



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR CAUDALES DE DILUCIÓN EN
ESTUARIOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

THOMAS ANDREW BOOTH RIEBEL

PROFESOR GUÍA:
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARCELO OLIVARES ALVEAL
MESENIA ATENAS VIVANCO
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2011

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL
POR: THOMAS ANDREW BOOTH RIEBEL
FECHA: 25 DE ABRIL DE 2011
PROF. GUÍA: SR. YARKO NIÑO CAMPOS

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR CAUDALES DE DILUCIÓN EN ESTUARIOS

A petición de la Dirección General de Aguas (DGA) se llevó a cabo durante el año 2009 un estudio titulado *Análisis Metodológico para la Determinación de Caudales de Dilución en Zonas Estuarinas* en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, con el objetivo principal de establecer una metodología para determinar caudales de dilución en estuarios en el marco de la aplicación de la normativa de emisión DS N°90/2000. En el presente trabajo de título se muestra la metodología desarrollada, además de un análisis más acabado de su validez, realizado con posterioridad al estudio de la DGA. Los resultados obtenidos de dicho análisis muestran la necesidad de modificar en cierta medida la metodología desarrollada.

Dadas las características del escurrimiento en el sector del río influenciado por el mar, se define una metodología que incluye necesariamente la modelación numérica del escurrimiento y de los procesos de mezcla. En este sentido se propone utilizar las ecuaciones de Saint Venant en su forma unidimensional para modelar el escurrimiento, la ecuación de advección-dispersión unidimensional para modelar los procesos de mezcla en el caso que se tenga baja estratificación de la columna de agua y el modelo de cuña salina en régimen permanente de Olivares (2000) para modelar la intrusión en el caso que se tenga alta estratificación.

La metodología desarrollada fue aplicada y validada utilizando mediciones de terreno realizadas en tres estuarios que se consideraron representativos de la diversidad de estuarios existentes en el territorio nacional: río Toltén, ubicado en la Región de la Araucanía; río Lebu, ubicado en la Región del Bío Bío; y estero Tongoy, ubicado en la Región de Coquimbo. Los resultados de la validación realizada como parte del proyecto de la DGA se consideraron satisfactorios, por lo que se consideró concluida la definición de la metodología de determinación de caudales de dilución en estuarios.

Con posterioridad al proyecto de la DGA se realizó un análisis más acabado de la validez de los modelos numéricos que forman parte del estudio, a partir del cual se definieron un conjunto de modificaciones a la metodología desarrollada que merecen ser tomadas en consideración por la autoridad.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE TÍTULO	2
CAPITULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES	3
2.1. DECRETO SUPREMO N°90/2000 Y CAUDAL DE DILUCIÓN.....	3
2.2. INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DE ESTUARIOS.....	4
2.2.1. DEFINICIÓN DE ESTUARIO	4
2.2.2. FENÓMENO DE MAREA	5
2.2.3. PROCESOS DE MEZCLA EN ESTUARIOS.....	5
2.2.4. GEOMORFOLOGÍA	9
2.3. MODELOS NUMÉRICOS	9
2.3.1. MODELACIÓN IMPERMANENTE DEL ESCURRIMIENTO EN EL ESTUARIO.....	9
2.3.2. RELACIONES PARA EL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN	10
2.3.3. MODELO DE MEZCLA PARA BAJA ESTRATIFICACIÓN.....	11
2.3.4. MODELO DE CUÑA SALINA	12
2.3.5. OTRAS ECUACIONES RELEVANTES	15
CAPITULO 3: METODOLOGÍA PARA DETERMINAR $Q_{DILUCIÓN}$.....	18
3.1. ESQUEMA GENERAL	18
3.2. METODOLOGÍA PARA OBTENER EL CAUDAL DE DILUCIÓN	19
3.2.1. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO	19
3.2.2. DETERMINACIÓN DEL MÍNIMO CAUDAL PARA TENER CUÑA SALINA	20
3.2.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA.....	21
3.2.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL.....	21
3.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL	22
3.2.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN.....	23
3.2.7. RESUMEN.....	23
3.3. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN TERRENO	23
3.3.1. PERFILES DE PROFUNDIDAD	24
3.3.2. PERFILES DE SALINIDAD.....	24
3.3.3. VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO.....	24
3.3.4. SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO.....	25
3.3.5. CAUDAL DEL RÍO	25
CAPITULO 4: ESTUDIO DE TERRENO.....	26
4.1. METODOLOGÍA GENERAL	26

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS RÍOS	26
4.2.1. RÍO TOLTÉN.....	26
4.2.2. RÍO LEBU.....	28
4.2.3. ESTERO TONGOY	29
4.3. FECHAS DE MEDICIÓN	30
4.4. RESULTADOS DE CAMPAÑAS DE TERRENO.....	31
4.4.1. RÍO TOLTÉN.....	31
4.4.2. RÍO LEBU.....	37
4.4.3. ESTERO TONGOY	44
4.5. RESUMEN DE RESULTADOS.....	49
CAPITULO 5: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	50
5.1. RÍO TOLTÉN	50
5.1.1. LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO	50
5.1.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA.....	50
5.1.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA.....	51
5.1.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL.....	52
5.1.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL	52
5.1.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN.....	52
5.1.7. RESUMEN.....	52
5.2. RÍO LEBU	53
5.2.1. LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO	53
5.2.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA.....	54
5.2.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA	54
5.2.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL.....	55
5.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL	55
5.2.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN.....	56
5.2.7. RESUMEN.....	57
5.3. ESTERO TONGOY.....	57
CAPITULO 6: VALIDACIÓN.....	59
6.1. LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO	59
6.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA.....	60
6.2.1. RÍO TOLTÉN.....	60
6.2.1. RÍO LEBU.....	60
6.3. MODELO DE CUÑA SALINA PERMANENTE DE OLIVARES (2000).....	61
6.3.1. RÍO TOLTÉN.....	61
6.3.2. RÍO LEBU.....	65
6.4. MODELO DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN	68
CAPITULO 7: CONCLUSIONES	73

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

7.1. SOBRE EL SENTIDO DE ESTIMAR CAUDALES DE DILUCIÓN EN ESTUARIOS	73
7.2. SOBRE LOS CAUDALES DE DILUCIÓN OBTENIDOS PARA LOS ESTUARIOS PILOTO	74
7.3. SOBRE EL NIVEL DEL MAR CONSIDERADO COMO CONDICIÓN DE BORDE DEL MODELO DE OLIVARES (2000).....	75
7.4. SOBRE LA EXISTENCIA DE UNA EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA MAYOR QUE LA EXTENSIÓN DE UNA INTRUSIÓN EN FORMA DE MEZCLA PARCIAL.....	75
7.5. SOBRE EL CAUDAL DEL RÍO CONSIDERADO COMO CONDICIÓN DE BORDE DE LOS MODELOS DE SAINT VENANT Y DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN	76
7.6. ALCANCE DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA.....	76
7.7. SOBRE LA CONDICIÓN DE BORDE DE AGUAS ABAJO DEL MODELO DE OLIVARES (2000) ..	76
CAPITULO 8: BIBLIOGRAFÍA.....	77

ANEXO I: MODELO IMPERMANENTE DE CUÑA SALINA.

ANEXO II: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD.

ANEXO III: PERFILES LONGITUDINALES DE SALINIDAD.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: ESQUEMA DE ESTUARIO FUERTEMENTE ESTRATIFICADO. NIÑO Y TAMBURRINO (2002).	7
FIGURA 2.2: ESQUEMA DE ESTUARIO PARCIALMENTE MEZCLADO. BUSTOS (2007).	8
FIGURA 2.3: ESQUEMA DE ESTUARIO BIEN MEZCLADO. BUSTOS (2007).	8
FIGURA 2.4: ESQUEMA CUÑA SALINA PARA LECHO IRREGULAR. OLIVARES (2000).	13
FIGURA 2.5: COEFICIENTE DE FRICCIÓN INTERFACIAL. ARITA Y JIRKA (1987).	14
FIGURA 3.1: ESQUEMA DE LA SUBDIVISIÓN DE UN ESTUARIO.	18
FIGURA 3.2. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	20
FIGURA 3.3: ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PARA DETERMINAR CAUDALES DE DILUCIÓN.	23
FIGURA 4.1: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA . TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.	27
FIGURA 4.2: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL. TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.	27
FIGURA 4.3: PROB. DE EXCEDENCIA DE CAUDAL MEDIO DIARIO. TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT. .	27
FIGURA 4.4: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA. LEBU EN LOS ÁLAMOS.	28
FIGURA 4.5: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL. LEBU EN LOS ÁLAMOS.	28
FIGURA 4.6: PROB. DE EXCEDENCIA DE CAUDAL MEDIO DIARIO. LEBU EN LOS ÁLAMOS.	29
FIGURA 4.7: IMAGEN SATELITAL DEL ESTERO TONGOY.	29
FIGURA 4.8: UBICACIÓN DEL LUGAR DE AFORO Y DE MEDICIÓN DE LA SALINIDAD Y DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA. RÍO TOLTÉN.	31
FIGURA 4.9: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA TOLTÉN. (A) 21 DE ENERO Y (B) 9 DE MARZO.	32
FIGURA 4.9 (CONTINUACIÓN): NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA TOLTÉN. (C) 14 DE JUNIO Y (D) 19 DE JUNIO.	33
FIGURA 4.10: MÍNIMA COTA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN REFERIDA A NRS.	34
FIGURA 4.11: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	34
FIGURA 4.12: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	36
FIGURA 4.13: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL. RÍO TOLTÉN..	37
FIGURA 4.14: UBICACIÓN DEL LUGAR DE AFORO Y DE MEDICIÓN DE LA SALINIDAD Y DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA. RÍO LEBU.	38
FIGURA 4.15: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA LEBU. (A) 19 DE ENERO. (B) 11 DE MARZO Y (C) 12 DE JUNIO.	39
FIGURA 4.15 (CONTINUACIÓN): NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA LEBU. 22 DE JUNIO.	40
FIGURA 4.16: MÍNIMA COTA DE FONDO DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU REFERIDA A NRS.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.17: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.	41
FIGURA 4.18: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	42
FIGURA 4.19: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL. RÍO LEBU.	44
FIGURA 4.20: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA TONGOY. (A) 7 DE ABRIL Y (B) 7 DE JULIO.	45
FIGURA 4.21: MÍNIMA COTA DE FONDO DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY REFERIDA A NRS. ...	46
FIGURA 4.22: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.	46
FIGURA 4.23. PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.....	47
FIGURA 4.24: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL. ESTERO TONGOY.....	48
FIGURA 5.1. EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	50
FIGURA 5.2. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000) EN TOLTÉN.	51
FIGURA 5.3. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	52
FIGURA 5.4. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.	53
FIGURA 5.5. EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.	53
FIGURA 5.6. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000) EN LEBU.....	55
FIGURA 5.7. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.	56
FIGURA 5.8. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.	56
FIGURA 5.9. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.	57
FIGURA 6.1. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000). TOLTÉN EN ENERO..	62
FIGURA 6.2. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000). TOLTÉN EN MARZO.	63
FIGURA 6.3. COMPARACIÓN DE MODELOS PERMANENTE E IMPERMANENTE PARA TOLTÉN.....	65
FIGURA 6.4. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000). LEBU EN JUNIO.	66
FIGURA 6.5. COMPARACIÓN DE MODELOS PERMANENTE E IMPERMANENTE PARA LEBU.....	68
FIGURA 6.6. COEFICIENTE DE DISPERSIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	69
FIGURA 6.7. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN. RÍO LEBU, 19 DE ENERO.	70
FIGURA 6.8. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN. RÍO LEBU, 11 DE MARZO.	70
FIGURA 6.9. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN. RÍO LEBU, 12 DE JUNIO.....	70
FIGURA 6.10. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN HEC-RAS. RÍO LEBU, 22 DE JUNIO.	71
FIGURA 6.11. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN HEC-RAS. RÍO TOLTÉN, 21 DE ENERO.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 6.12. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN HEC-RAS. RÍO TOLTÉN, 9 DE MARZO.....	71
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1: FECHAS DE CAMPAÑAS DE TERRENO REALIZADAS DURANTE EL AÑO 2009.....	30
TABLA 4.2: CAUDAL DEL RÍO TOLTÉN PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.....	31
TABLA 4.3: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.....	35
TABLA 4.4: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.....	35
TABLA 4.5: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.....	36
TABLA 4.6: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.....	36
TABLA 4.7: CAUDAL DEL RÍO LEBU PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.....	38
TABLA 4.8: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.....	41
TABLA 4.9: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	41
TABLA 4.10: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	42
TABLA 4.11: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	43
TABLA 4.12: CAUDAL DEL ESTERO TONGOY PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.....	44
TABLA 4.13: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.....	46
TABLA 4.14: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO PARA EL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.....	47
TABLA 4.15: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.....	47
TABLA 4.16: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA DESDE LA BOCA PARA EL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.....	48
TABLA 4.17: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO TOLTÉN.....	49
TABLA 4.18: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO LEBU.....	49
TABLA 4.19: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA ESTERO TONGOY.....	49
TABLA 5.1: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{LÍMITE}$ PARA EL RÍO TOLTÉN.....	50
TABLA 5.2: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA. RÍO TOLTÉN.....	51
TABLA 5.3: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.....	53
TABLA 5.4: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{LÍMITE}$. RÍO LEBU.....	54
TABLA 5.5: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA. RÍO LEBU.....	54
TABLA 5.6: CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA VIRTUAL PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	56
TABLA 5.7: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.....	57
TABLA 6.1: VARIACIÓN DEL NIVEL Y DEL CAUDAL EN EL LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 6.2: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$	60
TABLA 6.3: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$	61
TABLA 6.4: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.....	62
TABLA 6.5: COMPARACIÓN DE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y MEDIDAS.....	62
TABLA 6.6: COMPARACIÓN ENTRE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y REAL.....	63
TABLA 6.7: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.....	64
TABLA 6.8: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.....	65
TABLA 6.9: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.....	65
TABLA 6.10: COMPARACIÓN ENTRE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y MEDIDAS..	66
TABLA 6.11: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.....	67
TABLA 6.12: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA EN FORMA DE MEZCLA PARCIAL PARA LEBU...	69

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Durante el año 2009 la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), dando cumplimiento al reglamento de dictación de normas, llevó a cabo el primer proceso de revisión de la normativa de emisión DS N°90/2000¹, dentro del cual se propuso considerar a los estuarios como una nueva categoría de cuerpo de agua receptor, con su propia tabla de concentraciones de descarga máximas permitidas. De manera adicional se identificó la necesidad de desarrollar una metodología para determinar caudales de dilución en estuarios, tarea que asumió el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, a petición del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas (DGA). Como resultado del estudio se entregó un informe titulado *Análisis Metodológico para la Determinación de Caudales de Dilución en Zonas Estuarinas*.

El presente trabajo de título muestra la metodología desarrollada, además de un análisis más acabado de su validez realizado con posterioridad al estudio de la DGA. Los resultados obtenidos del nuevo proceso de validación indican la necesidad de modificar en cierta medida la metodología desarrollada.

Es necesario mencionar que el terremoto ocurrido el 27 de febrero del 2010 afectó en gran medida la morfología del estuario del río Lebu, cuerpo de agua estudiado como parte del proyecto de la DGA, por lo que los resultados relacionados con dicho estuario no se pueden seguir considerando válidos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo del presente trabajo de título es definir una metodología para estimar caudales de dilución en estuarios en el marco de la aplicación de la normativa DS N°90/2000.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar la metodología de estimación de caudales de dilución a estuarios piloto representativos de la diversidad de estuarios existentes en el territorio nacional. Llevar a cabo las campañas de terreno necesarias para aquello.

¹ Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales.

- Desarrollar un modelo impermanente de cuña salina adecuado para analizar la validez de aplicar el modelo permanente de cuña salina de Olivares (2000) a estuarios que presentan influencia de marea.
- Validar la metodología desarrollada utilizando las mediciones de terreno como referencia. Para el análisis del modelo permanente de cuña salina se utiliza además el modelo impermanente desarrollado como parte del presente trabajo de título.
- Realizar un análisis crítico de la metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada tomando en cuenta los nuevos antecedentes aportados por el presente trabajo de título. Sugerir las modificaciones necesarias que permitan resolver los posibles problemas que se puedan detectar durante el nuevo proceso de validación.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE TÍTULO

El segundo capítulo entrega una revisión de antecedentes sobre los procesos físicos asociados a estuarios, sobre los modelos numéricos propuestos en la metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada y sobre la normativa de emisión DS N°90/2000. El tercer capítulo explica la metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada. El cuarto capítulo muestra los resultados obtenidos de las campañas de terreno. El quinto capítulo muestra la aplicación de la metodología propuesta a los estuarios piloto. El sexto capítulo muestra la validación de los modelos utilizados, basándose en la información obtenida en las campañas de terreno y en la aplicación de un modelo impermanente de cuña salina desarrollado en el Anexo I. El séptimo capítulo se encarga de concluir respecto del trabajo realizado. Finalmente el octavo capítulo muestra la bibliografía consultada. Además se incluyen tres anexos que muestran el desarrollo de un modelo impermanente de cuña salina, la información de mareas, salinidad y profundidad medida en terreno y figuras que muestran los perfiles longitudinales de salinidad medidos en terreno.

CAPITULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES

El presente capítulo introduce el concepto de caudal de dilución y su aplicación en el caso de estuarios. Además se presenta una revisión bibliográfica de lo referente al fenómeno de intrusión salina en estuarios, con énfasis en su modelación.

2.1. DECRETO SUPREMO N°90/2000 Y CAUDAL DE DILUCIÓN

El principal objetivo del presente trabajo es establecer una metodología para determinar caudales de dilución en estuarios. En este sentido, es la normativa de emisión DS N°90/2000 la que define el concepto de caudal de dilución en ríos y la Minuta DGA N°143 la que establece la forma de obtenerlo.

El caudal de dilución es un parámetro que da cuenta de la cantidad de agua disponible para diluir cierta descarga de contaminante, haciendo el supuesto de mezcla completa e instantánea en la sección de escurrimiento. La magnitud del caudal de dilución es utilizada para establecer la concentración máxima de descarga aceptada para dicho cuerpo de agua, conocido el caudal de la fuente emisora.

Para el caso de cuerpos de agua fluviales sin capacidad de dilución, las concentraciones máximas de descarga permitidas según tipo de contaminante quedan definidas por la Tabla N°1 del DS N°90/2000. Si el cuerpo de agua fluvial posee capacidad de dilución, a las fuentes emisoras se les permite aprovechar dicha capacidad, incrementando el límite establecido en la Tabla N°1 del DS N°90/2000 según la Ecuación (2.1), ateniéndose siempre a una concentración máxima definida en la Tabla N°2 del DS N°90/2000.

$$C_{MaxDescarga} = T_1 \cdot (1 + d) \leq T_2 \tag{2.1}$$

donde $C_{MaxDescarga}$ corresponde a la concentración máxima permitida para la descarga considerando capacidad de dilución, T_1 a la concentración máxima permitida sin capacidad de dilución (Tabla N°1 del DS N°90/2000), T_2 a la concentración máxima permitida con capacidad de dilución (Tabla N°2 del DS N°90/2000) y d a la tasa de dilución, definida por la Ecuación (2.2).

$$d = \frac{Q_{Dilución}}{Q_{Descarga}} \tag{2.2}$$

donde $Q_{Dilución}$ corresponde al caudal de dilución del cuerpo receptor y $Q_{Descarga}$ al caudal medio mensual del efluente vertido durante el mes de máxima producción de residuos líquidos. Cabe mencionar que $Q_{Dilución}$ se define como “la cantidad de agua disponible

expresada en volumen por unidad de tiempo para determinar la capacidad de dilución en un cuerpo receptor”.

Es posible demostrar que la Ecuación (2.1) se deduce a partir de un balance de volumen de agua y de masa de contaminante aplicado a un volumen de control definido por dos secciones del cauce cercanas al punto de descarga, considerando mezcla completa e instantánea en la sección de escurrimiento. Dichos supuestos dificultan la aplicación del concepto de caudal de dilución a un estuario, dadas las características típicas de su escurrimiento, esto es, flujo impermanente debido a la marea y posible estratificación de la columna de agua debido a la diferencia de densidad existente entre el agua dulce y el agua salada.

Por último, cabe mencionar que para cuerpos de agua fluviales sin influencia del mar, el caudal de dilución se asimila al caudal ecológico.

2.2. INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DE ESTUARIOS

Los estuarios corresponden a cuerpos de agua costeros semicerrados, donde el agua dulce se mezcla con el agua marina (Dyer, 1973), lo que determina la existencia de gradientes de salinidad, temperatura y por lo tanto de densidad. Lo anterior, sumado al fenómeno de marea, hace que los procesos de mezcla en estuarios sean en general más complejos que los que ocurren en ríos.

2.2.1. DEFINICIÓN DE ESTUARIO

Una de las definiciones de estuario más aceptadas es la propuesta por Pritchard (1967), quien indica que los estuarios son “cuerpos de agua semicerrados que poseen una conexión libre con el mar, y en los cuáles el agua marina es diluida por el agua dulce proveniente de la escorrentía de la cuenca”.

Existen tres criterios clásicos para definir el límite de aguas arriba de un estuario, los cuales determinan la extensión del mismo:

- Límite basado en la salinidad: Pritchard (1967) señala que un estuario queda limitado por el área en la cual la salinidad se encuentra en el rango de 0.1 g/l a 30-35 g/l.
- Límite basado en la onda de marea: Fairbridge (1980) propone que el límite de aguas arriba de un estuario se encontraría en la zona donde se deja de percibir el efecto de la marea.

- Límite basado en los sedimentos: Dalrymple (1992) define los límites de un estuario en función del transporte de sedimentos, señalando que el estuario es toda el área inundada que recibe aporte sedimentario tanto de parte del río como del mar.

En el acápite 3.2.1 se discute cuál de los criterios mencionados resulta ser el más conveniente para definir los límites entre el estuario y el río en el marco de la metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada.

2.2.2. FENÓMENO DE MAREA

Se conoce como marea a la variación periódica del nivel del mar debido a fuerzas gravitacionales ejercidas por el Sol o la Luna (mareas astronómicas), o bien a cambios en la presión atmosférica (mareas barométricas). En lo que respecta a las mareas astronómicas se distinguen seis constituyentes principales, tres de las cuales tienen periodos de alrededor de 12 hrs y tres de 24 hrs.

El efecto agregado de cada constituyente genera la variación del nivel del mar que termina condicionando el escurrimiento en el estuario, y por ende sus procesos de mezcla. Es posible que el flujo en el estuario no dependa del nivel del mar debido a las características morfológicas de su desembocadura que podrían llegar a provocar una crisis hidráulica.

Por otro lado, la variación del nivel del mar generada por la Luna varía a lo largo del mes debido a su traslación. En este sentido se conocen como mareas vivas o de sicigia al máximo que alcanza la amplitud de marea para luna llena o nueva, y mareas muertas o de cuadratura al mínimo que alcanza para luna creciente o menguante.

2.2.3. PROCESOS DE MEZCLA EN ESTUARIOS

Las características del escurrimiento en un estuario pueden variar en el transcurso del año, debido a cambios en las condiciones meteorológicas, costeras o de los afluentes fluviales. Dado que los procesos de mezcla dependen de las condiciones de escurrimiento, se concluye que la capacidad de dilución de un estuario es variable en el tiempo. La relación existente entre los procesos de mezcla y las condiciones meteorológicas, de marea y de caudal afluente se explican a continuación (Savenije, 2005):

- Importancia del viento: El viento favorece la mezcla al originar corrientes tanto en el plano vertical como horizontal. La circulación vertical se genera debido al esfuerzo de corte producido por el viento en la superficie libre, el cual induce un peralte de la superficie libre en dirección del viento, lo que origina una corriente de agua dulce en la superficie y de agua salina en el fondo. El viento puede producir circulaciones horizontales dependiendo de la forma del estuario. Estuarios irregulares y de baja profundidad pueden experimentar una circulación horizontal

neta debido al viento. A diferencia de lo que ocurre en lagos y lagunas costeras, en estuarios aluviales no se considera al viento como una fuente importante de energía para la mezcla.

- **Importancia del caudal del río:** El aporte de agua dulce, de menor densidad que el agua marina, provee un déficit de energía potencial al sistema definido por el estuario, produciendo corrientes gravitacionales o baroclínicas, que se originan por la tendencia natural de las isohalinas a la horizontalidad. Dichas corrientes se caracterizan por tener un sentido hacia aguas arriba en el fondo y hacia el océano en la superficie, y se consideran un importante mecanismo de mezcla, sobre todo en los lugares donde el gradiente longitudinal de salinidad es grande.
- **Importancia de la marea:** La marea provee energía cinética al estuario, la cual es responsable de una serie de procesos de mezcla. Dichos procesos se producen debido a la advección de agua, desde la escala turbulenta hasta circulaciones de escalas comparables a la del mismo estuario. Se identifican seis mecanismos de mezcla:
 - **Mezcla turbulenta:** Se caracteriza por ocurrir a escalas temporales y espaciales pequeñas. No se considera de gran importancia en estuarios (Fischer et al., 1979).
 - **Dispersión:** Se genera debido a gradientes de velocidad. No se considera de gran importancia en estuarios (Savenije, 2005).
 - **Interacción entre mareas de sicigia y cuadratura:** La intensidad de la mezcla debido a la marea varía de manera importante entre las condiciones de sicigia y cuadratura (Jay y Smith, 1990). La transición entre dichas condiciones genera importante mezcla (Uncles y Stephens, 1996).
 - **Tidal trapping:** Schijf y Schönfeld (1953) introdujeron el concepto de *tidal trapping*, el cual hace referencia a un mecanismo de mezcla originado por el desfase existente en el movimiento del agua en diferentes posiciones del estuario debido al efecto de la marea. Se considera de gran importancia, sobre todo en estuarios de morfología irregular, en donde la reflexión de la onda de marea en los bordes irregulares favorece el encuentro de flujos con diferentes sentidos. La distancia característica de este proceso es la excursión, que se define como la distancia horizontal que viaja un elemento de agua durante un ciclo completo de marea.
 - **Corrientes residuales en la sección transversal:** Se refiere a cualquier circulación que exista en un plano perpendicular al canal principal, originada

por el efecto de la marea o debido a la circulación gravitacional. No existe mucha información respecto a este tipo de corrientes, dado que la gran mayoría de las investigaciones suponen flujo bidimensional en el plano vertical-longitudinal (Savenije, 2005).

- *Tidal pumping*: Fischer et al. (1979) introdujo el concepto de *tidal pumping*, el cual hace referencia a la mezcla producida por la existencia de canales preferenciales para la llenante y vaciante, sobre todo si éstos se cruzan en su recorrido. Se considera de importancia en estuarios de morfología irregular.

Dependiendo de la magnitud del caudal de agua dulce afluente, del estado de mareas y de la morfología del cauce, un estuario puede presentar diferentes niveles de mezcla. En este sentido es posible identificar condiciones de estratificación fuerte, de mezcla parcial o mezcla completa. El nivel de estratificación se relaciona con la capacidad del estuario para mezclar sus aguas, por lo que está ligado al caudal de dilución. Debido a la variación temporal de las forzantes de los procesos de mezcla, un mismo estuario puede presentar diferentes niveles de estratificación a lo largo del tiempo.

Cabe mencionar que para modelar los procesos de mezcla en estuarios es fundamental conocer su grado de estratificación, sobre todo si se pretende utilizar modelos unidimensionales, como se propone realizar en la metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada. A continuación se muestran las características asociadas a cada tipo de estratificación.

- Estuarios fuertemente estratificados: La columna de agua se encuentra dividida en dos capas, las que presentan muy baja mezcla entre sí. La intrusión salina se da por medio del desarrollo de una cuña, cuya longitud depende del caudal del río, del nivel del mar y de la morfología del cauce. El alto grado de estratificación se ve favorecido por la existencia de mareas de baja amplitud y caudales de agua dulce relativamente altos. La cuña salina tiene un alto tiempo de retención debido a su lento movimiento y puede provocar que masas de agua salina queden atrapadas en depresiones del río (Miranda, 2001). En la Figura 2.1 se muestra una representación esquemática de este tipo de estuarios, para el caso de lecho plano.

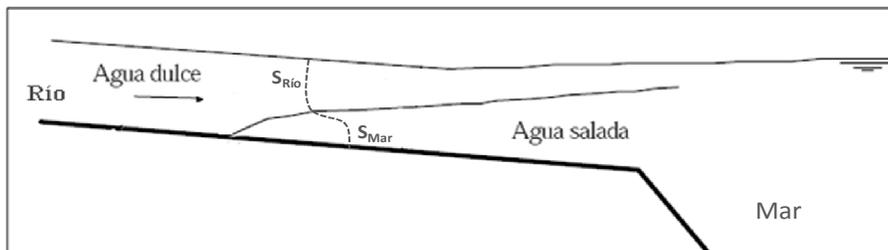


FIGURA 2.1: ESQUEMA DE ESTUARIO FUERTEMENTE ESTRATIFICADO. NIÑO Y TAMBURRINO (2002).

- Estuarios parcialmente mezclados: En este tipo de estuarios, las condiciones de mezcla producidas por la influencia del mar generan que la salinidad de la capa superior sea mayor que para el caso de cuña salina, presentando el estuario una estratificación débil. Las isohalinas se presentan inclinadas hacia el océano, lo que genera un gradiente horizontal de densidad responsable de la circulación baroclínica, tal como se muestra en la Figura 2.2. Estos estuarios tienen en general un caudal de agua dulce considerablemente menor que el asociado a estuarios fuertemente estratificados y mareas de mayor amplitud.

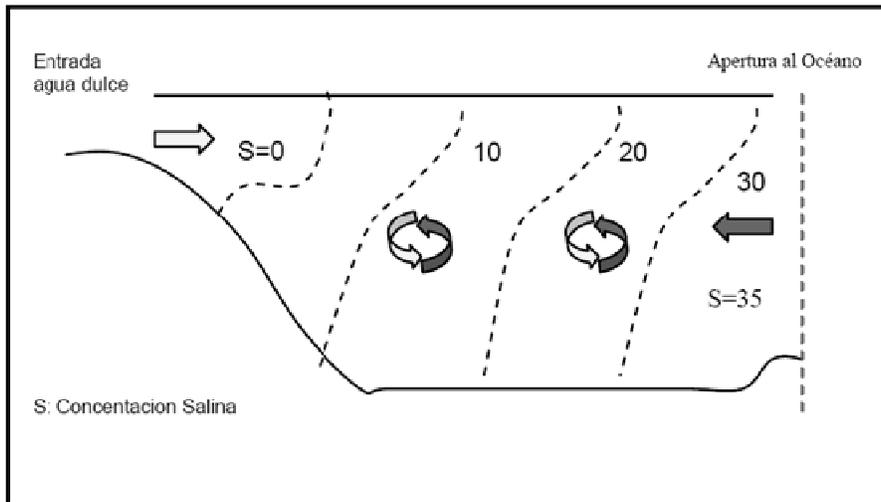


FIGURA 2.2: ESQUEMA DE ESTUARIO PARCIALMENTE MEZCLADO. BUSTOS (2007).

- Estuarios bien mezclados: Se dan en ríos con caudales muy bajos, por lo que la marea domina la mezcla en el estuario. Existe buena mezcla en la vertical y la salinidad aumenta en dirección al océano. Un esquema se presenta en la Figura 2.3.

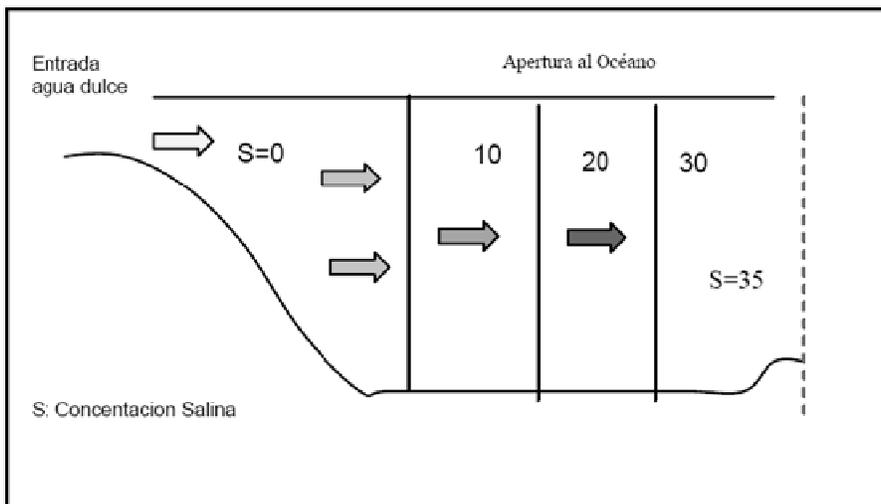


FIGURA 2.3: ESQUEMA DE ESTUARIO BIEN MEZCLADO. BUSTOS (2007).

2.2.4. GEOMORFOLOGÍA

Dependiendo de las características de la morfología del cauce, es posible identificar cuatro tipos principales de estuarios (Martin y McCutcheon, 1999):

- Valle inundado: Normalmente son amplios y presentan bajas profundidades, con pendientes de fondo que varían en forma moderada, incrementándose la profundidad en forma uniforme en dirección a la boca del estuario y existiendo amplias áreas de depósitos sedimentarios.
- De barra: Corresponden a estuarios cerrados por la existencia de una barra de arena en la boca, a través de la cual uno o más canales angostos generan el intercambio con el mar. Normalmente presentan bajas profundidades. Se pueden considerar inestables, ya que están sujetos a bruscos cambios en su configuración, por eventuales destrucciones de su barra. Dada la baja tasa de renovación de sus aguas, se consideran muy sensibles desde el punto de vista ambiental, pudiendo ocurrir acumulación de contaminantes y nutrientes en sus aguas y sedimentos.
- Fiordos: Son de origen glaciar y se encuentran en zonas de latitud alta (Gang Ji, 2008). Normalmente son largos y estrechos, con profundidades superiores a los 200 m. Típicamente presentan fuerte estratificación y en la boca existen pequeñas gradas (sills) que limitan la mezcla de las aguas más profundas.
- Otro tipo de estuario son aquellos generados por actividad tectónica, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierras o bien fallas geológicas.

2.3. MODELOS NUMÉRICOS

En este acápite se muestran las fórmulas y los modelos numéricos utilizados por la metodología desarrollada para la DGA. La información requerida para aplicar los modelos proviene de mediciones de terreno y de estadísticas hidrológicas.

2.3.1. MODELACIÓN IMPERMANENTE DEL ESCURRIMIENTO EN EL ESTUARIO

Se dice que el flujo en un estuario es impermanente debido a que la velocidad y la altura de escurrimiento pueden experimentar grandes variaciones temporales debido a la marea, en periodos de tiempo considerablemente menores que los asociados a cambios hidrológicos. Una manera usual de modelar escurrimientos impermanentes en cuerpos de agua fluviales es mediante las ecuaciones de Saint Venant, que se basan en la aplicación de los principios de conservación de masa y de momentum. La relación unidimensional derivada de la aplicación del principio de conservación de masa corresponde a la Ecuación (2.3), mientras

que la que se deriva del principio de conservación de momentum corresponde a la Ecuación (2.4), considerando la ley de resistencia de Manning.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2.3)$$

donde A corresponde al área de escurrimiento, Q al caudal total, q a un caudal lateral por unidad de longitud del cauce, x a la coordenada paralela a la pendiente media y t al tiempo.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -g \cdot A \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} - g \cdot \frac{n^2 \cdot Q \cdot |Q|}{A \cdot R_h^{4/3}} \quad (2.4)$$

donde g corresponde a la aceleración de gravedad, Z a la cota de la superficie libre, n al número de Manning y R_h al radio hidráulico.

Para efectos de la metodología desarrollada para la DGA se propone utilizar el programa HEC-RAS, que utiliza el esquema implícito de Preissmann (1965) para resolver la forma unidimensional de las ecuaciones de Saint Venant.

Cabe mencionar que las ecuaciones de Saint Venant se deducen bajo los supuestos de capa límite, densidad constante y la inexistencia de aceleración de coriolis, lo que puede llegar a restringir su aplicación en ciertos estuarios.

2.3.2. RELACIONES PARA EL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN

En esta sección se presentan dos números adimensionales que permiten estimar el grado de estratificación de un estuario, concepto abordado en el acápite 2.2.3. Es fundamental conocer el nivel de estratificación de un estuario para modelar los procesos de mezcla, sobre todo si se desean utilizar modelos de escurrimiento unidimensionales.

Para estimar el nivel de estratificación se propone utilizar el *Número de Richardson de Estuarios* (Fischer et al., 1972) definido por la Ecuación (2.5), que da cuenta de la razón entre la energía potencial aportada por el río y la cinética aportada por el mar.

$$N_R = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{Q}{W} \cdot \frac{1}{u_t^3} \begin{cases} N_R \leq 0.08 & \text{Bien Mezclado} \\ 0.08 < N_R < 0.8 & \text{Parcialmente Mezclado} \\ N_R \geq 0.8 & \text{Altamente Estratificado} \end{cases} \quad (2.5)$$

donde Q corresponde al caudal característico de agua dulce, W a un ancho característico del estuario, g a la aceleración de gravedad, $\Delta\rho/\rho$ a la diferencia entre la densidad del agua de mar y dulce, y u_t a la velocidad cuadrática media de la marea en la boca.

Para determinar el nivel de estratificación de la columna de agua se sugiere utilizar el *Grado de Estratificación* propuesto por Savenije (2005), definido en la Ecuación (2.6).

$$S = \frac{S_{Fondo} - S_{Superficie}}{(S_{Fondo} + S_{Superficie})/2} \begin{cases} S \leq 0.1 \text{ Bien Mezclado} \\ 0.1 < S < 0.3 \text{ Parcialmente Mezclado} \\ S \geq 0.3 \text{ Estratificado} \end{cases} \quad (2.6)$$

donde S_{Fondo} corresponde a la salinidad del fondo y $S_{Superficie}$ a la salinidad de la superficie.

2.3.3. MODELO DE MEZCLA PARA BAJA ESTRATIFICACIÓN

Para modelar los procesos de mezcla en un estuario completa o parcialmente mezclado se propone utilizar la ecuación de advección-dispersión unidimensional. Dicha ecuación considera mezcla completa en la sección de escurrimiento, sin embargo se supondrá válida para estuarios con mezcla parcial.

La Ecuación (2.7) describe la evolución espacial y temporal de la concentración de una sustancia disuelta en un flujo unidimensional e impermanente. Dadas las características de la ecuación, sólo se encuentran soluciones analíticas para ciertas condiciones de borde, geometrías y escurrimientos, por lo que en general se resuelve numéricamente. Cabe mencionar que es válido aplicar este modelo sólo cuando existe mezcla completa en la sección de escurrimiento, y que la Ecuación (2.7) en particular, considera el supuesto de sustancia conservativa e intercambio nulo con la atmósfera y el lecho del cauce. Para efectos de la metodología desarrollada se propone utilizar el programa HEC-RAS que resuelve numéricamente la ecuación de advección-dispersión, utilizando un esquema de diferencias finitas explícito.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u(x,t) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A(x,t)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(A(x,t) \cdot K_L(x,t) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

donde C corresponde a la concentración de la sustancia analizada, $u(x,t)$ a la velocidad de escurrimiento, $A(x,t)$ al área de escurrimiento y $K_L(x,t)$ al coeficiente de dispersión longitudinal.

Para resolver la Ecuación (2.7) es necesario conocer el coeficiente de dispersión K_L . Para estimar K_L se propone utilizar la Ecuación (2.8) en el tramo donde se tengan mediciones de salinidad y la Ecuación (2.9), donde no se tengan mediciones.

La Ecuación (2.8) se deduce al aplicar la ecuación de advección-dispersión a la sal, haciendo el supuesto de régimen permanente, o suponiendo régimen impermanente, pero promediando en un ciclo de marea, por lo que su aplicación es válida solo cuando se tienen

mediciones de salinidad realizadas para HWS o LWS¹ o bien durante todo un ciclo de marea.

$$K_L(x, t) = \frac{Q(t) \cdot S(x, t)}{A(x, t) \cdot \partial S / \partial x} \quad (2.8)$$

donde $K_L(x, t)$ corresponde al coeficiente de dispersión longitudinal para estuarios, $Q(t)$ al caudal del río, $S(x, t)$ a la salinidad medida en terreno y $A(x, t)$ al área de escurrimiento.

La Ecuación (2.9) (Fischer et al., 1979) se deduce bajo supuestos de escurrimiento uniforme y régimen permanente, por lo que se puede suponer válida solo en sectores del cauce donde el efecto de marea sea despreciable.

$$K_L = 0.01 \cdot u_* \cdot H \cdot \left(\frac{u}{u_*}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^2 \quad (2.9)$$

donde K_L corresponde al coeficiente de dispersión longitudinal para ríos sin influencia de marea, H y B a una medida de la profundidad y del ancho del río respectivamente, u a la velocidad media de escurrimiento y u_* a la velocidad de corte definida en la Ecuación (2.10).

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (2.10)$$

donde ρ corresponde a la densidad del fluido y τ_0 al esfuerzo de corte en el fondo.

Cabe mencionar que tanto la Ecuación (2.8) como la Ecuación (2.9) son constantes en el tiempo, por lo que corresponden solo a una aproximación del coeficiente de dispersión, el cual depende del escurrimiento y por lo tanto del tiempo.

2.3.4. MODELO DE CUÑA SALINA

Las cuñas salinas se caracterizan por tener altos tiempos de retención hidráulico (Miranda, 2001), por lo que la metodología desarrollada considera establecer un caudal de dilución nulo en el tramo del estuario donde exista cuña salina. En este sentido se hace necesario definir una herramienta para estimar la máxima extensión de la intrusión en forma de cuña salina. Para obtener dicha extensión en el marco de la metodología desarrollada, se propone utilizar el modelo permanente de cuña salina desarrollado por Olivares (2000).

¹ HWS (High Water Slack) y LWS (Low Water Slack) se refieren al momento en que el flujo de una sección cambia de dirección producto del efecto de la marea. En general es cercano al momento de pleamar y bajamar, respectivamente. Para dicho instante la inercia debería ser despreciable.

Como parte del presente trabajo de título se desarrolla un modelo impermanente de cuña salina con el objetivo de analizar la utilidad del modelo permanente de Olivares (2000) en el marco de la metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada.

MODELO DE CUÑA SALINA DE OLIVARES (2000)

El modelo de Olivares (2000) permite obtener el eje hidráulico de una cuña salina a partir de la aplicación de los principios de conservación de masa y momentum a un escurrimiento unidimensional permanente en dos capas totalmente estratificadas. Este modelo es una extensión del modelo de cuña salina de Schijf y Schönfeld (1953), que supone lecho plano. Un esquema del modelo de Olivares (2000) se muestra en la Figura 2.4.

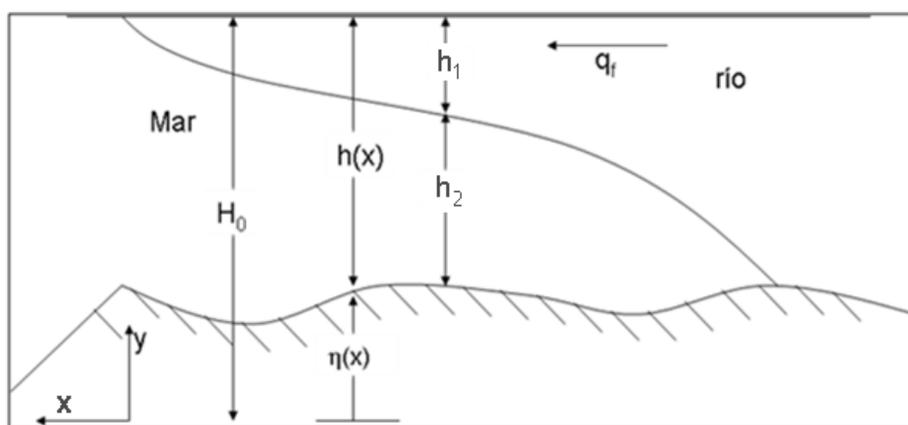


FIGURA 2.4: ESQUEMA CUÑA SALINA PARA LECHO IRREGULAR. OLIVARES (2000).

La ecuación diferencial ordinaria deducida por Olivares, Ecuación (2.11), no tiene solución analítica, salvo para el caso de lecho plano (Schijf y Schönfeld, 1953), por lo que requiere ser resuelta numéricamente.

$$\left(1 - \frac{h_1}{H_0 - \eta(x)}\right) \cdot \frac{dh_1}{dx} + c_{fi} \cdot \frac{q_f^2 / (\phi \cdot g \cdot h_1^3)}{1 - q_f^2 / (\phi \cdot g \cdot h_1^3)} = 0 \quad (2.11)$$

donde h_1 , H_0 y $\eta(x)$ corresponden a las distancias definidas en la Figura 2.4, x a la variable espacial, q_f al caudal por unidad de ancho definido en la Ecuación (2.12), g a la aceleración de gravedad, Φ a la diferencia de densidad normalizada definida en la Ecuación (2.13) y c_{fi} al coeficiente de fricción interfacial que se obtiene de la Figura 2.5 (Arita y Jirka, 1987).

$$q_f = \frac{Q}{B} \quad (2.12)$$

donde q_f corresponde al caudal por unidad de ancho, Q al caudal afluente y B al ancho medio del estuario.

$$\phi = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \quad (2.13)$$

donde Φ corresponde a la diferencia de densidad entre el agua salada y dulce normalizada, ρ_s a la densidad del agua de mar y ρ_0 a la densidad del agua dulce.

Para resolver el problema se supone que el escurrimiento está condicionado por el nivel del mar y por el caudal proveniente del río. Además se considera la existencia de crisis interna en la boca (Schijf y Schönfeld, 1953). La condición de crisis interna, considerando velocidad de la capa inferior nula, queda descrita por la Ecuación (2.14).

$$h_1 = \left(\frac{q_{desem}^2}{\phi \cdot g} \right)^{1/3} \quad (2.14)$$

donde h_1 corresponde a la profundidad definida en la Figura 2.4, q_{desem} al caudal por unidad de ancho en la boca del estuario, Φ a la diferencia de densidad entre el agua salada y dulce definida en la Ecuación (2.12) y g a la aceleración de gravedad.

La Figura 2.5 permite obtener el coeficiente de fricción interfacial, c_{fi} , que es utilizado para estimar el esfuerzo de corte existente entre las dos capas de agua. Es necesario mencionar que en estricto rigor el coeficiente de fricción interfacial no es constante a lo largo de la cuña, debido a que depende del número de Keulegan local.

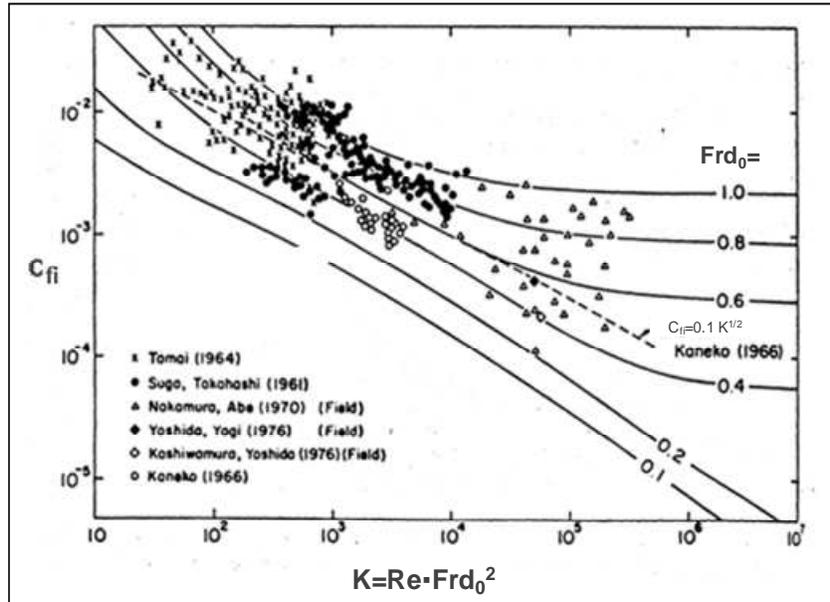


FIGURA 2.5: COEFICIENTE DE FRICCIÓN INTERFACIAL. ARITA Y JIRKA (1987).

