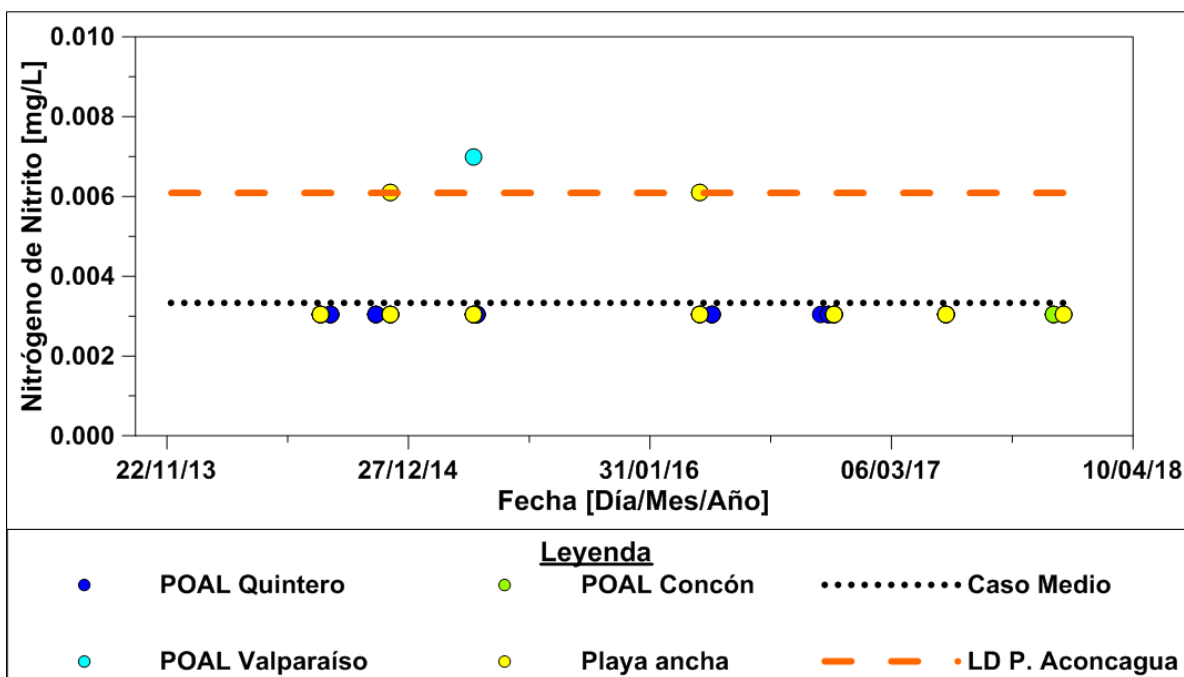


Figura 13-26 Información recopilada de nitrito.
Fuente: Elaboración propia.

Amonio: De forma similar que el nitrito, las mediciones del amonio durante las campañas del proyecto Aconcagua se encontraron bajo el límite de detección, con un valor de 0.023 [mg/L]. Esto se muestra en la Figura 13-27, donde también se presenta los datos del P.O.A.L., los cuales frecuentan un valor de 0.012 [mg/L], con una media de 0.013 [mg/L].

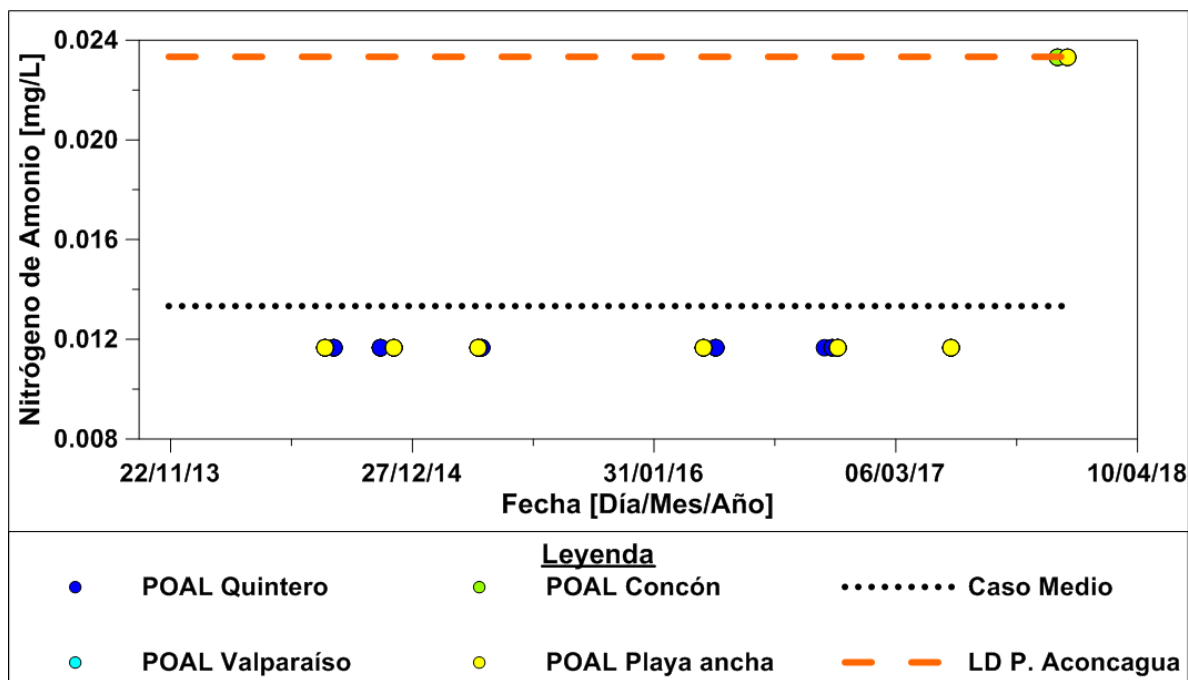


Figura 13-27 Información recopilada de amonio

Fuente: Elaboración propia.

Fósforo inorgánico: Como la principal concentración de fósforo inorgánico corresponde al fosfato se analizó solo este nutriente. A diferencia de los otros nutrientes, éste no fue medido durante las campañas del proyecto Aconcagua. La información bibliográfica recopilada se muestra en la Tabla 13-30 donde se presentan los valores máximos y mínimos en cada bibliografía. Entre las bibliografías consultadas se presenta el mayor valor en la bibliografía B1 con una concentración de 0.112 [mg/L], mientras que, el valor mínimo correspondió a la bibliografía B2 con una concentración de 0.003 [mg/L].

Esta información es descrita en la Figura 13-28, junto a los valores medidos en el P.O.A.L., los cuales se encuentran cercanos al valor mínimo de la bibliografía. El valor medio de los datos del P.O.A.L. es de 0.0125 [mg/L].

Tabla 13-30 Información de nutriente fosfato recopilada de la bibliografía.

Identificación	Bibliografía	Fosfato [mg/L]	
		Máximo	Mínimo
B1	Respuesta físico-química de la bahía de Valparaíso a la surgencia generada en punta Curaumilla y el fenómeno El Niño (Sievers & Vega, 2000)	0.344	0.035
B2	Proliferación de Primavera del fitoplancton en la bahía de Valparaíso. I. Condiciones meteorológicas y oceanográficas (Alvial & Avaria, 1981)	0.084	0.009
B3	Distribución de características físicas y químicas frente a península Los Molles, Chile (32° 45'S) y su relación con su fenómeno "El Niño" 1982/83 (Prado & Sievers, 1987)	0.190	0.040
B4	Evolución de un evento de surgencia frente a punta Curaumilla, Valparaíso (Silva & Valdenegro, 2003)	0.266	0.095
B5	Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la bahía de Mejillones del Sur (Rodríguez, Zárate, & Oyarce, Producción primaria del fitoplancton y su relación con la temperatura, oxígeno, nutrientes y salinidad en la bahía de Mejillones del Sur, 1986)	0.226	0.084
B6	Winter and summer distribution of dissolved oxygen, PH and nutrients at the heads of fjords in chilean patagonia with possible phosphorus limitation (Prado-Fiedler, 2009)	0.200	0.006

Fuente: Elaboración propia.

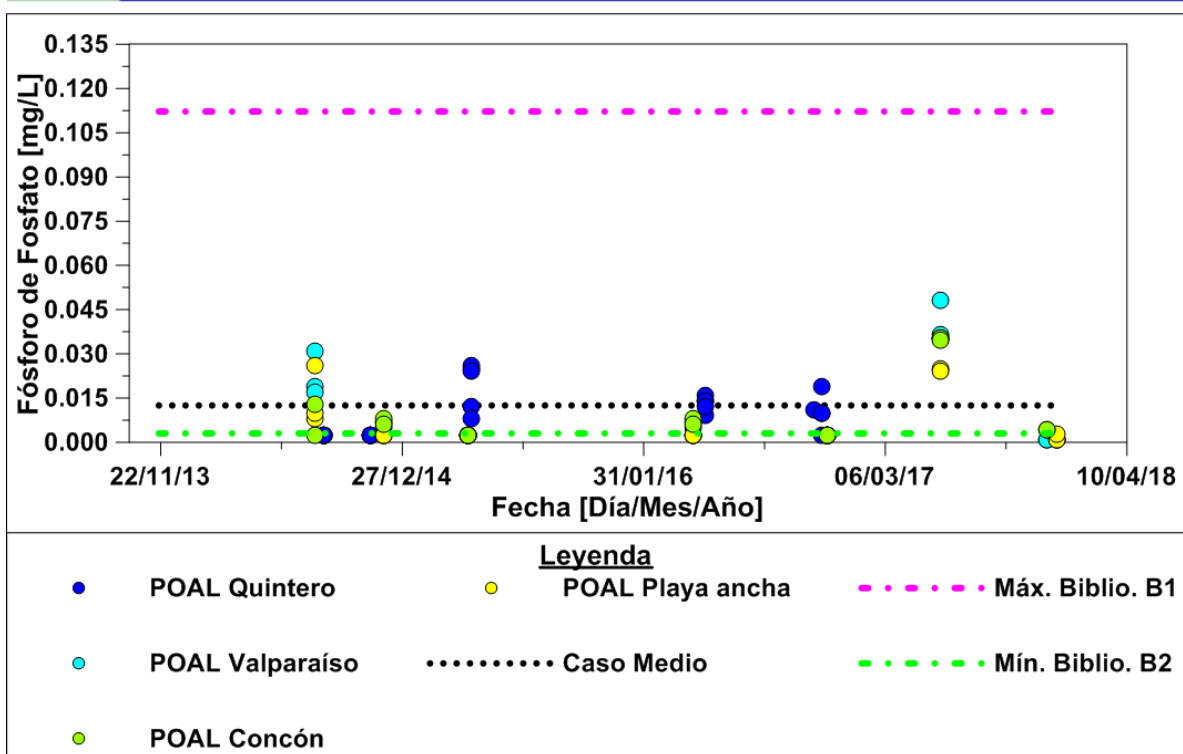


Figura 13-28 Información recopilada de fosfato.

Fuente: Elaboración propia.

Oxígeno disuelto: En cuanto a las mediciones de oxígeno disuelto, se obtuvieron las mediciones del proyecto Aconcagua mediante CTD en las estaciones mostradas en la Figura 6-4, cuyos valores se presentan en la Figura 13-29. En la campaña de invierno los valores en la superficie se encontraron entre los 5 a 7 [mg/L] y en el fondo se midieron valores en el rango de 4.5 a 6 [mg/L]. En verano se presencié una mayor dispersión entre las estaciones, con valores en superficie entre los 8 a 11 [mg/L] y en el fondo, con valores desde 4.5 a 9 [mg/L]. En la campaña de invierno los puntos de control presentaron valores similares al resto de los puntos, a diferencia de la campaña de verano, donde el punto de control norte presentó las concentraciones más bajas con 8 [mg/L], y el punto de control sur mostró valores ligeramente mayores, alcanzando una concentración de 11 [mg/L].

El análisis de las mediciones con CTD se realizó seleccionando los valores máximos y mínimos por campaña, despreciando la profundidad o estación del dato. Esta información es presentada en la Figura 13-30 junto a las mediciones del P.O.A.L., los cuales presentaron magnitudes dentro de los límites de los datos de CTD. El valor medio de las mediciones de la P.O.A.L. fue de 7.98 [mg/L].

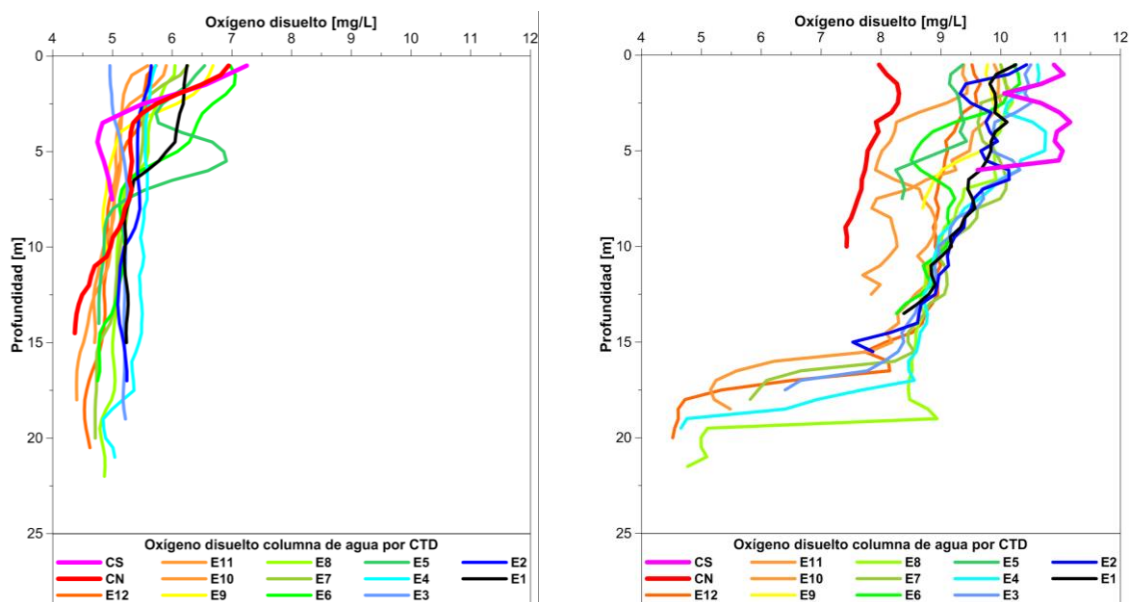


Figura 13-29 Mediciones de DO durante la campaña de invierno (izquierda) y durante la campaña de verano (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

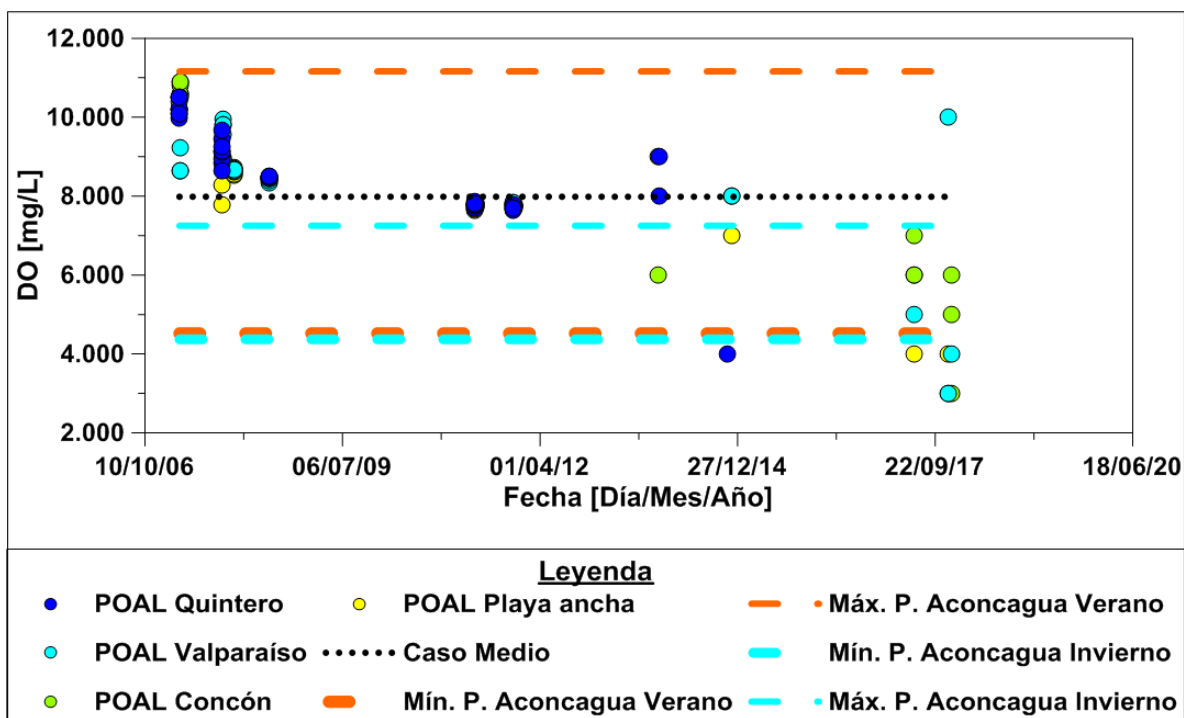


Figura 13-30 Información recopilada de oxígeno disuelto.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe mencionar que no se presentaron diferencias notables entre las mediciones de diferentes estaciones del P.O.A.L., dando indicios de una baja variabilidad espacial entre la calidad de las aguas en Quintero y en sur de la bahía (bahía de Valparaíso).

13.4.7 ORGANISMOS

Según lo establecido en la metodología, se asumió la ausencia de la concentración de vegetación bentónica en la bahía, dejando al fitoplancton como el único encargado de la producción primaria.

En la Tabla 13-31 se muestra la concentración de biomasa de clorofila a recopilada mediante bibliografía. La media de esta información es de 3.24 [mg/m³] (0.0032 [mg/L]), que al realizar la relación de Desortová (1981) se determina una concentración de biomasa de fitoplancton de 0.619 [mg/L].

Tabla 13-31 Datos de biomasa de clorofila a biográficos.

Año	Biomasa Clorofila	Unidad	Bibliografía
1972	1.5500	mg/m ³	(Avaria, Muñoz, & Braunn, 1988)
1982	1.6100	mg/m ³	
1983	5.1200	mg/m ³	
1974-75-76-77	4.0300	mg/m ³	
1970-71	2.0800	mg/m ³	(Avaria S. P., 1975)
1972-73	1.3300	mg/m ³	(Avaria & Orellana, 1975)
2007	1.1400	mg/m ³	(Palma, Henríquez, & Ojeda, 2009)
	3.8800	mg/m ³	
	7.8600	mg/m ³	
	2.2800	mg/m ³	
1977	4.8000	mg/m ³	(Alvial & Avaria, 1982)
Promedio	3.2436	mg/m³	

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13-32 se presenta la media de las mediciones de abundancia fitoplanctónica durante el proyecto Aconcagua en las campañas de invierno y verano, las cuales correspondieron a 72,528.57 [cél/L] y 434,497.93 [cél/L], respectivamente. En Alvial & Avaria (1982) se menciona una relación entre la abundancia de fitoplancton y su biomasa de clorofila a, lo que permitió estimar la biomasa de clorofila a en 0.0019 [mg/L] en la campaña de invierno y 0.0024 [mg/L] en la campaña de verano.

En la Figura 13-31 se muestra las distribuciones de las taxa de fitoplancton en las campañas de invierno y verano, demostrando el notable predominio de las diatomeas, lo que permite utilizar de forma apropiada la relación de Desortová (1981), obteniéndose la biomasa fitoplanctónica de 0.3879 [mg/L] en la campaña de invierno y 0.5112 [mg/L] en la campaña de verano. Estas estimaciones permitieron verificar el orden de magnitud determinado mediante las mediciones de biomasa de clorofila a.

Tabla 13-32 Resumen de cálculo de biomasa de fitoplancton y clorofila a.

	Unidades	Invierno	Verano
Abundancia	cél/L	72,528.57	434,497.93
Clorofila	mg/L	0.0019	0.0024
Fitoplancton	mg/L	0.3879	0.5112

Fuente: Elaboración propia.

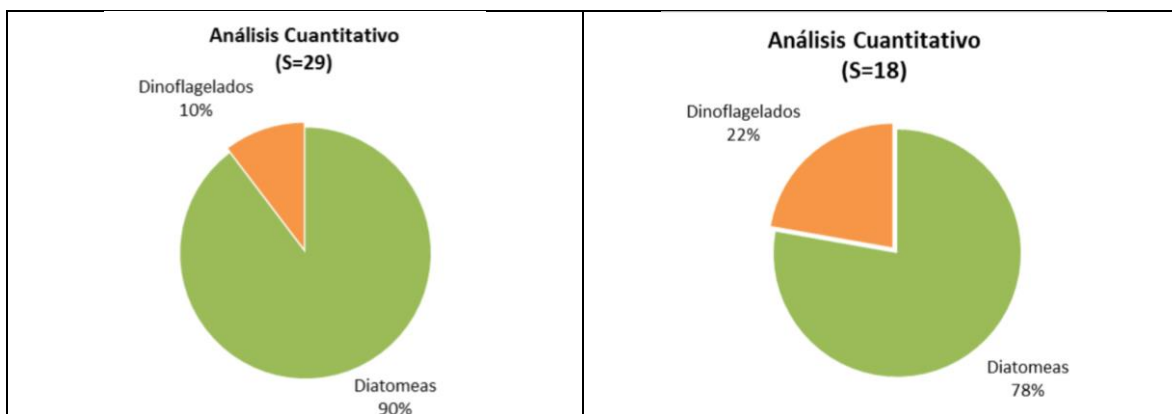


Figura 13-31 Composición numérica de las taxa más abundantes identificados en la comunidad fitoplanctónica. En la izquierda la campaña de invierno y en la derecha la campaña de verano.

Fuente: SGA (2017).

La determinación de las concentraciones de fitoplancton compuestas de nitrógeno y fósforo se utilizó la relación de Redfield (Libes, 2009), a partir de la concentración media de fitoplancton de 0.619 [mg/L], se obtuvo su correspondiente concentración de nitrógeno de 0.1044 [mg/L] y de 0.0065 [mg/L] de fósforo.

Durante las mediciones del proyecto Aconcagua se midieron las abundancias de zooplancton en las estaciones definidas en la bahía de Quintero. Las taxa determinadas en las muestras de aguas, en ambas campañas, se muestran en la Figura 13-32, donde se comprueba la presencia de los copépodos como una de las especies más relevantes. En la campaña de verano se muestra su predominio entre las taxa, mientras que, en la campaña de invierno se establece como la segunda taxa más abundante, después del ictioplancton, el cual corresponde al holoplancton, por tanto, según su crecimiento puede salir de esta taxa. El predominio de los copépodos en las mediciones permite la utilización de las mediciones en Escribano & Fuentes (2012), donde se obtiene la media de la biomasa de copépodos en distintos puntos en la costa de Chile. La media de los valores presentados entrega un valor de 0.056 [mg/L] como biomasa de copepodos.

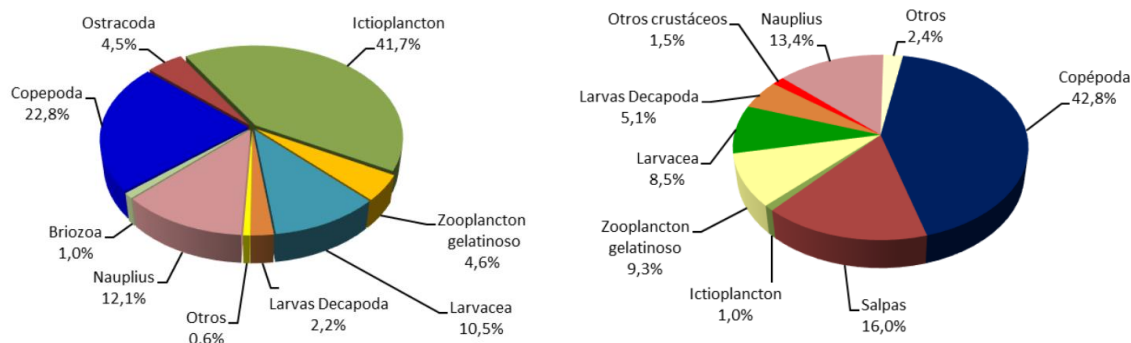


Figura 13-32 Composición numérica de los taxa más abundantes identificados en la comunidad zooplanctónica. En la izquierda la campaña de invierno y en la derecha la campaña de verano.
Fuente: SGA (2017).

Por la ausencia de información, se decidió establecer la concentración de detritus de 0 [mg/L], asumiendo, en el comienzo, un sistema sin desechos orgánicos.

13.4.8 DESCARGAS Y CAPTACIONES

Entre la información recopilada se encontró solo parte de los datos requeridos y en este capítulo se caracteriza parte de esta información.

En la Figura 13-33 se representaron las series de tiempo de los caudales de los efluente en la bahía, las cuales fueron prácticamente constantes. Los mayores caudales correspondieron al efluente Campiche y Nueva Ventanas con 10.42 [m³/s], seguidas por Ventanas 2, GNL y Ventanas 1, con caudales de 4.9 [m³/s], 4.1 [m³/s] y 3.08 [m³/s], respectivamente.

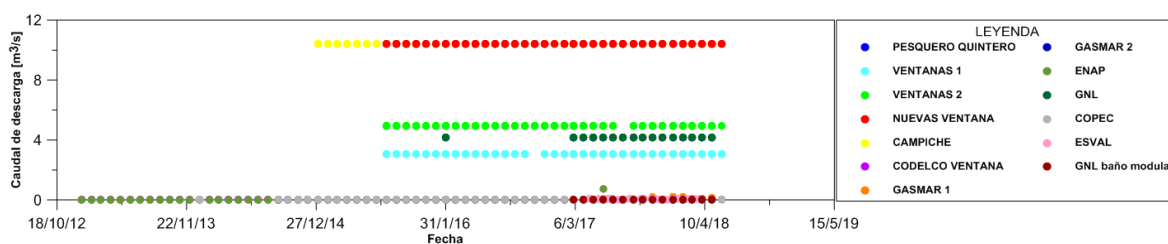


Figura 13-33 Gráfica caudales de descarga.
Fuente: Elaboración propia.

La información de las temperatura de los efluente a través del tiempo se representó en la Figura 13-34, donde se destaca una variación en el tiempo, registrándose temperaturas desde los 5 [°C] hasta los 30 [°C]. Las descargas Ventanas 1 y 2 presentaron las mayores descargas, cuyas temperaturas promedian 26.15 [°C] y 25.17 [°C], respectivamente, seguidos por las descargas Nueva Ventanas (23.35 [°C]), Campiche (22.16 [°C]) y Codelco Ventana (21.19 [°C]). Se debe mencionar que, las descargas con mayores temperaturas corresponden a los residuos de termoeléctricas, con excepción de Codelco Ventanas, las cuales se concentran en la zona norte de la bahía. En contraste, las descargas de Esval y GNL, baños modulares, expulsan líquidos con las menores temperaturas, en promedio,

14.48 [°C] y 14.62 [°C], respectivamente. Por otro lado, las descargas de GASMAR, pesquera de Quintero y la descarga principal de GNL, no informa la temperatura de sus descargas.

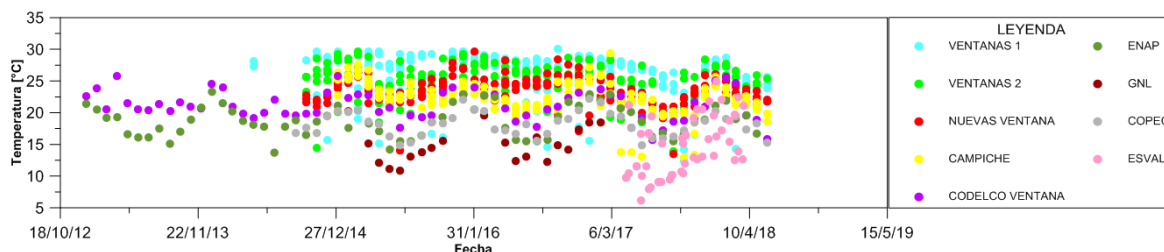


Figura 13-34 Gráfica temperaturas en descargas.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13-35 y Figura 13-36 se señalan las concentraciones de las descargas de los nutrientes, NKT y fósforo, respectivamente. Entre las industrias en la bahía de Quintero solo Codelco Ventana, Pesquera Quintero y GNL baños modulares, informan la concentración de NKT en sus descargas, con concentraciones promedio de 3.18 [mg/L], 57.92 [mg/L] y 1.61 [mg/L], respectivamente. En el fósforo solo se informó las correspondientes concentraciones en las descargas de pesquera Quintero (0.04 [mg/L]), Esval (6.8 [mg/L]) y GNL baños modulares (5.54 [mg/L]).

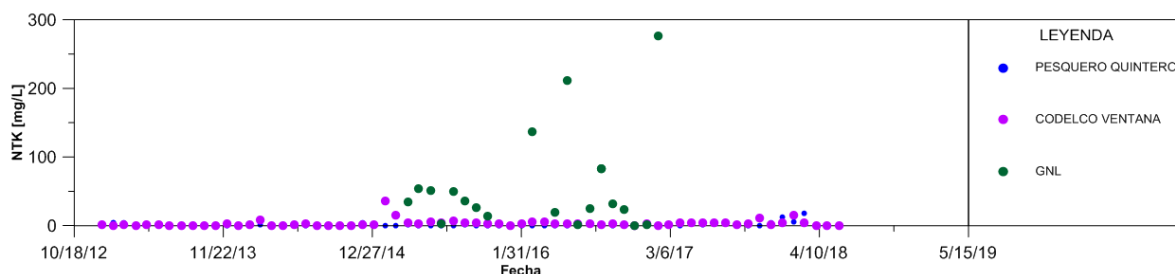


Figura 13-35 Gráfica Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) en descargas.
Fuente: Elaboración propia.

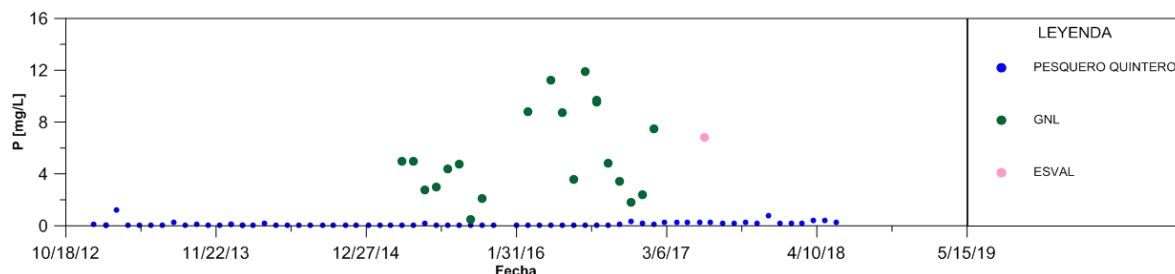


Figura 13-36 Gráfica fósforo en descargas.
Fuente: Elaboración propia.

13.5 ANEXO CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

13.5.1 OLEAJE

Como ha sido mencionado, el proceso en este parámetro consistió en la propagación del oleaje de los datos Atlas (en aguas profundas) hacia los puntos de mediciones en las cercanías de la bahía de Quintero. En la costa se dirigió el análisis hacia el punto qnt-1, debido a sus mediciones en las estaciones de invierno y verano, mientras que, los puntos qnt-2 y qnt-3, ubicados en la costa, permitieron verificar las capacidades del modelo, durante otras ventanas de tiempo. El punto qnt-5 tuvo una gran importancia debido a su localización en las afueras de la bahía y su mayor profundidad.

En la Figura 13-37 se muestran los resultados del proceso de calibración sobre el punto qnt-1 durante la estación de invierno, donde se contrasta los parámetros de resumen que son relatados a continuación:

En la serie de tiempo de la H_s , el comportamiento de la simulación se asemeja al de las mediciones, lo que concuerda con el gráfico Q-Q, donde se muestra una buena concordancia hasta los 1.2 [m], desde donde se revela una subestimación en la simulación. El R^2 para este parámetro fue de 0.96 [-] y el RMS igual a 0.11 [m], menor a la desviación estándar de los datos igual a 0.3 [m].

En el T_p la serie de tiempo se refleja una conducta semejante entre la simulación y la medición, con una mayor cercanía a los altos T_p que, a los menores, lo cual se refleja en el Q-Q, donde se muestra una ligera sobrestimación de la simulación. El R^2 de este parámetro fue de 0.98 [-], con un RMS de 1.26 [s], menor a la desviación estándar de los datos medidos de 2.3 [s].

