



INFORME FINAL

DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DEL ESTUARIO DE LA CUENCA DEL RÍO RAPEL, PARA LA ELABORACIÓN DE LA NORMA SECUNDARIA DE CALIDAD DEL AGUA

Enero 2017





| CONTROL REVISIÓN DOCUMENTOS | | | | |
|------------------------------------|--------------|---|--|----------------------|
| Versión | Fecha | Elaborado por: | Revisado por: | Aprobado por: |
| 0 | 30/01/2017 | Alejandro Aguado Cristián Godoy Esteban Martínez Francisca Urmeneta Juan Navarro María Alejandra Paredes Marta Martín Natalia Sandoval | Cristián Godoy Natalia Sandoval Esteban Abrigo | Elizabeth Araya |

| EQUIPO DE TRABAJO | | |
|--------------------------|--|--|
| Nombre | Título | Rol en proyecto |
| María Alejandra Paredes | Dra. Ciencias Biológicas | Jefa de proyecto, elaboración de informe |
| Francisca Urmeneta | Ingeniera Civil Hidráulica | Análisis de datos, elaboración de informe |
| Cristián Godoy | Ingeniero Civil Hidráulico | Revisión |
| Hernán Thielemann | Técnico | Conductor y patrón de embarcación |
| Dangelo Durán | Biólogo Ambiental | Jefe de terreno |
| Toradji Uraoka | Ingeniero Civil Hidráulico | Especialista terreno |
| Alejandro Aguado | Ingeniero Civil Hidráulico | Especialista terreno, elaboración informe |
| Valeria Rossel | Ingeniera Civil Hidráulica | Especialista terreno |
| Raúl Lagos | Técnico | Conductor y patrón de embarcación |
| Esteban Martínez | Ingeniero Ambiental | Especialista área acuática |
| Juan Navarro | Cartógrafo | Especialista cartográfico |
| Marta Martín | Magíster calidad de aguas continentales. | Especialista área química, elaboración de informe |
| Natalia Sandoval | Dr. © Cs. Ambientales | Especialista área acuática, elaboración de informe |
| Esteban Abrigo | Biólogo | Jefe Área Acuática, Revisión informe |
| Elizabeth Araya | Magíster en Zoología | Gerente Ecología, Aprobación informe |

| CONTRAPARTE TÉCNICA | | |
|----------------------------|---------------|------------------------|
| Nombre | Título | Rol en proyecto |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

RESUMEN

El Ministerio de Medio Ambiente solicita avanzar en el conocimiento del actual estado del humedal costero “La Boca de Rapel” mediante la caracterización y delimitación del estuario, lo cual dará lineamientos para la elaboración de la Norma de Calidad Secundaria de aguas de la cuenca Rapel. Bajo este contexto, el Centro de Ecología Aplicada Ltda. desarrolló un levantamiento de información en la zona, en sus variantes hidrológicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua cuyos resultados se describe en documento.

La caracterización de la hidrodinámica del estuario de “La Boca de Rapel” busca la determinación de la extensión del estuario y la delimitación de los tramos o compartimentos que lo componen, todos ellos gobernados por la variabilidad de la marea local, la morfología del sistema y los caudales afluentes a él. Así, en el estudio se realizó un análisis completo de su dinámica por medio de la aplicación de formulaciones empíricas existentes en la literatura junto con el análisis de la información de campo. Las aproximaciones empíricas fueron utilizadas para la estimación de la extensión de la cuña salina, siendo esta última uno de los elementos más relevantes en el desarrollo del estuario. Por otra parte, la determinación de la extensión del estuario y la delimitación de las zonas que lo componen, fue realizada mediante el procesamiento y análisis de las variables forzantes (p.ej. análisis del espectro de frecuencias de los registros de nivel), la identificación de características específicas del cauce (p.ej. identificación de una desconexión hidráulica) y el análisis de características del sistema (p.ej. análisis del alcance de la máxima marea según la morfología del cauce).

Los datos de calidad de agua y sedimentos fueron obtenidos de acuerdo a las recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras”, el cual está basado en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition, 2005 y las normas chilenas NCh411/1.Of96, NCh411/2.Of96, NCh411/3.Of96, NCh411/4.Of97 y NCh411/6.Of98.

Para establecer la línea de base biológica de las comunidades acuáticas del estuario fueron considerados organismos pertenecientes a distintos niveles tróficos de la columna de agua (fitoplancton, macrozoobentos, peces), de los cuales se obtuvieron muestras con diferentes métodos. El *fitoplancton* se obtuvo por medio de muestras recolectadas utilizando una red de arrastre de 30 μm de apertura de malla y 30 cm de diámetro en la boca, el arrastre fue horizontal en el epilimnion, posteriormente las muestras fueron fijadas con formalina al 10% para su análisis e identificación mediante microscopía óptica. Los *macroinvertebrados bentónicos*, en sustratos duros, fueron colectados en 2 muestras aleatorias con una red Surber de 0,09 m^2 con una malla de apertura de 250 μm , y en el caso de sustratos blandos se utilizó un corer de PVC, las muestras fueron fijadas con alcohol (70%) y etanol (10%) respectivamente, para su posterior análisis e identificación en laboratorio. Los *peces* fueron capturados mediante dos artes de pesca dependiendo de la zona del estuario, para áreas de baja salinidad se utilizó pesca eléctrica: utilizando un equipo de pesca eléctrica portátil, modelo SAMUS -725G y chinguillos, en cada punto de muestreo se recorrió un área cercana a los 100 m^2 , esto permite identificar y medir los peces para luego ser devueltos con vida al sistema acuático. En zonas de alta salinidad se utilizó una red de pesca tipo agallera de monofilamentos con paños de distinto tamaño de red, 30, 40, 50, 60, 80,

100 mm de distancia entre nudos, esta fue calada durante 12 horas continuas, perpendiculares a la línea de ribera y con un tamaño creciente de distancia entre nudos con la profundidad.

Finalmente, para proponer parámetros y límites de calidad acordes a la zona estuarina, en las Normas de Calidad Secundaria de aguas de la cuenca Rapel, se relacionó la condición del hábitat (calidad de agua y sedimentos) con la distribución y abundancia de especies. Complementariamente se realizó una revisión bibliográfica a cerca de la toxicidad de metales pesados en organismos estuarinos (cadmio, cobre y otros). Junto con ello, se revisó los anteproyectos de Normas Secundarias aprobadas en cursos fluviales nacionales y se propuso algunos rangos preliminares posibles.

En base a los resultados hidrológicos de este estudio se pudo establecer la hidrodinámica del estuario, que en primer lugar habla de la influencia de la marea dentro del sistema y sus diferentes alcances, ya sea hidráulicos, físico-químicos y ecológicos y secundariamente se vislumbra la influencia de los pulsos de inundación generados por el embalse Rapel sobre el sistema estuarino. No obstante, los resultados aquí expuestos se basan en la interacción río-mar y por el alcance del estudio no abarca en profundidad la dinámica de inundación artificial generada por la Represa.

La caracterización hidrodinámica del sistema, junto con el aporte de evidencia de terreno, permitió determinar la existencia de una desconexión hidráulica activa bajo condiciones normales de caudal, con ello fue posible definir una cota para el alcance de la zona de estuario bajo las condiciones forzantes registradas durante los terrenos realizados en el contexto del estudio. El límite definido para el estuario en 9 km es tal que permitió la identificación de las 3 zonas o compartimentos esperados en el estuario, pudiéndose así definir la extensión de las zonas de cuña salina (2,8 km), zona de mezcla parcial (4,8 km) y zona sin intrusión que se extiende desde los 4,8 km hasta el final del estuario.

La calidad de agua y sedimentos, describen al estuario río Rapel como aguas moderadamente alcalinas con una buena oxigenación y contenidos de salinidad que aumentan en dirección al flujo del agua. En general para los parámetros: conductividad, salinidad, DQO, fósforo total, nitrógeno total, clorofila "a" y sulfato se observó una diferenciación gradual entre la zona alta y terminal del río Rapel, no observándose claramente para el resto de parámetros analizados en el agua. De igual forma se establecen tres zonas posibles para el seguimiento y monitoreo de calidad de agua. Una zona de agua dulce (sitios ER-1, ER-2, ER-3), una zona de transición entre el agua dulce y salina (ER-4 y ER-5), y una tercera zona en la desembocadura (E-6). En los sedimentos esta diferenciación entre tramos es menos clara, solamente se puede inferir que existen diferencias ligeras entre tramos para potencial redox, fósforo total y aluminio, todos ellos aumentando en dirección del flujo.

Las comunidades biológicas se diferenciaron entre los distintos tramos descritos (Cuña salina, zona de mezcla y zona sin intrusión), especialmente demarcando la zona de cuña salina, por lo que este parámetro se comporta como el factor estructurador dentro del sistema. Los grupos indicadores del tramo de cuña salina corresponden a macroalgas (marinas), invertebrados bentónicos (poliquetos, *Perinereis* sp. y cangrejo, *Hemigrapsus crenulatus*) y peces (*Eleginops maclovinus*, *Mugil cephalus*). Luego en la zona de mezcla es posible distinguir especies salinas y de agua dulce, lo cual es

característico en zonas de transición y en la parte más alta, en la zona sin intrusión, encontramos especies dulceacuícolas como oligoquetos y peces como *Trichomycterus areolatus*.

No obstante, las especies utilizadas para determinar si los tramos hidráulicos se relacionan con la biota encontrada en el lugar, fueron las especies con menor vagilidad (macrozoobentos), ya que en estos taxa es posible distinguir preferencia de hábitat por un tiempo prologado. A diferencia de aquellos con mayor movilidad que pueden ser encontrados en más de una zona si lo medimos en un momento acotado, como es el caso de este estudio. En este sentido, el macrozoobentos definido como estuarino, dulce-salino y de agua dulce, responde a las tres zonas, principalmente por presentar mayor diversidad en la zona de mezcla.

Particularmente entre la fauna íctica, se identificó un total de 4 especies, dos de ellas nativas, ambas incluidas en el Reglamento para la Clasificación de Especies Silvestres (RCE). El “bagre chico” (*Trichomycterus areolatus*) clasificada como Vulnerable para la zona en estudio (DS 51/2008, MINSEGPRES) y la “carmelita” (*Percilia gillissi*) clasificada En Peligro (DS 33/2012, MMA).

De acuerdo a la relación entre la componente biótica y físico química evaluada, para proponer, preliminarmente, parámetros de calidad de agua y sedimentos acorde a la zona estuarina. Fue posible establecer la importancia de la condición de la columna agua para la permanencia de la biota acuática en el estuario, especialmente de la salinidad. No obstante, para establecer rangos definitivos, para los parámetros analizados en este estudio, es necesario señalar que se requieren antecedentes adicionales de calidad de agua, sedimentos y biota acuática, que den cuenta de la dinámica espacio-temporal del sistema. Sin embargo, este estudio es una buena primera aproximación para su elaboración, para lo cual se presenta una tabla de rangos para el tiempo evaluado. Complementariamente se sugiere utilizar como referencia el anteproyecto del río Rapel (Res. Ex. 873) y agregar a este, parámetros como Potencial redox, Carbonatos, Cobre disuelto, Cadmio disuelto, Ortofosfatos, entre otros.

Es importante tener en consideración que el levantamiento de información de este estudio, bajo todas las variantes expuestas, fue desarrollado en condiciones particulares existentes durante el desarrollo del estudio. Por ello, es necesario aumentar la resolución espacial y temporal, para así poder descartar la existencia de escenarios viables en lo que se tenga tanto una extensión superior del estuario como una configuración diferente de los compartimentos del mismo, como lo observado con los pulsos de inundación generados por la represa Rapel.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 2 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| 1.1 Área de estudio | 8 |
| 2 OBJETIVOS | 10 |
| 2.1 Objetivo General..... | 10 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 10 |
| 3 METODOLOGÍA..... | 11 |
| 3.1 Caracterizar la hidrodinámica del estuario de “La Boca de Rapel”, en función de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, de marea y afluentes fluviales. . | 12 |
| 3.1.1 Estimación de mareas y caudales..... | 12 |
| 3.1.2 Escenarios hidrodinámicos. | 12 |
| 3.2 Determinar la extensión del estuario de la cuenca Rapel, en función del alcance de la onda de marea..... | 12 |
| 3.2.1 Uso de sensores de presión..... | 13 |
| 3.2.2 Método de la cota de máxima marea | 15 |
| 3.3 Identificar el grado de estratificación del estuario considerando la dinámica temporal de las variables forzantes..... | 17 |
| 3.3.1 Perfiles de salinidad en el estuario..... | 17 |
| 3.3.2 Definición de zonas del estuario..... | 19 |
| 3.4 Establecer una línea de base de calidad física química del agua y sedimentos del estuario, incluyendo las condiciones de borde desde la zona fluvial y del sistema costero..... | 22 |
| 3.4.1 Toma de muestras de agua y sedimentos..... | 23 |
| 3.4.2 Análisis de la columna de agua y sedimentos | 23 |
| 3.4.3 Análisis de los datos de características físicas y químicas de la columna de agua y sedimentos. | 27 |
| 3.5 Establecer una línea de base biológica de las comunidades acuáticas del estuario..... | 27 |
| 3.5.1 Caracterización del hábitat..... | 27 |
| 3.5.2 Toma de muestras biológicas y método de análisis | 27 |
| 3.6 Proponer parámetros y límites de calidad acordes a la zona estuarina, en las normas de calidad secundaria de aguas de la cuenca Rapel..... | 29 |
| 4 RESULTADOS | 30 |
| 4.1 Caracterizar la hidrodinámica del estuario de “La Boca de Rapel”, en función de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, de marea y afluentes fluviales. . | 30 |
| 4.1.1 Mareas..... | 30 |
| 4.1.2 Caudales..... | 30 |
| 4.1.3 Escenarios | 32 |
| 4.2 Determinar la extensión del estuario de la cuenca Rapel, en función del alcance de la onda de marea. | 35 |
| 4.2.1 Uso de sensores de presión..... | 35 |
| 4.2.2 Método de la cota de máxima marea | 40 |
| 4.2.3 Profundidades en el estuario..... | 41 |
| 4.2.4 Extensión del estuario..... | 43 |
| 4.3 Identificar el grado de estratificación del estuario considerando la dinámica temporal de las variables forzantes..... | 43 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 4.3.1 | Perfiles de salinidad en el estuario..... | 43 |
| 4.3.2 | Definición de zonas del estuario..... | 47 |
| 4.4 | Establecer una línea de base de calidad física química del agua y sedimentos del estuario, incluyendo las condiciones de borde desde la zona fluvial y del sistema costero..... | 50 |
| 4.4.1 | Calidad física y química de la columna de agua..... | 50 |
| 4.4.2 | Parámetros físico-químicos..... | 55 |
| 4.4.3 | Calidad física y química de sedimentos..... | 69 |
| 4.5 | Establecer una línea de base biológica de las comunidades acuáticas del estuario..... | 76 |
| 4.5.1 | Caracterización del Hábitat..... | 76 |
| 4.5.2 | Macroinvertebrados bentónicos..... | 81 |
| 4.5.3 | Fitoplancton..... | 81 |
| 4.5.4 | Fauna íctica..... | 88 |
| 4.6 | Proponer parámetros y límites de calidad acordes a la zona estuarina, en las normas de calidad secundaria de aguas de la cuenca Rapel..... | 91 |
| 4.6.1 | <i>Relación de la biota acuática con los parámetros físico químicos de calidad del agua.....</i> | <i>91</i> |
| 4.7 | <i>Estado de Norma de calidad de Agua en Estuarios de Chile.....</i> | <i>94</i> |
| 5 | DISCUSIÓN..... | 98 |
| 6 | CONCLUSIONES..... | 103 |
| 7 | REFERENCIAS..... | 105 |
| 8 | ANEXO 1 FOTOGRAFICO..... | 109 |
| 8.1 | Puntos de muestreo..... | 109 |
| 8.2 | Fotografías Ictiofauna..... | 110 |
| 9 | ANEXO 2 PERMISO DE PESCA..... | 111 |
| 10 | ANEXO 3 BASE DE DATOS CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE AGUA Y SEDIMENTOS..... | 112 |
| 11 | ANEXO 4 PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA CONTENIDOS EN EL ANTEPROYECTO DEL RÍO RAPEL Y PARÁMETROS SUGERIDOS EN ESTE ESTUDIO (*)..... | 113 |
| 12 | ANEXO 5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 114 |
| 13 | ANEXO 6 CERTIFICADOS DE LOBORATORIO..... | 116 |

1 INTRODUCCIÓN

Los humedales costeros se caracterizan por presentar una vinculación muy estrecha con el mar, pudiendo estar conectados en forma permanente (ej. estuarios) y/o temporal (ej. lagunas costeras saladas) (Mitsch & Gosselink, 2007). En cualquier caso son sistemas muy dinámicos espacial y estacionalmente, en función del balance hídrico y de sales, regulado por los caudales de los ríos y el mar. Una de sus características más importantes es la presencia de gradientes, que permiten una elevada heterogeneidad dada por la disponibilidad de hábitats para especies costeras y continentales que interactúan sin límites rígidos. Esta condición se traduce en que los humedales costeros son sitios de alta concentración de biodiversidad, siendo particularmente relevante la presencia de numerosas especies de aves migratorias (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Adicionalmente, presentan servicios ecosistémicos, definidos como beneficios que apuntan al bien estar económico y social de las personas que interactúan con el ecosistema mediante actividades que se desarrollan de manera directa e indirecta en torno Humedal (TEEB, 2014). Estos servicios incluyen la *provisión* (alimentos y agua), *regulación* (como control de inundaciones, sequías, degradación de tierras y enfermedades), *soporte* (como formación de suelos y ciclos de nutrientes) y servicios *culturales* (como recreación, espirituales o religiosos, así como, otros beneficios no materiales) (Secretaría Convención RAMSAR, 2006).

Frente a las innumerables presiones que reciben actualmente los humedales costeros, es de urgencia proteger aquellos sistemas que se encuentran aún en un buen estado ecológico. Porque si bien, su conservación es esencial para la sobrevivencia de numerosas especies, también ofrecen variados beneficios para la comunidad humana que vive asociada a ellos (Bolund & Hunhammar, 1999). En este sentido, el humedal costero estuario “La Boca de Rapel” es un ecosistema insuficientemente estudiado respecto a las actuales presiones antrópicas que recibe y los posibles impactos que puede causar sobre el ecosistema. Entre ellas, la más representativa es la alteración hídrica causada por los pulsos de agua liberados por la central hidroeléctrica de embalse Rapel.

Por ello, el presente estudio, desarrollado bajo la solicitud del Ministerio de Medio Ambiente, tiene como objetivo avanzar en el levantamiento de información holística del sistema acuático, bajo las componentes ecológicas, físicas y químicas más relevantes (comportamiento hidrológico, biota acuática y calidad de agua y sedimentos), lo que permitirá establecer el estado actual del ecosistema para poder avanzar en su protección y lineamientos para la elaboración de la Norma de Calidad Secundaria de aguas de la cuenca Rapel. El presente documento presenta los principales resultados obtenidos entre julio-diciembre de 2016 en el área de estudio.

1.1 Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Rapel es una cuenca de relevancia en el valle central de Chile. Se extiende sobre un área de 13.695 km², de los que el 46,5% corresponde a la subcuenca Cachapoal, el 34,5% a la subcuenca Tinguiririca, el 7,2% a la subcuenca de Alhué y el 11,7% corresponde a la zona de drenaje del embalse y la desembocadura del río Rapel. El río Cachapoal, su principal afluente, nace de los pies del cerro Los Piuquenes a 4.460 metros de altura, alimentado por el deshielo de diversos ventisqueros. Por otra parte, el río Tinguiririca nace de la confluencia de los ríos Las Damas y Azufre. El recorrido promedio de ambos cursos es de 170 km hacia la confluencia, para unirse hasta la desembocadura en un recorrido de 60 km. El agua es represada en el embalse Rapel, el cual cuenta con una capacidad de 695 millones de m³, continuando su recorrido hasta la desembocadura al mar en el sector La boca, comuna de Navidad.