En la Figura 2.5 c_{fi} corresponde al coeficiente de fricción interfacial y K al Número de Keulegan definido en la Ecuación (2.15).

$$K = Re \cdot Frd_0^2 \quad (2.15)$$

donde Frd_0 corresponde al *Número de Froude Densimétrico* definido en la Ecuación (2.16) y Re al *Número de Reynolds* definido en la Ecuación (2.17).

$$Frd_0^2 = \frac{q_f^2}{\phi \cdot g \cdot h_1^3} \quad (2.16)$$

donde Φ corresponde a la diferencia de densidad entre el agua salada y dulce definida en la Ecuación (2.12), g a la aceleración de gravedad y h_1 al espesor de la capa superior.

$$Re = \frac{q_f}{\nu} \quad (2.17)$$

donde q_f corresponde al caudal por unidad de ancho definido en la Ecuación (2.12) y ν a la viscosidad cinemática del agua dulce.

MODELO IMPERMANENTE DE CUÑA SALINA

En el Anexo I se deducen las ecuaciones que describen la hidráulica interna de una cuña salina asociada a un escurrimiento impermanente. Los supuestos utilizados en la deducción son similares a los del modelo de cuña desarrollado por Olivares (2000), salvo que se consideran las variaciones temporales de velocidad y altura de escurrimiento. El modelo impermanente desarrollado se utiliza para analizar la validez de aplicar el modelo permanente de cuña salina de Olivares (2000) a estuarios condicionados por la marea.

2.3.5. OTRAS ECUACIONES RELEVANTES

En esta sección se muestran ecuaciones importantes para la aplicación de los modelos de mezcla mostrados anteriormente.

COEFICIENTE DE INTERCAMBIO

Se sabe que cierta fracción del agua que sale del estuario en el periodo de vaciante puede regresar en el periodo de llenante, devolviéndose de este modo parte de los contaminantes provenientes del estuario. Dicha fracción depende de los procesos de mezcla de la zona litoral, los cuales se relacionan principalmente con las corrientes marinas costeras, el oleaje, la marea, la batimetría y las características de la descarga del estuario. Es necesario conocer dicha fracción para poder modelar correctamente los procesos de mezcla al interior de un estuario, en la medida que no se suponga la existencia de una cuña salina estática completamente estratificada.

Utilizando a la sal proveniente del mar como trazador es posible estimar qué parte del caudal de la llenante corresponde a agua renovada proveniente exclusivamente del océano. En este sentido se entrega la Ecuación (2.18) propuesta por Fischer et al. (1979).

$$R = \frac{S_{Llenante} - S_{Vaciante}}{S_{Océano} - S_{Vaciante}} \quad (2.18)$$

donde R corresponde a la fracción de agua nueva que entra al estuario, $S_{Océano}$ a la salinidad del océano y $S_{Llenante}$ y $S_{Vaciante}$ a las salinidades medias de los periodos de llenante y vaciante.

El caudal de agua renovada se obtiene a partir de la Ecuación (2.19).

$$Q_O = R \cdot Q_{Llenante} \quad (2.19)$$

donde Q_O corresponde al caudal de agua renovada de la llenante, R al coeficiente de intercambio y $Q_{Llenante}$ al caudal de la llenante.

A partir de las relaciones anteriores se concluye que la fracción del caudal de la llenante que corresponde a agua proveniente del estuario queda definida por la Ecuación (2.20).

$$Q_E = (1 - R) \cdot Q_{Llenante} \quad (2.20)$$

donde Q_E corresponde al caudal de agua de la llenante que corresponde a agua estuarina y R al coeficiente de intercambio.

Por otro lado, si al interior del estuario existe una descarga de cierta sustancia conservativa, cuya única fuente es dicha descarga, la concentración con que ésta es devuelta al estuario se puede estimar utilizando la Ecuación (2.21), deducida bajo supuestos de mezcla completa y régimen permanente, o bien promediado en un ciclo de marea.

$$C_{Llenante} = (1 - R) \cdot \frac{Q_{Fuente Emisora}}{Q_{Fuente Emisora} + Q} \cdot C_{Descarga} \quad (2.21)$$

donde $C_{Llenante}$ corresponde a la concentración de la sustancia descargada asociada al caudal de la llenante, $Q_{Fuente Emisora}$ al caudal de la fuente emisora, Q al caudal del río para la situación de análisis y $C_{Fuente Emisora}$ a la concentración de la fuente emisora.

EXCURSIÓN

La excursión se define como la distancia horizontal que viaja un elemento de agua durante un ciclo completo de marea, es decir la suma de la distancia que recorre hacia aguas arriba durante la llenante y la que recorre de regreso durante la vaciante. La Ecuación (2.22) permite estimar la excursión en la boca del estuario. Dicha ecuación supone un comportamiento sinusoidal del nivel del mar y de la velocidad de escurrimiento en la boca del estuario.

$$E_0 = \frac{u_0 \cdot T}{\pi} \quad (2.22)$$

donde E_0 corresponde a la excursión en la boca del estuario, T al periodo de marea y u_0 amplitud de la velocidad en la boca del estuario.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA PARA DETERMINAR $Q_{DILUCIÓN}$

En el presente capítulo se muestra de manera resumida la metodología para determinar caudales de dilución desarrollada para la DGA.

3.1. ESQUEMA GENERAL

Para obtener el caudal de dilución en estuarios se propone modelar numéricamente el escurrimiento y los procesos de mezcla utilizando como información de entrada estadística hidrológica y mediciones de terreno. Básicamente se propone subdividir el estuario estudiado en zonas definidas en función de su capacidad de dilución. Un esquema de la subdivisión se presenta en la Figura 3.1. Cabe notar que el esquema mostrado corresponde al caso más general, pudiendo un estuario carecer de una o más de las zonas indicadas. A su vez la presencia o ausencia de las zonas depende del tiempo, considerando la metodología desarrollada siempre el caso más favorable desde el punto de vista ambiental.

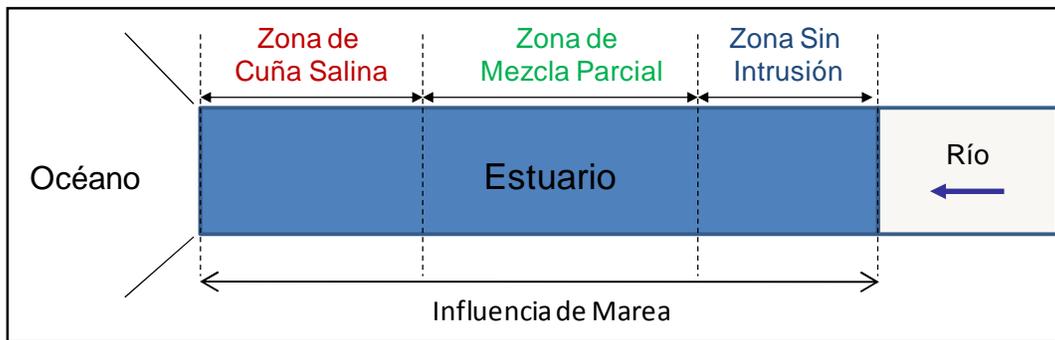


FIGURA 3.1: ESQUEMA DE LA SUBDIVISIÓN DE UN ESTUARIO.

Para cada una de las zonas se propone una metodología para estimar el caudal de dilución. El criterio adoptado para la subdivisión se basa principalmente en la información sobre procesos de mezcla entregada en el acápite 2.2.3.

A continuación se presenta una caracterización de las zonas en que se propone subdividir el estuario.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE CUÑA SALINA

Los altos tiempos de retención asociados a la cuña salina (Miranda, 2001) obliga a tomar la decisión de considerar un caudal de dilución nulo en esta zona. La extensión de la intrusión depende principalmente de la morfología del cauce, del caudal afluente y del nivel del mar. Para obtener dicha extensión se propone utilizar el modelo de cuña salina de Olivares (2000) descrito en el acápite 2.3.4.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Esta zona se caracteriza por presentar intrusión salina poco estratificada. Se considera válido suponer mezcla completa en la transversal, por lo que se propone utilizar una metodología basada en la ecuación de advección-dispersión para obtener el caudal de dilución.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA SIN INTRUSIÓN

Esta zona se caracteriza por no presentar intrusión salina, pero sí variación del caudal debido a la marea. Se propone una metodología basada en la ecuación de advección-dispersión para obtener el caudal de dilución.

3.2. METODOLOGÍA PARA OBTENER EL CAUDAL DE DILUCIÓN

3.2.1. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO

En lo que respecta al límite entre el estuario y el océano, el DS N°90/2000 indica que la zona de protección litoral “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 Marina Mercante...”. Debido a que la zona de protección litoral comienza donde termina el estuario, la definición anterior corresponde al límite entre el estuario y la zona de protección litoral, válida para la aplicación del DS N°90/2000.

Por otro lado, en el acápite 2.2.1 fueron mencionados tres criterios para establecer el límite entre un estuario y su afluente fluvial, que dependen del alcance de la onda de marea, de la extensión de la intrusión salina o bien del transporte de sedimentos marinos. Debido a que el caudal varía con el efecto de la marea y a que el alcance de la onda de marea es mayor que el alcance de la salinidad y de los sedimentos marinos, se considera al criterio del efecto de marea como el más adecuado para definir la extensión del estuario. De este modo el límite entre el estuario y el río queda definido por el lugar en que el efecto de marea deja de percibirse.

Una manera sencilla de estimar el límite entre el estuario y el río es considerar que éste queda definido por el lugar del cauce cuya cota mínima de fondo es similar a la cota del nivel del mar para una pleamar de sicigia. En otras palabras, se debe trazar una horizontal desde el máximo nivel de la marea de sicigia hasta donde se intercepte la cota de fondo del río, como se muestra en el ejemplo de la Figura 3.2, que corresponde a la aplicación para el río Toltén, para el que se obtiene una extensión de 13.4 km. La validez de este método se analiza en el acápite 6.1.

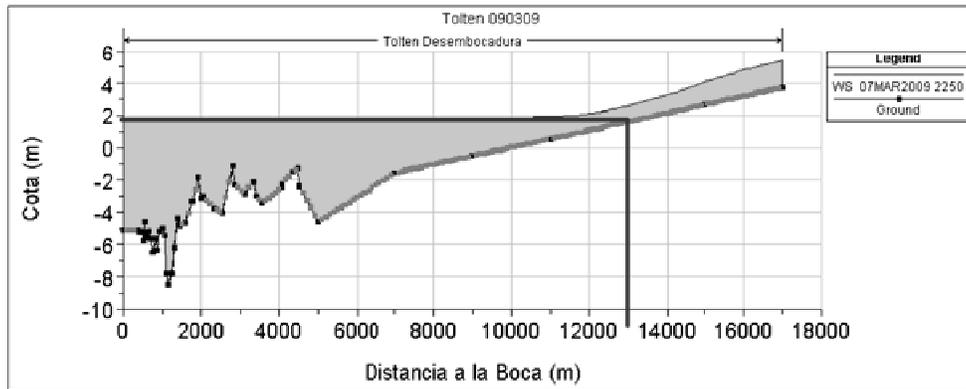


FIGURA 3.2. DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

3.2.2. DETERMINACIÓN DEL MÍNIMO CAUDAL PARA TENER CUÑA SALINA

Para determinar el caudal límite por sobre el cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina se propone utilizar la Ecuación (3.1), que se deduce de imponer un *Número de Richardson de Estuarios* igual a 0.8, que corresponde al límite de alta estratificación. Cabe recordar que el *Número de Richardson de Estuarios* se describe en el acápite 2.3.2.

$$Q_{Límite} = 0.8 \cdot \frac{W \cdot u_t^3}{\Delta\rho/\rho \cdot g} \quad (3.1)$$

donde $Q_{Límite}$ corresponde al mínimo caudal del río necesario para que exista cuña salina, W al ancho medio del estuario, g a la aceleración de gravedad, $\Delta\rho/\rho$ a la diferencia entre la densidad del agua de mar y del agua dulce y u_t a la velocidad cuadrática media de la marea en la boca del estuario.

Para obtener u_t se sugiere realizar una modelación impermanente de la hidráulica del sistema en HEC-RAS, considerando condiciones de marea de sicigia. El caudal afluente a utilizar en la modelación es desconocido, debido a que es $Q_{Límite}$, la incógnita del problema, por lo que se debe obtener iterando. Básicamente se debe correr el modelo HEC-RAS con un caudal afluente supuesto. HEC-RAS entregará, dentro de los resultados de la modelación la variación temporal de la velocidad media de escurrimiento en la boca del estuario. La velocidad cuadrática media que se obtiene de dicha serie de tiempo se reemplaza en la Ecuación (3.1) para obtener un nuevo $Q_{Límite}$, el cual es utilizado como condición de borde en HEC-RAS en la siguiente iteración.

En el caso de que el caudal límite sea menor al caudal con probabilidad de excedencia del 95%, se considera a éste como el nuevo caudal límite. La idea detrás de dicha decisión es la de considerar un caudal bajo, pero que tenga cierta probabilidad de ocurrir. El valor de probabilidad de excedencia considerado se acordó con la DGA.

3.2.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA

Utilizando el caudal límite obtenido en la etapa anterior se estima la extensión de la cuña salina mediante la aplicación del modelo de Olivares (2000), explicado en el acápite 2.3.4. Dicho modelo requiere como información de entrada la batimetría del estuario, el caudal afluente, el nivel del mar y el coeficiente de fricción interfacial, que se obtiene de la Figura 2.5.

Cabe recordar que debido a los altos tiempos de retención asociados a la cuña salina (Miranda, 2001), se decide imponer arbitrariamente un caudal de dilución nulo en toda su extensión, dado que se considera el caso más perjudicial desde el punto de vista ambiental que corresponde al de una descarga al interior de la cuña. Luego, si el interesado en descargar se ubica en esta zona, debe considerar un caudal de dilución nulo y dar por terminado el proceso de obtención del caudal de dilución. En caso contrario debe continuar con las siguientes etapas.

Dado que el modelo de cuña salina utilizado se deduce bajo supuesto de régimen permanente, no es posible dar cuenta correctamente del proceso de llenante y vaciante. Para efectos de la metodología desarrollada, lo anterior se refleja en la dificultad a la hora de definir el nivel del mar adecuado para obtener la máxima intrusión de cuña salina posible, la cual se da para una pleamar de sicigia en condiciones de bajo caudal afluente. Como solución se propone utilizar el nivel medio del mar para un estado de mareas de sicigia y sumarle un cuarto de la excursión a la extensión entregada por el modelo de Olivares (2000), para dar cuenta del proceso de llenante, recordando que la excursión corresponde a la distancia que recorre una partícula a lo largo del estuario durante un ciclo de marea. La excursión se obtiene a partir de la Ecuación (2.22).

Como parte de este trabajo de título se desarrolla un modelo impermanente de cuña salina, con la intención de analizar la validez de la aplicación del modelo de cuña salina permanente de Olivares (2000) en estuarios con influencia de marea.

3.2.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Considerando que la norma chilena de calidad de agua NCh409/1.Of.84 señala que la concentración máxima de cloruros en el agua potable debe ser inferior a 0.25 g/l, se propone definir el término de la intrusión salina donde se tienen salinidades iguales o inferiores a 0.25 g/l. Se utiliza esta metodología dado que no se encuentran referencias en la literatura para definir el límite superior de un estuario basándose en el criterio de intrusión salina.

Para determinar el punto en que la salinidad alcanza dicha concentración se propone utilizar el módulo de advección-dispersión de HEC-RAS. En el modelo de calidad de aguas se debe

utilizar como caudal afluente el de probabilidad de excedencia del 95%, determinado en común acuerdo con la DGA, y como salinidad del río 0.25 g/l. La salinidad de la llenante se obtiene a partir de la aplicación de la Ecuación (2.21), que da cuenta de los procesos de mezcla en la zona litoral. Se debe considerar una marea típica de sicigia como condición de borde de aguas abajo. Los coeficientes de dispersión utilizados se obtienen a partir de la Ecuación (2.8) en el tramo del estuario donde existen mediciones de salinidad, y con la Ecuación (2.9) en el tramo final del estuario, donde no existen mediciones de salinidad.

3.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Para determinar el caudal de dilución en la *Zona de Mezcla Parcial* se debe utilizar el módulo de calidad de aguas de HEC-RAS, considerando una descarga de una sustancia contaminante ficticia. HEC-RAS permite incluir descargas laterales en cualquier punto del cauce, por lo que es posible modelar una descarga ficticia de contaminante caracterizada por una concentración y un caudal arbitrarios³. En el modelo de calidad de aguas se debe utilizar como caudal afluente el de probabilidad de excedencia del 95% y condición de marea de cuadratura, que implica la menor capacidad de mezcla. Como condiciones de borde para la ecuación de advección-dispersión se debe considerar una concentración nula desde aguas arriba y cierta concentración de retorno desde aguas abajo, determinada por la Ecuación (2.21), que da cuenta de los procesos de mezcla en la zona litoral. Los coeficientes de dispersión utilizados se obtienen a partir de la Ecuación (2.8) en el tramo del estuario donde existen mediciones de salinidad, y con la Ecuación (2.9) en el tramo final del estuario, donde no existen mediciones de salinidad. Es fundamental incluir la descarga ficticia en el lugar del estuario donde se desea conocer el caudal de dilución.

HEC-RAS entrega como resultado de la modelación la variación temporal de la concentración a lo largo del estuario. Utilizando la Ecuación (3.2), deducida a partir de la Ecuación (2.1), y considerando la máxima concentración entregada por HEC-RAS en el lugar de la descarga y las características de la misma, se obtiene el caudal de dilución del lugar donde se impuso la descarga lateral⁴.

$$Q_{Dilución} = Q_{Descarga} \cdot \left(\frac{C_{Descarga}}{C_{Máx}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

donde $Q_{Dilución}$ corresponde al caudal de dilución del sector analizado, $Q_{Descarga}$ al caudal de la descarga virtual, $C_{Descarga}$ a la concentración de la descarga virtual y $C_{Máx}$ a la máxima concentración entregada por HEC-RAS como resultado de la modelación.

³ Idealmente se deberían utilizar la concentración y el caudal de la descarga real, pero debido a restricciones de la normativa no es posible realizar dicha exigencia.

⁴ Básicamente se llevan los resultados del modelo al lenguaje de la normativa DS N°90/2000.

3.2.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN

El proceso de obtención del caudal de dilución en esta zona es análogo al de la *Zona de Mezcla Parcial*, con la diferencia de que se debe considerar condiciones de marea de sicigia en vez de cuadratura.

3.2.7. RESUMEN

En la Figura 3.3 se presenta un esquema que resume la metodología definida.

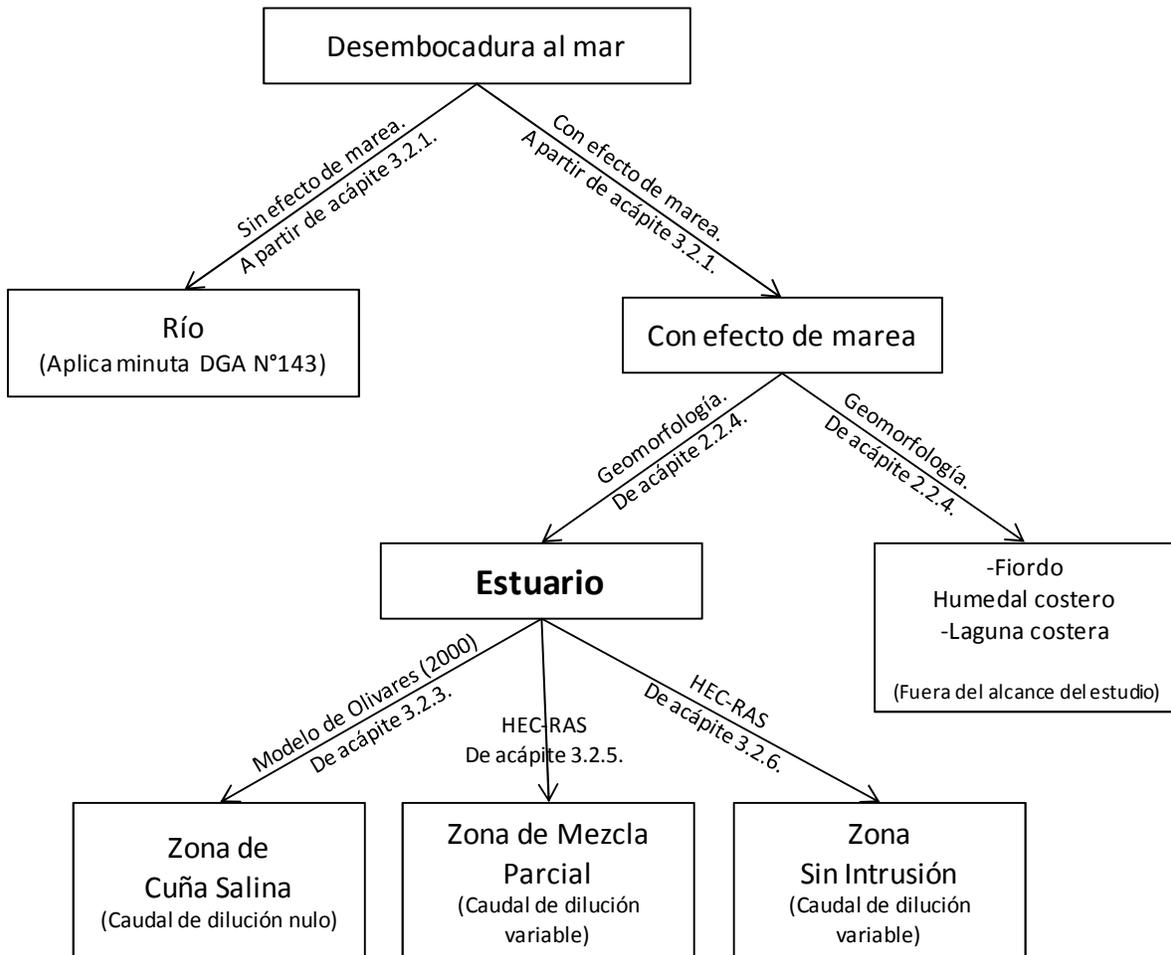


FIGURA 3.3: ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PARA DETERMINAR CAUDALES DE DILUCIÓN.

3.3. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN TERRENO

Considerando la información requerida por la metodología desarrollada se hace necesario medir perfiles transversales de profundidad y salinidad a lo largo del cauce, el caudal afluente y la variación del nivel del mar y de la salinidad en la boca del estuario. A continuación se detalla la forma en que deben llevarse a cabo las mediciones.

3.3.1. PERFILES DE PROFUNDIDAD

Una manera sencilla de obtener la batimetría es a través de mediciones de profundidad en secciones transversales a lo largo del cauce. Para ello es necesario utilizar un sensor de profundidad, además de un GPS para conocer las coordenadas del punto de medición. La cantidad de mediciones realizadas en la transversal debe ser tal que la sección quede correctamente descrita. Se recomienda realizar mediciones en secciones separadas por un máximo de 50 m en la longitudinal, valor que puede variar dependiendo de las características del estuario. Las mediciones deben ser realizadas desde la boca del estuario, hasta donde se detecte influencia de la marea.

Debido a que la profundidad está referida al nivel de la superficie libre y a que dicho nivel no es necesariamente horizontal, y además puede variar en el tiempo debido a la marea, se hace necesario corregir las mediciones de profundidad utilizando un modelo hidráulico impermanente.

3.3.2. PERFILES DE SALINIDAD

Para modelar los procesos de mezcla en términos de la metodología propuesta se hace necesario conocer la variación de la salinidad en la longitudinal y en la vertical. Ambas dependen de las condiciones particulares de marea y caudal afluente al momento de medición.

Para realizar las mediciones de salinidad es necesario utilizar un sensor de conductividad, además de un GPS para conocer las coordenadas del punto de medición. En general lo que se desea conocer para cada sección transversal es la distribución de salinidad a lo ancho y alto. En consecuencia, para cada sección se debe medir la salinidad a diferentes profundidades y a diferentes distancias de la orilla. La cantidad de mediciones debe ser la adecuada como para poder estimar correctamente la salinidad media de la sección y la profundidad a la cual se tiene los mayores gradientes de salinidad. Se establece que las mediciones en la vertical deben ser realizadas por lo menos cada 1 m, con un mínimo de cinco mediciones equiespaciadas. A lo ancho se deben realizar perfiles por lo menos cada 50 m, con un mínimo de tres mediciones. En la longitudinal deben realizarse perfiles por lo menos cada 50 m.

3.3.3. VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO

La medición del nivel debe realizarse en el sector del estuario más cercano a la boca en el que se siga teniendo flujo preferentemente unidimensional. Su medición se debe realizar con la ayuda de una regleta, recordando registrar el lugar mediante el uso de un GPS. Se debe determinar la cota de la regleta, de modo que el nivel del mar registrado esté referido a

un datum conocido. Además de la variación del nivel durante el día de muestreo, se debe tener información de dos días inmediatamente anteriores.

Se debe medir el nivel del mar en la boca del estuario debido a que en la mayoría de los casos corresponde a una condición de borde del sistema.

3.3.4. SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

Para poder estimar el intercambio de contaminantes entre el estuario y el océano es necesario conocer la variación temporal de la salinidad en la boca, tanto en el periodo de llenante como en el de vaciante. Básicamente se utiliza a la sal proveniente del mar como trazador, para dar cuenta de los procesos de mezcla de la zona litoral. La información obtenida es utilizada en la Ecuación (2.18).

La salinidad debe medirse en el mismo lugar en que se registra la variación del nivel por efecto de la marea, es decir en el sector del estuario más cercano a la boca en el que se siga teniendo flujo preferentemente unidimensional. Lo anterior debido a que ambas variables corresponden a condiciones de borde, la primera para modelos de mezcla y la segunda para modelos hidráulicos. Debido a esto, la medición debe ser representativa de la salinidad media de la sección.

3.3.5. CAUDAL DEL RÍO

El caudal del río debe ser aforado el día de muestreo en una sección del cauce en que no se observe influencia del mar. El lugar exacto del aforo debe ser registrado con ayuda de un GPS.

Cabe recordar que para ciertas etapas de la metodología es necesario recurrir a estadísticas de caudales, por lo que es necesario tener información de estaciones fluviométricas cercanas a la desembocadura del cauce analizado.

CAPITULO 4: ESTUDIO DE TERRENO

En el presente capítulo se entrega una descripción de los estuarios piloto considerados para la validación, además de un resumen de los resultados obtenidos de las campañas de terreno. La totalidad de las mediciones de nivel del mar, profundidad y salinidad se adjunta en el Anexo II, mientras que esquemas de los perfiles verticales de salinidad se adjuntan en el Anexo III.

4.1. METODOLOGÍA GENERAL

Como parte del estudio se contempló la aplicación de la metodología descrita en el Capítulo 4 a tres estuarios piloto que se consideraron representativos de la diversidad de estuarios existentes en el territorio nacional. Considerando los diferentes niveles de estratificación posibles de observar, se propuso realizar campañas de medición en los estuarios de los ríos Toltén y Lebu y del estero Tongoy. Dichas campañas fueron planificadas para condiciones de alto y bajo caudal del río, y para mareas de sicigia y de cuadratura.

Cabe mencionar que las campañas de terreno fueron realizadas de manera paralela a la formulación de la metodología, por lo que se puede considerar que ambos procesos fueron complementarios.

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS RÍOS

4.2.1. RÍO TOLTÉN

El río Toltén se ubica en la Región de la Araucanía. Su origen se encuentra en el Lago Villarrica y se extiende por 120 km hasta su desembocadura en punta Nilhue (Aquambiente Ltda., 2006). El estuario del río Toltén se desarrolla en las cercanías del poblado Nueva Toltén, encontrándose su desembocadura en Boca Toltén, coordenadas UTM: 653209E, 5653362S (Huso 18S), como se muestra en la Figura 4.1.

En la Figura 4.2 se presenta la curva de variación estacional del río Toltén en la estación fluviométrica Teodoro Schmidt, la que se encuentra ubicada alrededor de 40 km aguas arriba de la desembocadura del río Toltén, como se muestra en la Figura 4.1. De la Figura 4.2 se observa un régimen pluvial del río en las cercanías de su desembocadura. Los mayores caudales ocurren entre junio y agosto, debido a las lluvias de invierno, mientras que el período de estiaje se presenta entre enero y abril. En la Figura 4.3 se muestra la curva de probabilidad de excedencia de caudal medio diario obtenida a partir de la información hidrológica de la estación fluviométrica de Teodoro Schmidt.

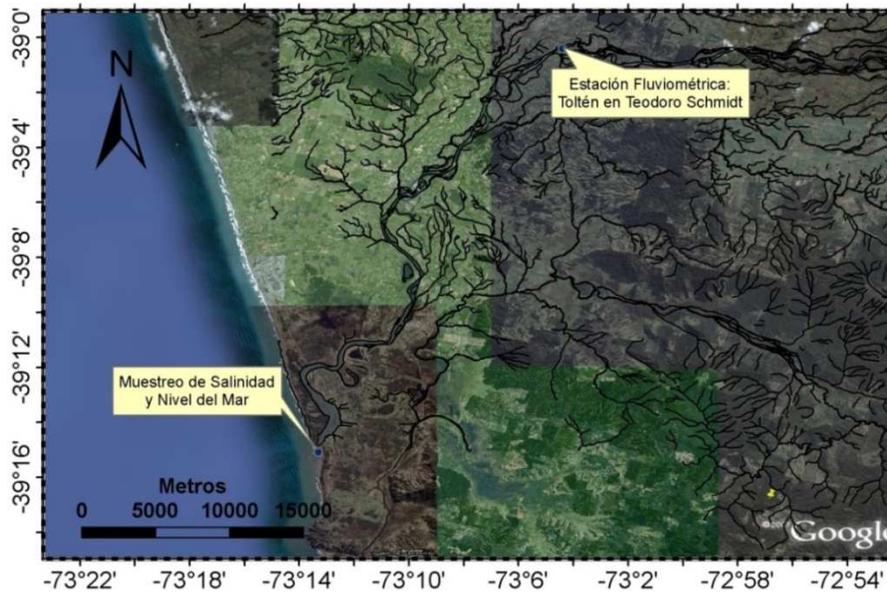


FIGURA 4.1: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA .TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.

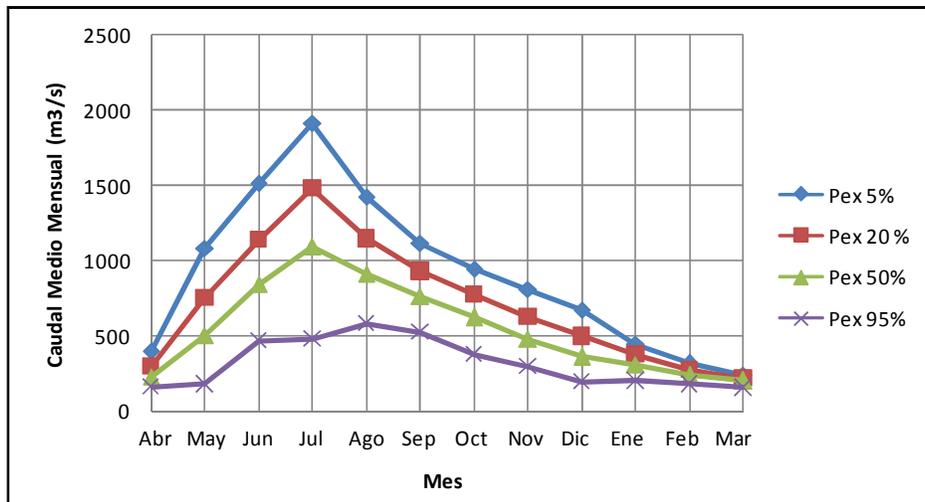


FIGURA 4.2: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL. TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.

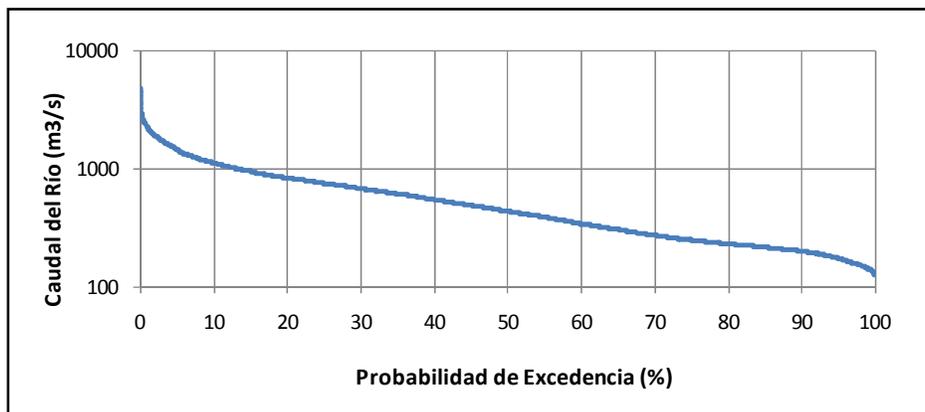


FIGURA 4.3: PROB. DE EXCEDENCIA DE CAUDAL MEDIO DIARIO. TOLTÉN EN TEODORO SCHMIDT.

4.2.2. RÍO LEBU

El río Lebu se encuentra en la Región del Bío Bío. Su origen se ubica en la Cordillera de Nahuelbuta, mientras que su desembocadura al mar ocurre en la ciudad de Lebu, específicamente en las coordenadas UTM 618049E, 5837964S (Huso 18S), como se muestra en la Figura 4.4.

De acuerdo a datos obtenidos en la estación Lebu en Los Álamos entre los años 1966 y 1982, el río Lebu presenta un régimen pluvial, caracterizado por caudales máximos durante julio y mínimos entre diciembre y abril, lo cual se aprecia en la curva de variación estacional presentada en la Figura 4.5. La ubicación de dicha estación fluviométrica se muestra en la Figura 4.4. En la Figura 4.6 se muestra la curva de probabilidad de excedencia de caudal medio diario obtenida a partir de información hidrológica de la estación fluviométrica Lebu en Los Álamos.

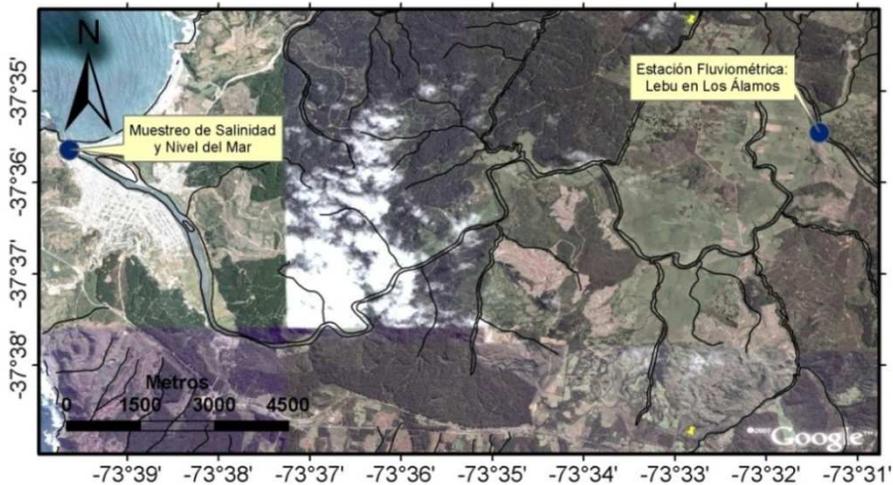


FIGURA 4.4: UBICACIÓN ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA. LEBU EN LOS ÁLAMOS.

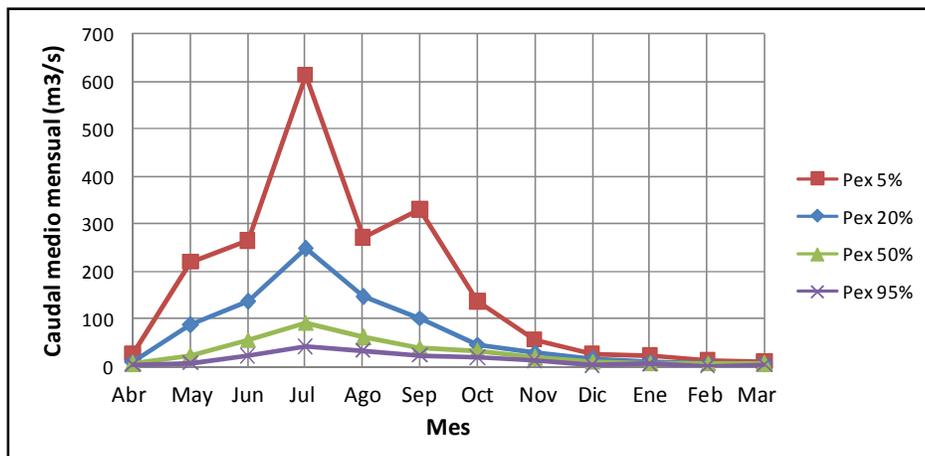


FIGURA 4.5: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL. LEBU EN LOS ÁLAMOS.

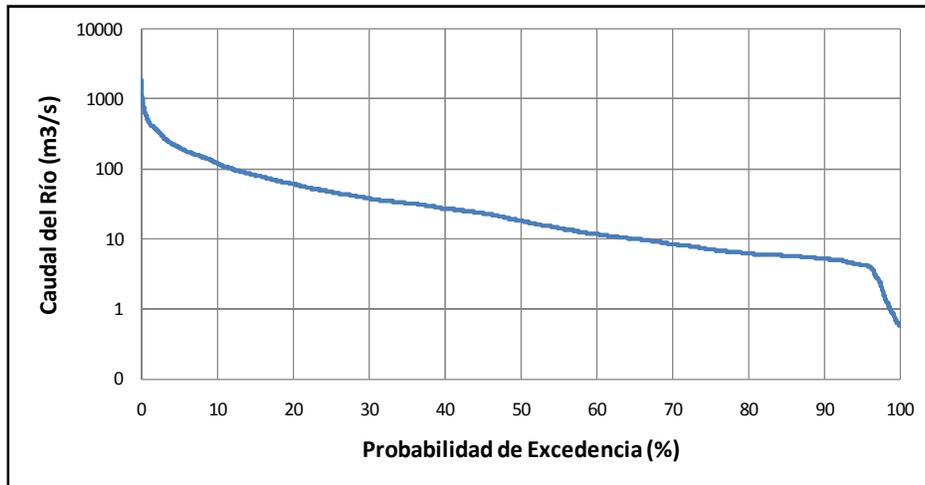


FIGURA 4.6: PROB. DE EXCEDENCIA DE CAUDAL MEDIO DIARIO. LEBU EN LOS ÁLAMOS.

4.2.3. ESTERO TONGOY

El estero Tongoy se encuentra en la Región de Coquimbo. Su origen se ubica en la Cordillera de la Costa, mientras que su desembocadura se encuentra en la ciudad de Tongoy, específicamente en las coordenadas UTM 260060E, 6650513S (Huso 19S), como se muestra en la Figura 4.7. Acorde a lo que muestra la imagen presentada en la Figura 4.7, el estero se extendería una distancia de 3 km desde su desembocadura hacia aguas arriba. Estimaciones del tiempo de concentración de la cuenca, en conjunto con información pluviométrica de la estación Cerrillos Pobres, indican que la condición de la imagen satelital sería la habitual del estero. No existe información fluviométrica para este cuerpo de agua.

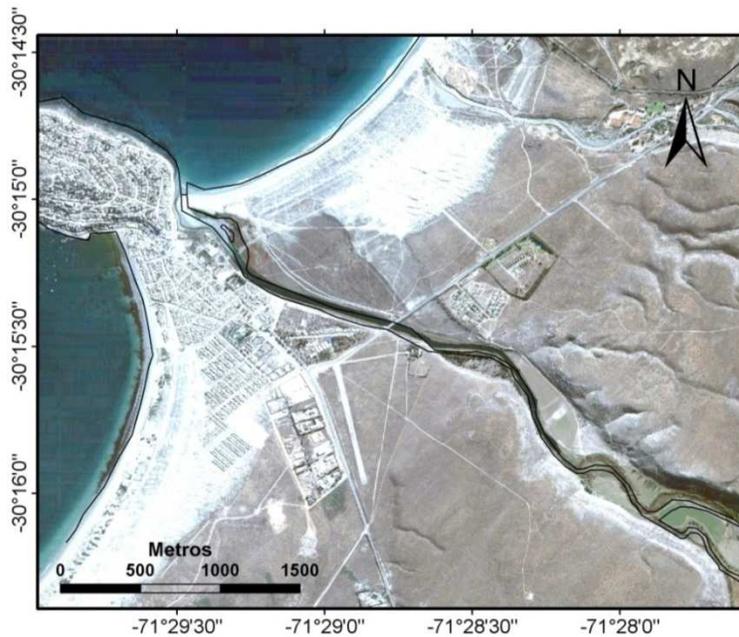


FIGURA 4.7: IMAGEN SATELITAL DEL ESTERO TONGOY.

4.3. FECHAS DE MEDICIÓN

Las fechas escogidas para realizar las campañas de terreno quedan determinadas por el estado de mareas y por la variación estacional del caudal afluente, principales forzantes de los procesos de mezcla en estuarios. En este sentido se definen cuatro escenarios de medición, que se obtienen a partir de las diferentes combinaciones de las forzantes:

- Caudal alto y marea de cuadratura:

Corresponde al caso de menor intrusión salina. Respecto a los otros escenarios, se espera que aumente el nivel de estratificación, pudiéndose observar presencia de cuña salina. Para caudales afluentes muy altos puede que no se observe intrusión, produciéndose la mezcla costa afuera.

- Caudal bajo y marea de sicigia:

Corresponde al caso de mayor intrusión salina. Respecto a los otros escenarios, se espera bajo nivel de estratificación del estuario. La longitud de la intrusión debería ser máxima.

- Caudal alto y marea de sicigia.

Escenario intermedio.

- Caudal bajo y marea de cuadratura.

Escenario intermedio.

En total se realizaron seis campañas de terreno, cuyas fechas se detallan en la Tabla 4.1. Se consideró medir para caudales con probabilidad de excedencia del 95% para el escenario de bajo caudal y del 10% para los escenarios de alto caudal. Cabe mencionar que dadas las características del estero Tongoy, se decidió realizar mediciones solo para mareas de sicigia, debido principalmente a la dificultad del mar para ingresar al estuario, dada la morfología de su boca.

TABLA 4.1: FECHAS DE CAMPAÑAS DE TERRENO REALIZADAS DURANTE EL AÑO 2009.

Estuario	Alto Caudal Marea Muerta	Bajo Caudal Marea Viva	Alto Caudal Marea Viva	Bajo Caudal Marea Muerta
Río Toltén	14 de Junio	9 de Marzo	19 de Junio	21 de Enero
Río Lebu	12 de Junio	11 de Marzo	22 de Junio	19 de Enero
Esteros Tongoy	----	7 de Abril	7 de Julio	----

4.4. RESULTADOS DE CAMPAÑAS DE TERRENO

A continuación se muestra un resumen de las mediciones realizadas en terreno.

4.4.1. RÍO TOLTÉN

CAUDAL DEL RÍO

Los aforos de caudal del río Toltén fueron realizados por la oficina regional de la DGA de la ciudad de Temuco en el puente Peule ubicado a 17 km de la boca del estuario, en las coordenadas UTM: 658829E, 5665027S (Huso 18S), como se indica en la Figura 4.8. Los resultados se muestran en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2: CAUDAL DEL RÍO TOLTÉN PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)
21 de Enero	187
9 de Marzo	186
14 de Junio	608
19 de Junio	1110

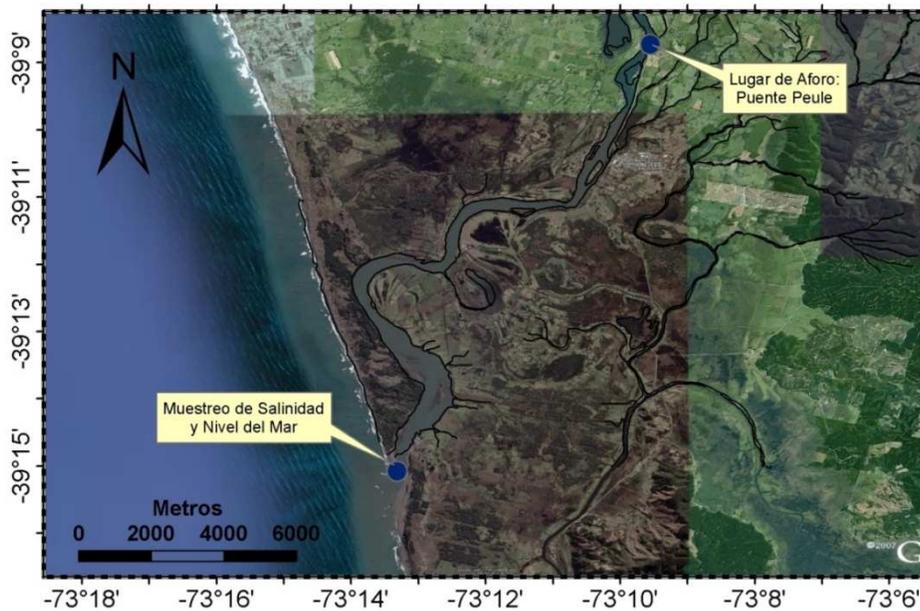


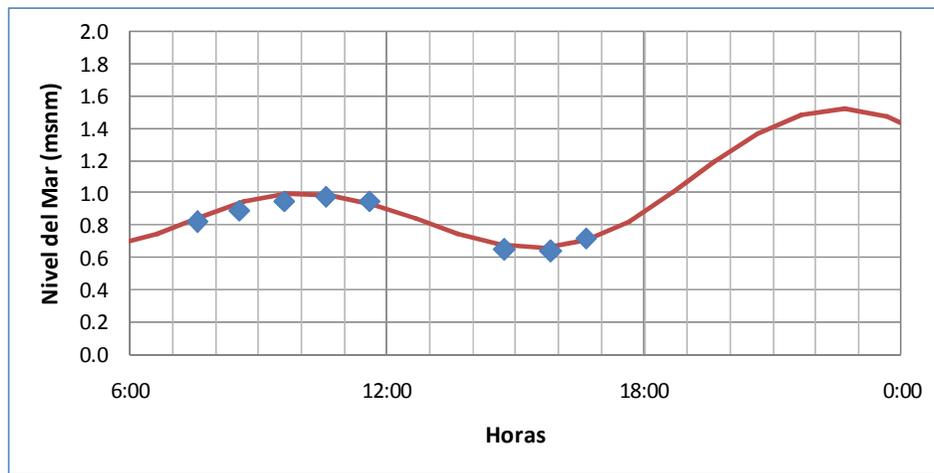
FIGURA 4.8: UBICACIÓN DEL LUGAR DE AFORO Y DE MEDICIÓN DE LA SALINIDAD Y DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA. RÍO TOLTÉN.

Las diferencias en los caudales existentes entre las campañas de verano y de invierno fueron adecuadas para el análisis de la hidrodinámica del sistema, pudiéndose observar grandes cambios en la estratificación entre campañas.

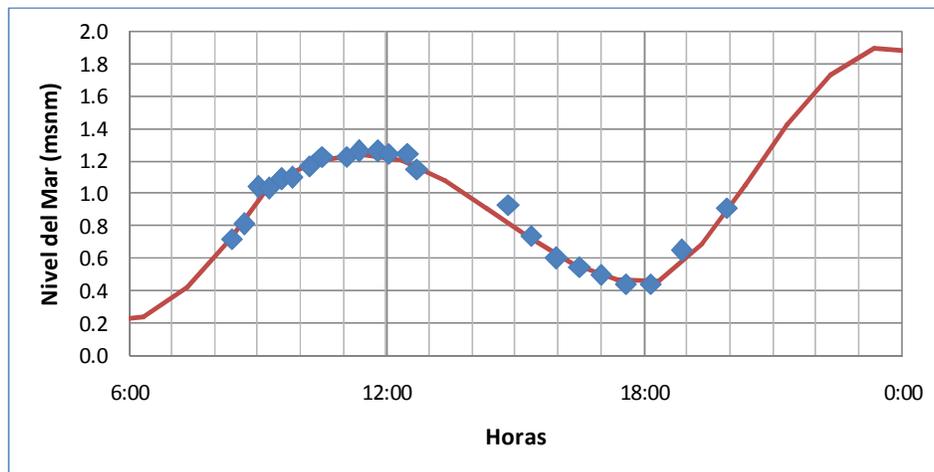
La similitud entre los caudales existentes en la primera y segunda campaña de terreno permitió atribuir las diferencias observadas exclusivamente al efecto de la marea, dado que en la primera campaña se midió con mareas de cuadratura y en la segunda con mareas de sicigia.