En el parámetro D_m se presentó una similitud con la media de los datos medidos, perdiéndose las D_m extremas, lo cual puede deberse a la geografía de la bahía que complejiza la simulación numérica. El R^2 para este parámetro fue de 0.84 [-] con un RMS de 4.01 [°] bajo la desviación estándar de 6.7 [°]. La calibración de la D_m es aceptada por su RMS menor a la desviación estándar, aunque el R^2 fuese menor a 0.9 [-], ya que la amplia discretización de direcciones del espectro (15 [°]) y la zona propensa a efectos de difracción, complejiza la representación de las direcciones en este tipo de modelo.

Con los resultados obtenidos se comprueba el cumplimiento de los estándares establecidos para esta memoria y fue posible continuar con el proceso de validación, el cual es mostrado en la Figura 13-38, que representa los parámetros de resumen analizados en el punto qnt-1 durante la estación de verano. El análisis de los parámetros se analiza a continuación:

La H_s simulada muestra un comportamiento similar a la medición con una ligera sobrestimación, que se encuentra evidenciada en el gráfico Q-Q, especialmente en sus alturas más bajas. El R^2 obtenido es de 0.99 [-], mientras que su RMS es de 0.1 [m], menor que la desviación estándar de la serie medida igual a 0.2 [m].

En el T_p se muestra una buena representación de los mayores T_p , aunque los menores no logran ser representados en su totalidad por la simulación. En relación a lo anterior, el gráfico Q-Q muestra una sobrestimación bajo los 16 [s], aunque el R^2 fue igual a 0.97 [-] y el RMS fue igual a 1.96 [s], siendo este último menor a la desviación estándar de 3.3 [s].

En la D_m se muestra que la simulación logra representar el comportamiento de la media de las mediciones, perdiendo los valores extremos de la serie. Con la simulación realizada se obtuvo un R^2 de 0.95 [-] y un RMS de 4.69 [°], el cual es menor que la desviación estándar de 9.1 [°].

Con los resultados señalados es posible concluir satisfactoriamente la validación del modelo en la bahía, lo cual permite aseverar la capacidad de representar la propagación de oleaje hacia la costa. Las capacidades del modelo fueron verificadas en el contraste de

datos sobre los puntos qnt-2 y qnt-3 (Figura 13-39 y Figura 13-40, respectivamente), donde se comprobaron resultados similares en los tres parámetros de oleaje analizados, cumpliendo los criterios de esta memoria. Esto permitió aumentar la confianza en la simulación costera del oleaje.

En la Figura 13-41 fueron representados los parámetros de resumen analizados en el punto qnt-5, cuya relevancia consistió en el contraste de datos en una locación alejada del punto qnt-1 y fuera de la bahía. El análisis de sus parámetros se realiza a continuación:

En la serie de tiempo de la H_s se visualiza una correcta representación del comportamiento medido, aunque en el gráfico Q-Q se evidencia una ligera sobrestimación en la simulación, en especial, en las H_s más altas. El R^2 determinado fue de 0.991 [-] y el RMS es de 0.355 [m], menor que la desviación estándar de 0.61 [m].

La representación de la variable T_m se logra representar la conducta en el tiempo, aunque el gráfico Q-Q demuestra una sobrestimación. A pesar de esto, el R^2 determinado fue igual a 0.993 [-] y un RMS igual a 0.999 [s], cuya magnitud es menor a la desviación estándar de 1.65 [s].

La ubicación en las afueras de la bahía, permitió contrastar la simulación en un sector donde la geografía no afecta al oleaje y los efectos de fondo son mínimos. Por esta razón, la evaluación permite analizar la representación de los datos Atlas, que fueron utilizados como forzantes, los cuales cumplen los criterios como fue mostrado en los resultados.

Es posible concluir que los datos de oleaje en aguas profundas representan el fenómeno, al menos los parámetros analizados, además como se cumplieron los criterios al interior de la bahía, se demostró la capacidad de representar los efectos costeros en la propagación del oleaje. Se debe mencionar que, en los resultados presentados fue evidente ciertas debilidades en la representación de la dirección del oleaje, lo que es comprensible debido a la geografía cerrada de la bahía de Quintero, asociada a la ocurrencia del fenómeno de difracción, que no es representada en su totalidad por el modelo numérico empleados en la presente investigación.

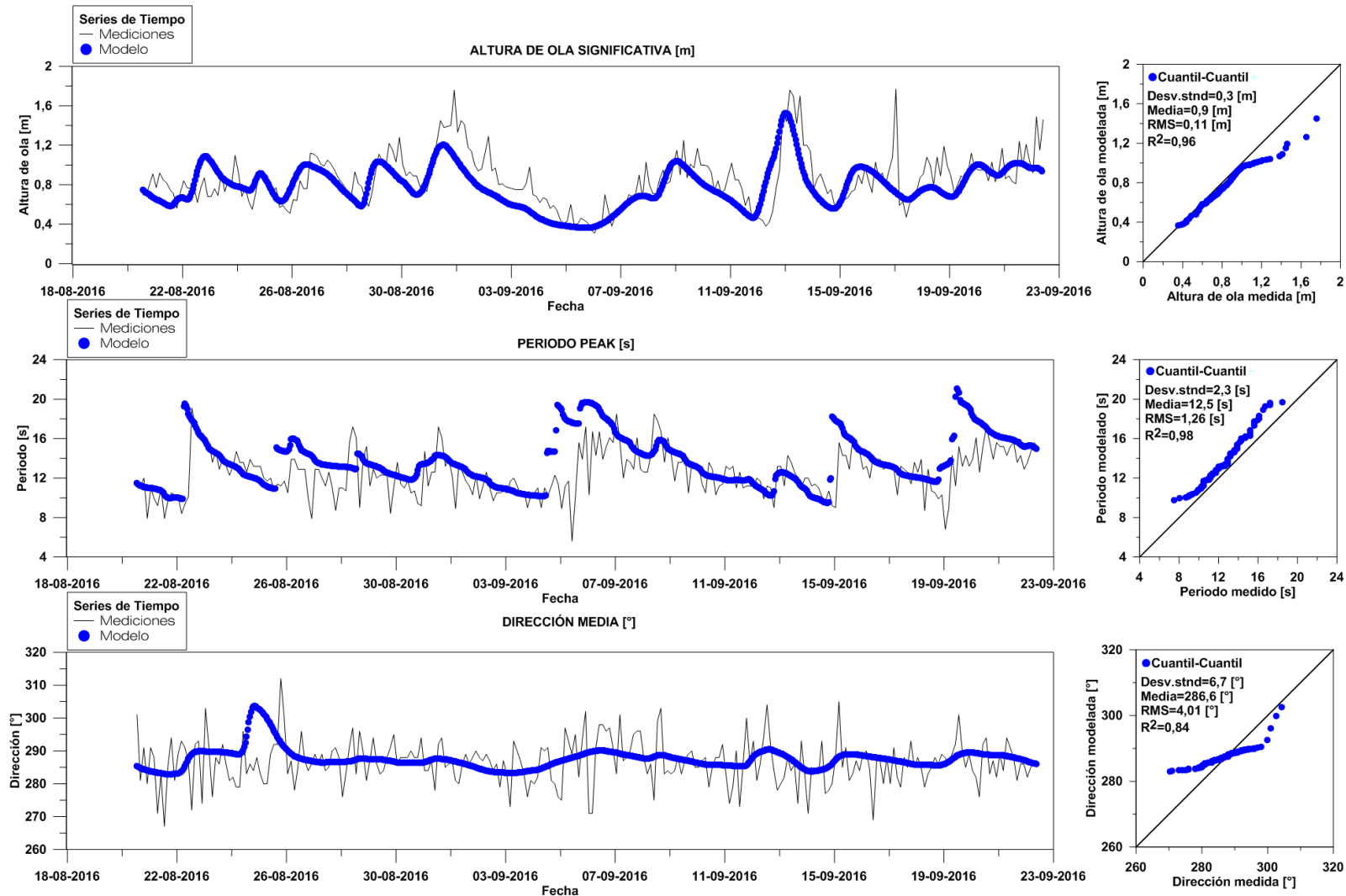


Figura 13-37 Calibración modelo oleaje punto qnt-1, estación de invierno.

Fuente: Elaboración propia.

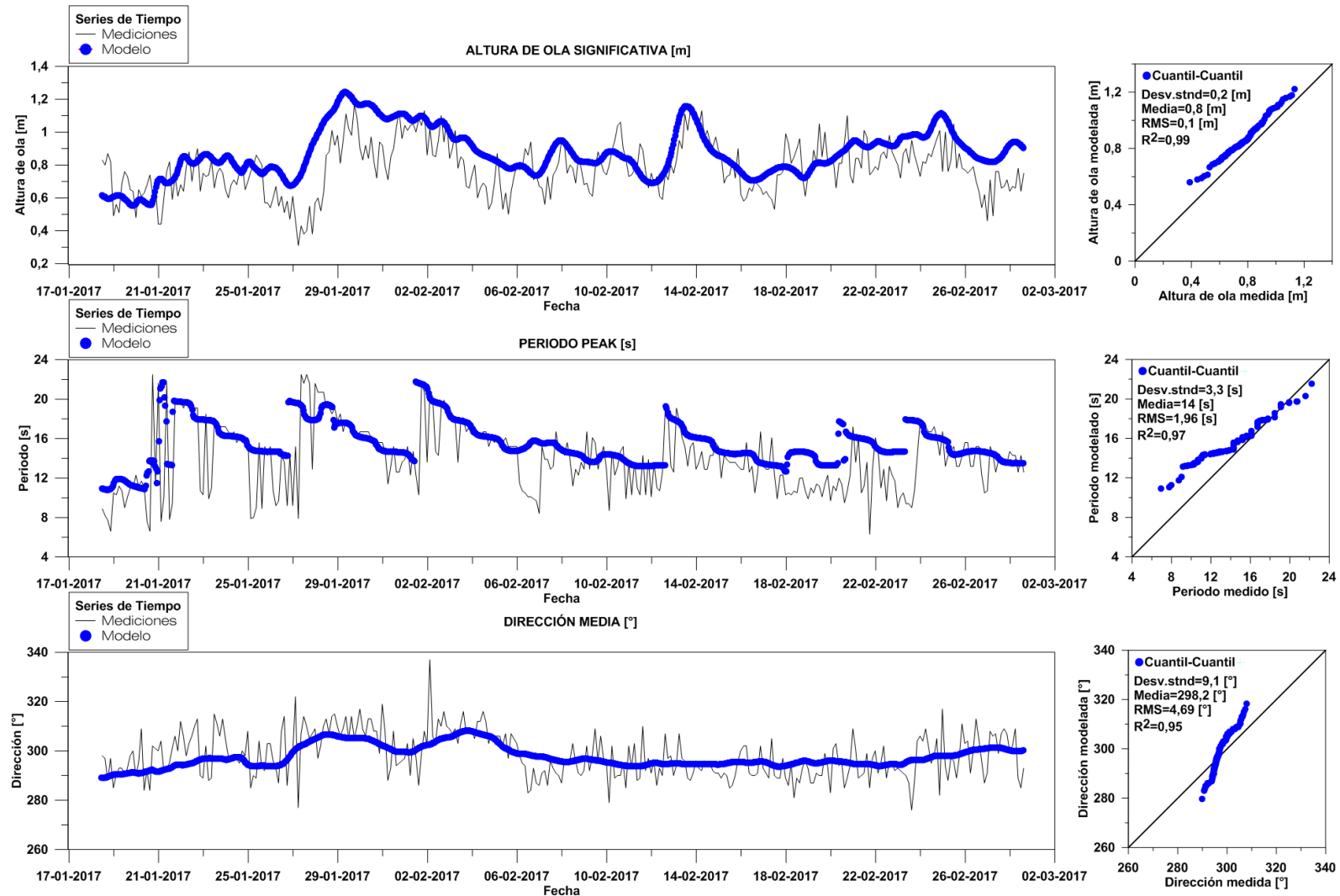


Figura 13-38 Validación modelo oleaje punto qnt-1, estación de verano.

Fuente: Elaboración propia.

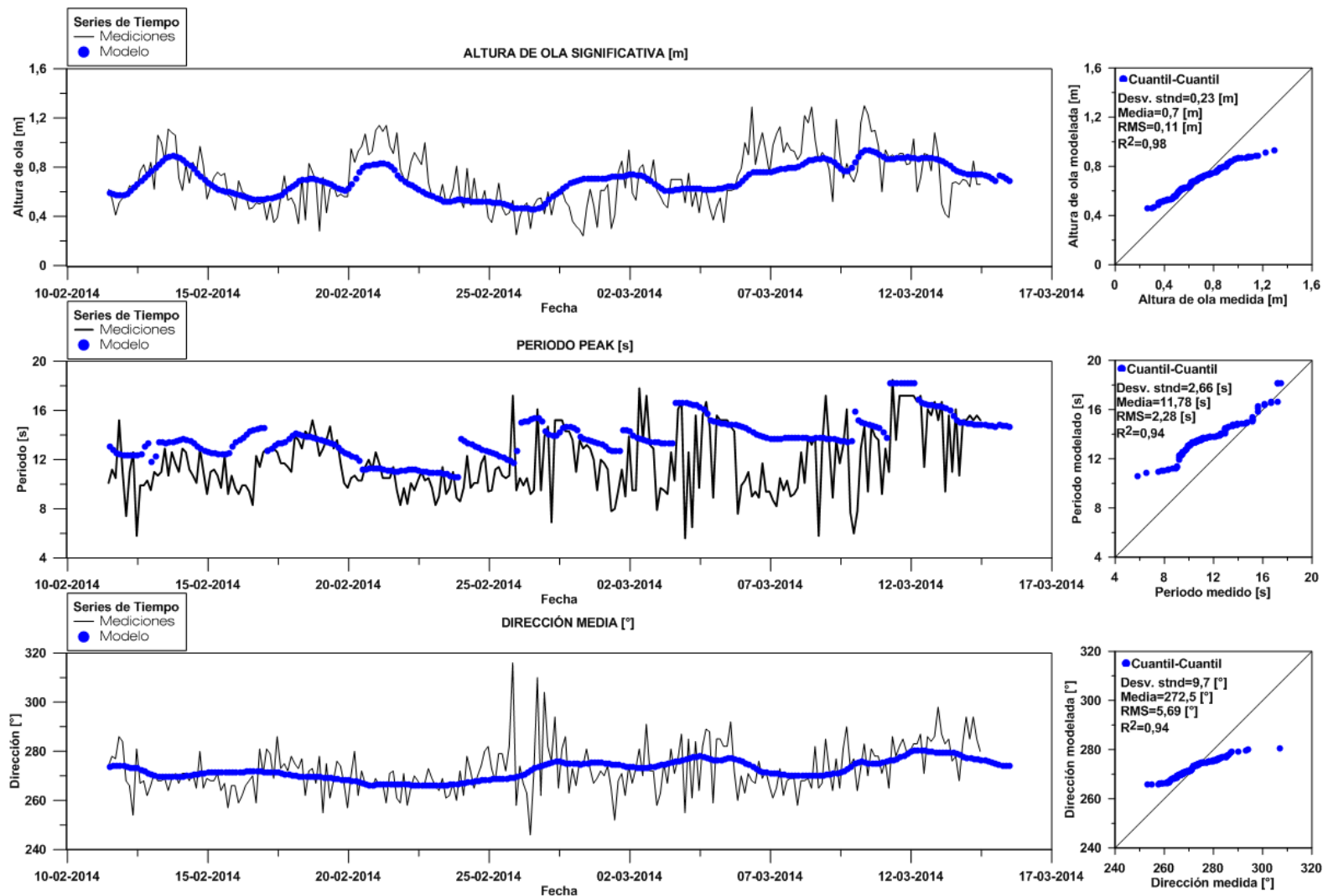


Figura 13-39 Validación oleaje punto qnt-2.

Fuente: Elaboración propia.

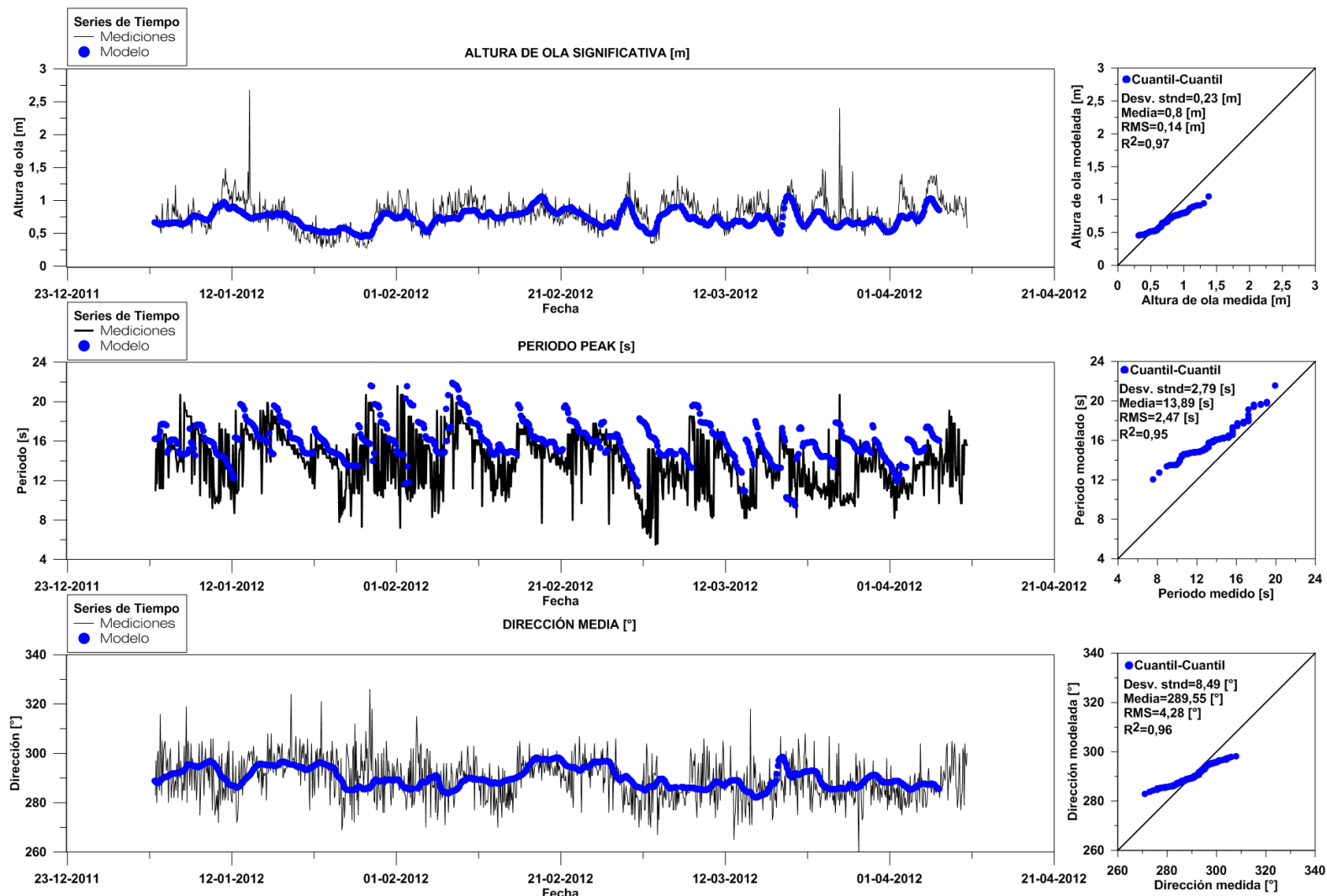


Figura 13-40 Validación oleaje punto qnt-3.

Fuente: Elaboración propia.

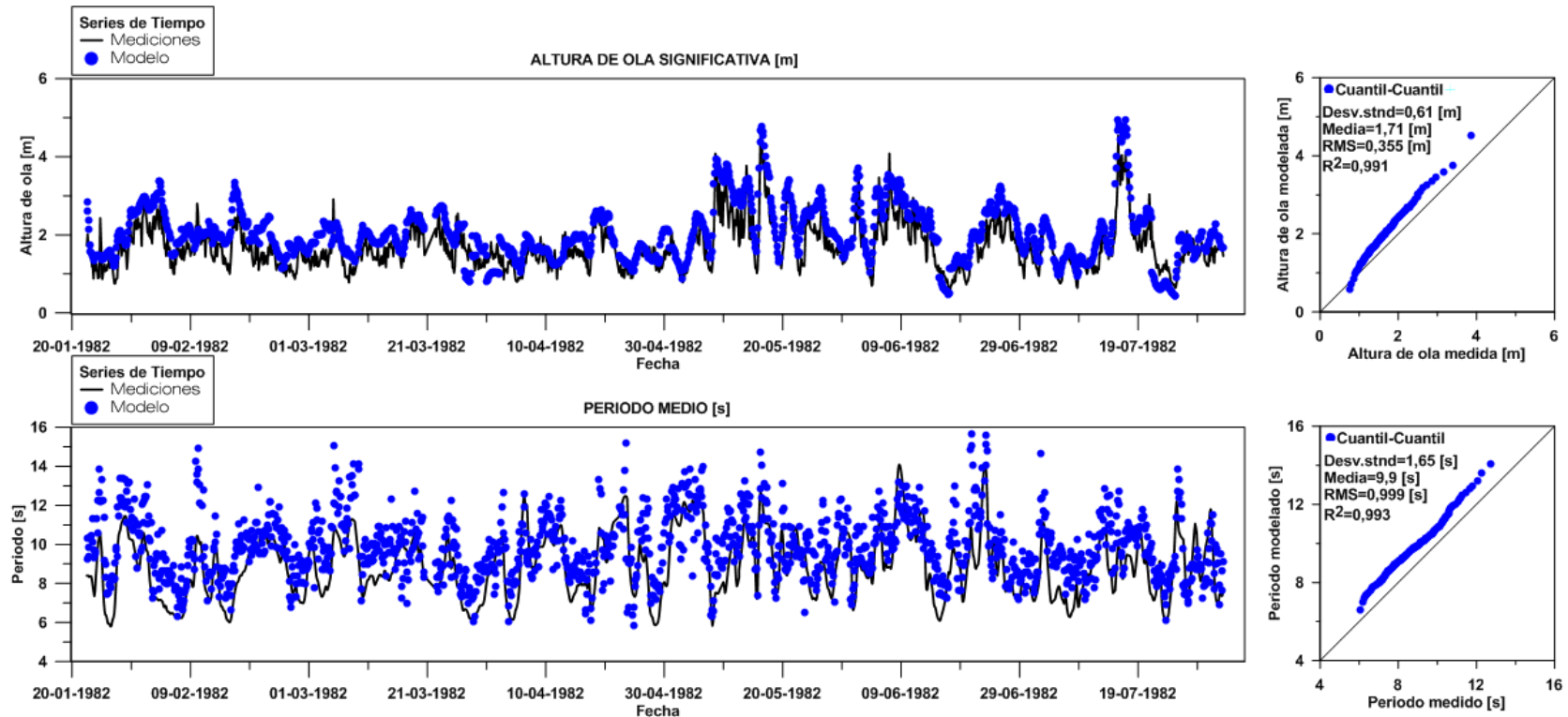


Figura 13-41 Validación oleaje punto qnt-5.

Fuente: Elaboración propia.

13.5.2 MAREA

Según lo establecido en la memoria, el contraste de datos para el proceso de calibración se realizó al interior de la bahía en el punto qnt-1 durante la estación de invierno. El análisis de la calibración fue señalado en la Figura 13-42, donde se muestra una correcta representación por la simulación de la conducta sinusoidal semidiurna mostrado en la medición. En la serie de tiempo y en el residuo es posible verificar una subestimación en la simulación de la señal de marea, en el residuo la máxima diferencia presenta un valor de 0.3 [m]. En el R^2 se presenta un valor de 0.975 [-] y un RMS igual a 0.097 [m], bastante menor que la desviación estándar de 0.373 [m].

Los resultados obtenidos durante la calibración permiten finalizar y proceder con el proceso de validación, que se realiza al interior de la bahía en el punto qnt-1 durante la estación de verano. Los resultados de la validación son presentados en la Figura 13-43, representándose el comportamiento de la marea. En la serie de tiempo y en el residuo se muestra una subestimación en la simulación, con un residuo máximo de 0.2 [m]. El R^2 resultante es de 0.986 [-] y el RMS igual a 0.081 [m] bastante más pequeño que la desviación estándar igual a 0.369 [m].

En las simulaciones realizadas en los procesos de calibración y validación, se muestra una subestimación que puede deberse a la ausencia del aporte meteorológico a la marea, cuyas magnitudes en el residuo, se asemejan a este fenómeno. A pesar de esto, se comprueba la concordancia entre la medición y simulación, según los valores estadísticos, que cumplen con los criterios establecidos en la metodología. Es posible aseverar que el comportamiento simulado cumple con la característica oscilatoria semidiurna propio de la marea en Chile (SHOA, 1999).

Con los resultados obtenidos se hace posible utilizar los datos recopilados y el modelo seleccionado para la replantación de la marea en las simulaciones de los casos de estudio.

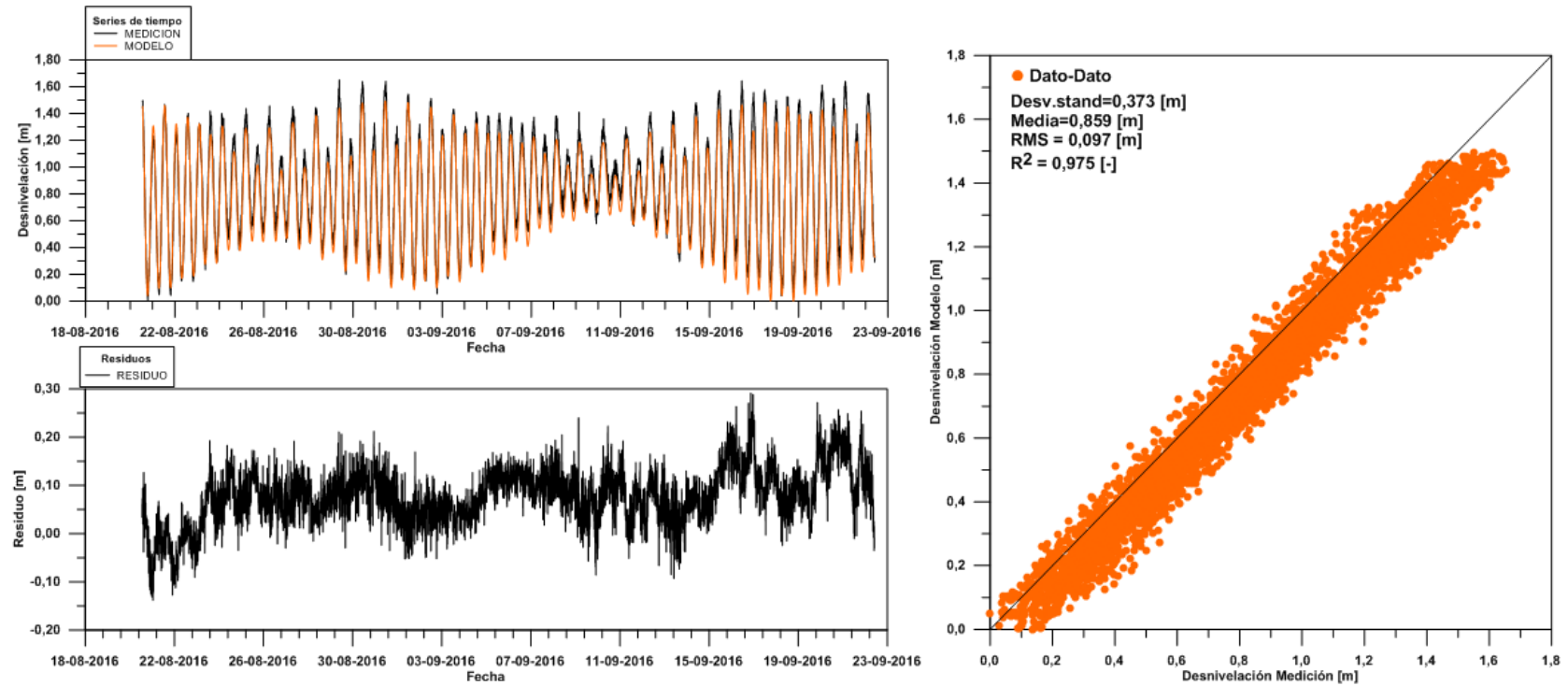


Figura 13-42 Calibración de marea punto qnt-1, estación de invierno.

Fuente: Elaboración propia.

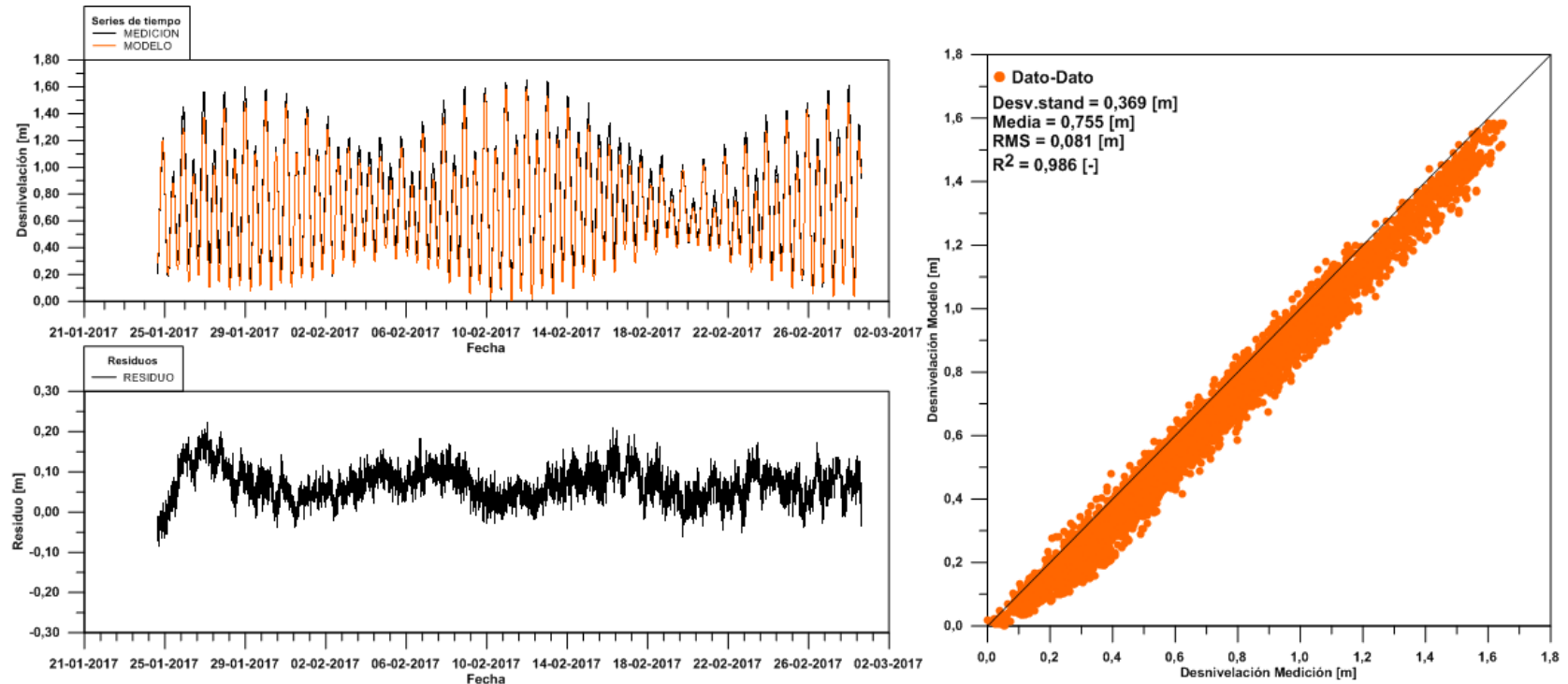


Figura 13-43 Validación de marea punto qnt-1, estación de verano.

Fuente: Elaboración propia.

13.5.3 CORRIENTES

Como fue mencionado en la metodología, las corrientes se analizaron en las componentes ortogonales de las velocidades (U y V), en sus capas superficial, intermedia y de fondo. La calibración se realizó en el punto qnt-1, durante la estación de invierno.