En el alto Cachapoal el régimen es nivo-pluvial, mientras que el río Tinguiririca tiene una componente nival notoriamente menor. Aguas abajo, los afluentes evidencian un régimen pluvio-nival, siendo los mayores caudales medios asociados a los deshielos previos al período estival. El caudal medio anual del río Cachapoal fluctúa alrededor de los 70,6 m³/s en su nacimiento, mientras que el río Tinguiririca, en los 48,9 m³/s. En el sistema fluvial de la cuenca, en sus cursos y tributarios principales, se distinguen las zonas ecológicas rítrón, transición, potamón, y estuario, que son determinados para reconocer y comprender los factores que inciden en la calidad del agua y en la distribución de la biota acuática.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar la zona de desembocadura de la cuenca (indicada en la **Figura 1-1**), en donde la incidencia de mareas modula la dinámica del medio. Dicha caracterización requiere de una óptima delimitación y reconocimiento del estuario, permitiendo identificar las comunidades acuáticas presentes. Todo lo anterior en el contexto de la generación de información relevante para futuras revisiones de la norma de calidad ambiental secundaria para la cuenca Rapel.

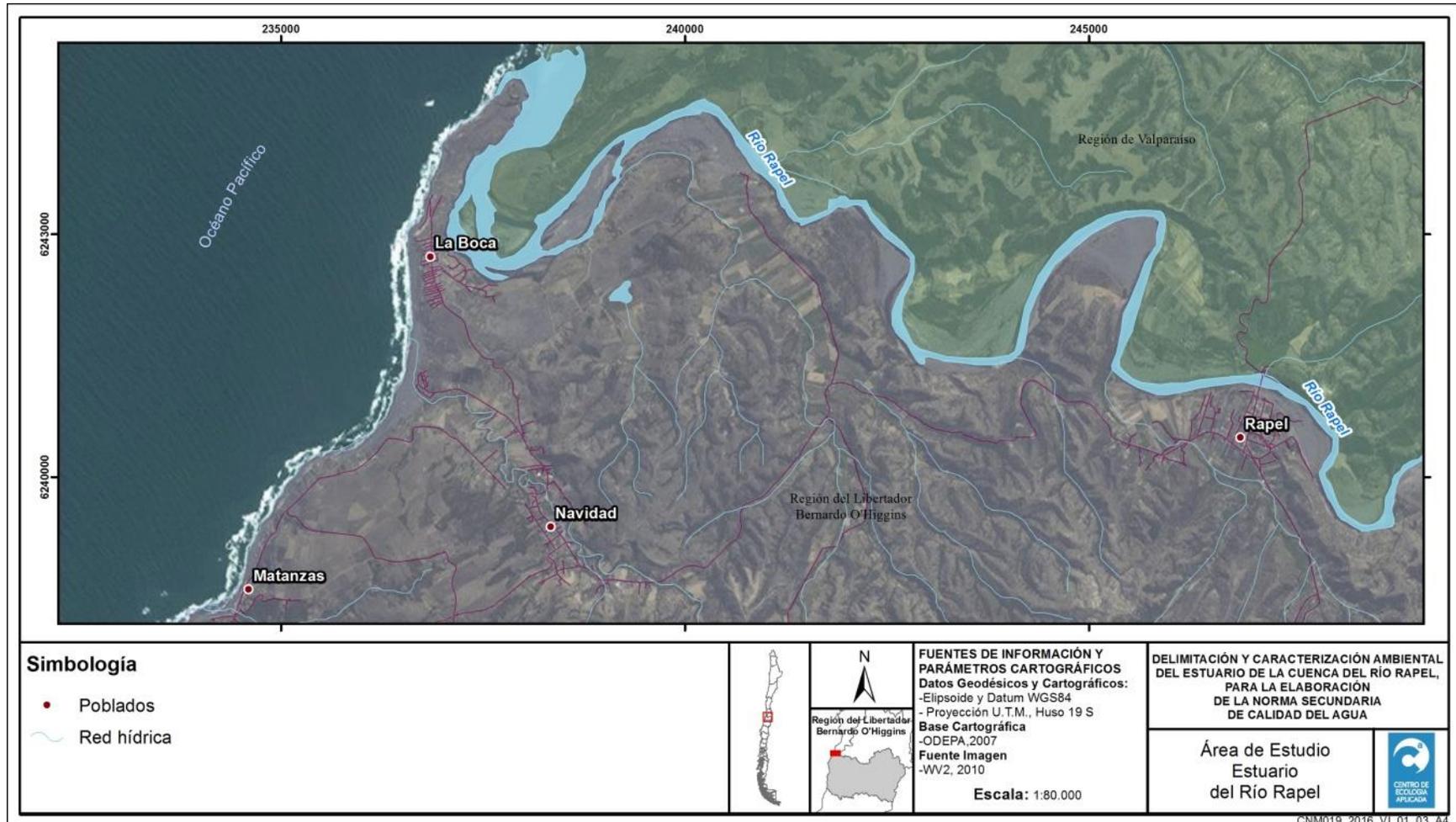


Figura 1-1. Área de estudio.

2 OBJETIVOS

Los objetivos del estudio se entregan a continuación.

2.1 Objetivo General

Caracterizar y delimitar el estuario de la cuenca hidrográfica de Rapel definiendo una línea de base ambiental.

2.2 Objetivos Específicos

El estudio contiene los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar la hidrodinámica del estuario de “La Boca de Rapel”, en función de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, de marea y afluentes fluviales.
2. Determinar la extensión del estuario de la cuenca Rapel, en función del alcance de la onda de marea.
3. Identificar el grado de estratificación del estuario considerando la dinámica temporal de las variables forzantes.
4. Establecer una línea de base de calidad física química del agua y sedimentos del estuario, incluyendo las condiciones de borde desde la zona fluvial y del sistema costero.
5. Establecer una línea de base biológica de las comunidades acuáticas del estuario.
6. Proponer parámetros y límites de calidad acordes a la zona estuarina, en las normas de calidad secundaria de aguas de la cuenca Rapel.

3 METODOLOGÍA

El estudio busca poder caracterizar al estuario, tanto en su forma y alcance como en términos de las características de las diferentes partes que los componen. Así, primeramente se entregan metodologías asociadas a la caracterización física del sistema, dada por la definición de la extensión del sistema completo, como también por la determinación de los tramos (compartimentos), según los procesos hidrodinámicos que los caracterizan. Una vez determinadas las características físicas e hidrodinámicas del sistema, se realizará una caracterización química y biológica del mismo en toda su extensión, permitiendo generar una línea base para los diferentes compartimentos de acuerdo a lo obtenido en las campañas de terreno (**Tabla 3.1**).

Tabla 3.1: Meses de muestreo de los diferentes componentes evaluados en Humedal costero estuario “La Boca de Rapel”

| Componente medido/mes | 2016 | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| | julio | agosto | septiembre | octubre | noviembre | diciembre |
| Fitoplancton | | | | x | | |
| Macrozoobentos | | | | x | | x |
| Peces | | | | x | | x |
| Calidad de agua | | | | x | | |
| Sedimentos | | | | x | | |
| Estimación mareas y caudal | x | | x | x | | |
| Escenarios hidrodinámicos | x | | x | x | | |

En el contexto de la caracterización física e hidrodinámica del sistema, se debe señalar que se realizaron 2 enfoques en el análisis. El primero de ellos busca determinar el alcance de la zona de estuario, la cual está forzada principalmente por la relación existente entre la marea local, la morfología del sistema y los caudales del río. El segundo, corresponde a la segmentación del estuario, determinando la zona de desarrollo de los 3 compartimentos que lo componen, los que están definidos principalmente por la capacidad de dilución, y que corresponden a la zona de cuña salina, zona de mezcla parcial y zona sin intrusión (DGA, 2009). Así, se presentarán metodologías para alcanzar ambos resultados.

Tras las metodologías para la determinación del alcance del estuario, se entregarán las asociadas a la caracterización tanto de la química como de la biología del sistema. Cabe señalar que dado que, tanto el alcance del estuario como las zonas que lo componen, son determinadas durante el desarrollo del estudio, el diseño del levantamiento de información para estas dos componentes fue definido en forma previa y en base al conocimiento de la zona y a criterio experto. Es por ello que se podrán tener puntos y zonas de monitoreo de química y biología que tengan estrecha relación con los compartimentos del estuario, presentándose en zonas de cambio y de traslape dinámico entre dos compartimentos.

A continuación, en la sección 3.1 se realiza la caracterización propia de la hidrodinámica, con lo cual será posible definir la extensión del estuario, mediante los métodos explicados en la sección 3.2. Posteriormente, en la sección 3.3 se realiza la segmentación del estuario en las diferentes zonas según estratificación, como fue antes explicado. Finalmente, en las secciones 3.4 y 3.5 se entregan una caracterización química y biológica a lo largo del estuario.

3.1 Caracterizar la hidrodinámica del estuario de “La Boca de Rapel”, en función de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, de marea y afluentes fluviales.

Para caracterizar la hidrodinámica del estuario, la cual permitirá realizar la estimación de la extensión del estuario, se requirió conocer el comportamiento de las dos forzantes principales del sistema: las mareas y caudales que circulan en el río. Caracterizados ambos forzantes del estuario, fue posible estimar la extensión del estuario en función de algunos de los procesos que ocurren en su interior, como por ejemplo, el alcance de la onda de marea o de una cuña salina (si ella existiese).

3.1.1 Estimación de mareas y caudales.

Las mareas fueron estimadas a partir de las tablas de marea del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), y fueron comparadas con las mediciones de los sensores de presión ubicados en el estuario. A partir de las tablas de marea, se pueden conocer las fechas de máxima y mínima marea, asociadas a las sicigias en pleamar y bajamar, respectivamente.

Además, se recopiló información sobre la variabilidad del caudal del río. El caudal del río Rapel está regulado por la operación del embalse Rapel, por lo tanto está relacionado con la potencia generada por el embalse. A través de la generación real horaria de la central, publicada en el CDEC SIC (Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central), se generó una aproximación de la operación del embalse para así poder estimar el régimen de caudales que llegan al estuario.

3.1.2 Escenarios hidrodinámicos.

Se estableció una matriz de escenarios hidrodinámicos, en base a las combinaciones posibles de existir entre marea y caudal del río, la cual contiene todos los casos posibles, y da cuenta de los 2 casos extremos opuestos correspondientes a las situaciones límite del sistema. El primer límite corresponde a una fuerte forzante de marea y baja forzante de caudal (bajo o nulo caudal), en donde la máxima marea está dada por una condición de pleamar de sicigia. El segundo escenario límite corresponde a una baja forzante de marea y una alta forzante de caudal (máximo caudal de operación), que en términos de la marea está representada por una condición de bajamar de sicigia.

3.2 Determinar la extensión del estuario de la cuenca Rapel, en función del alcance de la onda de marea.

En la literatura es posible identificar tres criterios principales para definir la extensión de un estuario (DGA, 2009), los que dependen del alcance de la onda de marea, de la intrusión salina o de los sedimentos marinos, respectivamente. Para el presente estudio se consideró la extensión del estuario en función del alcance de la onda de marea.

Para evaluar el criterio de alcance del estuario según la onda de marea, se utilizaron sensores de presión en el estuario. Adicionalmente, utilizando la información provista por un Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona de estudio, se definió una pendiente

media de la zona, con lo que se identificó de forma preliminar, el alcance de la marea a partir de la batimetría y el nivel de la máxima marea, correspondiente al nivel de pleamar de sicigia. A continuación se describen los 2 métodos mencionados.

3.2.1 Uso de sensores de presión.

La onda de marea fue registrada mediante la instalación de sensores de presión en el estuario (ver **Figura 3-1**). Durante el día miércoles 27 de julio de 2016 se instalaron dos sensores en el área de estudio, la cual corresponde a la zona que de forma preliminar se estimó podría corresponder al estuario. Adicionalmente, se instaló un sensor para medir presión atmosférica local, y con ello poder determinar la columna de agua registrada por cada sensor. En la **Tabla 3.2** se indican los parámetros que miden los sensores instalados y sus coordenadas de instalación. En la **Figura 3-2**, **Figura 3-3** y **Figura 3-4** se presenta la ubicación y el detalle de la instalación de los 2 sensores ubicados a lo largo del estuario.



Figura 3-1. Sensor de presión.

Tabla 3.2 Coordenadas de sensores en río Rapel.

| Sensor | Parámetros del sensor | UTM Este (m) WGS84 19H | UTM Norte (m) WGS84 19H | Observaciones |
|--------|---|------------------------|-------------------------|---|
| R-1 | Presión atmosférica | 238429 | 6239431 | Ubicado en Municipalidad de Navidad. |
| R-2 | Presión, temperatura, conductividad Eléctrica | 240007 | 6244579 | Ubicación aproximada a 6 km desde desembocadura. Instalado a 4 m de profundidad. |
| R-3 | Presión, temperatura, conductividad Eléctrica | 243817 | 6241382 | Ubicación aproximada a 12 km desde desembocadura. Instalado a 5 m de profundidad. |

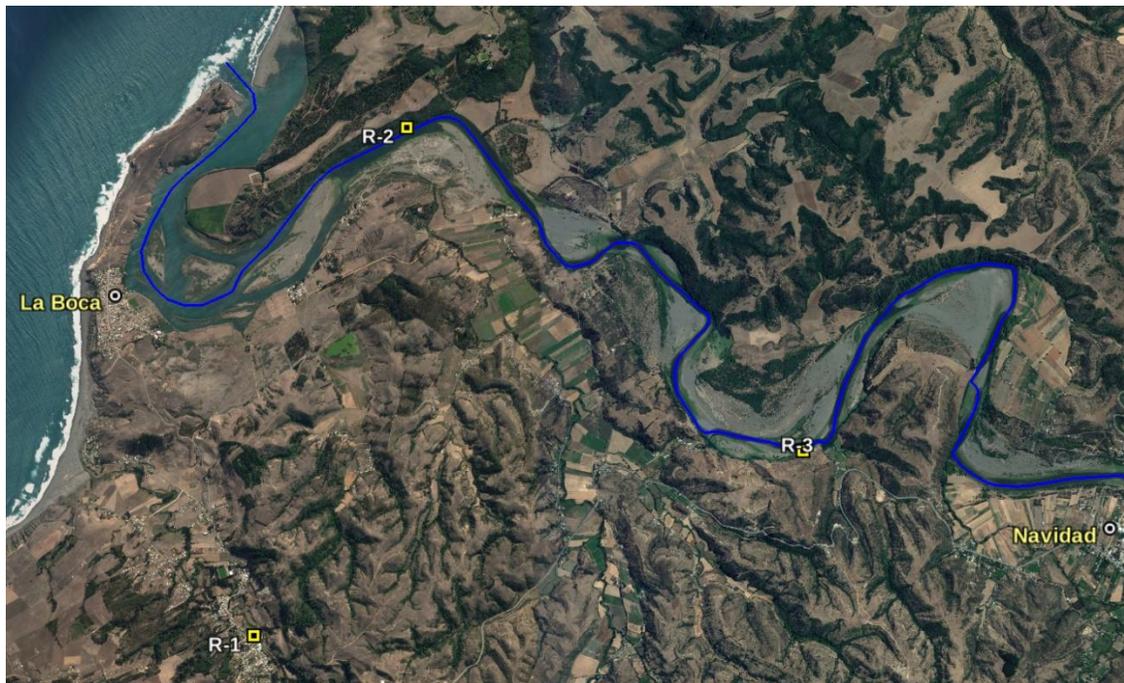


Figura 3-2 Vista general con la ubicación aproximada de los sensores instalados.



Figura 3-3 Anclaje y ubicación de sensor R-2.



Figura 3-4 Anclaje y ubicación de sensor R-3.

A partir de los datos registrados por los sensores de presión, se determinó la distancia aproximada a la cual se deja de percibir el efecto de la marea, y por lo tanto, el punto o zona donde se considera estuario.

Durante el terreno realizado el 22 de septiembre del 2016 se rescató la información disponible en los sensores de presión instalados, para luego volver a instalarlos para su retiro definitivo durante el terreno realizado el día 28 de septiembre de 2016. Cabe señalar que no fue posible contar con toda la información de los sensores descritos, debido a que 2 sensores no fueron encontrados durante los retiros (el sensor en R-3 en la campaña del 22 de septiembre y el sensor en R-2 durante la campaña del 28 de septiembre), aun cuando se realizó un extenso barrido del área, por lo que se asumió que ellos fueron extraídos por terceros previo al desarrollo del terreno. A pesar de esta situación, se cuenta con información disponible de R-1, R-2 y R-3. Los sensores ubicados en R-1 y R-2 cuentan con información entre el 27 de julio hasta el 22 de septiembre de 2016, mientras que el sensor R-3 cuenta con datos sólo en la semana entre el 22 y 28 de septiembre de 2016.

3.2.2 Método de la cota de máxima marea

Para la planificación de la medición de batimetría y perfiles CTD en terreno, se realizó previamente un estudio del alcance del estuario, para definir la zona en la que se realizarían las mediciones. Para esto se tomó en cuenta la información proporcionada por los sensores de presión instalados, y una aproximación de la batimetría generada a través de un DEM del área de estudio, con lo que se estimó una pendiente media.

Posteriormente, la batimetría del estuario del río Rapel fue levantada utilizando una ecosonda GPSMap 420s marca Garmin (ver **Figura 3-5**). Para ello se realizó un completo barrido de la zona de interés, ejecutando levantamientos en secciones transversales a lo largo del estuario. Para el análisis morfométrico y batimétrico, los datos levantados en terreno (perfiles batimétricos) fueron procesados mediante el uso del programa SURFER (v.6.04) y del programa ArcGIS, con lo que se obtuvo una interpolación de los puntos, y fue posible generar un sistema de isobatas.



Figura 3-5. Ecosonda Garmin.

A partir de la información obtenida del DEM y de la batimetría medida en terreno, se aplicó el método de la cota de máxima marea. Para esto, fue necesario identificar la máxima marea, es decir, la marea en la condición de pleamar de sicigia, debido a que corresponde al máximo alcance de la onda de marea.

El máximo alcance de la onda de marea quedó definido por el punto en el que la cota de terreno fue similar a la cota del nivel del mar. Por lo tanto, este punto se pudo identificar trazando una línea recta desde el nivel máximo de marea hasta que interceptó la cota de fondo del río (DGA, 2009), como se aprecia en el ejemplo de la **Figura 3-6**.

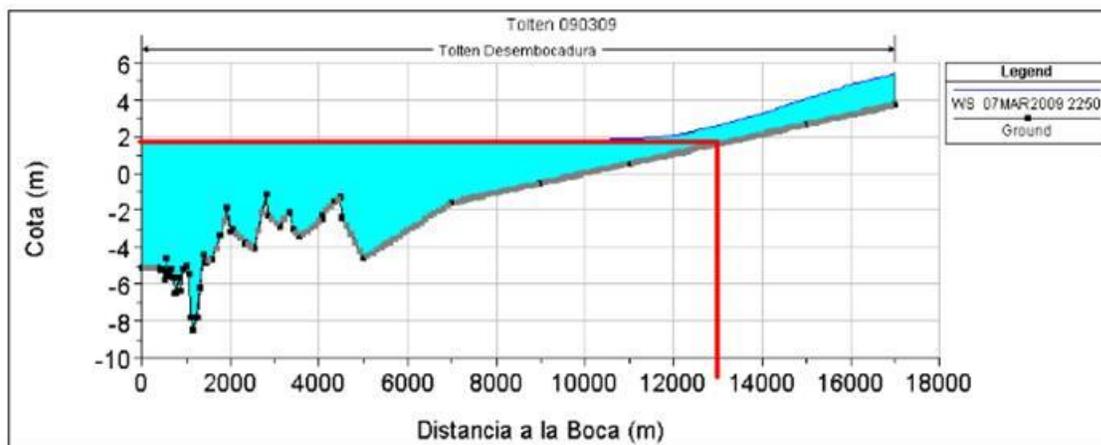


Figura 3-6. Ejemplo de determinación de la extensión de un estuario (DGA, 2009).