ESTADO DE MAREAS

La Figura 4.A a la Figura 4.D muestran la variación del nivel del mar medida en la boca del estuario, lugar indicado en la Figura 4.8, coordenadas UTM: 653209E, 5653362S (Huso 18S), comparadas con la información entregada por el SHOA obtenida en Bahía Corral para las cuatro campañas. Las cotas están referidas al nivel de reducción de sonda (NRS).

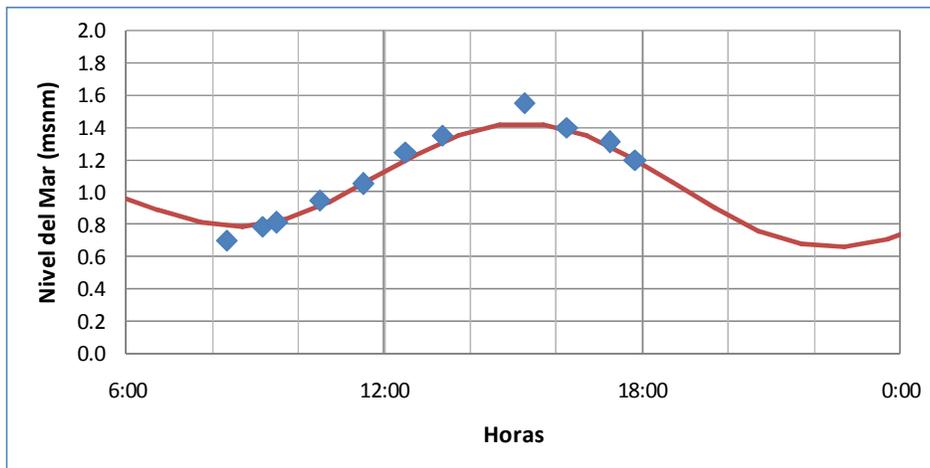


(A)

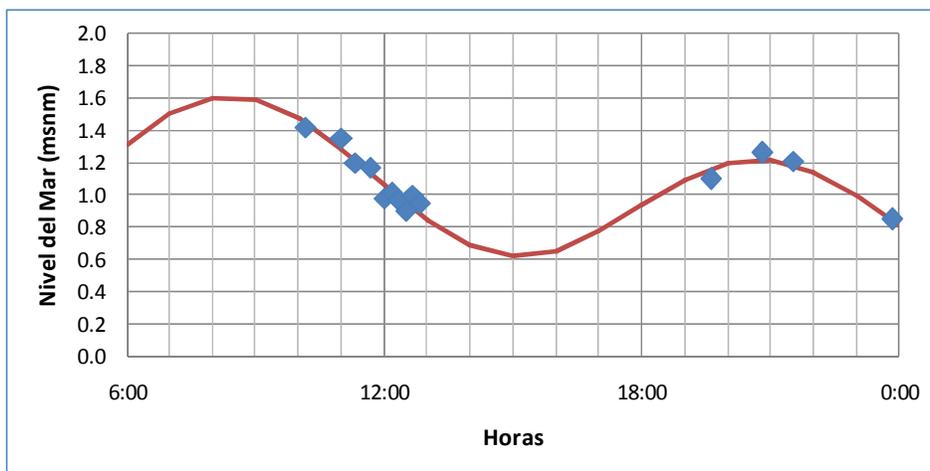


(B)

FIGURA 4.9: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA TOLTÉN. (A) 21 DE ENERO Y (B) 9 DE MARZO.



(C)



(D)

FIGURA 4.9 (CONTINUACIÓN): NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA TOLTÉN. (C) 14 DE JUNIO Y (D) 19 DE JUNIO.

MORFOLOGÍA

En la Figura 4.10 y Figura 4.11 se muestra el perfil longitudinal de la batimetría (mínima cota en la transversal) y del ancho superficial del río Toltén, luego de haber procesado y corregido la información de las cuatro campañas realizadas.

Se observan dos singularidades en la batimetría del estuario. La primera corresponde a la existencia de una isla alrededor de 2 km aguas arriba de la boca, que es posible de apreciar en la Figura 4.8, pero no en la Figura 4.10, dado que esta última figura muestra la máxima profundidad en la transversal. La segunda singularidad es la existencia de una fosa de 9 m de profundidad, ubicada a 1.3 km de la boca. A partir de las mediciones de salinidad se observó gran influencia de ambos accidentes batimétricos en los procesos de mezcla del estuario. Por un lado, en la fosa se tiende a acumular cierto volumen de agua marina, el cual

es liberado solo para caudales altos, como se pudo apreciar en las campañas de junio. Por otro lado, la isla se comporta como una barrera para el ingreso del agua marina, frenando el avance de la intrusión salina, como se pudo observar en las campañas de enero y marzo.

La existencia de una barra en la boca del estuario hace disminuir el ancho del río, como se aprecia en la Figura 4.11, y por lo tanto aumentar la velocidad de escurrimiento, lo cual dificulta el ingreso de agua marina hacia el estuario.

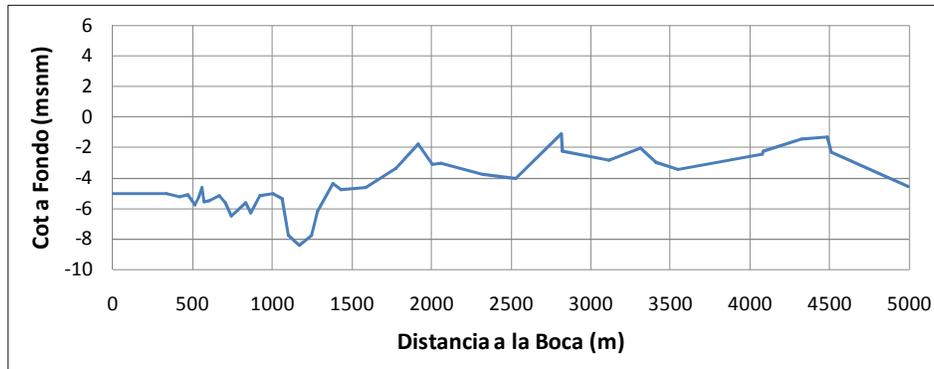


FIGURA 4.10: MÍNIMA COTA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN REFERIDA A NRS.

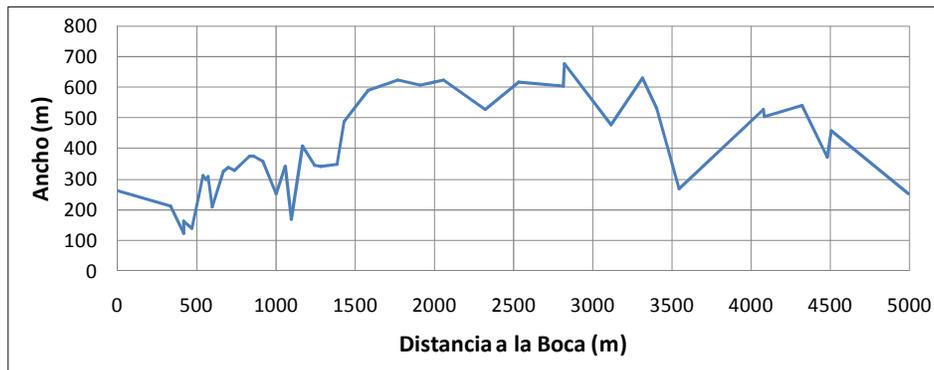


FIGURA 4.11: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

En la Tabla 4.3 se muestra la salinidad en la boca asociada a los periodos de llenante y de vaciante. La información corresponde al promedio temporal en el periodo de medición y se obtuvo a partir de mediciones en la orilla del cauce, que se supusieron representativas de la salinidad en la sección. Para la campaña del 19 de junio no se registró presencia de agua salada en la boca del estuario, dado el alto caudal de agua dulce del río Toltén.

TABLA 4.3: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.

Fecha	Salinidad Llenante (g/l)	Salinidad Vaciante (g/l)
21 de Enero	13,6	6,5
9 de Marzo	11,6	3,7
14 de Junio	3,0	2,0
19 de Junio	0	0

En base a los valores de la tabla anterior y utilizando la Ecuación (2.18) es posible encontrar la fracción de agua marina renovada que entra al estuario en el periodo de llenante para cada campaña de medición, mostradas en la Tabla 4.4.

TABLA 4.4: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

Fecha	Coefficiente de Intercambio (%)
21 de Enero	26
9 de Marzo	27
14 de Junio	3
19 de Junio	0

SALINIDAD AL INTERIOR DEL ESTUARIO

La Figura 4.12 muestra la variación longitudinal de la salinidad media de la sección para los terrenos en que se detectó intrusión salina, es decir para los de enero y marzo. Cabe mencionar que las mediciones fueron realizadas en diferentes instantes de tiempo, lo que dificulta su comparación.

Se puede observar que las salinidades medidas en enero son menores a las de marzo, siendo siempre inferiores a la salinidad del mar, que se puede considerar cercana a 35 g/l. El caudal de agua dulce afluente al estuario fue similar para ambas campañas, por lo que las diferencias observadas se deben principalmente al cambio en el estado de mareas. En este sentido la intrusión salina fue mayor en la campaña de marzo, para la que se tuvo niveles del mar mayores que los de enero. Para ambas campañas, la salinidad tiende a aumentar hacia la boca del estuario.

Además de estar condicionada por la marea y por el caudal de agua dulce, la intrusión salina depende en gran medida de la morfología del cauce, siendo limitada por cotas de fondo altas. En este sentido, la isla ubicada a 2 km de la boca del estuario corresponde a la

primera barrera que debe superar el agua marina. Vemos que para la campaña de enero, se midió salinidad nula aguas arriba de la isla. Para la campaña de marzo la intrusión logra superar los 2 km, pero experimentando una fuerte disminución. En la Figura 4.10 se puede apreciar que a partir del kilómetro 2 la cota del lecho tiende a aumentar paulatinamente hacia aguas arriba, lo que termina frenando completamente la intrusión a 4 km de la boca.

Para las dos campañas de junio, el caudal de agua dulce fue de tal magnitud que independiente del estado de mareas no se tuvo intrusión salina.

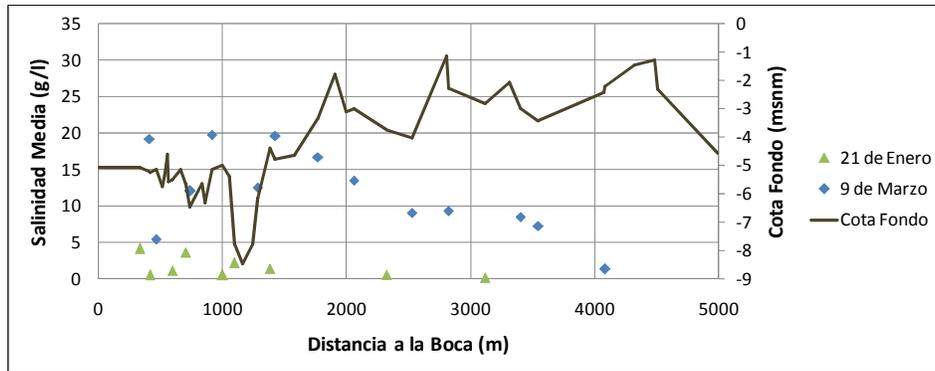


FIGURA 4.12: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

En la Tabla 4.5 se muestra la salinidad media del estuario según campaña. La información fue promediada temporalmente en el periodo de medición y espacialmente desde la boca hasta la sección en que se midió salinidad de río, para la campaña de mayor intrusión.

TABLA 4.5: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

Fecha	Salinidad Media (g/l)
21 de Enero	1.0
9 de Marzo	11.0
14 de Junio	0.0
19 de Junio	0.0

En la Tabla 4.6 se muestra la extensión de la intrusión salina, medida desde la boca hacia aguas arriba, considerando como límite el punto dónde se midió salinidad de río.

TABLA 4.6: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

Fecha	Extensión Intrusión (km)
21 de Enero	3.1
9 de Marzo	4.2
14 de Junio	0.0
19 de Junio	0.0

En el Anexo III se incluyen cuatro figuras que muestran las isohalinas para los periodos de llenante y vaciante de las dos campañas en que se tuvo intrusión salina (Figuras III.1 a III.4). Cabe hacer notar que para las dos campañas se tuvo gran estratificación de la columna de agua, tanto para el periodo de llenante como de vaciante. Se puede apreciar además que la intrusión disminuye considerablemente en el periodo de vaciante, lo que da una idea de la importancia de la variación del nivel del mar en el fenómeno de intrusión salina. Cabe recordar que las mediciones de salinidad se realizaron en diferentes instantes de tiempo, por lo que no es adecuado mostrarlas en un mismo gráfico.

En la Figura 4.13 se muestra la variación del grado de estratificación, definido en el acápite 2.3.2, para los terrenos en que se observó intrusión salina, es decir para la campaña del 21 de enero y del 9 de marzo. De la Figura 4.13 se concluye que el estuario se encontró estratificado desde su boca hasta el límite de la intrusión para ambas campañas. El nivel de estratificación fue relativamente similar, siendo el de la campaña de marzo levemente menor, producto que en marzo se tuvo mareas de mayor amplitud, para caudales de agua dulce similares. Cabe mencionar que se consideran cuestionables los límites sugeridos por Savenije (2005) para distinguir entre niveles de alta y baja mezcla.

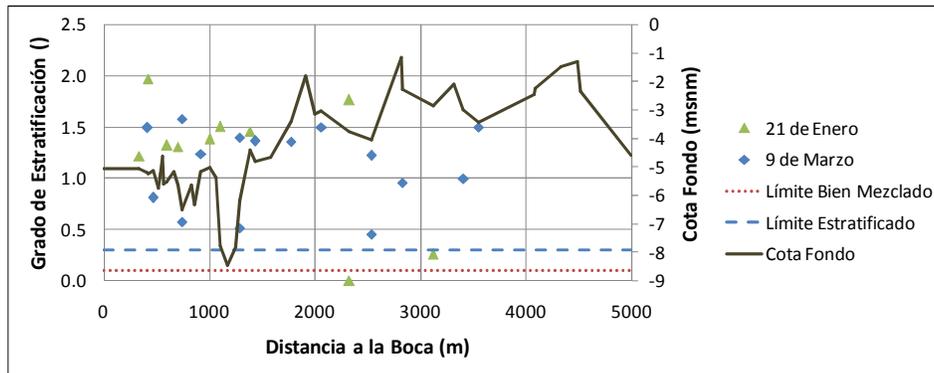


FIGURA 4.13: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL. RÍO TOLTÉN.

4.4.2. RÍO LEBU

CAUDAL DEL RÍO

Los aforos del caudal del río Lebu fueron realizados por la oficina regional de la DGA de la ciudad de Concepción en el puente Curíco ubicado a 30 km de la boca del estuario, en las coordenadas UTM: 628871E, 5835692S (Huso 18S), como se indica en la Figura 4.14 . Los resultados se muestran en la Tabla 4.7.

TABLA 4.7: CAUDAL DEL RÍO LEBU PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)
19 de Enero	5.6
11 de Marzo	4.0
12 de Junio	4.3
22 de Junio	35.4

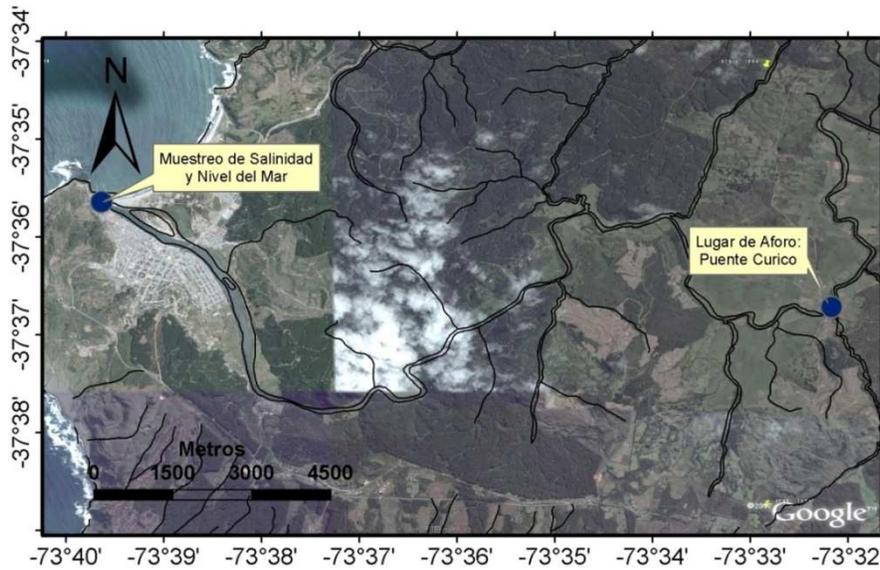
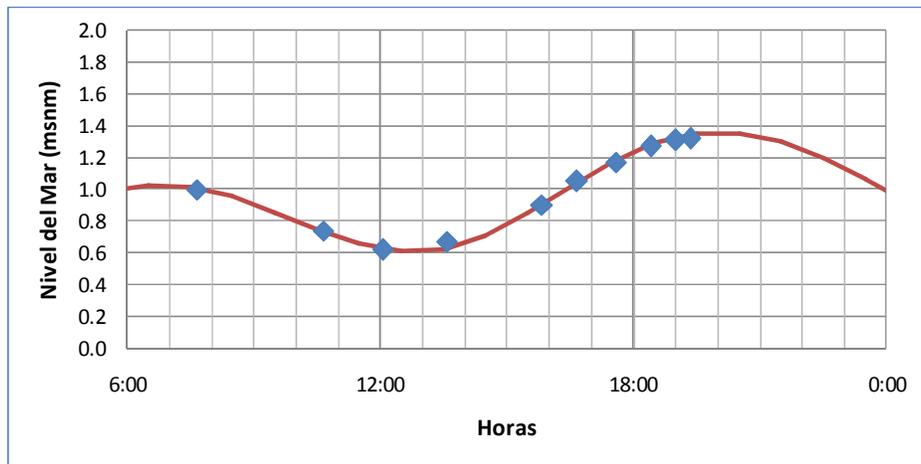


FIGURA 4.14: UBICACIÓN DEL LUGAR DE AFORO Y DE MEDICIÓN DE LA SALINIDAD Y DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA. RÍO LEBU.

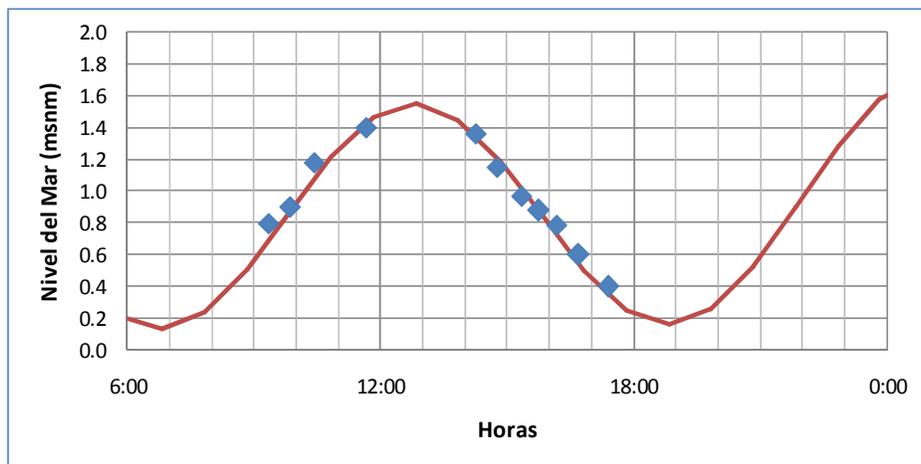
La similitud entre los caudales medidos en las tres primeras campañas fue de algún modo perjudicial para el estudio, debido a que no se pudo observar grandes cambios en la estratificación del estuario, salvo para la última campaña. Sin embargo, el haber medido para caudales similares fue de utilidad para observar la influencia de la marea en el sistema.

ESTADO DE MAREAS

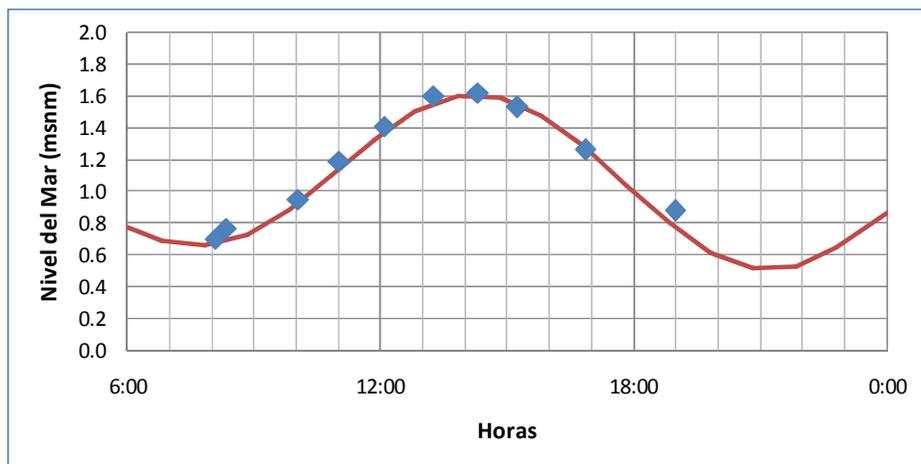
La Figura 4.A a la Figura 4.D muestran la variación del nivel del mar medida en la boca del estuario, indicada en la Figura 4.14, coordenadas UTM: 618049E, 5837964S (Huso 18S), comparadas con la información entregada por el SHOA obtenida en Talcahuano, para las cuatro campañas. Las cotas están referidas al nivel de reducción de sonda (NRS).



(A)



(B)



(C)

FIGURA 4.15: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA LEBU. (A) 19 DE ENERO. (B) 11 DE MARZO Y (C) 12 DE JUNIO.

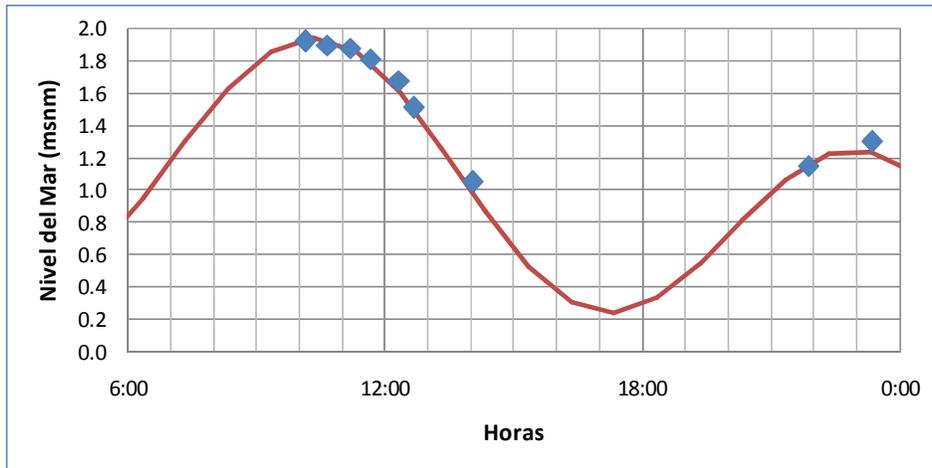


FIGURA 4.15 (CONTINUACIÓN): NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA LEBU. 22 DE JUNIO.

MORFOLOGÍA

En la Figura 4.16 y Figura 4.17 se muestra el perfil longitudinal de la batimetría (mínima cota en la transversal) y del ancho superficial del río Lebu, luego de haber procesado y corregido la información de las cuatro campañas realizadas.

El río Lebu se encuentra canalizado desde su boca hasta tres kilómetros aguas arriba. Entre los kilómetros 2 y 4 se observa la existencia de un depósito de sedimentos, el cual existe debido a las bajas velocidades del sector. Aguas abajo de dicho tramo se tienen mayores velocidades debido al intercambio de aguas con el mar y a un menor ancho del estuario. La cota de fondo de dicho depósito es cercana al nivel medio del mar, por lo que para mareas bajas y caudales bajos ciertos sectores del cauce se secan.

Como se puede apreciar en la Figura 4.17, a una distancia de 4 km de la desembocadura se produce un fuerte cambio en el ancho del río, tendiendo a aumentar desde dicho punto hasta donde comienza la canalización.

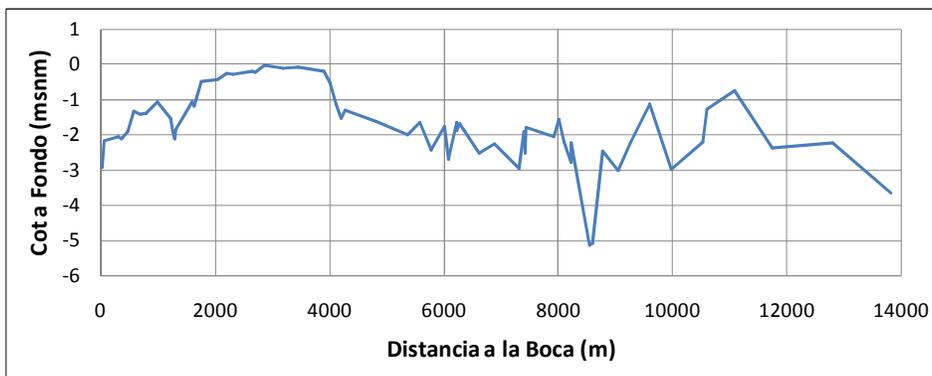


FIGURA 4.16: MÍNIMA COTA DE FONDO DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU REFERIDA A NRS.

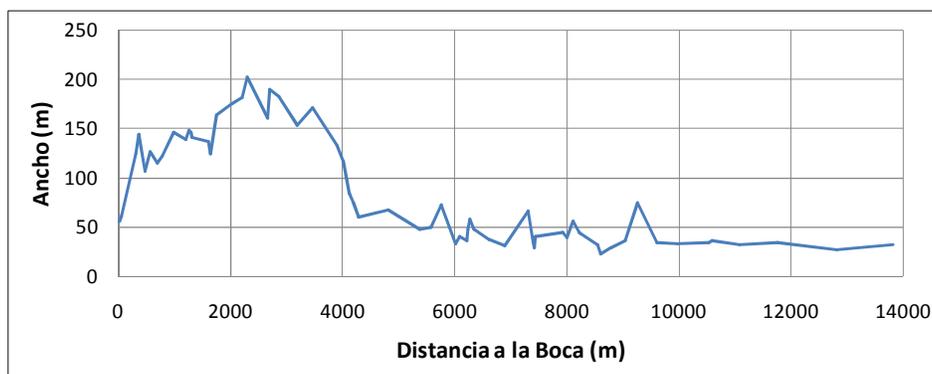


FIGURA 4.17: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

En la Tabla 4.8 se muestra la salinidad en la boca asociada al periodo de llenante y de vaciante. La información corresponde al promedio temporal en el periodo de medición y se obtuvo a partir de mediciones en la orilla del cauce, que se supusieron representativas de la salinidad en la sección.

TABLA 4.8: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.

Fecha	Salinidad Llenante (g/l)	Salinidad Vaciante (g/l)
19 de Enero	31,2	21,2
11 de Marzo	32,1	31,7
12 de Junio	34,0	27,0
22 de Junio	6,0	3,8

En base a los valores de la tabla anterior y utilizando la Ecuación (2.18) es posible encontrar la fracción de agua marina renovada que entra al estuario en el periodo de llenante para cada campaña de medición.

TABLA 4.9: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

Fecha	Coefficiente de Intercambio (%)
19 de Enero	78
11 de Marzo	17
12 de Junio	100
22 de Junio	8

SALINIDAD AL INTERIOR DEL ESTUARIO

La Figura 4.18 muestra la variación de la salinidad en la longitudinal para las cuatro campañas de terreno. Para todas las campañas se midió intrusión salina, lo cual se explica por los bajos caudales observados y por la morfología del cauce.

Los caudales de agua dulce asociados a las tres primeras campañas fueron muy parecidos, por lo que las diferencias observadas en la estratificación se explican principalmente por el cambio en el estado de mareas. En este sentido, los resultados obtenidos para las campañas del 11 de marzo y del 12 de junio fueron muy parecidos, debido a que se tuvo niveles del mar y caudales afluentes similares. En cambio en la campaña del 19 de enero se midió en condiciones de mareas de cuadratura, por lo que se tuvo salinidades menores. Sin embargo, la longitud de la intrusión salina fue semejante para las tres campañas, lo cual se puede deber a la incapacidad del caudal de estiaje para remover volúmenes de agua marina ubicados aguas arriba del depósito de sedimentos mencionado anteriormente.

Para la campaña del 22 de junio se tuvo una intrusión salina mucho menor tanto en extensión como en la magnitud de las salinidades medidas, fenómeno asociado al aumento del caudal del río.

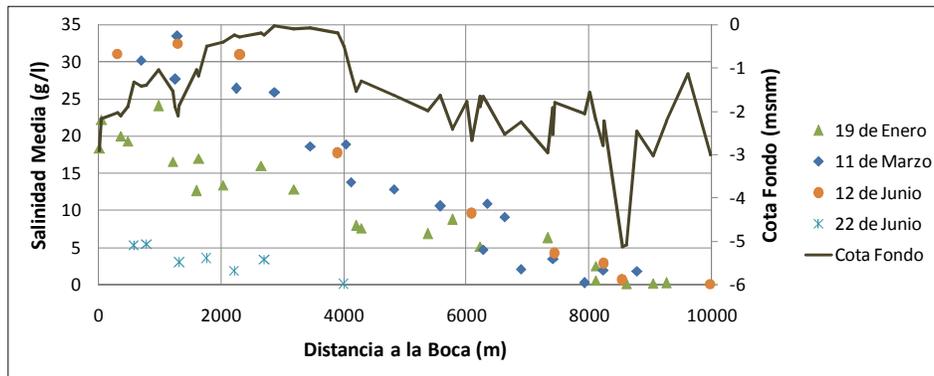


FIGURA 4.18: PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

En la Tabla 4.10 se muestra la salinidad media del estuario para el día de muestreo. La información fue promediada temporalmente en el periodo de medición y espacialmente desde la boca hasta la sección en que se midió salinidad de río (<0.25 g/l).

TABLA 4.10: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

Fecha	Salinidad Media (g/l)
19 de Enero	9.6
11 de Marzo	14.8
12 de Junio	18.0
22 de Junio	2.7

En la Tabla 4.11 se muestra la extensión de la intrusión salina, medida desde la boca hacia aguas arriba, considerando como límite el punto dónde se midió salinidad de río.

TABLA 4.11: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA MEDIDA DESDE LA BOCA PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

Fecha	Extensión Intrusión (km)
19 de Enero	9.3
11 de Marzo	9.4
12 de Junio	9.2
22 de Junio	3.5

En el Anexo III se incluyen seis figuras que muestran las isohalinas para los periodos de llenante y vaciante de las cuatro campañas de terreno realizadas (Figuras III.5 a III.10). De las figuras se aprecia que, independiente de la campaña considerada, la estratificación de la columna de agua tiende a aumentar en el periodo de vaciante, con una consecuente disminución de la extensión de la intrusión, lo que muestra la importancia del fenómeno de marea en la intrusión salina. El nivel de la estratificación varió considerablemente entre campañas debido al cambio en las condiciones de marea y de caudal afluente.

En la Figura 4.19 se muestra la variación del grado de estratificación, definido en el acápite 2.3.2, para las cuatro campañas de terreno. Cabe mencionar que se consideran cuestionables los límites sugeridos por Savenije (2005) para distinguir entre niveles de alta y baja mezcla.

Para la campaña del 19 de enero se tuvo alto grado de estratificación en toda la extensión de la intrusión, incrementándose hacia aguas arriba, siendo máximo a una distancia de 8 km de la boca del estuario. La estratificación observada en el tramo comprendido entre los cuatro y ocho kilómetros se debe a que el caudal del río asociado al periodo de estiaje fue incapaz de remover el agua marina estancada en las profundidades de dicho tramo, producto de la contrapendiente observable en la Figura 4.19.

La estratificación observada para la campaña del 11 de marzo fue menor que la observada para enero, debido a que en la segunda campaña se tuvo mareas de sicigia, mientras que en la primera de cuadratura, para caudales de agua dulce similares, lo que implica mayor capacidad de mezcla. Al igual que para la campaña de enero, se tuvo gran estratificación en el tramo comprendido entre los 4 y 8 kilómetros, observable en la Figura 4.19.

Los resultados obtenidos para la campaña del 12 de junio fueron muy parecidos a los obtenidos para la campaña de marzo, debido a que las condiciones de medición fueron parecidas en lo que respecta a caudal y a estado de marea. La amplitud de la marea para el 12 de junio fue menor que la de marzo, lo cual se reflejó en un aumento en la estratificación, producto de la menor capacidad de mezcla inducida por el mar.

En la campaña del 22 de junio se observó alta estratificación en las cercanías de la boca del estuario, la cual disminuye rápidamente hacia aguas arriba.

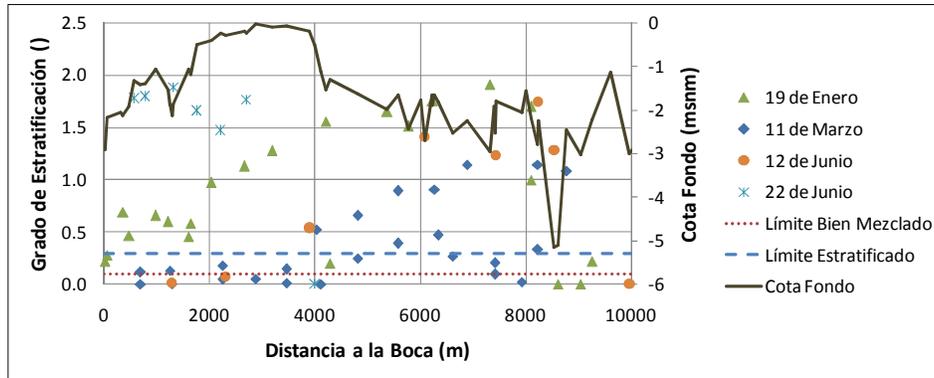


FIGURA 4.19: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL. RÍO LEBU.

4.4.3. ESTERO TONGOY

CAUDAL DEL RÍO

Para las dos campañas realizadas no se observó aporte superficial de agua dulce, debido a lo cual no fue necesario realizar aforos.

TABLA 4.12: CAUDAL DEL ESTERO TONGOY PARA LOS DÍAS DE MEDICIÓN.

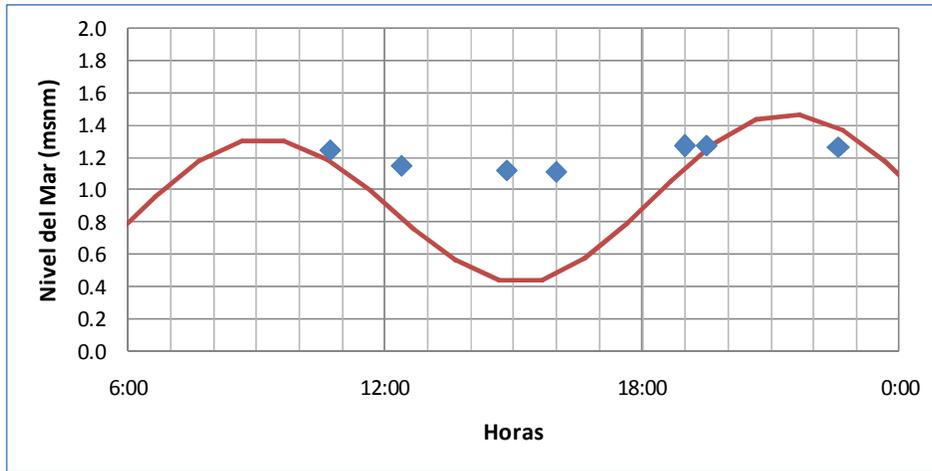
Fecha	Caudal del Estero (m ³ /s)
7 de Abril	0
7 de Julio	0

La falta de escorrentía superficial para los días de muestreo fue de algún modo perjudicial para el análisis de la hidrodinámica del sistema, en el sentido de que no se pudo observar claramente el efecto de la mezcla de agua dulce con agua de mar. Sin embargo se considera beneficioso, dado que el comportamiento de este estero es representativo de otros cursos de agua del norte del país.

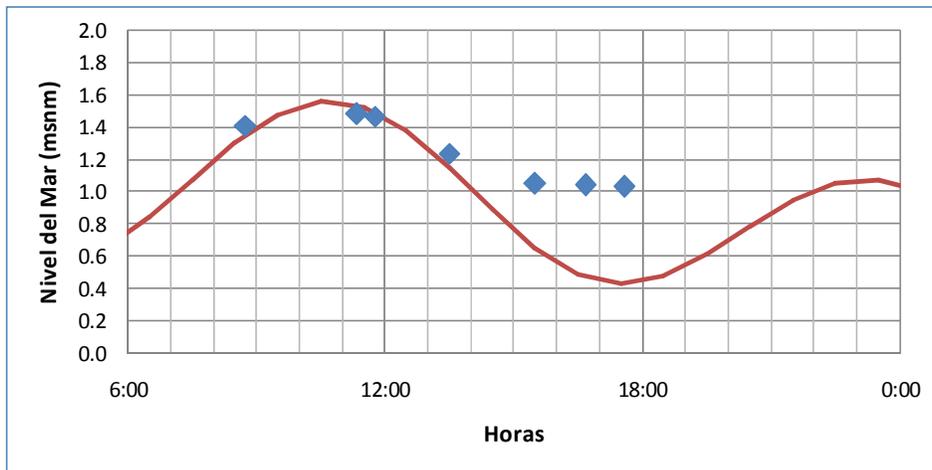
ESTADO DE MAREAS

La Figura 4.20A y la Figura 4.20B muestran la variación del nivel del mar medida en la boca del estuario, coordenadas UTM: 260060E, 6650513S (Huso 19S), comparadas con la información entregada por el SHOA obtenida en Coquimbo, para las dos campañas de terreno. Las cotas están referidas al nivel de reducción de sonda (NRS). Cabe añadir que para las fechas de medición, el mar solo lograba ingresar para niveles altos de marea y con

ayuda del oleaje. Esto se vio reflejado en las diferencias observadas entre la serie medida y la obtenida del SHOA.



(A)



(B)

FIGURA 4.20: NIVEL DEL MAR MEDIDO EN TERRENO (MARCAS) Y OBTENIDO DEL SHOA (LÍNEA) PARA TONGOY. (A) 7 DE ABRIL Y (B) 7 DE JULIO.

MORFOLOGÍA

En la Figura 4.21 y Figura 4.22 se muestra el perfil longitudinal del cauce (mínima cota en la transversal) y del ancho superficial del estero Tongoy, luego de haber procesado y corregido la información de las dos campañas realizadas.

En general no se observa gran variación de la cota de fondo en la longitudinal, salvo en el extremo de aguas arriba del estuario, en dónde se ubica una fosa de gran profundidad.

Desde la boca hasta alrededor de 700 m aguas arriba, se tiene una cota de fondo mayor al nivel medio del mar, lo cual permite el ingreso de aguas desde éste solo para condiciones de alto nivel de marea y oleaje.

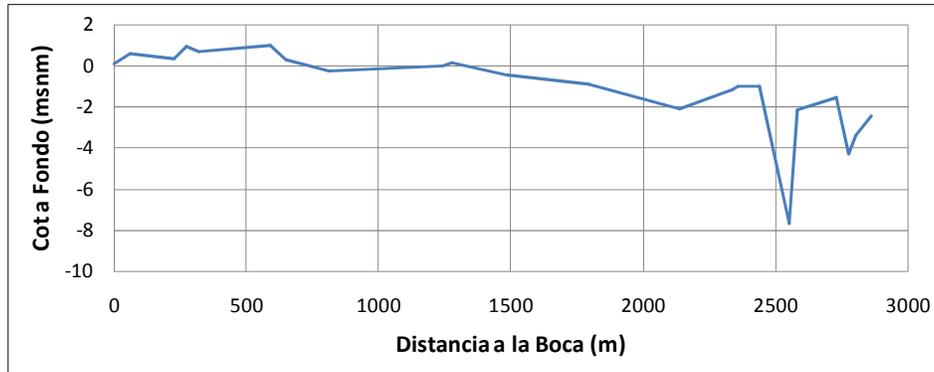


FIGURA 4.21: MÍNIMA COTA DE FONDO DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY REFERIDA A NRS.

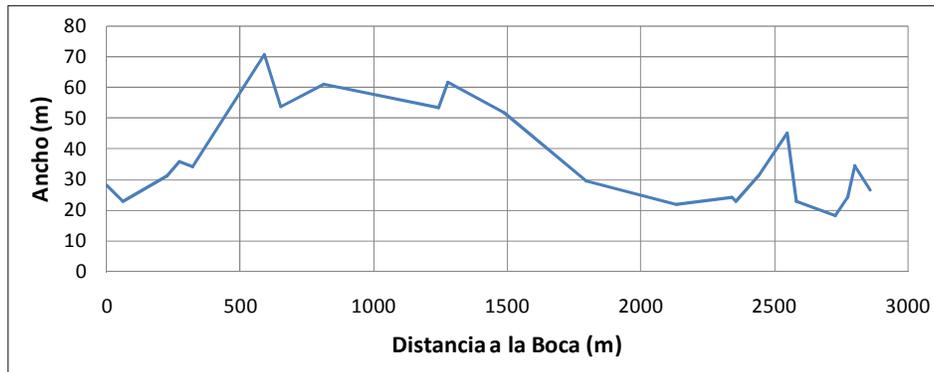


FIGURA 4.22: ANCHO SUPERFICIAL DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO

En la Tabla 4.13 se muestra la salinidad en la boca asociada al periodo de llenante y de vaciante. La información corresponde al promedio temporal en el periodo de medición y se obtuvo a partir de mediciones en la orilla del cauce, que se supusieron representativas de la salinidad en la sección.

TABLA 4.13: SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY DURANTE LA LLENANTE Y VACIANTE.

Fecha	Salinidad Llenante (g/l)	Salinidad Vaciante (g/l)
7 de Abril	32	27
7 de Julio	34	28

En base a los valores de la tabla anterior y utilizando la Ecuación (2.18) es posible encontrar la fracción de agua marina renovada que entra al estuario en el periodo de llenante para cada campaña de medición, mostrada en la Tabla 4.14.

TABLA 4.14: COEFICIENTE DE INTERCAMBIO PARA EL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

Fecha	Coefficiente de Intercambio, R (%)
7 de Abril	71
7 de Julio	100

SALINIDAD AL INTERIOR DEL ESTUARIO

La Figura 4.23 muestra la variación de la salinidad en la longitudinal para las dos campañas de terreno. Para ambos terrenos se midió salinidad cercana a la del mar a lo largo de todo el estero. En general no se observaron variaciones longitudinales de salinidad considerables, ni estratificación en la vertical. En base a las mediciones se concluye que gran parte del volumen de agua del estero proviene del mar.

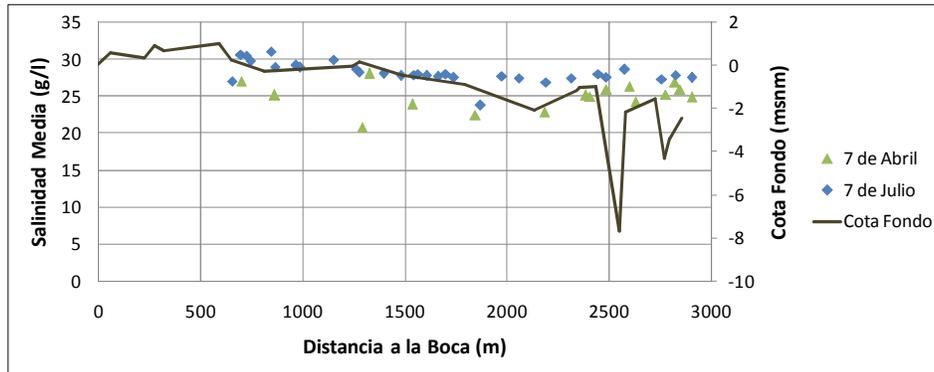


FIGURA 4.23. PERFIL LONGITUDINAL DE SALINIDAD DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

En la Tabla 4.15 se muestra la salinidad media del estuario para el día de la medición. La información fue promediada temporalmente en el periodo de medición y espacialmente desde la boca hasta el final del estero.

TABLA 4.15: SALINIDAD MEDIA DEL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

Fecha	Salinidad Media (g/l)
7 de Abril	24.2
7 de Julio	28.0

En la Tabla 4.16 se muestra la extensión de la intrusión salina, medida desde la boca hacia aguas arriba. Para las fechas de medición, la intrusión salina abarcó todo el estero.

TABLA 4.16: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA DESDE LA BOCA PARA EL ESTUARIO DEL ESTERO TONGOY.

Fecha	Extensión Intrusión (km)
7 de Abril	Todo el estero (2.9 km).
7 de Julio	Todo el estero (2.9 km).

En el Anexo III se incluyen dos figuras que muestran las isohalinas de las dos campañas de terreno realizadas (Figuras III.11 y III.12). De las figuras se aprecia que para ambas campañas de terreno se tuvo alta mezcla de la columna de agua a lo largo de todo el estero, con salinidades considerablemente altas.

En la Figura 4.24 se muestra la variación del grado de estratificación, definido en el acápite 2.3.2, para ambas campañas de terreno. La Figura 4.24 confirma el bajo nivel de estratificación que se aprecia en las Figuras III.11 y III.12 del Anexo III. Cabe recordar que el estero Tongoy no presentó afluentes superficiales de agua dulce para las fechas de medición. En este sentido, el bajo nivel de estratificación no se explica por una alta capacidad de mezcla en el estuario, sino porque gran parte del volumen de agua tuvo un origen común. Cabe mencionar que se consideran cuestionables los límites sugeridos por Savenije (2005) para distinguir entre niveles de alta y baja mezcla.

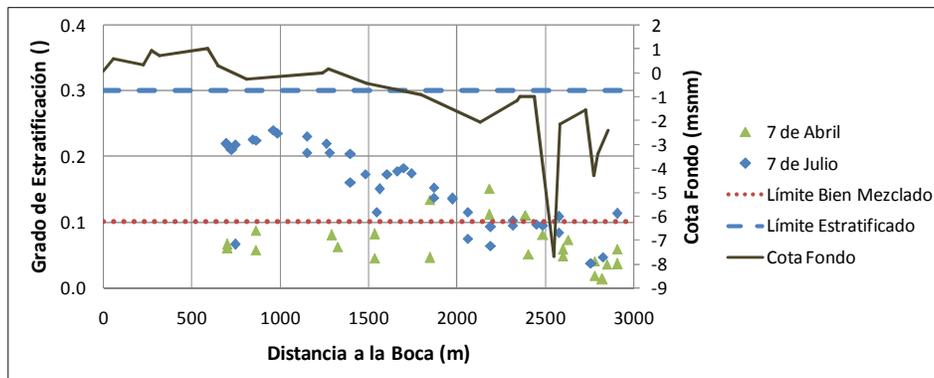


FIGURA 4.24: VARIACIÓN DEL GRADO DE ESTRATIFICACIÓN EN LA LONGITUDINAL. ESTERO TONGOY.

4.5. RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos, útiles para la aplicación de la metodología desarrollada a petición de la DGA.