En la Figura 13-44 se muestra la componente U de la velocidad, donde es notable una similitud en el comportamiento y magnitudes en las tres capas analizadas. En los gráficos Q-Q se muestran cercanía entre la simulación y medición, con una mayor disparidad en la capa intermedia. Los R^2 fueron de 0.99 [-] en las tres capas, mientras los valores de *RMS* fueron de 9.33 [mm/s], 14.39 [mm/s] y 8.39 [mm/s], en las capas superficial, intermedia y de fondo, respectivamente. Estos errores fueron menores a sus correspondientes desviaciones estándar de 65.48 [mm/s], 41.23 [mm/s] y 43.12 [mm/s].

La componente V de la velocidad se muestra en la Figura 13-45, donde se puede advertir la similitud en el comportamiento de las series de tiempo, en las tres capas, por sobre todo en la capa superior. Esta similitud concuerda con las gráficas Q-Q, con una notable cercanía entre la simulación y la medición. Los R^2 se encontraron en un valor de 0.99 [-], en las tres capas. El *RMS* encontrado en las capas superior, intermedia y de fondo, fueron iguales a 4.09 [mm/s], 14.75 [mm/s] y 4.98 [mm/s], respectivamente. Estos valores fueron menores a sus correspondientes desviaciones estándar de 55.45 [mm/s], 41.56 [mm/s] y 36.49 [mm/s]. Al encontrarse los indicadores estadísticos dentro de los criterios establecidos en la metodología, se pudo comprobar la relación entre la simulación y las mediciones, permitiendo proseguir al proceso de validación en el punto qnt-1, durante la estación de verano.

La serie de tiempo de la componente U señalada en la Figura 13-46 presenta un comportamiento de las corrientes simuladas semejante a las mediciones, aunque en menor magnitud que en la simulación de calibración. En los gráficos Q-Q se visualizan mayores diferencias en la capa superior, donde se sobrestiman los valores negativos de la componente U (dirección Oeste), mientras, en la capa intermedia ocurre, en menor magnitud, una subestimación de los valores negativos (dirección Oeste), en la misma componente. Los R^2 de las capas superficial e intermedia fueron iguales a 0.99 [-], mientras que, en la capa de fondo fue igual a 0.98 [-]. Los valores de *RMS* fueron iguales a 33.63 [mm/s], 26.95 [mm/s] y 17.73 [mm/s], en las capas superior, intermedia y fondo, respectivamente. Estos valores fueron menores a sus correspondientes desviaciones estándar iguales a 70.33 [mm/s], 42.41 [mm/s] y 52.66 [mm/s].

En la Figura 13-47 se presenta la serie de tiempo de la componente V simulada en el punto qnt-1 durante la estación de verano. En un análisis visual es posible notar la correcta representación de la conducta general medida en las tres capas analizadas y en los gráficos Q-Q se verifican bajas diferencias en las magnitudes. El R^2 es igual a 0.99 [-] en la capa superficial y de fondo, y en la capa intermedia es igual a 0.98 [-]. Los *RMS* obtenidos en la simulación fueron iguales a 12.07 [mm/s], 9.00 [mm/s] y 2.89 [mm/s], en la capa superior, intermedia y fondo, respectivamente. Estos valores fueron menores a sus correspondientes DV, que fueron iguales a 47.53 [mm/s], 46.13 [mm/s] y 34.99 [mm/s], donde se verifica la comprobación de los criterios en el proceso de validación.

Como los indicadores estadísticos permitieron verificar el cumplimiento de los criterios propuestos en la simulación de validación, es posible aseverar la capacidad de representación de la hidrodinámica en la costa de la bahía por parte del modelo bajo la configuración utilizada.

La simulación hidrodinámica fue verificada también en los puntos qnt-2 y qnt-3, en sus correspondientes ventanas temporales, como fueron representadas en la Figura 13-48, Figura 13-49, Figura 13-50 y Figura 13-51. En estas simulaciones se cumplen también los criterios establecidos, comprobando la capacidad de representar la hidrodinámica en la costa de la bahía.

El contraste de datos en el punto qnt-4 tuvo una notoria relevancia a causa de su localización, en la entrada de la bahía. Como se mencionó en la metodología, la dificultad de realizar la simulación en este punto fue la recopilación de datos de vientos, ya que debido a la fecha en que se realizó la medición se debió utilizar una estación meteorológica más alejada.

En la Figura 13-52 se señala la componente U de la velocidad, donde se muestra en la capa superior, cierta similitud en la magnitud de los valores negativos de la componente U, mientras que en las capas intermedias y de fondo, mantiene una cercanía a la media de las mediciones. En las gráficas Q-Q se muestra una debilidad en la representación de los valores negativos de la componente U (dirección Oeste), de la corriente. El R^2 de la capa superficial fue igual a 0.98 [-], mientras que, en las capas intermedia y fondo fueron de 0.99 [-]. Los valores de *RMS* fueron de 55.15 [mm/s], 31.45 [mm/s] y 15.10 [mm/s] en las capas superficial, intermedia y fondo, respectivamente. Estos valores fueron menores a la desviación estándar, correspondientes, de 87.64 [mm/s], 58.43 [mm/s] y 42.64 [mm/s].

En la Figura 13-53 se muestra la componente V de la velocidad. Esta componente muestra una mayor proximidad en el comportamiento de las series de tiempo. Esto se refleja en las gráficas Q-Q, donde se demuestra una buena correspondencia entre la simulación y la medición, con una ligera sobrestimación de los valores positivos de la componente V (dirección Norte), en la capa superior y una sobrestimación de los valores negativos en la componente V (dirección Sur) de las capas intermedias y fondo. El R^2 presentó un valor de 0.99 en las tres capas. El *RMS* fue igual a 26.27 [mm/s], 25.43 [mm/s] y 22.2 [mm/s] en las capas superficial, intermedia y fondo, respectivamente. Estos valores fueron menores a la desviación estándar, correspondientes, de 77.73 [mm/s], 55.49 [mm/s] y 40.89 [mm/s].

Según los resultados mostrados, se ha logrado alcanzar los criterios establecidos para verificar la representación hidrodinámica en el sector de la entrada de la bahía en específico en el punto qnt-4. Es relevante mencionar que las mayores diferencias de magnitud pueden deberse por los datos de vientos proveniente de una localización alejada y al adentramiento hacia el mar del punto qnt-4.

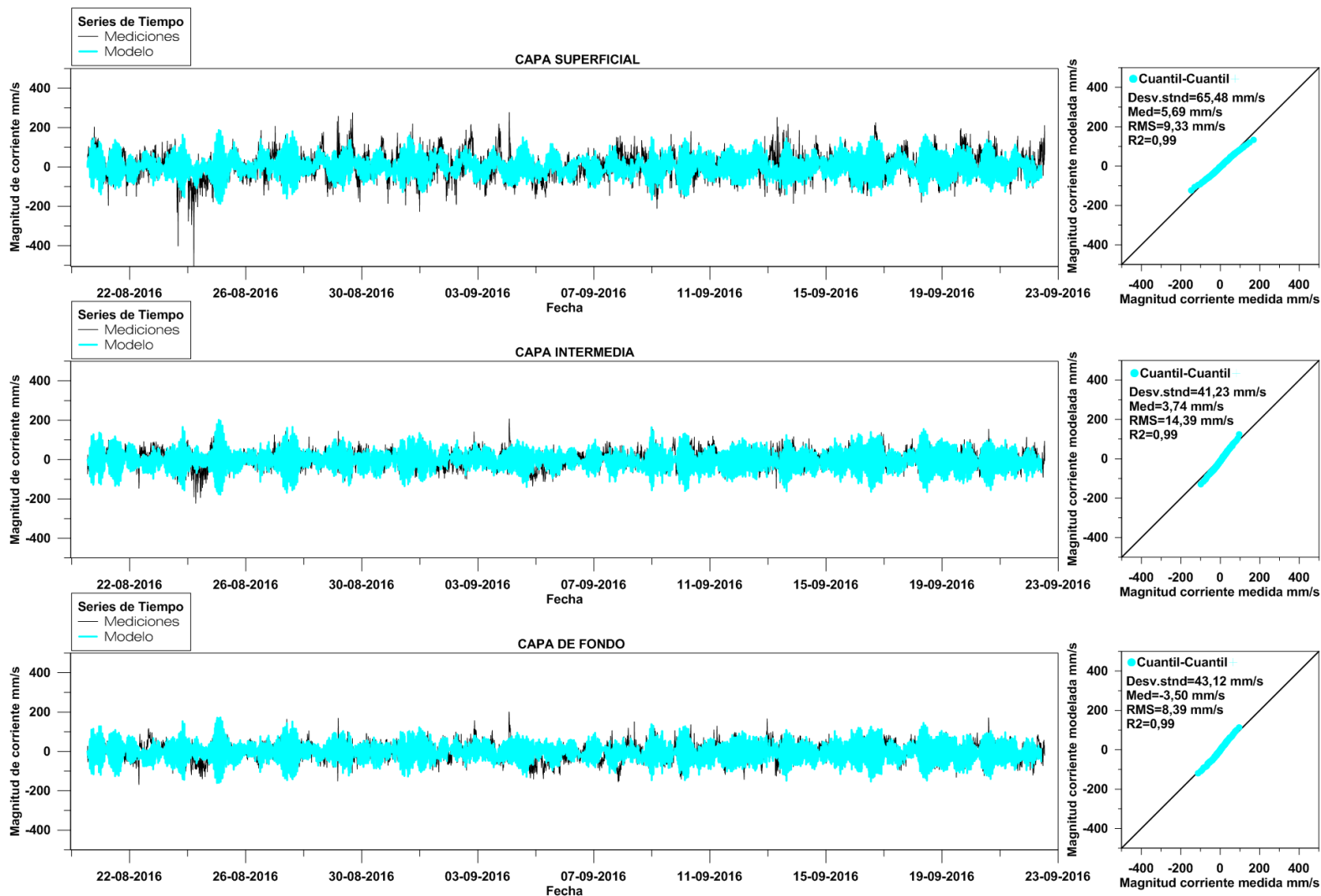


Figura 13-44 Calibración corrientes de la componente U, en el punto qnt-1, estación de invierno.

Fuente: Elaboración propia.

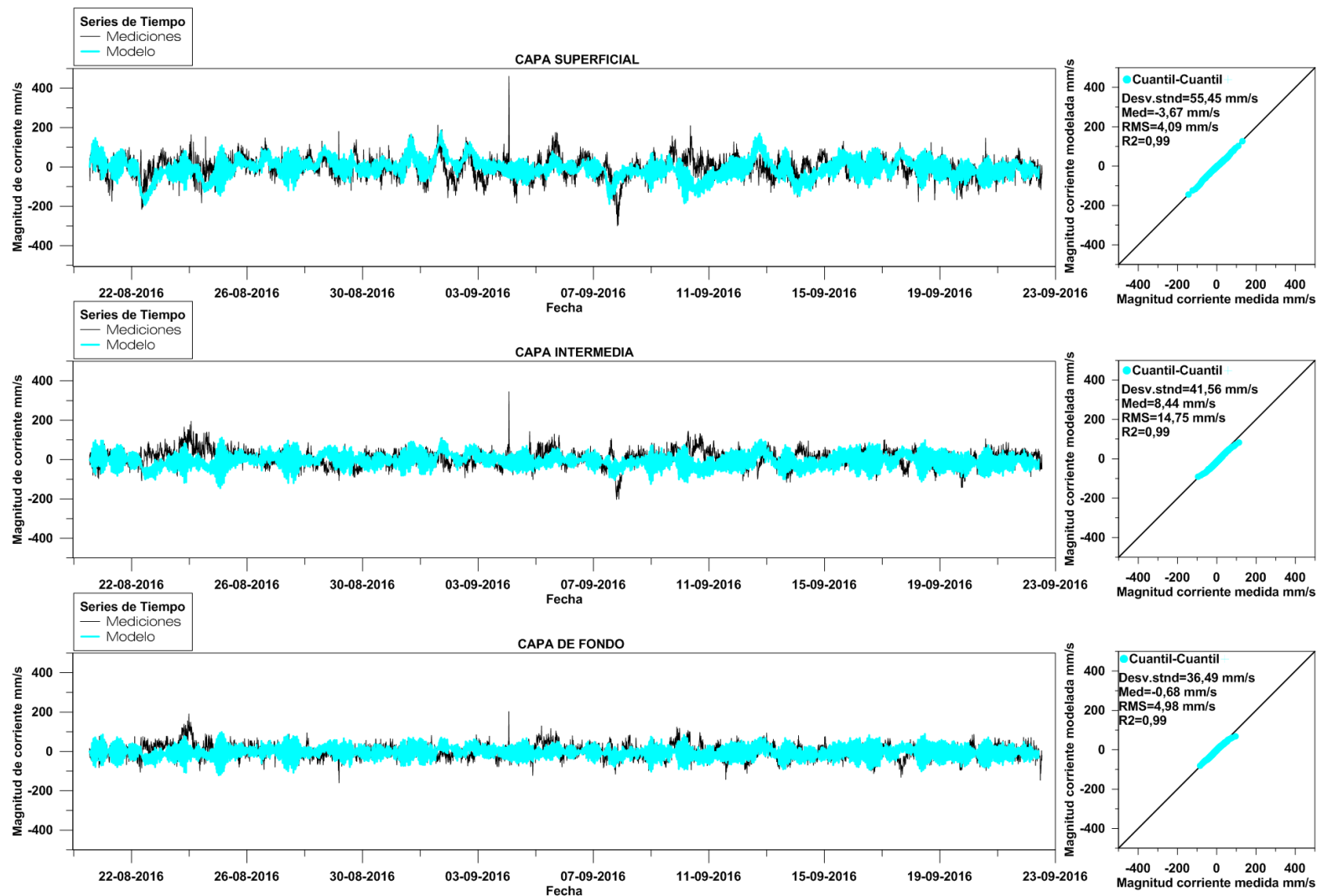


Figura 13-45 Calibración corrientes de la componente V en el punto qnt-1, estación de invierno.

Fuente: Elaboración propia.

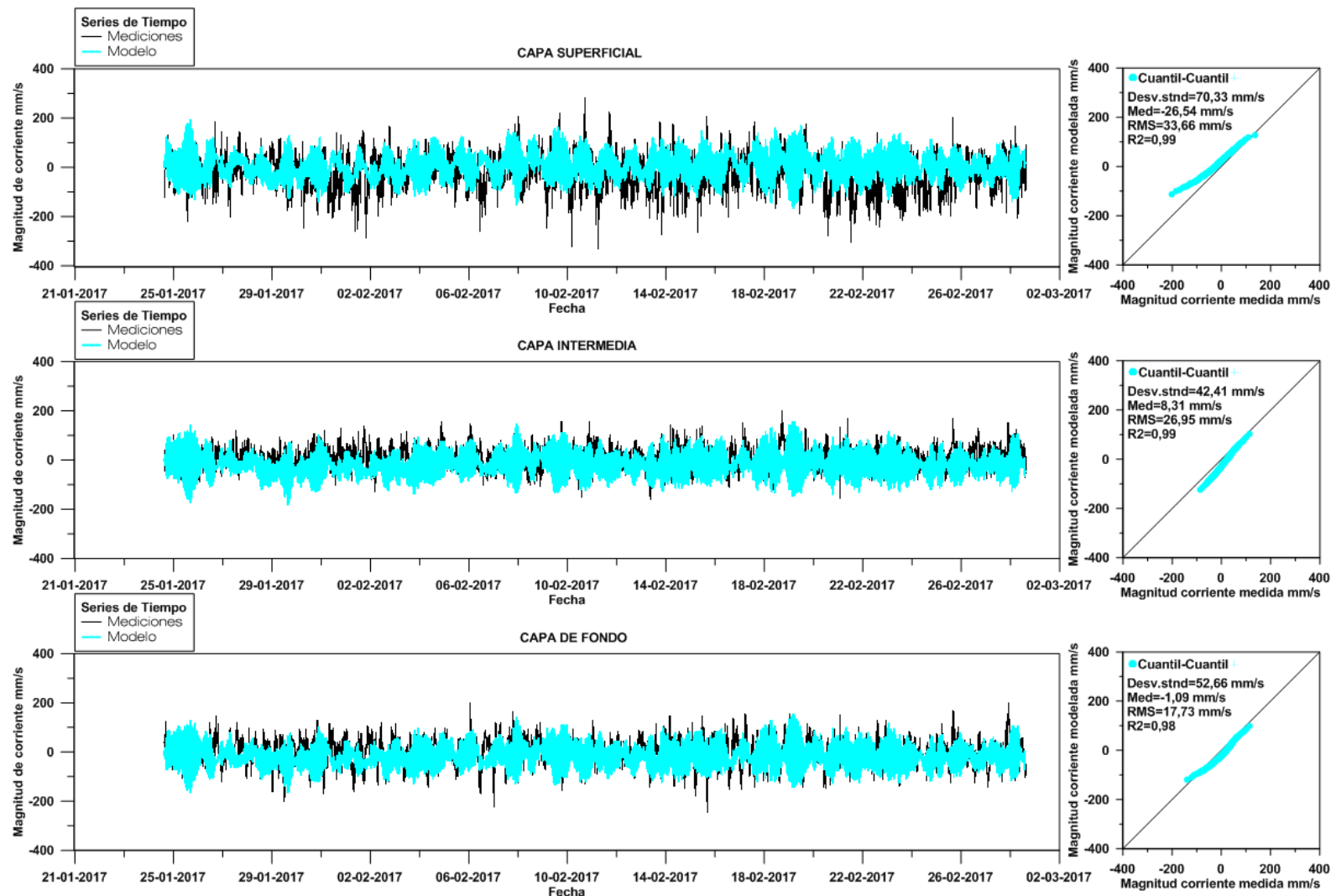


Figura 13-46 Validación de corrientes de la componente U, en el punto qnt-1, estación de verano.

Fuente: Elaboración propia.

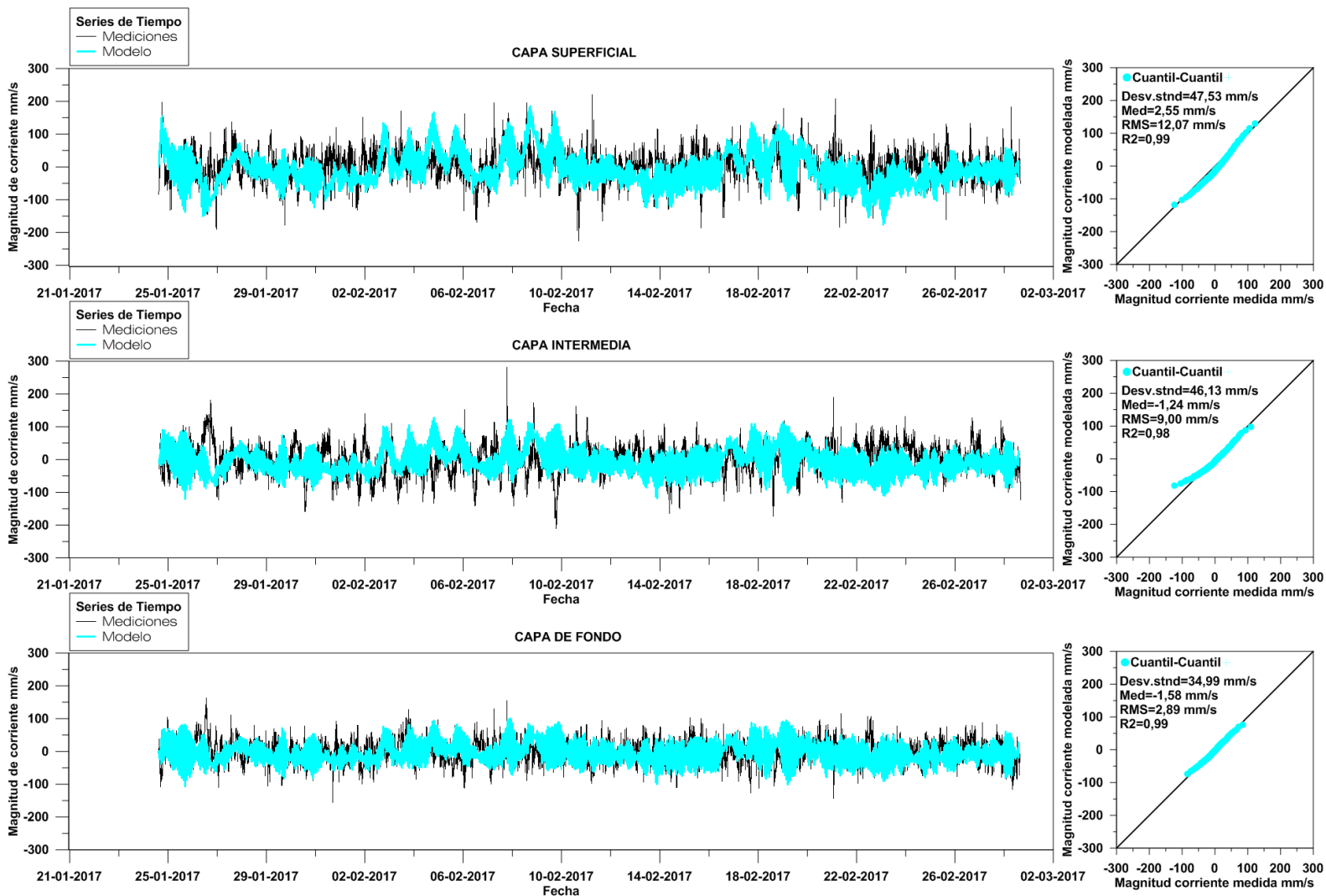


Figura 13-47 Validación de corrientes de la componente V, en el punto qnt-1, estación de verano.

Fuente: Elaboración propia.

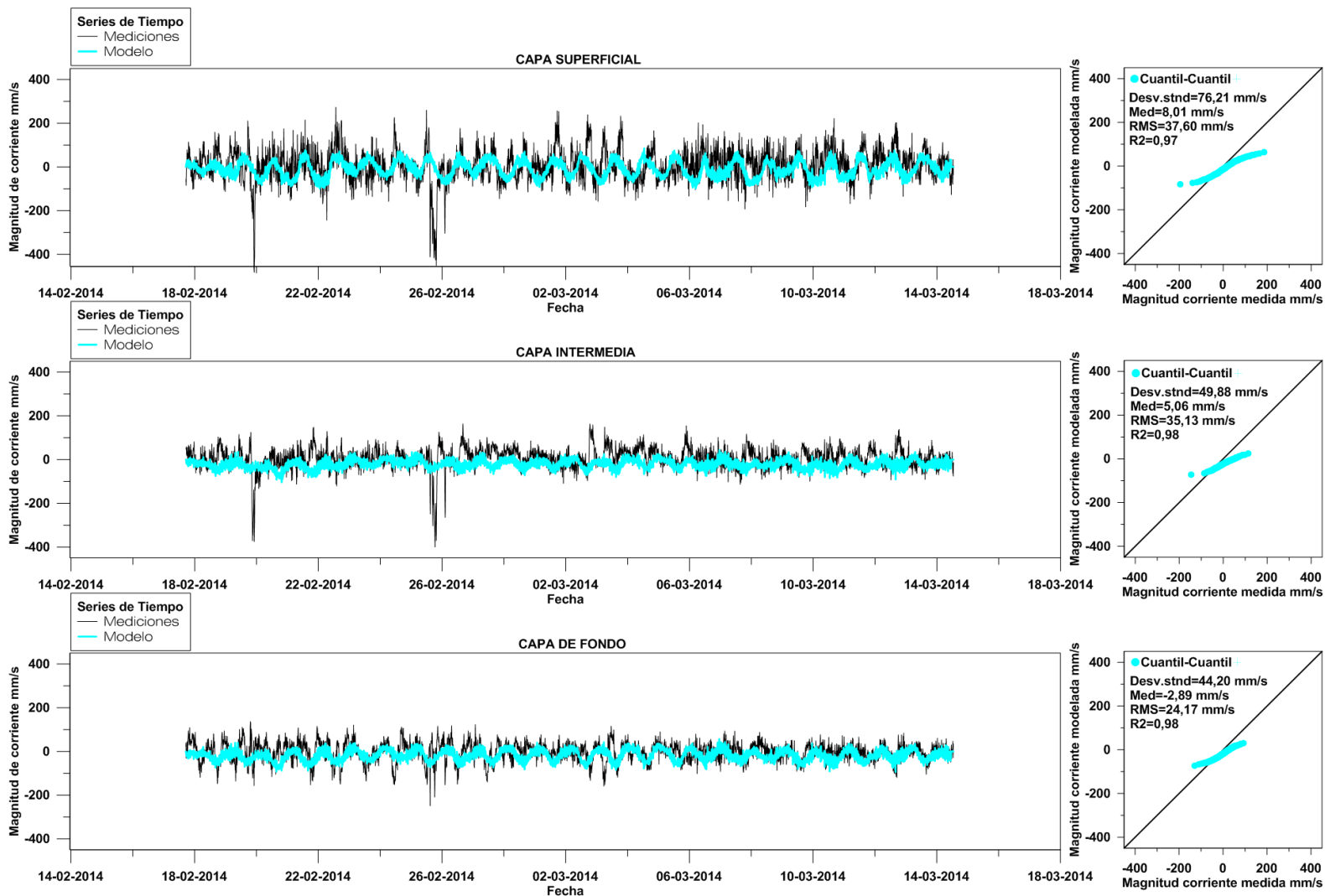


Figura 13-48 Validación corrientes de la componente U, en el punto qnt-2.

Fuente: Elaboración propia.

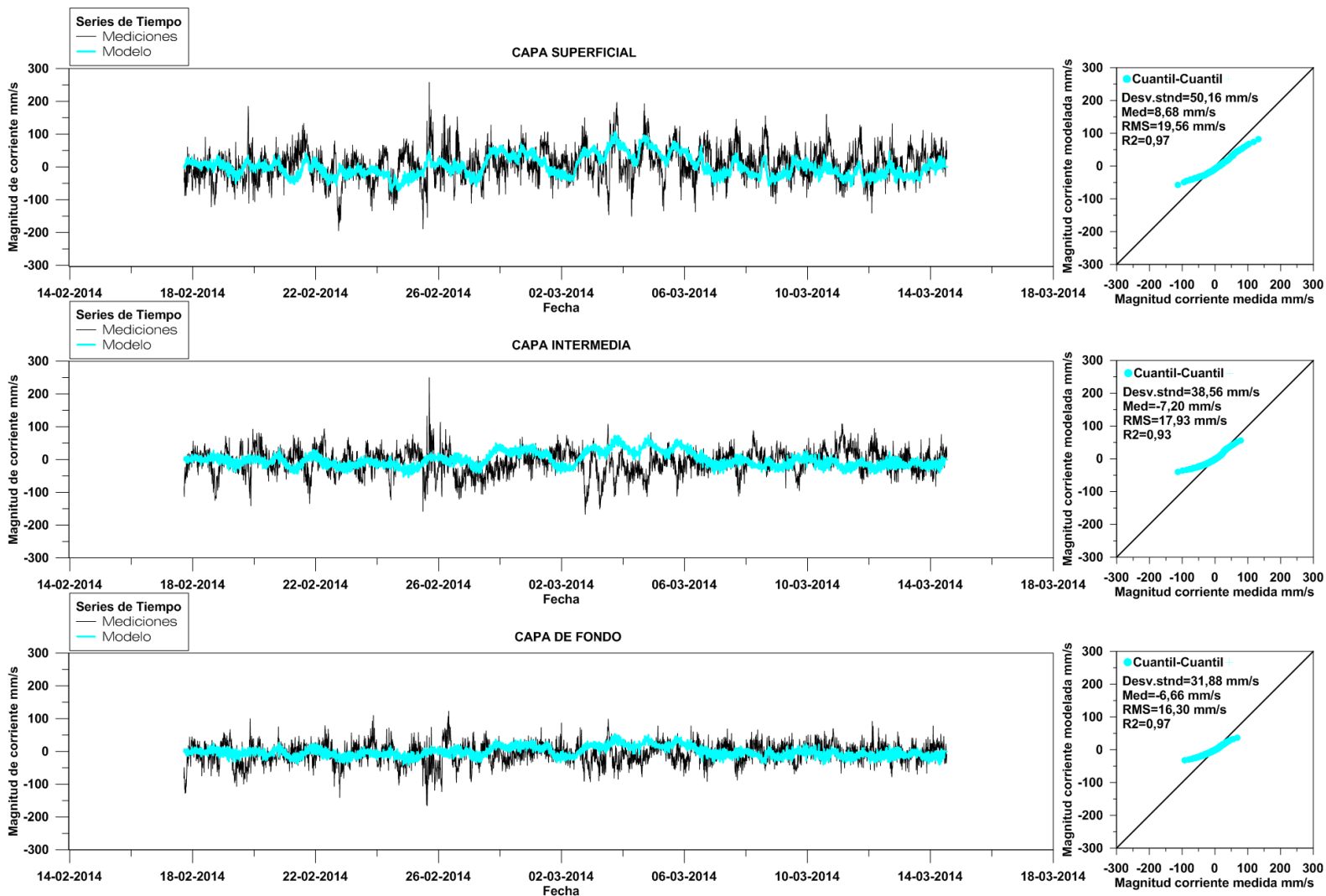


Figura 13-49 Validación corrientes de la componente V, en el punto qnt-2.

Fuente: Elaboración propia.

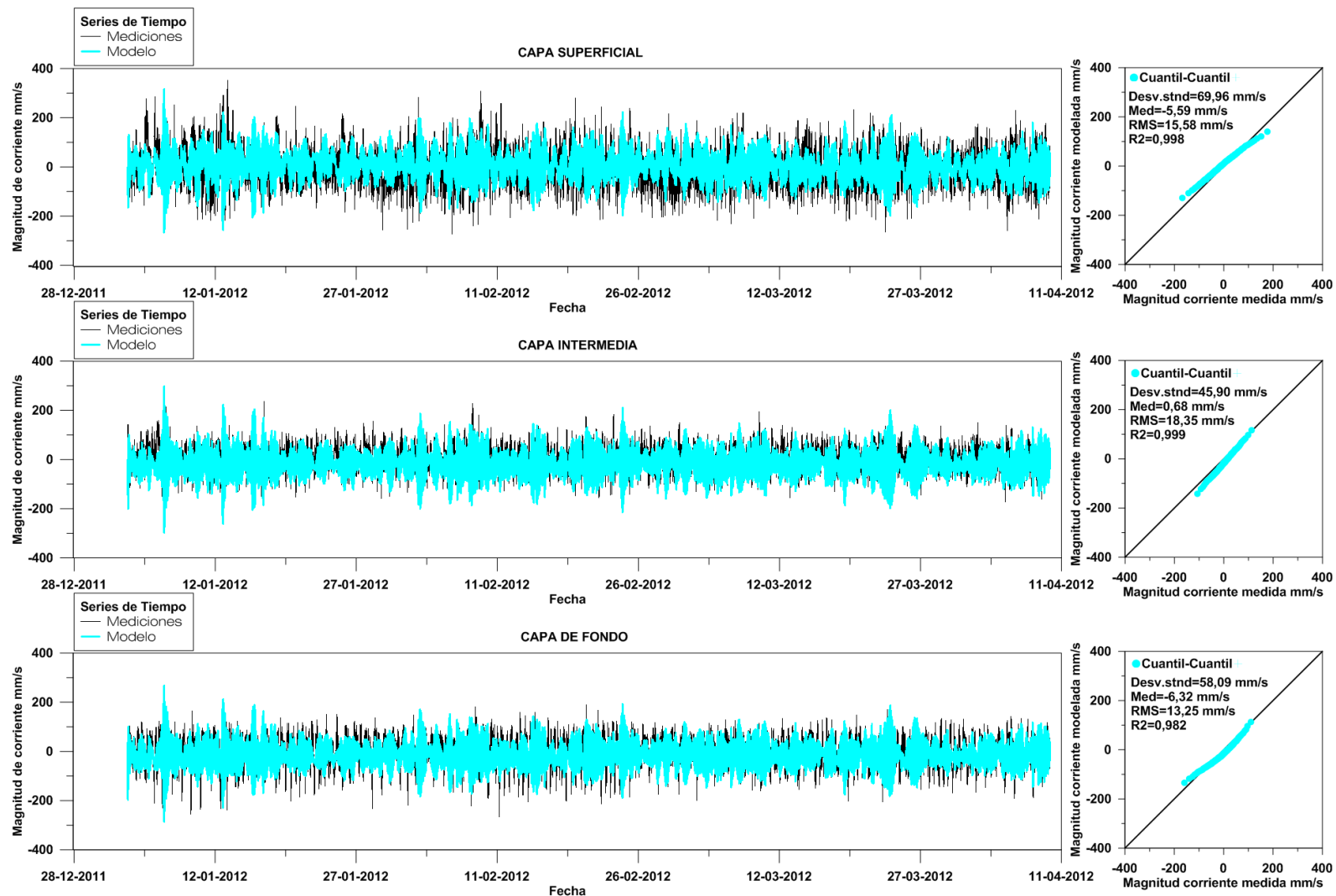


Figura 13-50 Validación corrientes de la componente U, punto qnt-3.