3.3 Identificar el grado de estratificación del estuario considerando la dinámica temporal de las variables forzantes.

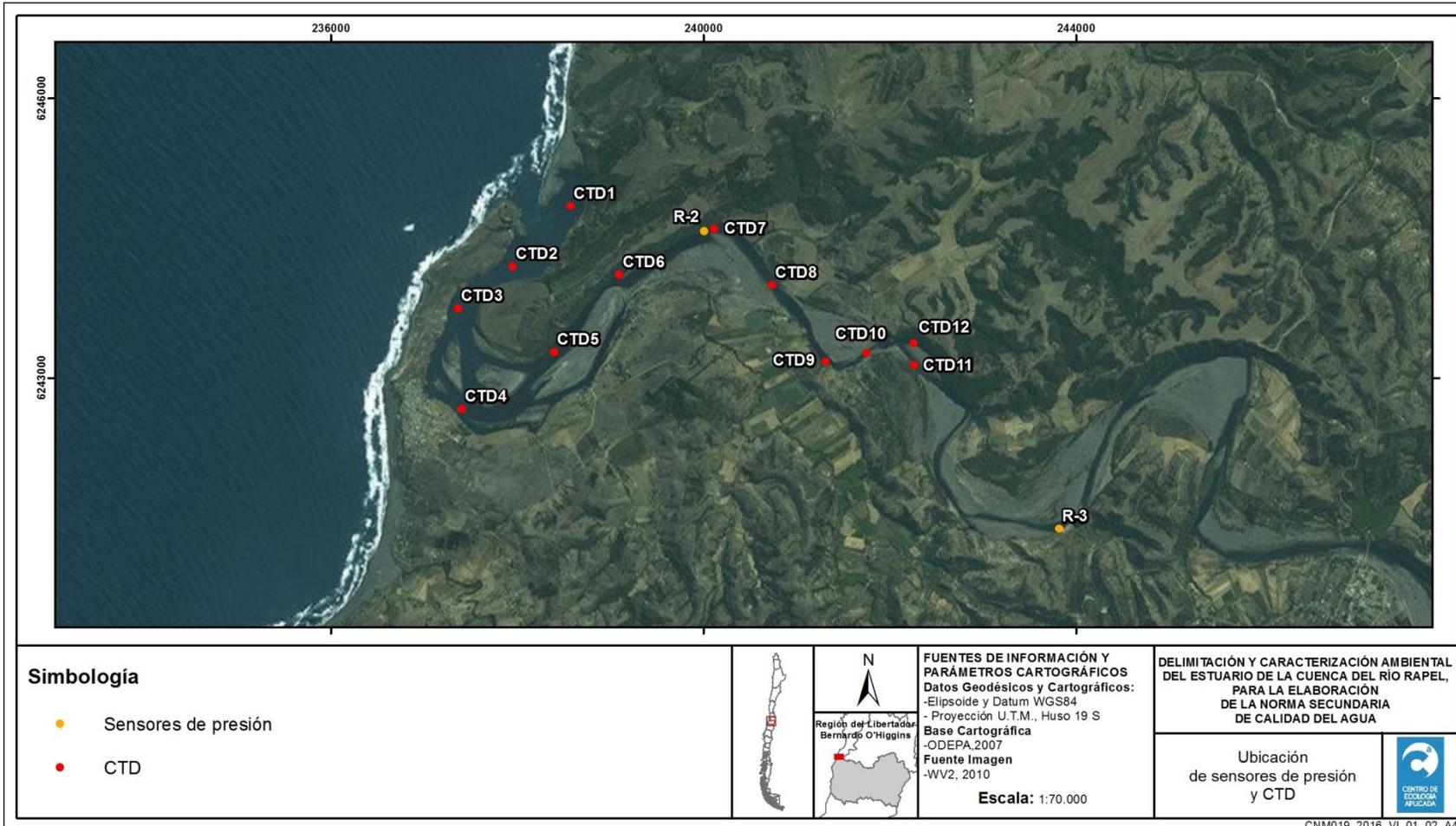
A partir de los escenarios determinados de la caracterización hidrodinámica, en particular de las fechas de ocurrencia de la pleamar y bajamar de sicigia, se establecieron las fechas para el desarrollo de la campaña hidrodinámica, que tiene como objetivo identificar el grado de estratificación del estuario.

3.3.1 Perfiles de salinidad en el estuario

Las campañas hidrodinámicas consistieron en mediciones de perfiles transversales de salinidad utilizando un sensor de conductividad CTD Idronaut 304 (ver **Figura 3-7**). Las mediciones se realizaron a distintas profundidades y distancias desde la orilla. Los puntos fueron definidos a partir de los resultados de la extensión del estuario, realizando un total de 12 puntos, los cuales se indican en la **Figura 3-8**. Una vez obtenida la batimetría y los perfiles CTD, se realizaron los análisis correspondientes para evaluar la intrusión salina en el estuario.



Figura 3-7. CTD Idronaut 304.



CNM019_2016_VI_01_02_A4

Figura 3-8. Mapa de ubicación de perfiles CTD realizados y de ubicación de sensores de presión.

3.3.2 Definición de zonas del estuario

Un estuario se puede subdividir en 3 zonas en función de su capacidad de dilución, correspondientes a: zona de cuña salina, zona de mezcla parcial y zona sin intrusión (DGA, 2009, Niño & Tamburrino, 2004), como se indica en la **Figura 3-9**. Es importante aclarar que, dependiendo de la morfología del cauce, el caudal afluente y el nivel del mar, el estuario puede presentar distintos grados de mezcla, pudiendo presentarse o no, una zona de cuña salina.

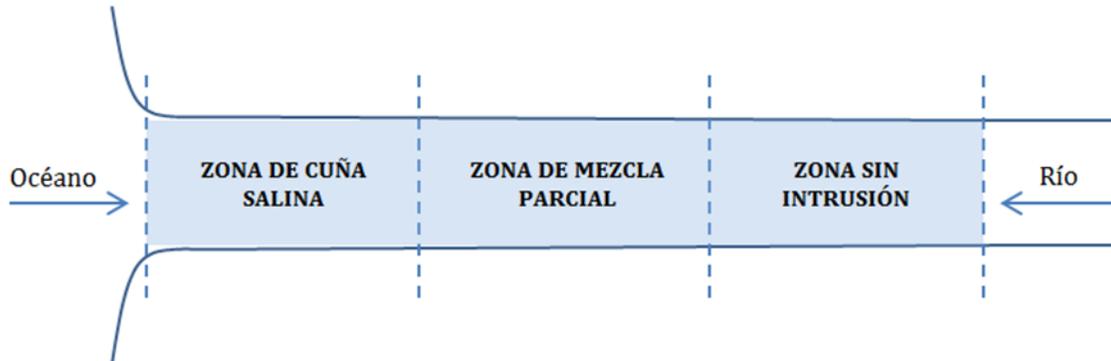


Figura 3-9. Esquema de la subdivisión del estuario. En base a DGA (2009).

Debido a que se encontró presencia de estratificación fuerte en la primera zona del estuario, para obtener el límite de la zona de cuña salina se consideró la metodología para el estudio de la longitud y forma de la cuña salina propuesta por Arita & Jirka (1987), en la cual se considera además el intercambio de caudal y masa a lo largo de la interfaz de la cuña. Sin embargo, Arita & Jirka (1987) lo incorporan al definir como límite de integración de las ecuaciones, la interfaz de velocidades en vez de la interfaz de densidad.

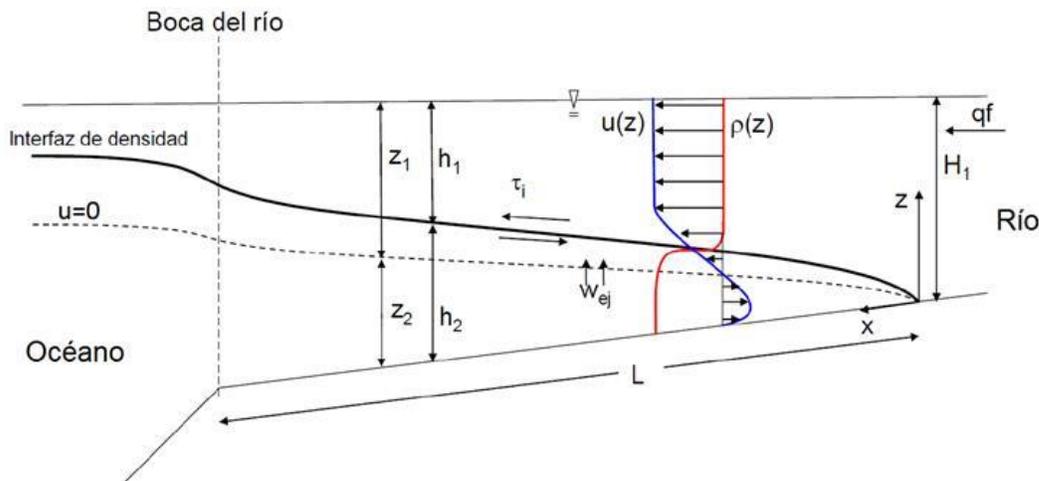


Figura 3-10 Geometría cuña salina y estructura interna. Fuente: Arita & Jirka (1987b).

Como se puede ver en la **Figura 3-10**, en azul se muestra el perfil de velocidad $u(z)$ y en rojo el perfil de densidad $\rho(z)$. También se aprecia que se considera fondo plano con una cierta pendiente. El sistema de ecuaciones que describe la cuña es el siguiente:

$$\frac{dh_r}{dx_r} = \frac{-Fr^2}{\Delta^*} \left[\frac{\lambda_i(1+Sx_r)}{h_r^3(1+Sx_r-h_r)} + \frac{q_r^2(\lambda_b+S\beta_2)}{(1+Sx_r-h_r)^3} \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{dq_r}{dx_r} = \frac{\alpha_j}{h_r} \quad (3.2)$$

Este sistema se debe resolver acopladamente, donde la primera ecuación tiene que ver con la forma de la cuña y la segunda con el intercambio de caudal entre estratos. Se utilizan las siguientes variables adimensionales:

$$h_r = \frac{h_1}{H_1}; x_r = \frac{x}{H_1}; q_r = \frac{q_s}{q_f}; Fr^2 = \frac{q_f^2}{g'H_1^3} \quad (3.3)$$

donde x corresponde al eje longitudinal, h_1 es la profundidad del estrato superior, h_2 la profundidad del estrato inferior y H_1 la profundidad total. Además $\beta_2 \cong 6,2$ es un factor de no uniformidad, el coeficiente de fricción interfacial se define como $\lambda_i = 2\alpha_j$, S corresponde a la pendiente de fondo, q_f y q_s los caudales de agua dulce y salada respectivamente, ρ_f y ρ_s las densidades del agua dulce y salada respectivamente, y la gravedad reducida se define como $g' = g \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$. El coeficiente de fricción de fondo (λ_b) se calcula según:

$$\lambda_b = \begin{cases} \frac{2}{R_2}, & R_2 < 500 \\ \frac{0,03}{R_2}, & R_2 > 500 \end{cases} \quad (3.4)$$

donde $R_1 = \frac{q_f(H_1 - 0,6h_2)}{h_1 v}$ y $R_2 = R_1 \frac{q_s}{q_f}$ corresponden al número de Reynolds en el estrato superior e inferior respectivamente. Además se define el determinante λ^* como:

$$\Delta^* = 1 - \frac{Fr^2}{h_r^3} \left[1 + \beta_2 q_r^2 \left(\frac{h_r}{1+Sx_r-h_r} \right)^3 \right] \quad (3.5)$$

Y α_j es un coeficiente de incorporación de caudal, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\alpha_j = 0,038 \left(1 - \frac{Ri_1}{\sqrt{Ri_1^2 + Ri_*^2}} \right) + \frac{2}{R_1} \left(\frac{z_1}{\delta_u} \right) \quad (3.6)$$

con

$$\frac{\delta_u}{z_1} = \begin{cases} 1, & R_1 < 500 \\ \left(\frac{500}{R_1} \right)^{1/2} + \frac{Ri_*}{\sqrt{Ri_1^2 + Ri_*^2}} \left[1 - \left(\frac{500}{R_1} \right)^{1/2} \right], & R_1 > 500 \end{cases} \quad (3.8)$$

donde $Ri_1 = \frac{g'z_1}{u_1^2}$ es el número de Richardson en la capa superior y $Ri_* = 1/4$ el número de Richardson crítico de gradiente de corte interfacial. Las condiciones de borde que determinan el sistema son:

$$\begin{aligned} h_r &= 1 \text{ en } x_r = 0 \\ q_r &= 0 \text{ en } x_r = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Cabe señalar que esta metodología se basa en el supuesto que el estuario posee fondo plano con cierta pendiente, lo cual no representa fielmente a la zona en estudio. Sino más bien, se adopta una pendiente media de fondo, basada en la información de la batimetría (topografía) del estuario, para tener una mejor aproximación.

Para realizar el cálculo de la longitud de la cuña salina, se consideró que la marea media se ubica a 3 m sobre la batimetría en la zona final del estuario de desembocadura al medio marino y que el estuario posee un ancho medio de 100 m. En la **Tabla 3.3** se indica el detalle de todos los parámetros utilizados para resolver la ecuación teórica propuesta por Arita & Jirka (1987).

Tabla 3.3 Parámetros y valores adoptados para el análisis de la cuña salina

| Parámetro | Valor o Rango | Unidad | Descripción |
|-------------|-------------------------------|---------------------|---|
| z_{base} | 3 | [m] | Profundidad media del estuario, sin marea |
| H_{marea} | $-1 \leq H_{marea} \leq 1,25$ | [m] | Nivel de marea |
| H_1 | $z_{base} + H_{marea}$ | [m] | Profundidad media del estuario, con marea |
| W | 100 | [m] | Ancho medio del estuario |
| Q_f | $2 \leq Q_f \leq 500$ | [m ³ /s] | Caudal del río |
| q_f | $0,02 \leq q_f \leq 5$ | [m ² /s] | Caudal del río por unidad de ancho |

| Parámetro | Valor o Rango | Unidad | Descripción |
|-----------|---------------|----------------------|---------------------------|
| ν | 10^{-6} | [m ² /s] | Viscosidad cinemática |
| ρ_f | 1000 | [kg/m ³] | Densidad agua dulce |
| ρ_s | 1020 | [kg/m ³] | Densidad agua de mar |
| S | 0,078 | [%] | Pendiente media del fondo |

Para definir la zona de mezcla parcial, se debe considerar que ésta se caracteriza por tener una estratificación considerablemente menor a la observada en la zona de cuña salina. Por otro lado, la zona sin intrusión, tal como lo indica su nombre, corresponde a la zona que presenta agua dulce sin presencia de salinidad. Por lo tanto, a partir de las mediciones realizadas de conductividad en el estuario, y de la posterior interpretación de los resultados, fue posible definir las diferentes zonas del estuario.

3.4 Establecer una línea de base de calidad física química del agua y sedimentos del estuario, incluyendo las condiciones de borde desde la zona fluvial y del sistema costero.

El diseño de muestreo consideró la ubicación de 6 puntos de muestreo correspondientes a la biota acuática, calidad físico química del agua y sedimentos del estuario. Las coordenadas y descripción de los puntos de muestreo fueron determinados según la zonificación del estuario; zona de cuña salina, zona de mezcla parcial y zona sin Intrusión. Además se consideró un punto en el río Rapel aguas arriba del estuario como condición de borde.

La ubicación relativa de dichos puntos en el área de estudio se presenta en la **Tabla 3.4** y **Figura 3-11**.

Tabla 3.4 Puntos de muestreo de biota acuática, calidad de agua y sedimentos.

| Punto de muestreo | Descripción del punto | UTM - wgs84 - zona 19h | |
|-------------------|---|------------------------|--------|
| | | Norte | Este |
| ER-1 | Río Rapel , aguas arriba de la zona estuarina | 6243115 | 242260 |
| ER-2 | Río Rapel, zona estuarina sin intrusión | 6244246 | 240643 |
| ER-3 | Río Rapel, zona estuarina sin intrusión | 6243926 | 238947 |
| ER-4 | Río Rapel, zona estuarina con mezcla parcial | 6242630 | 238065 |
| ER-5 | Río Rapel, zona estuarina con cuña salina | 6243122 | 237208 |
| ER-6 | Río Rapel, zona estuarina con cuña salina | 6244535 | 238535 |

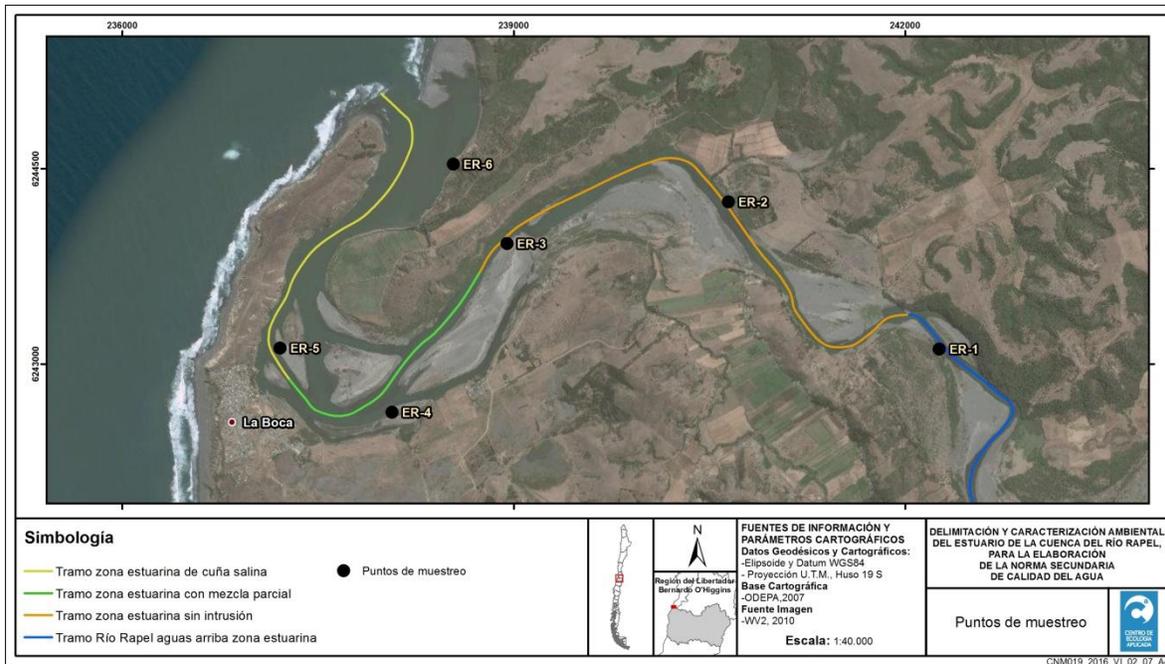


Figura 3-11. Ubicación de los puntos de muestreo.

3.4.1 Toma de muestras de agua y sedimentos

La toma de muestras de agua superficial y sedimentos, la preservación y transporte de las mismas, se realizó de acuerdo al procedimiento general de muestreo PGL-13 del Laboratorio CEA “Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras”, el cual está basado en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition, 2005 y las normas chilenas NCh411/1.Of96, NCh411/2.Of96, NCh411/3.Of96, NCh411/4.Of97 y NCh411/6.Of98.