TABLA 4.17: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO TOLTÉN.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)	Amplitud Marea (m)	Coefficiente de Intercambio (%)	Salinidad Media (g/l)	Extensión Intrusión (km)
21 de Enero	187	0.30	26	1	3.1
9 de Marzo	186	0.70	27	11	4.2
14 de Junio	608	0.27	Sin Intrusión	Sin Intrusión	Sin Intrusión
19 de Junio	1110	0.41	Sin Intrusión	Sin Intrusión	Sin Intrusión

TABLA 4.18: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA RÍO LEBU.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)	Amplitud Marea (m)	Coefficiente de Intercambio (%)	Salinidad Media (g/l)	Extensión Intrusión (km)
19 de Enero	5.6	0.27	78	10	9.3
11 de Marzo	4.0	0.62	17	15	9.4
12 de Junio	4.3	0.40	100	18	9.2
22 de Junio	35.4	0.64	8	3	3.5

TABLA 4.19: RESUMEN DE DATOS DE TERRENO PARA ESTERO TONGOY.

Fecha	Caudal del Río (m ³ /s)	Amplitud Marea (m)	Coefficiente de Intercambio (%)	Salinidad Media (g/l)	Extensión Intrusión (km)
7 de Abril	0	0.08	71	24	2.9
7 de Julio	0	0.23	100	28	2.9

CAPITULO 5: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En el presente capítulo se muestra la aplicación de la metodología de estimación de caudales de dilución a los estuarios piloto considerados en el estudio. En este sentido se obtiene para cada estuario su extensión, los límites de la *Zona Sin Intrusión*, *Zona de Mezcla Parcial* y *Zona de Cuña Salina* y el caudal de dilución asociado a las primeras dos zonas, recordando que se propone considerar caudal de dilución nulo para la *Zona de Cuña Salina*, dada su baja capacidad de mezcla.

5.1. RÍO TOLTÉN

5.1.1. LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.1 se llega a una extensión de 13.4 km considerando un nivel del mar de 1.8 m (pleamar de sicigia de la serie del 9 de marzo), como se muestra en la Figura 5.1.

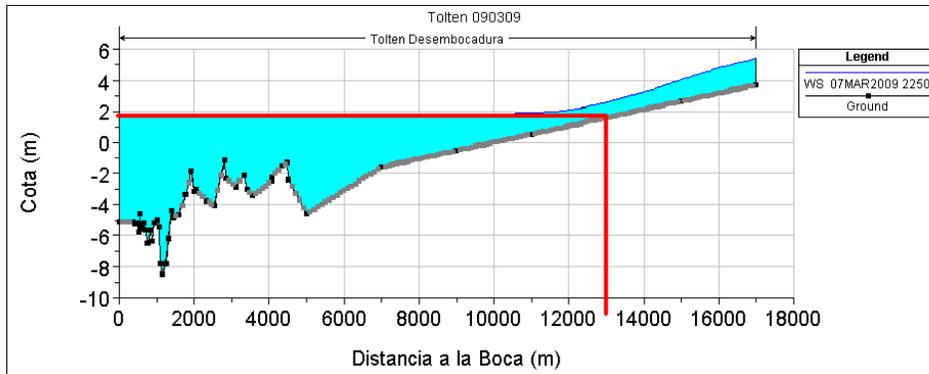


FIGURA 5.1. EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

5.1.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.2 y la información presentada en la Tabla 5.1 se llega a un $Q_{Límite}$ de $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Dado que el caudal con probabilidad de excedencia del 95% es igual a $174 \text{ m}^3/\text{s}$, se considera finalmente $Q_{Límite} = 174 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 5.1: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{LÍMITE}$ PARA EL RÍO TOLTÉN.

Parámetro	Valor
W (m)	388
ρ río (kg/m^3)	1000
ρ océano (kg/m^3)	1025
u_t (m/s)	0.18

5.1.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.3 se obtiene la extensión de la *Zona de Cuña Salina*. La información utilizada para aplicar el modelo de Olivares (2000) se muestra en la Tabla 5.2, mientras que la batimetría se obtiene de la Figura 4.10. La condición de borde de crisis interna se impone en el sector más angosto de la boca.

TABLA 5.2: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA. RÍO TOLTÉN.

Parámetro	Valor
Caudal (m ³ /s)	174
Ancho medio (m)	372
Profundidad media (m)	2.9
Nivel del mar (msnm)	1.01
Amplitud velocidad boca (m/s)	0.2
Densidad cuña (kg/m ³)	1025
Coefficiente de fricción	0.00049

Dentro de la metodología desarrollada se propuso utilizar el nivel medio del mar para un estado de mareas de sicigia como condición de borde de aguas abajo, agregando un cuarto de la excursión a la extensión entregada por el modelo de cuña salina, para dar cuenta del avance de la cuña durante el periodo de llenante. En este sentido, el modelo de cuña salina entrega 7.1 km, como se aprecia en la Figura 5.2, y a partir de la aplicación de la Ecuación (2.22) se obtiene una excursión de 2.8 km, resultando una extensión total de 7.8 km.

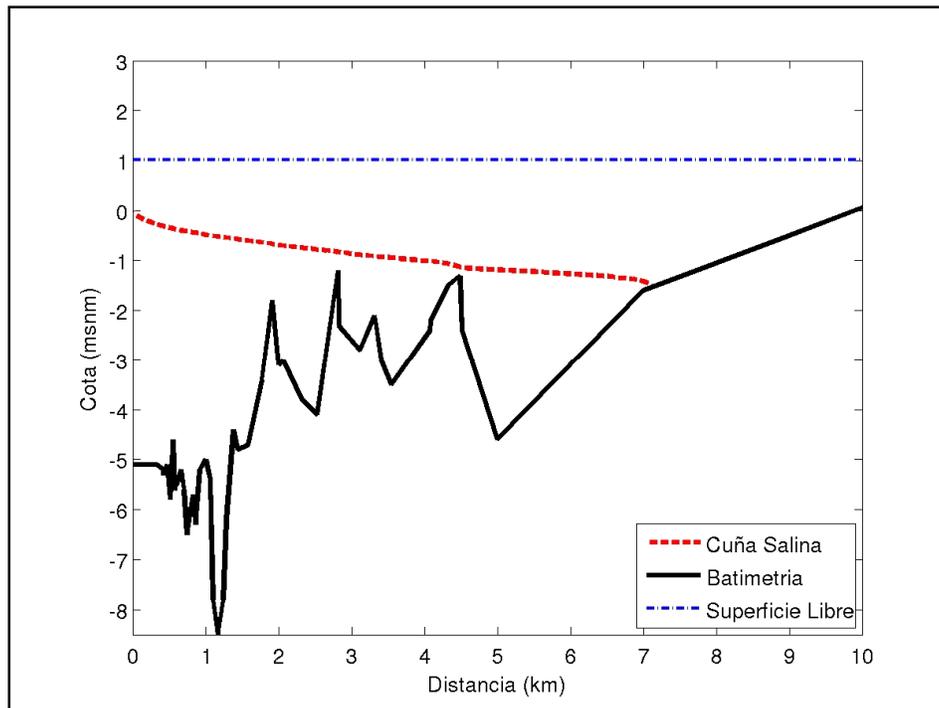


FIGURA 5.2. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000) EN TOLTÉN.

5.1.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Debido a que el valor original del caudal límite es $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$, inferior al caudal con probabilidad de excedencia del 95% que resulta ser $174 \text{ m}^3/\text{s}$, se concluye que es muy poco probable tener intrusión en forma de mezcla parcial por lo que este estuario no tiene *Zona de Mezcla Parcial*.

5.1.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Debido a que no existe *Zona de Mezcla Parcial*, no tiene sentido calcular caudales de dilución en esta zona.

5.1.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.6 y considerando un caudal con probabilidad de excedencia del 95% de $174 \text{ m}^3/\text{s}$ y mareas de sicigia (serie del 9 de marzo), obtenemos el caudal de dilución para la *Zona Sin Intrusión*, mostrado en la Figura 5.3. Cabe mencionar que los coeficientes de dispersión se obtuvieron de la Ecuación (2.8) para el tramo donde se midió salinidad (0 a 5 km) y a partir de la Ecuación (2.9) donde no se tuvo intrusión salina (5 a 13.4 km).

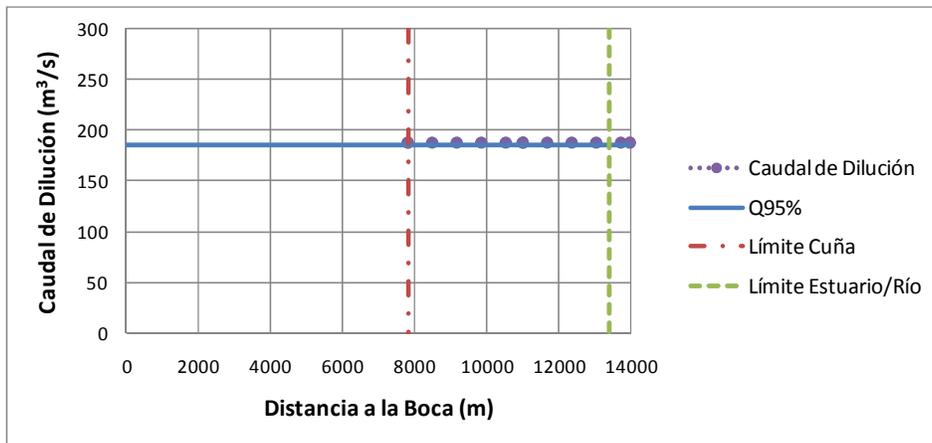


FIGURA 5.3. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

5.1.7. RESUMEN

En la Tabla 5.3 se muestran las extensiones de las zonas características del estuario, mientras que en la Figura 5.4 se muestra la variación del caudal de dilución a lo largo del estuario.

TABLA 5.3: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

Zona	Límite Aguas Abajo (km)	Límite Aguas Arriba (km)
Zona de Cuña Salina	0	7.8
Zona de Mezcla Parcial	No Existe	No Existe
Influencia de Marea	7.8	13.4

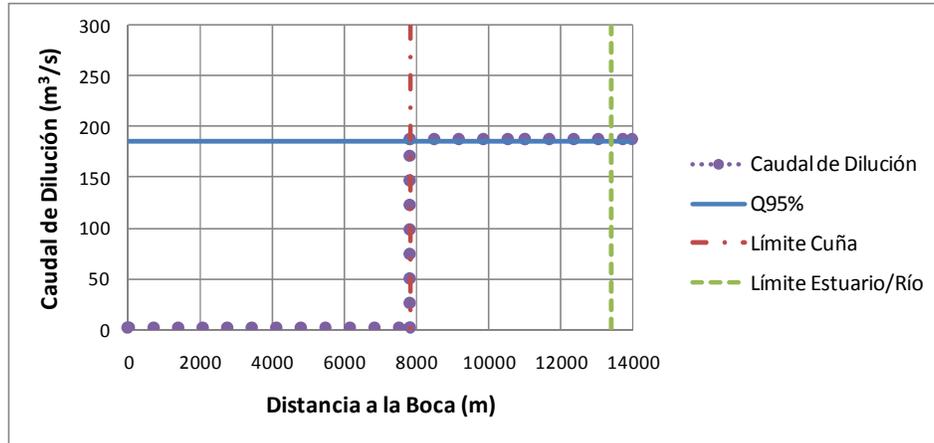


FIGURA 5.4. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN.

5.2. RÍO LEBU

5.2.1. LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.1 se llega a una extensión de 26.8 km considerando un nivel del mar de 1.9 m (pleamar de sicigia de la serie del 22 de junio), como se muestra en la Figura 5.5.

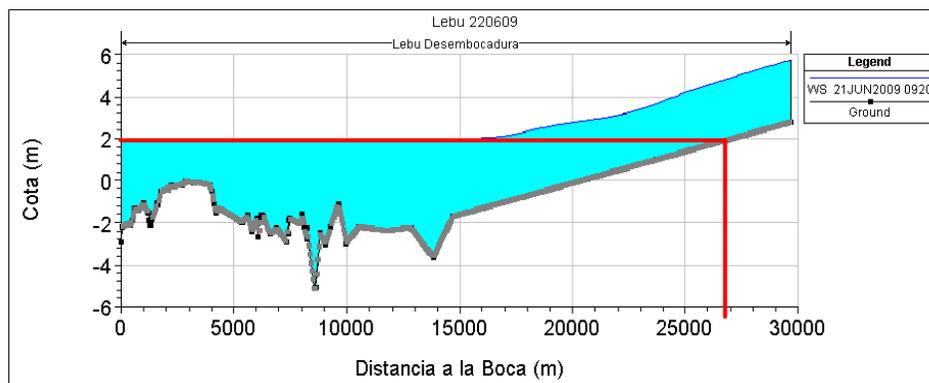


FIGURA 5.5. EXTENSIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

5.2.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.2 y la información presentada en la Tabla 5.4 se llega a un $Q_{Límite}$ de $8.7 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual es mayor al caudal con probabilidad de excedencia del 95%, que resulta ser de $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Luego se concluye que $Q_{Límite} = 8.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 5.4: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER $Q_{Límite}$. RÍO LEBU.

Parámetro	Valor
W (m)	85
ρ río (kg/m^3)	1000
ρ océano (kg/m^3)	1025
u_t (m/s)	0.32

5.2.3. EXTENSIÓN DE LA CUÑA SALINA

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.3 se obtiene la extensión de la *Zona de Cuña Salina*. La batimetría se obtiene de la Figura 4.16, mientras que la información utilizada para correr el modelo de Olivares (2000) se muestra en la Tabla 5.5. La condición de borde de crisis interna se impone en el sector más angosto de la boca.

TABLA 5.5: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA. RÍO LEBU.

Parámetro	Valor
Caudal (m^3/s)	8.7
Ancho medio (m)	101
Profundidad media (m)	1.4
Nivel del mar (msnm)	1.03
Amplitud velocidad boca (m/s)	0.4
Densidad cuña (kg/m^3)	1025
Coefficiente de fricción	0.00145

Dentro de la metodología desarrollada se propuso utilizar el nivel medio del mar para un estado de mareas de sicigia como condición de borde de aguas abajo, agregando un cuarto de la excursión a la extensión entregada por el modelo de cuña salina, para dar cuenta del avance de la cuña durante el periodo de llenante. En este sentido, el modelo de Olivares (2000) entrega 2.8 km, como se aprecia en la Figura 5.6, y a partir de la aplicación de la Ecuación (2.22) se obtiene una excursión de 5.6 km, resultando una extensión total de 4.2 km.

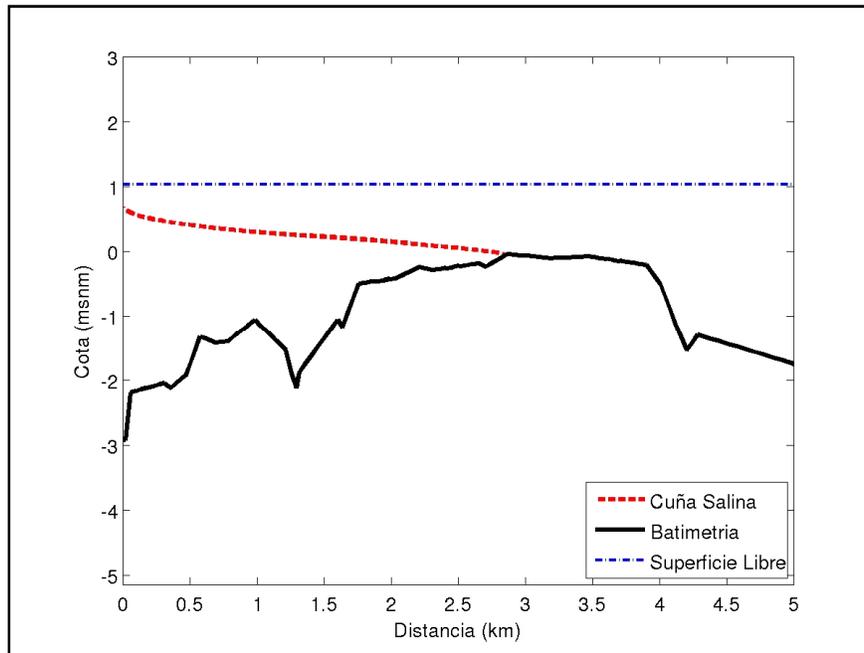


FIGURA 5.6. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000) EN LEBU.

5.2.4. EXTENSIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.4 se obtiene la extensión de la *Zona de Mezcla Parcial*. Se utiliza un caudal con probabilidad de excedencia de 95% igual a 4.3 m³/s, según la información obtenida en la estación fluviométrica de la DGA en Los Álamos. Se utiliza la serie de nivel del mar del 22 de junio (mareas de sicigia). Los coeficientes de dispersión se obtuvieron a partir de la Ecuación (2.8) para el tramo entre los 0 y 10.3 km y a partir de la Ecuación (2.9) desde los 10.3 km de la boca hacia aguas arriba.

Se determinó del modelo advección-dispersión de HEC-RAS que la salinidad disminuye por debajo de 0.25 g/l a 10.3 km de la boca, distancia igual a la extensión de la intrusión en forma de mezcla parcial.

5.2.5. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA DE MEZCLA PARCIAL

Para determinar el caudal de dilución en esta zona se ocupa el mismo modelo HEC-RAS, considerando esta vez descargas de contaminantes virtuales, a lo largo del cauce, acorde a la metodología explicada en el acápite 3.2.5. Para el modelo se considera el caudal con probabilidad de excedencia de 95% de 4.3 m³/s y condiciones de marea de cuadratura (serie del 19 de enero). El resultado de la modelación se muestra en la Figura 5.7. Las características de la descarga virtual utilizada se detallan en la Tabla 5.6, además del coeficiente de intercambio utilizado y de la concentración proveniente del mar resultante de la aplicación de la Ecuación (2.21).

TABLA 5.6: CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA VIRTUAL PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

$Q_{95\%}$ (m^3/s)	4.3
R (%)	78
$Q_{Descarga}$ (m^3/s)	0.1
$C_{Descarga}$ (mg/l)	100
C_{Mar} (mg/l)	0.5

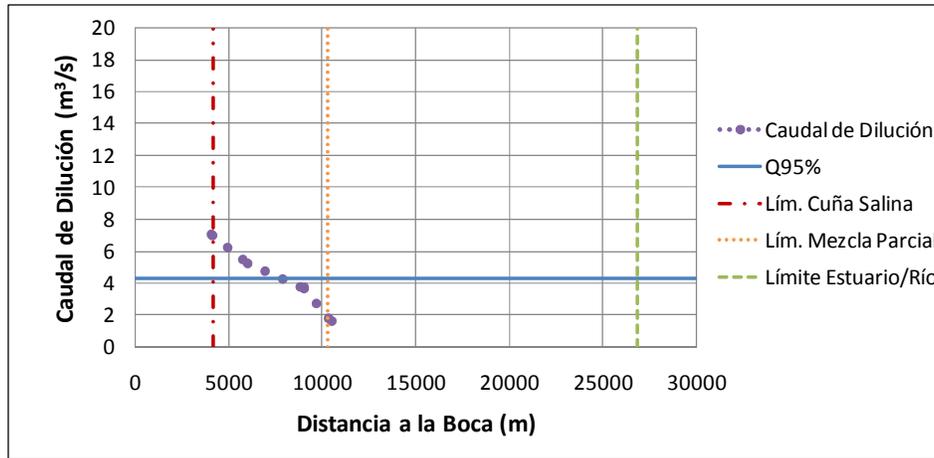


FIGURA 5.7. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

5.2.6. CAUDAL DE DILUCIÓN EN LA ZONA SIN INTRUSIÓN

Utilizando la metodología descrita en el acápite 3.2.6 y considerando un caudal con probabilidad de excedencia de 95% de $4.3 m^3/s$ y mareas de sicigia (serie del 22 de junio), obtenemos el caudal de dilución para la *Zona Sin Intrusión*. Cabe mencionar que los coeficientes de dispersión se obtuvieron a partir de la Ecuación (2.8) para el tramo entre los 0 y 10.3 km y a partir de la Ecuación (2.9) desde los 10.3 km de la boca hacia aguas arriba. El resultado se entrega en la Figura 5.8.

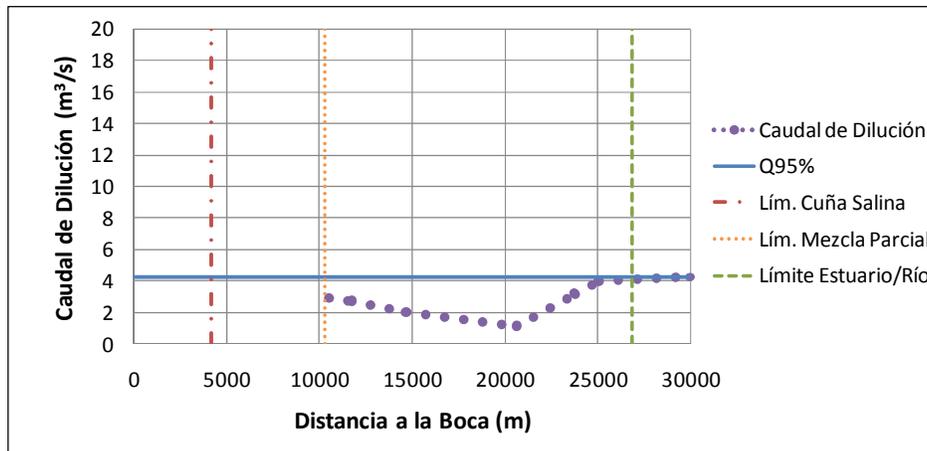


FIGURA 5.8. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

5.2.7. RESUMEN

En la Tabla 5.7 se muestra un resumen de las zonas en que se divide el estuario, mientras que la Figura 5.9 muestra la variación del caudal de dilución a lo largo de éste.

TABLA 5.7: ZONAS DE DIVISIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

Zona	Límite Aguas Abajo (km)	Límite Aguas Arriba (km)
Zona de Cuña Salina	0	4.2
Zona de Mezcla Parcial	4.2	10.3
Influencia de Marea	10.3	26.8

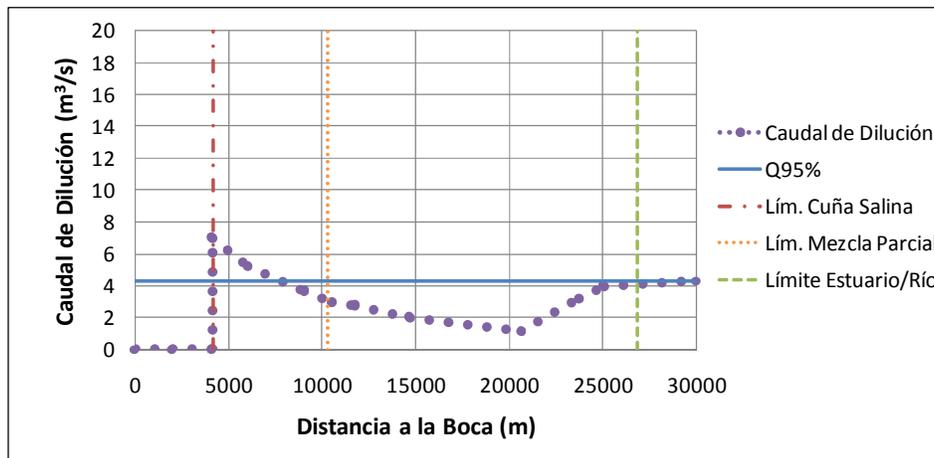


FIGURA 5.9. CAUDALES DE DILUCIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

5.3. ESTERO TONGOY

Para las fechas en que fueron realizadas las campañas de terreno no se observó aporte de agua superficial desde la cuenca hacia el estero, por lo que se concluye que la mayor parte del agua del estero proviene del mar. Lo anterior se verifica con los valores de salinidad medidos, los cuales se encuentran en el rango 24 g/l a 28 g/l, valores cercanos a la salinidad del agua de mar. Los valores indicados muestran la existencia de cierto volumen de agua dulce de origen desconocido, el cual podría provenir de descargas antrópicas. En base a lo anterior y a la definición de los límites de estuario adoptada, se determina que todo el estero corresponde a un estuario, por lo que su extensión es de 2.9 km.

Por otro lado, se realiza un análisis hidrológico de la cuenca aportante al estero, para determinar si las condiciones observadas en terreno son normales, o bien excepcionales. Información pluviométrica de la estación Cerrillos Pobres indica que entre los años 1962 y 1968 precipitó un total de 51 días, lo que arroja una probabilidad de precipitación de 2.3%. La cota máxima de la cuenca del estero Tongoy es cercana a los 1200 msnm, mientras que

la longitud de la quebrada que define el estero es de alrededor de 20 km. La superficie de la cuenca es de alrededor de 300 km². Con estos datos, se puede estimar el tiempo de concentración de la cuenca, lo que se lleva a cabo por medio del método de California y del método de Giandotti, presentados en las Ecuaciones (5.1) y (5.2), respectivamente.

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{H_d} \right)^{0,385} \quad (5.1)$$

$$t_c = 60 \cdot \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_d}} \quad (5.2)$$

donde t_c al tiempo de concentración en segundos, A corresponde al área de la cuenca en km², H_d al desnivel en metros, L a la longitud del cauce principal en km.

Los resultados entregados por los modelos indican que el tiempo de concentración para la cuenca del estero Tongoy es de menos de 5 horas (2 horas para el método de California y 3.5 horas para el de Giandotti). Considerando el bajo tiempo de concentración y la probabilidad de asociada a la precipitación, se puede concluir que el estuario presenta un caudal afluente muy pocas veces en el año, y que éste se debe principalmente a pulsos ocasionados por la precipitación, que rápidamente llegan a la costa. Por lo tanto, se puede asegurar que la condición normal del sistema es la observada en terreno para las fechas de medición. Debido a que la probabilidad de recibir aporte de aguas superficiales es baja, no tiene sentido definir las zonas de mezcla antes propuestas. Por las razones antes mencionadas, se impone arbitrariamente un caudal de dilución nulo para toda la extensión del estuario.

CAPITULO 6: VALIDACIÓN

Para conocer la utilidad de los modelos numéricos considerados en la metodología desarrollada para la DGA se hace necesario llevar a cabo un proceso de validación. En este sentido se propone aplicar el modelo de Olivares (2000) y el de advección-dispersión a los estuarios piloto del estudio DGA considerando las condiciones de caudal afluente y marea asociadas a las campañas de terreno, de modo de poder comparar los resultados de la modelación con las mediciones. La validación se realiza utilizando los supuestos de la metodología de determinación de caudales de dilución.

Por otro lado, se analiza la validez de aplicar el modelo permanente de cuña salina de Olivares (2000) a estuarios con influencia de marea, utilizando como referencia el modelo impermanente de cuña salina desarrollado en el Anexo I.

6.1. LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO

Modelando el escurrimiento en HEC-RAS se determina para cada campaña de terreno la variación del caudal y de la altura de escurrimiento en el límite de aguas arriba de los estuarios piloto considerados. Dichos límites se calcularon de acuerdo a la metodología explicada en el acápite 3.2.1, y su obtención se muestra en los acápites 5.1.1 y 5.2.1, para Toltén y Lebu respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.1.

TABLA 6.1: VARIACIÓN DEL NIVEL Y DEL CAUDAL EN EL LÍMITE ENTRE EL ESTUARIO Y EL RÍO.

Lebu	Variación profundidad (%)	Variación caudal (%)	Toltén	Variación profundidad (%)	Variación caudal (%)
19 de Enero	1.3	0.4	21 de Enero	1.5	0.1
11 de Marzo	4.1	2.0	9 de Marzo	1.0	0.1
12 de Junio	2.0	0.8	15 de Junio	1.1	0.1
22 de Junio	0.5	0.2	19 de Junio	0.8	0.0

Se puede observar que las variaciones obtenidas son bajas, tanto para el caudal como para la altura de escurrimiento, lo que indica que en los límites obtenidos según la metodología propuesta el efecto de marea es despreciable.

Sin embargo, debe quedar claro que tanto las extensiones obtenidas, como la validación realizada dependen de la calidad de la batimetría utilizada, que en este caso se obtuvo a partir de un modelo de elevación digital desde los 7 km hacia aguas arriba para Toltén y desde los 15 km para Lebu, dado que las campañas de terreno culminaron con anterioridad a la definición de la metodología desarrollada, por lo que no se realizaron mediciones de batimetría en dichos tramos.

6.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL LÍMITE PARA TENER CUÑA SALINA

La validez de la metodología para determinar caudales de dilución desarrollada depende en gran medida de la capacidad de la Ecuación (3.1) para determinar el caudal límite a partir del cual se comienza a tener intrusión en forma de cuña salina. A continuación se analiza la validez de dicha ecuación.

6.2.1. RÍO TOLTÉN

En terreno se observó alta estratificación en casi todos los perfiles medidos en las campañas del 21 de enero y 9 de marzo, mientras que para las campañas de junio no se tuvo intrusión de ningún tipo. Luego se espera encontrar valores de $Q_{Límite}$ inferiores al caudal del río para las campañas del 21 de enero y 9 de marzo, mientras que para las campañas de junio no tiene sentido preguntarse por $Q_{Límite}$. En la Tabla 6.2 se muestran los caudales límites obtenidos y los caudales aforados en terreno, además de los valores de u_t obtenidos de HEC-RAS.

TABLA 6.2: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$.

Fecha	u_t (m/s)	W (m)	$Q_{Río}$ (m ³ /s)	$Q_{Límite}$ (m ³ /s)	N_R ()
21 de Enero	0.10	388	186	1	117.45
9 de Marzo	0.28	388	187	28	5.38

Vemos que los caudales aforados son efectivamente mayores que los caudales límites, por lo que no existe contradicción. Sin embargo, no es posible concluir respecto a la precisión del criterio utilizado para definir $Q_{Límite}$ dado que ambos caudales aforados son mucho mayores que $Q_{Límite}$.

6.2.1. RÍO LEBU

El nivel de estratificación observado en terreno es en cierto modo discutible dado que no se midió salinidad en forma continua. Sin embargo, en base a las mediciones que se tienen se puede concluir que para las campañas del 19 de enero y del 22 de junio se tiene alta estratificación en casi todos los perfiles medidos. Para el resto de las campañas el nivel de estratificación varía entre mezcla parcial y alta estratificación dependiendo del perfil medido. Luego se esperaría obtener valores de $Q_{Límite}$ inferiores al caudal del río con seguridad para las campañas del 19 de enero y del 22 de junio. En la Tabla 6.3 se muestran los caudales límites obtenidos y los caudales aforados en terreno.

TABLA 6.3: VALIDACIÓN DEL MODELO PARA $Q_{LÍMITE}$.

Fecha	u_t (m/s)	W (m)	$Q_{Río}$ (m ³ /s)	$Q_{Límite}$ (m ³ /s)	N_R ()
19 de Enero	0.32	85	5.6	9.8	0.54
11 de Marzo	0.58	85	4.0	54.1	0.06
12 de Junio	0.37	85	4.3	12.9	0.24
22 de Junio	0.39	85	35.4	16.5	1.72

Luego, notamos que el criterio adoptado en la metodología de obtención de caudales de dilución falla para la campaña del 19 de enero y podría ser cuestionable para las campañas del 11 de marzo y 12 de junio. En lo que sigue de la validación se considera solo a la campaña del 22 de junio como de alta estratificación.

6.3. MODELO DE CUÑA SALINA PERMANENTE DE OLIVARES (2000)

Se propone aplicar el modelo de Olivares (2000) a los estuarios de los ríos Toltén y Lebu, considerando las condiciones de marea y caudal afluente medidas en las campañas de terreno que se consideran de alta estratificación, de modo de poder comparar la extensión de la cuña salina entregada por el modelo con la intrusión observada en terreno. Se utilizan los supuestos especificados en la metodología desarrollada, es decir utilizar el nivel medio del mar como condición de borde y sumar un cuarto de la excursión al resultado obtenido del modelo de Olivares (2000), para dar cuenta del avance de la cuña durante el periodo de llenante. La validación se realiza considerando las campañas que tuvieron alta estratificación según el *Número de Richardson de Estuarios*. La condición de borde de crisis interna se impone en la sección más angosta de la desembocadura, dado que no existe suficiente información de terreno como para establecer el lugar más adecuado para imponer dicha condición, ni tampoco para verificar su validez. La incertidumbre asociada a la condición de borde de crisis se discute en el acápite 7.7.

Por otro lado, se analiza la validez de aplicar el modelo de cuña salina permanente de Olivares (2000) a estuarios con influencia de marea, utilizando como referencia el modelo impermanente de cuña salina desarrollado en el Anexo I.

6.3.1. RÍO TOLTÉN

La información utilizada para la modelación se muestra en la Tabla 6.4 y corresponde a la de las campañas del 21 enero y 9 de marzo. Se considera el nivel medio del mar del periodo de medición y una densidad de la cuña de 1025 kg/m³. Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Olivares (2000) se muestran en la Figura 6.1 y Figura 6.2, para las campañas de enero y marzo respectivamente, mientras que la Tabla 6.5 muestra la comparación entre las extensiones modeladas y la medidas en terreno.

TABLA 6.4: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.

Campaña de terreno	Caudal (m ³ /s)	Nivel mar (msnm)	Profundidad media (m)	Ancho medio (m)	Velocidad boca (m/s)	Coefficiente fricción ()
21 de Enero	186	0.98	2.9	340	0.2	0.00043
9 de Marzo	187	0.95	2.9	372	0.4	0.00046

TABLA 6.5: COMPARACIÓN DE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y MEDIDAS.

Campaña de terreno	Máxima extensión medida (m)	Olivares (m)	Olivares + Excursión/4 (m)
21 de Enero	3100	4418	5050
9 de Marzo	4200	4449	5803

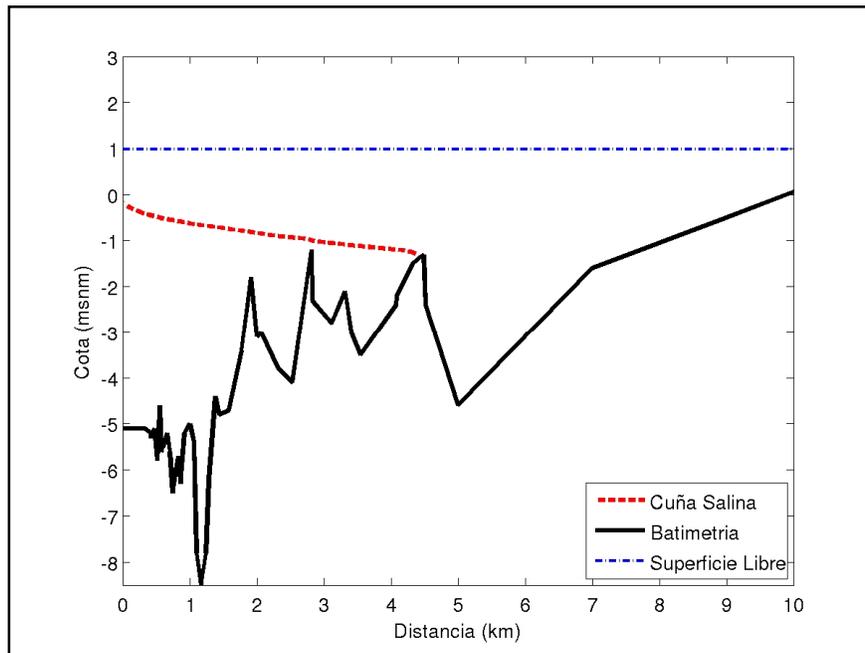


FIGURA 6.1. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000). TOLTÉN EN ENERO.

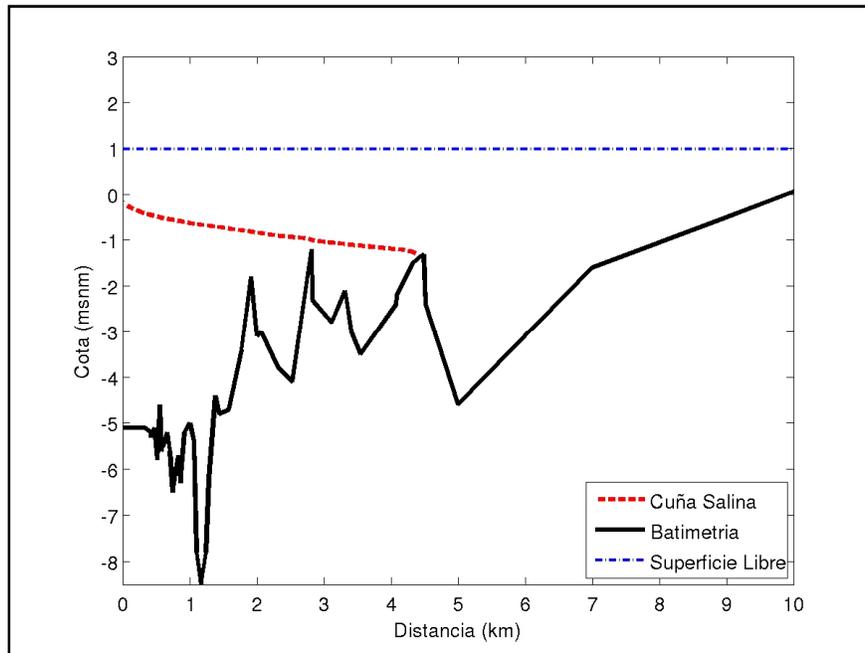


FIGURA 6.2. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000). TOLTÉN EN MARZO.

Para poder comparar las longitudes mostradas en la Tabla 6.5 se hace necesario recordar que las extensiones máximas medidas pueden no haber sido las máximas del día de medición, dado el desplazamiento de la cuña durante la llenante y vaciante. Para tener una idea de la relación existente entre la máxima extensión medida y la máxima extensión del día de medición se obtienen los instantes en que comienza y termina la llenante, utilizando un modelo HEC-RAS del estuario. Los tiempos obtenidos se comparan con los asociados a las mediciones del perfil más alejado de la boca. Los resultados se muestran en la Tabla 6.6.

TABLA 6.6: COMPARACIÓN ENTRE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y REAL.

Campaña de terreno	Hora medición perfil más alejado (hrs)	Hora comienzo llenante (hrs)	Hora término llenante (hrs)
21 de Enero	16:26	12:50	19:30
9 de Marzo	15:14	14:50	21:10

A partir de los resultados anteriores se concluye que para ambas campañas la extensión medida no fue la máxima del día, sobre todo para la campaña del 9 de marzo. Lo anterior podría explicar en parte las diferencias encontradas entre las extensiones medidas y modeladas. Sin embargo existen otros supuestos que influyen en los resultados obtenidos como lo es el considerar fluidos inmiscibles, régimen permanente, condición de borde de crisis interna en la boca, canal rectangular de ancho constante, la forma en que se modela la fricción interfacial, errores en la batimetría, etc.

IMPORTANCIA DEL SUPUESTO DE RÉGIMEN PERMANENTE

Para analizar la validez de aplicar el modelo permanente de cuña salina de Olivares (2000) en estuarios con influencia de marea, se compara el eje hidráulico interno entregado por dicho modelo para una condición de borde de pleamar, con el eje hidráulico entregado por el modelo impermanente, desarrollado en el Anexo I, para una condición de marea variable con una pleamar similar a la utilizada como condición de borde por el modelo de Olivares (2000).

Para las modelaciones se utiliza la información de la Tabla 6.7, que corresponde a la información utilizada en el acápite 5.1.3 para obtener la extensión de la *Zona de Cuña Salina* en el marco de la aplicación de la metodología de obtención de caudales de dilución en el río Toltén. La condición de borde de crisis interna se impone en el sector más angosto de la desembocadura. El resultado de la modelación se muestra en la Figura 6.3.

TABLA 6.7: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.

Parámetro	Valor
Caudal (m ³ /s)	174
Ancho medio (m)	372
Densidad cuña (kg/m ³)	1025
Nivel de pleamar (msnm)	1.83
Coefficiente de fricción	0.00049

La Figura 6.3 muestra los ejes hidráulicos entregados por el modelo de Olivares (2000) y por el modelo impermanente. Para el caso impermanente se grafica el eje para el instante de pleamar, por lo que corresponde a la máxima intrusión del periodo de tiempo simulado. Como se aprecia en la figura, la extensión asociada al modelo impermanente (9.3 km) es levemente mayor a la entregada por el modelo permanente (8.5 km), lo que se explica en parte por la inercia asociada al fenómeno de la llenante⁵. El resultado obtenido indica que durante el periodo de llenante la cuña logra viajar la extensión asociada a una cuña salina que resulta de suponer un nivel del mar constante e igual a la pleamar. Luego, se concluye que para este estuario el modelo de cuña salina permanente de Olivares (2000) estima correctamente la cuña salina para el instante de pleamar.

Por otro lado, como se muestra en el acápite 5.1.3, la metodología de obtención de caudales de dilución entrega una máxima extensión de la cuña salina de 7.8 km, inferior a los valores entregados por el modelo permanente e impermanente para un nivel de pleamar. El resultado anterior sugiere modificar la metodología explicada en el acápite 3.2.3, de modo

⁵ Existen otros efectos a considerar, como los gradientes de presión, la interacción con la batimetría, el esfuerzo de corte en la interfaz, etc.

de considerar como condición de borde para el modelo de Olivares (2000) a la pleamar de sicigia en vez del nivel medio del mar.

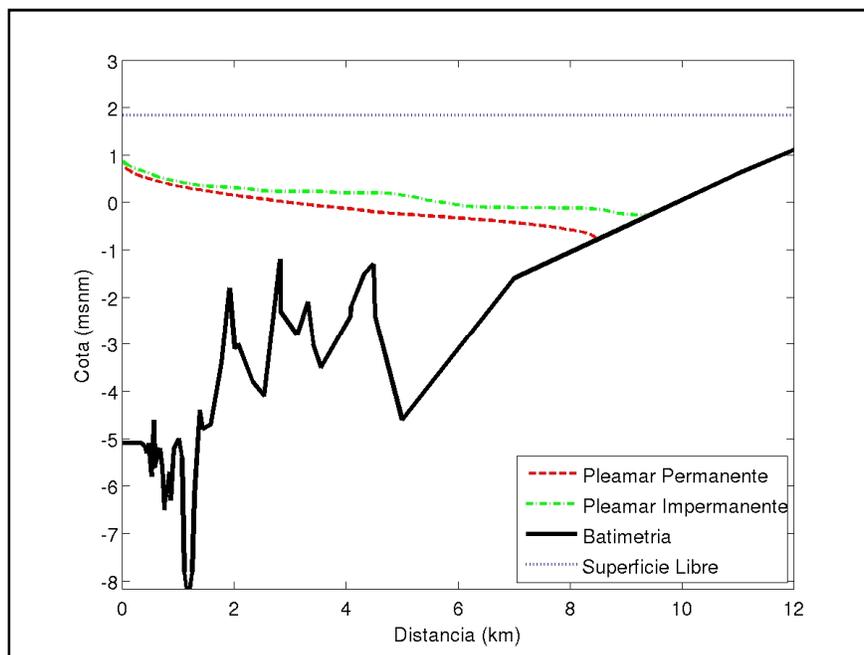


FIGURA 6.3. COMPARACIÓN DE MODELOS PERMANENTE E IMPERMANENTE PARA TOLTÉN.

6.3.2. RÍO LEBU

Para validar la aplicación del modelo de Olivares (2000) al río Lebu se recurre a la única campaña en que se observó intrusión en forma de cuña salina según el *Número de Richardson de Estuarios*, que corresponde a la del 22 de junio.

Los datos de entrada para la modelación se presentan en la Tabla 6.8, mientras que los resultados se muestran en la Figura 6.4 y en la Tabla 6.9. Se considera el nivel medio del mar del periodo de medición y una densidad de la cuña de 1025 kg/m^3 .

TABLA 6.8: DATOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN.

Campaña de terreno	Caudal (m^3/s)	Nivel mar (msnm)	Profundidad media (m)	Ancho medio (m)	Velocidad Boca (m/s)	Coefficiente fricción (λ)
22 de Junio	35.4	1.03	2.4	124	0.6	0.00067

TABLA 6.9: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.

Campaña de terreno	Máxima extensión medida (m)	Olivares (m)	Olivares + Excursión/4 (m)
22 de Junio	3500	1772	3192

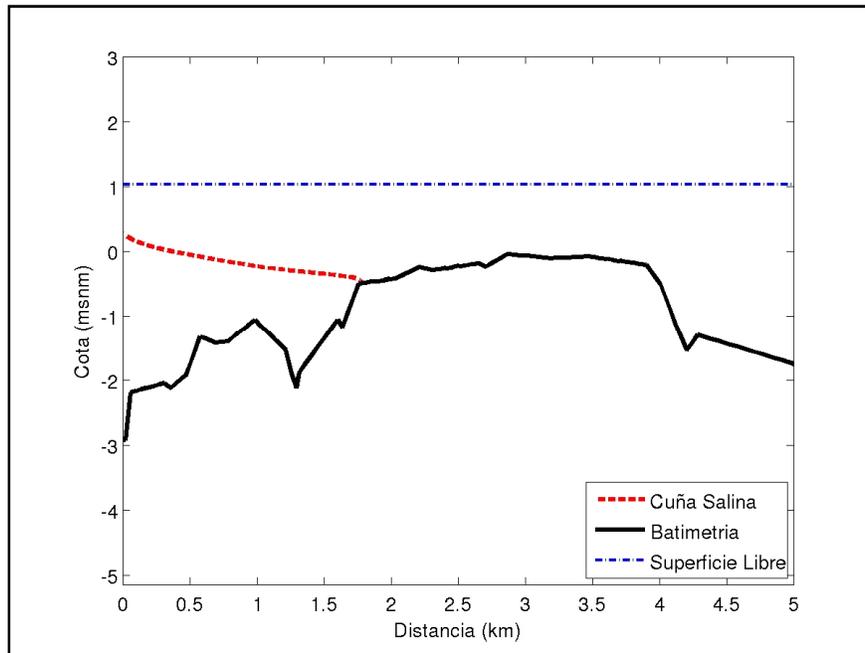


FIGURA 6.4. CUÑA SALINA ESTIMADA POR EL MODELO DE OLIVARES (2000). LEBU EN JUNIO.

Para analizar la importancia de la marea se obtienen los instantes de tiempo del comienzo y término del periodo de llenante a partir del modelo HEC-RAS del río Lebu. Los resultados se muestran en la Tabla 6.10.

TABLA 6.10: COMPARACIÓN ENTRE EXTENSIONES DE LA CUÑA SALINA MODELADAS Y MEDIDAS.

Campaña de terreno	Hora medición perfil más alejado (hrs)	Hora comienzo llenante (hrs)	Hora término llenante (hrs)
22 de Junio	13:33	13:20	21:20

Como se observa en la Tabla 6.10, la longitud medida debería ser bastante menor a la máxima del día, por lo que el resultado mostrado en la Tabla 6.9 se considera incorrecto. Esto se puede deber a la forma en que se está tratando el fenómeno impermanente de avance de la cuña salina durante el periodo de llenante, o bien al coeficiente de fricción utilizado, obtenido de la Figura 2.5. Sin embargo existen otros supuestos que influyen en los resultados obtenidos como lo es el considerar fluidos inmiscibles, régimen permanente, condición de borde de crisis interna en la boca, canal rectangular de ancho constante, la forma en que se modela la fricción interfacial, errores en la batimetría, etc.

IMPORTANCIA DEL SUPUESTO DE RÉGIMEN PERMANENTE

Para analizar la validez de aplicar el modelo permanente de cuña salina de Olivares (2000) en estuarios con influencia de marea, se compara el eje hidráulico interno entregado por dicho modelo para una condición de borde de pleamar, con el eje hidráulico entregado por

el modelo impermanente, desarrollado en el Anexo I, para una condición de marea variable con una pleamar similar a la utilizada como condición de borde por el modelo de Olivares (2000).

Para las modelaciones se utiliza la información de la Tabla 6.11, que corresponde a la información utilizada en el acápite 5.2.3 para obtener la extensión de la *Zona de Cuña Salina* en el marco de la aplicación de la metodología de obtención de caudales de dilución al río Lebu. La condición de borde de crisis interna se impone en el sector más angosto de la boca. El resultado de la modelación se muestra en la Figura 6.5.

TABLA 6.11: INFORMACIÓN UTILIZADA PARA OBTENER EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA.