Fuente: Elaboración propia.

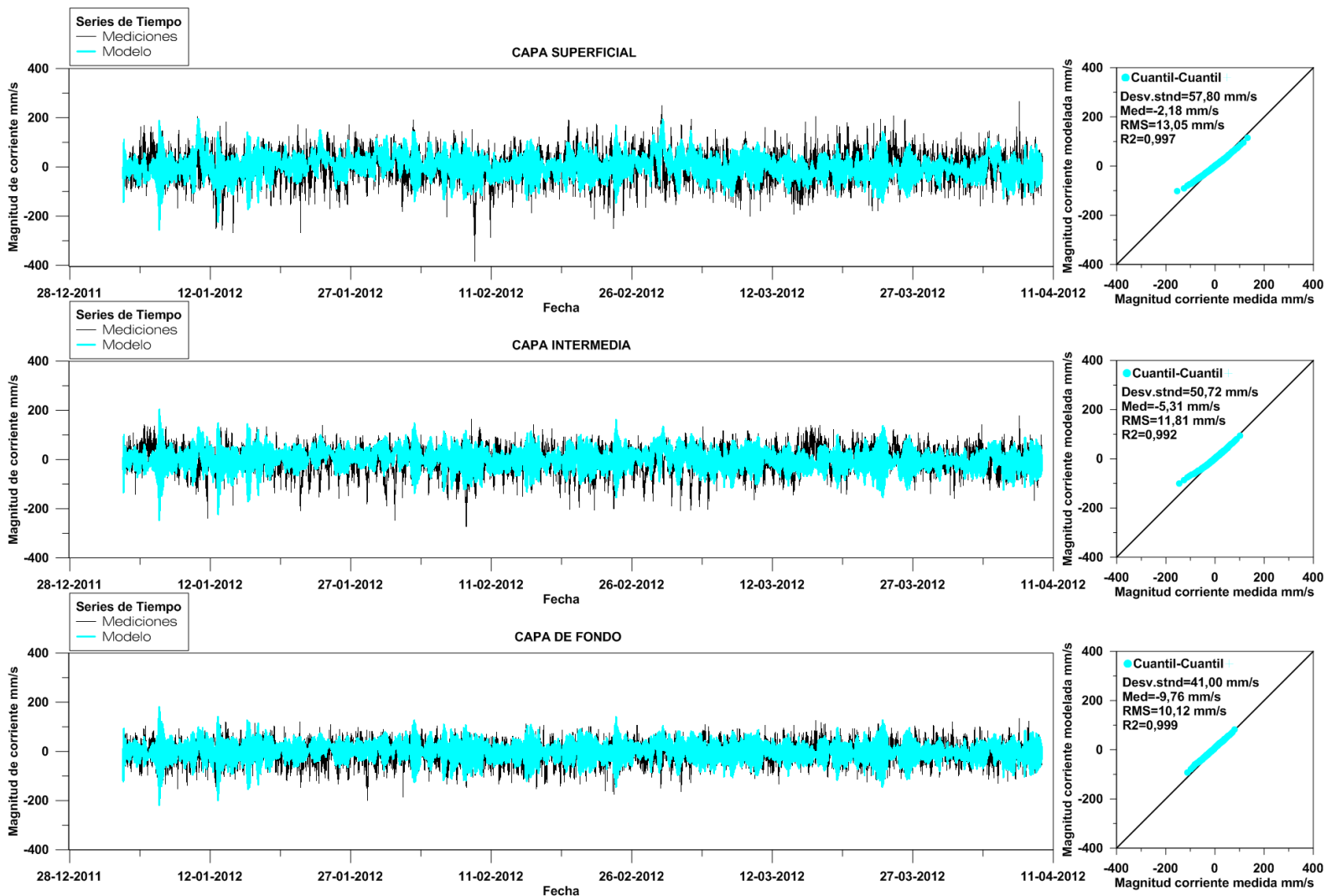


Figura 13-51 Validación corrientes de la componente V, en el punto qnt-3.

Fuente: Elaboración propia.

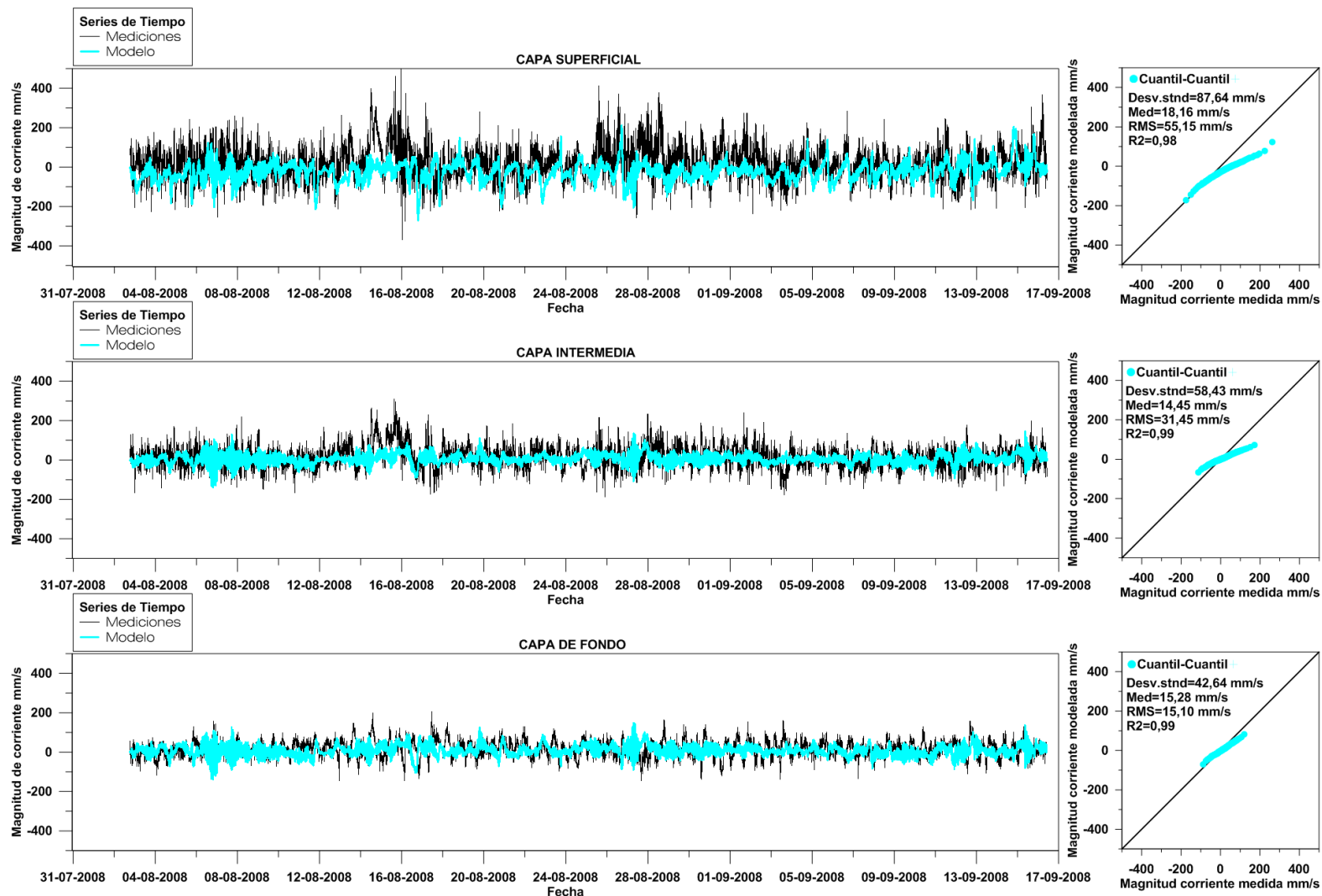


Figura 13-52 Validación corrientes de la componente U, punto qnt-4.

Fuente: Elaboración propia.

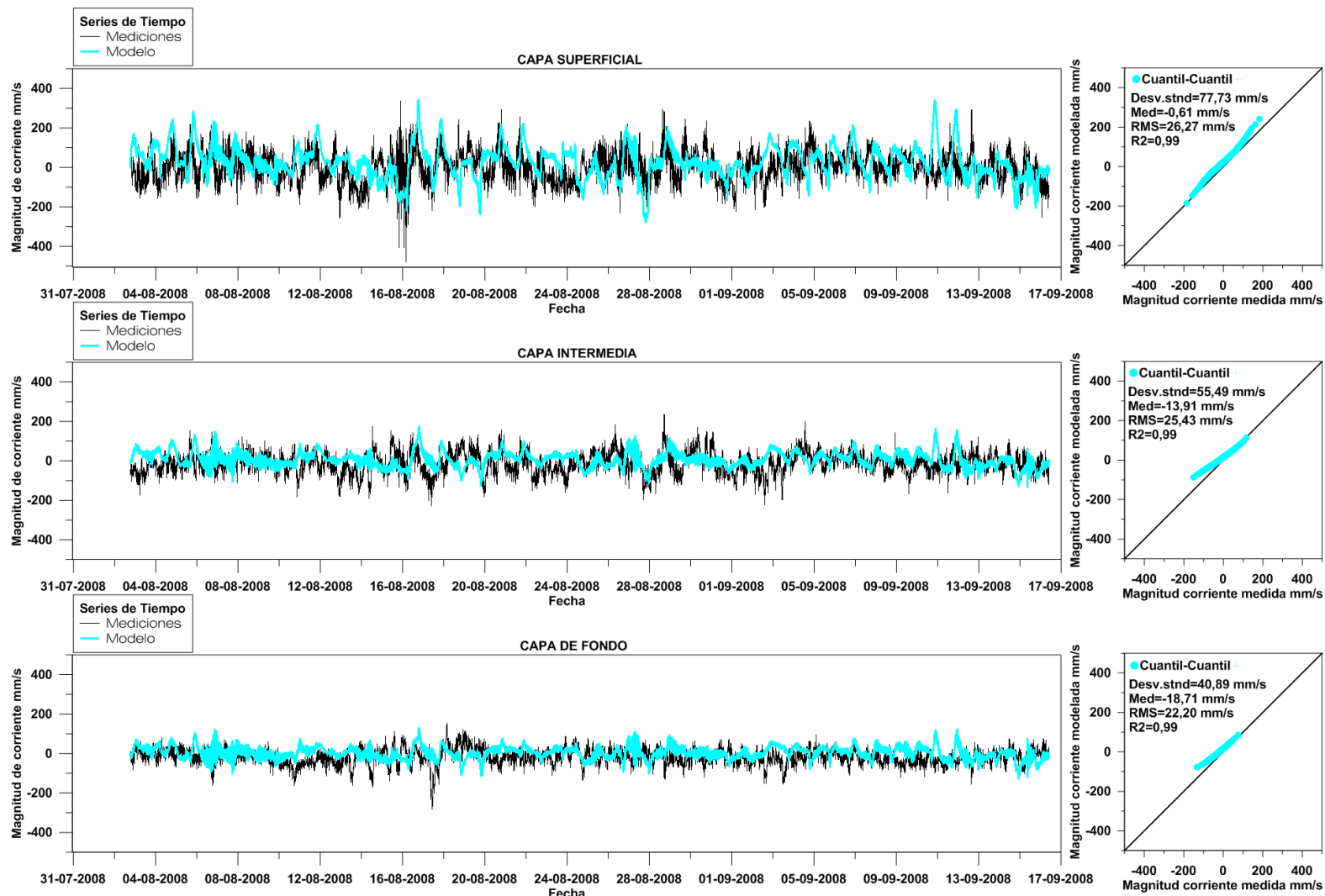


Figura 13-53 Validación corrientes de la componente V, en el punto qnt-4.

Fuente: Elaboración propia.

13.5.4 TEMPERATURA Y SALINIDAD

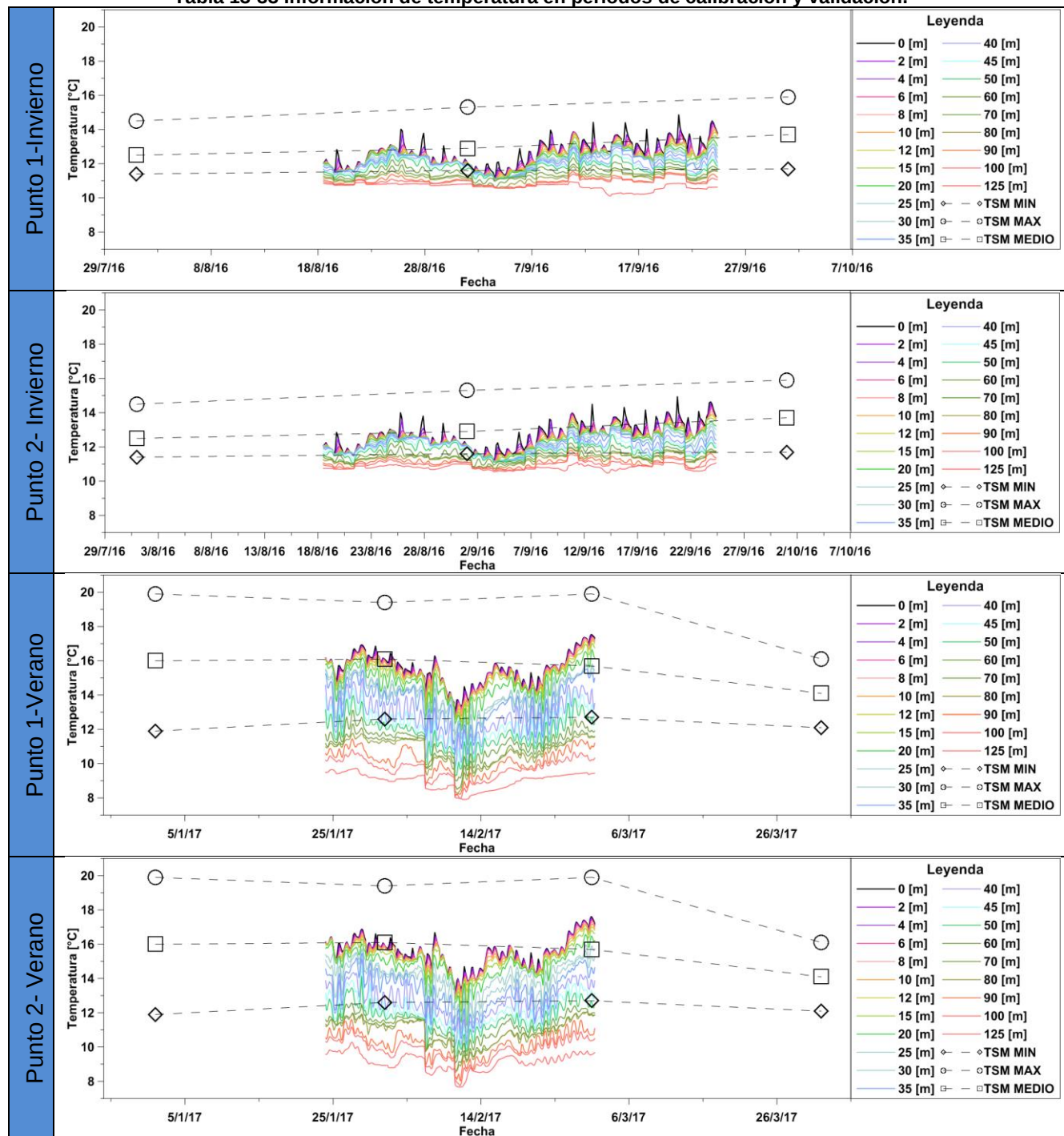
Los procesos de calibración y validación sobre las variables de temperatura y salinidad del mar consistieron en contrastar la información medida con los instrumentos ADCP, en el fondo marino, y CTD, a través de la columna de agua, con las simulaciones hidrodinámicas cuyas variables de temperatura y salinidad dependieron principalmente de las forzantes construidas con los datos extraídos desde el modelo HYCOM.

En la Tabla 13-33 y Tabla 13-34 se representaron las forzantes de las variables temperatura y salinidad del mar, respectivamente, para los procesos de calibración (invierno) y validación (verano), tras efectuarse los ajustes en las forzantes mencionadas en la Tabla 8-4. Junto a los datos de temperatura extraídos se presentaron los datos de TSM máxima, media y mínima, medidos en la región de Valparaíso correspondiente a los meses simulados, con la finalidad de corroborar los datos de temperatura del mar superficial.

En la Tabla 13-33 esquematiza la estación de invierno, la forzante para la simulación de calibración presenta temperaturas cercano a los 11 [°C] en el fondo y entre los 12 y 14 [°C] en superficie, encontrándose entre el valor medio de TSM hacia el valor mínimo en el mes. En la estación de verano, la forzante para la simulación de validación describe una estratificación de la temperatura del mar, en el fondo se muestran valores desde los 8 a 10 [°C], mientras que, en la superficie se tienen temperaturas entre los 14 a 18 [°C], encontrándose entre las magnitudes de TSM medias y mínimas. Las mediciones de TSM permitieron dar indicios que la temperatura superficial simulada por el modelo HYCOM se encuentra dentro de los rangos medidos.

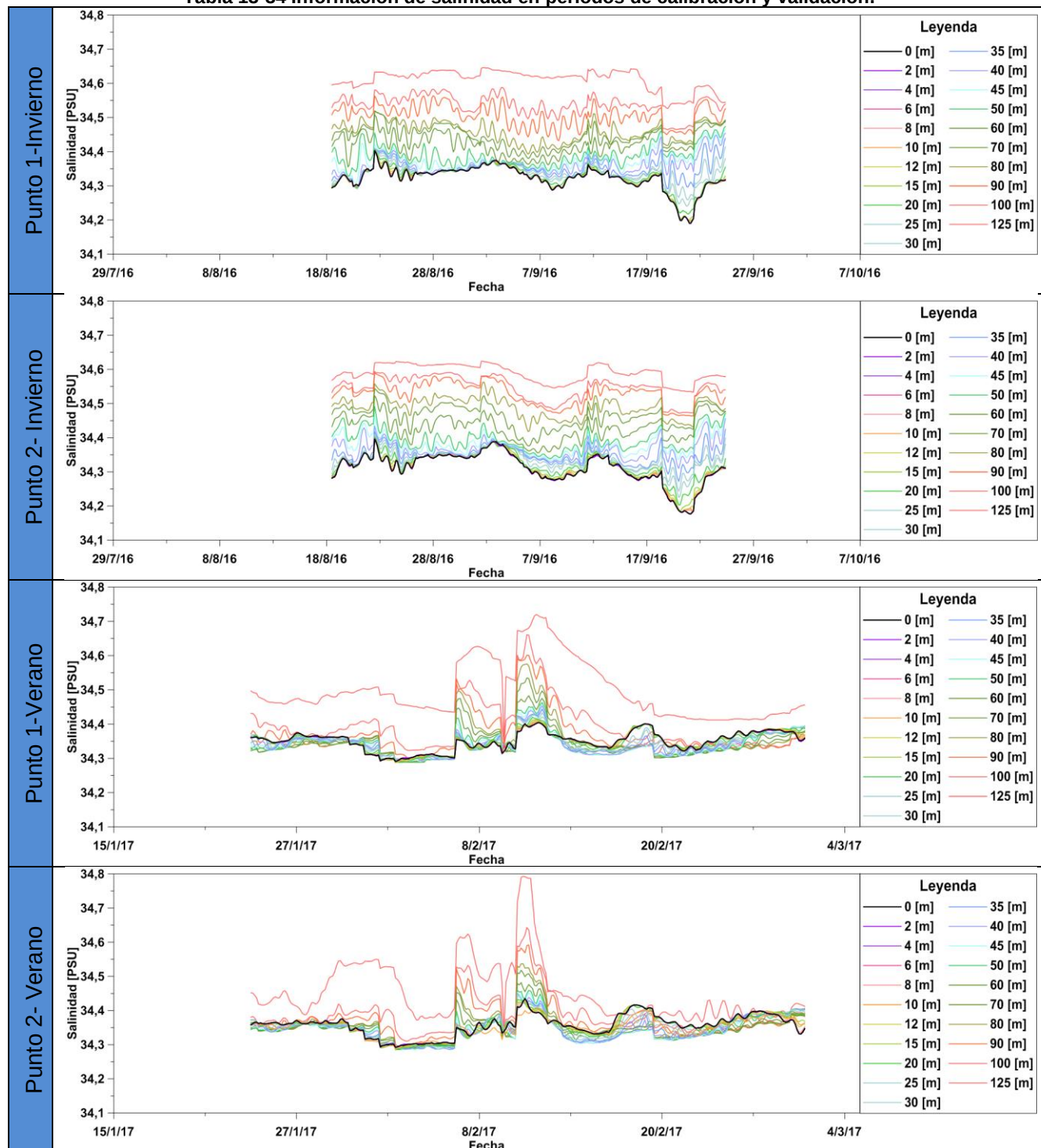
En la Tabla 13-34 fueron presentadas las salinidades de las forzantes para las simulaciones de calibración y validación. La forzante para la calibración, en la estación de invierno, registró valores entre 34.2 y 34.3 [PSU] en la superficie y, en contraste, en el fondo predominó el valor de 34.6 [PSU]. La forzante para la validación, durante la estación de verano, presentó salinidades entre los 34.3 a 34.4 [PSU], en la superficie, y una magnitud entre los 34.5 y 34.7 [PSU] en el fondo.

Tabla 13-33 Información de temperatura en periodos de calibración y validación.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13-34 Información de salinidad en periodos de calibración y validación.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13-54 se muestran los resultados del proceso de calibración mediante el contraste de datos en el punto qnt-1, en el fondo marino, durante la estación de invierno. En este proceso se muestra una cercanía entre los valores, aunque no se representa su conducta totalmente. El R^2 resultante fue de 0.94 [-] y el RMS es igual a 0.11 [°C], menor a la desviación estándar de los datos medidos, de 0.28 [°C], cumpliendo los criterios establecidos.

La validación fue contrastada con los datos medidos en el punto qnt-1, en el fondo marino, durante la estación de verano. A pesar que estas mediciones mostraron una mayor dispersión, la simulación logró representar los valores medios, manteniendo la conducta, lo anterior se verifica en la gráfica Q-Q, donde se representa una subestimación del modelo en los valores extremos. El R^2 es igual a 0.9 [-], mientras que, el RMS es igual a 0.29 [°C], menor a la desviación estándar con un valor de 0.82 [°C].

El cumplimiento de los criterios en ambos procesos permite verificar la representación de la temperatura en el fondo de la bahía en las cercanías de la costa.

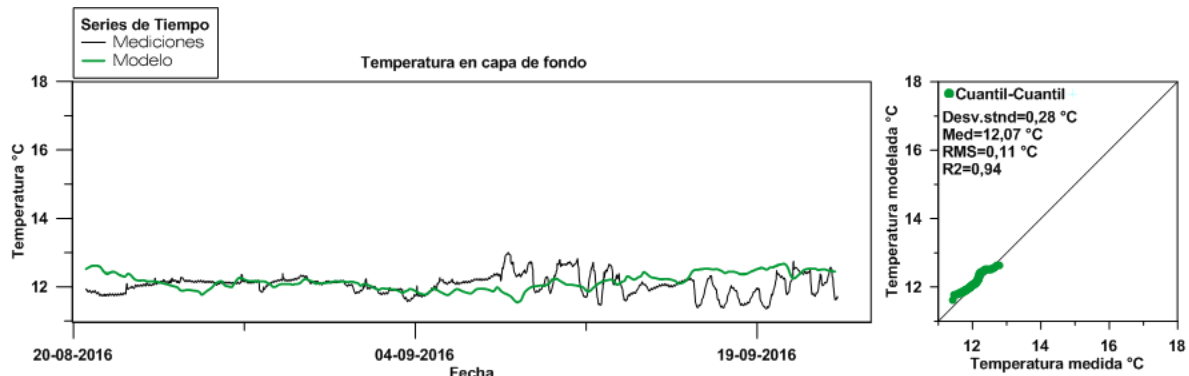


Figura 13-54 Calibración de temperatura en punto qnt-1_inv.

Fuente: Elaboración propia.

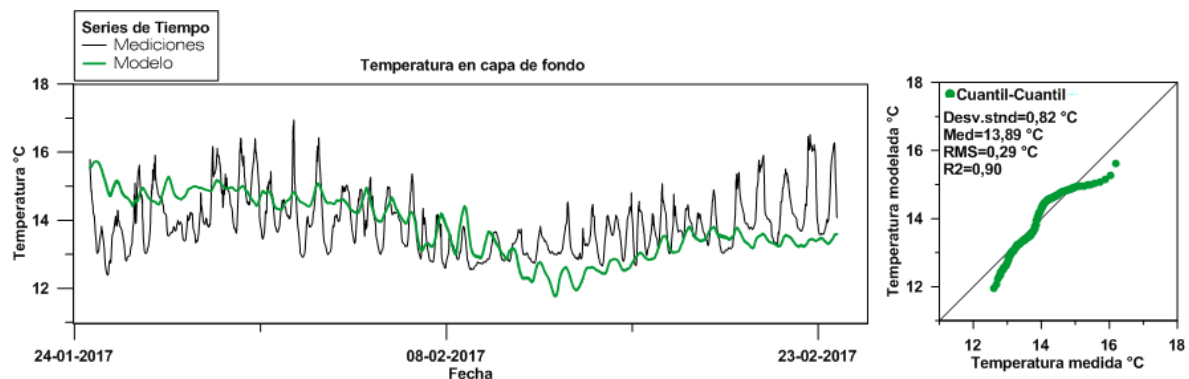


Figura 13-55 Validación de temperatura en punto qnt-1_ver.

Fuente: Elaboración propia.

Los procesos de calibración y validación mediante el contraste de datos medidos por CTD en los puntos señalados en la Figura 6-4 fueron mostrados desde la Figura 13-56 hasta la Figura 13-63. La información desde el CTD fue representada mediante una línea negra, mientras que la variabilidad de los valores simulado fue representada con una superficie gris y su valor medio con una línea roja.

La calibración del parámetro temperatura con los datos CTD se muestra en la Figura 13-56 y Figura 13-57. La variación simulada, en los puntos de muestreo, se encuentra entre los 11 a 18 [°C], en contraste, las mediciones de CTD se encuentran entre los 12 a 14 [°C]. En la mayoría de los puntos, se muestran los datos de CTD, dentro de la variabilidad simulada, en general, debajo de la media, aunque en los puntos E-5, E-6, E-9, E-10 y E-11, en las capas cercanas al fondo se encontraron temperaturas medidas bajo la variabilidad modelada. Se debe mencionar que, los puntos mencionados son los más norteños y con mayor cercanía a la zona donde se acumulan las descargas de termoeléctricas y, por tanto, esta sobrestimación simulada puede deberse al desconocimiento de las características del efluente en el tiempo.

En la simulación de la calibración, la media simulada de los puntos de control se encontró cercana a las correspondientes mediciones del CTD.

La validación del parámetro temperatura, con respecto a los datos medidos con CTD, durante la estación de verano fue mostrada en la Figura 13-58 y Figura 13-59. Las variaciones de temperatura simulada se encuentran entre los 14 a 21 [°C], en contraste, las mediciones por CTD variaron entre los 14 a 18.5 [°C]. En estas simulaciones las mediciones por CTD, en general, se encontró sobre la temperatura media modelada, pero dentro del rango simulado. El punto CS, fue la única medición de CTD fuera del rango simulado, presentando temperaturas ligeramente superiores a la variación simulada. En contraste, el punto CN se mantiene en la cercanía de la media simulada.

La calibración de la salinidad del agua, en la estación de invierno, fue mostrada en la Figura 13-60 y Figura 13-61. La variabilidad de la salinidad simulada se encuentra entre 34.3 a 34.7 [PSU], a diferencia de las mediciones por CTD con valores entre 34.55 y 34.85 [PSU]. La gran parte de los puntos analizados muestran las mediciones de salinidad por CTD, dentro del rango simulado, con una tendencia a los valores medios de simulación. En los puntos E-7, E-8, E-9 y E-10, las mediciones de salinidad superficial salen del rango simulado, aunque la medición muestra una pendiente marcada en las primeras capas. Los puntos de control se encuentran dentro de la variación simulada.

La validación del parámetro salinidad, durante la estación de verano, se muestra en la Figura 13-62 y Figura 13-63. La simulación disminuye la variación de salinidad, en comparación con la calibración, con valores de salinidad entre los 34.3 a 34.4 [PSU], en contraste, las mediciones por CTD registraron valores entre 34.4 a 34.6 [PSU]. Las mediciones de CTD fueron complejas de utilizar al presentarse un ruido instrumental, que muestra una pendiente abrupta. En general las mediciones por CTD se encuentran por sobre la media simulada, aunque, en gran parte del perfil, se encuentran dentro del rango simulado. En los puntos de control, CN y CS, se muestran comportamientos semejantes con mediciones sobre la media simulada.

Como fue mencionado en la metodología, las mediciones con CTD no son la información ideal para los procesos de calibración y validación, debido a su carácter instantáneo. A pesar de lo anterior, se muestra una buena concordancia en las variables temperatura y salinidad entre las simulaciones y mediciones. Las mayores diferencias se presentaron en la variable de temperatura durante el proceso calibración, donde ocurre una sobrestimación en los puntos más cercanos a las termoeléctricas. Como esta situación no persiste durante la simulación de la validación, permite suponer que la problemática ocurre por la variabilidad en el caudal o temperatura del efluente, el cual, para las simulaciones, fue considerado constante a partir del valor medio de los datos recopilados.

Se debe mencionar que, junto a la dificultad de definir un correcto valor temporal de las características de los efluentes, en este estudio las variables temperatura y salinidad fueron

complejas de simular, debido al uso de resultados de una simulación con una amplia discretización como forzante del modelo (modelo HYCOM) y, además, las forzantes meteorológicas que determinan el intercambio de calor con la atmósfera fueron obtenidas desde una estación meteorológica en tierra considerándose constante en el dominio. A pesar de lo anterior, se logró cumplir los criterios propuesto en la evaluación de los resultados y se permite la utilización para los datos para la simulación del caso medio.

Con el fin de visualizar la distribución de las variables temperatura y salinidad del mar en el dominio durante las simulaciones de calibración y validación se confeccionó la Figura 13-64, la cual señala las variables promediadas en el tiempo simulado en la capa superficial, intermedia y fondo, además de un promedio a través de la columna de agua.

La distribución de la variable temperatura del agua evidencia mayores valores al interior de la bahía y en las capas superficiales. En las afueras de la bahía en la simulación de calibración se produjeron temperaturas desde los 9.5 [°C] hasta los 12 [°C], y en el norte de la bahía se presentó la mayor temperatura de 17 [°C]. En la simulación de validación se presentó temperaturas en las afueras de la bahía entre los 12 a 16 [°C], mientras que en el norte de la bahía se presentaron hasta 19.5 [°C].

Para la variable salinidad del mar, se presentaron mayores valores en los sectores más profundos del dominio, con un aumento en las capas más profundas. En la simulación de calibración se presentaron valores entre los 34.3 a los 34.7 [PSU] al interior del dominio. En la simulación de validación se mostraron salinidades desde los 34.35 hasta 34.48 [PSU]. A diferencia de la variable temperatura no se presentan elevadas magnitudes al interior de la bahía, aunque en la capa de fondo se evidencian pequeños puntos con bajo valores de salinidad, que pueden deberse a las descargas con 0 [PSU].