La colecta de sedimento se efectuó mediante un Core, de modo de no introducir contaminación por elementos traza y muestrear siempre el mismo estrato o mediante una draga de acero inoxidable, dependiendo de la profundidad máxima de cada estación. En cada estación se tomó una muestra de aproximadamente 500 gramos, las cuales se almacenaron en bolsas de polietileno selladas con cierre hermético, refrigeradas a una temperatura constante de 4°C y posteriormente transportadas al laboratorio.

3.4.2 Análisis de la columna de agua y sedimentos

Los análisis de los diferentes parámetros de calidad de agua y sedimentos se realizaron principalmente en el Laboratorio CEA Ltda., acreditado por el INN mediante certificado LE 677. Los parámetros que no están acreditados, fueron analizados en laboratorios acreditados por el INN de acuerdo a lo especificado en la **Tabla 3.5**. Los certificados de acreditación de los laboratorios son: SGS LE 117, Hidrolab LE 215.

Tabla 3.5. Metodologías y laboratorios de análisis de los parámetros de calidad de agua.

| Matriz | Parámetro | Metodología | Unidad | Laboratorio |
|--------|--------------------------------|---|--------|-------------|
| Agua | Aluminio disuelto | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Aluminio total | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. Digestión según EPA 3015A Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. | mg/L | CEA |
| | Arsénico disuelto | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Arsénico total | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. Digestión según EPA 3015A Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. | mg/L | CEA |
| | Calcio disuelto | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Carbonato | Standard Methods for the Examination of Water of Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 2320 B. | mg/L | CEA |
| | Clorofila a | Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 10200 H. | µg/L | CEA |
| | Conductividad eléctrica (25°C) | PTL-24, Procedimiento de Determinación de Conductividad - Salinidad, basado en el Manual de Equipo Multiparamétrico P4 y Multi 340i y según Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 2520 B. | mS/cm | CEA |
| | Cromo disuelto | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Cromo total | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. Digestión según EPA 3015A Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. | mg/L | CEA |
| | DBO5 | SM-5210 B(2) | mg/L | Hidrolab |
| | DQO | SM-5220 D(2) | mg/L | Hidrolab |
| | Fósforo total | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 4500-P B y E. | µg/L | CEA |
| | Magnesio disuelto | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Mercurio | SM-3112 B(2) | mg/L | Hidrolab |
| | Mercurio disuelto | SM-3112 B(2) | mg/L | Hidrolab |
| | Nitrógeno total | SM-450NA(7) | mg/L | Hidrolab |
| | Oxígeno disuelto | PTL-23 Procedimiento de Determinación de Oxígeno Disuelto y Porcentaje de Saturación, basado en el Manual de Equipo Multiparamétrico P4 y Multi 340i y según Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 4500-O G. | mg/L | CEA |
| | pH | PTL-22 Procedimiento de Determinación de pH basado en el Manual de Equipo Multiparamétrico P4 y Multi 340i y según Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 4500-H+B. | - | CEA |

| Matriz | Parámetro | Metodología | Unidad | Laboratorio |
|--------|-----------------------------|---|--------|-------------|
| | Potasio disuelto | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Potencial redox (Eh) | Nordstrom and F.D. Wilde, 2005, Reduction Oxidation Potential (Electrode Method): U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. A6., sec. 6.5, September 2005. http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/Chapter6/6.5_v_1.2.pdf | mV | CEA |
| | Salinidad | PTL-24, Procedimiento de Determinación de Conductividad - Salinidad, basado en el Manual de Equipo Multiparamétrico P4 y Multi 340i y según Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 2520 B. | g/L | CEA |
| | Sodio disuelto | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Sólidos totales suspendidos | Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 2540 D. | mg/L | CEA |
| | Sulfato | PTL-3 Procedimiento de Determinación de Sulfatos. Método validado, basado en Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 4500-SO4-2 E. | mg/L | CEA |
| | Temperatura | PTL-26 Procedimiento de Determinación de Temperatura, basado en el Manual de Equipo Multiparamétrico P4 y Multi 340i y según Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 2550 B. | ° C | CEA |
| | Cobre total | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Hierro total | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Plomo total | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Zinc total | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Cadmio total | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |

| Matriz | Parámetro | Metodología | Unidad | Laboratorio |
|-------------|-----------------------------------|---|--------|-------------|
| | Cadmio disuelto | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Cobre disuelto | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Hierro disuelto | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Plomo disuelto | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| | Zinc disuelto | PTL-02 Determinación de elementos trazas pre concentradas en resinas catiónicas por ICP-OES basado en Matrix separation y trace-element preconcentration by ICP-MS y Según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 3120 B. | mg/L | CEA |
| Sedimentos | Aluminio total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA |
| | Arsénico total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA |
| | Cromo total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA |
| | Fósforo total | EPA_SW-846. Método 3051A y 6010B. | mg/kg | CEA |
| | Mercurio | I-ENV-LAB-110 Basado en EPA 7471 AB | mg/kg | SGS |
| | Nitrógeno total | PTL-9, determinación de nitrógeno en amonio, basado en Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22nd Edition, 2012, Método 4500-NH3 F. Previa digestión. | mg/kg | CEA |
| | Potencial redox (Eh) | Nordstrom and F.D. Wilde, 2005, Reduction Oxidation Potential (Electrode Method): U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. A6., sec. 6.5, September 2005. http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/Chapter6/6.5_v_1.2.pdf . | mV | CEA |
| | Temperatura | Determinación de Temperatura en extracto acuoso, basado en el Manual de Equipo Multiparamétrico P4 y Multi 340i y según Standard Methods for the Examination of Water of Wastewater, 21st Edition, 2005. Met. 2520 B. | ° C | CEA |
| | Cadmio total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA |
| | Cobre total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA |
| | Hierro total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA |
| | Materia orgánica | Pérdida por ignición a 450 ° C | g/kg | CEA |
| Plomo total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA | |

| Matriz | Parámetro | Metodología | Unidad | Laboratorio |
|--------|---------------|---|--------|-------------|
| | Zinc total | EPA_SW-846. Método 3050B y 6010C. | mg/kg | CEA |
| | Granulometría | Método de separación por tamiz, según escala de Wentworth | % | CEA |
| | | | | |
| | | | | |

3.4.3 Análisis de los datos de características físicas y químicas de la columna de agua y sedimentos.

Los resultados de los parámetros de calidad física y química del agua en el estuario del río Rapel, se presentan en general en gráficos de barras desde aguas abajo y en dirección aguas arriba. Para aquéllos parámetros que presentan un claro aumento o disminución de sus valores o concentraciones en dirección del flujo del agua, además se presentan los resultados en un mapa de concentraciones. Estos parámetros son: conductividad eléctrica, salinidad, DQO, fósforo total, sulfato, hierro total y cobre total. En el caso de los parámetros que presentan su mayoría de valores (>50% de los datos) inferiores al límite de detección, estos no se representan, simplemente se describen. Para el caso de los parámetros con menos del 50% de los datos bajo el límite de detección, por tanto, parámetros que se graficaron, para aquellos puntos de muestreo con valores inferiores al límite, se graficó el valor de límite mismo.

3.5 Establecer una línea de base biológica de las comunidades acuáticas del estuario.

3.5.1 Caracterización del hábitat

Para cada punto de muestreo se realizó una caracterización del medio de manera general, abarcando distintos parámetros que definen el hábitat. Dicha medición se realizó a través de una descripción del entorno de los distintos tramos identificados en el estuario utilizando una "Ficha de campo para la evaluación del hábitat", cuyos componentes de mayor relevancia corresponden a características del sistema como: parámetros *in situ*, cobertura vegetal del fondo del estuario y de las riberas, aves y fauna acuática, tipo de suelo y sustrato, entre otras. Además se registró la profundidad de visibilidad del disco Secchi.

3.5.2 Toma de muestras biológicas y método de análisis

Macroinvertebrados bentónicos: En cada punto de muestreo se colectaron 2 muestras aleatorias con una red Surber de 0,09 m² con una malla de apertura de 250 µm en el caso de sustratos duros. En el caso de sustratos blandos se utilizó un core de PVC. Las muestras fueron fijadas con etanol al 10% para su posterior análisis en laboratorio.

Las muestras fueron analizadas cualitativa y cuantitativamente mediante una lupa Zeiss Stemi 2000-C. La clasificación de los organismos se realizó en base a los trabajos de

Bertrand (1995), Lopretto & Tell (1995), Lugo-Ortiz & McCafferty (1995, 1999), Merrit & Cummins (1996).

Fitoplancton: Las muestras para el análisis de las comunidades fitoplanctónicas fueron recolectadas utilizando una red de arrastre de 30 μm de apertura de malla y 30 cm de diámetro en la boca. El arrastre fue horizontal, con el objetivo de obtener las muestras a partir del epilimnion. Posteriormente las muestras fueron fijadas con formalina al 10% para su análisis posterior mediante microscopía óptica (Carl Zeiss), clasificando y contando la totalidad de los organismos presentes (Wetzel & Likens, 1991).

Se determinó la diversidad y la equidad en el ensamble del fitoplancton a través del índice de Shannon-Wiener (Krebs, 1988).

El número de individuos en la muestra dividido por el volumen filtrado en litros permitió la estimación de la densidad en cél/L . Se cuantificó la densidad de organismos fitoplanctónicos a través de transectos en un volumen de 1 mL. El número de transectos contados es función de la precisión deseada y el número de células, colonias o filamentos por transecto. El recuento de fitoplancton se realizó en una cámara Sedwick-Rafter y se calculó como sigue:

$$\frac{n^{\circ} \text{ cel}}{\text{mL}} = \frac{C * 1.000 \text{mm}^3}{L * D * W * S}$$

Donde:

C= número de organismos contados;

L= longitud total de la cámara (50 mm), longitud del transecto (2,3 mm);

D= profundidad de la cámara (1 mm);

W= ancho de la cámara (20 mm) y

S= número de transectos contados.

Finalmente, se dividió el número de células presentes en 1 mililitro por un factor de corrección ajustado a la dilución o concentración de la muestra.

La identificación de las diatomeas y de los otros grupos se realizó utilizando las claves de Prescott (1970), Rivera (1983), Krammer & Lange-Bertalot (1986, 1991), Simonsen (1987), Round *et al.*, (1996), Rumrich *et al.*, (2000) y Lange-Bertalot (2001).

Fauna ícticas: Para la caracterización de los ensambles de peces se utilizaron 3 artes de pesca, a saber:

- Pesca eléctrica: El muestreo se llevó a cabo utilizando un equipo de pesca eléctrica portátil, modelo SAMUS -725G y chinguillos. En cada punto de muestreo se recorrió un área cercana a los 100 m^2 .
- Pesca con redes: Se usaron redes agalleras de monofilamentos con paños de distinto tamaño de red, 30, 40, 50, 60, 80, 100 mm de distancia entre nudos,

caladas durante 12 horas continuas, perpendiculares a la línea de ribera y con un tamaño creciente de distancia entre nudos con la profundidad.

Es importante mencionar que el Centro de Ecología Aplicada cuenta con el permiso de pesca de investigación para realizar las actividades en el sector (**ANEXO 2 PERMISO DE PESCA**).

3.6 Proponer parámetros y límites de calidad acordes a la zona estuarina, en las normas de calidad secundaria de aguas de la cuenca Rapel.

Este objetivo fue desarrollado bajo el entendimiento de la relación entre el medio acuático y la distribución de especies en el estuario del río Rapel. Es decir, cómo interactúa la calidad de agua y sedimentos con la presencia y abundancia de diferentes especies dentro del ecosistema. Complementariamente se realizó una revisión bibliográfica a cerca de la toxicidad de metales pesados en organismos estuarinos. En este informe se presenta el efecto del cadmio en macroinvertebrados bentónicos, de varios contaminantes en peces, y el efecto del cobre en microalgas. Para ello se utilizó la base bibliográfica del CEA y se utilizaron buscadores online tales como (<https://scholar.google.com>), (<http://scihub.io/>), Scielo Chile (<http://www.scielo.cl>), Biblioteca de la Universidad de Chile (<http://www.uchile.cl/bibliotecas>, <http://catalogo.uchile.cl>).

Además de la revisión bibliográfica acerca de la toxicidad por determinados contaminantes, y debido a que no existe actualmente ninguna norma secundaria de calidad ambiental aprobada en sistemas estuarinos en Chile, se revisaron los anteproyectos y el resto de normas secundarias aprobadas en cursos fluviales nacionales.

Finalmente se establecieron rangos de los parámetros de Calidad de Agua medidos en este estudio como una propuesta preliminar e inicial para comenzar nuevos estudios que permitan afinar estos rangos para la realización de una Norma Secundaria de Calidad de agua para el área de estudio.

4 RESULTADOS

A continuación, se entregan los resultados obtenidos referentes a la caracterización de la hidrodinámica del estuario Rapel, la determinación de la extensión del estuario y la identificación del grado de estratificación del estuario. Además, se presentan los resultados de las características físico-químicas del agua y sedimentos y de las comunidades ícticas y del macrozoobentos presentes en los distintos tramos del estuario.

4.1 Caracterizar la hidrodinámica del estuario de “La Boca de Rapel”, en función de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, de marea y afluentes fluviales.

4.1.1 Mareas

Las mareas fueron obtenidas a partir de las tablas de marea publicadas por el SHOA, las cuales se encuentran referidas al NRS (Nivel de Reducción de Sondas). Se utilizaron las tablas de marea del puerto principal de Valparaíso y las correcciones indicadas para el puerto secundario de Topocalma, para el período comprendido entre los años 2012 y 2016. Las series de mareas obtenidas entre el año 2012 y 2015 se presentan en la **Figura 4-1**, mientras que la serie del año 2016 se presenta en la **Figura 4-2**.

En base a esta serie de mareas de 5 años de extensión, se estimó el rango dentro del cual ellas oscilan con respecto al NRS. Se obtuvo que este rango varía entre los -0.05 y 2.08 m. A partir del rango anterior establecido, se generó una serie equi-espaciada (de 10 mareas), que tiene a estos valores del rango como límites.

4.1.2 Caudales

El caudal que recibe el estuario Rapel corresponde al caudal regulado por el embalse Rapel. Según los datos registrados en el CDEC SIS (Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central) el caudal turbinable de este embalse corresponde a 535 m³/s.

Por otro lado, el embalse Rapel no posee un caudal mínimo de operación, ya que la modificación del Código de Aguas que hace referencia a los caudales ecológicos fue realizada posteriormente a la entrada en operación de este embalse (Guzmán, 2013). Sin embargo, existen pequeños aportes de caudal aguas abajo de la central Rapel, que proporcionan un caudal base menor. De todas formas, no se conoce la magnitud de éste caudal base, ya que no se poseen estaciones de medición en este tramo del río.

Considerando estos antecedentes, se estimó que el rango de posibles caudales que ingresan al estuario, varía entre los 0 y los 535 m³/s. Al igual que lo realizado con las mareas, se generó con estos límites una serie equi-espaciada de valores de caudal, que permiten resolver los estados posibles del sistema.

Adicionalmente, a partir de la información de potencia diaria generada obtenida de los datos publicados en el CDEC SIC, se estimó una serie de caudales reales del año 2016. La estimación se realizó a partir de una relación lineal entre potencias y caudales, considerando una equivalencia entre la potencia declarada, correspondiente a 377 MW y el máximo caudal turbinable, correspondiente a 535 m³/s. Se generó una serie horaria

para la parte transcurrida del año 2016, abarcando desde enero hasta septiembre. Esta serie se presenta en la **Figura 4-2**.

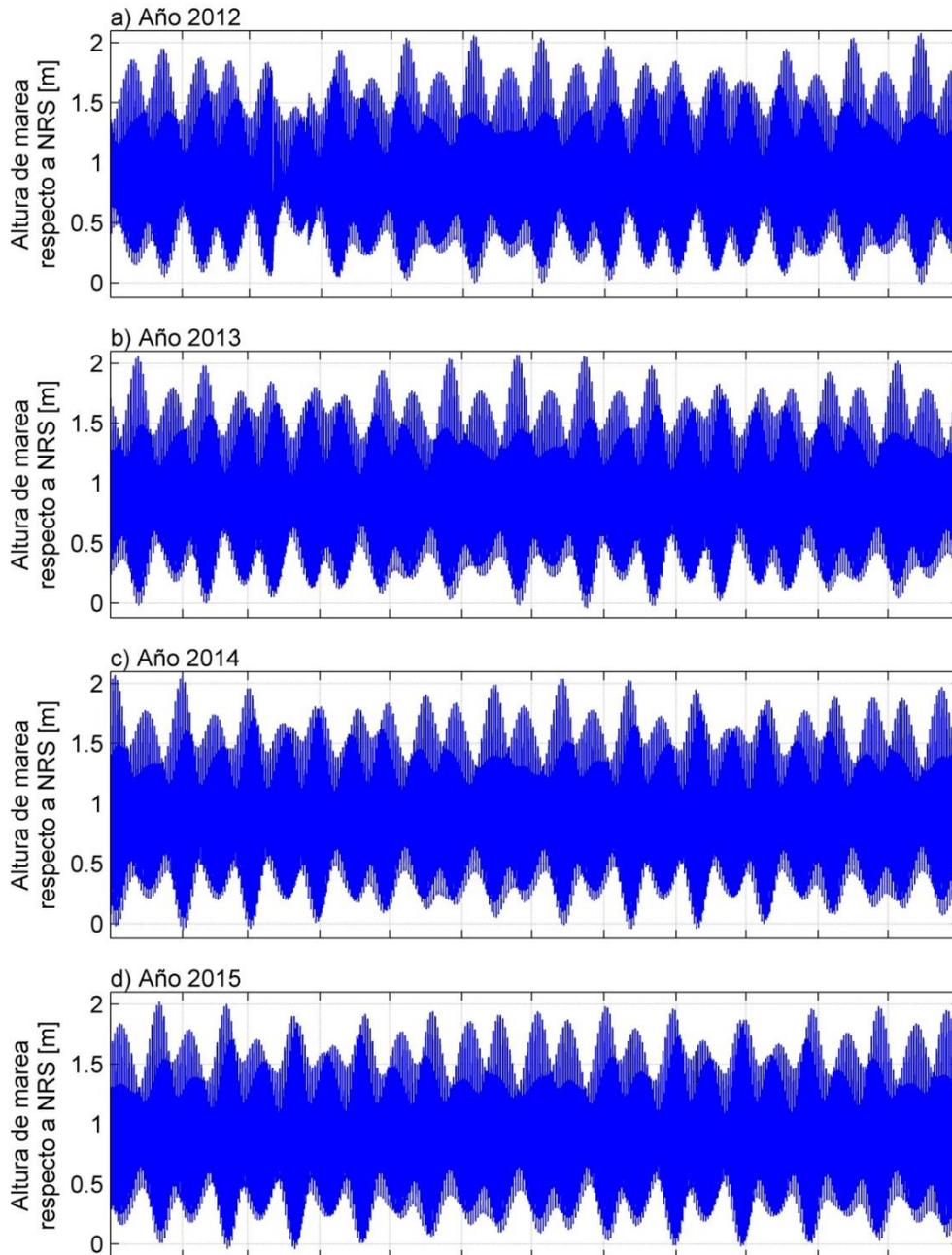


Figura 4-1 Series de mareas estimadas en puerto secundario Topocalma entre los años 2012 y 2015.