Parámetro	Valor
Caudal (m ³ /s)	8.7
Ancho medio (m)	101
Densidad cuña (kg/m ³)	1025
Nivel de pleamar (msnm)	1.94
Coefficiente de fricción	0.00145

Como se aprecia en la Figura 6.5, la extensión que sale de considerar un nivel de pleamar constante en el tiempo (22 km) es mayor a la que sale de considerar condiciones transientes (12.6 km). Esto se explica debido a que el avance de la cuña durante la llenante no es lo suficientemente rápido como para alcanzar la extensión asociada a un nivel de pleamar constante en el tiempo. Lo anterior se ve ayudado por la existencia de una grada a 2 km de la boca del estuario, que limita el ingreso de la cuña para ciertos niveles del mar. El resultado obtenido indica que el modelo de Olivares (2000) es incapaz de entregar el eje hidráulico asociado a la condición de pleamar.

Por otro lado, como se muestra en el acápite 5.2.3, la metodología de obtención de caudales de dilución entrega una máxima extensión de la cuña salina de 4.2 km, inferior a los valores entregados por el modelo permanente e impermanente para un nivel de pleamar. Si se desea ser conservador desde el punto de vista ambiental, se sugiere modificar la metodología explicada en el acápite 3.2.3, de modo de considerar como condición de borde para el modelo de Olivares (2000) a la pleamar de sicigia en vez del nivel medio del mar y de este modo obtener una extensión de *Zona de Cuña Salina* mayor a la entregada por el modelo impermanente. La sugerencia anterior es consecuente con la que sale del mismo análisis realizado para el estuario del río Toltén.

Sin embargo, la extensión entregada por el modelo de Olivares (2000) al suponer una condición de pleamar de sicigia (22 km) es mayor que el límite superior de la *Zona de Mezcla Parcial* (10.3 km), estimado en el acápite 5.2.4, por lo que existiría una contradicción en la metodología desarrollada, dado que ésta supone que la extensión de la

intrusión en forma estratificada es siempre inferior a la intrusión en forma de mezcla parcial.

Los resultados obtenidos anteriormente indican la necesidad de replantear la metodología de estimación de caudales de dilución desarrollada, lo cual se analiza en el acápite 7.4.

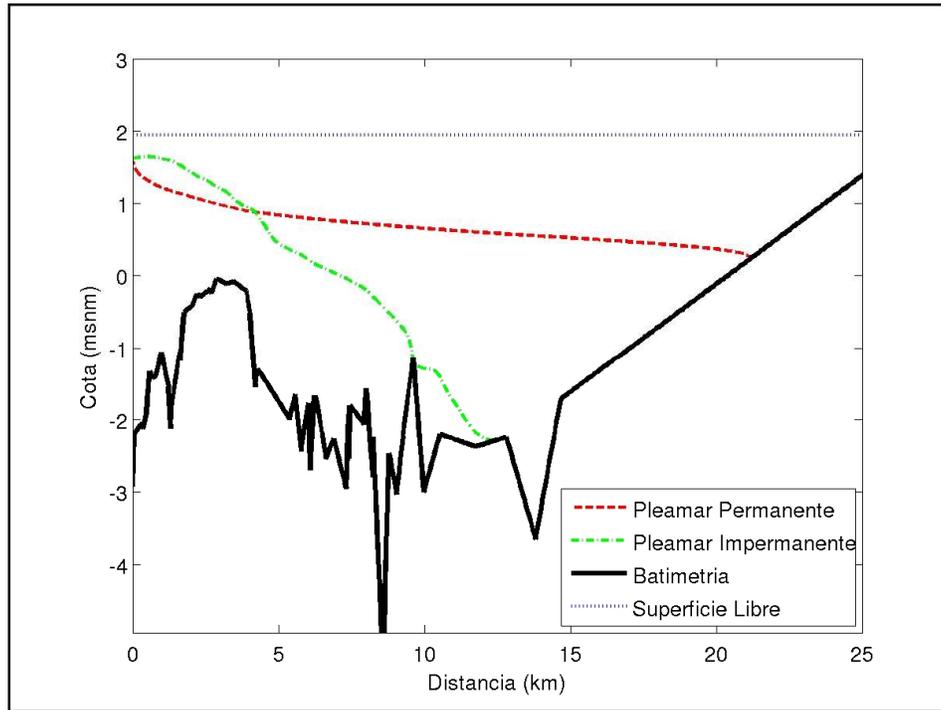


FIGURA 6.5. COMPARACIÓN DE MODELOS PERMANENTE E IMPERMANENTE PARA LEBU.

6.4. MODELO DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN

A modo de validación se comparan las mediciones de salinidad realizadas en terreno con la salinidad entregada por el modelo de advección-dispersión unidimensional de HEC-RAS, para las campañas del 19 de enero, 11 de marzo y 12 de junio en el estuario del río Lebu, las cuales se consideran de baja estratificación de acuerdo al criterio basado en el *Número de Richardson de Estuarios*, cuya aplicación se muestra en la Tabla 6.3. Las mediciones de salinidad fueron promediadas en sus respectivas secciones de escurrimiento, para poder ser comparadas con las resultantes del modelo unidimensional utilizado. Los coeficientes de dispersión se obtuvieron a partir de la aplicación de la Ecuación (2.8) a las mediciones de salinidad y se muestran en la Figura 6.6 para todas las campañas.

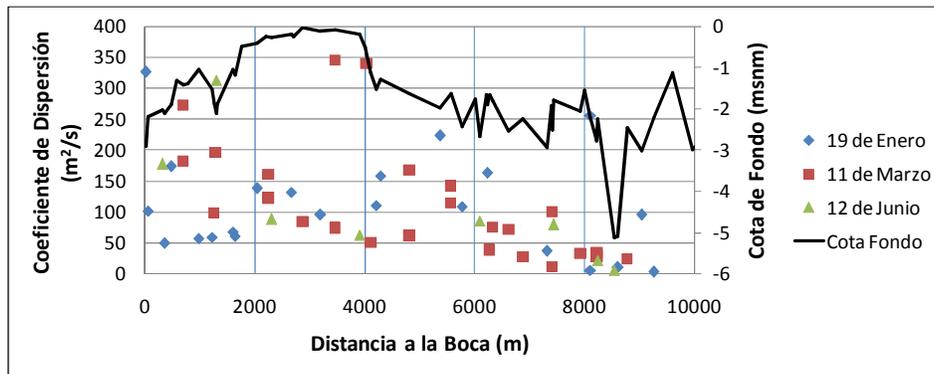


FIGURA 6.6. COEFICIENTE DE DISPERSIÓN PARA EL ESTUARIO DEL RÍO LEBU.

En principio se comparan las máximas extensiones de intrusión salina medidas y modeladas, recordando que se adoptó como criterio para definir el límite de la intrusión el lugar del cauce en que se tuvieran salinidades menores a 0.25 g/l. Los resultados se presentan en la Tabla 6.12.

TABLA 6.12: EXTENSIÓN DE LA INTRUSIÓN SALINA EN FORMA DE MEZCLA PARCIAL PARA LEBU.

Método	19 de Enero	11 de Marzo	12 de Junio
Máxima Extensión HEC-RAS	9434	10847	10415
Máxima Extensión Medida	9260	9400	9150

Se aprecia de la Tabla 6.12 que las longitudes entregadas por HEC-RAS se asemejan bastante a las medidas en terreno con un error medio de 9%, siendo siempre mayores a éstas. Cabe recordar que la extensión de la intrusión salina puede sufrir variaciones de varios kilómetros en el transcurso del día debido a la marea, por lo que la longitud medida en terreno pudo no haber sido la máxima del día, lo cual podría explicar las diferencias obtenidas.

Luego surge la necesidad de comparar los perfiles transversales de salinidad medidos en terreno con los resultantes de la modelación, tomando en cuenta tanto el lugar como la hora a la que fueron realizados. Cabe mencionar que para un mismo perfil se pueden tener hasta dos mediciones realizadas en diferentes momentos. Los resultados se muestran en la Figura 6.7, Figura 6.8 y Figura 6.9, según campañas.

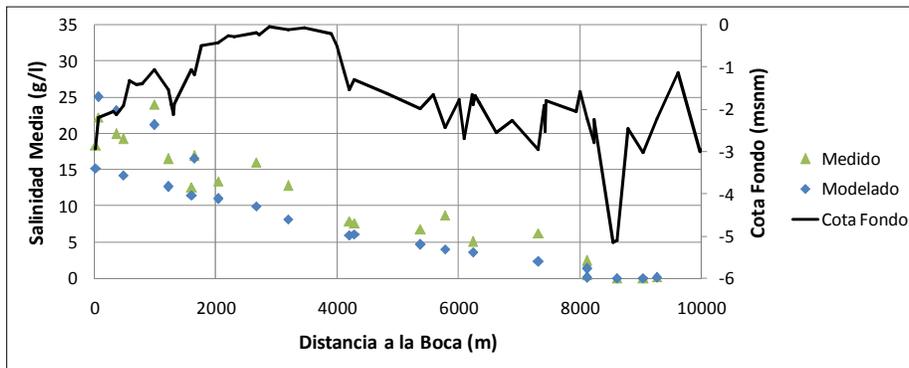


FIGURA 6.7. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN. RÍO LEBU, 19 DE ENERO.

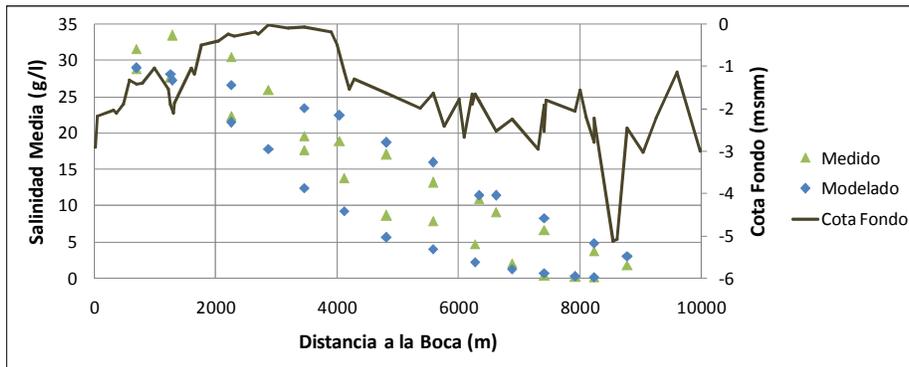


FIGURA 6.8. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN. RÍO LEBU, 11 DE MARZO.

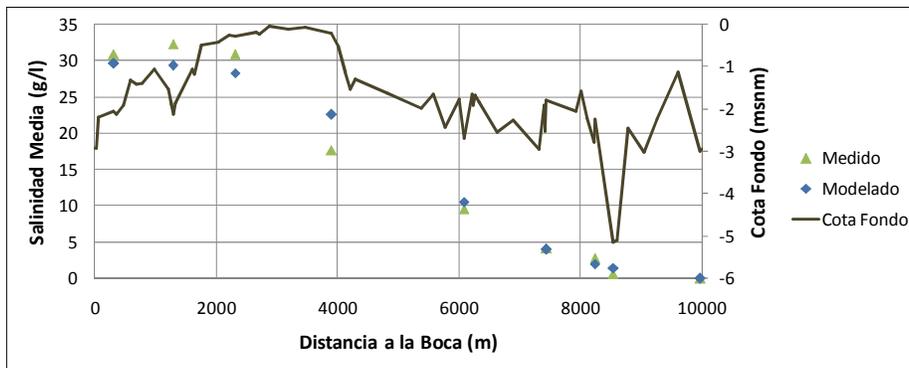


FIGURA 6.9. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN. RÍO LEBU, 12 DE JUNIO.

De las figuras se aprecia que el modelo de advección-dispersión representa correctamente el fenómeno de intrusión salina para las campañas de terreno analizadas. En lo que respecta a la metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada, se considera válido aplicar este modelo en la medida que el *Número de Richardson de Estuarios* indique que se tiene mezcla parcial, y en base a este criterio se realizó la validación.

Para evaluar el comportamiento del modelo de advección-dispersión en el caso de una intrusión estratificada, se modelan las campañas del 22 de junio en Lebu y del 21 de enero y 9 de marzo en Toltén, las cuales tuvieron condiciones de alta estratificación, según los

Números de Richardson de Estuarios obtenidos, como se aprecia en la Tabla 6.2 y Tabla 6.3. Cabe recordar que la metodología desarrollada contempla la aplicación del modelo de cuña salina de Olivares (2000) cuando se tiene alta estratificación.

Las salinidades obtenidas de la modelación se comparan con las medidas en terreno, considerando tanto el lugar como la hora a la que fueron realizadas. Los resultados se muestran en la Figura 6.10, Figura 6.11 y Figura 6.12, según campañas de terreno.

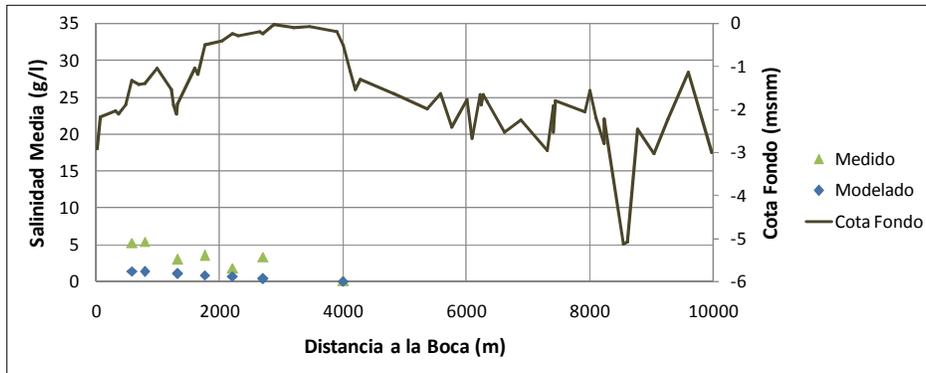


FIGURA 6.10. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN HEC-RAS. RÍO LEBU, 22 DE JUNIO.

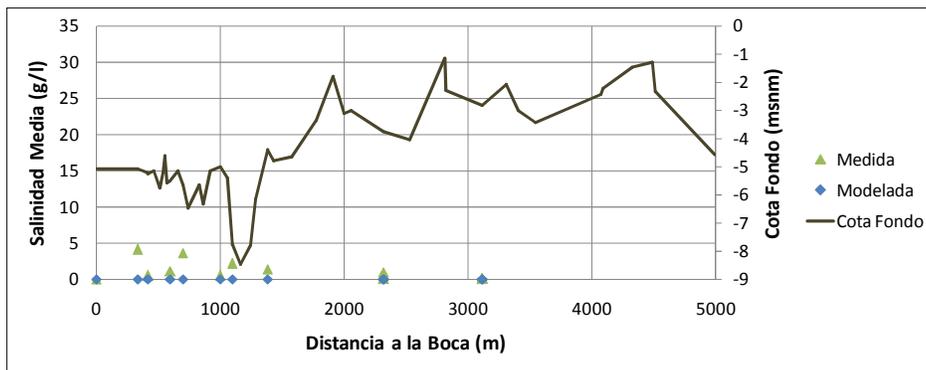


FIGURA 6.11. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN HEC-RAS. RÍO TOLTÉN, 21 DE ENERO.

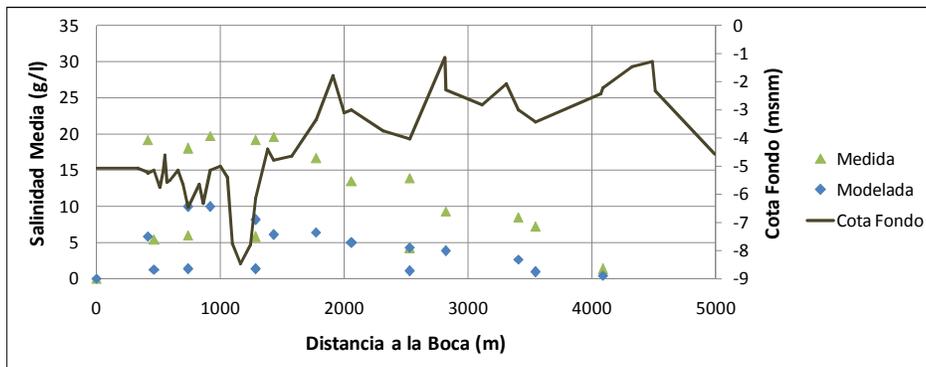


FIGURA 6.12. COMPARACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y MODELACIÓN HEC-RAS. RÍO TOLTÉN, 9 DE MARZO.

Notamos que las salinidades entregadas por el modelo de advección-dispersión difieren bastante de las medidas en terreno para los dos estuarios. El comportamiento observado se explica, en parte debido al alto nivel de estratificación de las aguas para las campañas analizadas, observable en la Figura 4.13 y Figura 4.19 para el río Toltén y Lebu respectivamente. La existencia de intrusión en forma estratificada invalida en cierta medida el modelo de escurrimiento, Saint Venant unidimensional en una capa, y el de transporte, advección-dispersión unidimensional.

CAPITULO 7: CONCLUSIONES

La metodología de determinación de caudales de dilución desarrollada cumple sólo parcialmente con los objetivos que se definieron al comienzo del estudio de la DGA, considerando los resultados obtenidos durante el proceso de validación realizado como parte del presente trabajo de título. En este sentido se concluye que es imprescindible llevar a cabo la segunda etapa del proyecto, de modo de solucionar los problemas encontrados. Independiente de lo anterior, se presentan en este capítulo soluciones preliminares a los problemas encontrados durante el proceso de validación.

A continuación se presentan, en orden de importancia, las conclusiones más importantes del presente trabajo de título.

7.1. SOBRE EL SENTIDO DE ESTIMAR CAUDALES DE DILUCIÓN EN ESTUARIOS

Se considera cuestionable aplicar el concepto de caudal de dilución a estuarios, dado que este parámetro lleva implícitamente los supuestos de escurrimiento en régimen permanente y de mezcla completa, características que no son propias del escurrimiento en un estuario. A continuación se explica la manera en que la metodología desarrollada permite calcular caudales de dilución en estuarios, a pesar de que éstos no cumplan con los supuestos antes mencionados.

Para abordar la incompatibilidad del supuesto de mezcla completa se estableció la división del estuario en tres zonas, en una de las cuáles el caudal de dilución no es calculado (*Zona de Cuña Salina*), mientras que en las otras dos (*Zona de Mezcla Parcial* y *Zona Sin Intrusión*) se supone mezcla completa en la transversal, dado que se aplica la ecuación de advección-dispersión unidimensional. Es decir, la metodología desarrollada evita abordar el tema de la mezcla parcial, debido a que el caudal de dilución supone mezcla completa en la transversal. Independiente de lo anterior, intentar modelar un estado de mezcla parcial implicaría utilizar modelos numéricos más sofisticados, que alejarían a la metodología desarrollada del sentido de la normativa de emisión DS N°90/2000. Cabe mencionar que en el marco de los EIAs se considera a la utilización de modelos numéricos bidimensionales en el plano vertical-longitudinal como un estándar para abordar el estudio de procesos de mezcla en estuarios. A pesar de que no se sugiere incluir en la metodología la utilización de modelos bidimensionales, sí se considera necesario mencionar que la utilización de éstos simplificaría considerablemente la metodología desarrollada, en el sentido de que un único modelo bidimensional daría cuenta de estados de alta y baja estratificación, lo que eliminaría la necesidad de subdividir el estuario en zonas, calcular un caudal límite para la existencia de cuña salina y la aplicación conjunta y no necesariamente compatible de la ecuación de advección-dispersión y del modelo de Olivares (2000).

Para abordar la incompatibilidad del supuesto de régimen permanente se estableció modelar el transiente intradiario asociado a la marea y considerar el instante que implica el menor caudal de dilución en la sección donde ocurre la descarga. Es decir, se modela el transiente, pero se considera sólo un instante de la modelación para determinar el caudal de dilución. Es necesario hacer notar que el caudal de dilución obtenido de la modelación intradiaria es utilizado en conjunto con el “caudal medio mensual del efluente vertido durante el mes de máxima producción de residuos líquidos” para obtener la máxima concentración de descarga admisible en términos del DS N°90/2000. Claramente existe un problema de escalas de tiempo, dado que el caudal asociado al cuerpo de agua viene de un análisis intradiario mientras que el asociado a la descarga corresponde a uno medio mensual.

En base a lo presentado anteriormente se concluye que el estudio de los procesos de mezcla en estuarios debería enmarcarse en una normativa de calidad ambiental, y no en una normativa de emisión. Sin embargo, se entiende que actualmente la única opción existente para considerar la capacidad de mezcla de un cuerpo de agua al momento de regular la descarga de contaminantes no sujetas a un EIA, es a través de la normativa de emisión DS N°90/2000. En este sentido se plantea continuar el trabajo asociado a esta metodología independiente de los cuestionamientos de fondo que se le puedan realizar.

7.2. SOBRE LOS CAUDALES DE DILUCIÓN OBTENIDOS PARA LOS ESTUARIOS PILOTO

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de determinación de caudal de dilución desarrollada a los estuarios piloto del proyecto. Cabe mencionar que debido al terremoto ocurrido el 27 de febrero del 2010, los resultados que se presentan para el estuario del río Lebu no se pueden seguir considerando válidos.

ESTUARIO DEL RÍO TOLTÉN

Debido al elevado caudal del río Toltén se determinó sólo la existencia de la *Zona de Cuña Salina* y de la *Zona Sin Intrusión*, cuyos límites se ubican a 7.8 km y 13.4 km de la boca, respectivamente. En la *Zona de Cuña Salina* se impuso un caudal de dilución nulo, mientras que en la *Zona Sin Intrusión* se calculó un caudal de dilución que resultó ser similar al caudal con probabilidad de excedencia del 95%, que corresponde a $174 \text{ m}^3/\text{s}$.

ESTUARIO DEL RÍO LEBU

En el estuario del río Lebu quedaron definidas la *Zona de Cuña Salina*, la *Zona de Mezcla Parcial* y la *Zona Sin Intrusión*, cuyos límites se ubican a 4.2 km, 10.3 km y 26.8 km de la boca, respectivamente. En la *Zona de Cuña Salina* se impuso un caudal de dilución nulo, mientras que en la *Zona de Mezcla Parcial* y en la *Zona Sin Intrusión*, se calculó un caudal de dilución que resultó ser variable en la longitudinal alcanzando un valor máximo de 7

m^3/s aguas arriba de la *Zona de Cuña Salina* y un valor mínimo de $1.2 m^3/s$ a 20 km de la boca, dentro de la *Zona Sin Intrusión*. Cerca del límite entre el estuario y el río, el caudal de dilución alcanza el valor del caudal con probabilidad de excedencia del 95%, que corresponde a $4.3 m^3/s$.

ESTERO TONGOY

Dado el bajo aporte de escorrentía desde la cuenca hacia el estero, se consideró establecer un caudal de dilución nulo en toda la extensión del estero Tongoy. La decisión se basa en análisis del tiempo de concentración de la cuenca y de la probabilidad de precipitación.

7.3. SOBRE EL NIVEL DEL MAR CONSIDERADO COMO CONDICIÓN DE BORDE DEL MODELO DE OLIVARES (2000)

La metodología desarrollada contempla considerar un nivel medio del mar como condición de borde para el modelo de Olivares (2000), agregando la cuarta parte de la excursión a la extensión entregada por dicho modelo para dar cuenta del avance de la cuña durante el periodo de llenante. El proceso de validación mostró que el criterio anterior tiende a subestimar la distancia entregada por el modelo impermanente de cuña salina, como se muestra en el acápite 6.3.2, por lo que se sugiere modificar la metodología de modo de considerar como condición de borde al nivel de pleamar de sicigia.

7.4. SOBRE LA EXISTENCIA DE UNA EXTENSIÓN DE CUÑA SALINA MAYOR QUE LA EXTENSIÓN DE UNA INTRUSIÓN EN FORMA DE MEZCLA PARCIAL

Del análisis de la validez de aplicar el modelo de cuña salina de Olivares (2000) al estuario del río Lebu, realizado en el acápite 6.3.2, se obtuvo que la máxima extensión de cuña que surge de aplicar el modelo impermanente desarrollado en el Anexo I, o bien de considerar un nivel de pleamar de sicigia en el modelo de Olivares (2000), puede ser mayor a la extensión en forma de mezcla parcial obtenida a partir del modelo de advección-dispersión, lo cual contradice el supuesto de que la *Zona de Mezcla Parcial* se ubica siempre aguas arriba de la *Zona de Cuña Salina*. Lo anterior se considera un problema importante de la metodología propuesta, que lamentablemente se identificó con posterioridad a la entrega del informe final del estudio de la DGA.

Para solucionar este problema se propone aplicar la metodología tal como existe ahora, pero aceptando el hecho de que la extensión de una cuña salina puede llegar a ser mayor que la extensión de una intrusión en forma de mezcla parcial. En el caso de que esto ocurra, se consideraría válida sólo a la *Zona de Cuña Salina* por ser ésta más restrictiva que la *Zona de Mezcla Parcial*. En resumen, para este caso particular, se tendría un estuario compuesto por la *Zona de Cuña Salina* seguida de la *Zona Sin Intrusión*. Para el resto de los casos la metodología se aplicaría tal cual existe ahora.

7.5. SOBRE EL CAUDAL DEL RÍO CONSIDERADO COMO CONDICIÓN DE BORDE DE LOS MODELOS DE SAINT VENANT Y DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN

Para determinar la extensión y el caudal de dilución en la *Zona de Mezcla Parcial* y en la *Zona Sin Intrusión* se consideró como condición de borde de aguas arriba al caudal medio diario con probabilidad de excedencia del 95%, de modo de obtener extensiones de intrusión salina altas, pero probables. Se propone modificar la metodología de modo de considerar como caudal afluente al caudal de dilución del sector del río ubicado inmediatamente aguas arriba del estuario. Dicho caudal de dilución se asimila al caudal ecológico, como se indica en la Minuta DGA N°143. De este modo se tendría una continuidad entre el caudal de dilución del río y el caudal de dilución del estuario.

7.6. ALCANCE DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

Durante el desarrollo del estudio se consideró dejar fuera de éste a los fiordos, lagunas costeras y humedales costeros, por tener características hidrodinámicas diferentes a las de un estuario aluvial típico de la costa chilena. Asimismo, la metodología desarrollada no considera a los estuarios condicionados por la existencia de una barra, ni los que poseen más de un tributario importante, conocidos como estuarios multicanal (Nguyen, 2008). Se considera necesario establecer un criterio para abordar este tipo de estuarios.

7.7. SOBRE LA CONDICIÓN DE BORDE DE AGUAS ABAJO DEL MODELO DE OLIVARES (2000)

Un tema importante que se considera inconcluso es el de la condición de borde de aguas abajo para el modelo de cuña salina. Para las modelaciones se consideró crisis interna en la boca del estuario, tanto para el modelo permanente como para el impermanente, además de la condición de nivel impuesta por el mar. Lamentablemente, el conjunto de mediciones de terreno no permite validar dicho supuesto, dado que no se tiene conocimiento de la estratificación en la boca del estuario durante el periodo de medición. Durante el estudio se vislumbró la importancia de dicha información, sin embargo fue físicamente imposible realizar las mediciones requeridas, dadas las características del escurrimiento en la boca de los estuarios estudiados. Cabe recordar que se propone imponer la crisis en la sección más angosta de la boca del estuario, lo cual no se condice con las mediciones de terreno, las cuales indican que la posición de la posible crisis varía con las condiciones de marea y caudal afluente, dependiendo además de la morfología del estuario.

En base a lo mencionado anteriormente se concluye que es necesario estudiar la validez de suponer crisis interna en la boca del estuario, sobre todo cuando se tiene un escurrimiento condicionado por la marea.

CAPITULO 8: BIBLIOGRAFÍA

Arita, M., Jirka, G. (1987). “Two-Layer Model of Saline Wedge. I: Entrainment and Interfacial Friction”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113, pp. 1229-1248.

Arita, M., Jirka, G. (1986). “Two-Layer Model of Saline Wedge. II: Prediction of Mean Properties”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113, pp. 1249-1263.

Aquambiente Ltda. (2006). “Definición oceanográfica de límites de aplicación de la normativa en estuarios de Chile”.

Bouchut F., Zeitlin V. (2010). “A robust well-balanced scheme for multi-layer shallow water equations”. *Discrete and Continuous Dynamical Systems Series B*, vol 13, num 4, pp. 739-758.

Bustos, C. (2007). “Desarrollo de una metodología para la estimación del caudal de dilución en estuarios. Aplicación Estuario Pudeto X Región”. Trabajo de Título para obtener el Título de Ingeniero Civil en Geografía, Universidad de Santiago de Chile.

Dirección General de Aguas (2005). “Criterios para la Determinación de Caudales Disponibles para la Dilución en Cuerpos Receptores Superficiales”. *Minuta Técnica N° 143*.

Dyer, K. R. (1973). “Estuaries: A physical introduction”. Wiley-Interscience.

Fairbridge, R. W. (1980). “The estuary: its definition and geo-dynamic cycle”. *Chemistry and Biochemistry of Estuaries*.

Fischer, H., List, J., Koh, R., Imberger, J., Brooks, N. (1979). “Mixing in Inland and Coastal Waters”. Academic Press.

Gang-Ji, Z. (2008). “Hydrodynamics and Water Quality Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries”. Wiley-Interscience.

Ippen, A., Eagleson, P., Dean, R., Bretschneider, C., Raichlen, F., Harleman, D., Johnson, J., Keulegan, G., Simmons, H. (1966). “Estuary and Coastline Hydrodynamics”. McGraw-Hill.

Jay, D.A., Smith, J.D. (1990). “Residual circulation in shallow estuaries, 2. Weakly stratified and partially mixed, narrow estuaries”. *Journal of Geophysical Research* Vol. 95, pp. 733–748.

Kurganov, A., Petrova, G. (2009). “Central-Upwind Scheme for Two-Layer Shallow Water Equations”. *Journal of Scientific Computing*, 31, pp. 1742-1773.

- Martin, J. L. y McCutcheon, S. C. (1999). "Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling". Lewis Publishers, New York.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2001). "Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales", Decreto Supremo N°90/2000.
- Miranda, J. (2001). "Estudio analítico y experimental de los efectos de la batimetría en la intrusión salina en estuarios estratificados". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Nguyen, A. D. (2008). "Salt Intrusion, Tides and Mixing in Multi-Channel Estuaries". TU Delft.
- Niño, Y., Tamburrino, A. (2002). "Apuntes del curso Hidrodinámica Ambiental".
- Olivares, M. (2000). "Estudio analítico-numérico y experimental de la cuña salina en estuarios". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Preissmann A. (1965). "Difficultés rencontrées dans le calcul des ondes de translation à front raide". XI IAHR Congress, Leningrad, Russia, Vol 3.
- Pritchard, D. W. (1967). "What is an estuary, physical viewpoint". Estuaries, American Association for the Advancement of Science.
- Roe, P. L., (1986). "Characteristic-based schemes for the Euler equations". Ann. Rev. Fluid Mech., 18, pp. 337-365.
- Ruuth, S., Spiteri, R. (2004). "High Order Strong-Stability-Preserving Runge Kutta Methods with Downwind-Biased Spatial Discretizations". SIAM J. Num. Analysis Vol. 42 Issue 3.
- Savenije, H. (2005). "Salinity and Tides in Alluvial Estuaries". Elsevier BV.
- Schijf, J. B., Schönfeld, J. C. (1953). "Theoretical Considerations on the Motion of Salt and Fresh Water". Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention.
- Shu, C. W., Osher, S. (1988). "Total-variation-diminishing time discretizations". SIAM J. Sci. Stat. Comput. Vol. 9, pp. 1073-1084.
- Uncles, R.J., Stephens, J.A. (1996). "Salt intrusion in the Tweed Estuary". Estuarine, Coastal and Shelf Science Vol. 43, pp. 271–293.

ANEXOS

- Anexo I Modelo impermanente de cuña salina.
- Anexo II Mediciones de salinidad y profundidad.
- Anexo III Perfiles longitudinales de salinidad.

ANEXO I: MODELO IMPERMANENTE DE CUÑA SALINA

Para analizar la validez de aplicar el modelo de Olivares (2000) en estuarios con influencia de marea se desarrolla un modelo numérico impermanente de cuña salina. Para ello se deducen las ecuaciones de la hidráulica interna de la cuña salina considerando los términos temporales. Cabe mencionar que el efecto de la marea tiende a mezclar las aguas, pudiendo llegar a ser inválido ocupar un modelo de escurrimiento en dos capas (Schijf y Schönfeld, 1953). De este modo, el modelo desarrollado en este capítulo sólo puede ser aplicado a estuarios que presenten estratificación en toda su extensión durante todo el ciclo de marea.

I.1. DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES

Considerando la aproximación de capa límite y promediando sobre la turbulencia, las ecuaciones que gobiernan el flujo son las Ecuaciones (I.1) a (I.4). Se ha considerado una densidad promediada sobre la turbulencia que varía debido al efecto de la salinidad, al incorporar un factor de amplificación $\phi(x, y, t)$, que se supone proporcional a la salinidad y que toma valores de entre 0.005 y 0.025 en estuarios. Bajo el supuesto anterior se hace innecesario utilizar una ecuación de estado para la densidad. Las variables espaciales quedan definidas en la Figura I.1.

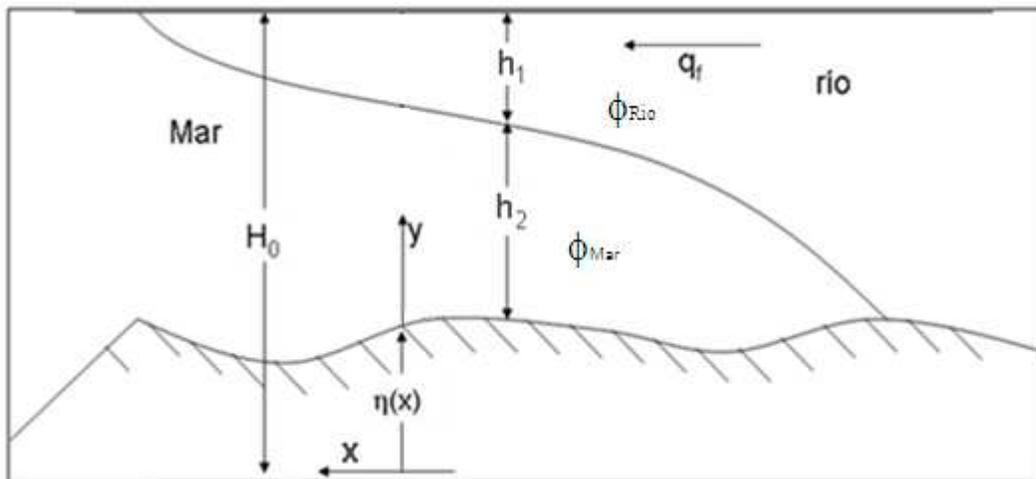


FIGURA I.1: ESQUEMA CUÑA SALINA PARA LECHO IRREGULAR. OLIVARES (2000).

Ecuación de momentum según el eje longitudinal:

$$\rho_0 \cdot (1 + \phi) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} - \rho_0 \cdot (1 + \phi) \cdot g \cdot \frac{d\eta}{dx} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (I.1)$$

Ecuación de momentum según el eje vertical:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\rho_0 \cdot (1 + \phi) \cdot g \quad (I.2)$$

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (I.3)$$

Ecuación de transporte de sal:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot \phi}{\partial x} + \frac{\partial v \cdot \phi}{\partial y} = -\frac{\partial F_\phi}{\partial y} \quad (I.4)$$

donde las variables x , y , η están definidas en la Figura I.1, u y v corresponden a la velocidad según los ejes x e y , P a la presión termodinámica, ρ_0 a la densidad del agua dulce, ϕ al factor de amplificación de la densidad producto de la salinidad, g a la aceleración de gravedad, F_ϕ al flujo medio de ϕ en la vertical y τ al esfuerzo de corte según el eje x .

Para obtener el término del gradiente de presión en la dirección longitudinal, se integra la Ecuación (I.2) en la vertical desde cierta ubicación y hasta la superficie libre y luego se deriva con respecto a x , como se muestra a continuación. Se consideran presiones relativas.

$$\int_{\eta+y}^{\eta+h_1+h_2} \frac{\partial P}{\partial y} dy' = -\rho_0 \cdot g \cdot \int_{\eta+y}^{\eta+h_1+h_2} (1 + \phi) dy' \quad (I.5)$$

$$P(\eta + y) = \rho_0 \cdot g \cdot \left[h_1 + h_2 - y + \int_{\eta+y}^{\eta+h_1+h_2} \phi dy' \right] \quad (I.6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \cdot g \cdot \left[\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{\eta+y}^{\eta+h_1+h_2} \phi dy' \right) \right] \quad (I.7)$$

donde h_1 y h_2 corresponden a los espesores de la capa superior e inferior, respectivamente, como se muestra en la Figura I.1.

Para facilitar los cálculos obtenemos la forma conservativa de la ecuación de momentum en la longitudinal, como la suma de la Ecuación (I.1) con la Ecuación (I.3) multiplicada por u . Además se reemplaza el gradiente longitudinal de presión, deducido en la Ecuación (I.7).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(1+\phi) \cdot u}{\partial t} + \frac{\partial(1+\phi) \cdot u^2}{\partial x} + \frac{\partial(1+\phi) \cdot u \cdot v}{\partial y} \\ & = -g \cdot \left[\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{\eta+y}^{\eta+h_1+h_2} \phi dy' \right) \right] - (1+\phi) \cdot g \cdot \frac{d\eta}{dx} + \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial y} \end{aligned} \quad (\text{I.8})$$

Suponemos además distribuciones de velocidad y densidad tipo sombrero de copa, como se muestra en las Ecuaciones (I.9) y (I.10), respectivamente.

$$u(x, y, t) = \begin{cases} U_1(x, t), & y > h_2 \\ U_2(x, t), & y \leq h_2 \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

$$\phi(x, y, t) = \begin{cases} 0, & y > h_2 \\ \Phi, & y \leq h_2 \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

donde U_1 y U_2 corresponden a la velocidad media en la longitudinal para la capa superior e inferior, respectivamente, y Φ a un factor de amplificación de la densidad, constante en el tiempo y en el espacio.

Las condiciones de borde utilizadas en la superficie y el fondo se detallan en las Ecuaciones (I.11) a (I.14). Las Ecuaciones (I.11) y (I.13) corresponden a la condición de no resbalamiento y fondo impermeable, respectivamente, mientras que las Ecuaciones (I.13) y (I.14) corresponden a la condición de borde cinemática de la superficie libre y de la interfaz de densidad, respectivamente.

$$u(y = 0) = 0 \quad (\text{I.11})$$

$$v(y = 0) = 0 \quad (\text{I.12})$$

$$v(\eta + h_1 + h_2) = \frac{\partial(\eta + h_1 + h_2)}{\partial t} + u(\eta + h_1 + h_2) \cdot \frac{\partial(\eta + h_1 + h_2)}{\partial x} \quad (\text{I.13})$$

$$v(\eta + h_2) = \frac{\partial(\eta + h_2)}{\partial t} + u(\eta + h_2) \cdot \frac{\partial(\eta + h_2)}{\partial x} \quad (\text{I.14})$$

A partir de la integración de la Ecuación (I.3), que corresponde a la de continuidad, se obtienen las Ecuaciones (I.15) y (I.16), para las capas superior e inferior, respectivamente. Se aplicó el supuesto de sombrero de copa y las condiciones de borde descritas por las Ecuaciones (I.11) a (I.14).

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} = 0 \quad (\text{I.15})$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial q_2}{\partial x} = 0 \quad (\text{I.16})$$

donde q_1 y q_2 corresponden al caudal por unidad de ancho en la capa superior e inferior, respectivamente.

Considerando el supuesto de sombrero de copa y las condiciones de borde del problema, la Ecuación (I.4), que corresponde al transporte de sal, se puede escribir como las Ecuaciones (I.17) y (I.18), para la capa superior e inferior, respectivamente.

$$F_\phi(\eta + h_1 + h_2) = F_\phi(\eta + h_2) \quad (\text{I.17})$$

$$\Phi \cdot \left(\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial q_2}{\partial x} \right) = F_\phi(\eta) - F_\phi(\eta + h_2) \quad (\text{I.18})$$

Luego si reemplazamos la Ecuación (I.16), que corresponde a la de continuidad en la capa inferior, en la Ecuación (I.18), y considerando la Ecuación (I.17), obtenemos la Ecuación (I.19).

$$F_\phi(\eta) = F_\phi(\eta + h_2) = F_\phi(\eta + h_1 + h_2) \quad (\text{I.19})$$

La Ecuación (I.19) indica que, si suponemos que no existe intercambio de sal con la atmósfera o con el fondo, no es posible la existencia de mezcla en la interfaz. En este sentido, la ecuación de transporte de sal no aporta información, lo cual es coherente dado que bajo los supuestos con que se trabaja, el problema analizado no es el de transporte de una sustancia, sino el de la interacción entre dos fluidos completamente estratificados.

Por otro lado, bajo el supuesto de sombrero de copa para ϕ , es posible demostrar que la Ecuación (I.7) se puede escribir como la Ecuación (I.20) y la Ecuación (I.21), para las capas superior e inferior, respectivamente.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \cdot g \cdot \left[\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} \right] \quad (I.20)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \cdot g \cdot \left[\frac{\partial h_1}{\partial x} + (1 + \Phi) \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} \right] \quad (I.21)$$

Reemplazando la nueva forma del gradiente longitudinal de presión en la Ecuación (I.8), e integrando en la vertical se obtienen las Ecuaciones (I.22) y (I.23) para cada capa.

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial q_1 \cdot U_1}{\partial x} = -g \cdot h_1 \cdot \left[\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{d\eta}{dx} + \frac{\partial h_2}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho_0} \cdot (\tau_s - \tau_i) \quad (I.22)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial q_2 \cdot U_2}{\partial x} = -\frac{g}{(1 + \Phi)} \cdot h_2 \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} - g \cdot h_2 \cdot \left[\frac{\partial h_2}{\partial x} + \frac{d\eta}{dx} \right] + \frac{\tau_i - \tau_f}{(1 + \Phi) \cdot \rho_0} \quad (I.23)$$

donde τ_s , τ_i y τ_f corresponden a los esfuerzos de corte según el eje x evaluados en la superficie libre, la interfaz y el fondo, respectivamente.

Finalmente obtenemos el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describe la hidráulica interna de una cuña salina totalmente estratificada, bajo un régimen de escurrimiento impermanente. Las ecuaciones de momentum se reescribieron en su forma conservativa.

Ecuación de continuidad en la capa superior:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} = 0 \quad (I.24)$$

Ecuación de continuidad en la capa inferior:

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial q_2}{\partial x} = 0 \quad (I.25)$$

Momentum en la capa superior:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1^2}{h_1} + \frac{g \cdot h_1^2}{2} \right) = -g \cdot h_1 \cdot \left[\frac{d\eta}{dx} + \frac{\partial h_2}{\partial x} \right] + \frac{\tau_s - \tau_i}{\rho_0} \quad (I.26)$$

Momentum en la capa inferior:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_2^2}{h_2} + \frac{g \cdot h_2^2}{2} + \frac{g \cdot h_1 \cdot h_2}{1 + \Phi} \right) \\ = -g \cdot \left[h_2 \cdot \frac{d\eta}{dx} - \frac{h_1}{(1 + \Phi)} \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} \right] + \frac{\tau_i - \tau_f}{(1 + \Phi) \cdot \rho_0} \end{aligned} \quad (I.27)$$

donde q_1 y q_2 corresponden al caudal por unidad de ancho en la capa superior e inferior.

Para estimar los esfuerzos de corte en la interfaz y en el fondo utilizamos las Ecuaciones (I.28) y (I.29). Cabe mencionar que dichas relaciones son válidas para régimen permanente. Sin embargo, debido a la falta de otros modelos, dichas relaciones serán utilizadas para modelar los esfuerzos de corte en régimen impermanente. El esfuerzo de corte en la superficie libre dependerá principalmente de las características del viento.

$$\tau_i = \rho_0 \cdot c_{fi} \cdot |U_1 - U_2| \cdot (U_1 - U_2) \quad (I.28)$$

$$\tau_f = \rho_0 \cdot (1 + \Phi) \cdot g \cdot \frac{n^2}{h_2^{1/3}} \cdot |U_2| \cdot U_2 \quad (I.29)$$

donde c_{fi} corresponde al coeficiente de fricción interfacial que se puede obtener de la Figura 2.5 y n el número de Manning.

En caso que la altura de escurrimiento de la capa inferior sea nula, se propone utilizar como esfuerzo de corte de fondo para la primera capa la ley de resistencia de Manning, de modo que se recupere la solución de las ecuaciones de Saint Venant en una capa.

Como condiciones de borde del problema se propone utilizar las mismas del modelo de Olivares (2000), resumidas en las Ecuaciones (I.30) a (I.34). Se supone que se tiene escurrimiento de río condicionado por el nivel del mar y por una crisis interna. Dado que la capa inferior se desplaza, la condición de borde de crisis interna difiere respecto a la utilizada en el modelo de Olivares (2000), que supone capa inferior quieta. Sin embargo, se supondrá que la velocidad de la capa inferior es lo suficientemente baja como para seguir considerando válida la Ecuación (I.30). En estricto rigor habría que considerar la relación que surge de suponer nulos los valores propios asociados a las ondas internas.

$$h_1^{boca} = \left(\frac{q_{boca}^2}{\Phi \cdot g} \right)^{1/3} \quad (I.30)$$

$$h_2^{boca} = H - h_1^{boca} \quad (I.31)$$

$$h_2^{cabeza} = 0 \quad (I.32)$$

$$q_1^{cabeza} = q_{río} \quad (I.33)$$

$$q_2^{cabeza} = 0 \quad (I.34)$$

donde H corresponde a la profundidad total en la boca, que depende de la cota de fondo y del nivel del mar, $q_{río}$ al caudal por unidad de ancho del río y q_{boca} al caudal por unidad de ancho en la boca.

Las condiciones para h_1^{cabeza} , h_2^{cabeza} , q_1^{boca} y q_2^{boca} se obtienen extrapolando desde los nodos adyacentes, o bien haciendo supuestos adicionales como altura normal, altura crítica, nivel conocido, etc.

I.2. FORMULACIÓN DEL ESQUEMA NUMÉRICO

Las Ecuaciones (I.24) a (I.27) son una versión unidimensional de las ecuaciones de aguas poco profundas en dos capas (*Two-Layer Shallow Water Equations*), y existe una variedad de esquemas numéricos para su resolución. En este trabajo de título se utilizan los resultados obtenidos por Kurganov y Petrova (2009), quienes dedujeron un esquema explícito de volúmenes finitos, centrado-upwind, de tipo Godunov. Este esquema se caracteriza por mantener positivas las alturas de escurrimiento, además de recuperar el régimen permanente teórico cuando desaparecen los términos inerciales (*Well-Balanced*). A continuación se muestra de manera resumida el esquema numérico utilizado en el trabajo de título.

I.2.1. FORMULACIÓN DEL ESQUEMA NUMÉRICO

Kurganov y Petrova (2009) proponen resolver el sistema de EDPs dado por las Ecuaciones (I.35) a (I.38), que considera los cambios de variables dados por las Ecuaciones (I.39) a (I.42), e indicados en la Figura I.2. El sentido de estos cambios de variables es hacer que los términos fuentes sean proporcionales a ε , que en general es mucho menor que $h_1 + h_2$ para el sistema de coordenadas de la Figura I.2, por lo que los resultados numéricos tienden

a independizarse de la manera en que se discretizan los términos fuentes. Cabe mencionar que las ecuaciones resueltas por este esquema desprecian el efecto de la fricción interfacial, que en general es importante para el problema de la cuña salina. El término friccional es agregado al esquema numérico, dado que se considera importante para la modelación del problema de cuña salina.