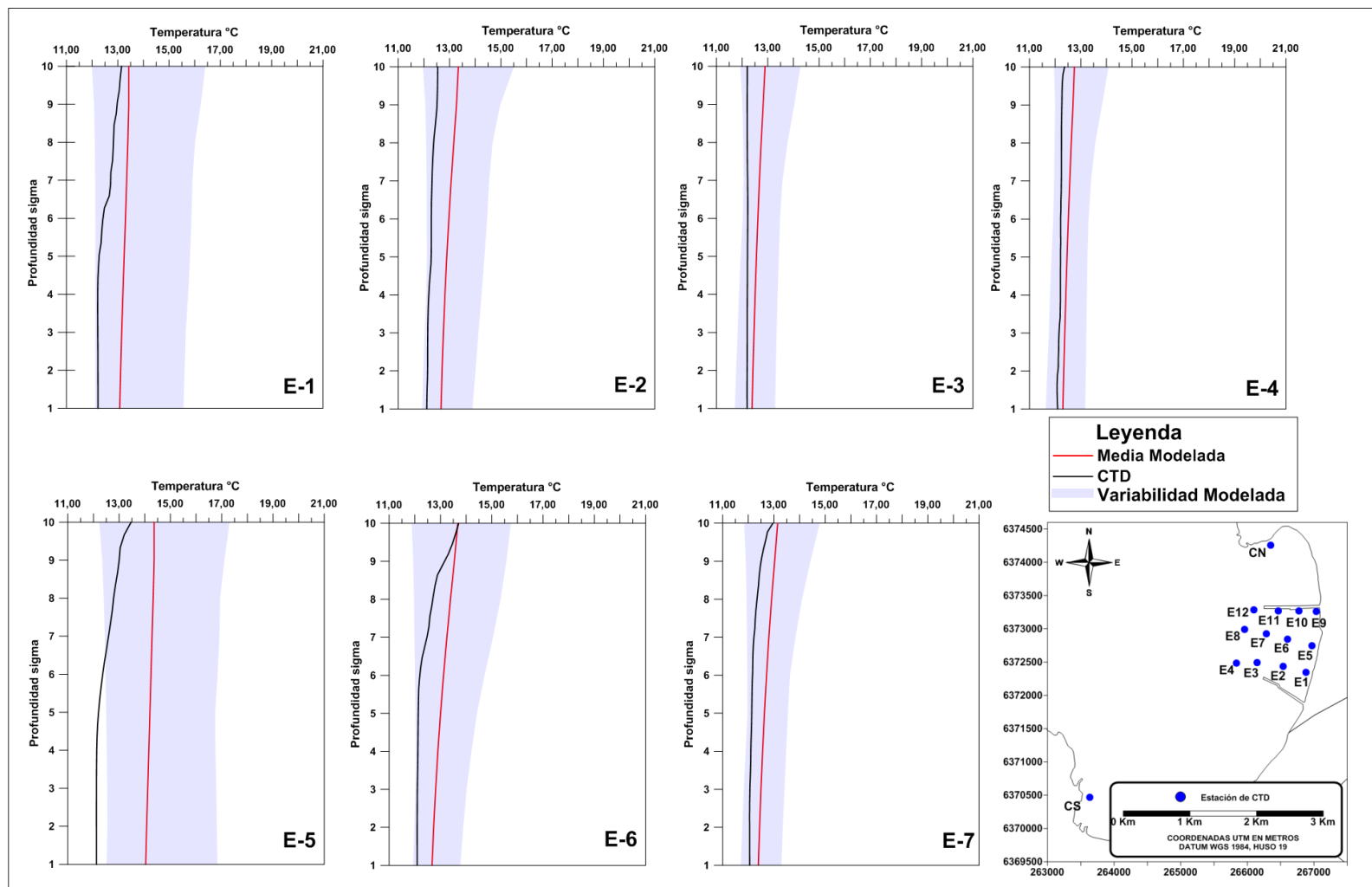


Figura 13-56 Calibración de temperatura por CTD puntos E-1 a E-7.

Fuente: Elaboración propia.

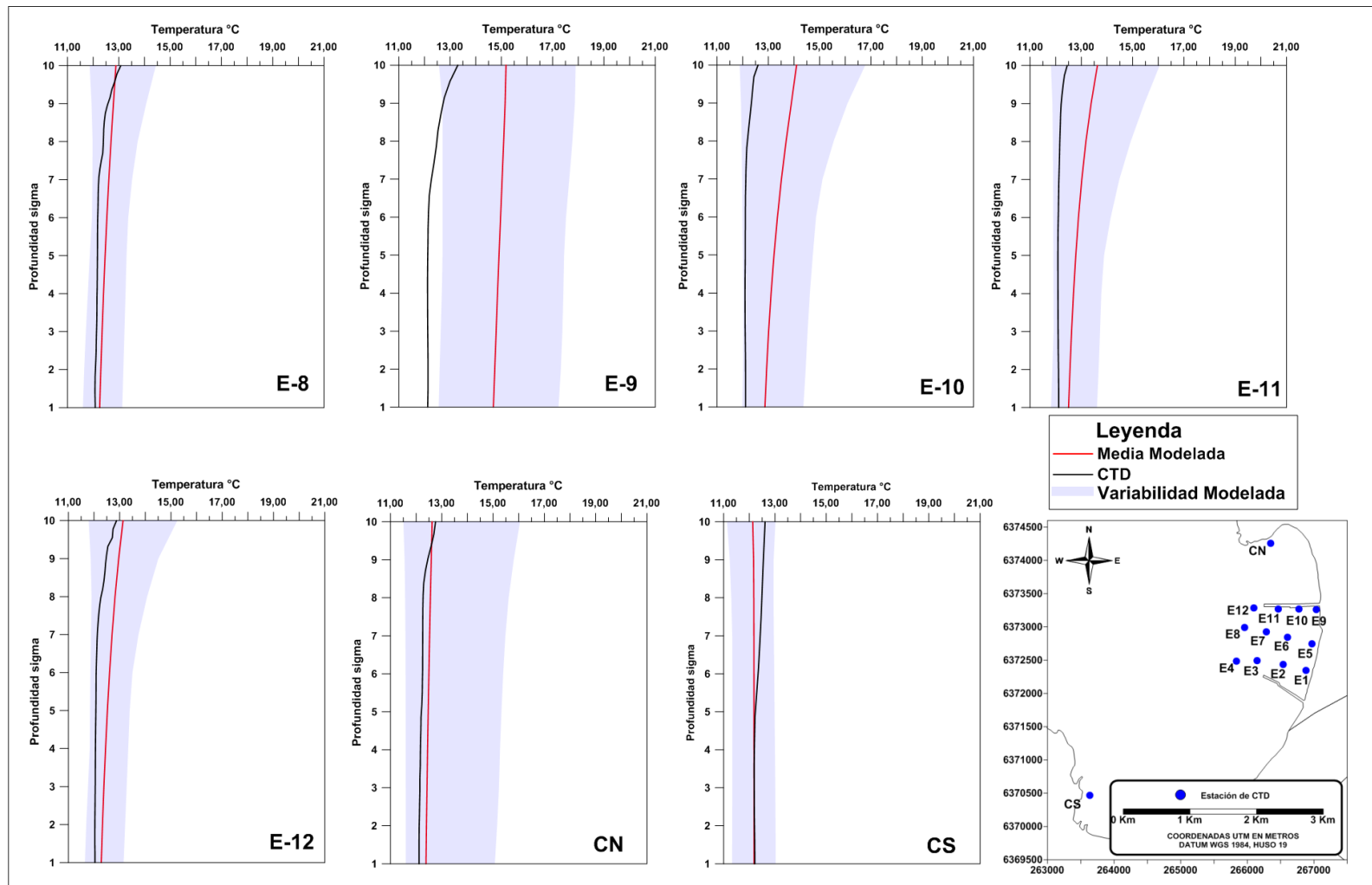
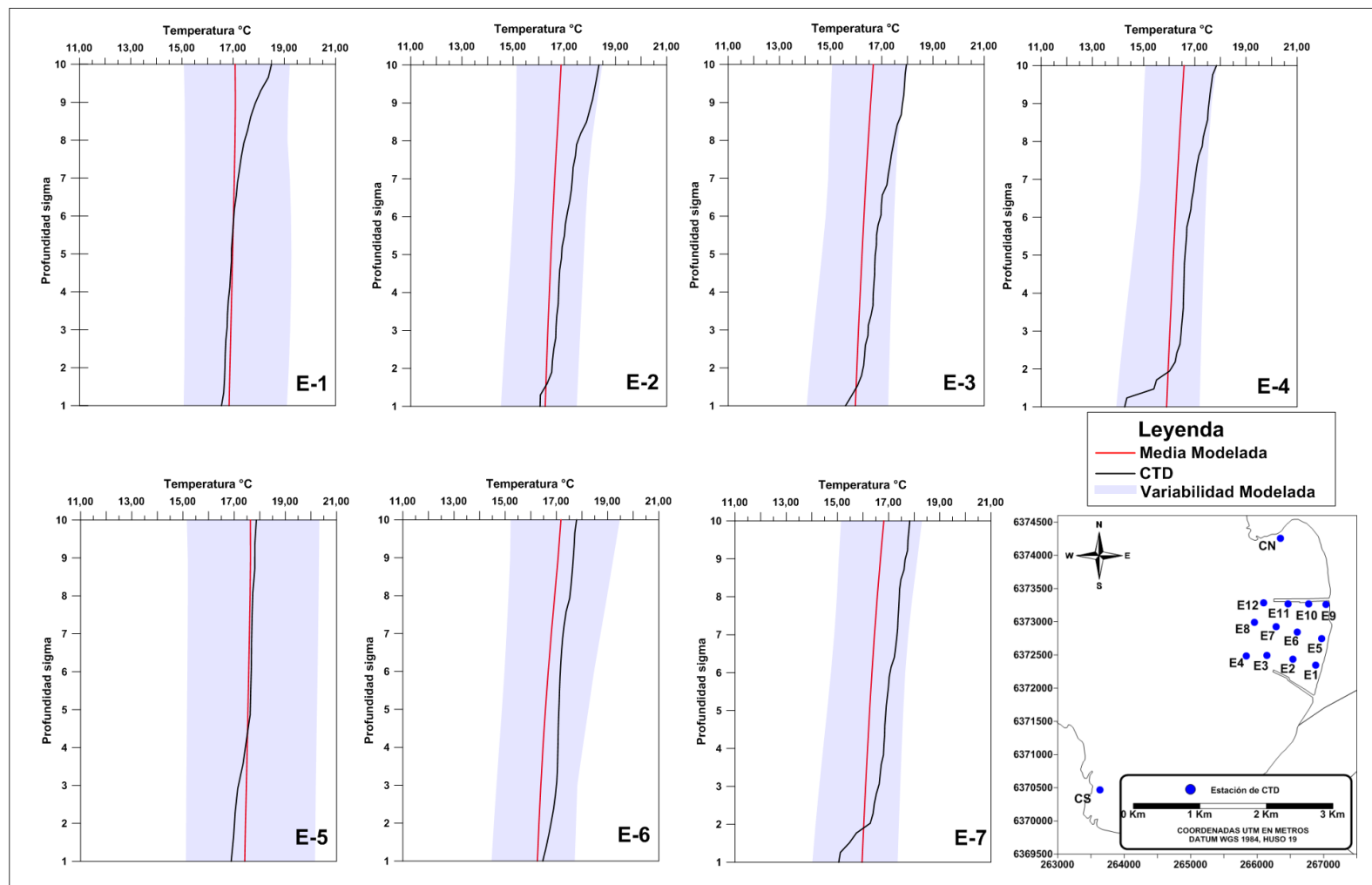


Figura 13-57 Calibración de temperatura por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.
Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

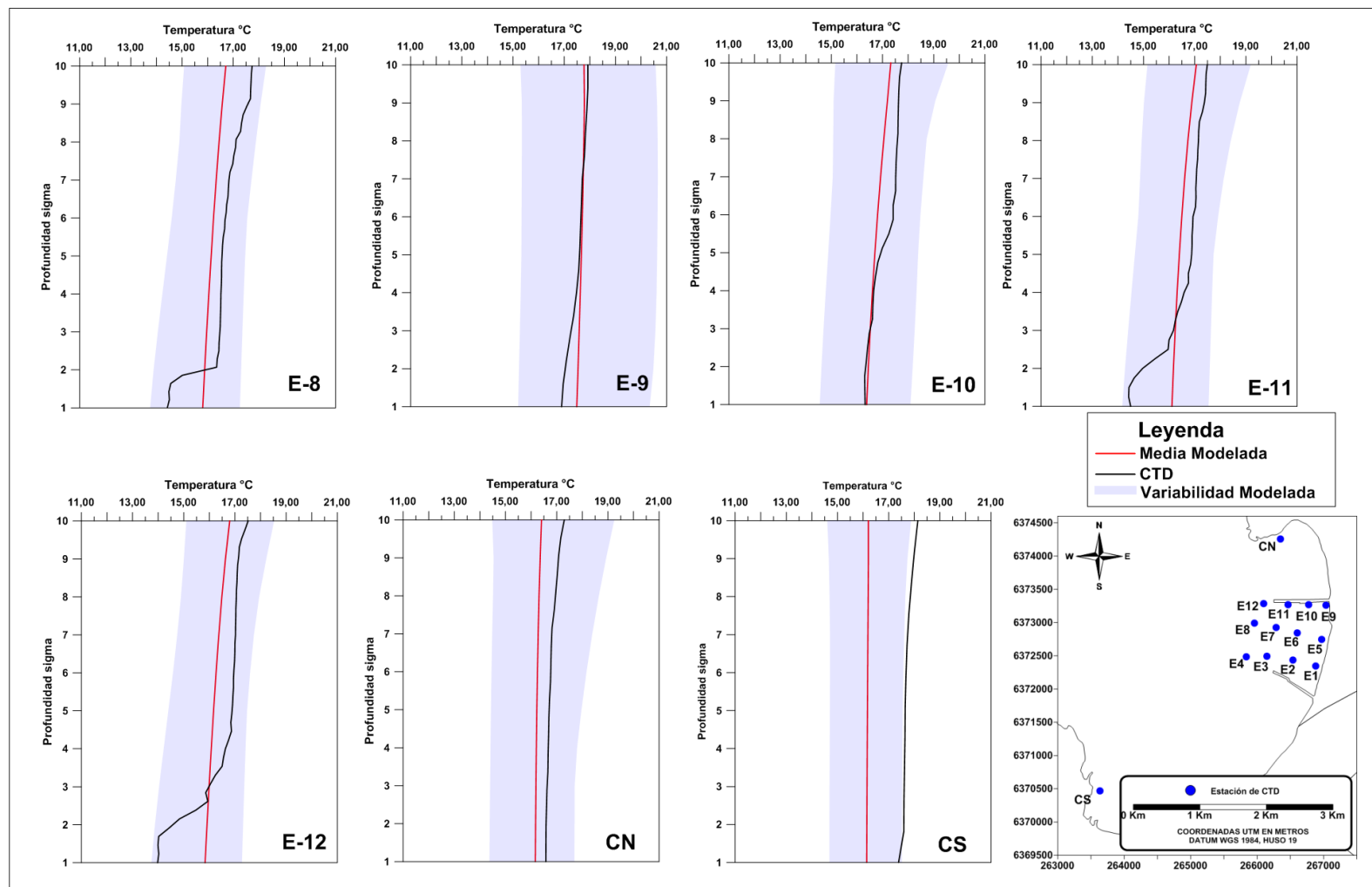


Figura 13-59 Validación de temperatura por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.

Fuente: Elaboración propia.

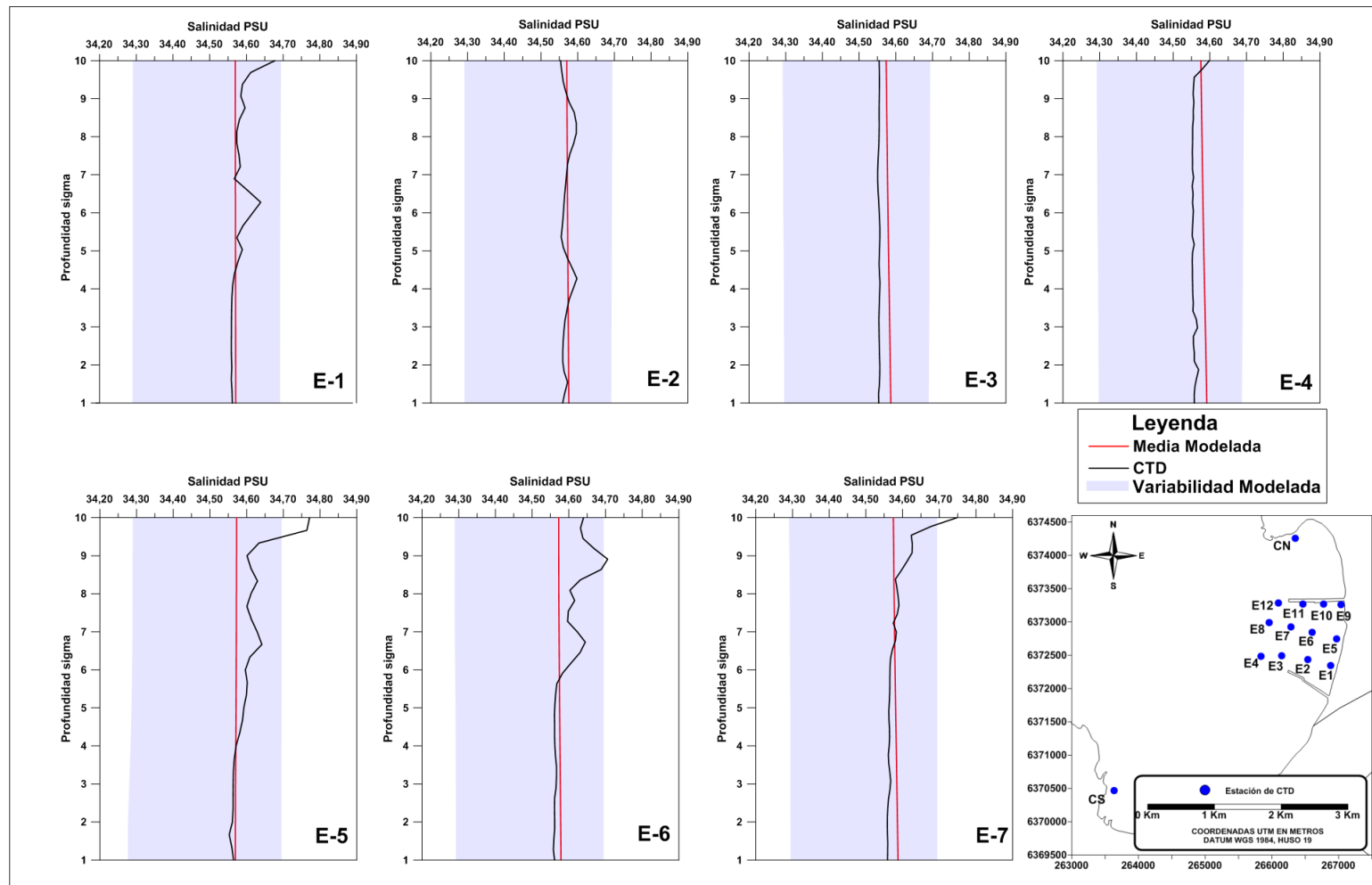


Figura 13-60 Calibración de salinidad por CTD puntos E-1 a E-7.

Fuente: Elaboración propia.

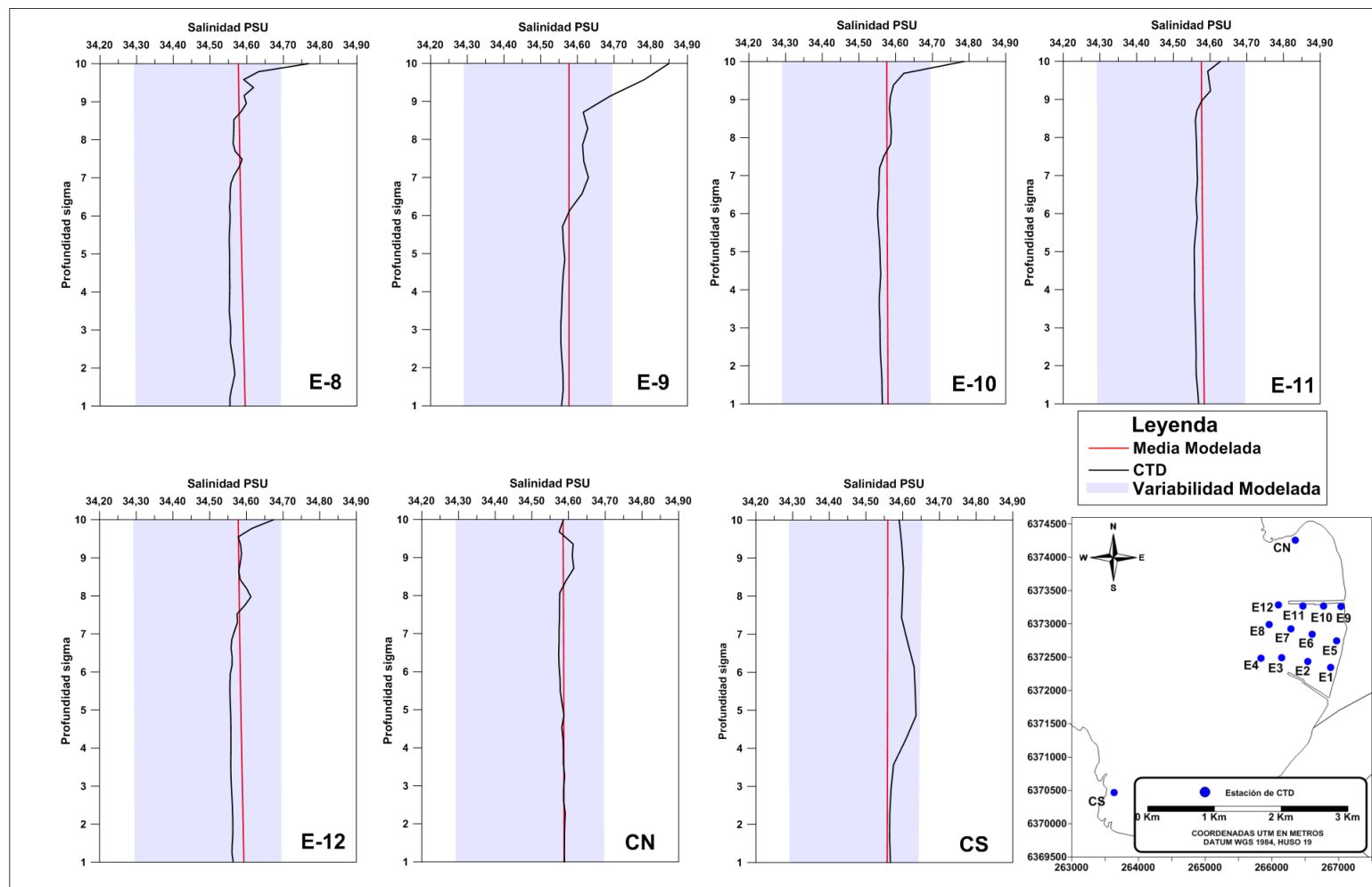


Figura 13-61 Calibración de salinidad por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.
Fuente: Elaboración propia.

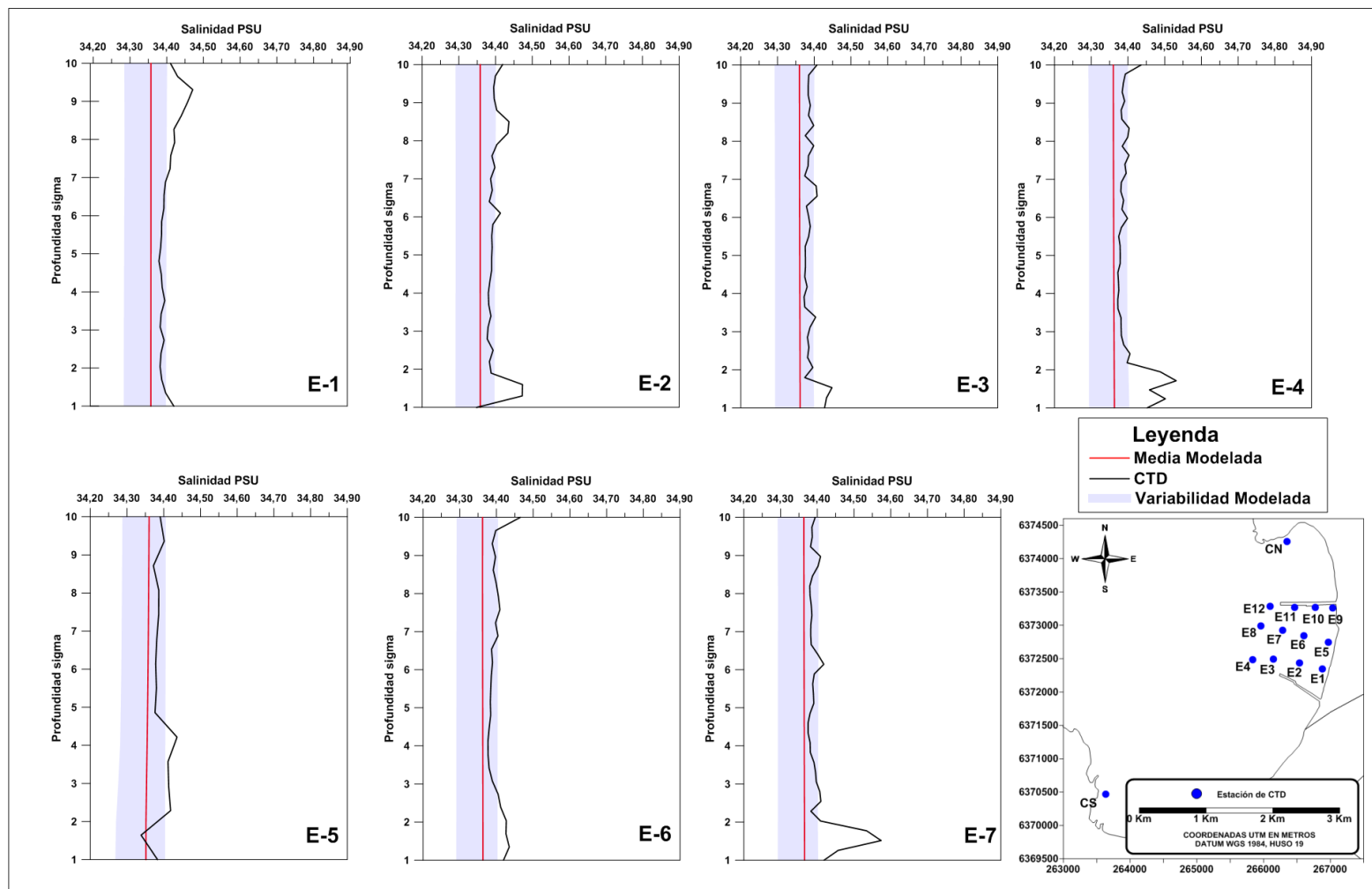


Figura 13-62 Validación de salinidad por CTD puntos E-1 a E-7.

Fuente: Elaboración propia.

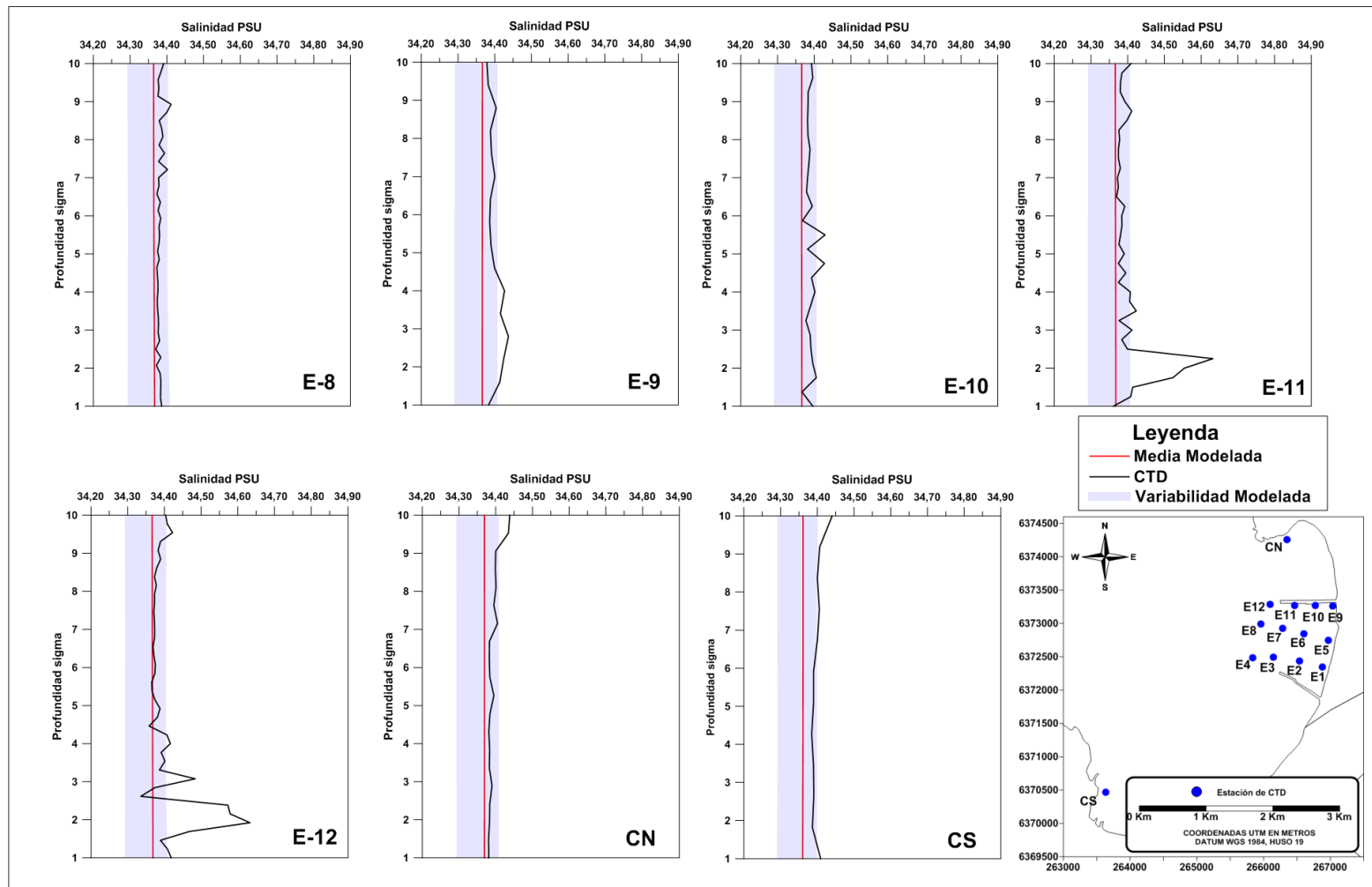


Figura 13-63 Validación de salinidad por CTD puntos E-8 a E-12, CN y CS.

Fuente: Elaboración propia.

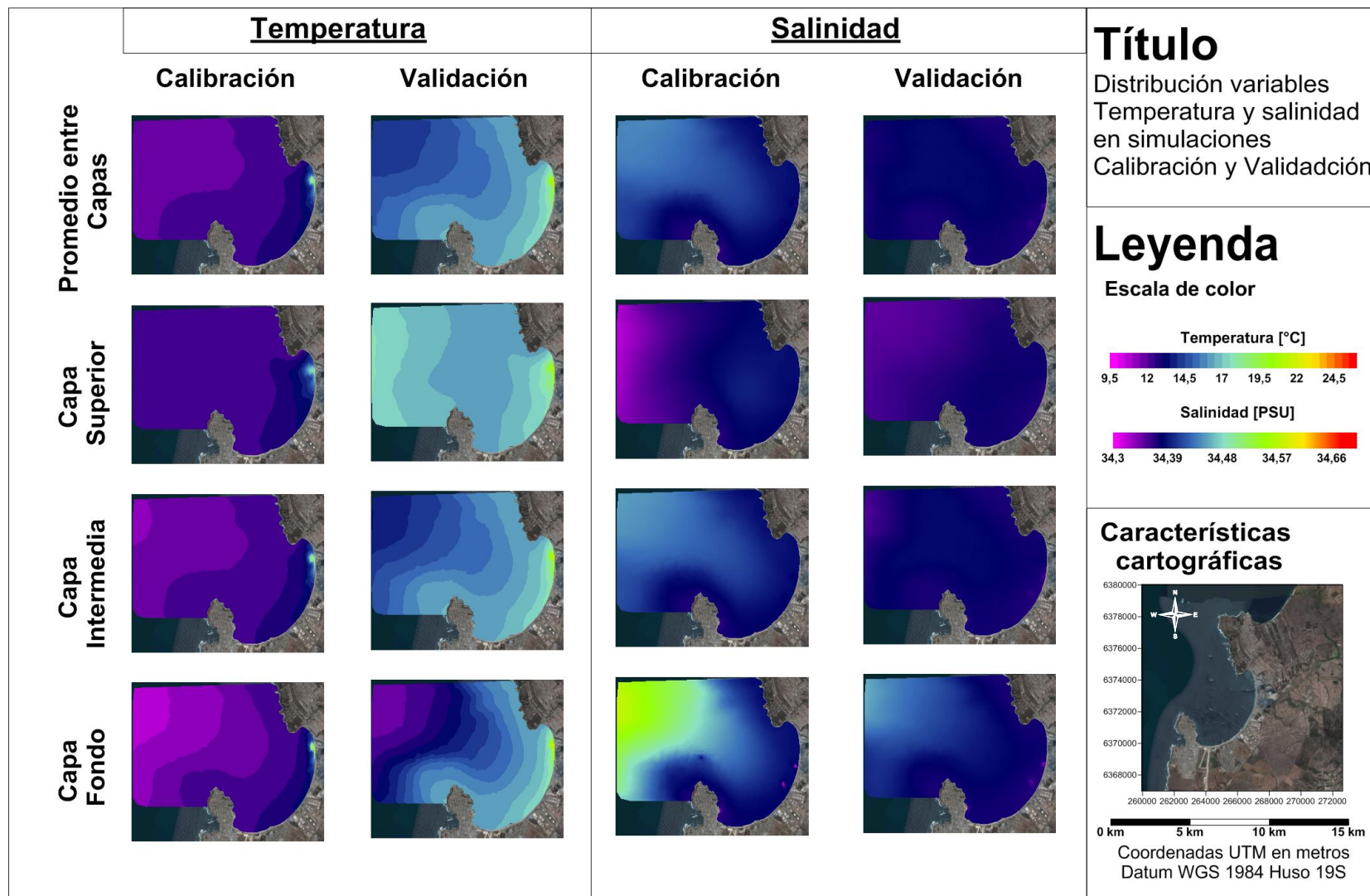


Figura 13-64 Distribución de las variables temperatura y salinidad en las simulaciones de calibración y validación.