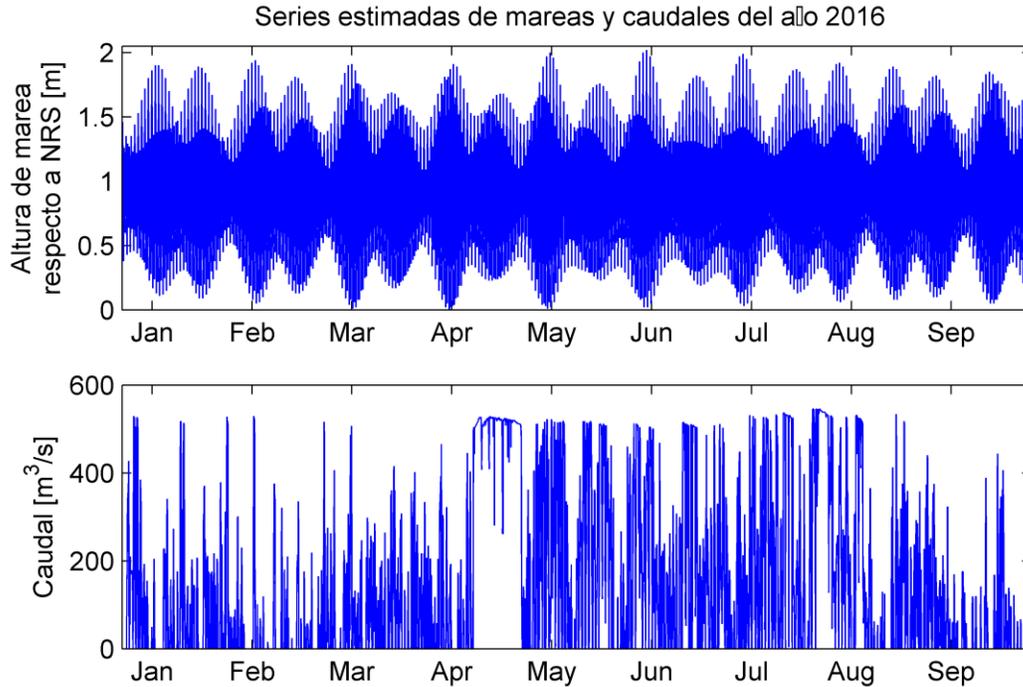


Figura 4-2 Series de mareas estimadas en puerto Topocalma y caudales estimados emitidos por el embalse Rapel, entre enero y septiembre de 2016.

4.1.3 Escenarios

En base a los rangos de ocurrencia de mareas y caudales determinados, se realizó una combinación de casos entre las dos forzantes hidrodinámicas del estuario. Para cada uno de estos casos, se determinó el largo teórico que alcanzaría la cuña salina en el estuario. Este último resultado será considerado más adelante para la definición de zonas del estuario, en particular, para la definición de la zona de cuña salina.

El largo teórico de la cuña salina se determinó utilizando el sistema de ecuaciones (3.1 y 3.2) y parámetros descritos en la metodología.

Los resultados obtenidos para la matriz de casos, en función del Caudal (Q_f) y nivel de marea (H_{marea}) son los mostrados en la **Figura 4-3** y **Figura 4-4**. En la **Figura 4-3** se entrega los resultados como mapa de colores, en donde es posible observar como los mayores largos de la cuña salina se dan bajo condiciones de bajo caudal y alta marea, y la cuña no puede desarrollarse para caudales superiores, independiente de la marea existente.

En términos del alcance máximo teórico de la cuña salina, es posible desprender que bajo condiciones favorables para el desarrollo de ella, se podría extender hasta 28 kilómetros río arriba. De los 2 casos extremos de combinación de las forzantes de mareas y caudales, los cuales se presentan en la **Tabla 4.1**, se observa que la longitud teórica para

el desarrollo de la cuña está en el rango entre los 0 (completa ausencia de intrusión salina en el estuario) y los 28 km (máximo alcance de la intrusión bajo condiciones particulares).

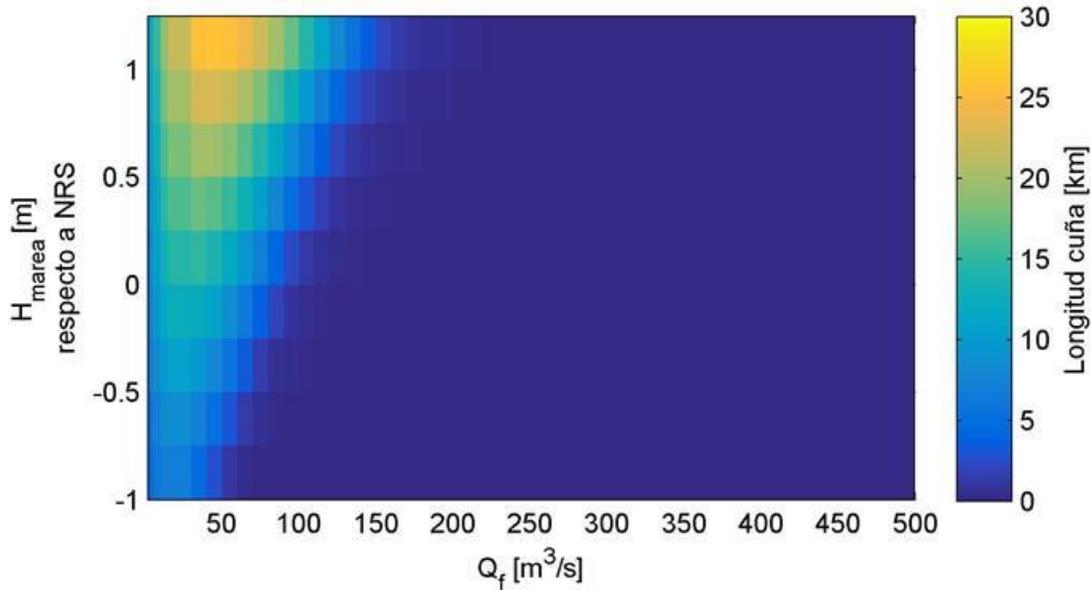


Figura 4-3 Longitud de la cuña salina en función del caudal afluente del río y el nivel de marea.

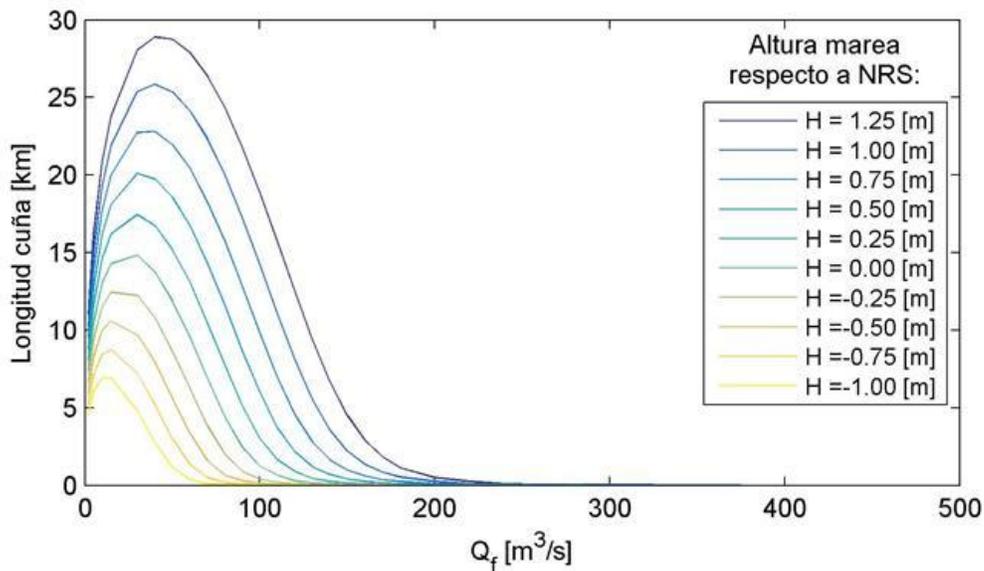


Figura 4-4. Longitud de cuña salina en función del caudal afluente del río, para distintas condiciones de marea.

Tabla 4.1. Resultado de casos particulares del largo de cuña salina, para dos condiciones extremas de forzantes de caudal y marea.

| Q_f [m ³ /s] | H_{marea} [m] | $L_{cuña}$ [km] |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| 40 | 1,17 | 27,95 |
| 500 | -0,96 | 0 |

De las **Figura 4-3** y Figura 4-4 se observa que para caudales bajos, la longitud de la cuña disminuye. Esta condición corresponde en realidad, que para muy bajos caudales, en relación a la forzante de marea, la estratificación se debilita, generándose mayores niveles de mezcla, como se aprecia en la Figura 4-5.

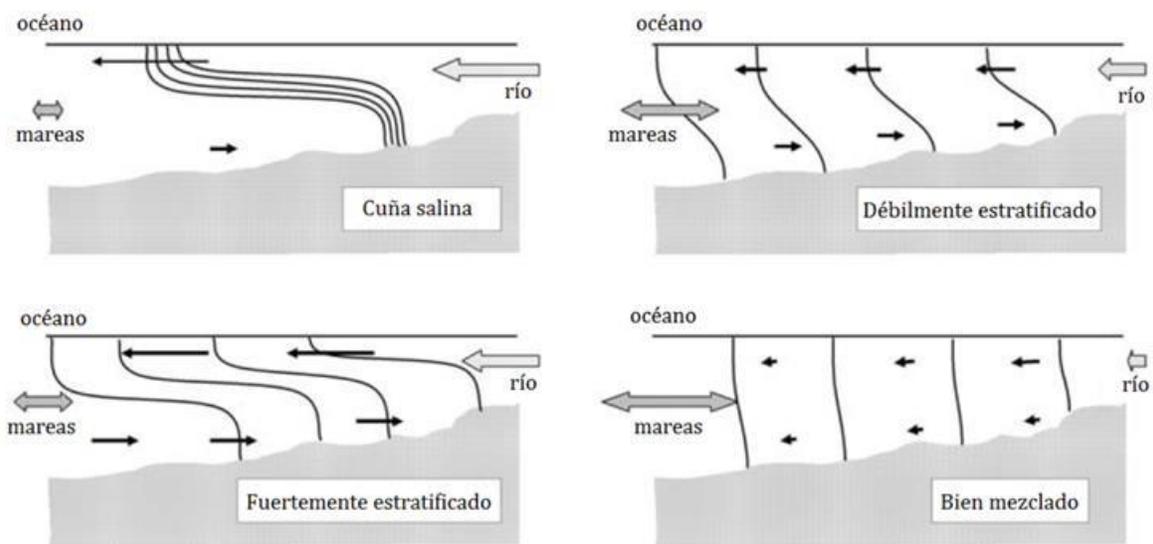


Figura 4-5. Tipos de estuario según estructura vertical de salinidad (Figura extraída de: Valle-Levinson, 2010).

4.2 Determinar la extensión del estuario de la cuenca Rapel, en función del alcance de la onda de marea.

4.2.1 Uso de sensores de presión.

A partir de los dos sensores de presión instalados en el estuario, se analizó si en sus respectivas ubicaciones existía influencia por la onda de marea.

Las series de presión registradas por los sensores R-2 y R-3, fueron corregidas por presión atmosférica, para lo que se utilizó la serie registrada con el sensor R1. Luego, las series corregidas fueron comparadas con la serie teórica de marea (estimada a partir de las mareas del SHOA en el puerto de Topocalma) y la serie estimada de caudales, durante los mismos períodos de medición. Además, las series fueron sometidas a un análisis del espectro de frecuencias, donde se identificó la presencia o ausencia de los principales armónicos asociados a la marea (K1 y M2).

- Sensor R-2: ubicado a 6 km de la boca del estuario

Este sensor estuvo instalado entre el 27 de julio de 2016 y el 22 de septiembre de 2016. Como se observa en la **Figura 4-6** y **Figura 4-7**, la serie obtenida presenta un comportamiento similar al de la serie de marea de Topocalma, coincidiendo en general las pleamares y bajamares, pero presentando algunos comportamientos irregulares, debido a la influencia recibida por el caudal del río, el cual a su vez, se encuentra condicionado por la operación de la central.

En la **Figura 4-6** se presenta la serie de marea de Topocalma, el caudal estimado emitido por la central y las series de profundidad y conductividad registradas por el sensor, durante todo el período de medición de éste. Se observa que el nivel registrado en este sector se ve influenciado por el caudal, pero además presenta un comportamiento oscilatorio que puede estar influido por la marea. La conductividad registró valores muy bajos durante la mayor parte de la serie, cercanos a los 0 mS/cm, lo que corresponde a valores de agua dulce. Sin embargo, se aprecia que en dos ocasiones durante el período registrado, se presentaron aumentos en la conductividad, llegando alrededor de los 8 y 9 mS/cm. Considerando que el agua de mar tiene una conductividad aproximada de 50 mS/cm, estos valores siguen siendo bajos, y representan una baja concentración de sal en este sector del estuario. Sin embargo, se debe destacar que los aumentos registrados coinciden con períodos de bajo caudal emitido por el embalse Rapel y con días cercanos a la sicigia, por lo que se desprende que en condiciones de mínimo caudal y máxima pleamar, podría llegar hasta este punto del estuario algunas bajas concentraciones de sal.

En la **Figura 4-7** se presenta una semana en particular del período de medición, para apreciar en detalle el comportamiento de la marea, el caudal y la serie de alturas de columna de agua obtenida a partir del sensor de presión. Se aprecia que los peaks de caudal provocan una alteración en el nivel del agua, el cual aumenta con algunas horas de retardo luego del peak de caudal. En los períodos de nulo caudal emitido por la central (alrededor del día 18 de septiembre en la figura), se aprecia que el nivel del agua se acopla de forma ordenada con la serie de marea.

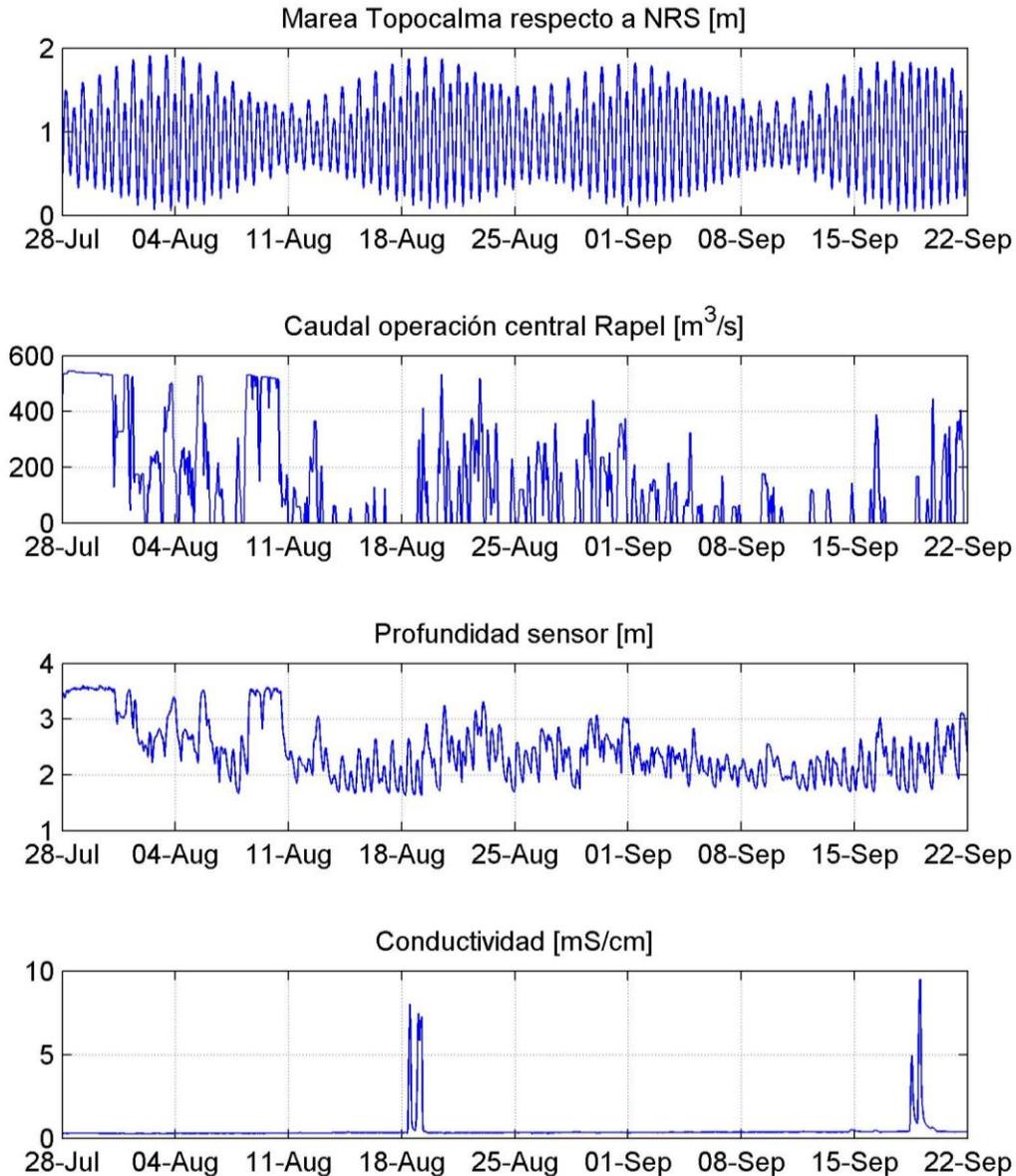


Figura 4-6. Series de marea en sector Topocalma, caudal de operación de central Rapel y series de tiempo del nivel y conductividad registrada por sensor R-2.

A partir del análisis del espectro de frecuencia realizado, se identificó si los armónicos característicos de la marea, como lo son los modos K1 y M2, están presentes en la serie obtenida. Se obtuvo que éstos correspondan a los modos más relevantes de la serie, lo cual indica que la serie está efectivamente influenciada por la marea. En particular, se busca la presencia del modo M2 (semidiurno), ya que la presencia del modo K1 (diurno), puede resultar afectada por el comportamiento del caudal regulado por el embalse. El resultado del análisis indicó la presencia del armónico M2, como se aprecia en la **Figura**

4-8, donde se observa que para la frecuencia correspondiente a este modo, la amplitud obtenida es mayor.

Por lo tanto, se determinó que el punto del estuario donde se ubicó el sensor R-2 (a unos 6 km desde la boca del estuario), se encuentra influenciado por la marea.

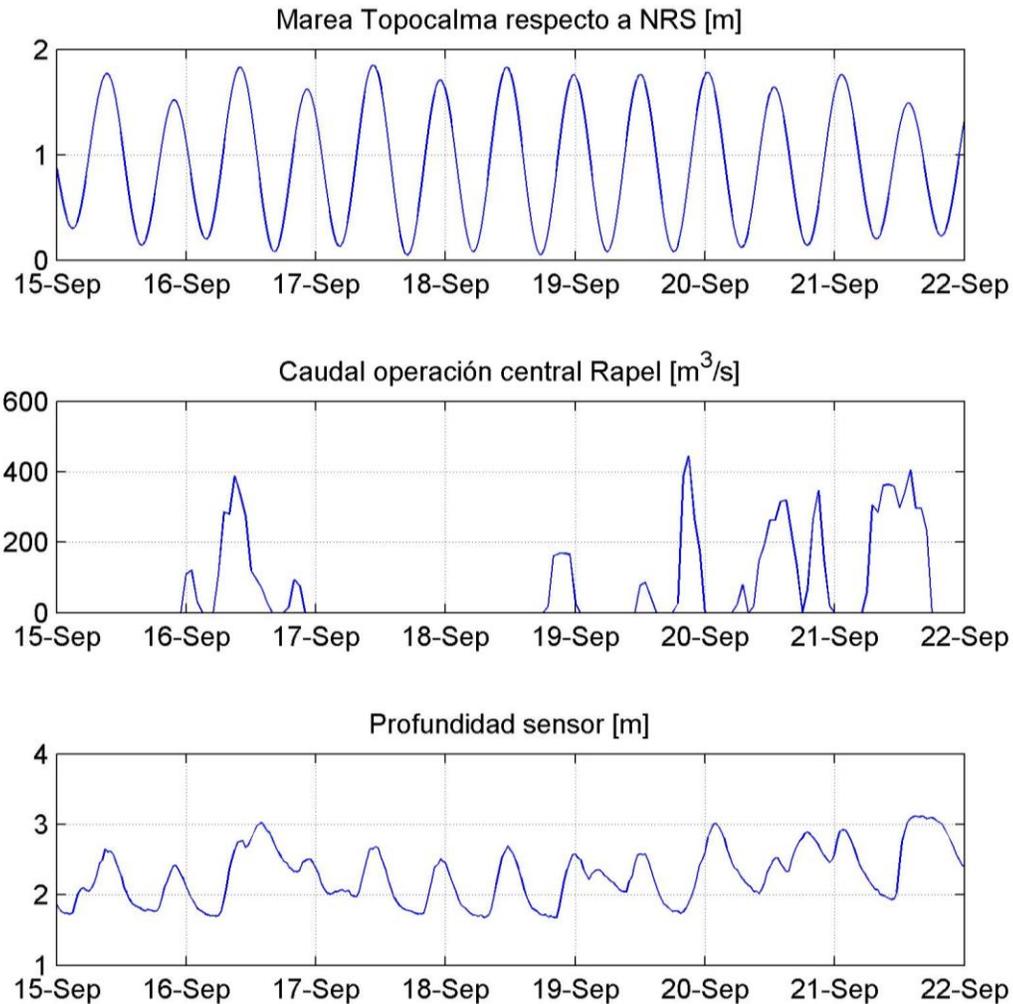


Figura 4-7. Series de marea en sector Topocalma, caudal de operación de central Rapel y serie de tiempo de nivel registrada por sensor R-2.