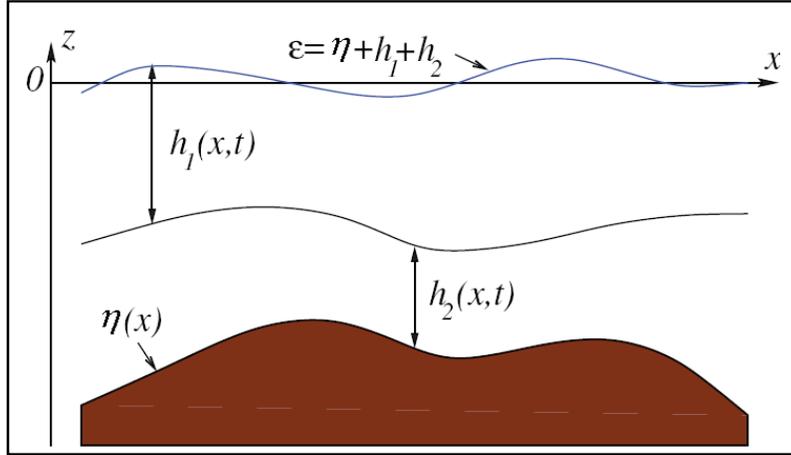


FIGURA I.2: ESQUEMA CUÑA SALINA. KURGANOV Y PETROVA (2009).

Ecuación de continuidad en la capa superior:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} = 0 \quad (I.35)$$

Momentum en la capa superior:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1^2}{h_1} + g \cdot \varepsilon \cdot h_1 \right) = g \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} \quad (I.36)$$

Ecuación de continuidad en la capa inferior:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q_2}{\partial x} = 0 \quad (I.37)$$

Momentum en la capa inferior:

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_2^2}{w - \eta} + \frac{g}{2} \cdot w^2 - \frac{g}{2} \cdot r \cdot h_1^2 - g \cdot \eta \cdot \varepsilon \right) = -g \cdot \varepsilon \cdot \frac{d\eta}{dx} - g \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial \hat{h}_1}{\partial x} \quad (I.38)$$

donde las nuevas variables quedan definidas por las Ecuaciones (I.39) a (I.42).

$$w = \eta + h_2 \quad (I.39)$$

$$\varepsilon = w + h_1 \quad (I.40)$$

$$\hat{h}_1 = r \cdot h_1 \quad (I.41)$$

$$\hat{\varepsilon}_1 = \hat{h}_1 + w \quad (I.42)$$

$$r = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (I.43)$$

I.2.2. NOTACIÓN UTILIZADA PARA EL ESQUEMA NUMÉRICO

Para facilitar la comprensión de las ecuaciones que forman parte del desarrollo del esquema numérico de volúmenes finitos utilizado, se presenta la Figura I.3 que explica la notación de subíndices y superíndices utilizada. El subíndice $i+1/2$ hace referencia a la posición intermedia entre el nodo i y el nodo $i+1$, mientras que el superíndice $+$ ($-$) hace referencia al lado derecho (izquierdo) de dicha posición.

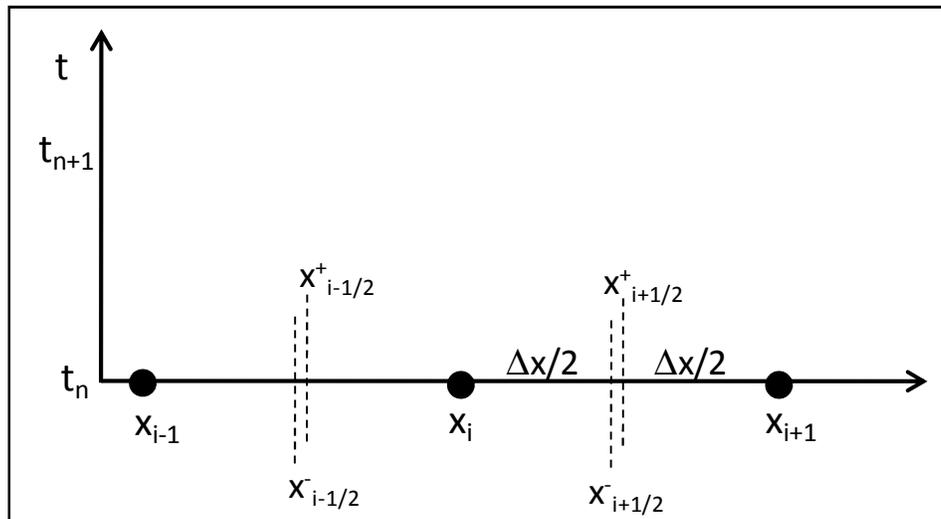


FIGURA I.3: NOTACIÓN UTILIZADA PARA EL ESQUEMA NUMÉRICO.

I.2.3. CONSIDERACIONES PARA LA BATIMETRÍA

El esquema numérico requiere que la batimetría sea discretizada de manera especial, para preservar positivas las alturas de escurrimiento. Cabe mencionar que el esquema supone

una discretización dx constante y límites para el volumen de control diferencial en $x_{i\pm 1/2}$ dados por $x_i \pm dx/2$.

Si $\eta(x)$ es la función que describe la batimetría del cauce, los valores de la cota de fondo en $x_{i\pm 1/2}$ y x_i quedan dados por las Ecuaciones (I.44) y (I.45), respectivamente.

$$\eta_{i+1/2} = \frac{\eta(x_{i+1/2}^+) + \eta(x_{i+1/2}^-)}{2} \quad (\text{I.44})$$

$$\eta_i = \frac{\eta_{i+1/2} + \eta_{i-1/2}}{2} \quad (\text{I.45})$$

I.2.4. ESQUEMA SEMIDISCRETO CENTRADO-UPWIND

Se definen el vector de variables dependientes U , el de flujo F , el del término geométrico S y el de los términos no-conservativos N , en las Ecuaciones (I.46) a (I.49).

$$U = (h_1, q_1, w, q_2)^T \quad (\text{I.46})$$

$$F(U, \eta) = \left(q_1, \frac{q_1^2}{h_1} + g \cdot \varepsilon \cdot h_1, q_2, \frac{q_2^2}{w - \eta} + \frac{g}{2} \cdot w^2 - \frac{g}{2} \cdot r \cdot h_1^2 - g \cdot \eta \cdot \hat{\varepsilon} \right)^T \quad (\text{I.47})$$

$$S(U, \eta) = \left(0, 0, 0, -g \cdot \hat{\varepsilon} \cdot \frac{d\eta}{dx} \right)^T \quad (\text{I.48})$$

$$N(U, \eta) = \left(0, g \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x}, 0, -g \cdot \hat{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \hat{h}_1}{\partial x} \right)^T \quad (\text{I.49})$$

Dados los vectores anteriores, la semi-discretización del sistema de ecuaciones queda dada por la Ecuación (I.50).

$$\frac{d}{dt} \bar{U}_i(t) = - \frac{H_{i+1/2}(t) - H_{i-1/2}(t)}{\Delta x} + \bar{S}_i(t) + \bar{N}_i(t) \quad (\text{I.50})$$

donde los vectores barra aproximan el promedio espacial de los vectores correspondientes dentro del volumen de control diferencial.

Los flujos numéricos $H_{i+1/2}$ quedan definidos por la Ecuación (I.51).

$$H_{i+1/2}(t) = \frac{a_{i+1/2}^+ \cdot F(U_{i+1/2}^-, \eta_{i+1/2}) - a_{i+1/2}^- \cdot F(U_{i+1/2}^+, \eta_{i+1/2})}{a_{i+1/2}^+ - a_{i+1/2}^-} + \frac{a_{i+1/2}^+ \cdot a_{i-1/2}^-}{a_{i+1/2}^+ - a_{i+1/2}^-} \cdot [U_{i+1/2}^+ - U_{i+1/2}^-] \quad (I.51)$$

donde el vector U evaluado en los límites del volumen de control diferencial $_{i+1/2}$ queda definido por la Ecuación (I.52) y las velocidades locales a^+ y a^- por las Ecuaciones (I.53) y (I.54). Cabe mencionar que los superíndices $+$ y $-$, hacen referencia al lado derecho e izquierdo del límite del volumen de control diferencial, respectivamente.

$$U_{i+1/2}^\pm = \bar{U}_{i+1/2 \pm 1/2} \mp \frac{\Delta x}{2} \cdot \left(\frac{d}{dx} U \right)_{i+1/2 \pm 1/2} \quad (I.52)$$

$$a_{i+1/2}^+ = \max\{(\lambda_1^+)_{i+1/2}, (\lambda_2^+)_{i+1/2}, (\lambda_3^+)_{i+1/2}, (\lambda_4^+)_{i+1/2}, (u_1^+)_{i+1/2}, (u_2^+)_{i+1/2}, 0\} \quad (I.53)$$

$$a_{i+1/2}^- = \min\{(\lambda_1^-)_{i+1/2}, (\lambda_2^-)_{i+1/2}, (\lambda_3^-)_{i+1/2}, (\lambda_4^-)_{i+1/2}, (u_1^-)_{i+1/2}, (u_2^-)_{i+1/2}, 0\} \quad (I.54)$$

Los términos λ_j corresponden a los valores propios de la matriz jacobiana del sistema. La derivada de U con respecto a x se debe obtener con un derivador no lineal (*slope limiter*) para mantener la característica no-oscilatoria del esquema. Kurganov y Petrova (2009) proponen utilizar el limitador *minmod generalizado* que se muestra en las Ecuaciones (I.55) y (I.56).

$$\left(\frac{d}{dx} U \right)_i = \minmod \left\{ \theta \cdot \frac{\bar{U}_i - \bar{U}_{i-1}}{\Delta x}, \frac{\bar{U}_{i+1} - \bar{U}_{i-1}}{2 \cdot \Delta x}, \theta \cdot \frac{\bar{U}_{i+1} - \bar{U}_i}{\Delta x} \right\} \quad (I.55)$$

$$\minmod\{z_1, z_2, \dots\} = \begin{cases} \min\{z_j\} & \text{si } z_j > 0 \quad \forall j \\ \max\{z_j\} & \text{si } z_j < 0 \quad \forall j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (I.56)$$

donde θ es un parámetro que varía entre 1 y 2 y permite agregar viscosidad numérica al esquema. Valores altos implican menor disipación y por lo tanto un comportamiento más oscilatorio. Cuando θ vale 1, el limitador se reduce al *minmod* (Roe, 1986).

Los valores propios de la matriz jacobiana se determinan a partir de la Ecuación (I.57), que corresponde al determinante de la matriz igualado a cero.

$$\lambda^4 + c_1 \cdot \lambda^3 + c_2 \cdot \lambda^2 + c_3 \cdot \lambda + c_4 = 0 \quad (\text{I.57})$$

donde los coeficientes c_j quedan dados por las Ecuaciones (I.58) a (I.61).

$$c_1 = -2 \cdot (u_1 + u_2) \quad (\text{I.58})$$

$$c_2 = (u_1 + u_2)^2 + 2 \cdot u_1 \cdot u_2 - g \cdot (h_1 + h_2) \quad (\text{I.59})$$

$$c_3 = -2 \cdot u_1 \cdot u_2 \cdot (u_1 + u_2) + 2 \cdot g \cdot (u_1 \cdot h_2 + u_2 \cdot h_1) \quad (\text{I.60})$$

$$c_4 = u_1^2 \cdot u_2^2 - g \cdot (u_1^2 \cdot h_2 + u_2^2 \cdot h_1) + g^2 \cdot (1 - r) \cdot h_1 \cdot h_2 \quad (\text{I.61})$$

Si se supone $\rho_1 \sim \rho_2$ y $u_1 \sim u_2$, los valores propios quedan dados por las Ecuaciones (I.62) y (I.63), velocidades de propagación de las ondas externas e internas, respectivamente.

$$\lambda_{1,2} = \frac{u_1 \cdot h_1 + u_2 \cdot h_2}{h_1 + h_2} \pm \sqrt{g \cdot (h_1 + h_2)} \quad (\text{I.62})$$

$$\lambda_{3,4} = \frac{u_1 \cdot h_2 + u_2 \cdot h_1}{h_1 + h_2} \pm \sqrt{(1 - r) \cdot g \cdot \frac{h_1 \cdot h_2}{h_1 + h_2} \cdot \left(1 - \frac{(u_1 - u_2)^2}{(1 - r) \cdot g \cdot (h_1 + h_2)}\right)} \quad (\text{I.63})$$

Por otro lado, la discretización de los vectores N y S , queda dada por las Ecuaciones (I.64) a (I.66).

$$\bar{N}_i^{(2)} = g \cdot \frac{(h_1)_{i+1/2}^- + w_{i+1/2}^- + (h_1)_{i-1/2}^+ + w_{i-1/2}^+}{2} \cdot \frac{(h_1)_{i+1/2}^- - (h_1)_{i-1/2}^+}{\Delta x} \quad (\text{I.64})$$

$$\bar{N}_i^{(4)} = -r \cdot \bar{N}_i^{(2)} \quad (\text{I.65})$$

$$\bar{S}_i^{(4)} = -g \cdot \frac{w_{i+1/2}^- + (\hat{h}_1)_{i+1/2}^- + w_{i-1/2}^+ + (\hat{h}_1)_{i-1/2}^+}{2} \cdot \frac{\eta_{i+1/2} - \eta_{i-1/2}}{\Delta x} \quad (\text{I.66})$$

El esfuerzo de corte se agrega al vector de términos no-conservativos N , como se muestra en las Ecuaciones (I.67) y (I.68).

$$\bar{N}_i^{*(2)} = \bar{N}_i^{(2)} - c_{fi} \cdot \left| \frac{(u_1)_{i+1/2}^- - (u_1)_{i-1/2}^+}{2} - \frac{(u_2)_{i+1/2}^- - (u_2)_{i-1/2}^+}{2} \right| \cdot \left(\frac{(u_1)_{i+1/2}^- - (u_1)_{i-1/2}^+}{2} - \frac{(u_2)_{i+1/2}^- - (u_2)_{i-1/2}^+}{2} \right) \quad (I.67)$$

$$\bar{N}_i^{*(4)} = -r \cdot \bar{N}_i^{*(2)} \quad (I.68)$$

Finalmente, para resolver el sistema de EDOs dado por la Ecuación (I.50), Kurganov y Petrova (2009) proponen utilizar un método SSP-RK de tercer orden explícito (Shu & Osher, 1988), resumido por las Ecuaciones (I.69) a (I.71).

$$\bar{U}_i^{(1)} = \bar{U}_i^n + \Delta t \cdot \left[-\frac{H_{i+1/2}^n - H_{i-1/2}^n}{\Delta x} + \bar{S}_i^n + \bar{N}_i^n \right] \quad (I.69)$$

$$\bar{U}_i^{(2)} = \frac{3}{4} \cdot \bar{U}_i^n + \frac{1}{4} \cdot \bar{U}_i^{(1)} + \frac{\Delta t}{4} \cdot \left[-\frac{H_{i+1/2}^{(1)} - H_{i-1/2}^{(1)}}{\Delta x} + \bar{S}_i^{(1)} + \bar{N}_i^{(1)} \right] \quad (I.70)$$

$$\bar{U}_i^{n+1} = \frac{1}{3} \cdot \bar{U}_i^n + \frac{2}{3} \cdot \bar{U}_i^{(2)} + \frac{2 \cdot \Delta t}{3} \cdot \left[-\frac{H_{i+1/2}^{(2)} - H_{i-1/2}^{(2)}}{\Delta x} + \bar{S}_i^{(2)} + \bar{N}_i^{(2)} \right] \quad (I.71)$$

donde el superíndice n hace referencia al instante de tiempo.

I.3. VALIDACIÓN MODELO IMPERMANENTE DE CUÑA SALINA

Para validar el modelo impermanente de cuña salina se analiza su comportamiento para condiciones de borde permanentes e impermanentes. Para el caso permanente se analiza la capacidad del modelo para recuperar los resultados entregados por el modelo de cuña salina permanente de Olivares (2000), mientras que para el régimen impermanente se analiza su estabilidad numérica.

I.3.1. ANÁLISIS DEL RÉGIMEN PERMANENTE

Como parte de la validación del modelo impermanente de cuña salina, se analiza su comportamiento para condiciones de régimen permanente utilizando como referencia el modelo de Olivares (2000). Para ello se repiten algunas de las experiencias realizadas por

Olivares (2000), además de la aplicación conjunta de los modelos permanente e impermanente a los estuarios estudiados en las campañas de terreno del presente estudio.

En el trabajo de Olivares (2000) se aplicó el modelo numérico de cuña salina para distintos escenarios que contemplan diferentes batimetrías y números de Froude densimétricos. Para la validación se consideran cuatro escenarios, dos de los cuales poseen batimetría plana y los otros dos batimetría sinusoidal de amplitudes 0.2 m y 0.4 m. Se consideran números de Froude densimétricos de 0.1 y 0.4, y un coeficiente de fricción interfacial de 0.002. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura I.4 a la Figura I.7. Como se aprecia de las figuras, los ejes hidráulicos obtenidos a partir del modelo impermanente no se ajustan completamente a los del modelo de Olivares (2000), sin embargo los resultados se consideran adecuados como para utilizar el modelo desarrollado para analizar la importancia del fenómeno transiente de intrusión. Las diferencias obtenidas se deben en parte a la discretización espacial utilizada, la cual se fijó en 10 m para $Fr^2 = 0.1$ y 1 m para $Fr^2 = 0.4$, dada la capacidad computacional requerida. Al considerar un Δx relativamente alto, no se pudo dar cuenta de las curvaturas observadas en los resultados entregados por el modelo de Olivares (2000), lo cual afectó la forma y por tanto la extensión de la intrusión entregada por el modelo impermanente.

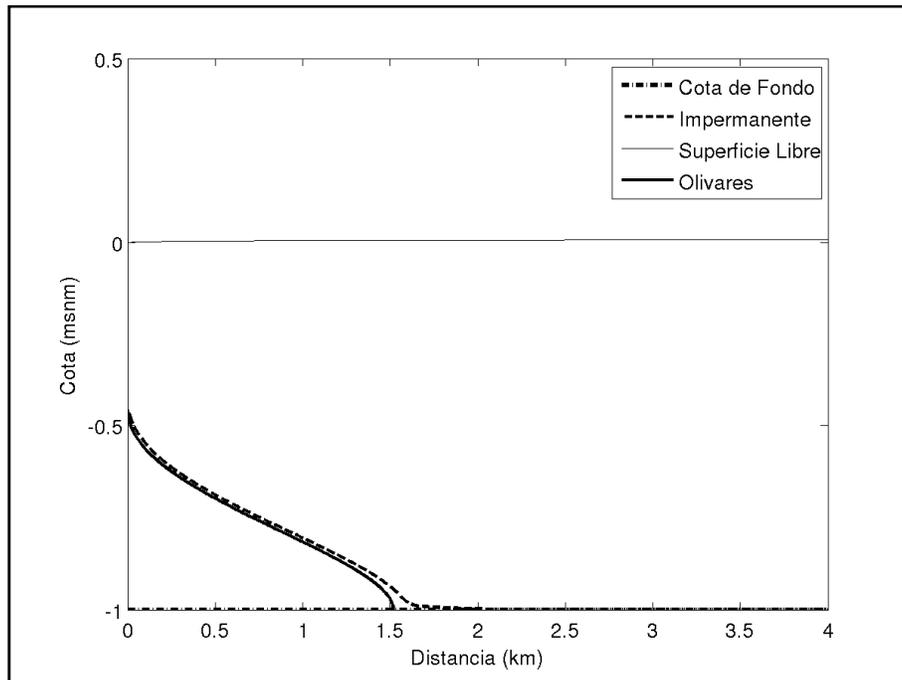


FIGURA I.4. COMPARACIÓN MODELOS CUÑA SALINA. BATIMETRÍA PLANA. $FR^2 = 0.1$.

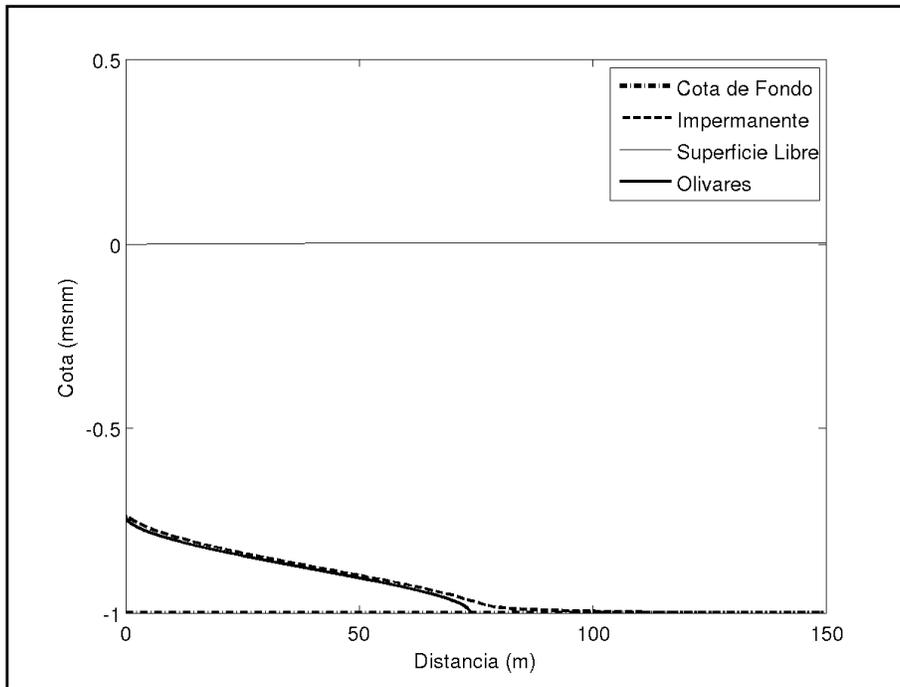


FIGURA I.5. COMPARACIÓN MODELOS CUÑA SALINA. BATIMETRÍA PLANA. $FR^2 = 0.4$.

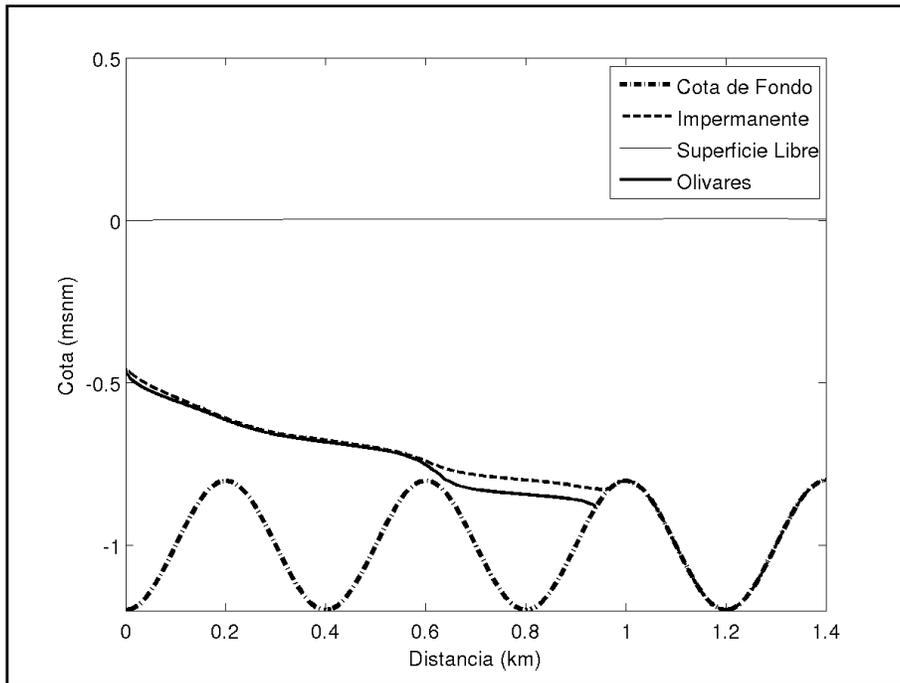


FIGURA I.6. COMPARACIÓN MODELOS CUÑA SALINA. BATIMETRÍA SINUSOIDAL DE 0.2 m. $FR^2 = 0.1$.

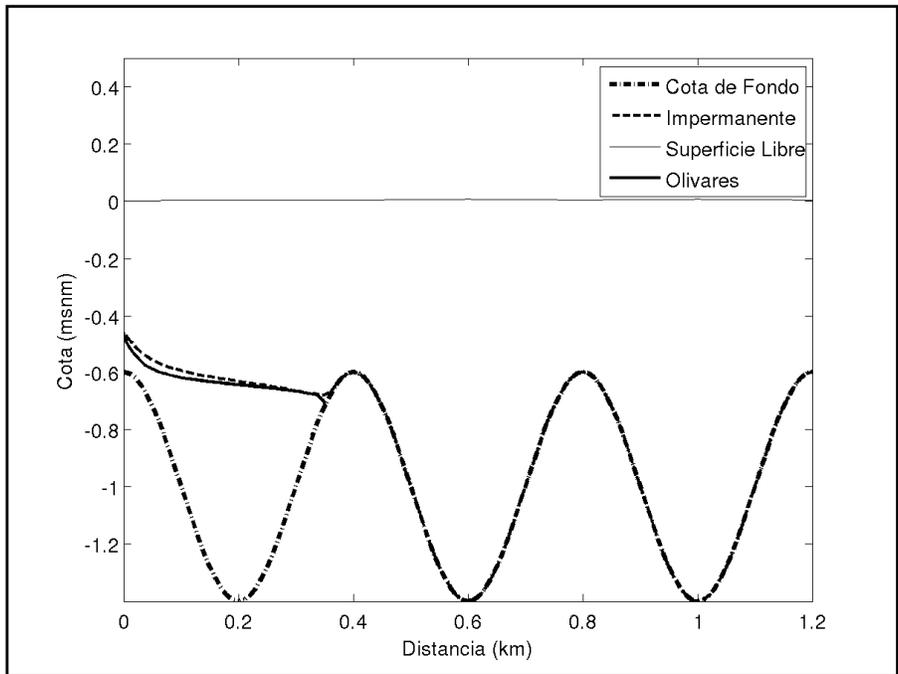


FIGURA I.7. COMPARACIÓN MODELOS CUÑA SALINA. BATIMETRÍA SINUSOIDAL DE 0.4 m. $FR^2 = 0.1$.

De manera adicional, se replican los ejes hidráulicos de las cuñas salinas modeladas por el modelo de Olivares (2000) para los estuarios piloto, considerando condiciones de borde permanentes, que en este caso corresponden a un nivel del mar constante igual al nivel medio. Vemos que para todos los escenarios el modelo impermanente de cuña salina recupera el resultado del régimen permanente.

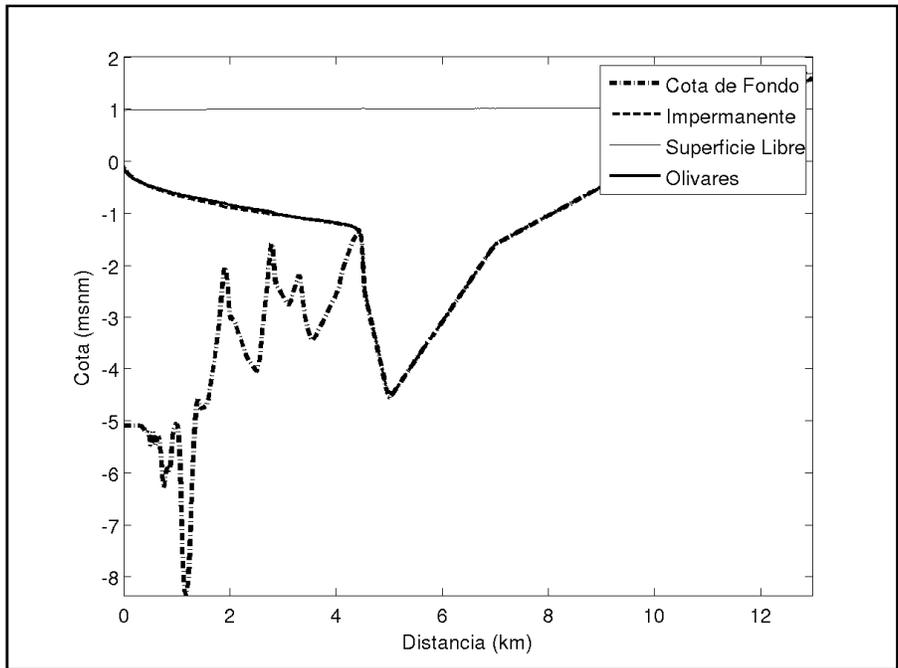


FIGURA I.8. COMPARACIÓN MODELOS CUÑA SALINA. TOLTÉN EN ENERO.

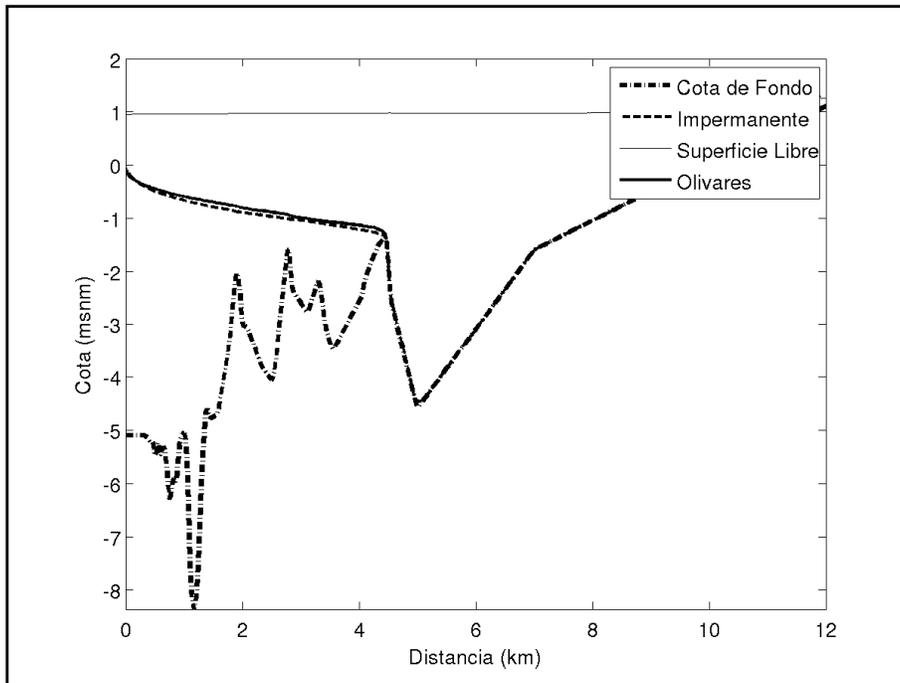


FIGURA I.9. COMPARACIÓN MODELOS CUÑA SALINA. TOLTÉN EN MARZO.

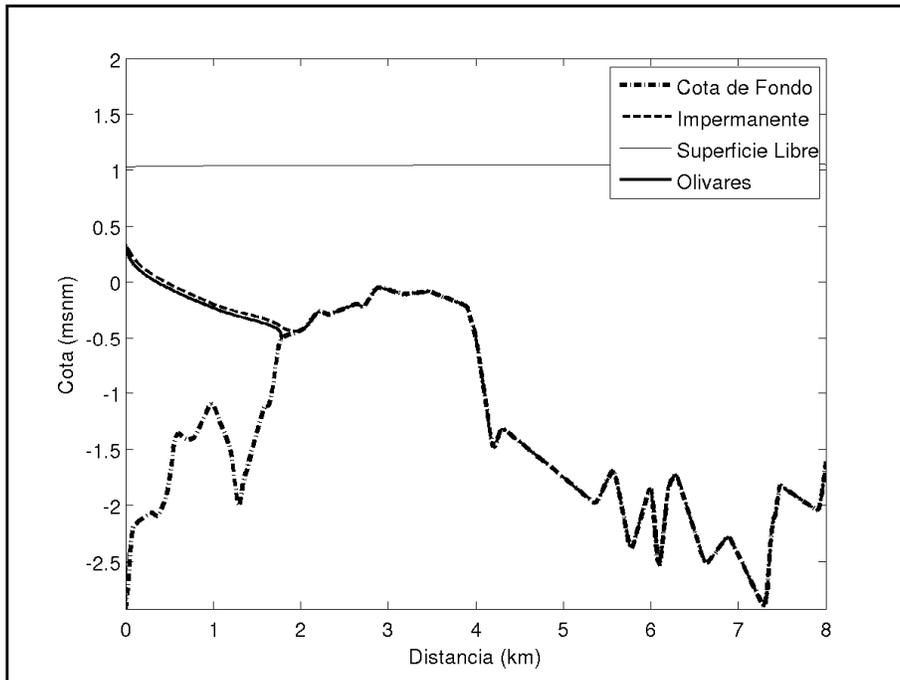


FIGURA I.10. COMPARACIÓN MODELOS CUÑA SALINA. LEBU EN JUNIO.

I.3.1. ANÁLISIS DEL RÉGIMEN IMPERMANENTE

El modelo impermanente de cuña salina se inestabiliza al intentar modelar todo el ciclo de marea en los estuarios piloto del estudio. Lo anterior se debe a la aparición de velocidades de propagación de las ondas internas imaginarias en parte del dominio para ciertos tiempos. Cabe recordar que el esquema numérico utilizado calcula dichas velocidades mediante la Ecuación (I.63). La aparición de valores propios internos imaginarios en sistemas de ecuaciones Saint Venant multicapas indican la pérdida de hiperbolicidad de la solución en cierta parte del dominio. La pérdida de hiperbolicidad se asocia a la aparición de inestabilidades de Kelvin-Helmholtz, que se generan cuando existe una gran diferencia de velocidad entre las capas, indicando la existencia de mezcla (Bouchut & Zeitlin, 2010). De la Ecuación (I.63), es fácil ver que la pérdida de hiperbolicidad del sistema ocurre para la condición mostrada en la Ecuación (I.72) y cuando la densidad de la capa superior es mayor que la de la capa inferior.

$$(u_1 - u_2)^2 > \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \cdot g \cdot (h_1 + h_2) \quad (I.72)$$

donde u_i , ρ_i y h_i corresponden a la velocidad, densidad y espesor de la capa i , respectivamente.

En otras palabras, si las condiciones de borde consideradas inducen mezcla importante en el problema real, no tiene sentido aplicar un modelo que supone estratificación completa entre las capas. Las mediciones de terreno muestran que un estuario puede pasar de un estado estratificado a uno de alta mezcla durante un mismo ciclo de marea. Cabe mencionar que el modelo de cuña salina de Schijf y Schönfeld (1953), que corresponde a la base del modelo de Olivares (2000), es desarrollado por sus autores específicamente para estuarios sin influencia de marea, analizándose de manera independiente el caso de estuarios con influencia de marea.

Lo anterior indica que no es posible modelar todo un ciclo de marea con el modelo impermanente desarrollado. Sin embargo, el modelo impermanente se considera adecuado para analizar la validez de aplicar el modelo permanente de Olivares (2000) para obtener la máxima intrusión durante el ciclo de marea, en la medida que no se inestabilice durante el proceso de llenante, lo cual se cumple tanto para Toltén como para Lebu, como se muestra en las Figuras I.12 a I.14, donde se aprecia que las inestabilidades aparecen siempre durante la vaciante y comienzo de la llenante.

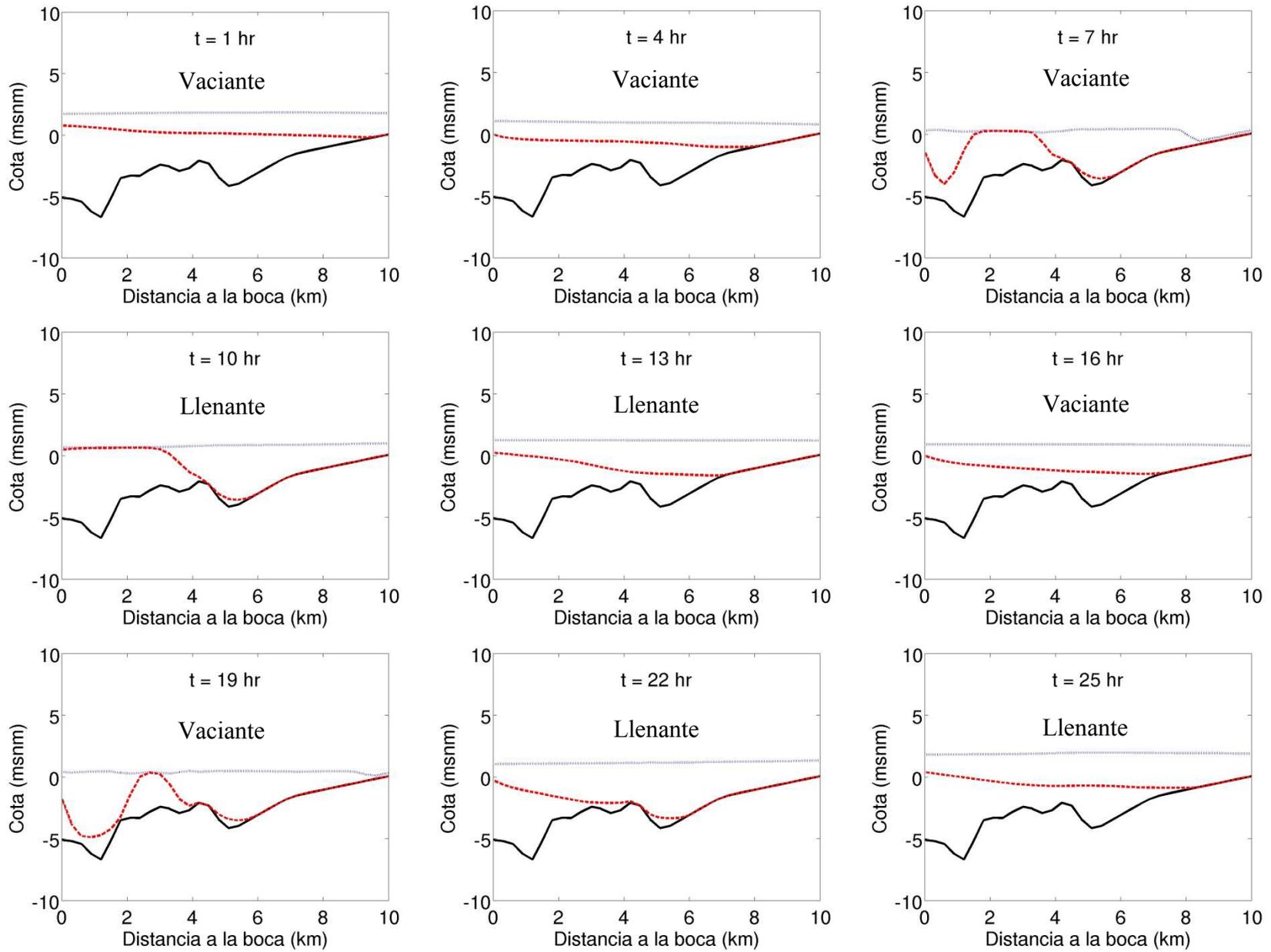


FIGURA I.11. MODELO IMPERMANENTE APLICADO A TOLTÉN CON $\Delta x=300\text{m}$, DURANTE DOS CICLOS DE MAREA SEMIDIURNA.

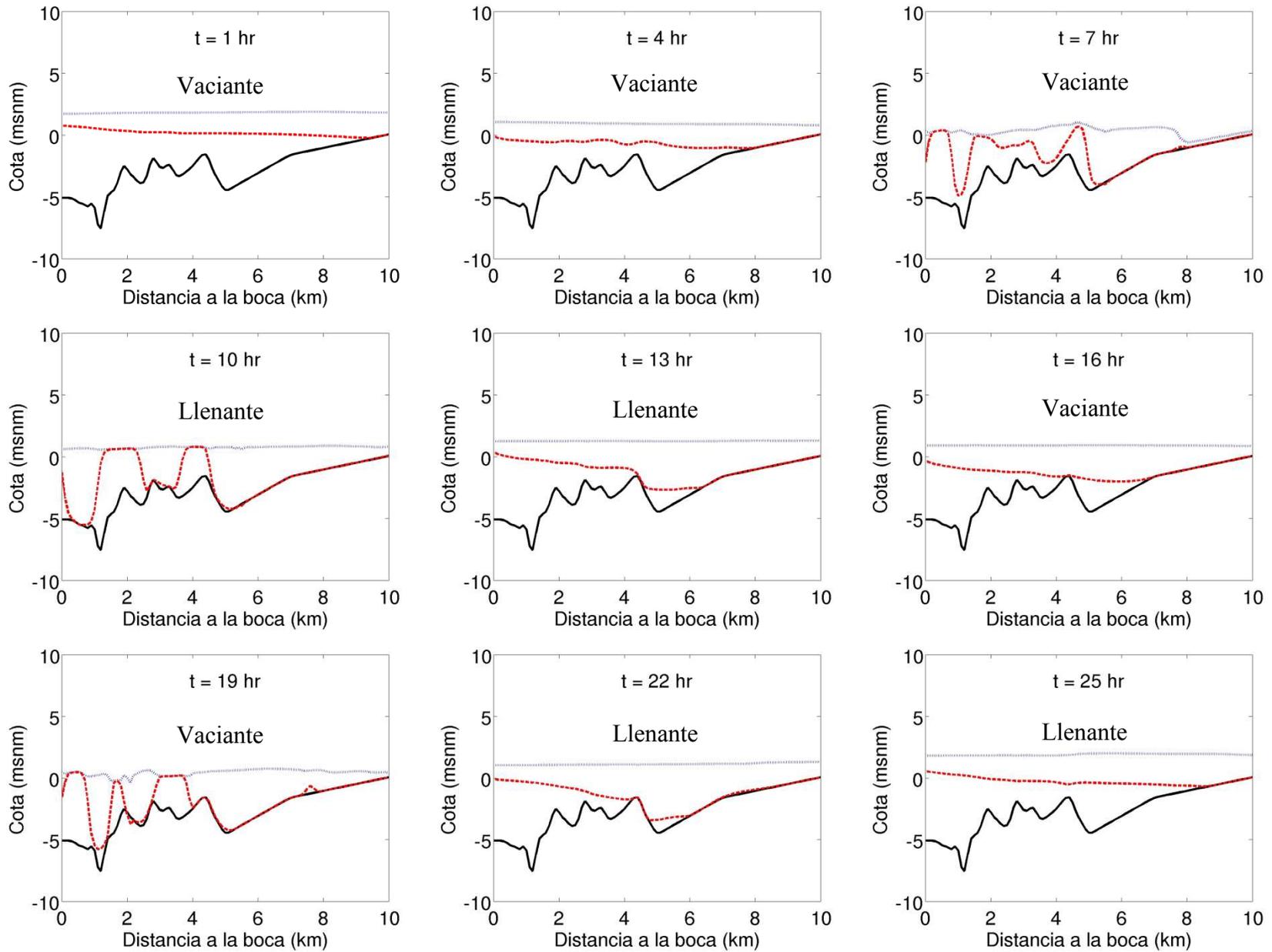


FIGURA I.12. MODELO IMPERMANENTE APLICADO A TOLTÉN CON $\Delta x=100$ m, DURANTE DOS CICLOS DE MAREA SEMIDIURNA.

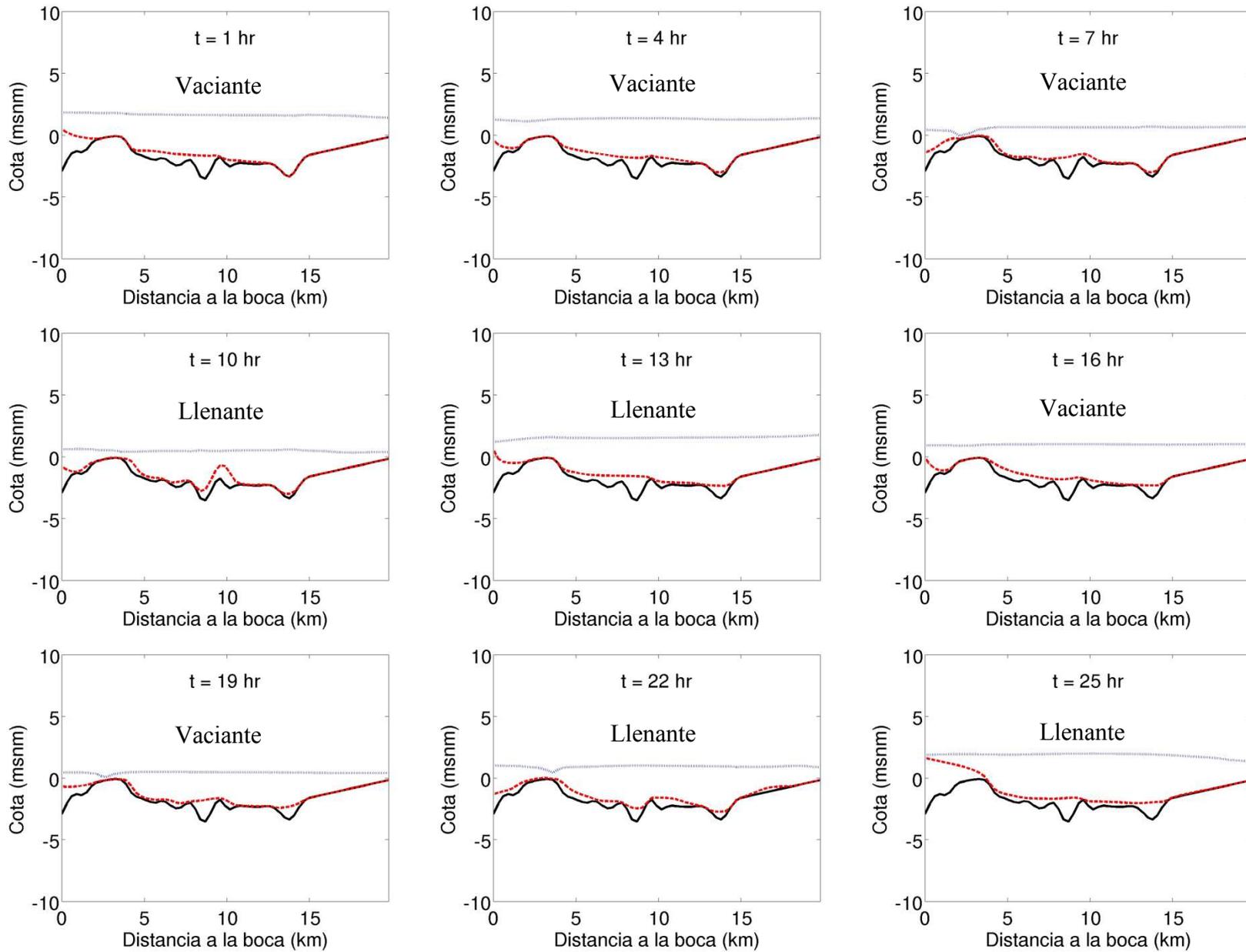
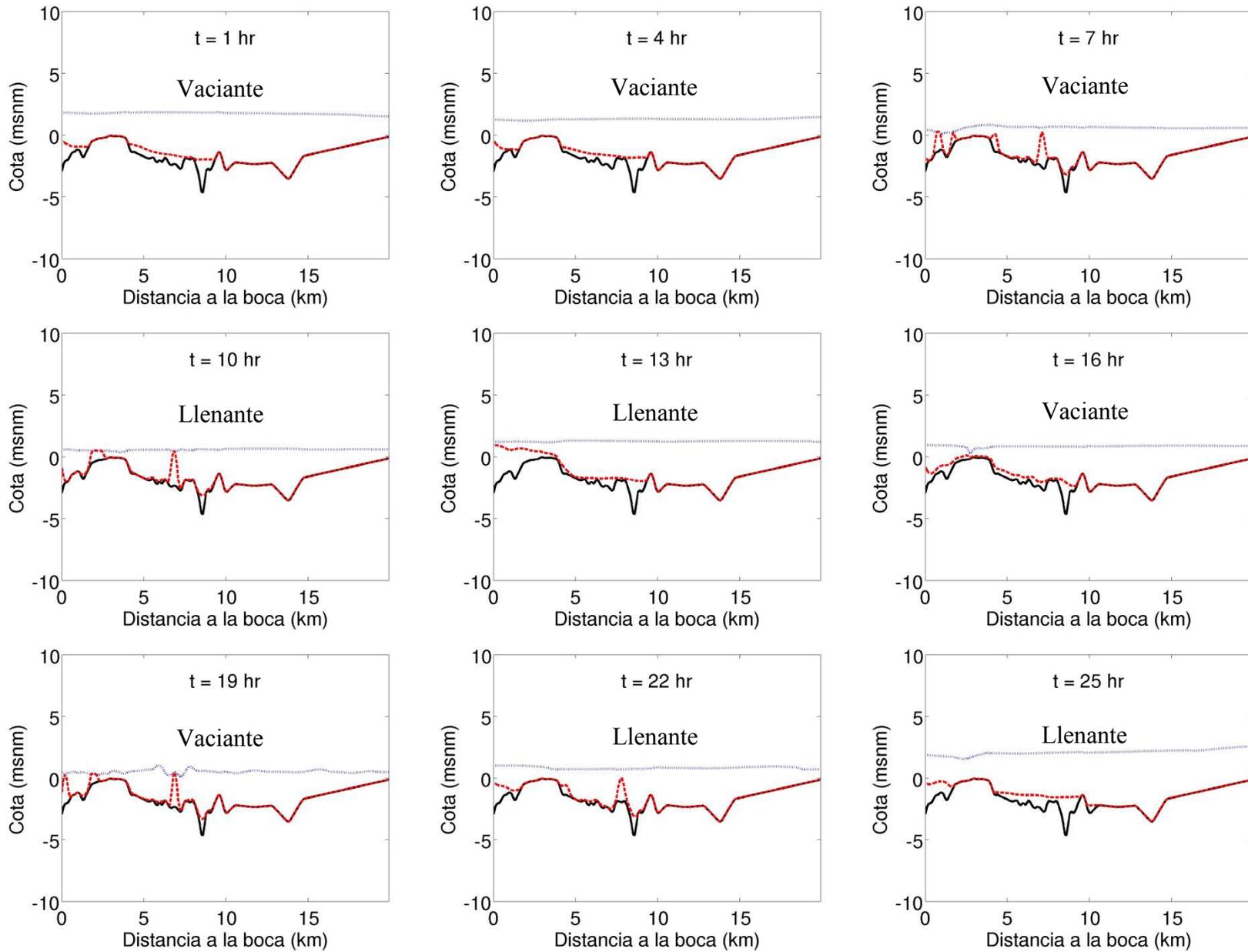


FIGURA I.13. MODELO IMPERMANENTE APLICADO A LEBU CON $\Delta x=300m$, DURANTE DOS CICLOS DE MAREA SEMIDIURNA.