Fuente: Elaboración propia.

Al encontrarse validado el uso de los datos HYCOM para este estudio se debió proceder con la construcción de las forzantes de las variables temperatura y salinidad según lo mencionado en la metodología.

La comparación de los meses enero y julio durante los últimos cinco años se realiza en la Figura 13-65 y Figura 13-66, respectivamente. En estas figuras se señalan ambos puntos de extracción de datos, de los cuales se muestran comportamientos semejantes.

Para la variable temperatura del mar, durante los meses de julio, correspondiente al invierno, se muestra el año 2017 con las mayores temperaturas, mientras que el año 2016 resalta con un aumento de temperatura al final del mes. En el mes de enero, correspondiente al verano, el año 2016 presentó las mayores temperaturas de los datos recopilados.

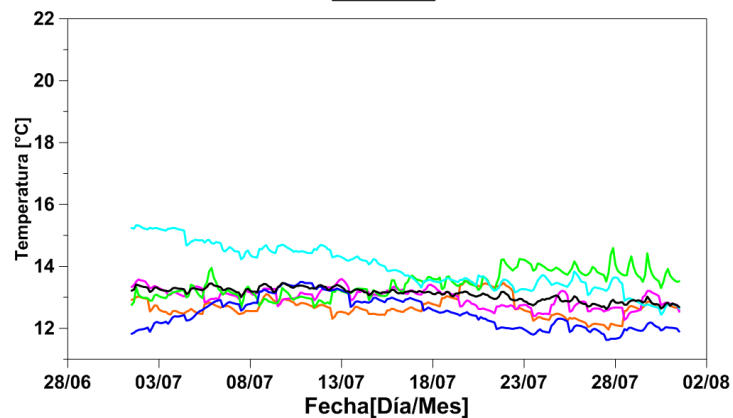
En la variable salinidad del mar, en el mes de julio, correspondiente al invierno, se mostró una elevada dispersión en comparación al mes de enero, durante la estación de verano, donde existió una mayor cercanía entre los años recopilados.

Según al comportamiento gráfico, la variable temperatura de mar del año 2015 muestra mayor cercanía a la media (curva negra), a diferencia de la variable salinidad, la cual muestra una mayor similitud a la media con los datos del año 2016, por lo cual se escogieron estos años para la construcción de las respectivas forzantes.

Invierno Superficial



Punto 2



Punto 1

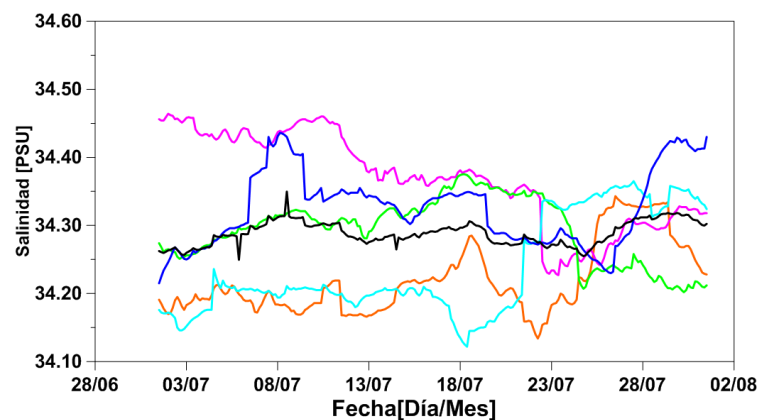
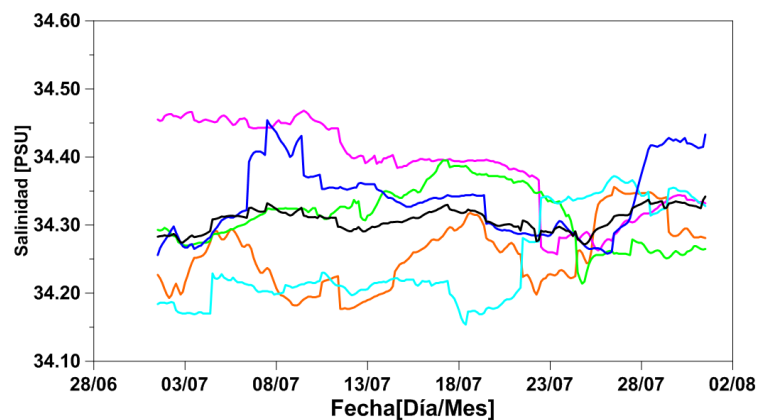
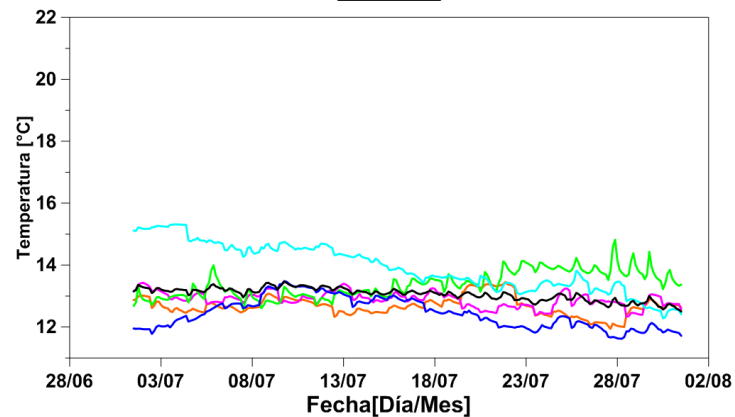


Figura 13-65 Elección año representativo del modelo HYCOM en periodo de invierno.

Fuente: Elaboración propia.

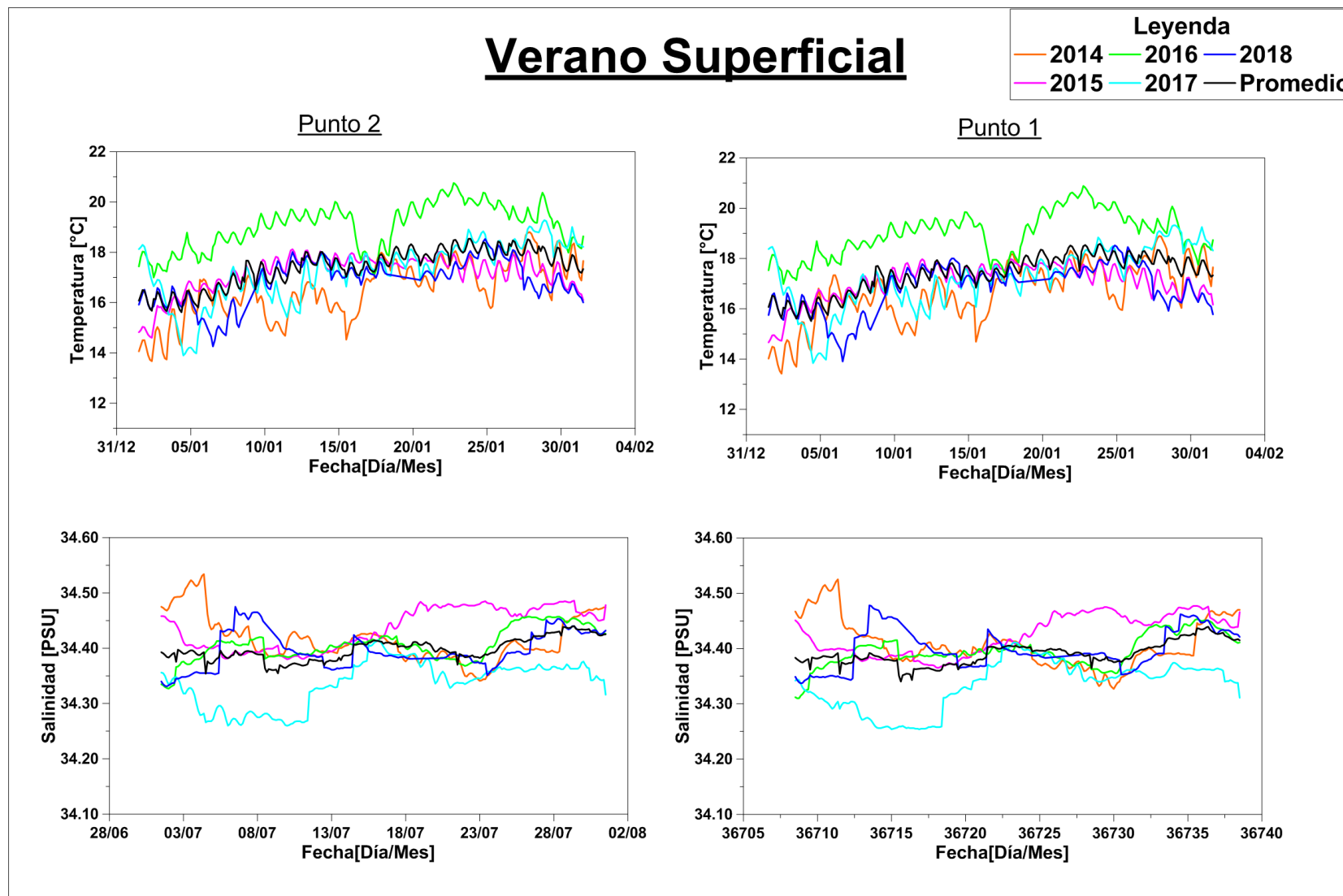


Figura 13-66 Elección año representativo del modelo HYCOM en periodo de verano.

Fuente: Elaboración propia.

13.5.5 SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA

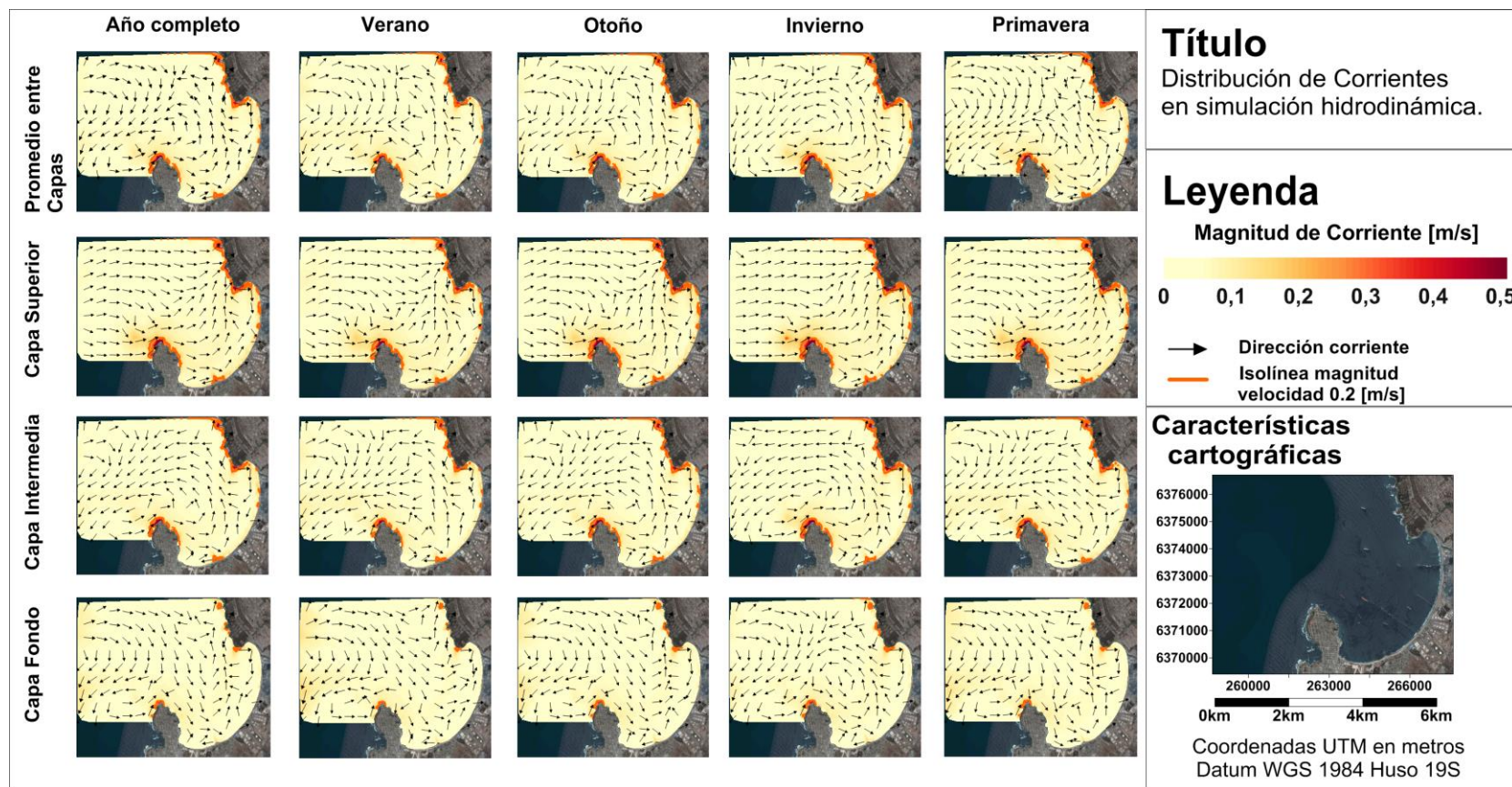


Figura 13-67 Distribución de las corrientes durante la simulación hidrodinámica.
Fuente: Elaboración propia.

13.5.6 SIMULACIÓN ECOLÓGICA

La simulación ecológica necesaria para esta memoria fue realizada mediante el modelo Mike *Eco Lab*, empleado con condiciones iniciales construidas con los datos recopilados de los nutrientes y organismos, y bajo la hidrodinámica correspondiente al caso medio.

Debido a la poca información de las variables nutrientes y organismos se debió contrastar el comportamiento anual de las variables ecológicas simuladas contra las conductas descritas por la bibliografía consultada. En el caso de las variables nutrientes, su mayor volumen de información permitió verificar el orden de magnitud representado en la simulación.

La conducta de la simulación ecológica fue descrita al analizar los datos extraídos de las principales variables en los puntos establecidos en la Figura 6-13 que se distribuyen al interior de la bahía. Las variables analizadas fueron amonio, nitrato, fosfato, detritus, fitoplancton, zooplancton y oxígeno disuelto, que se muestran en la Figura 13-68, Figura 13-69 y Figura 13-70, en las respectivas capas superior, intermedia y fondo. Según se muestra en estas ilustraciones, el comportamiento entre los distintos puntos, en las capas analizadas es semejante con diferencias en sus magnitudes. Debido a las semejanzas, se analizó el comportamiento general de las variables durante la simulación.

Para ahondar en los resultados de las simulaciones ecológicas se decidió realizar gráficas sobre la distribución en el dominio (según lo establecido en el capítulo 6.5) de las concentraciones de fitoplancton y zooplancton, siendo los organismos analizados en esta memoria.

La complejidad del análisis de la conducta de las variables mostradas en la Figura 13-68, Figura 13-69 y Figura 13-70 se centró en la dependencia conjunta entre todas las variables, y de las características del medio (hidrodinámica y atmosférica). A continuación, se realiza un análisis del comportamiento de las variables producido en la simulación, el cuál comienza por los nutrientes y culmina con los organismos simulados.

La variable amonio describe oscilaciones en los inicios de las estaciones de verano y primavera, hasta mediados de estación donde ocurre un incremento en su concentración, luego en las estaciones de otoño e invierno se produce una reducción paulatina. El comportamiento señalado se asemeja al descrito por la variable detritus, lo cual se debe al proceso de mineralización en el detritus, provocando una transferencia de la concentración de nitrógeno desde el detritus hacia el amonio. Son notorios los incrementos y reducciones de la concentración de amonio en los inicios de las estaciones de verano y primavera, que no se presentan en el detritus, ya que este efecto se produce por la actividad del fitoplancton, el cual se alimenta del amonio y, además, ciertas porciones pueden transferirse directamente hacia el amonio tras su muerte. La reducción del amonio en la estación de otoño e invierno se produce a pesar del aporte del detritus, a causa del proceso de nitrificación, que provoca una transferencia de la concentración de nitrógeno hacia la variable nitrato.

La conducta del nitrato se asemeja al descrito por el fosfato, el cual consiste en una reducción de la concentración hasta mediados de la estación de verano, desde donde comienza a incrementarse hasta la estación de primavera, donde se reduce nuevamente con una mayor magnitud. Las reducciones de estos nutrientes se debieron al consumo del fitoplancton, mientras que, los incrementos ocurrieron desde la reducción abrupta de biomasa fitoplanctónica, a causa de la transformación del material orgánico inerte. La transformación del fosfato ocurre desde el detritus, en comparación, para el nitrato, el

detritus debe pasar por el amonio y luego mediante la nitrificación. A pesar, del proceso adicional que debe sufrir el nitrato, las curvas mostradas son similares, demostrando la rapidez que ocurre el proceso de nitrificación.

En resumen, el nitrato y fosfato simulado presentan mayores concentraciones al final de la estación de invierno debido a la transformación del material orgánico, el cual, luego es consumido por el fitoplancton en los comienzos de primavera. Esta conducta se asemeja al descrito por Prado & Sievers (1987), en la bahía de Quintero, donde ocurre un incremento de nutrientes al comienzo de la primavera, por la ocurrencia de la surgencia costera, a lo cual, le prosiguió una reducción en los nutrientes por el consumo del fitoplancton durante el mes de noviembre.

El comportamiento del oxígeno disuelto consistió en incrementos en su concentración durante la estación de verano y en primavera, con una mayor magnitud éste último. Estos incrementos son coincidentes con los aumentos de la biomasa fitoplanctónica, comportamiento concordante a lo visto en Prado & Sievers (1987). En las estaciones de otoño e invierno ocurren incrementos del oxígeno disuelto con una baja pendiente, el cual se debe a la reducción de las variables zooplancton, detritus y amonio, que se relacionan con procesos consumidores de oxígeno.

La variable detritus presenta incrementos en su concentración en las estaciones de verano y primavera, mientras que, en las estaciones de otoño e invierno se reduce su concentración paulatinamente. Los incrementos de la concentración son coincidentes con las variables fitoplancton y zooplancton, ya que son las variables productoras del material orgánico en el modelo utilizado. En las estaciones de otoño e invierno la biomasa fitoplanctónica es bastante baja, por lo cual, el zooplancton es la principal fuente de material orgánico en estas estaciones. Como ya fue mencionado, la reducción de la concentración de detritus ocurre por la mineralización del material orgánico hacia los nutrientes amonio y fosfato.

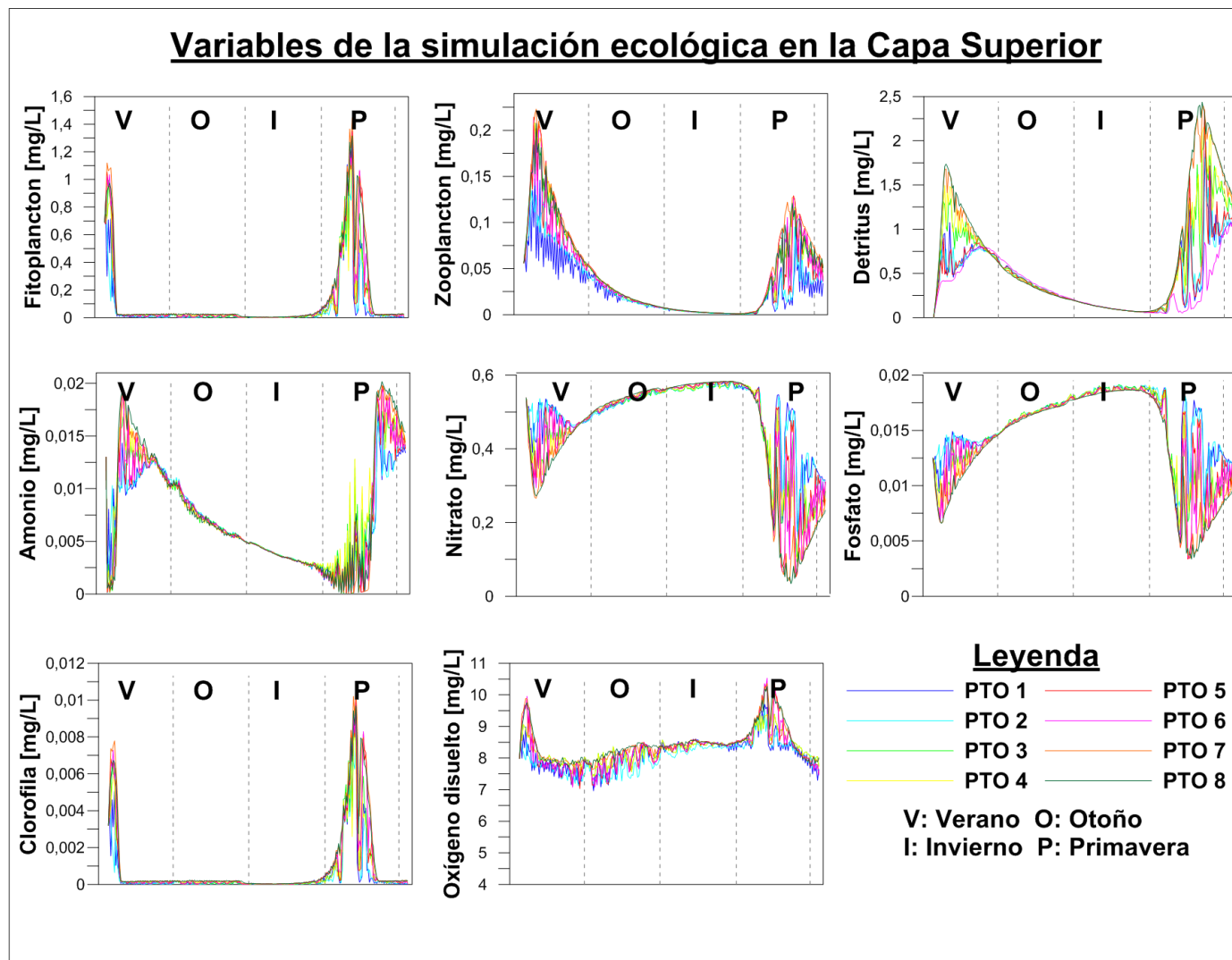


Figura 13-68 Variación de variables del modelo ecológico al interior de la bahía en la capa superior.
Fuente: Elaboración propia.

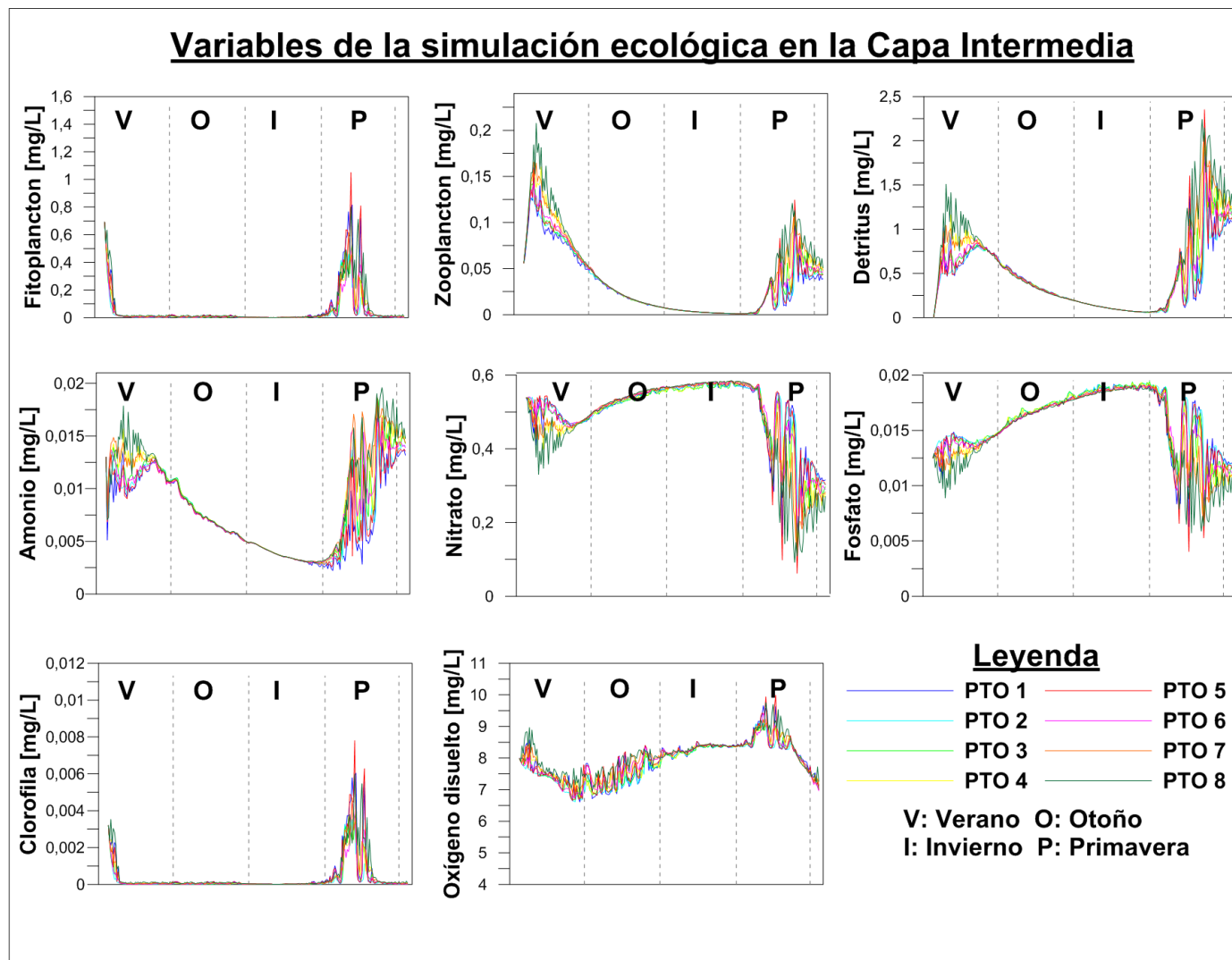


Figura 13-69 Variación de variables del modelo ecológico al interior de la bahía en la capa intermedia.
Fuente: Elaboración propia.

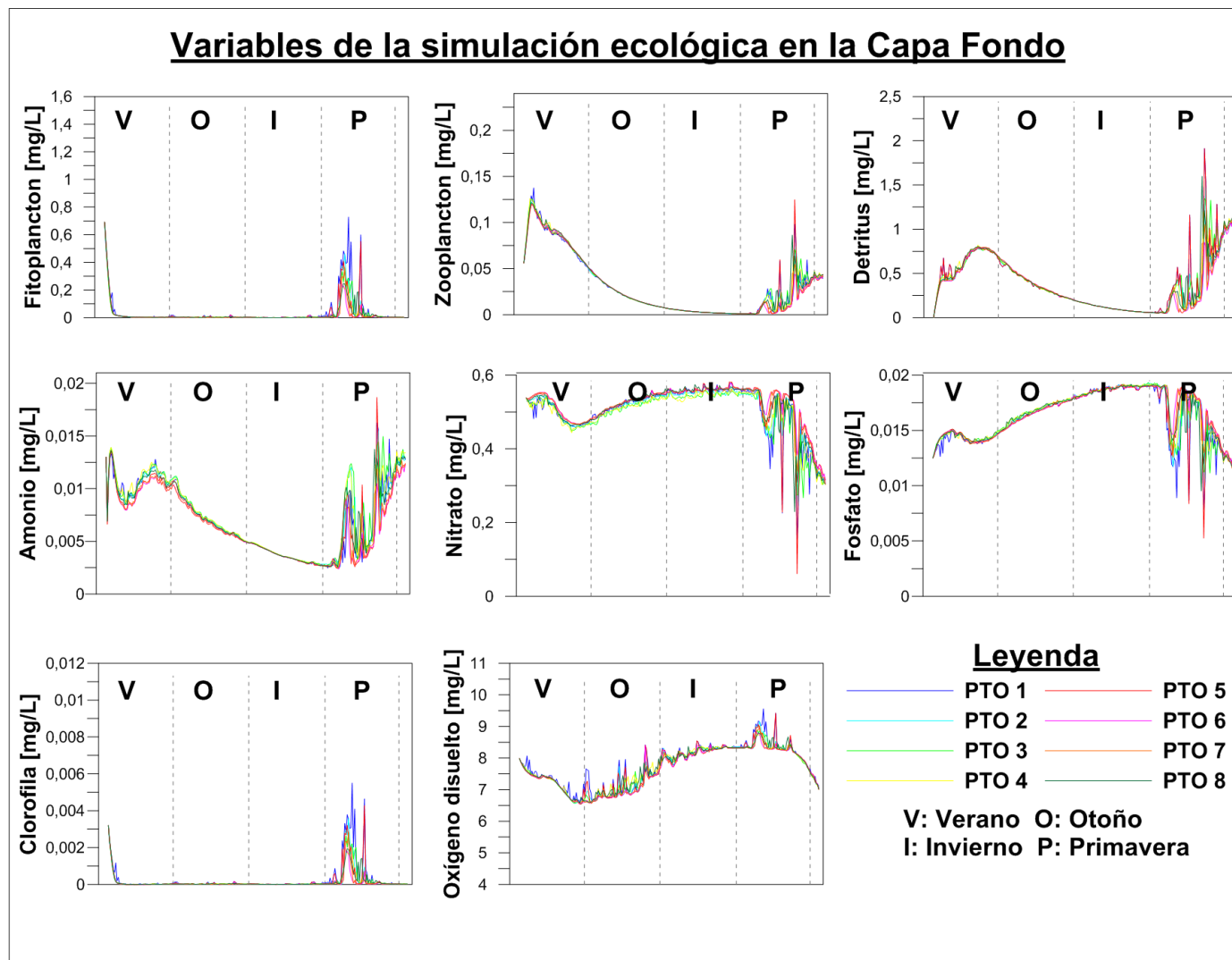


Figura 13-70 Variación de variables del modelo ecológico al interior de la bahía en la capa fondo.

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de analizar la variación vertical de las concentraciones de los nutrientes simulados por el modelo ecológico, se realizó la Figura 13-71, donde se esquematizaron los valores medios y extremos de las variables estudiadas, extraídas de la simulación en los puntos señalados de la Figura 6-13, en las capas superficial, intermedia y fondo.

La variable detritus presenta valores entre 0 a 2.5 [mg/L], con un valor medio cercano a los 0.5 [mg/L], ubicándose las mayores magnitudes en la superficie.

Por el contrario, los nutrientes nitrato y fosfato, obtienen mayores concentraciones en la capa de fondo, concordante con la información bibliográfica encontrada (Prado & Sievers, 1987; Sievers & Vega, 2000; Silva & Valdenegro, 2003; Santander *et al.*, 2003). Este comportamiento puede explicarse por la localización del fitoplancton en la superficie donde accede, más directamente, a la luz. La preferencia por esta ubicación provoca menores cantidades de nutrientes por su alimentación (Prado & Sievers, 1987). y mayor concentración de detritus, una vez muerto el fitoplancton. Las concentraciones del nitrato se encontraron desde los 0.6 [mg/L], hasta valores menores a 0.1 [mg/L] y en el fosfato las magnitudes se ubicaron entre los 0.004 [mg/L] hasta 0.02 [mg/L].