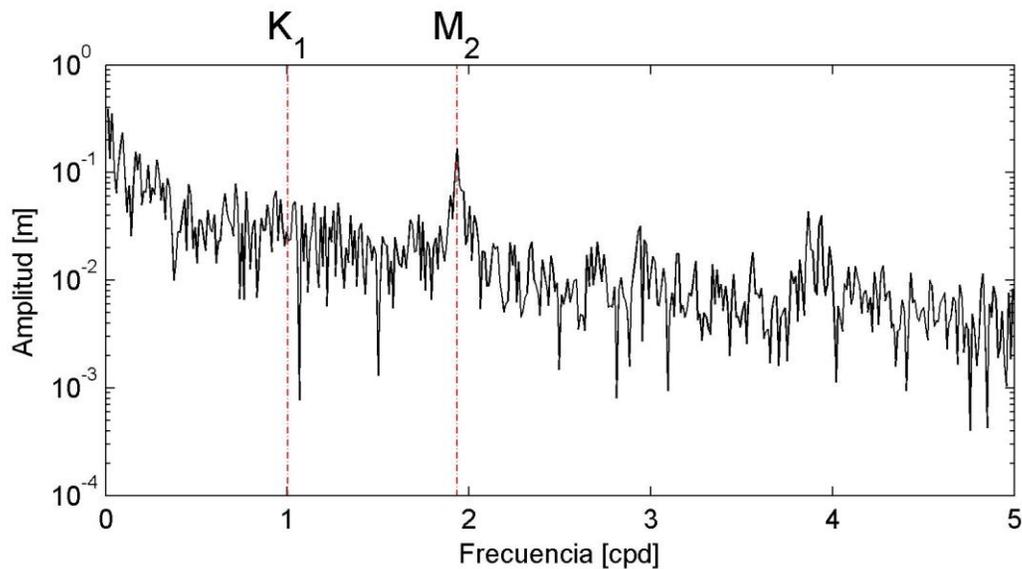


Figura 4-8. Análisis del espectro de frecuencia e identificación de modos de marea relevantes asociados al sensor R-2.

- Sensor R-3: ubicado a 12 km de la boca del estuario

Análogamente al análisis realizado para el sensor R-2, para el sensor R-3 se realizó el mismo procedimiento. En la **Figura 4-9** se presentan los resultados de la semana de medición de este sensor, comprendida entre el 22 y el 28 de septiembre de 2016. A diferencia de lo ocurrido con el sensor anterior, en esta figura se observa que las profundidades registradas están influenciadas por el comportamiento del caudal del río, y no por la marea. Se aprecia que todos los aumentos en el nivel responden a aumentos en el caudal, con un desfase de algunas horas, y que para ausencias de caudal el nivel se mantiene constante.

Del análisis de frecuencias realizado (**Figura 4-10**), se observó que ninguno de los dos armónicos principales de la marea (K1 y M2) presentó una amplitud que destaque. En particular, se observa que el armónico M2 no predominó sobre el resto, a diferencia de lo ocurrido con la serie del sensor R-2.

Producto de estos resultados, se determinó que el punto del estuario donde se ubicó el sensor R-3, correspondiente a un recorrido de 12 km desde la boca del estuario aproximadamente, no está influenciado por la marea. Así, la extensión total del estuario debe ser inferior a los 12 km desde la costa.

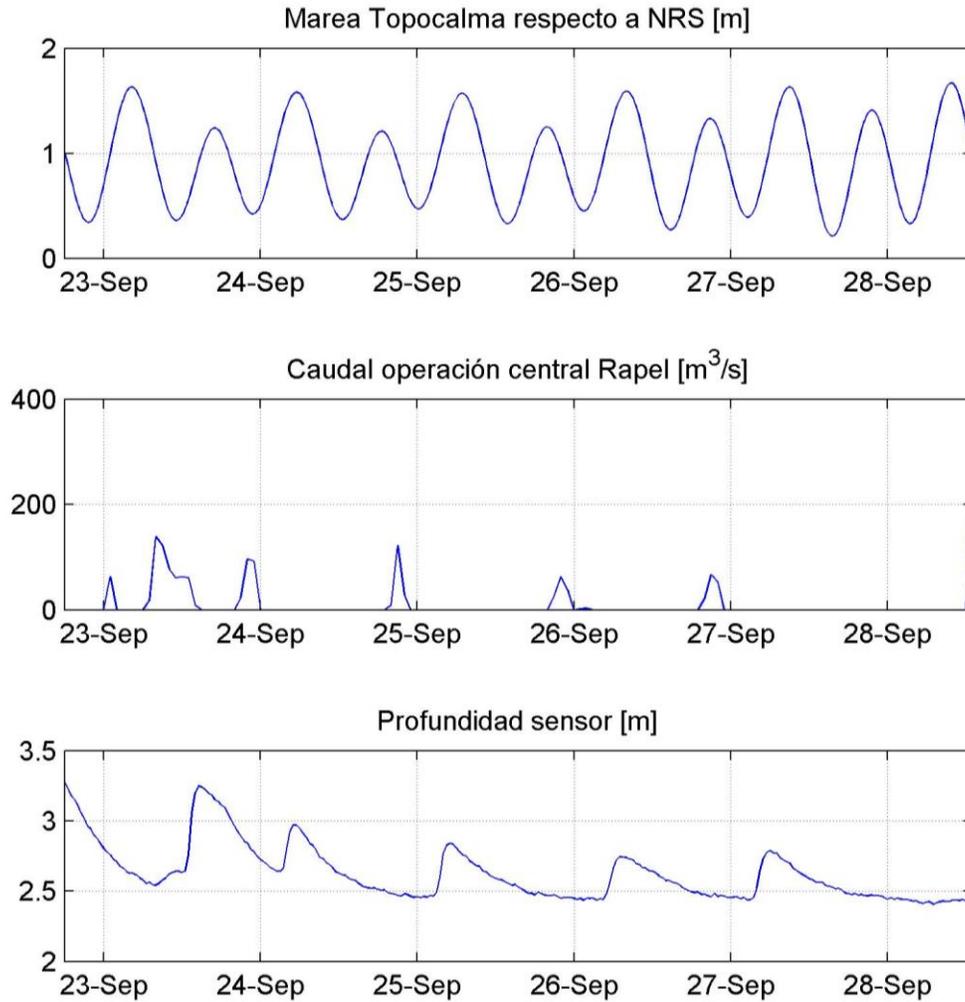


Figura 4-9.Series de marea en sector Topocalma, caudal de operación de central Rapel y serie de tiempo de conductividad registrada por sensor R-3.

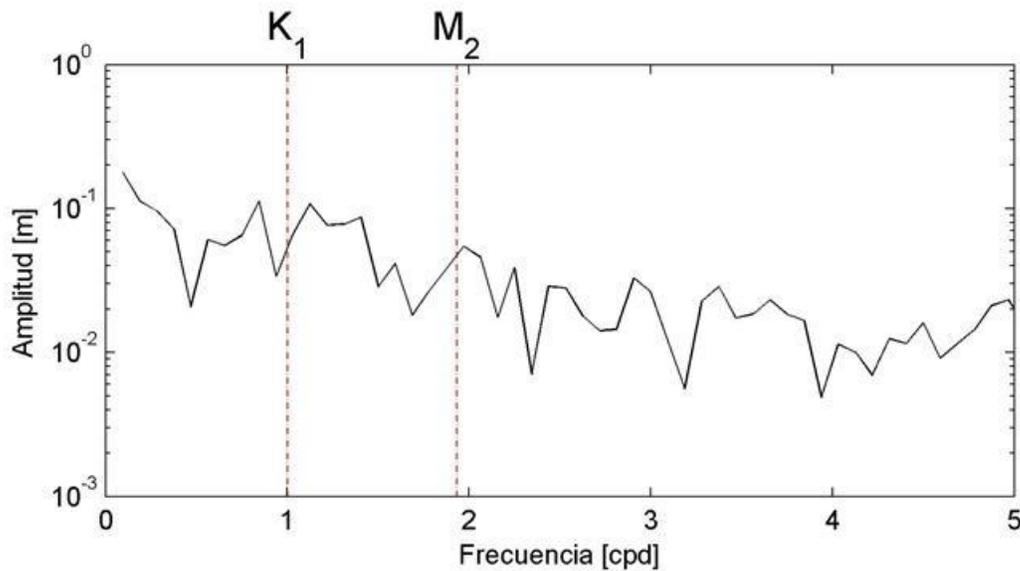


Figura 4-10. Análisis del espectro de frecuencia e identificación de modos de marea relevantes asociados al sensor R-3.

4.2.2 Método de la cota de máxima marea

Durante las salidas a terreno de los días 22 de julio y 22 de septiembre, se identificó que a una distancia de aproximada de 9 km desde la boca del estuario, se ubica una zona de angostamiento, con una alta diferencia del nivel de fondo y altas velocidades del escurrimiento. Esta zona se reconoce como una desconexión hidráulica, lo que hidráulicamente corresponde a una zona en la cual todo tipo de regulación o condicionamiento del escurrimiento desde aguas abajo, no puede remontar hacia aguas arriba de ese punto. Lo anterior es de mayor relevancia en los escurrimientos de tipo río (más lentos y de altura de escurrimiento considerable), como lo es en el caso del estuario. Así, se espera que el alcance de la onda de marea, si es que llegara a esta zona, no pueda avanzar más allá de este punto hacia aguas arriba. Por lo tanto, esta zona acotaría más aún la zona del estuario, que según los resultados de los sensores de presión cuenta con un alcance inferior a los 12 km desde la costa.

Para complementar los resultados de los sensores de presión, y para determinar el área donde se realizaría la batimetría y los puntos CTD, se realizó una caracterización de la elevación del lecho en función de un Modelo de Elevación Digital (DEM de su sigla en inglés) obtenido del modelo Aster-GDEM. El DEM fue elaborado hasta una distancia de 9 km de la boca, congruentemente a la información entregada por el sensor R-3 (donde no se obtuvo alcance de marea) y la desconexión hidráulica identificada en el km 9. La información entregada por el DEM indicó que el estuario se encuentra en una zona de relativamente bajas pendientes. En los 9 km evaluados del estuario, se obtuvo un desnivel de 7 m, lo que corresponde a una pendiente media aproximada de 0,07% aproximadamente.

El nivel de máxima marea está dado por la máxima pleamar de sicigia, que dentro del período analizado en la caracterización hidrodinámica, corresponde a 2,08 m con respecto al NRS. Según la información de las tablas de marea del SHOA (SHOA, 2016), el NRS del puerto patrón utilizado (puerto de Valparaíso) está ubicado 0,91 m bajo el nivel medio del mar. Por otro lado, según información de un estudio realizado por Araya Vergara (2014), la profundidad en el sector de la boca del estuario es de aproximadamente 3 m con respecto al nivel medio del mar. Con todo lo anterior, se estima que la máxima marea a tenerse sería de 4,17 m medidos desde el fondo (medida local y no referida al NRS5).

Así, al considerar este valor para la máxima marea, la pendiente media estimada, se estima que la zona con posibilidad de ser influenciada por la marea, y correspondiente a la longitud del estuario, es de 5,4 km aproximadamente.

4.2.3 Profundidades en el estuario

La **Figura 4-11** presenta el resultado de la batimetría tomada en terreno durante los días 29 y 30 de septiembre de 2016. Se presenta la interpolación de profundidades realizada a partir de los datos tomados en terreno de perfiles transversales y de perfil longitudinal. Sin embargo, las profundidades presentadas poseen una superficie móvil, dada por la elevación del bote a lo largo de los días de medición y la posición en el estuario, que varía tanto por la acción de la marea como del caudal. Con la instrumentación utilizada no es posible determinar una superficie fija, por lo que este cálculo no se utilizó para la determinación del alcance del estuario.

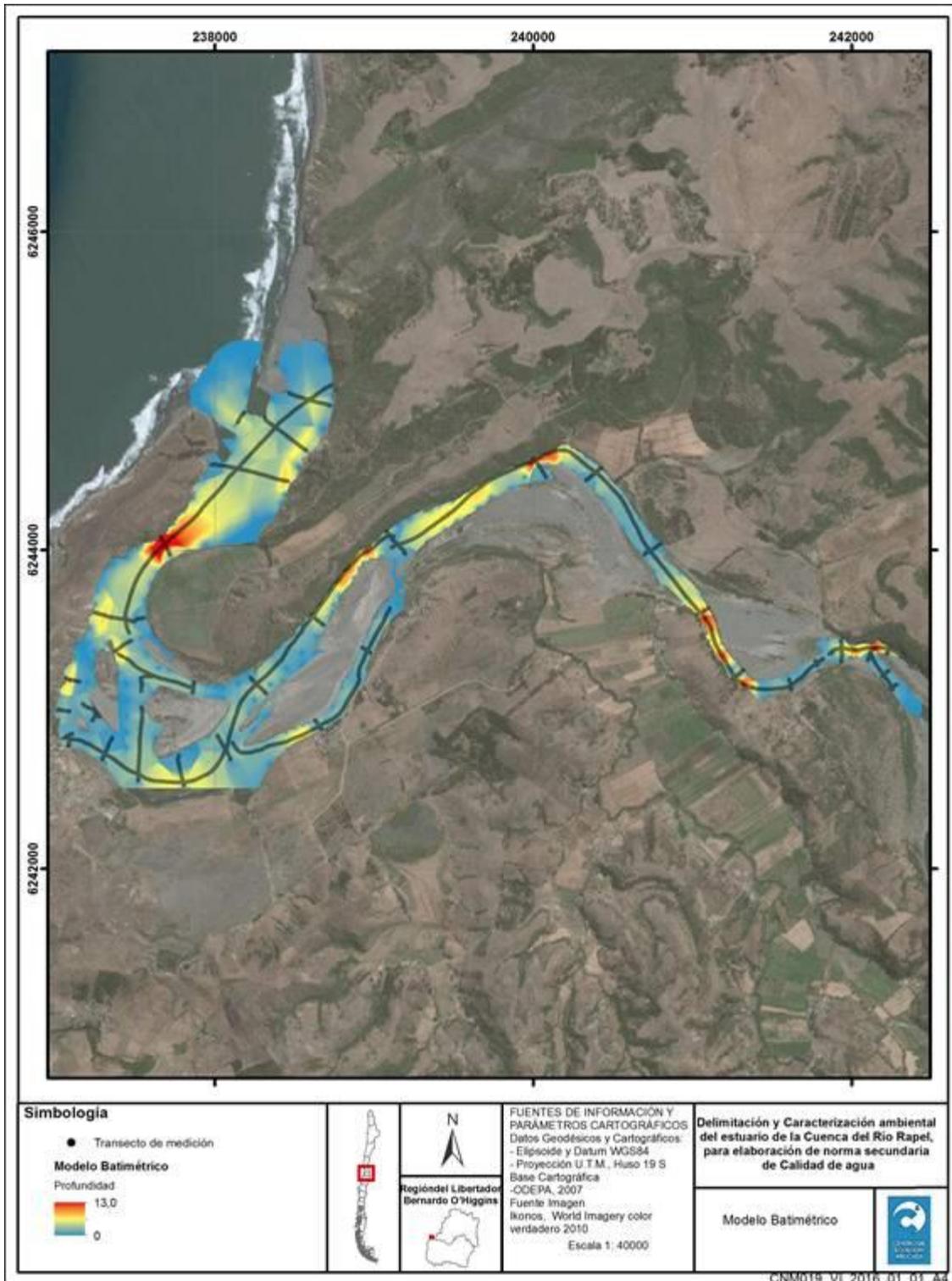


Figura 4-11. Resultado de batimetría realizada en zona de estudio. Las profundidades son móviles con respecto a la superficie del pelo de agua.

4.2.4 Extensión del estuario

Dado los resultados registrados por el sensor de presión R-2, se sabe que el alcance del estuario llega hasta al menos el kilómetro 6 medido desde la boca del estuario. Por esta razón, dado que la estimación realizada por el método de la cota de máxima de marea fue de 5,4 km, éste no fue considerado como un buen indicador para la determinación del largo del estuario.

En cuanto a la información del sensor R-3, se sabe que la longitud del estuario es inferior a 12 km, y adicionalmente, se reconoce la existencia de una desconexión hidráulica en el km 9.

En resumen, se puede reconocer la presencia de la cuña salina (interior del estuario) a una distancia de 6 km desde la boca del estuario; no se evidencia la influencia de la marea en el registro del sensor R-3, por lo que el estuario debe tener una extensión menor a 12 km; y se evidencia la desconexión hidráulica a 9 km aproximadamente desde la boca del estuario, la cual impediría el remonte de la cuña salina y de la influencia de marea, acotando el alcance del estuario a esa posición. Así, todos los antecedentes indicados, muestran que el estuario tiene una extensión sobre los 6 km y bajo los 9 km.

Cabe señalar que bajo condiciones particulares y de carácter más extremas, el alcance podría ser mucho mayor, pero la información disponible y la levantada en terreno no permite estimarla. Los límites espaciales del estuario no son constantes espacialmente, dada la naturaleza espacio-temporal dinámica de estos sistemas ecológicos, que tienen fuertemente influida por las mareas y en este caso por la estacionalidad del caudal del río regulado. Así, se utilizan las extensiones determinadas en este estudio como una extensión promedio del estuario, de modo referencial,

4.3 Identificar el grado de estratificación del estuario considerando la dinámica temporal de las variables forzantes.

4.3.1 Perfiles de salinidad en el estuario

Los 12 perfiles CTD realizados a lo largo del estuario, se midieron en condición de pleamar y bajamar de sicigia.

En la **Figura 4-12** se indican los momentos de medición de los perfiles CTD realizados a lo largo del estuario, en relación a la serie de mareas y caudales estimadas para el día 29 de septiembre. Se observa que las mediciones se efectuaron en condiciones de bajo caudal, y que se llevaron a cabo durante los 2 escenarios de marea opuestos (pleamar y bajamar de sicigia).