FIGURA I.14. MODELO IMPERMANENTE APLICADO A LEBU CON $\Delta x=100\text{m}$, DURANTE DOS CICLOS DE MAREA SEMIDIURNA.

ANEXO II: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

Datum	WGS84
Uso Toltén	18S
Uso Lebu	18S
Uso Tongoy	19S

TABLA II.1: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 21 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5656131	653919			8:50	0.1	3.8
						0.1	0.0
1	5656176	653986			9:00	0.1	2.4
						0.1	0.0
1	5656221	654085			9:05	0.1	1.9
						0.1	0.0
1	5656254	654210	I	20	9:10	0.8	3.8
						0.1	0.0
1	5656113	653884			9:20	0.1	1.4
						0.1	0.0
1	5656089	653814	D	40	9:25	0.1	1.3
						0.1	0.0
2	5655387	654125	I	114	9:40	0.1	1.0
						0.1	0.0
2	5655361	653956			9:42	0.1	2.7
						0.1	0.0
2	5655346	653797	D	50	9:45	0.1	1.3
						0.1	0.0
3	5654700	653432	D	10	9:55	6.0	4.3
						5.2	4.2
						4.5	3.7
						1.4	2.6
						0.1	1.6
3	5654674	653575			10:01	0.1	1.8
						0.1	0.0
3	5654635	653693			10:03	7.0	3.7
						1.4	2.7
						0.1	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.2: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 21 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
3	5654604	653752	I	7	10:10	11.5	5.4
						10.8	3.7
						4.0	2.7
						1.0	2.5
						0.1	0.0
4	5654144	653464	I	30	10:24	5.0	3.3
						0.5	3.0
						0.2	2.3
						0.2	1.6
						0.1	0.2
4	5654111	653392			10:26	11.8	4.6
						11.5	3.7
						1.6	2.7
						0.3	2.5
						0.2	2.4
						0.1	1.6
4	5654077	653319			10:45	11.9	6.6
						11.8	3.7
						11.5	2.7
						0.1	0.0
4	5654040	653215			10:47	0.2	2.6
						0.1	0.0
4	5654045	653173	D	7	10:50	0.1	1.7
						0.1	0.0
5	5653770	653245			10:55	14.2	6.0
						11.8	3.7
						4.0	2.7
						0.2	0.0
5	5653690	653301			11:00	11.4	4.7
						11.7	3.7
						7.0	2.0
						0.2	1.4
5	5653539	653370	I	10	11:10	0.3	0.7
						0.1	0.0
5	5653825	653185	D	15	11:10	0.1	4.5
						0.1	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.3: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 21 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
6	5653826	653283	D	50	14:50	14.1	5.9
						13.4	5.5
						0.2	5.1
						0.3	5.1
						0.1	3.1
						0.1	0.0
6	5653780	653333	I	50	14:59	7.5	5.5
						6.5	5.3
						0.2	4.9
						2.0	5.0
						0.2	4.8
						0.1	0.0
7	5653963	653393	I	15	15:04	0.4	4.4
						0.4	3.0
						0.2	0.5
7	5653956	653358			15:06	1.6	5.1
						1.0	4.1
						0.2	1.4
						0.2	0.0
7	5653984	653271			15:13	16.2	6.2
						15.4	6.1
						9.7	5.8
						7.4	5.4
						3.0	5.1
						0.5	3.2
						0.2	0.0
7	5653997	653221	D	20	15:16	0.6	4.0
						0.3	2.0
						0.2	0.0
8	5654276	653513	I	15	15:22	0.5	3.1
						0.3	0.0
8	5654311	653477			15:24	0.9	4.5
						0.1	0.0
8	5654325	653415			15:28	6.0	5.7
						5.1	5.2
						1.0	4.7

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.4: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 21 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						0.2	1.7
						0.1	0.0
8	5654354	653360	D	70	15:30	0.7	3.2
						0.1	0.0
9	5656175	654170	I	50	16:23	0.1	2.0
						0.1	0.0
9	5656165	653935	D	70	16:26	0.1	2.7
						0.1	0.0
10	5654494	653384	D	20	16:40	0.4	2.6
						0.1	0.0
10	5654463	653415			16:43	0.5	3.2
						0.1	0.0
10	5654413	653483	I	25	16:46	28.2	8.5
						24.7	7.0
						18.2	6.3
						10.8	5.8
						6.3	5.6
						1.3	5.1
						0.2	0.0
11	5655477	654371			16:00	4.1	4.3
						0.1	0.0
11	5655476	654378			16:01	5.9	4.5
						0.1	0.0
11	5655479	654383	I	1	16:02	1.6	4.0
						0.1	0.0
11	5655479	654366			16:03	2.9	4.2
						0.1	0.0
11	5655479	654352			16:04	1.7	4.2
						0.1	0.0
11	5655490	654303	D	4	16:07	0.5	3.0
						0.1	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.5: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5653799	653273			8:40	33.3	6.1
						33.3	4.5
						30.7	3.5
						20.5	3.0
						15.3	1.9
						4.4	0.4
						3.4	0.0
1	5653805	653245	D	10	8:50	28.8	3.8
						26.0	1.1
						4.6	0.4
						4.3	0.0
1	5653789	653342			8:55	33.4	4.5
						29.4	2.7
						24.4	2.2
						19.3	1.8
						13.0	1.5
						10.0	0.6
						5.0	0.2
						3.4	0.0
1	5653800	653356	I	2	8:58	14.8	1.5
						8.7	0.6
						3.5	0.0
2	5654001	653390			9:06	31.7	4.8
						22.5	2.9
						18.7	2.4
						16.4	1.8
						14.0	0.8
						0.4	0.0
2	5654024	653434	I	10	9:09	31.4	4.2
						28.9	2.7
						18.5	2.4
						14.4	1.6
						6.0	1.0
						4.5	0.4
						0.2	0.0
2	5654065	653402			9:22	32.1	4.1

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.6: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						22.0	2.7
						17.0	1.7
						7.9	1.0
						4.8	0.5
						3.7	0.0
2	5654127	653323			9:27	33.0	7.5
						33.0	3.3
						28.6	2.6
						21.5	1.6
						16.5	0.8
						4.8	0.3
						3.8	0.0
2	5654147	653227			9:31	18.6	1.3
						15.5	0.5
						4.3	0.0
2	5654166	653153	D	10	9:33	16.1	0.8
						4.6	0.0
3	5654314	653184	D	5	9:38	4.9	0.2
						4.9	0.0
3	5654300	653253			9:40	24.0	1.4
						16.0	0.5
						4.8	0.0
3	5654276	653367			9:43	33.0	6.2
						31.6	3.1
						25.0	2.1
						19.9	1.2
						17.4	0.8
						4.0	0.3
						0.7	0.0
3	5654263	653493			9:48	32.8	4.0
						28.1	2.2
						18.3	1.6
						16.3	0.8
						12.0	0.3
						5.3	0.0
3	5654283	653529	I	10	9:50	31.8	3.1

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.7: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						30.5	2.2
						24.9	1.7
						21.2	1.1
						14.1	0.7
						8.0	0.3
						4.7	0.0
4	5654482	653678	I	5	9:58	32.5	2.6
						24.9	1.6
						14.0	0.8
						8.0	0.0
4	5654539	653654			10:00	32.6	7.3
						31.7	2.4
						23.6	1.8
						18.2	1.2
						9.6	0.0
4	5654583	653560			10:04	32.8	3.9
						30.0	2.0
						21.5	12.9
						18.2	0.5
						17.0	0.4
						6.4	0.0
4	5654678	653405	D	5	10:10	24.5	1.2
						20.6	0.6
						16.2	0.3
						1.4	0.0
4	5654683	653468			10:13	32.0	6.0
						31.8	2.7
						24.9	1.4
						18.1	0.6
						3.9	0.0
5	5654553	653854	I	3	10:23	32.3	3.2
						23.0	1.9
						21.1	1.1
						10.4	0.3
						9.2	0.0
5	5654623	653815			10:27	33.3	5.8

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.8: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						30.7	2.6
						24.2	1.8
						16.0	0.7
						7.5	0.0
5	5654697	653727			10:30	23.5	0.8
						13.4	0.5
						9.2	0.0
5	5654738	653596			10:33	24.7	1.1
						19.8	0.8
						16.8	0.5
						10.6	0.2
						0.0	0.0
5	5654808	653443	D	5	10:38	32.4	6.1
						30.0	2.1
						26.0	1.6
						20.9	0.9
						10.7	0.5
						4.0	0.5
						4.0	0.0
6	5655149	653565	D	3	10:47	29.9	1.7
						27.4	0.9
						17.5	0.4
						7.8	0.3
						4.8	0.0
6	5654819	654090	I	5	10:05	20.3	0.9
						10.0	0.6
						5.6	0.0
7	5655043	654243	I	5	11:12	19.2	1.2
						12.3	0.7
						4.3	0.4
						3.9	0.0
7	5655128	654171			11:16	32.5	2.9
						31.0	1.8
						22.1	1.4
						9.7	0.6
						3.4	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.9: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
7	5655225	654066			11:21	18.3	1.2
						9.2	1.1
						3.7	0.6
						3.1	0.0
7	5655327	653877			11:26	30.2	2.3
						22.4	1.8
						16.2	1.3
						6.3	0.8
						2.5	0.0
7	5655386	653734	D	8	11:31	32.0	4.3
						31.4	2.0
						14.1	1.3
						6.5	0.5
						5.5	0.0
8	5655567	653774	D	3	11:36	30.9	2.4
						30.9	1.5
						15.4	0.9
						5.5	0.6
						1.4	0.0
8	5655573	653850			11:40	30.4	1.6
						17.6	1.0
						5.7	0.6
						3.6	0.0
8	5655527	653989			11:43	29.4	3.5
						26.2	2.5
						22.2	1.7
						12.4	0.9
						4.3	0.0
9	5655946	653881			12:00	11.7	0.9
						10.3	0.5
						4.7	0.0
9	5655945	654120			12:07	20.0	2.2
						12.3	1.6
						5.2	1.1
						3.2	0.0
9	5655940	654301			12:10	32.2	3.6

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.10: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						29.6	2.5
						23.2	1.8
						17.7	1.6
						7.6	1.4
						2.9	0.8
						1.0	0.0
9	5655903	654398	I	5	12:14	2.5	0.6
						2.5	0.3
						2.4	0.0
10	5656608	653950	I	3	12:23	2.1	0.5
						2.1	0.0
10	5656539	653927			12:25	31.2	4.2
						27.3	3.1
						19.3	1.9
						2.8	0.9
						1.0	0.0
10	5656453	653884			12:30	30.0	4.2
						26.3	2.6
						17.6	1.4
						8.0	0.9
						1.6	0.0
10	5656397	653765			12:34	1.7	0.5
						1.7	0.2
						1.7	0.0
10	5656266	653683			12:39	5.1	1.6
						2.1	0.9
						1.5	0.0
10	5656175	653647	D	2	12:41	12.8	1.8
						10.4	1.1
						3.9	0.5
						3.1	0.0
11	5656751	653083	D	6	15:14	3.1	2.0
						1.9	0.7
						0.9	0.0
11	5656830	653190			15:18	1.2	0.6
						1.2	0.3

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.11: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						1.2	0.0
11	5656911	653395			15:21	1.4	1.5
						1.4	1.0
						1.4	0.0
11	5656920	653515			15:23	1.1	3.1
						0.8	1.1
						0.8	0.0
11	5656898	653559	I	2	15:25	0.8	2.0
						0.8	0.7
						0.8	0.0
14	5654533	653800	I	3	17:06	3.3	2.7
						3.3	1.8
						3.3	0.0
14	5654578	653709			17:09	14.5	5.4
						9.7	4.8
						6.5	3.8
						4.2	2.4
						3.3	0.0
14	5654630	653575			17:13	4.3	1.6
						4.2	0.7
						4.2	0.0
14	5654623	653463			17:16	16.0	4.2
						13.0	3.1
						8.4	1.6
						3.5	0.4
						3.5	0.0
14	5654616	653379	D	5	17:18	5.0	1.0
						5.0	0.0
15	5654194	653183	D	15	17:25	4.6	0.3
						4.6	0.0
15	5654174	653227			17:26	4.2	0.8
						4.1	0.4
						4.1	0.0
15	5654140	653281			17:28	11.7	4.1
						11.7	3.4
						5.7	2.4

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.12: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						3.6	0.7
						3.6	0.0
15	5654042	653353			17:31	14.2	5.1
						8.8	3.4
						7.2	1.9
						3.7	0.4
						3.7	0.0
15	5654015	653435	I	5	17:33	7.4	2.0
						4.5	0.6
						3.9	0.0
16	5653856	653363	I	6	17:38	12.8	5.4
						6.3	3.8
						5.3	1.5
						3.6	0.0
16	5653843	653316			17:40	13.3	5.6
						7.7	4.1
						5.3	2.7
						3.8	0.4
						3.8	0.0
16	5653807	653243	D	3	17:42	4.5	3.2
						3.9	2.0
						3.8	0.6
						3.7	0.0
12	5656690	653807	I	8	15:30	7.6	1.6
						1.9	0.8
						1.9	0.0
12	5656630	653794			15:32	27.0	4.3
						16.3	3.5
						14.0	3.1
						8.4	2.0
						3.0	0.9
						1.3	0.0
12	5656443	653751	D	12	15:37	12.9	2.7
						10.3	2.2
						5.6	1.5
						3.0	1.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.13: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 9 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						1.9	0.0
13	5655925	654374	I	3	16:18	2.2	1.2
						2.0	0.0
13	5655869	654329			16:20	13.2	4.7
						8.1	3.4
						3.3	2.5
						3.0	0.0
13	5655752	654250	D	4	16:26	3.5	0.8
						3.5	0.0

TABLA II.14: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 15 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5653881	653370			9:00	0	0
1	5653889	653337				0	1.9
1	5653851	653324				0	6.6
1	5653919	653268				0	6
1	5653959	653188			9:15	0	5.5
2	5654179	653538			9:20	0	6.5
2	5654212	653487				0	6.2
2	5654219	653427				0	5.2
2	5654242	653356				0	4.7
2	5654310	653218				0	5.2
2	5654217	653460			9:30	0	7
3	5654633	653379			9:35	0	0.8
3	5654629	653439				0	2.45
3	5654566	653530				0	3.5
3	5654555	653620				0	7.15
3	5654512	653653				0	8.5
3	5654484	653673			9:45	0	2.2
4	5654996	654210			10:20	0	3.9
4	5655062	654155				0	1.1
4	5655133	654086				0	1.7
4	5655204	653965				0	1.5
4	5655270	653758				0	3.55

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.15: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 15 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
4	5655310	653702			10:30	0	0.95
5	5656292	654246			10:45	0	1.2
5	5656309	654135				0	2
5	5656314	654013				0	1
5	5656244	653859				0	0
5	5656228	653751				0	0
5	5656195	653674				0	2.4
5	5656177	653651			11:00	0	2.7
6	5656772	653058			11:10	0	3.5
6	5656824	653143				0	0.7
6	5656857	653223				0	0.9
6	5656898	653378				0	1.8
6	5656911	653460				0	3.1
6	5656877	653546				0	2.1
7	5657320	653286			11:59	0	3.5
7	5657326	653290				0	3.4
7	5657283	653228				0	3.5
7	5657265	653172				0	2.4
7	5657254	653080				0	2.7
7	5657205	653010				0	3.2
7	5657147	652928				0	3.4
7	5657139	652904			12:14	0	0.2
8	5657561	652693			12:20	0	0.6
8	5657588	652739				0	5.7
8	5657649	652874				0	5.8
8	5657652	652877				0	2.8
8	5657668	652889			12:27	0	2
9	5653917	653406			15:21	0	0.4
9	5653906	653409				0	1.6
9	5653921	653391				0	4.9
9	5653925	653347				0	7
9	5653942	653298				0	6.2
9	5653934	653212				0	5
9	5653954	653168				0	2.6
9	5653955	653145			15:34	0	0
10	5653983	653138			16:03	0	0.4

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.16: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 15 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
10	5653989	653199				0	2.8
10	5653974	653257				0	6.7
10	5653953	653327				0	6.5
10	5653917	653398			16:12	0	2.8
11	5654508	653705			17:20	0	2.4
11	5654512	653687				0	3.9
11	5654520	653643				0	6.2
11	5654481	653592				0	9.7
11	5654498	653534				0	5
11	5654535	653432				0	3
11	5654519	653330			17:32	0	0
12	5655573	653162			17:40	0	0.6
12	5655573	653250				0	6.5
12	5655578	653357				0	6.5
12	5655581	653360			17:46	0	0

TABLA II.17: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 19 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5653996	653146	D	10	11:10	0.0	2.6
1	5653956	653218			11:08	0.0	6.1
1	5653915	653307			11:06	0.0	5.0
1	5653889	653398	I	15	11:01	0.0	4.8
2	5654113	653155	D	12	11:13	0.0	4.2
2	5654050	653242			11:18	0.0	6.1
2	5654025	653353			11:20	0.0	6.6
2	5653995	653435	I	12	11:22	0.0	5.3
3	5654320	653198	D	5	11:35	0.0	4.9
3	5654213	653291			11:32	0.0	6.7
3	5654142	653379			11:29	0.0	7.1
3	5654171	653467			11:26	0.0	6.8
3	5654121	653506	I	5	11:25	0.0	5.0
4	5654533	653322	D	8	11:39	0.0	5.1
4	5654477	653397			11:42	0.0	6.8
4	5654357	653450			11:46	0.0	6.8

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.18: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 19 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
4	5654294	653548	I	8	11:49	0.0	4.6
6	5655204	653635	D	10	12:03	0.0	3.3
6	5655192	653755			12:06	0.0	1.7
6	5655121	653947			12:09	0.0	1.7
6	5655050	654097			12:10	0.0	2.0
6	5654989	654189	I	10	12:12	0.0	1.6
7	5655437	654244	D	7	12:18	0.0	1.7
7	5655416	654308			12:20	0.0	3.3
7	5655413	654376	I	5	12:21	0.0	3.3
8	5655698	654272	D	4	12:31	0.0	1.8
8	5655686	654369			12:29	0.0	3.2
8	5655678	654416	I	4	12:27	0.0	0.9
9	5656000	653759	D	100	12:49	0.0	0.4
9	5655966	653821			12:47	0.0	0.6
9	5655913	653957			12:45	0.0	2.2
9	5655886	654046			12:42	0.0	2.7
9	5655889	654229			12:34	0.0	1.1
9	5655955	654347	I	10	12:37	0.0	2.3
10	5656210	653843	D	170	15:13	0.0	0.8
10	5656213	654005			15:17	0.0	2.4
10	5656260	654138			15:19	0.0	2.3
10	5656298	654208	I	10	15:20	0.0	3.3
11	5656391	653780	D	215	15:30	0.0	2.1
11	5656402	653882			15:28	0.0	3.2
11	5656399	654003			15:26	0.0	2.9
11	5656394	654064			15:24	0.0	3.1
11	5656371	654149	I	8	15:22	0.0	3.7
12	5656484	653725	D	266	15:33	0.0	2.7
12	5656518	653785			15:34	0.0	3.4
12	5656557	653887			15:36	0.0	3.1
12	5656574	653961	I	10	15:38	0.0	3.2
13	5656537	653718	D	30	15:46	0.0	3.2
13	5656585	653791			15:43	0.0	3.1
13	5656607	653827			15:41	0.0	3.2
13	5656631	653885	I	10	15:40	0.0	2.7
14	5656666	653562	D	30	15:49	0.0	1.9

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.19: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TOLTÉN 19 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
14	5656671	653676			15:51	0.0	3.5
14	5656723	653743	I	10	15:53	0.0	2.6
17	5657001	652950	D	12	16:17	0.0	2.1
17	5657016	653059			16:18	0.0	1.9
17	5657074	653222			16:20	0.0	1.8
17	5657143	653408			16:23	0.0	2.7
17	5657180	653447	I	8	16:24	0.0	3.1
18	5657197	653004	D	8	16:33	0.0	2.6
18	5657229	653136			16:31	0.0	2.0
18	5657228	653207			16:29	0.0	2.1
18	5657256	653297			16:28	0.0	2.7
18	5657266	653359	I	8	16:26	0.0	2.9

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.20: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5835374	623290	I	4	8:00	0.1	2.4
						0.1	0.0
1	5835383	623284			8:05	0.1	2.6
						0.1	0.0
1	5835387	623274			8:10	0.1	2.7
						0.1	0.0
1	5835392	623269			8:15	0.1	3.2
						0.1	0.0
1	5835393	623263	D	2	8:20	0.1	4.0
						0.2	0.0
2	5835000	623072	D	4	8:25	0.1	6.1
						0.1	0.0
2	5834998	623067			8:27	0.1	4.1
						0.1	0.0
2	5834984	623068	I	4	9:30	0.1	3.8
						0.1	0.0
3	5834795	622663	I	4	8:35	0.1	3.2
						0.1	0.0
3	5834806	622634			8:40	0.1	2.7
						0.0	0.0
3	5834798	622629			8:45	0.1	1.6
						0.1	0.0
3	5834800	622614	D	4	8:47	12.4	2.9
						11.2	2.5
						8.3	2.3
						0.2	1.7
						0.1	0.0
4	5834175	622671	I	3	8:50	16.0	3.0
						14.0	2.0
						2.0	1.8
						0.4	1.3
						0.4	0.0
4	5834183	622654			9:02	16.6	3.9
						16.1	2.9
						3.0	1.8
4	5834184	622611	D	4	9:06	16.0	3.4

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.21: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						14.0	2.0
						2.0	1.8
						0.4	1.3
						0.4	0.0
5	5834034	621877	I	3	9:14	13.6	2.2
						9.3	1.8
						5.5	1.4
						0.9	1.0
						0.8	0.2
5	5834029	621870			9:16	17.0	2.7
						0.8	0.0
5	5834033	621854			9:17	19.5	2.8
						9.9	2.6
						6.2	1.5
						1.0	1.0
						0.7	0.0
5	5834044	621835	D	3	9:19	6.3	1.6
						0.8	0.0
6	5833995	621007	I	3	9:25	11.9	2.1
						10.9	1.6
						8.2	1.4
						7.0	1.1
						3.3	1.1
						2.4	0.8
						2.2	0.5
						2.1	0.0
6	5834012	621014			9:29	23.8	2.9
						23.3	2.8
						21.4	2.5
						14.2	2.2
						13.1	1.9
						11.5	1.6
						7.0	1.2
						1.8	0.9
						1.3	0.5
						1.1	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.22: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
6	5834037	621011	D	5	10:09	17.0	2.3
						13.7	2.1
						10.8	1.6
						7.3	1.3
						4.5	1.1
						1.6	0.9
						1.4	0.4
						1.3	0.0
7	5834690	620182	I	4	9:42	21.7	1.4
						12.0	1.3
						7.0	0.9
						4.5	0.6
						3.6	0.3
						3.5	0.0
7	5834693	620207			9:47	19.6	1.9
						17.7	1.8
						12.7	1.4
						9.6	1.0
						5.7	0.8
						3.6	0.6
						2.0	0.0
7	5834720	620239	D	8	9:55	21.3	2.4
						21.3	2.4
						19.7	2.0
						16.4	1.7
						13.3	1.4
						9.9	1.1
						9.8	0.7
						4.5	0.6
						2.4	0.0
8	5835667	620038	I	7	10:00	26.0	0.7
						23.7	0.6
						12.0	0.5
						5.5	0.0
8	5835685	620058			10:02	27.6	0.9
						17.0	0.6

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.23: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						8.5	0.4
						5.5	0.0
8	5835715	620143			10:04	29.4	1.0
						28.5	0.9
						29.0	0.8
						8.0	0.6
						6.2	0.2
						6.2	0.0
8	5835735	620165	D	6	10:10	29.1	0.9
						7.8	0.0
9	5836236	620043	D	10	10:14	29.5	0.8
						27.3	0.5
						13.2	0.2
						6.7	0.0
9	5836223	620007			10:16	30.0	1.0
						30.0	0.7
						15.8	0.4
						9.2	0.0
9	5836224	619934			10:18	30.4	0.9
						30.0	0.7
						25.2	0.5
						7.5	0.4
						7.5	0.0
9	5836187	619909	I	15	10:21	19.3	0.5
						10.2	0.3
						6.6	0.2
10	5836795	619769	D	15	10:30	30.7	1.2
						29.0	0.9
						13.5	0.8
						12.0	0.5
						10.4	0.1
10	5836786	619708			10:32	30.7	1.1
						30.7	1.0
						13.0	0.8
						12.3	0.7
						10.6	0.4

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.24: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						10.4	0.0
10	5836746	619616	I	3	10:35	30.8	1.0
						17.5	0.8
						11.5	0.3
						11.2	0.0
11	5837019	619328	I	6	10:51	12.6	1.0
						12.0	0.6
						12.0	0.0
11	5837067	619373			10:54	31.7	1.8
						31.0	1.3
						20.3	1.1
						14.0	0.9
						11.5	0.7
						10.8	0.0
11	5837104	619407	D	20	11:00	15.0	1.0
						12.0	0.9
						10.8	0.5
						10.8	0.0
12	5837288	619056	D	1	11:10	31.8	1.9
						26.0	1.3
						14.3	1.1
						13.5	0.8
						13.0	0.5
						12.9	0.0
12	5837235	619024			11:17	31.8	2.3
						31.7	2.0
						31.7	1.7
						26.0	1.3
						14.0	1.1
						12.5	0.0
12	5837177	618993	I	15	11:22	14.0	0.5
						13.0	0.3
						13.0	0.0
13	5837981	618087	D	3	11:27	18.1	2.1
						17.9	2.0
						17.8	1.5

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.25: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						17.6	1.0
						17.6	0.4
						17.4	0.0
13	5837968	618057			11:39	31.0	3.6
						25.5	2.4
						23.5	2.1
						18.0	1.5
						17.6	1.2
						17.5	0.0
13	5837937	618057	I	1	11:42	17.6	2.2
						17.0	1.8
						16.7	1.4
						16.5	0.4
						16.5	0.0
14	5837650	618384	I	5	11:49	18.6	1.3
						16.6	0.0
14	5837672	618429			11:52	31.8	2.6
						31.7	2.2
						28.0	1.9
						23.5	1.7
						19.5	1.2
						16.5	0.0
14	5837707	618469	D	1	11:54	27.5	1.8
						23.4	1.7
						21.5	1.5
						19.6	1.0
						17.6	0.9
						14.2	0.0
15	5837921	618088			16:05	32.6	2.8
						30.0	1.2
						26.4	0.6
						25.0	0.0
15	5837950	618098	D	15	16:10	31.5	3.1
						32.7	2.2
						28.3	1.3
						26.2	0.5

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.26: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						20.0	0.0
16	5837732	618305	I	20	16:14	32.4	3.1
						32.3	1.2
						28.6	0.7
						25.0	0.4
						15.8	0.0
16	5837764	618344			16:19	32.5	2.5
						30.9	1.2
						29.0	0.8
						24.7	0.5
						19.6	0.4
						16.4	0.0
16	5837784	618399	D	25	16:23	30.9	2.1
						32.3	1.1
						28.5	0.9
						27.8	0.6
						20.3	0.6
						14.6	0.0
17	5834692	620181	I	5	16:33	30.7	1.5
						27.0	1.0
						17.3	0.4
						15.2	0.0
17	5837367	618838			16::39	32.4	2.0
						32.1	1.4
						25.7	0.7
						21.2	0.5
						16.5	0.0
17	5837404	618886	D	5	16:44	32.4	2.0
						32.0	1.1
						26.8	0.8
						25.0	0.7
						19.8	0.6
						16.7	0.0
18	5837013	619352	I	20	16:50	31.0	1.8
						26.1	0.9
						18.9	0.6

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.27: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						18.4	0.0
18	5837044	619409			16:55	31.0	2.3
						28.3	1.1
						18.1	0.7
						17.0	0.0
18	5837070	619430	D	20	16:58	30.6	1.2
						20.8	0.7
						17.3	0.5
						15.4	0.0
19	5834630	620213	I	15	17:27	10.3	1.8
						8.9	0.0
19	5834630	620231			17:30	11.5	2.3
						9.2	0.0
19	5834613	620258	D	2	17:33	11.7	2.4
						9.3	0.0
20	5833925	621394	I	20	17:40	22.3	3.6
						16.9	1.7
						7.6	1.6
						6.9	0.8
						2.7	0.0
20	5833934	621398			17:49	22.0	3.3
						14.2	2.6
						10.2	1.8
						5.0	0.9
						3.1	0.0
20	5833953	621441	D	2	17:50	21.0	3.3
						14.0	2.6
						12.4	2.1
						8.3	1.6
						5.2	1.0
						3.3	0.0
21	5834795	622615	D	2	18:13	14.4	3.3
						14.0	2.6
						2.0	2.1
						1.6	1.5
						1.1	0.6

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.28: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 19 DE ENERO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						1.1	0.0
21	5834790	622618	I	2	18:19	13.7	2.6
						9.5	2.3
						6.0	2.2
						2.0	2.0
						1.3	1.7
						1.2	0.1
22	5835482	623427	D	3	18:33	0.2	3.0
						0.3	0.0
22	5835487	623498	I	2	18:37	0.2	3.1
						0.2	0.0
22	5835517	623482			18:41	0.2	3.5
						0.1	0.0

TABLA II.29: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 11 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5834835	622738	I	2	9:17	0.2	2.1
						0.2	0.0
1	5834824	622731			9:19	0.3	3.5
						0.1	0.0
1	5834838	622698	D	3	9:20	0.1	2.0
						0.1	0.0
2	5834591	622542	D	1	9:25	0.2	1.8
						0.2	0.0
2	5834588	622562			9:27	0.2	2.7
						0.2	0.0
2	5834599	622584	I	2	9:28	0.2	1.9
						0.2	0.0
3	5834210	622733	D	1	9:32	0.3	1.3
						0.3	0.0
3	5834195	622720			9:33	0.4	3.2
						0.4	0.0
3	5834182	622725	I	1	9:34	0.4	2.9
						0.3	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.30: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 11 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
4	5834281	622249	D	1	9:40	5.0	2.8
						1.5	1.6
						1.3	0.0
4	5834270	622246			9:41	4.2	2.6
						1.3	0.6
						1.3	0.0
4	5834258	622232	I	2	9:42	4.8	2.9
						1.2	1.3
						1.2	0.0
5	5834084	621863	D	1	9:48	4.5	1.8
						2.5	0.8
						2.4	0.0
5	5834059	621869			9:49	15.9	2.4
						5.0	1.4
						1.9	0.0
5	5834030	621881	I	1	9:51	4.5	1.2
						2.6	0.0
6	5833977	621225	D	1	9:57	5.9	1.3
						4.1	0.0
6	5833959	621209			9:58	25.2	2.4
						10.4	1.7
						5.4	0.8
						4.7	0.0
6	5833932	621208	I	1	10:00	15.1	2.2
						6.5	1.0
						5.4	0.0
7	5834239	620506	D	1	10:06	9.4	1.6
						7.8	0.5
						6.5	0.0
7	5834227	620476			10:08	10.2	2.4
						8.8	0.8
						7.4	0.0
7	5834198	620454	I	1	10:09	9.6	1.7
						9.0	0.6
						9.0	0.0
8	5834803	620235	D	1	10:20	13.9	1.8

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.31: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 11 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						13.9	0.7
						13.8	0.0
8	5834802	620211			10:22	14.7	1.9
						14.7	0.4
						14.7	0.0
8	5834798	620153	I	1	10:24	13.4	1.2
						13.4	0.0
9	5835485	620233	D	2	10:31	19.7	0.8
						18.9	0.0
9	5835475	620201			10:32	20.3	0.5
						20.3	0.0
9	5835445	620148			10:33	20.6	0.6
						20.6	0.0
9	5835426	620075	I	2	10:34	19.5	0.9
						19.5	0.0
10	5836060	620106	D	1	10:40	26.8	0.7
						25.8	0.0
10	5836028	620029			10:42	28.1	0.6
						26.7	0.0
10	5836000	619936	I	2	10:44	25.5	1.0
						23.8	0.0
11	5836643	619870	D	2	10:50	31.3	0.9
						30.1	0.0
11	5836617	619812			10:52	32.7	0.7
						29.9	0.0
11	5836542	619711	I	4	10:54	32.3	0.7
						32.0	0.0
12	5837253	619116	D	2	11:03	34.2	1.9
						34.2	0.0
12	5837220	619080			11:04	34.2	1.8
						34.2	0.0
12	5837140	619028	I	1	11:05	34.1	0.8
						34.0	0.0
13	5837490	618650	D	1	11:12	34.2	1.8
						34.1	0.0
13	5837550	618616			11:13	34.2	1.5

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.32: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 11 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						34.1	0.0
13	5837518	618545	I	8	11:16	34.2	2.7
						34.2	0.0
14	5835130	623149			14:05	3.4	3.1
						2.5	2.5
						0.9	0.0
14	5835114	623130	D	1	14:05	3.4	3.2
						1.8	1.8
						1.3	0.0
14	5835102	623155	I	2	14:06	3.9	3.9
						2.0	2.2
						1.0	0.0
15	5834821	622706	I	2	14:11	6.5	4.5
						5.5	2.6
						1.7	0.0
15	5834831	622685			14:12	6.1	3.4
						4.8	1.7
						1.5	0.0
15	5834850	622678	D	3	14:13	5.8	3.2
						2.7	1.4
						1.8	0.0
16	5834191	622711	I	1	14:20	6.2	1.2
						6.2	0.5
						6.1	0.0
16	5834203	622711			14:20	10.5	5.0
						9.1	3.5
						6.7	1.9
						5.9	0.6
						5.7	0.0
16	5834216	622724	D	1	14:23	6.4	0.3
						6.4	0.0
17	5834335	622061	I	1	14:30	10.1	1.4
						8.9	0.5
						8.8	0.0
17	5834348	622055			14:31	14.4	3.9
						11.6	2.7

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.33: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 11 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						9.1	1.2
						9.0	0.0
17	5834364	622041	D	2	14:33	10.1	2.6
						8.4	1.4
						8.3	0.0
18	5834093	621923	I	2	14:37	16.1	2.8
						9.8	1.2
						9.7	0.0
18	5834106	621913			14:38	16.7	3.2
						12.3	1.8
						8.7	0.0
18	5834125	621891	D	1	14:39	12.5	1.8
						9.4	0.4
						9.4	0.0
19	5833938	621170	I	1	14:45	11.0	0.6
						11.0	0.0
19	5833954	621177			14:46	23.7	2.8
						16.2	1.6
						11.0	0.6
						10.7	0.0
19	5833983	621164	D	2	14:47	17.3	1.6
						11.3	0.7
						11.3	0.0
20	5834190	620478	i	1	14:53	21.5	1.5
						13.2	0.6
						13.0	0.0
20	5834218	620490			14:54	29.7	2.2
						24.4	1.6
						12.8	0.6
						11.5	0.0
20	5834245	620493	D	2	14:55	23.9	1.6
						13.4	0.5
						13.0	0.0
21	5834874	620236	D	1	15:00	25.2	1.2
						16.8	0.0
21	5834885	620189			15:02	25.2	0.7

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.34: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 11 DE MARZO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						12.1	0.0
21	5834882	620129	I	4	15:03	26.0	0.9
						16.1	0.0
22	5835477	620222	D	10	15:08	20.6	0.3
						20.6	0.0
22	5835474	620160			15:09	16.1	0.3
						16.1	0.0
22	5835455	620074	I	1	15:10	28.1	0.8
						18.1	0.0
23	5836635	619870	D	4	15:18	23.9	0.8
						23.7	0.0
23	5836617	619816			15:19	29.5	0.8
						21.1	0.0
23	5836576	619706	I	20	15:22	29.2	0.9
						24.1	0.0
24	5837263	619092	D	5	15:30	31.5	2.7
						28.0	0.9
						26.7	0.0
24	5837228	619049			15:30	33.0	2.9
						29.1	1.6
						26.4	0.0
24	5837157	618998	I	4	15:33	30.2	0.5
						30.0	0.0
25	5837593	618639	D	2	15:37	33.4	1.1
						31.9	0.7
						31.4	0.0
25	5837556	618597			15:38	33.2	1.6
						30.6	0.6
						28.1	0.0
25	5837514	618548	I	10	15:40	33.7	2.3
						33.2	1.0
						29.8	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.35: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 12 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5836534	625044	I	2	10:50	0.0	2.2
						0.0	0.0
1	5836547	625034				0.0	3.1
						0.0	0.0
1	5836556	625026	D	2	11:10	0.0	0.9
						0.0	0.0
2	5837323	625537	I	2	11:15	0.0	1.9
						0.0	0.0
2	5837331	625545				0.0	4.5
						0.0	0.0
2	5837342	625556	D	2		0.0	2.0
						0.0	0.0
3	5837490	624881	I	3	11:40	0.0	3.1
						0.0	0.0
3	5837503	624880			11:42	0.0	3.1
						0.0	0.0
3	5837508	624870	D	2		0.0	2.6
						0.0	0.0
4	5836268	624465	I	3	11:58	0.0	1.4
						0.0	0.0
4	5836283	624468			12:00	0.0	3.2
						0.0	0.0
4	5836295	624453	D	1		0.0	0.8
						0.0	0.0
5	5835615	623739	I	1	12:10	0.0	1.9
						0.0	0.0
5	5835601	623741			12:15	0.0	4.0
						0.0	0.0
5	5835599	623762	D	4		0.0	3.5
						0.0	0.0
6	5835009	623053	I	4	12:25	0.8	3.6
						0.5	3.0
						0.4	2.5
						0.4	1.5
						0.4	1.0
						0.3	0.5

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.36: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 12 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						0.3	0.0
6	5834997	623053			12:30	2.1	6.2
						2.0	6.0
						1.3	5.5
						1.2	5.0
						1.1	4.5
						1.1	4.0
						0.5	3.5
						0.4	3.0
						0.4	2.5
						0.4	2.0
						0.4	1.5
						0.4	1.0
						0.4	0.5
						0.4	0.0
6	5834982	623057	D	3		1.5	3.7
						1.3	3.5
						0.5	3.0
						0.4	2.5
						0.4	2.0
						0.4	1.5
						0.3	1.0
						0.3	0.5
						0.2	0.0
7	5834834	622751	I	8	12:35	9.5	3.3
						9.5	3.0
						6.9	2.5
						1.6	2.0
						0.8	1.5
						0.7	1.0
						0.7	0.5
						0.6	0.0
7	5834844	622757			12:45	9.5	3.1
						9.5	3.0
						5.9	2.5
						1.4	2.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.37: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 12 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						0.9	1.5
						0.8	1.0
						0.8	0.5
						0.7	0.0
7	5834864	622760	D	4		8.6	3.4
						8.3	3.0
						7.1	2.5
						1.6	2.0
						0.9	1.5
						0.7	1.0
						0.7	0.5
						0.6	0.0
8	5834226	622743	I	5	12:55	4.0	1.4
						1.8	1.0
						1.6	0.5
						1.6	0.0
8	5834221	622759			13:10	13.5	3.0
						12.4	2.5
						7.5	2.0
						5.1	1.5
						2.3	1.0
						1.8	0.5
						1.7	0.0
8	5834213	622768	D	5		7.7	2.0
						5.4	1.5
						3.0	1.0
						1.9	0.5
						1.7	0.0
9	5834001	621675	I	3	13:25	14.6	2.8
						13.0	2.5
						11.3	2.0
						8.5	1.5
						7.1	1.0
						3.8	0.5
						2.5	0.0
9	5833976	621679			13:30	23.2	4.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.38: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 12 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						20.0	3.5
						16.0	3.0
						14.0	2.5
						11.2	2.0
						8.8	1.5
						6.2	1.0
						3.9	0.5
						3.0	0.0
9	5833962	621676	D	3		12.5	2.2
						12.5	2.0
						9.5	1.5
						6.5	1.0
						4.0	0.5
						2.8	0.0
10	5835002	620117	I	6		19.4	1.1
						23.3	1.0
						12.6	0.5
						12.5	0.0
10	5835009	620146				25.6	1.5
						23.6	1.0
						13.7	0.5
						12.0	0.0
10	5835020	620192				25.4	1.6
						25.7	1.5
						24.6	1.0
						12.7	0.5
						12.7	0.0
10	5835041	620234	D	2		14.9	1.0
						12.8	0.5
						12.8	0.0
11	5836562	619898	I	15	14:15	31.7	1.2
						31.7	1.0
						31.7	0.5
						30.7	0.0
11	5836553	619849			14:20	32.4	1.7
						32.5	1.5

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.39: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 12 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						31.0	0.5
						31.0	0.0
11	5836502	619803				32.3	1.7
						32.3	1.5
						32.3	1.0
						31.5	0.5
						27.7	0.0
11	5836473	619742	D	6		28.7	0.8
						27.3	0.0
12	5837251	619129	I	3	14:30	32.5	3.5
						32.6	2.5
						32.6	1.5
						32.4	0.0
12	5837211	619103			14:40	32.6	2.3
						32.5	1.0
						32.5	0.0
12	5837131	619052	D	1		32.2	0.8
						31.1	0.0
13	5837692	618324	I	15	14:50	31.5	1.0
						31.5	0.0
13	5837723	618341			15:00	30.6	3.1
						30.7	0.0
13	5837785	618312				30.8	2.5
						30.9	0.0
13	5837859	618275	D	2		30.7	3.4
						30.8	

TABLA II.40: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 22 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	5836409	624849	D	4	10:46	0.0	1.8
						0.0	0.0
1	5836406	624872			10:45	0.0	1.6
						0.0	0.0
1	5836392	624874	I	4	10:40	0.1	0.9

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.41: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 22 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						0.0	0.0
2	5836283	624390	D	4	11:00	0.0	2.2
						0.0	0.0
2	5836280	624415			11:00	0.0	2.3
						0.0	0.0
2	5836264	624416	I	5	10:55	0.0	2.1
						0.0	0.0
3	5835576	623704	D	4	11:20	0.0	3.0
						0.0	0.0
3	5835573	623717			11:18	0.0	3.1
						0.0	0.0
3	5835561	623729	I	4	11:15	0.0	2.9
						0.0	0.0
							0.0
							0.0
5	5834768	622542	D	4	11:50	0.0	3.5
						0.0	0.0
5	5834757	622558			11:47	0.0	2.8
						0.0	0.0
5	5834744	622567	I	4	11:40	0.0	2.6
						0.0	0.0
6	5834232	622758	D	6	12:00	0.0	1.6
						0.0	0.0
6	5834230	622765			12:02	0.0	3.0
						0.0	0.0
6	5834205	622769	I	5	12:04	0.0	3.8
						0.0	0.0
7	5834065	621845	D	8	12:23	0.0	2.6
						0.0	0.0
7	5834065	621847			12:25	0.0	2.8
						0.0	0.0
7	5834039	621855	I	6	12:27	0.0	3.4
						0.0	0.0
8	5833965	621645	I	3	12:36	0.1	3.4
						0.1	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.42: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 22 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
8	5833989	621640			12:34	0.0	3.5
						0.0	0.0
8	5833994	621641	D	3	12:33	0.1	2.2
						0.1	0.0
10	5834924	620231	D	5	13:13	0.1	1.6
						0.1	0.0
10	5834919	620214			13:15	0.1	2.0
						0.1	0.0
10	5834903	620173			13:17	0.1	1.6
						0.1	0.0
10	5834888	620130	I	15	4:48	0.1	1.4
						0.1	0.0
11	5836206	620069	D	10	13:33	1.1	1.4
						0.2	0.0
11	5836185	620024			13:33	17.3	1.6
						1.1	0.0
11	5836181	619934			13:34	0.1	1.2
						0.1	0.0
11	5836161	619899	I	15	13:35	0.1	1.0
						0.1	0.0
12	5836660	619853	D	5	13:40	0.3	1.0
						0.3	0.0
12	5836657	619807			13:45	1.7	1.5
						0.8	0.0
12	5836637	619744			13:47	5.9	1.5
						0.9	0.0
12	5836606	619696	I	20	13:50	2.8	1.5
						0.8	0.0
13	5837052	619541	D	10	13:54	0.7	1.0
						0.6	0.0
13	5837026	619507			13:51	1.9	1.6
						0.4	0.0
13	5836972	619473			13:49	13.9	1.7
						5.6	0.6
						1.3	0.0
13	5836929	619457	I	15	13:48	11.2	1.6