Las magnitudes del amonio presentaron los mayores valores, seguidos por la capa superficial y luego en el fondo, este comportamiento puede explicarse por la dependencia con el detritus y el nitrato, cuyos comportamientos son opuestos en la columna de agua. Los valores del amonio se registraron entre los 0 [mg/L] hasta 0.02 [mg/L].

El oxígeno disuelto presentó las mayores concentraciones en la superficie reduciéndose con la profundidad, comportamiento concordante con la bibliografía encontrada (Prado & Sievers, 1987; Sievers & Vega, 2000; Silva & Valdenegro, 2003; Santander *et al.*, 2003), lo que puede deberse a la localización superficial del fitoplancton. Las concentraciones del oxígeno disuelto se encontraron entre los 6.5 [mg/L] hasta los 10.5 [mg/L].

Se debe mencionar que, las magnitudes registradas en la columna de agua se encuentran dentro de los rangos de las mediciones recopiladas y señaladas en el anexo 13.4.6, demostrando su representación de la realidad. En el caso del oxígeno disuelto, las simulaciones se ubicaron entre los mayores valores recopilados, lo que puede deberse a la ausencia de organismos consumidores de oxígeno o a la baja concentración de material orgánico inerte, respecto a la concentración inicial de detritus igual a 0 [mg/L].

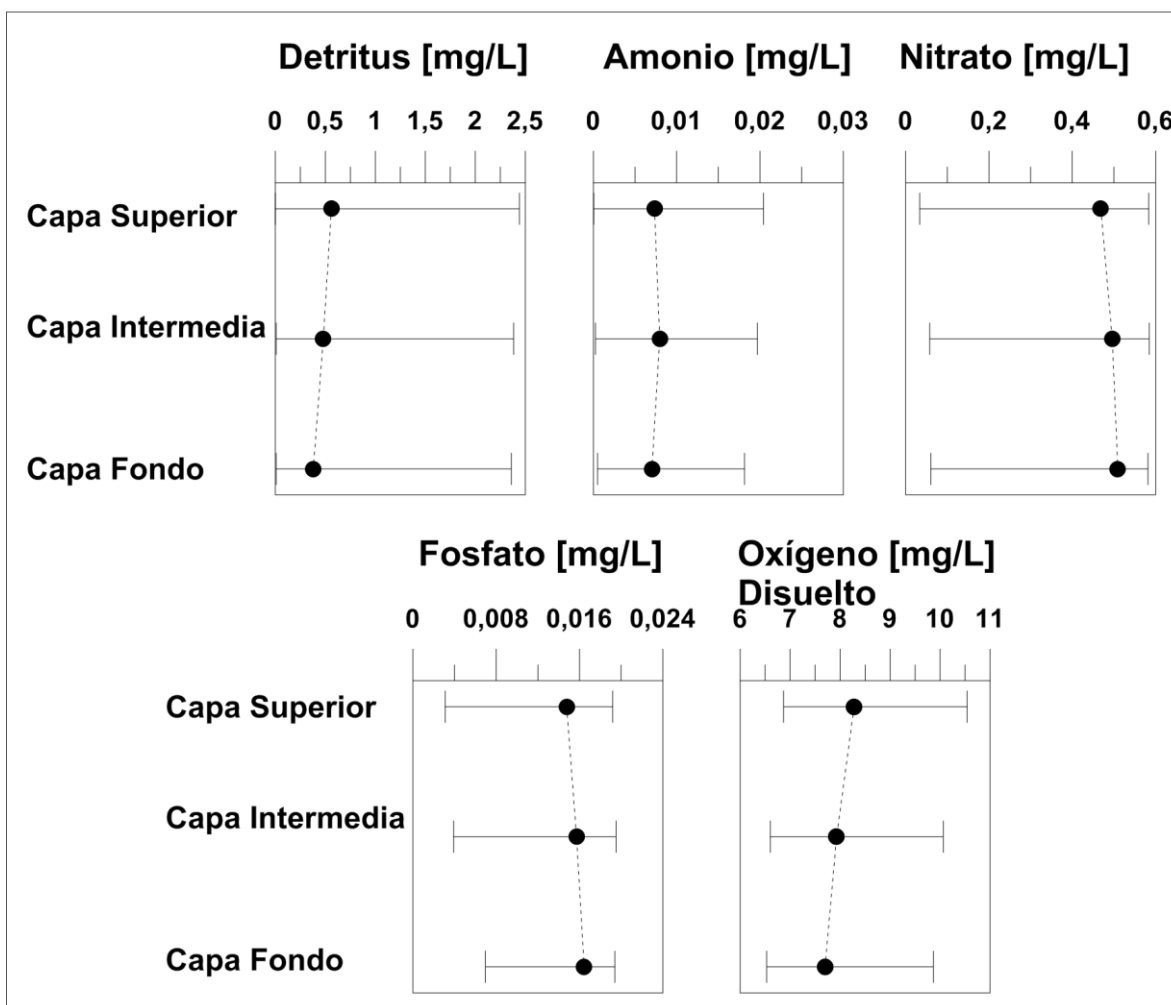


Figura 13-71 Distribución vertical de nutrientes.
Fuentes: Elaboración propia.

El comportamiento simulado de la variable fitoplancton describe incrementos de biomasa durante las estaciones de verano y primavera, desde donde ocurren abruptas reducciones, manteniéndose en una concentración mínima durante las estaciones de invierno y otoño. Esta concentración mínima fue configurada desde el modelo, con la finalidad de permitir la sobrevivencia del fitoplancton frente a un fuerte pastoreo del zooplancton.

La conducta simulada del fitoplancton presenta semejanzas con el ciclo anual del fitoplancton propuesto en Avaria, Muñoz, & Braunn (1988) (Figura 8-10), donde se establecen incrementos importantes de fitoplancton en el inicio de la primavera hasta el verano, tras lo cual comienza a disminuir, alcanzando valores mínimos de concentración. A pesar que las altas concentraciones simuladas de fitoplancton tienen menor duración, coincidieron la ocurrencia de las concentraciones más importantes en las estaciones de verano y primavera, el incremento durante la estación de primavera y la ocurrencia de las menores concentraciones durante la estación de invierno. Se debe dejar en claro que, el esquema mostrado en la Figura 8-10, es una representación simplificada del comportamiento del fitoplancton, por tanto, no se espera esta duración en todos los años en el ambiente marino.

La conducta de la producción primaria establecida en Avaria *et al.* (1988) responde al fenómeno de surgencia costera, el cual ocurrió en el sitio estudiado por aumentos del viento con dirección SW durante la primavera. Estos vientos provocaron una inestabilidad en la columna de agua, que permitió el ingreso de nutrientes en la superficie desde capas más profundas (Alvial & Avaria, 1982), además de la dispersión de la nubosidad que eleva la radiación solar, fomentando la producción primaria (Avaria S. P., 1975). En vista que, la producción de fitoplancton registrada en primavera ocurre tras un incremento de nutrientes (nitrato y fosfato) y las forzantes meteorológicas, generadas para la simulación del caso medio, presentaron en primavera incrementos en la magnitud del viento (Figura 8-2) y aumentos de la radiación solar (Figura 8-3) es posible asociar el incremento del fitoplancton simulado con la representación de un evento de surgencia.

La distribución de la concentración de fitoplancton simulado (Figura 13-73) presenta las mayores magnitudes en la capa superficial reduciendo hacia el fondo, comportamiento que es descrito en la bibliografía consultada recopilada (Avaria S. P., 1975; Avaria & Muñoz, 1982; Alvial & Avaria, 1982). En ciertas ocasiones es posible que la producción de fitoplancton alcance magnitudes que dificulte el paso de la luz hacia la columna de agua, reduciendo la producción del fitoplancton en sectores más profundos (Avaria & Orellana, 1975). Las estaciones de otoño e invierno se caracterizaron con ambientes de bajas concentraciones de fitoplancton en toda la columna de agua, por tanto, no es evidente la variación con la profundidad.

El fitoplancton se concentra (Figura 13-73) principalmente en las cercanías de la península Los Molles y con una menor frecuencia en los alrededores de la punta Ventanillas. Los mayores valores de fitoplancton también coinciden con las ubicaciones de las AMERBs Noroeste península Los Molles, El embarcadero, El Papagayo y Ventana (Figura 4-3), donde ocurre una alta actividad orgánica. Es relevante notar la ausencia de biomasa fitoplanctónica al interior de la bahía, en especial, hacia el norte, lo cual se debe a las elevadas temperaturas producidas por las descargas, como se detalla en el capítulo 10.2.1. La elevada concentración en las cercanías de la península Los Molles coincide con lo mencionado en IFOP (2016), donde se establece el sector oeste de la península como un sistema de surgencia. Debido a lo anterior se preparó la Figura 13-74, que ilustra la componente media vertical de la corriente (W), en las distintas estaciones y distintas capas. En esta ilustración se revelan grandes magnitudes ascendentes y descendentes en las cercanías de la península Los Molles y entre la punta ventanilla y la punta Horcón, donde también se concentra la biomasa de los organismos en la simulación. En Niño (2013(b)) se establece que los evento de surgencias son causados a la fricción del viento y provocan ascensos y descensos de masas de agua, que en un ambiente estratificado se presentan desplazamientos de las capas en la columna de agua. Bajo estas características, junto a las variables nutrientes, fitoplancton y las condiciones meteorológicas, es posible suponer que se logra representar un evento de surgencia, al menos en sus consecuencias. La simulación fidedigna de la surgencia costera requiere de un estudio más profundo, lo cual se aleja de los objetivos de esta memoria.

El zooplancton, al igual que el fitoplancton, muestra incrementos en su biomasa durante la estación de verano y primavera, aunque en las estaciones de otoño e invierno, se reduce la concentración paulatinamente (Figura 13-68, Figura 13-69 y Figura 13-70). A pesar de lo anterior, el incremento del zooplancton dura hasta que el fitoplancton alcanza sus concentración mínima, momento en que el modelo numérico impide el pastoreo y por ello el zooplancton comienza a decaer continuamente. En la primavera, cuando las condiciones ambientales y la concentración de zooplancton se encuentra reducida, el fitoplancton

incrementa su biomasa, lo cual permite el reinicio del pastoreo. Debido a que el fitoplancton se mantuvo en su concentración mínima durante eventos de alta productividad (ambiente con altas concentraciones de nutrientes, elevadas temperatura y alta radiación solar), se puede suponer el pastoreo agresivo del zooplancton como la principal causa de la rápida reducción de biomasa fitoplántonica. Este comportamiento es esperable en el modelo, pues ambas especies son transportadas por la hidrodinámica, facilitando la depredación del zooplancton hacia el fitoplancton, el cual carece de mecanismos de defensas o huida. En resumen, el comportamiento simulado entre fitoplancton y zooplancton corresponde a la alimentación del zooplancton hasta la reducción del fitoplancton (su alimento). El zooplancton se reduce por la inanición, lo que permite el incremento de fitoplancton y, luego, el zooplancton sobreviviente vuelve a alimentarse nuevamente. Este comportamiento circular se asemeja a la conducta entre especies descrita en el modelo depredador-presa de Lotka-Volterra (Asencio, 2017). Este modelo se presenta en la Figura 13-72 (izquierda), esquematizando en series de tiempo las poblaciones de ambas especies con una conducta oscilatoria donde ocurre un desfase, con un adelantamiento en las presas. La causa de esto se ilustra en la Figura 13-72 (derecha) mediante una circunferencia, en donde, comenzando desde el primer cuadrante y en un sentido antihorario, bajo cierto número de presas, un aumento de los depredadores provoca una reducción de las presas por su alimentación. La baja cantidad de presas causa la muerte por inanición de algunos depredadores, aunque siguen reduciéndose las presas. En el tercer cuadrante, el número de depredadores es tan bajo que permite un aumento en la cantidad de presas. Finalmente, el incremento de presas permite aumentar los depredadores gradualmente hasta detener la producción de presas, cerrando el ciclo. La similitud con la relación del fitoplancton y zooplancton permite confirmar la correcta representación de una relación depredador-presa, aunque en el modelo Lotka-Volterra, solo considera dos variables, mientras que el modelo ecológico se considera organismos afectados por variables relacionadas con el medio.

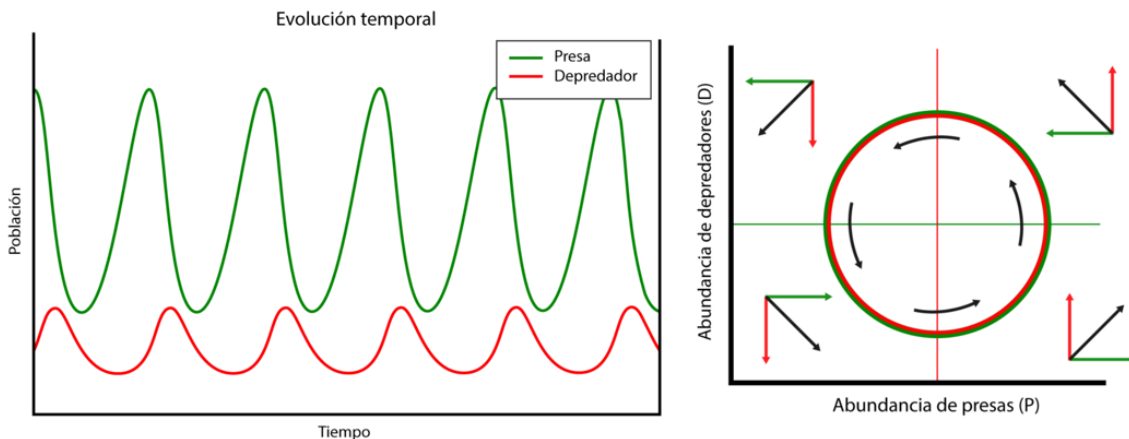


Figura 13-72 Esquema del modelo depredador-presa Lotka-Volterra.

Fuente: (Asencio, 2017).

En la Figura 13-75 se presenta la distribución de la variable zooplancton en el dominio. Como el fitoplancton, las mayores magnitudes de biomasa del zooplancton se producen en la estación de verano y primavera, en contraste, las estaciones de otoño e invierno las concentraciones son bastante bajas. Las mayores concentraciones del zooplancton ocurren

en la capa superficial, como el fitoplancton, aunque esta variable alcanza mayores profundidades. En la distribución en el dominio se revelan elevadas magnitudes de biomasa en las cercanías de la península Los Molles, a diferencia del sector norte de la bahía, donde se produce una reducción de la biomasa causado por las elevadas temperaturas provocadas por los efluentes allí localizadas, como se describe en el capítulo 10.2.1.

La simulación realizada por el modelo ecológico logró representar varios aspectos de la conducta establecida por la bibliografía consultada, lo que permite comprobar la capacidad del modelo ecológico para su empleo en las próximas simulaciones. Entre los aspectos no representados se tiene la simplificación de las especies del fitoplancton y zooplancton, donde se modelan taxa únicas con características y tolerancias iguales en cada especie. Esta simplificación despreja la relación de las especies de fitoplancton y zooplancton entre sus distintas taxa, asumiéndolo como una relación presa-depredador y al considerar el transporte de ambas especies por la hidrodinámica del cuerpo de agua, el fitoplancton no es capaz de huir o protegerse, culminando con reducciones abruptas del fitoplancton y, en consecuencia, disminuye el zooplancton por inanición.

La especie zooplancton se compone de múltiples taxa en los ambientes marinos, no obstante, en la simulación realizada se caracterizó una taxa semejante a los copépodos o microzooplánctones (DHI, 2017(c)), los cuales presentan una dieta, principalmente, herbívora (fitoplancton), que puede variar bajo situaciones extremas. En las estaciones de verano y primavera los copépodos muestran una dieta casi exclusiva por las diatomeas, la taxa que predomina en estas estaciones. En las estaciones de otoño e invierno, la abundancia de las diatomeas se reduce y la dieta de los copépodos se concentra en la taxa de fitoplancton dominante en estas estaciones, dinoflagelados (Vargas *et al.*, 2006; Vargas *et al.*, 2010). En ciertas ocasiones la productividad primaria se encuentra reducida y el zooplancton puede optar por una dieta omnívora, alimentándose de otros copépodos para sobrevivir (Riley & Chester, 1989; Valdés *et al.*, 2017).

En el fitoplancton, al modelarse como una especie única se impide la representación del fenómeno sucesión de especies que afecta esta especie en el ambiente marino, el cual consiste en el predominio de taxa que mejor se adapten a eventos donde ocurren cambios abruptos en las características del ambiente marino (Avaria & Orellana, 1975; Margalef, 1978; Santander *et al.*, 2003). La surgencia puede cambiar las condiciones del ambiente, permitiendo el predominio de la taxa diatomeas (Avaria & Orellana, 1975; Margalef, 1978; Santander *et al.*, 2003). El fitoplancton simulado puede relacionarse con la taxa de las diatomeas, debido al incremento del fitoplancton ante una aparente representación del evento de surgencia y, además, al ser presa del zooplancton simulado que representa a la taxa copépodos.

Debido a lo anteriormente mostrado, la bibliografía presenta un ambiente marino complejo de modelar por sus varios procesos que afectan los organismos y nutrientes, que dependen de más parámetros. La representación de las especies habitantes en el mar requiere un enorme esfuerzo computacional, por lo tanto, los resultados conseguidos en la simulación de especies compuestas de taxa únicas (de fitoplancton y zooplancton), se acerca en varios aspectos a la bibliografía recopilada, verificando la representación del ambiente marino. Es importante mencionar que, el objetivo de realizar la simulación ecológica en esta memoria fue la modelación de un ambiente marino representativo que responda a los cambios en la bahía producidos por las descargas instaladas y, así, permita la evaluación de las alteraciones causadas.

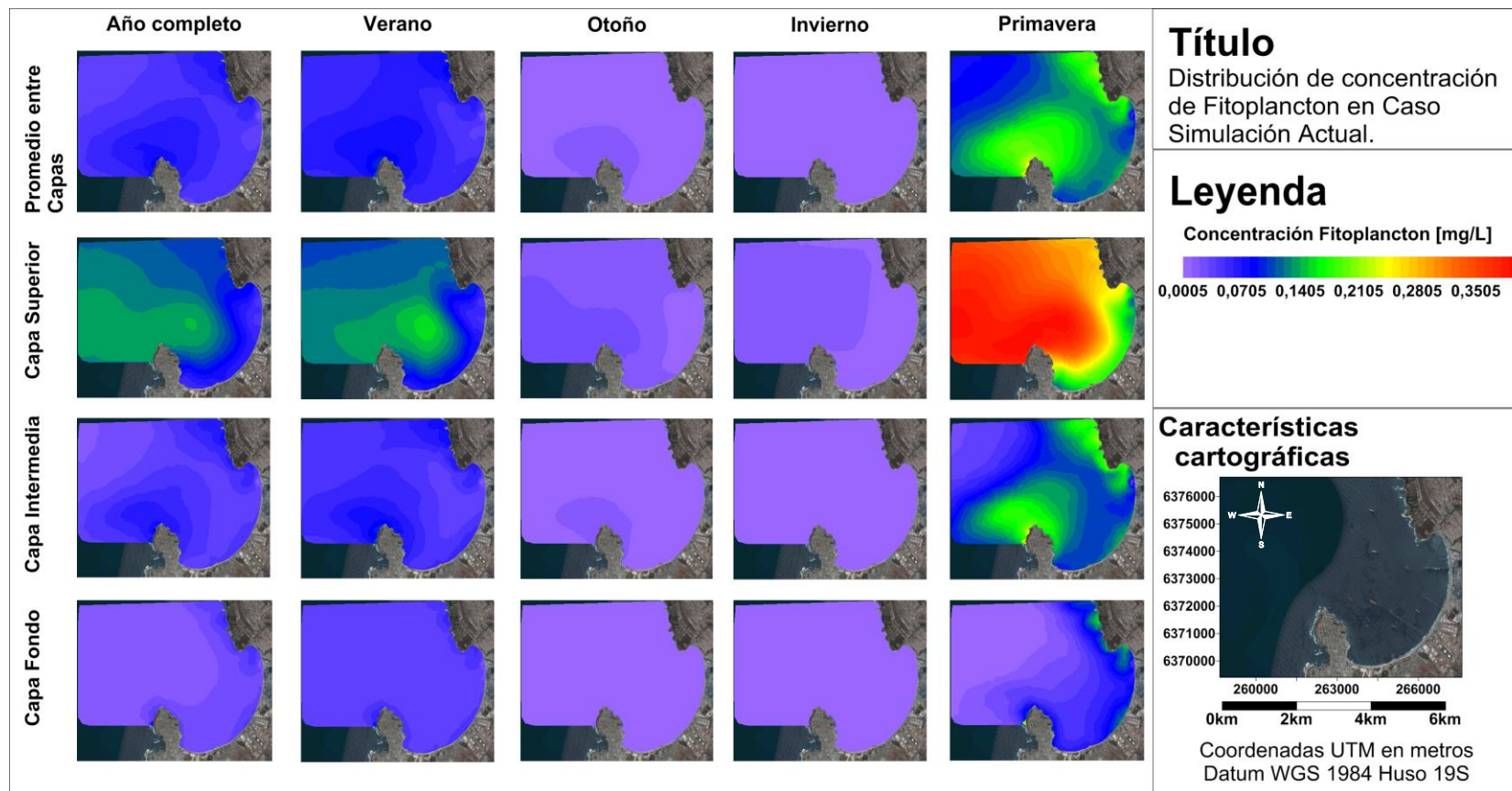


Figura 13-73 Distribución de la concentración de fitoplancton en caso SA.
Fuente: Elaboración propia.

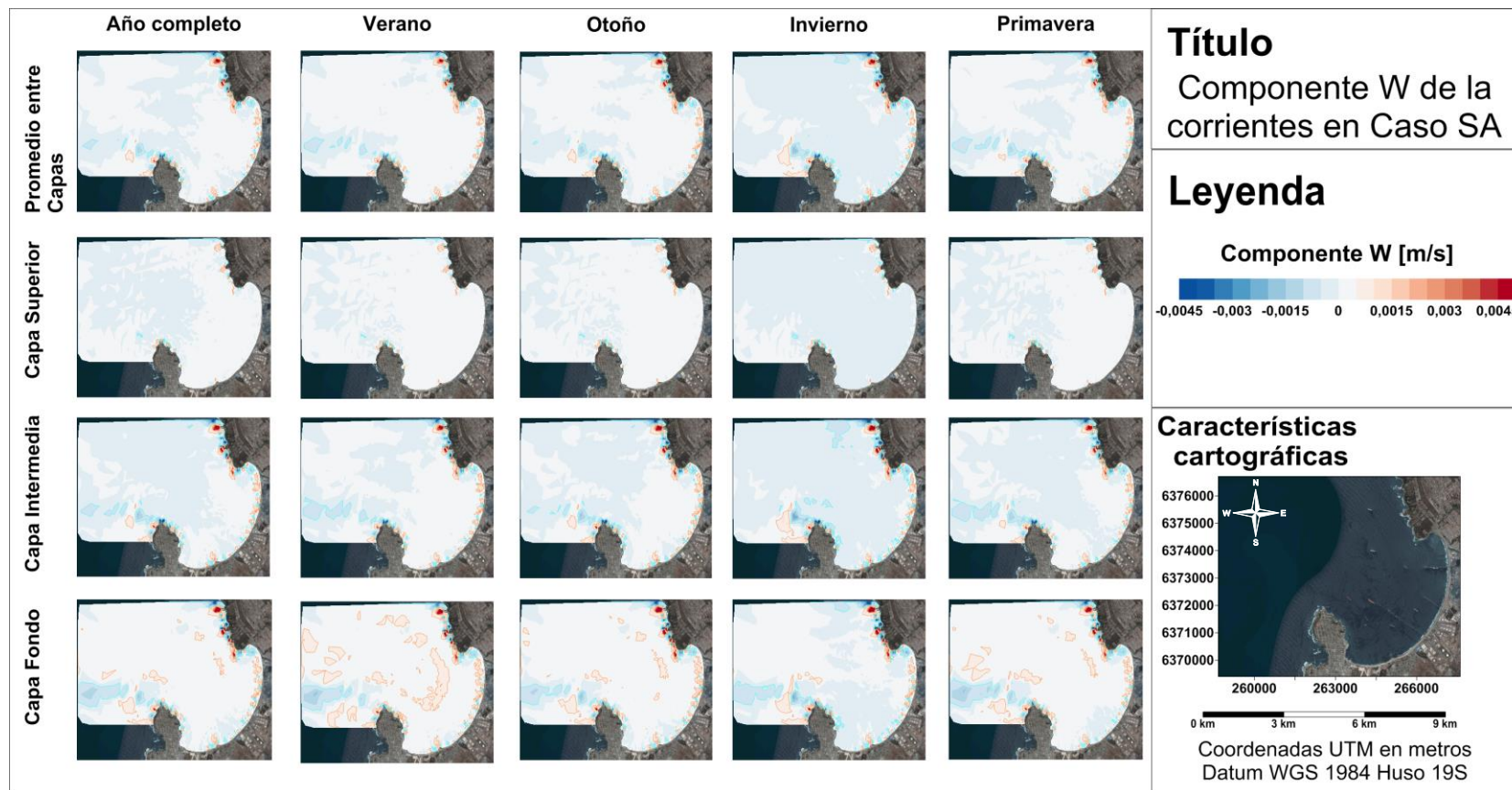


Figura 13-74 Componente W de la corriente en la simulación caso SA.

Fuente: Elaboración propia.

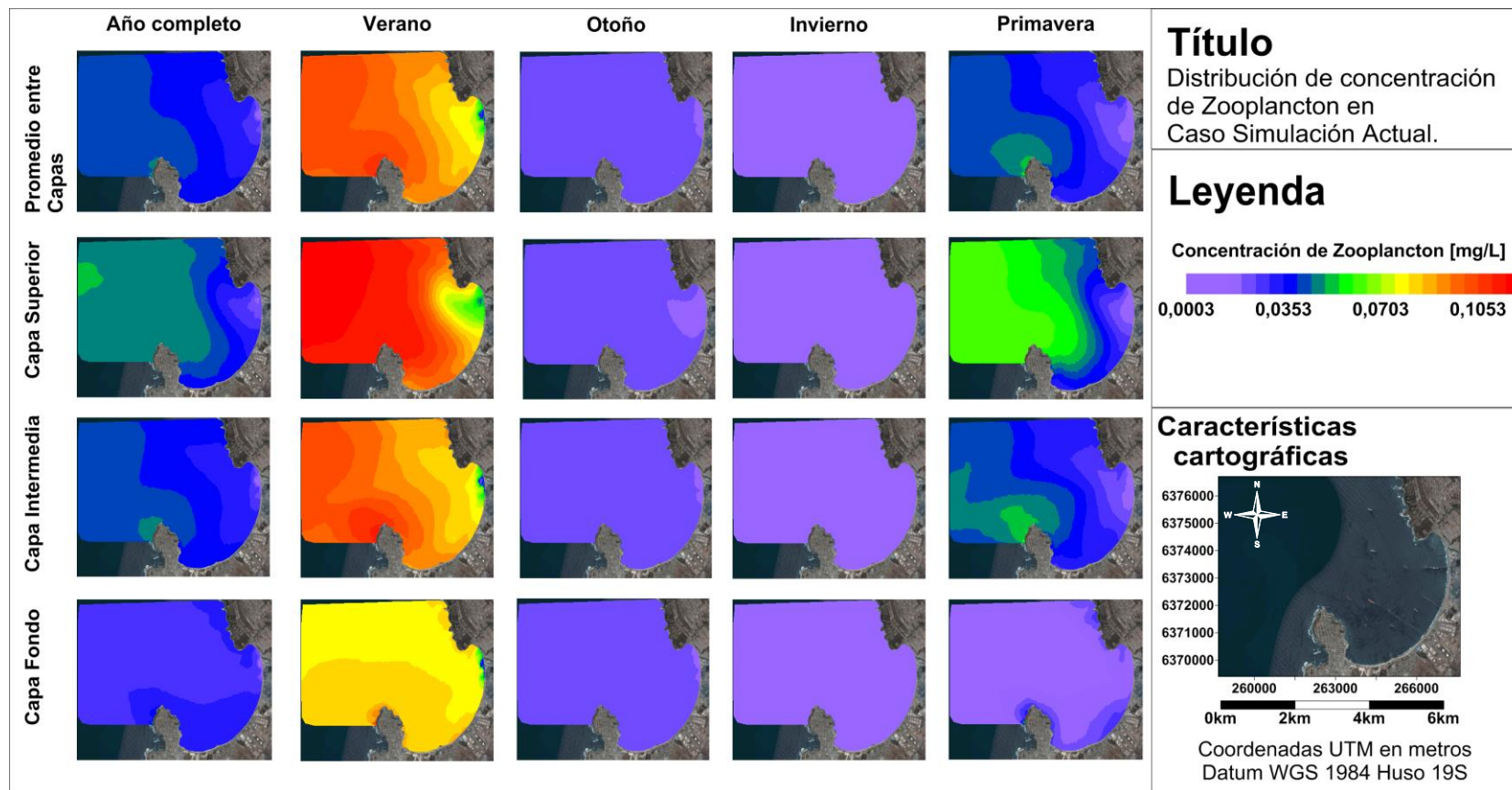


Figura 13-75 Distribución de concentración de zooplancton en caso SA.
Fuente: Elaboración propia.

13.6 ANEXO RESULTADOS

13.6.1 DIFERENCIAL DE SALINIDAD ENTRE EL CASO SA Y CASO SN

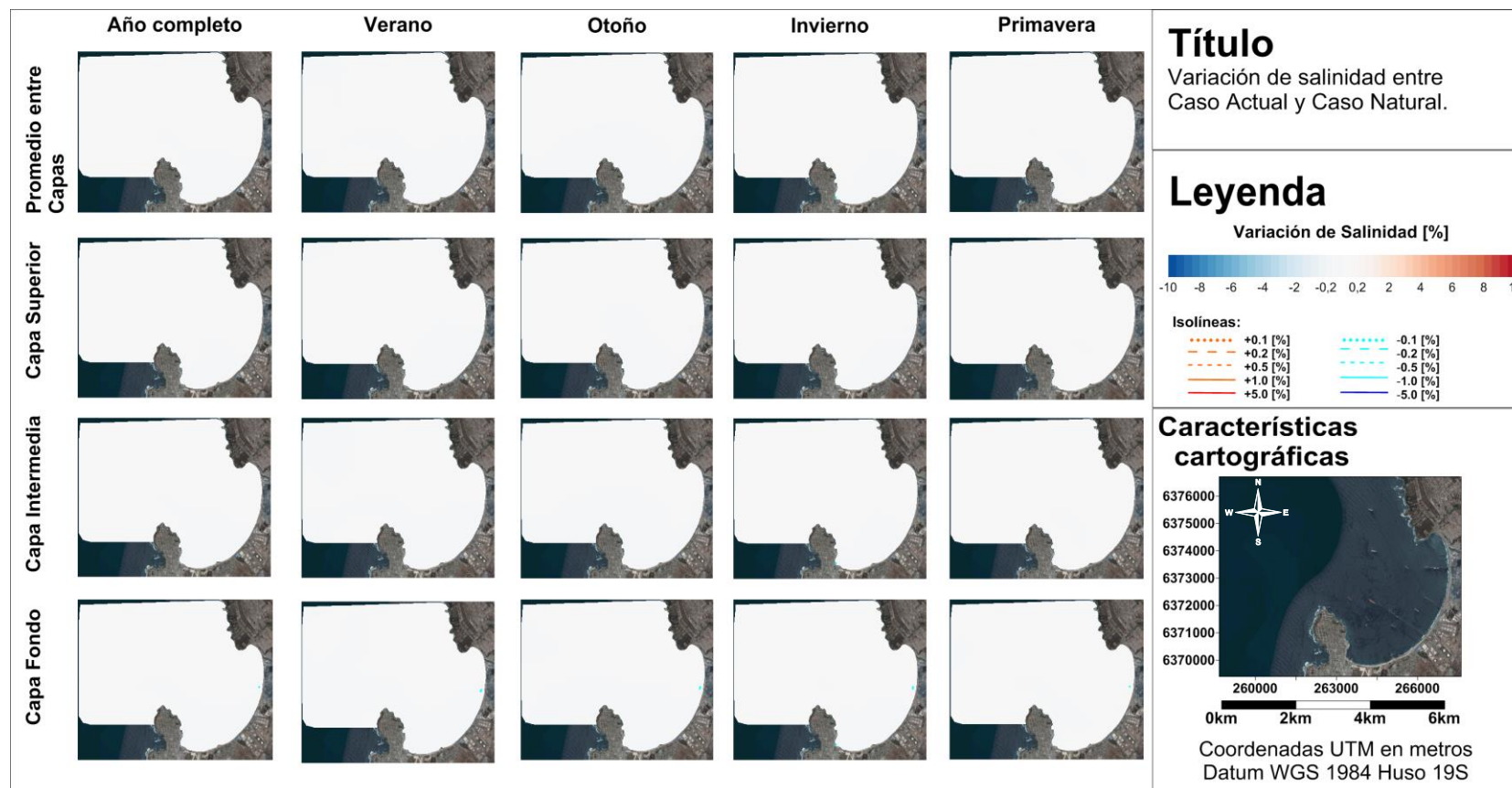


Figura 13-76 Diferencial de salinidad entre los casos SA y SN.
Fuente: Elaboración propia.