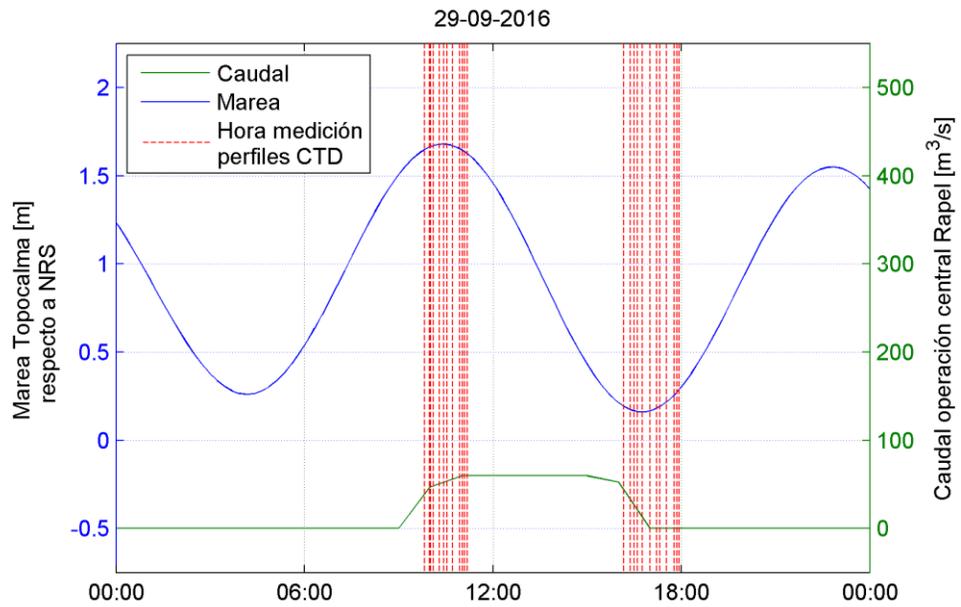


Figura 4-12. Momentos de medición de perfiles CTD, en relación a la condición de marea y caudal estimados.

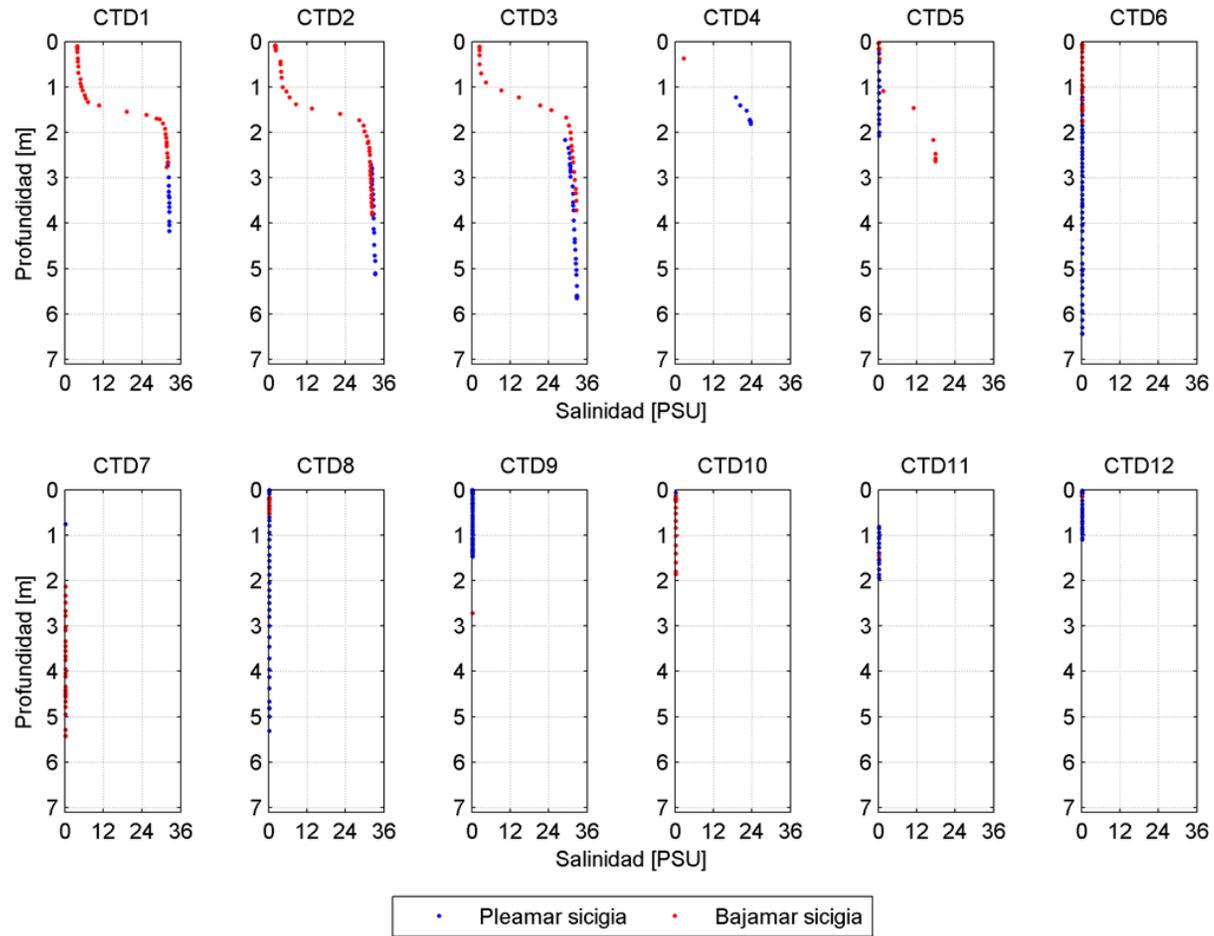


Figura 4-13 Perfiles de salinidad registrados en terreno.

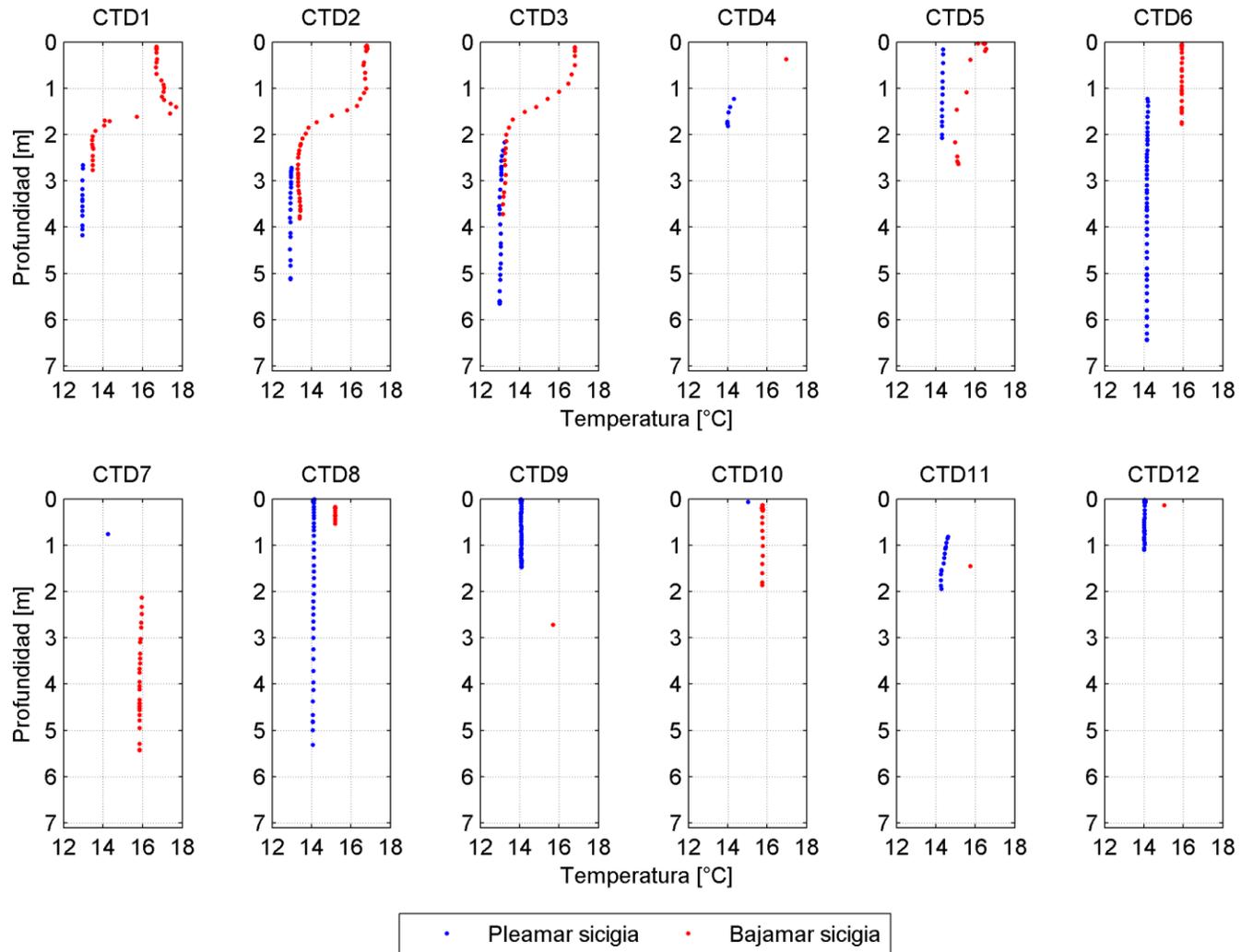


Figura 4-14 Perfiles de temperatura registrados en terreno.

En las **Figura 4-13** y **Figura 4-14** se indican los resultados obtenidos para los 12 perfiles CTD realizados, de salinidad y temperatura, respectivamente. Para cada CTD, se indica el perfil realizado en pleamar y bajamar.

Se observa que en los 3 primeros perfiles (CTD 1, 2 y 3) hay indicios de una intrusión salina (ver **Figura 4-13**), en forma de cuña, ya que en el estrato de fondo se presenta agua salada, con concentraciones mayores a 30 PSU. Este comportamiento se registró tanto en condición de pleamar como de bajamar. En la **Figura 4-14** se observa que la temperatura también presenta un comportamiento estratificado en estos 3 primeros perfiles, con temperaturas en la superficie cercanas a los 17°C y de 13°C en el fondo.

En los perfiles CTD 4 y 5, se presentaron algunas concentraciones mayores de salinidad, pero no con salinidad de agua de mar, sino que con valores inferiores, llegando a concentraciones máximas de 24 PSU aproximadamente. Los perfiles de temperatura no indicaron una estratificación tan marcada como en los perfiles anteriores.

Desde el CTD 6, ubicado a 5,4 km desde la boca del estuario, los perfiles registraron concentraciones de sal prácticamente nulas, de agua dulce. De igual forma, las temperaturas registraron una variación casi nula a lo largo de los perfiles. Como los perfiles en pleamar y bajamar fueron realizados a distintas horas del día, se aprecia una diferencia de temperatura entre ambas mediciones de entre 1 y 2°C.

4.3.2 Definición de zonas del estuario

Dados los antecedentes recopilados en terreno y los análisis realizados del estuario Rapel, se definieron 3 diferentes zonas en el estuario: zona de cuña salina, zona de mezcla parcial y zona sin intrusión. Se debe destacar que los estuarios se caracterizan por ser sistemas dinámicos, por lo que el real alcance de estas zonas varía en el tiempo. Sin embargo, para fines de levantamiento de información en el estuario, es de utilidad diferenciar estas zonas a partir de puntos fijos en el estuario.

- Zona de cuña salina

La primera zona corresponde a la que presenta una cuña salina. La presencia de la intrusión en forma de cuña fue corroborada con las mediciones de perfiles CTD realizados en el estuario.

El alcance de la zona de cuña salina se definió en base a los resultados de los perfiles CTD y a los resultados de la ecuación teórica, presentados anteriormente en la caracterización hidrodinámica.

El alcance teórico de la cuña salina puede variar considerablemente bajo distintas condiciones de caudales y mareas. Según los resultados teóricos obtenidos, para un lecho con pendiente constante, su longitud puede variar entre los 0 y los 28 km. Sin embargo, en las mediciones efectuadas en terreno, para condición de máxima y mínima marea, se registró una cuña salina sólo hasta los 2 km. Considerando que la formulación teórica no considera las limitaciones que impone la forma del terreno en el avance de la cuña, se utilizó para esta zona la información recopilada de terreno, con la cual se determinó una longitud aproximada de esta zona de 2,8 km.

- Zona de mezcla parcial

La zona de mezcla parcial corresponde a una zona intermedia, posterior a la zona de cuña salina pero donde aún es posible encontrar ciertas condiciones de salinidad. El comienzo de esta zona queda delimitado por el final de la zona de cuña salina, definido anteriormente, mientras que el final queda delimitado por una disminución notoria en la salinidad, llegando a valores cercanos a los 0 g/l.

Dado que los perfiles CTD que presentaron mezcla parcial fueron los CTD 5 y 6, se delimitó esta zona hasta aguas arriba del perfil CTD 6, en el km 4,8.

Cabe destacar que bajo ciertas condiciones puede no existir cuña salina, y en este caso, las zonas de cuña salina y de mezcla parcial deberían considerarse como una única zona.

- Zona sin intrusión

Finalmente, la zona sin intrusión corresponde a la zona final del estuario, la más cercana a la zona de río. Esta zona queda definida por el final de la zona de mezcla parcial y el final del estuario.

Como se indicó anteriormente, la zona de mezcla parcial quedó definida hasta el km 4,8, mientras que el final del estuario se definió en el km 9.

En la **Figura 4-15** se presenta un mapa en el que se identifican las 3 zonas del estuario, para facilitar la identificación de estos sectores.

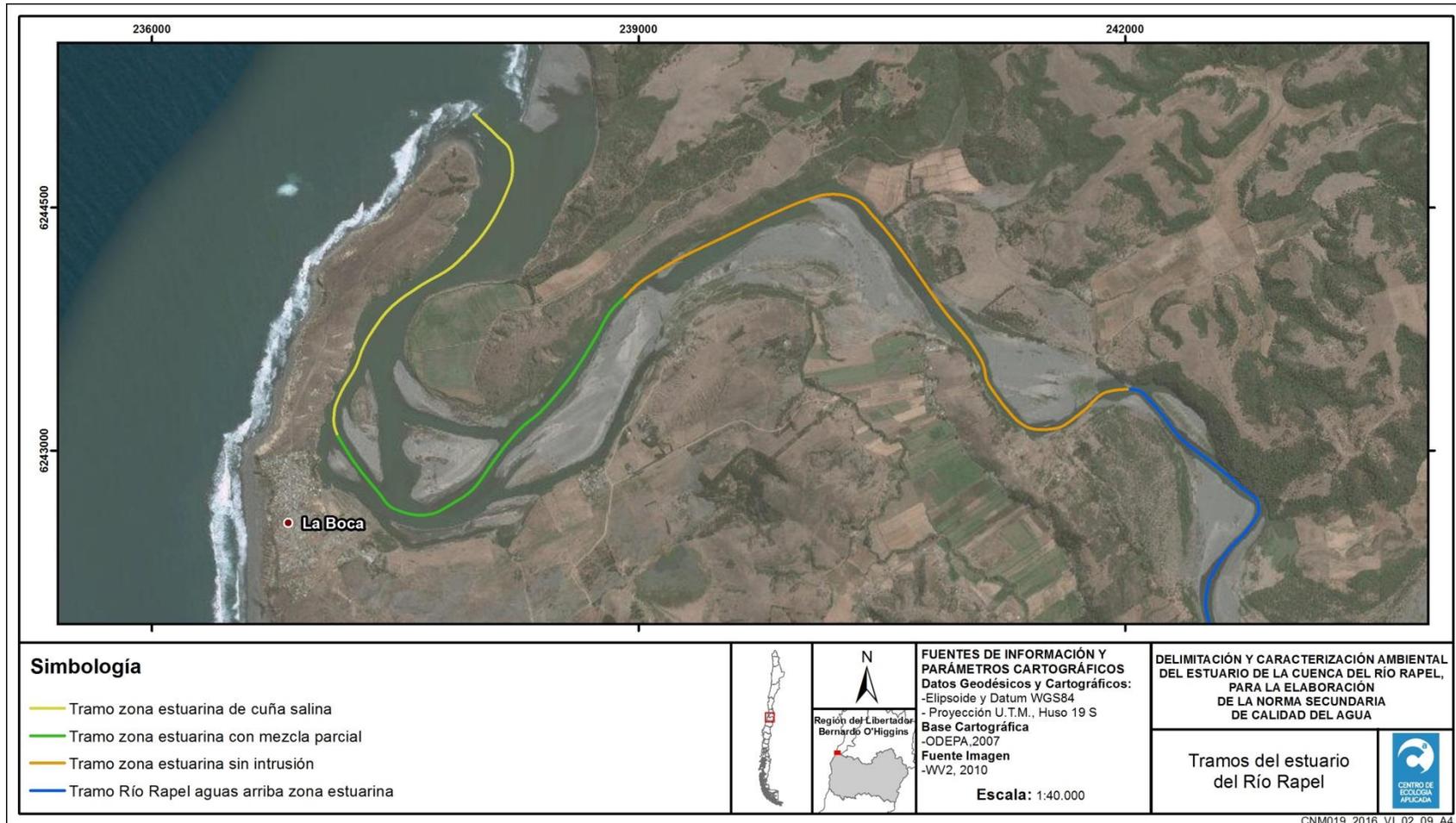


Figura 4-15. Tramos definidos en la zona estuarina.

4.4 Establecer una línea de base de calidad física química del agua y sedimentos del estuario, incluyendo las condiciones de borde desde la zona fluvial y del sistema costero.

4.4.1 Calidad física y química de la columna de agua

4.4.1.1 Parámetros *in situ*

Los valores de conductividad y salinidad medidos en el estuario del río Rapel aumentaron en dirección del flujo del agua, siendo menores en los tramos ubicados aguas arriba (aguas arriba de la zona estuarina y en la zona estuarina sin intrusión) y mayores en la zona estuarina con cuña salina, justo antes de la desembocadura del río en el mar. Concretamente la conductividad presentó valores entre 0,5 mS/cm y 24,5 mS/cm y la salinidad presentó valores desde 0 g/L hasta 14,7 g/L (**Figura 4-16 A y B**). Este comportamiento de aumento en dirección del flujo del agua se observa también en la **Figura 4-17** y en la **Figura 4-18**.

Los valores de oxígeno disuelto registrados en el estuario del río Rapel, se presentaron en general similares entre todos los tramos, independiente de la presencia o no de cuña salina. Concretamente fluctuaron entre 9,78 mg/L en la zona estuarina con cuña salina y 10,98 mg/L en la zona estuarina sin intrusión (**Figura 4-16 C**).

De acuerdo a los valores de pH, las aguas del estuario del río Rapel, se presentaron moderadamente alcalinas, de acuerdo a la clasificación de Hounslow (1995). A lo largo del estuario, se presentaron valores de pH similares, sin observarse un aumento o disminución en dirección del flujo del agua. El menor valor registrado fue 8,53 unidades, mientras que el valor más elevado fue 8,95 unidades (**Figura 4-16 D**).

Los valores de potencial redox medidos a lo largo del estuario del río Rapel, también fueron similares. Estos se presentaron en valores típicos de ambientes oxidantes, desde 280 mV hasta 284 mV (**Figura 4-16 E**).

La temperatura del agua fue similar también a lo largo del curso de agua, presentándose en valores entre 17,0 °C y 18,6 °C (**Figura 4-16 F**).