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.43: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. LEBU 22 DE JUNIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						1.2	0.0
14	5837129	619083	I	4	13:54	1.2	0.7
						1.2	0.0
14	5837161	619094			13:58	2.2	1.3
						1.3	0.0
14	5837216	619104			13:59	28.3	2.8
						16.0	2.5
						2.3	1.6
						0.9	0.0
14	5837249	619125	D	15	14:00	3.2	2.9
						2.7	2.5
						2.2	2.0
						0.7	0.0
16	5837547	618685	D	5	14:15	26.4	2.2
						10.2	2.0
						5.6	1.8
						1.7	0.0
16	5837481	618676			14:13	27.6	2.1
						19.0	1.9
						1.6	1.1
						1.5	0.0
16	5837451	618637	I	15	14:00	27.6	2.3
						8.2	1.7
						2.0	1.2
						2.0	0.0
17	5837686	618519	D	5	14:22	4.7	1.5
						1.9	0.9
						1.5	0.0
17	5837619	618509			14:19	28.5	2.2
						24.7	1.9
						16.0	1.7
						1.9	0.9
						1.7	0.0
17	5837583	618490	I	20	14:18	25.5	2.2
						12.4	1.9
						3.5	1.2
						2.0	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.44: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE ABRIL DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	6648938	262186	D	1	9:47	28.2	1.0
						27.1	0.0
1	6648931	262170			9:42	30.1	3.0
						28.1	0.0
1	6648927	262162	I	1	9:39	29.6	1.1
						29.6	0.0
2	6649002	262141	D	1	9:51	29.0	1.2
						28.4	0.0
2	6648988	262130			9:53	29.0	5.6
						28.5	0.0
2	6648951	262136	I	1	9:57	27.1	0.9
						27.1	0.0
3	6649052	262092	D	1	10:46	29.6	1.2
						28.7	0.0
3	6649043	262086			10:46	30.6	2.9
						28.5	0.0
3	6649019	262094	I	1	10:56	28.2	1.1
						27.7	0.0
4	6649165	262053	D	2	11:00	30.3	1.8
						28.7	0.0
4	6649163	262044			11:03	31.2	3.4
						27.2	0.0
4	6649164	262033	I	2	11:05	29.2	1.7
						28.4	0.0
5	6649212	262062	D	3	11:08	30.2	1.3
						28.1	0.0
5	6649203	262041			11:12	28.4	6.9
						28.4	0.0
5	6649195	262023	I	2	11:14	30.6	1.6
						28.5	0.0
6	6649327	262004	D	2	11:20	29.6	1.0
						28.3	0.0
6	6649311	262000			11:22	32.3	2.2
						28.2	0.0
6	6649301	261992	I	2	11:23	30.1	1.5
						28.3	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.45: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE ABRIL DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
7	6649404	261961	D	2	11:27	29.7	1.1
						28.2	0.0
7	6649392	261956			11:31	30.8	2.4
						26.4	0.0
7	6649391	261942	I	1	11:04	27.8	0.6
						24.5	0.0
8	6649552	261815	D	2	11:38	32.6	1.8
						25.7	0.0
8	6649547	261811			11:40	29.8	3.3
						24.5	0.0
8	6649528	261813	I	1	11:42	23.7	0.6
						23.2	0.0
9	6649596	261487	D	2	11:51	18.6	0.8
				1		17.8	0.0
9	6649581	261483			11:49	22.0	2.1
						17.7	0.0
9	6649561	261486	I	1	11:47	19.2	1.3
						16.7	0.0
10	6649721	261227	D	1	12:08	20.2	0.7
						18.7	0.0
10	6649712	261184			12:06	24.0	1.6
						20.3	0.0
10	6649695	261182	I	1	12:03	18.7	0.5
						18.7	0.0
11	6649802	260990	D	2	12:16	20.6	0.5
						19.8	0.0
11	6649787	260968			12:14	25.9	1.2
						21.3	0.0
11	6649773	260946	I	1	12:13	20.9	0.5
						20.8	0.0
12	6648937	262184	D	1	12:22	20.6	0.4
						20.6	0.0
12	6648937	262184			12:24	26.6	1.3
						20.5	0.0
12	6648937	262184	I	1	12:25	19.9	0.4
						19.9	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.46: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE ABRIL DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
13	6650056	260471	D	3	12:30	29.4	0.2
						29.4	0.0
13	6650044	260464			12:32	30.4	0.5
						29.2	0.0
13	6650037	260452			12:33	32.4	0.8
						29.5	0.0
13	6650035	260440			12:34	33.4	0.9
						29.5	0.0
13	6650032	260436			12:36	31.3	0.6
						29.8	0.0
13	6650022	260431	I	3	12:37	31.4	0.5
						28.8	0.0
15	6650056	260471	D	3	14:50	31.7	0.3
						31.7	0.0
15	6650037	260452			14:49	32.4	0.6
						31.8	0.0
15	6650022	260431	I	3	14:47	31.2	0.3
						31.2	0.0
16	6649956	260596	D	1	15:07	29.6	0.2
						29.6	0.0
16	6649933	260567			15:04	35.0	1.5
						29.6	0.0
16	6649917	260549	I	2	15:01	29.6	0.2
						29.5	0.0
17	6649790	261033	D	2	15:18	30.9	0.5
						28.9	0.0
17	6649779	260986			15:17	32.2	1.0
						28.7	0.0
17	6649763	260978	I	2	15:15	28.7	0.6
						28.6	0.0
18	6649724	261229	D	1.5	15:32	28.9	0.8
						28.7	0.0
18	6649718	261197			15:31	32.6	1.6
						28.8	0.0
18	6649696	261187	I	1.5	15:28	28.6	0.6
						28.5	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.47: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE ABRIL DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
19	6649590	261501	D	1	15:40	28.8	0.4
						27.8	0.0
19	6649591	261480			15:39	30.4	1.4
						28.9	0.0
19	6649578	261464	I	1	15:37	30.2	1.4
						28.7	0.0
20	6648937	262184	D	4	15:45	31.2	1.4
						27.4	0.0
20	6648937	262184			15:52	32.2	3.3
						28.2	0.0
20	6648937	262184	I	2	15:47	30.7	1.6
						28.6	0.0
21	6649384	261968	D	1	15:57	28.6	1.4
						28.6	0.0
21	6649385	261962			15:56	31.8	2.2
						28.3	0.0
21	6649372	261951	I	2	15:54	27.3	1.4
						26.3	0.0
22	6649225	262061	D	2	16:02	28.2	1.2
						28.2	0.0
22	6649221	262047			16:04	31.8	8.9
						28.3	0.0
22	6649202	262037			16:07	31.2	4.8
						28.3	0.0
22	6649198	262028	I	2	16:08	28.8	1.6
						28.3	0.0
23	6649038	262104	D	1.5	16:12	28.4	1.3
						28.4	0.0
23	6649031	262094			16:13	29.8	2.7
						28.2	0.0
23	6649033	262089	I	2	16:15	28.9	1.6
						28.9	0.0
24	6649017	262127	D	2	16:19	28.3	0.9
						28.0	0.0
24	6649003	262118			16:20	30.3	4.6
						28.3	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.48: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE ABRIL DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
24	6648987	262114	I	1	16:22	27.1	2.0
						26.4	0.0
25	6648937	262184	D	2	16:29	28.0	0.7
						27.0	0.0
25	6648933	262173			16:27	30.1	3.7
						27.2	0.0
25	6648926	262163	I	3	16:26	28.2	1.1
						27.1	0.0

TABLA II.49: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE JULIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
1	6649689	261270			10:40	31.1	2.8
						27.5	1.6
						26.3	0.5
						26.3	0.0
2	6649668	261321			10:44	31.1	2.8
						28.1	1.9
						26.6	1.4
						26.2	0.0
3	6649638	261396			10:49	31.1	2.8
						26.9	1.7
						26.4	0.9
						26.3	0.0
4	6649577	261507			10:55	29.8	2.3
						26.4	1.3
						26.2	0.3
						26.1	0.0
5	6649567	261612			11:01	29.9	2.8
						27.8	1.9

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.50: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE JULIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						26.5	0.9
						26.2	0.0
6	6649562	261701			11:06	28.3	2.3
						27.4	1.5
						26.4	0.8
						26.3	0.0
7	6649540	261822			11:12	27.8	1.9
						26.4	0.8
						26.1	0.0
8	6649455	261913			11:17	29.2	2.2
						27.3	1.4
						26.5	0.8
						26.4	0.0
9	6649343	261978			11:22	29.3	3.7
						28.1	1.8
						27.0	0.9
						26.6	0.0
10	6649218	262030			11:30	29.2	9.7
						29.2	3.8
						28.8	2.9
						27.5	1.6
						26.8	0.5
						26.1	0.0
11	6649055	262083			11:47	27.8	3.5
						27.7	2.1
						26.9	0.6
						26.8	0.0
12	6649003	262121			11:49	28.2	6.9
						28.2	3.7
						27.8	2.6
						27.4	1.5
						27.1	0.7
						26.9	0.0
13	6649703	261232			12:08	30.6	3.0
						30.4	2.8
						26.8	1.1

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.51: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE JULIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
						26.4	0.0
14	6649726	261152			12:13	31.3	2.0
						26.7	1.0
						26.5	0.0
15	6649747	261074			12:15	31.0	1.7
						26.6	0.5
						26.5	0.0
16	6649791	260959			12:17	32.2	1.7
						26.7	0.7
						26.4	0.0
17	6649823	260825			12:20	33.1	1.8
						32.0	1.0
						26.8	0.0
18	6649875	260682			12:22	33.6	1.8
						27.1	0.8
						26.8	0.0
19	6649951	260555			12:25	34.0	1.9
						31.1	0.8
						27.0	0.0
20	6650005	260478			12:27	34.2	2.0
						33.1	0.9
						27.2	0.0
21	6650036	260475			12:29	33.7	1.1
						27.3	0.0
22	6650054	260455			12:34	34.0	1.1
						27.3	0.0
23	6650095	260434			12:39	29.8	0.3
						29.8	0.0
24	6649653	261357			16:02	31.7	3.2
						28.4	2.4
						26.7	0.5
						26.6	0.0
25	6649634	261401			16:04	31.5	3.1
						30.2	2.4
						28.7	1.5
						26.6	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.52: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE JULIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
26	6649570	261508			16:09	31.0	2.1
						27.0	0.7
						26.7	0.0
27	6649563	261610			16:12	30.5	2.2
						27.7	1.3
						26.7	0.0
28	6649562	261693			16:14	29.9	2.1
						27.1	1.0
						26.7	0.0
29	6649539	261815			16:17	28.6	1.6
						27.1	1.1
						26.1	0.0
30	6649459	261902			16:19	29.3	2.2
						27.3	1.2
						26.7	0.0
31	6649348	261974			16:21	29.2	2.6
						27.5	1.4
						26.8	0.6
						26.6	0.0
32	6649223	262021			16:24	29.1	7.7
						29.1	3.4
						29.0	2.4
						27.3	1.4
						26.7	0.3
						26.7	0.0
33	6649058	262082			16:34	27.7	3.1
						27.7	2.2
						27.0	1.3
						26.7	0.2
						26.7	0.0
34	6648934	262164			16:40	28.4	5.0
						28.4	3.5
						27.9	2.7
						27.1	1.5
						25.3	0.0

ANEXO I: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD

TABLA II.53: MEDICIONES DE SALINIDAD Y PROFUNDIDAD. TONGOY 7 DE JULIO DEL 2009.

Perfil	Norte (UTM)	Este (UTM)	Orilla	Distancia Orilla (m)	Hora	Salinidad (g/l)	Profundidad (m)
35	6649720	261218			16:53	29.8	1.5
						26.8	0.4
						26.6	0.0
36	6649756	261070			16:56	32.4	1.4
						27.0	0.8
						26.7	0.0
37	6649800	260943			16:58	33.1	1.5
						27.7	0.8
						26.8	0.0
38	6649836	260838			17:00	33.4	1.4
						27.3	0.6
						26.7	0.0
39	6649904	260664			17:03	33.8	1.4
						27.3	0.6
						26.8	0.0
40	6649948	260578			17:04	33.3	1.2
						27.0	0.4
						26.8	0.0
41	6650021	260486			17:06	28.7	0.7
						27.1	0.4
						26.9	0.0
42	6650097	260442			17:10	27.0	0.3
						27.0	0.0

TABLA II.54: MEDICIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO. TOLTÉN EN 653209E, 5653362S (HUSO 18S).

Hora	Nivel (msnm)		Hora	Nivel (msnm)		Hora	Nivel (msnm)		Hora	Nivel (msnm)
21/01 7:35	0.82		09/03 8:24	0.72		14/06 8:20	0.70		19/06 10:10	1.42
21/01 8:33	0.89		09/03 8:41	0.81		14/06 9:10	0.79		19/06 11:00	1.35
21/01 9:37	0.95		09/03 9:01	1.04		14/06 9:30	0.81		19/06 11:20	1.20
21/01 10:35	0.98		09/03 9:15	1.03		14/06 10:30	0.95		19/06 11:40	1.17
21/01 11:35	0.95		09/03 9:34	1.09		14/06 11:30	1.05		19/06 12:00	0.98
21/01 14:45	0.65		09/03 9:48	1.10		14/06 12:30	1.25		19/06 12:10	1.02
21/01 15:50	0.64		09/03 10:12	1.17		14/06 13:20	1.35		19/06 12:20	0.97
21/01 16:39	0.72		09/03 10:30	1.23		14/06 15:15	1.55		19/06 12:30	0.90
			09/03 11:04	1.23		14/06 16:15	1.40		19/06 12:40	1.00
			09/03 11:21	1.26		14/06 17:15	1.31		19/06 12:50	0.95
			09/03 11:48	1.26		14/06 17:50	1.08		19/06 19:37	1.10
			09/03 12:02	1.25		15/06 10:00	0.85		19/06 20:49	1.26
			09/03 12:29	1.25		15/06 10:30	0.82		19/06 21:31	1.21
			09/03 12:42	1.15		15/06 11:45	0.90		19/06 23:51	0.85
			09/03 14:50	0.93		15/06 13:15	1.10			
			09/03 15:21	0.74		15/06 15:30	1.30			
			09/03 15:57	0.60		15/06 16:00	1.40			
			09/03 16:30	0.55						
			09/03 16:59	0.50						
			09/03 17:33	0.44						
			09/03 18:08	0.44						
			09/03 18:51	0.65						
			09/03 19:54	0.91						

TABLA II.55: MEDICIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO. LEBU EN 618049E, 5837964S (HUSO 18S).

Hora	Nivel (msnm)		Hora	Nivel (msnm)		Hora	Nivel (msnm)		Hora	Nivel (msnm)
19/01 7:40	1.00		11/03 9:20	0.80		12/06 8:05	0.70		22/06 10:09	1.92
19/01 10:40	0.74		11/03 9:50	0.90		12/06 8:21	0.77		22/06 10:40	1.90
19/01 12:04	0.62		11/03 10:25	1.18		12/06 10:03	0.95		22/06 11:11	1.88
19/01 13:35	0.67		11/03 11:39	1.40		12/06 11:02	1.19		22/06 11:40	1.81
19/01 15:50	0.90		11/03 14:15	1.36		12/06 12:06	1.41		22/06 12:20	1.68
19/01 16:40	1.05		11/03 14:45	1.15		12/06 13:16	1.60		22/06 12:40	1.51
19/01 17:35	1.17		11/03 15:20	0.97		12/06 14:19	1.62		22/06 14:03	1.05
19/01 18:25	1.27		11/03 15:45	0.88		12/06 15:15	1.53		22/06 21:52	1.15
19/01 19:01	1.31		11/03 16:10	0.79		12/06 16:51	1.26		22/06 23:21	1.30
19/01 19:22	1.32		11/03 16:41	0.60		12/06 18:59	0.88			
			11/03 17:24	0.40						

TABLA II.56: MEDICIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO. TONGOY EN 260060E, 6650513S (HUSO 19S).

Hora	Nivel (msnm)		Hora	Nivel (msnm)
07/04 10:44	1.25		07/07 8:45	1.41
07/04 12:23	1.15		07/07 11:21	1.48
07/04 14:50	1.12		07/07 11:45	1.47
07/04 16:00	1.11		07/07 13:30	1.24
07/04 19:00	1.27		07/07 15:30	1.05
07/04 19:30	1.27		07/07 16:41	1.04
07/04 22:35	1.27		07/07 17:35	1.03

TABLA II.57: MEDICIONES DE SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO TOLTÉN. EN 653209E, 5653362S (HUSO 18S).

Hora	Salinidad (g/l)		Hora	Salinidad (g/l)		Hora	Salinidad (g/l)		Hora	Salinidad (g/l)
21/01 8:12	15.0		09/03 8:36	34.0		Todo el día	0		Todo el día	0
21/01 9:12	16.4		09/03 9:11	11.0						
21/01 10:06	12.0		09/03 9:43	12.5						
21/01 11:09	10.4		09/03 10:22	8.5						
21/01 15:07	2.3		09/03 11:14	14.0						
21/01 16:13	7.1		09/03 11:56	7.5						
21/01 17:09	10.1		09/03 12:35	5.0						
			09/03 14:51	3.2						
			09/03 15:17	4.4						
			09/03 15:53	3.6						
			09/03 16:27	3.6						
			09/03 16:56	3.7						
			09/03 17:30	3.5						
			09/03 18:04	3.5						

TABLA II.58: MEDICIONES DE SALINIDAD EN LA BOCA DEL ESTUARIO. LEBU EN 618049E, 5837964S (HUSO 18S).

Hora	Salinidad (g/l)		Hora	Salinidad (g/l)		Hora	Salinidad (g/l)		Hora	Salinidad (g/l)
19/01 11:58	21.2		11/03 9:30	31.7		12/06 9:34	33.8		22/06 10:09	5.6
19/01 16:16	31.0		11/03 9:55	32.0		12/06 9:41	34		22/06 10:40	2.8
19/01 17:15	31.2		11/03 10:30	32.1		12/06 9:47	34.1		22/06 11:11	2.4
19/01 18:11	31.2		11/03 11:40	32.2		12/06 9:54	34.2		22/06 11:40	2.3
19/01 18:48	31.2		11/03 13:45	32.2		12/06 10:36	34.3		22/06 12:10	2.4
			11/03 14:20	32.2		12/06 10:42	34.4		22/06 12:40	2.8
			11/03 14:50	32.3		12/06 10:48	34.5		22/06 14:09	2.3
			11/03 15:20	32.3		12/06 10:54	34.5		22/06 14:51	2.5
			11/03 15:50	30.8		12/06 11:34	34.5		22/06 15:20	2.7
			11/03 16:10	28.5		12/06 11:40	34.6		22/06 15:51	2.5
						12/06 11:46	34.6		22/06 16:20	2.4
						12/06 11:51	34.6		22/06 21:42	7.8
						12/06 11:57	34.6		22/06 23:11	6.6
						12/06 12:45	34.6			
						12/06 12:56	34.7			
						12/06 13:01	34.7			
						12/06 13:59	34.8			
						12/06 14:04	34.8			
						12/06 15:00	34.8			
						12/06 15:06	34.8			
						12/06 18:15	20.5			
						12/06 18:35	18			
						12/06 18:43	18.5			
						12/06 19:56	10.8			

TABLA II.59: MEDICIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LA BOCA DEL ESTUARIO. TONGOY EN 260060E, 6650513S (Huso 19S).

Hora	Salinidad (g/l)		Hora	Salinidad (g/l)
07/04 18:16	32.3		07/07 8:45	33.4
07/04 10:46	32.0		07/07 11:21	34.2
07/04 12:23	26.5		07/07 11:45	34.3
07/04 14:50	25.7		07/07 13:30	30.3
07/04 16:00	28.0		07/07 15:30	28.0
07/04 17:33	28.2		07/07 16:41	27.8
			07/07 17:35	27.8

ANEXO III: PERFILES LONGITUDINALES DE SALINIDAD

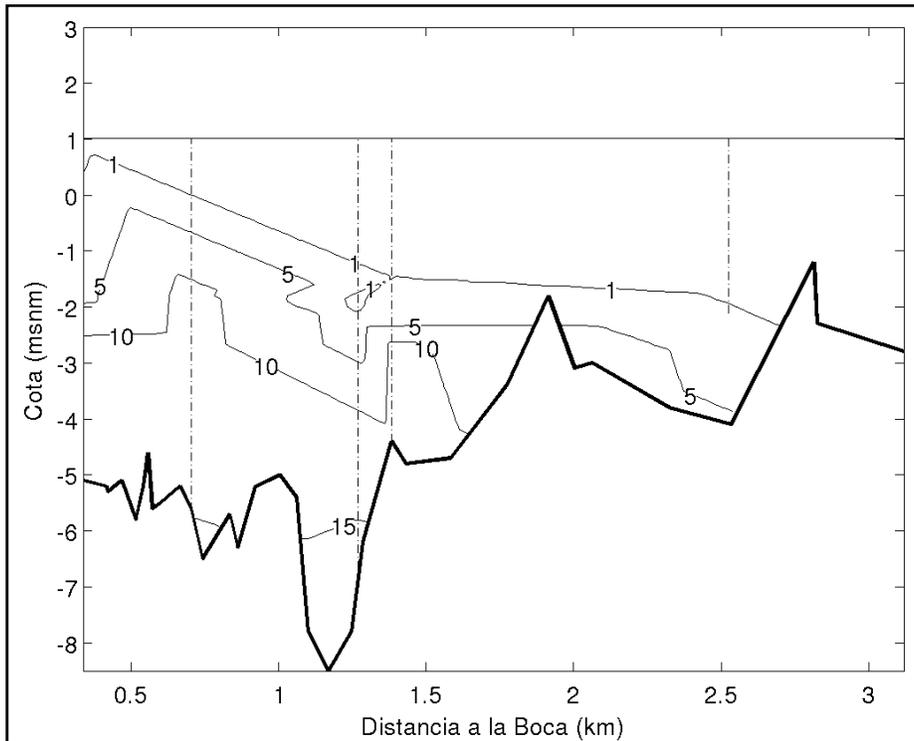


FIGURA III.1: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 21 DE ENERO EN EL RÍO TOLTÉN. LLENANTE.

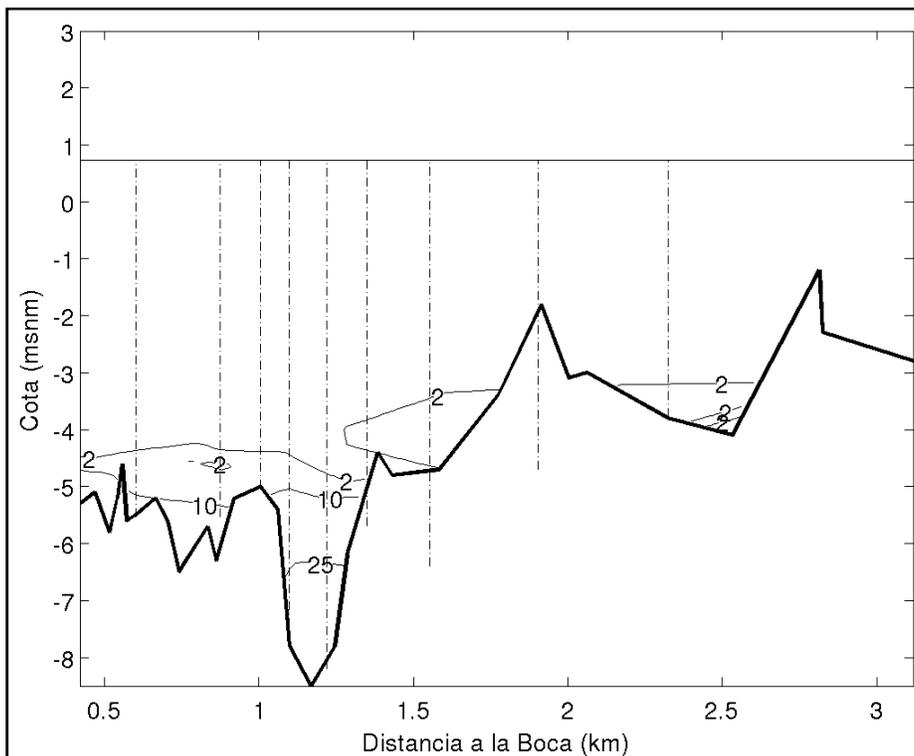


FIGURA III.2: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 21 DE ENERO EN EL RÍO TOLTÉN. VACIANTE.

ANEXO II: PERFILES LONGITUDINALES DE SALINIDAD

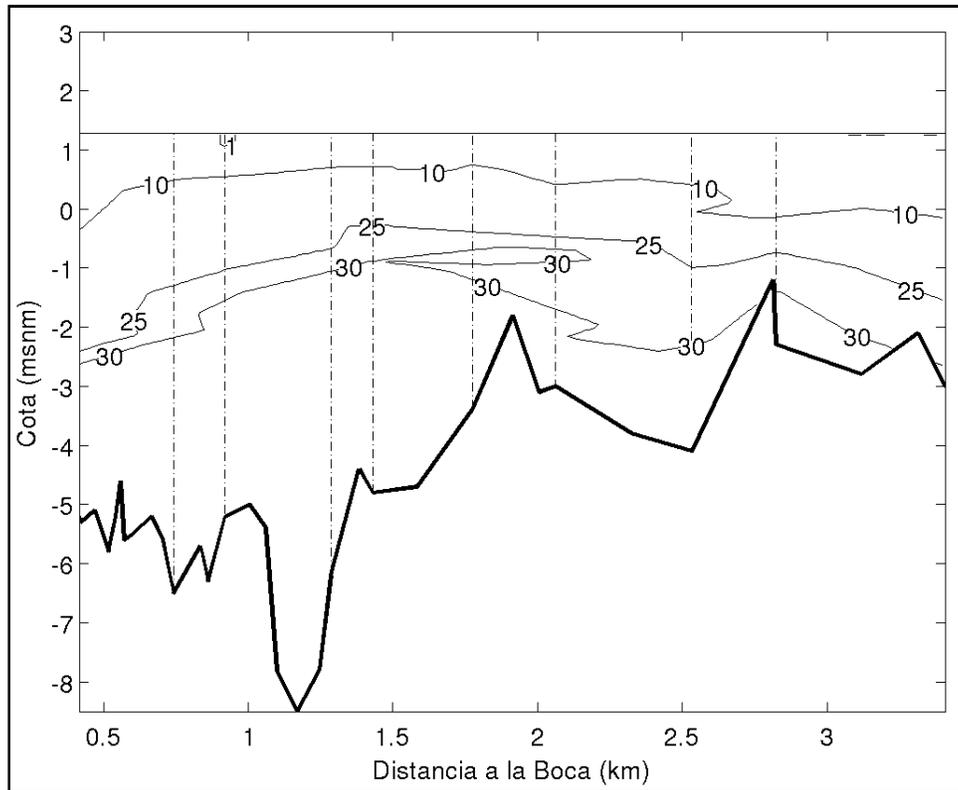


FIGURA III.3: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 9 DE MARZO EN EL RÍO TOLTÉN. LLENANTE.

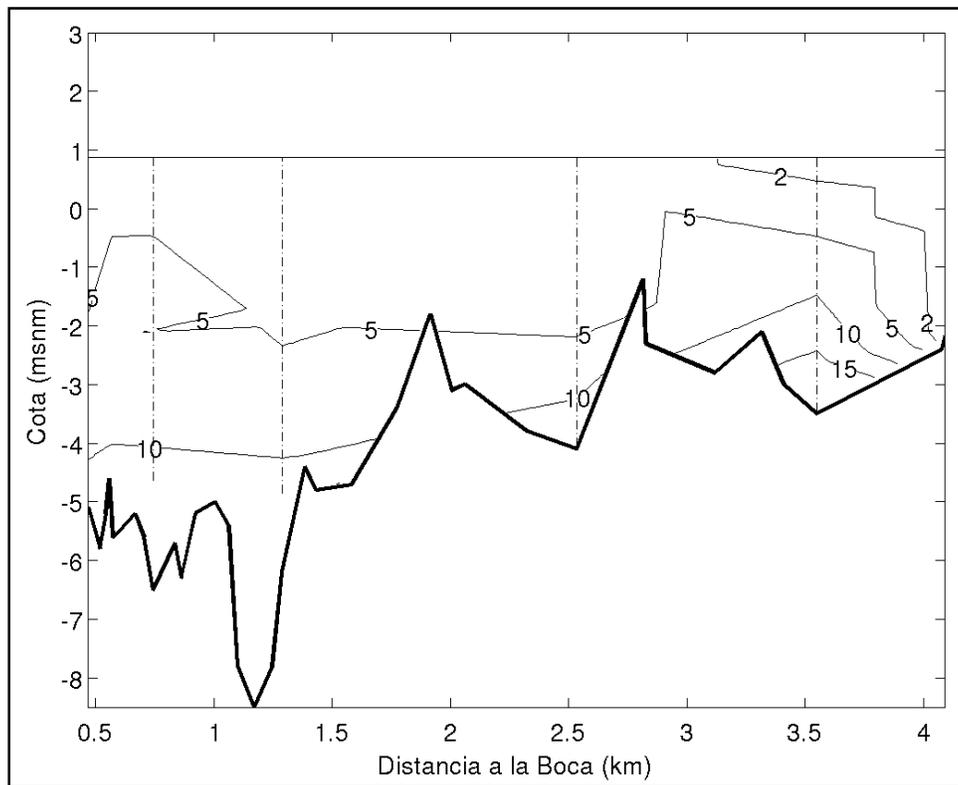


FIGURA III.4: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 9 DE MARZO EN EL RÍO TOLTÉN. VACIANTE.

ANEXO II: PERFILES LONGITUDINALES DE SALINIDAD

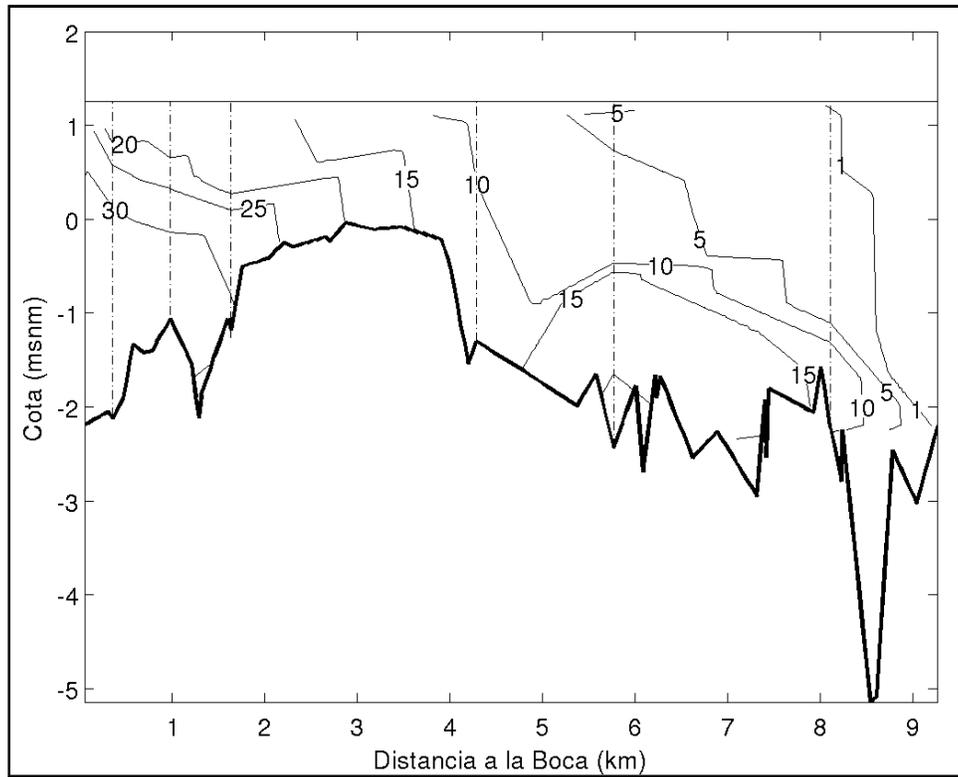


FIGURA III.5: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 19 DE ENERO EN EL RÍO LEBU. LLENANTE.

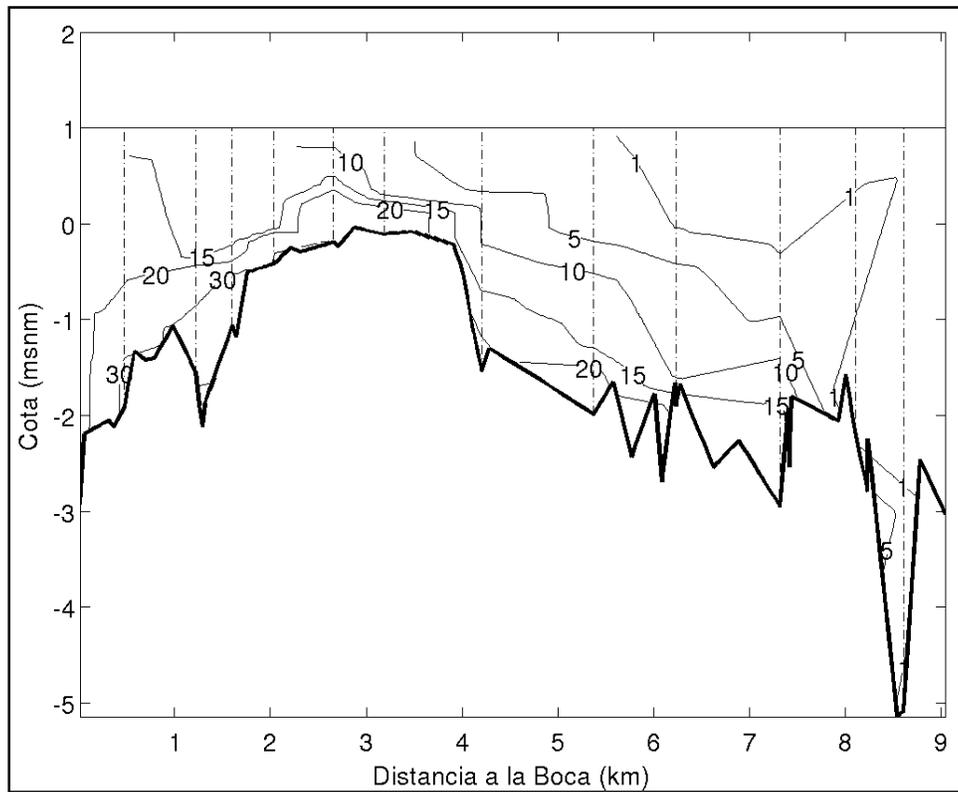


FIGURA III.6: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 19 DE ENERO EN EL RÍO LEBU. VACIANTE.

ANEXO II: PERFILES LONGITUDINALES DE SALINIDAD

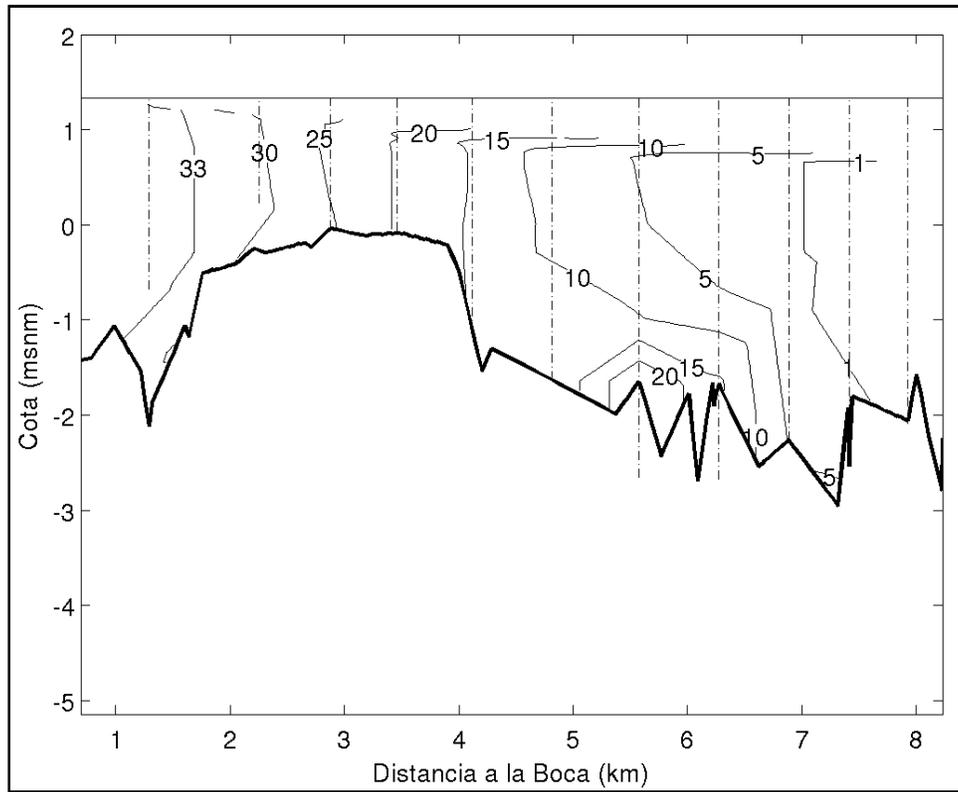


FIGURA III.7: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 11 DE MARZO EN EL RÍO LEBU. LLENANTE.

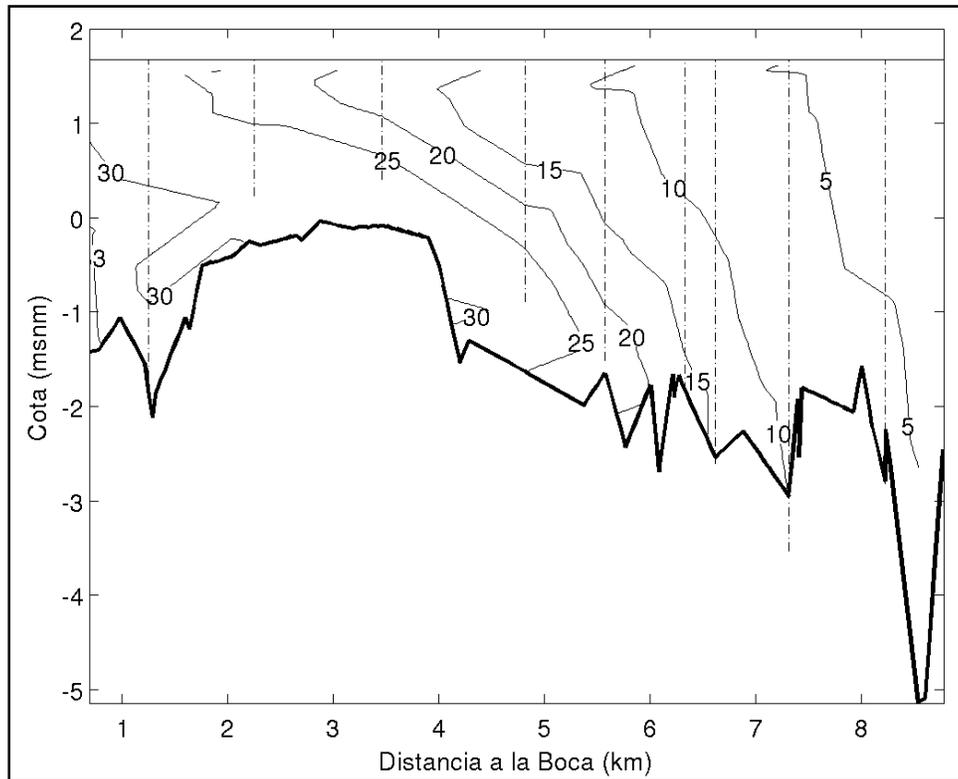


FIGURA III.8: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 11 DE MARZO EN EL RÍO LEBU. VACIANTE.

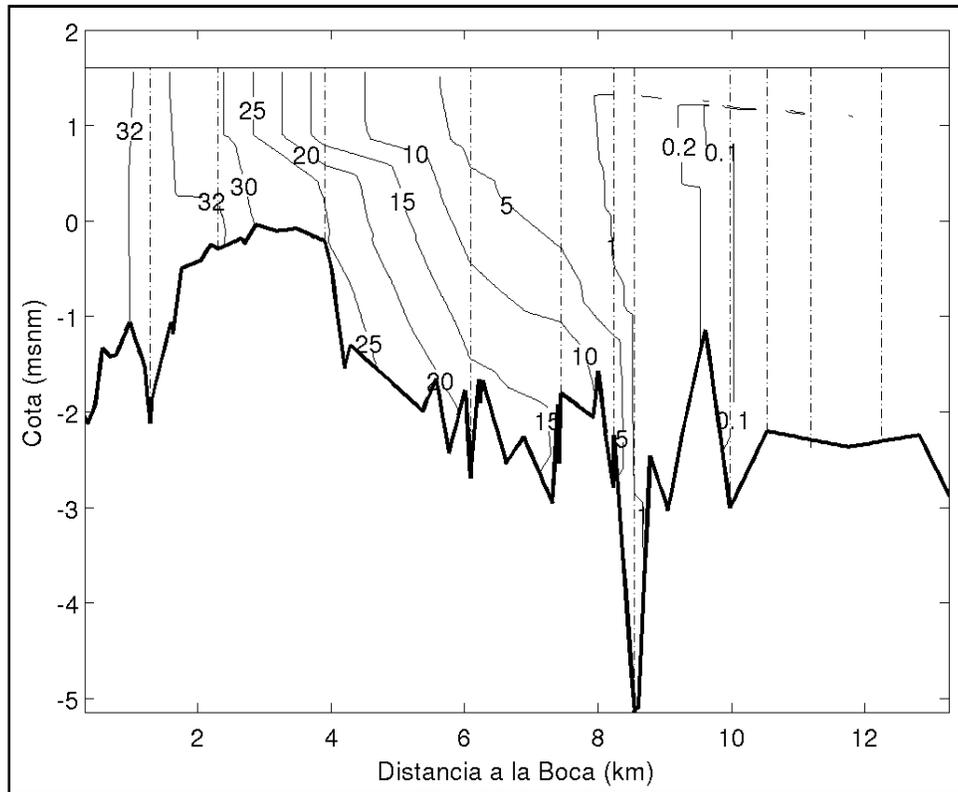


FIGURA III.9: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 12 DE JUNIO EN EL RÍO LEBU. LLENANTE.

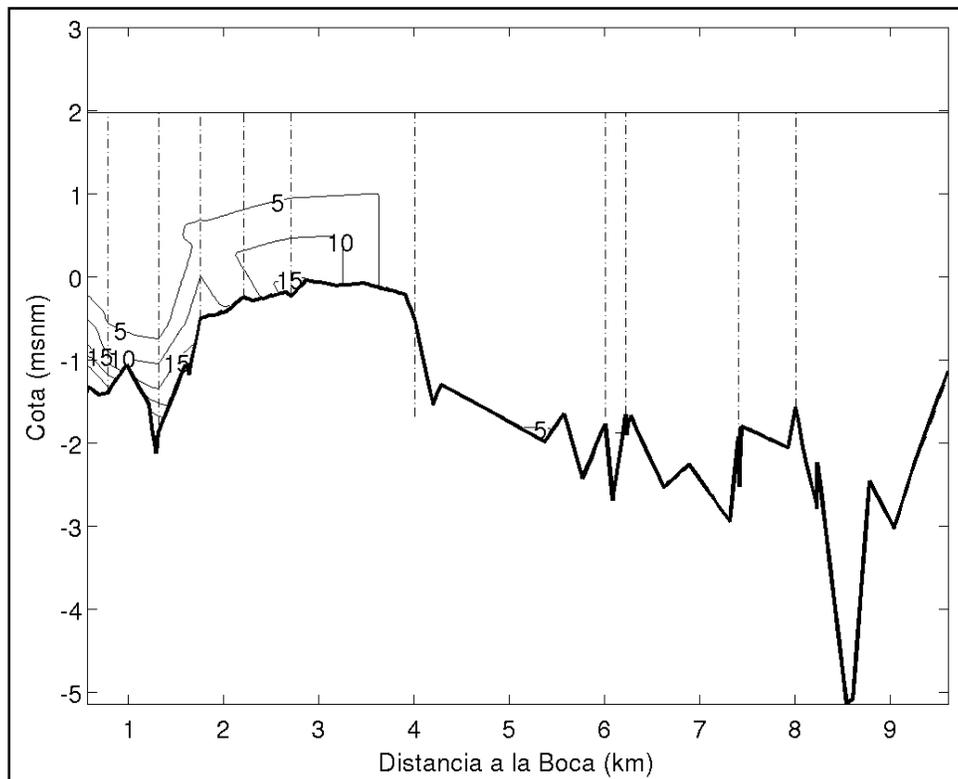


FIGURA III.10: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 22 DE JUNIO EN EL RÍO LEBU. VACIANTE.

ANEXO II: PERFILES LONGITUDINALES DE SALINIDAD

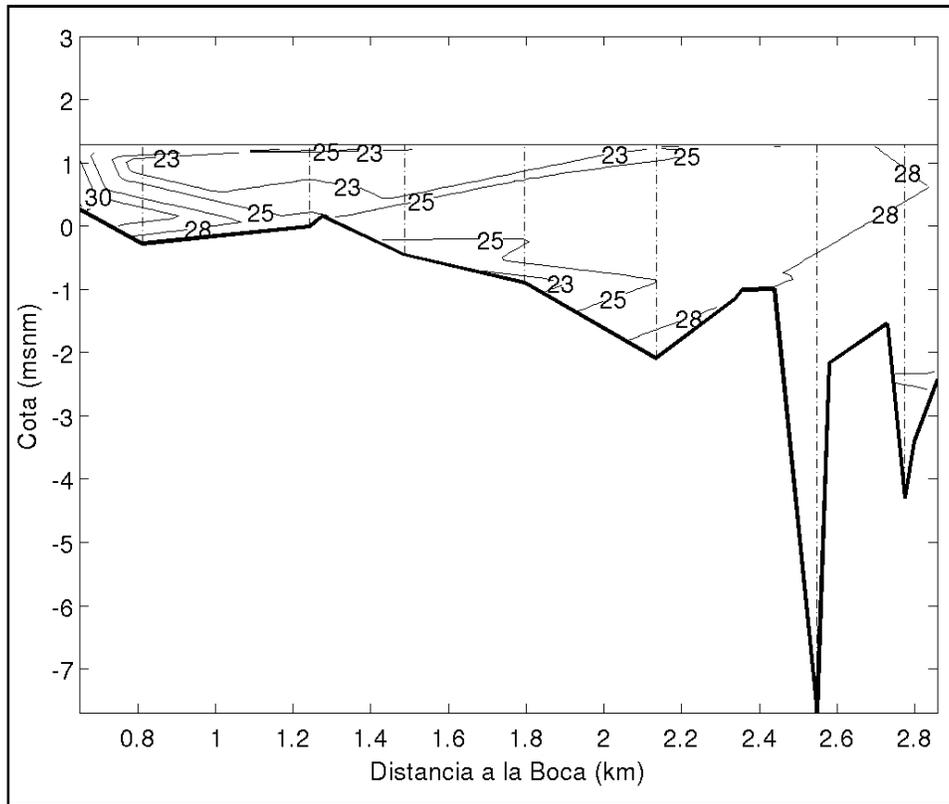


FIGURA III.11: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 7 DE ABRIL EN EL ESTERO TONGOY. VACIANTE.

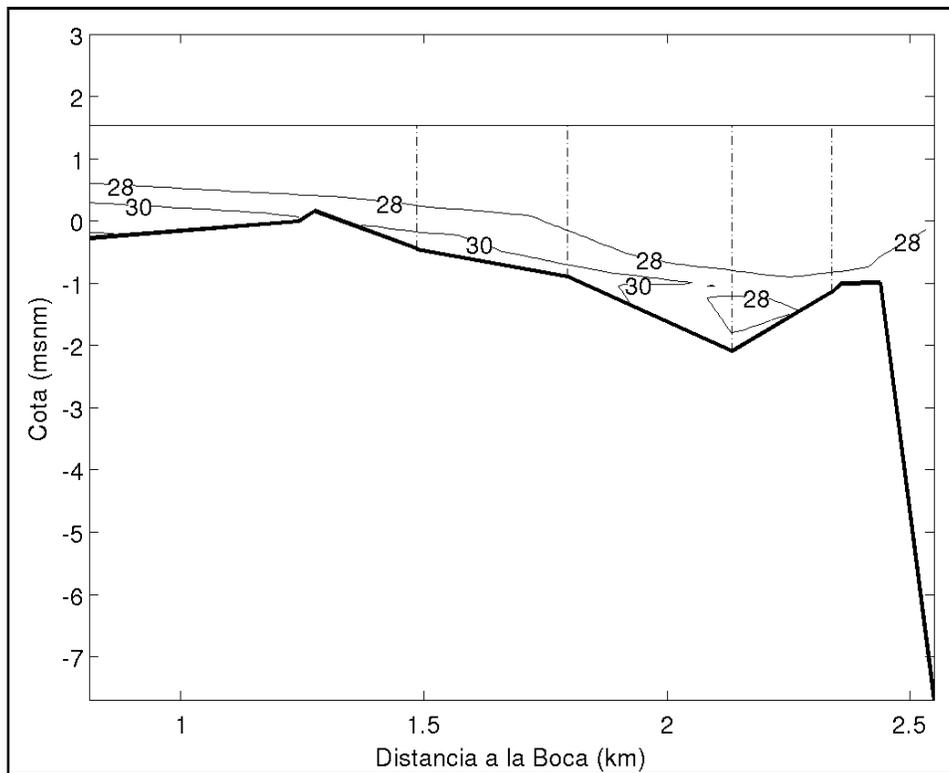


FIGURA III.12: ISOHALINAS CAMPAÑA DEL 7 DE JULIO EN EL ESTERO TONGOY. VACIANTE.