13.6.2 GRÁFICOS DE LOS COEFICIENTES TRIX EN LAS DISTINTAS SIMULACIONES

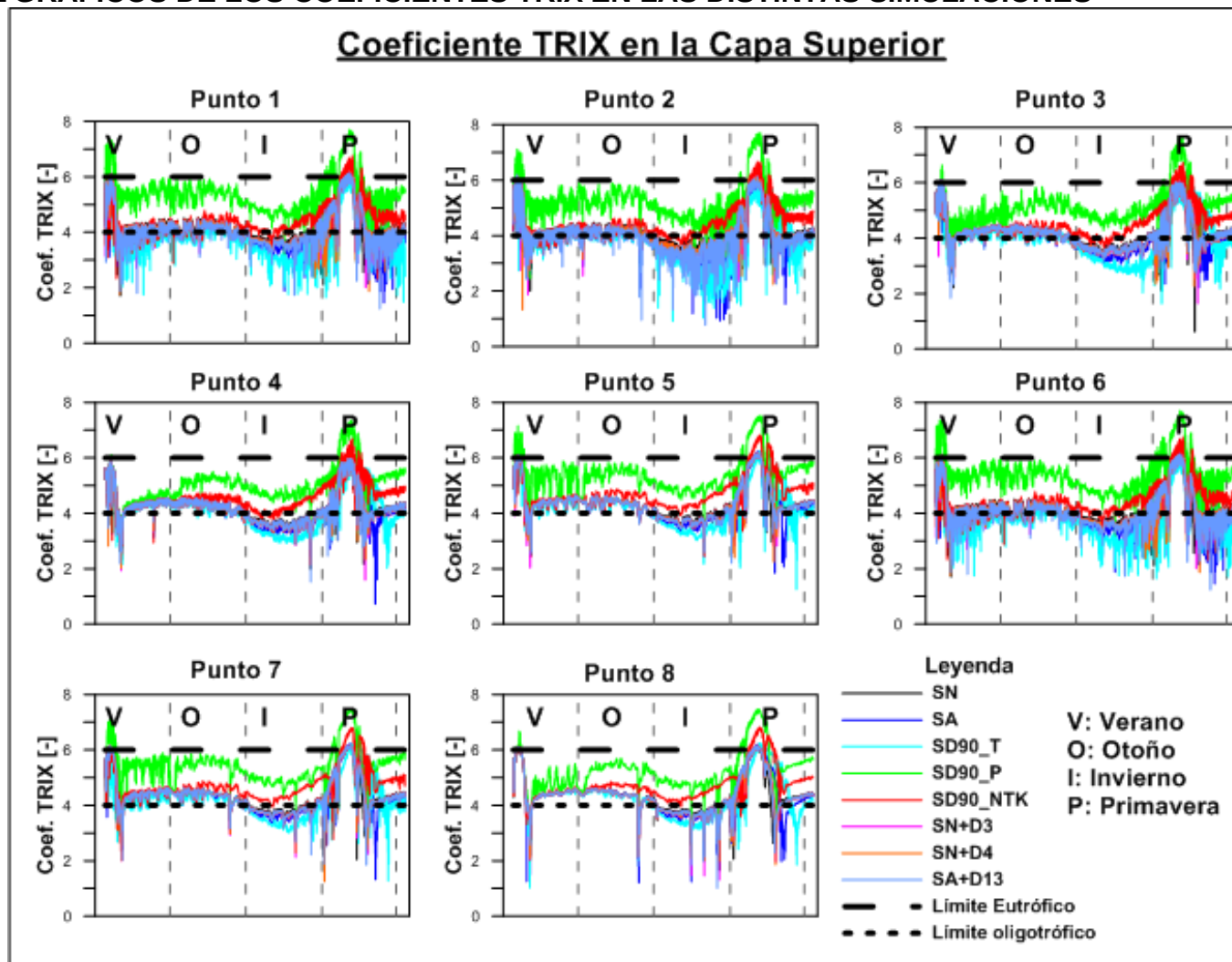


Figura 13-77 Gráfica coef. TRIX capa superior en distribución de puntos.
Fuente: Elaboración propia.

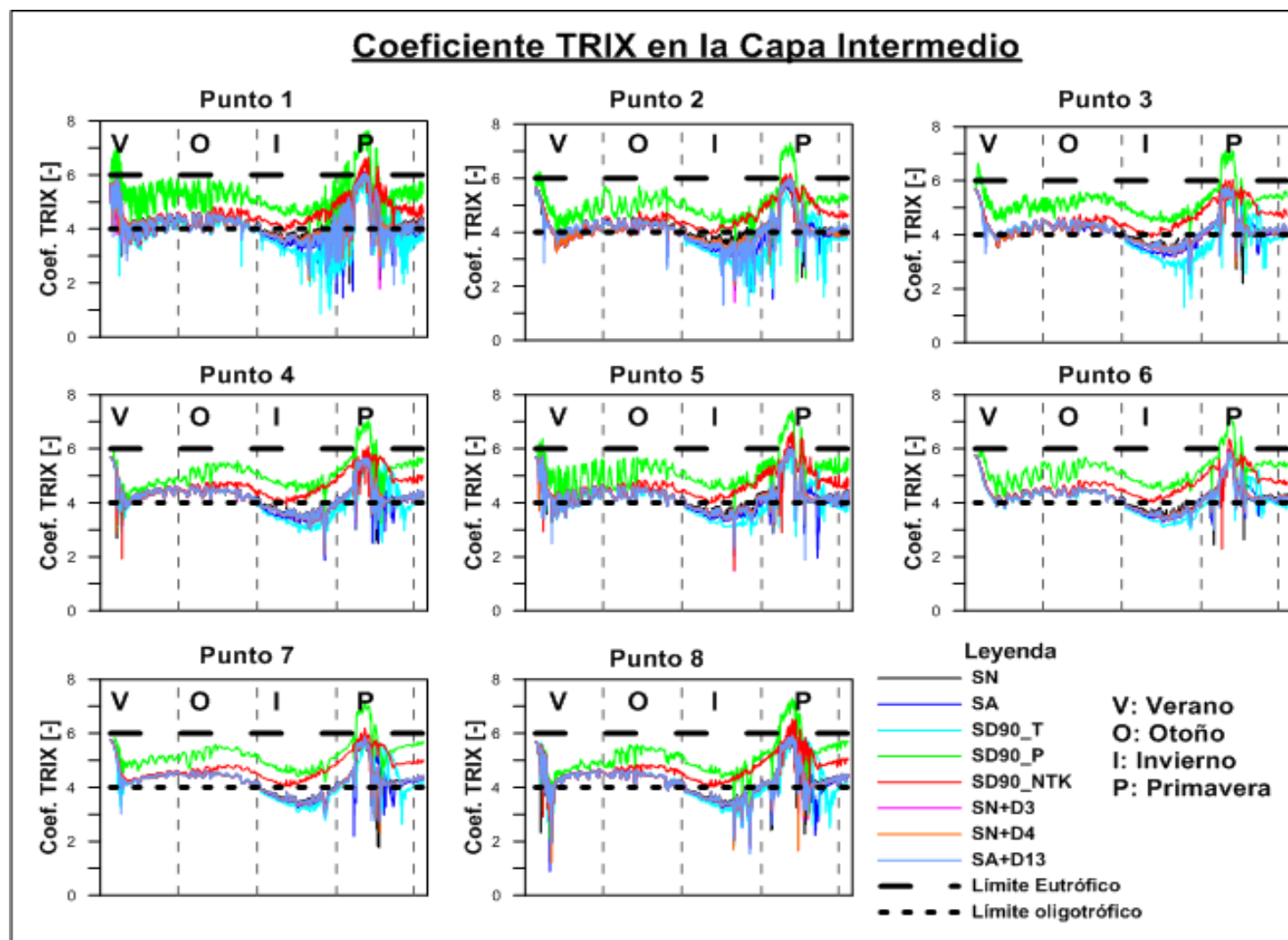


Figura 13-78 Gráfica coef. TRIX capa intermedia en distribución de puntos.
Fuente: Elaboración propia.

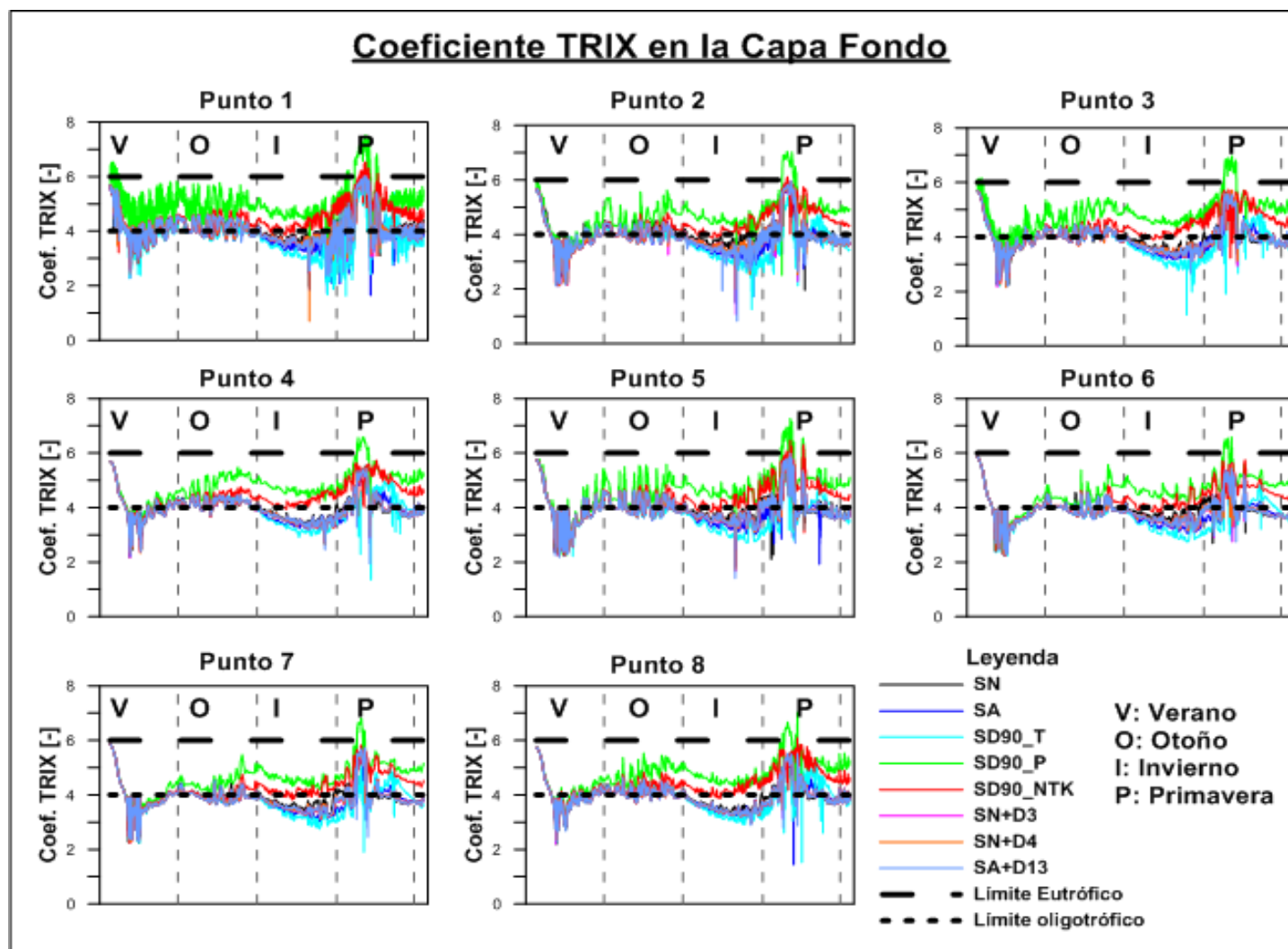


Figura 13-79 Gráfica coef. TRIX capa fondo en distribución de puntos.
Fuente: Elaboración propia.

13.7 ANEXO DISCUSIÓN

13.7.1 DIFERENCIAL DE COMPONENTE W EN DISTINTAS SIMULACIONES

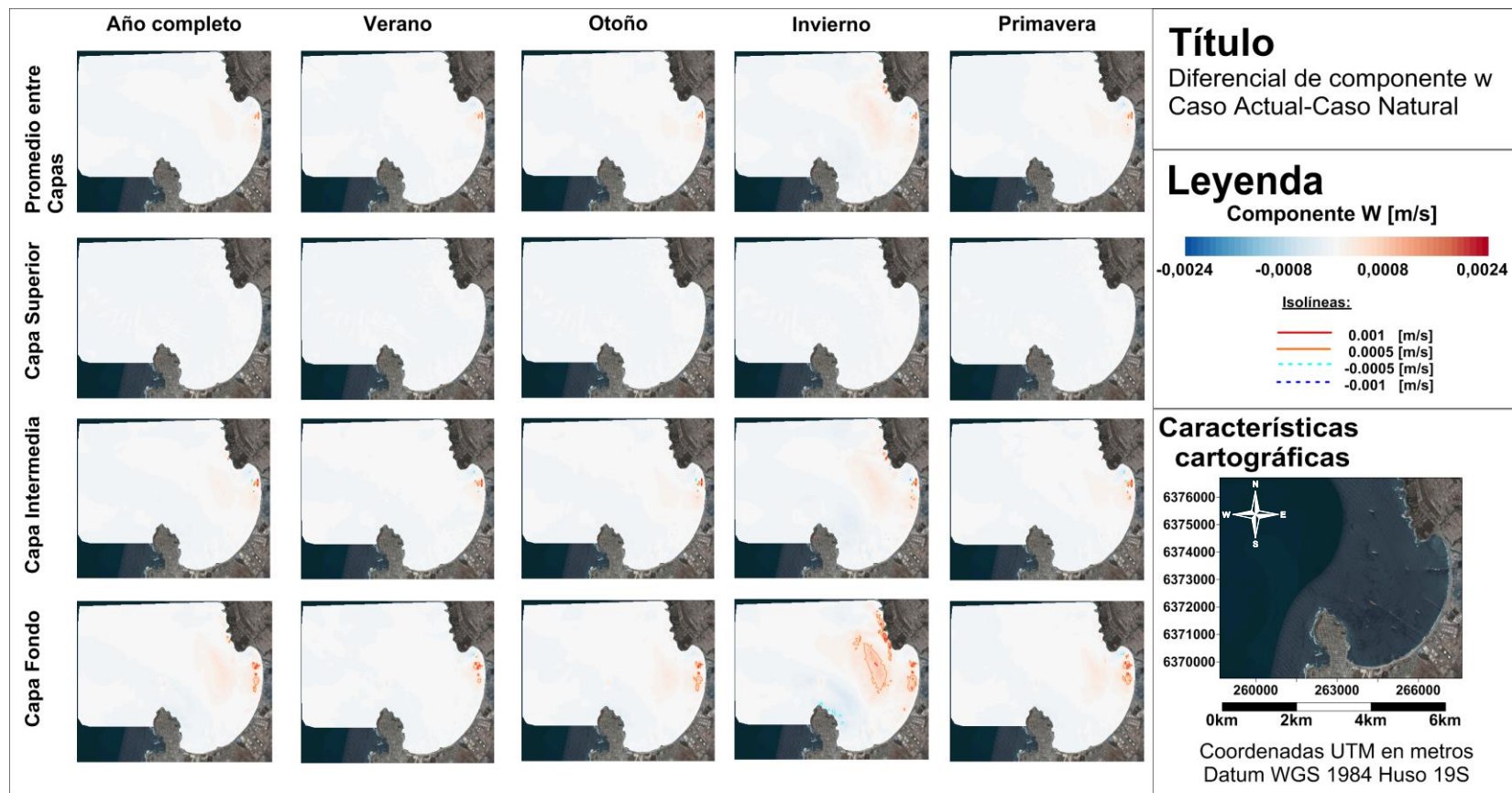


Figura 13-80 Diferencial de componente w de la corriente entre los casos SA y SN.
Fuente: Elaboración propia.

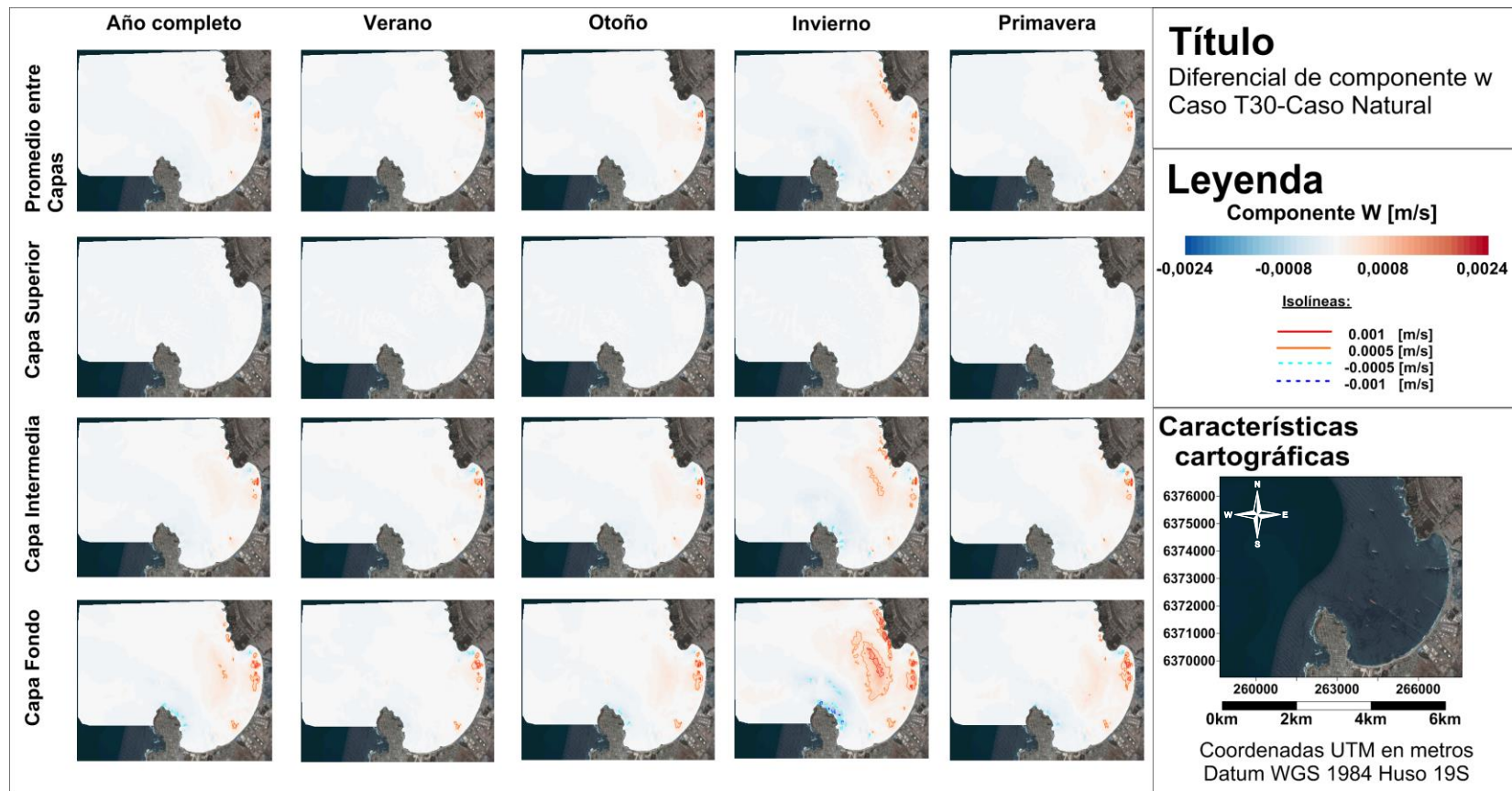


Figura 13-81 Diferencial de componente w de la corriente entre los casos SD90_T y SN.

Fuente: Elaboración propia.

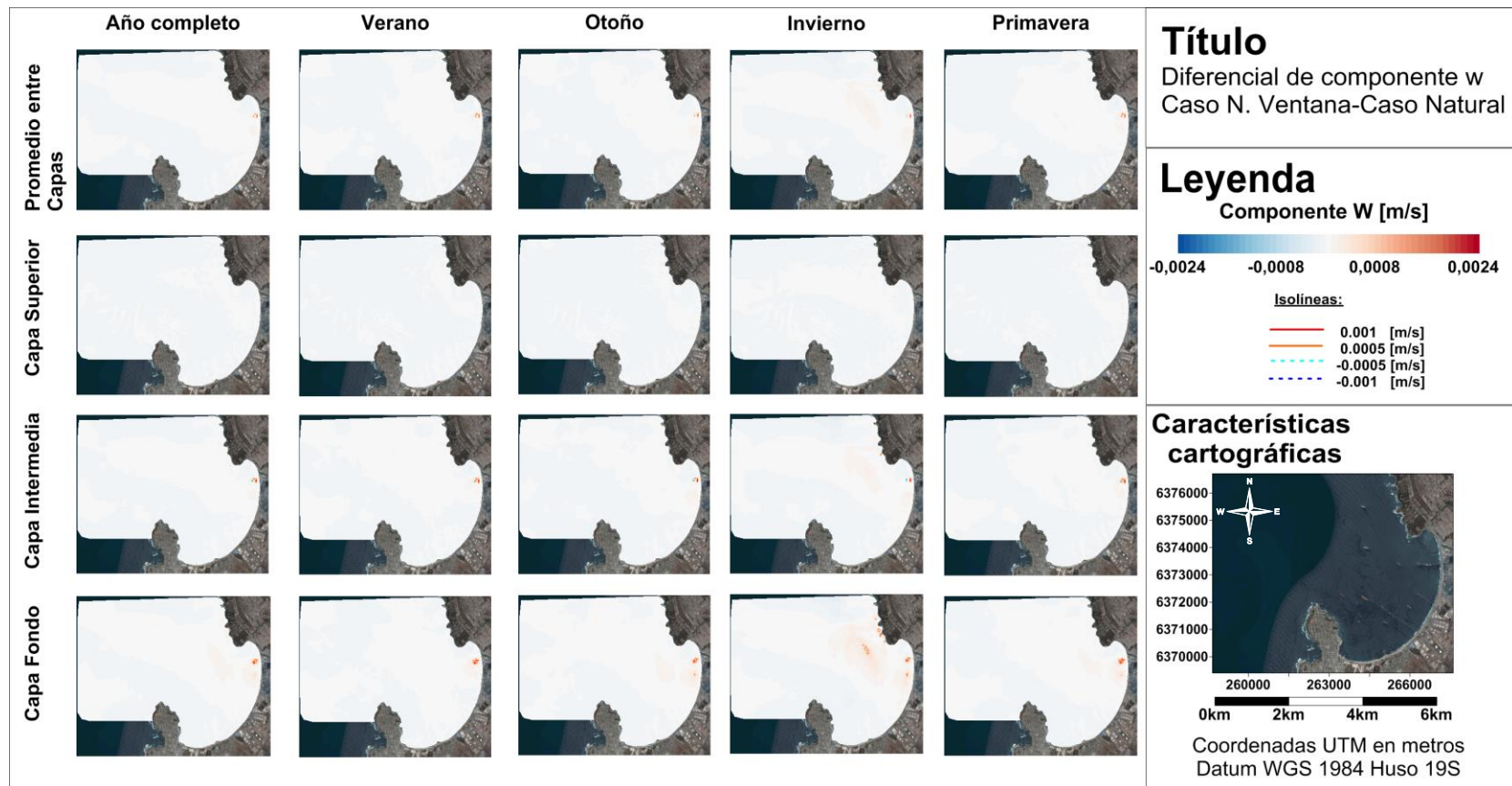


Figura 13-82 Diferencial de componente w de la corriente entre los casos SN+D3 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

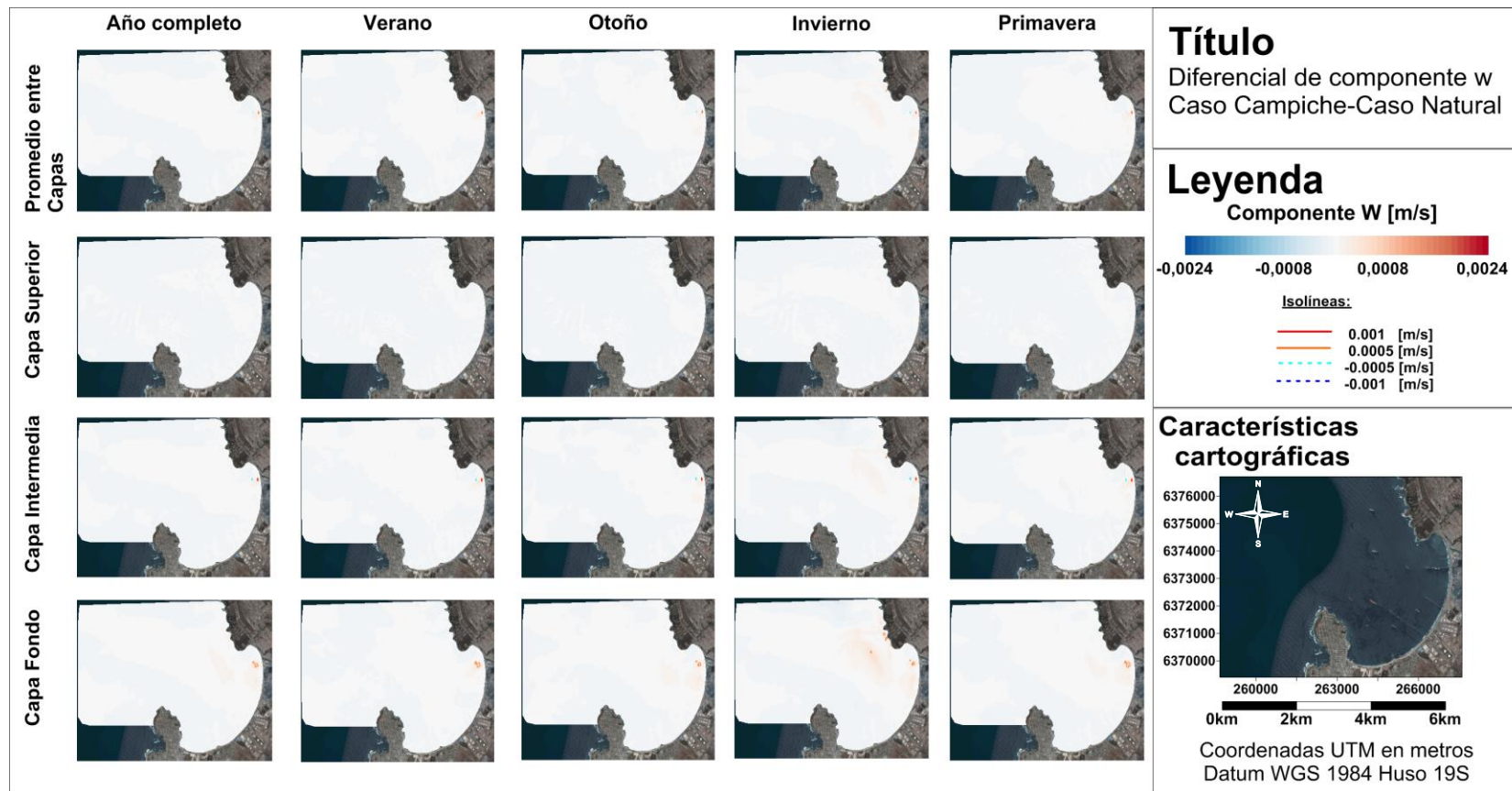


Figura 13-83 Diferencial de componente w de la corriente entre los casos SN+D4 y SN.

Fuente: Elaboración propia.

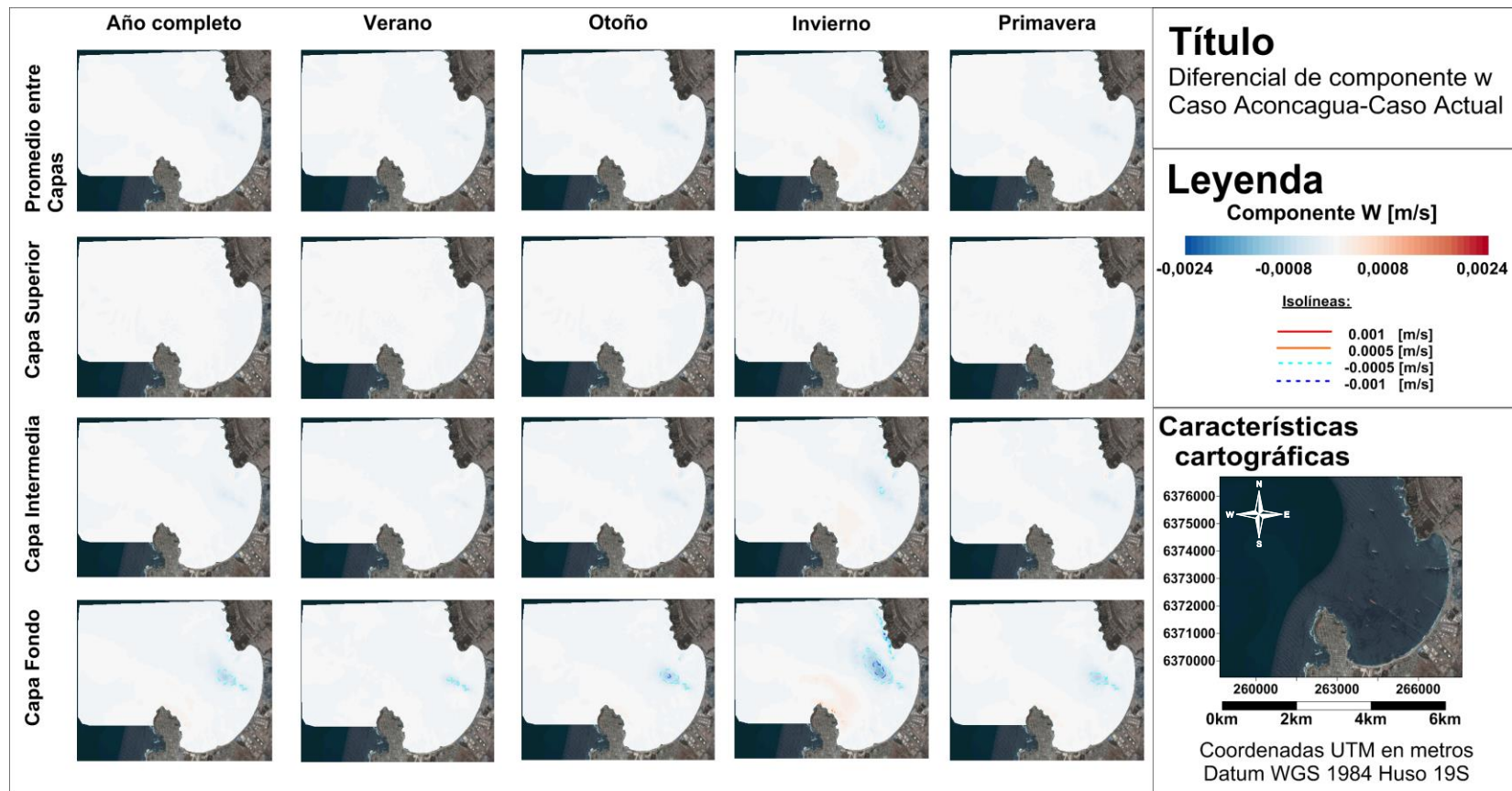


Figura 13-84 Diferencial de componente w de la corriente entre los casos SA+D13 y SA.

Fuente: Elaboración propia.