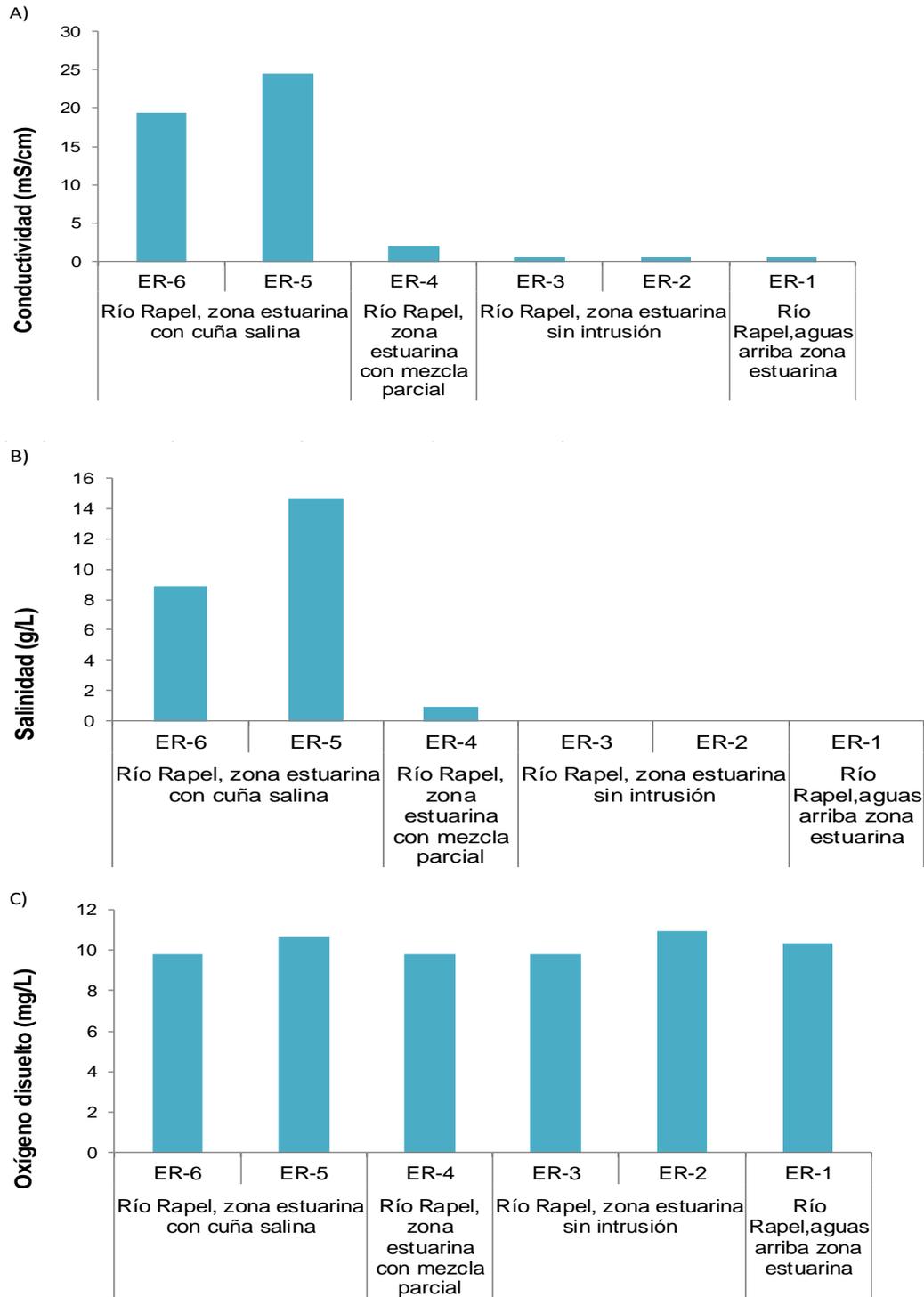


Figura 4-16. Parámetros *in situ* medidos en el agua superficial del estuario del Río Rapel. Primavera 2016.

A) Conductividad, B) Salinidad, C) Oxígeno disuelto.

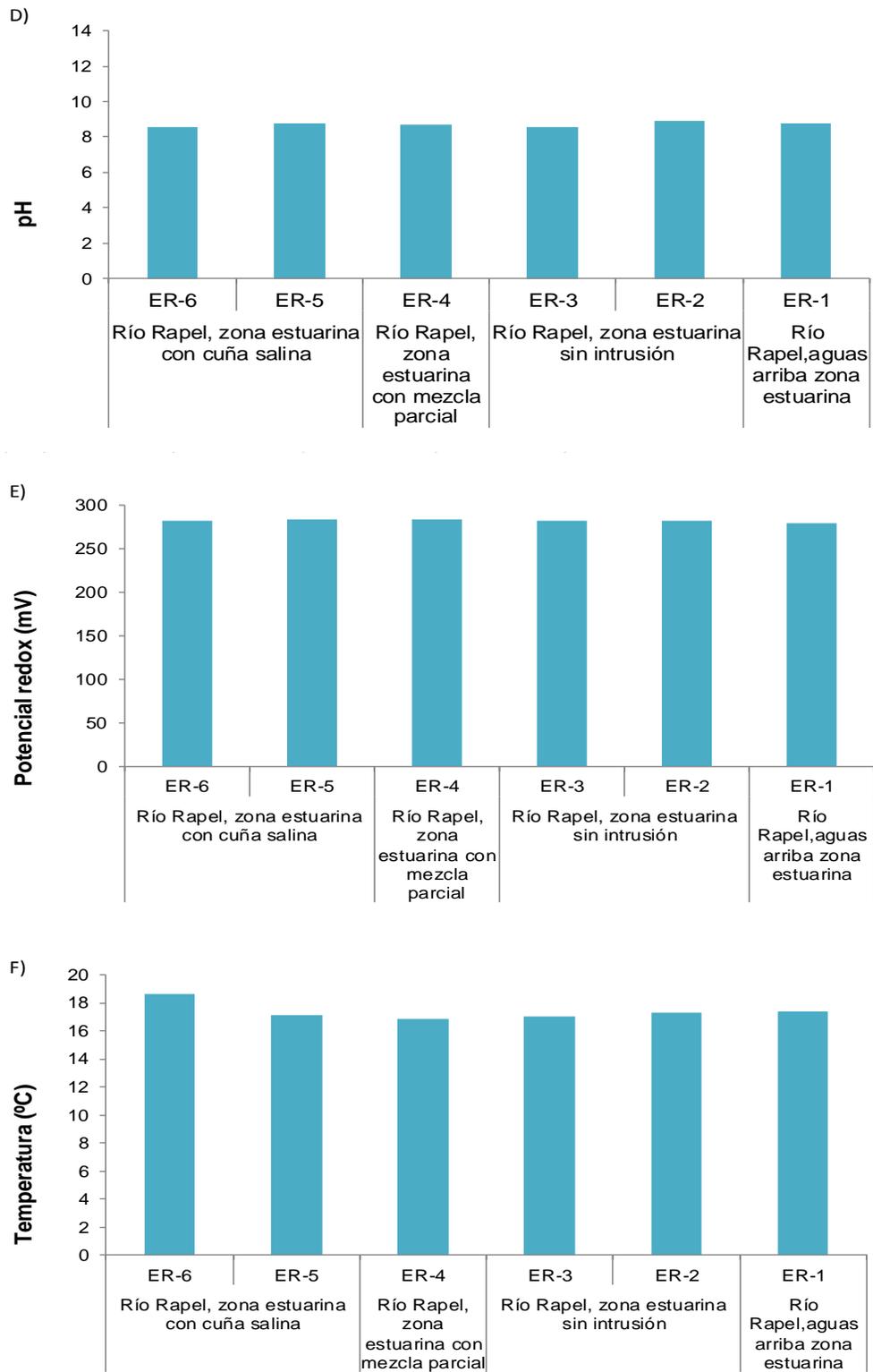


Figura 4-16. Parámetros *in situ* medidos en el agua superficial del estuario del Río Rapel. (Continuación). D) pH, E) Potencial Redox, F) Temperatura.

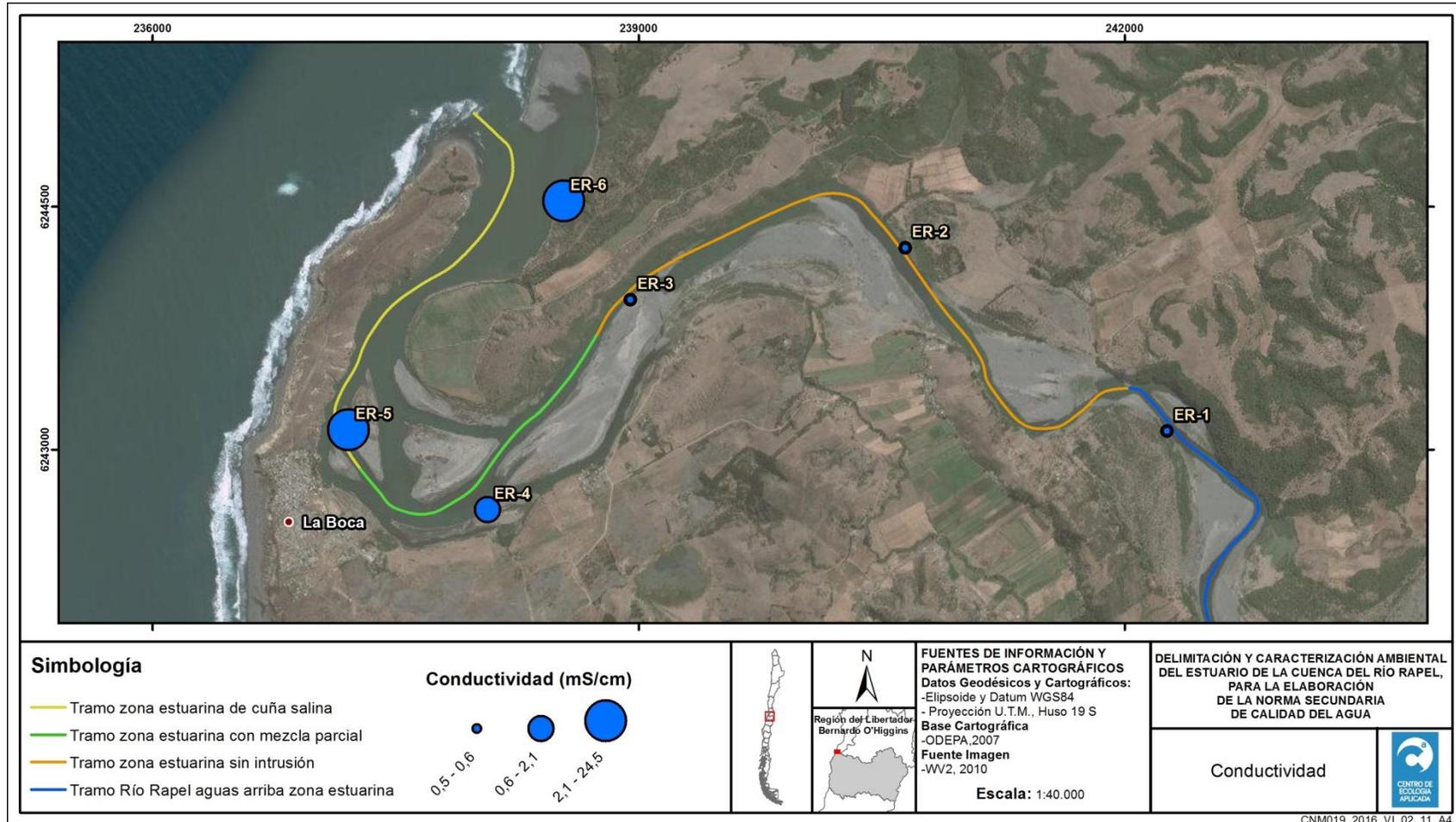


Figura 4-17 Rangos de conductividades a lo largo de río Rapel en su estuario. Primavera 2016.

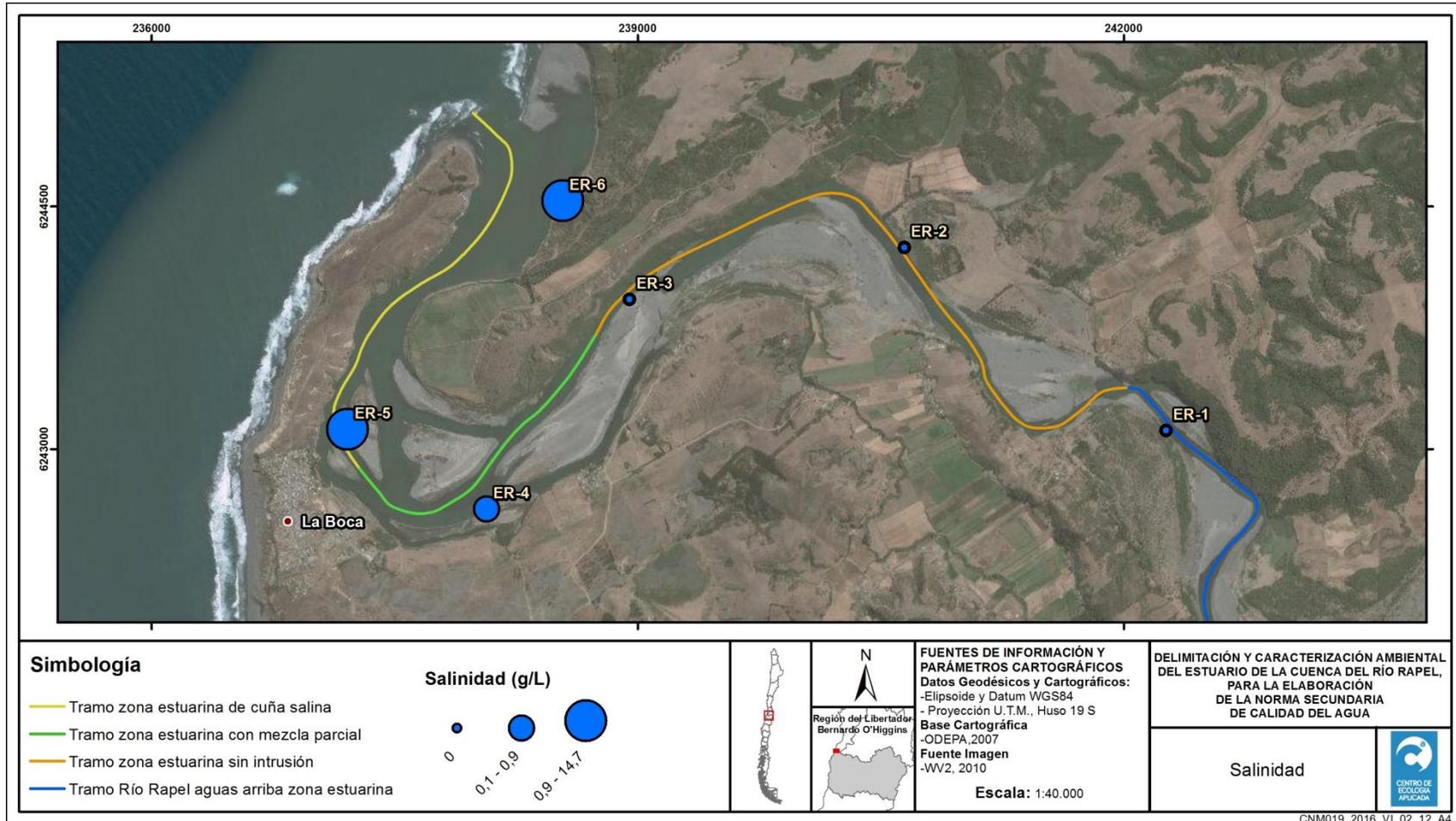


Figura 4-18 Rangos de salinidades a lo largo de río Rapel en su estuario. Primavera 2016.

4.4.2 Parámetros físico-químicos

Los sólidos totales suspendidos presentaron un comportamiento independiente del tramo, es decir, no se observó aumento o disminución en dirección del flujo del agua. En el área de estudio, este parámetro se presentó en concentraciones desde 0,8 mg/L aguas arriba de la zona estuarina, hasta 5,9 mg/L en la zona estuarina sin intrusión (**Figura 4-19 A**).

En general, los valores de demanda química de oxígeno (DQO) presentaron un aumento aguas abajo, presentando la zona estuarina, con cuña salina, los valores más elevados de este parámetro, durante la campaña de muestreo. Sin embargo, en el resto de puntos no se observó ese comportamiento tan claro. Los valores se presentaron entre 7 mg/L en la zona sin intrusión y 15 mg/L en la zona ubicada más cercana a la desembocadura (**Figura 4-19 B**).

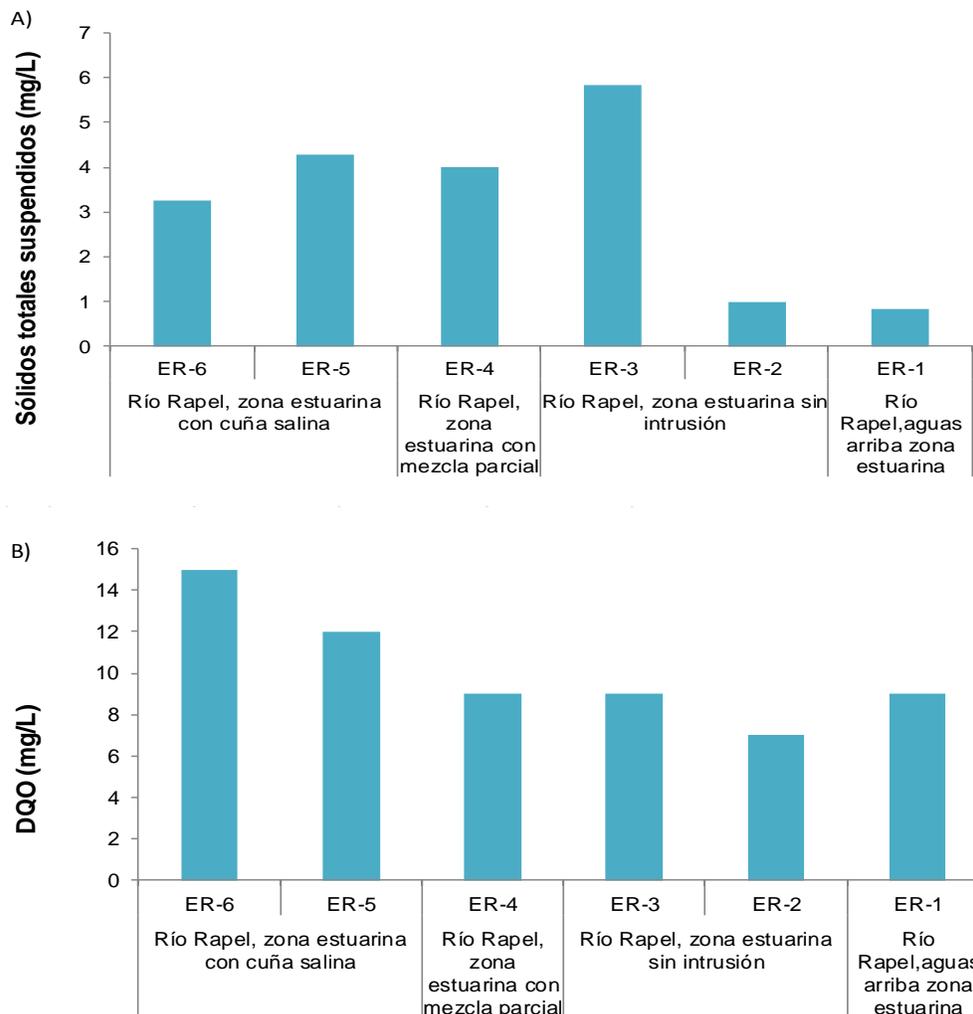


Figura 4-19 Parámetros físico-químicos analizados en el estuario del río Rapel. A) Sólidos totales suspendidos, B) Demanda química de oxígeno (DQO).

4.4.2.1 Nutrientes

Las concentraciones de fósforo total analizadas durante la campaña de primavera 2016, presentaron un aumento en dirección del flujo del agua. Concretamente los valores en el área de estudio se presentaron entre 11 $\mu\text{g/L}$ aguas arriba de la zona estuarina y en la zona estuarina sin intrusión, y 37,5 $\mu\text{g/L}$ en la zona con cuña salina (**Figura 4-20 A**). Este aumento gradual se representa espacialmente en la **Figura 4-21**.

En el caso del nitrógeno total, este aumento no se observa debido a la concentración mínima registrada en uno de los puntos de la zona con cuña salina (ER-5). Concretamente los valores de nitrógeno total en el área de estudio se presentaron entre 2,14 mg/L y 5 mg/L (**Figura 4-20 B**).

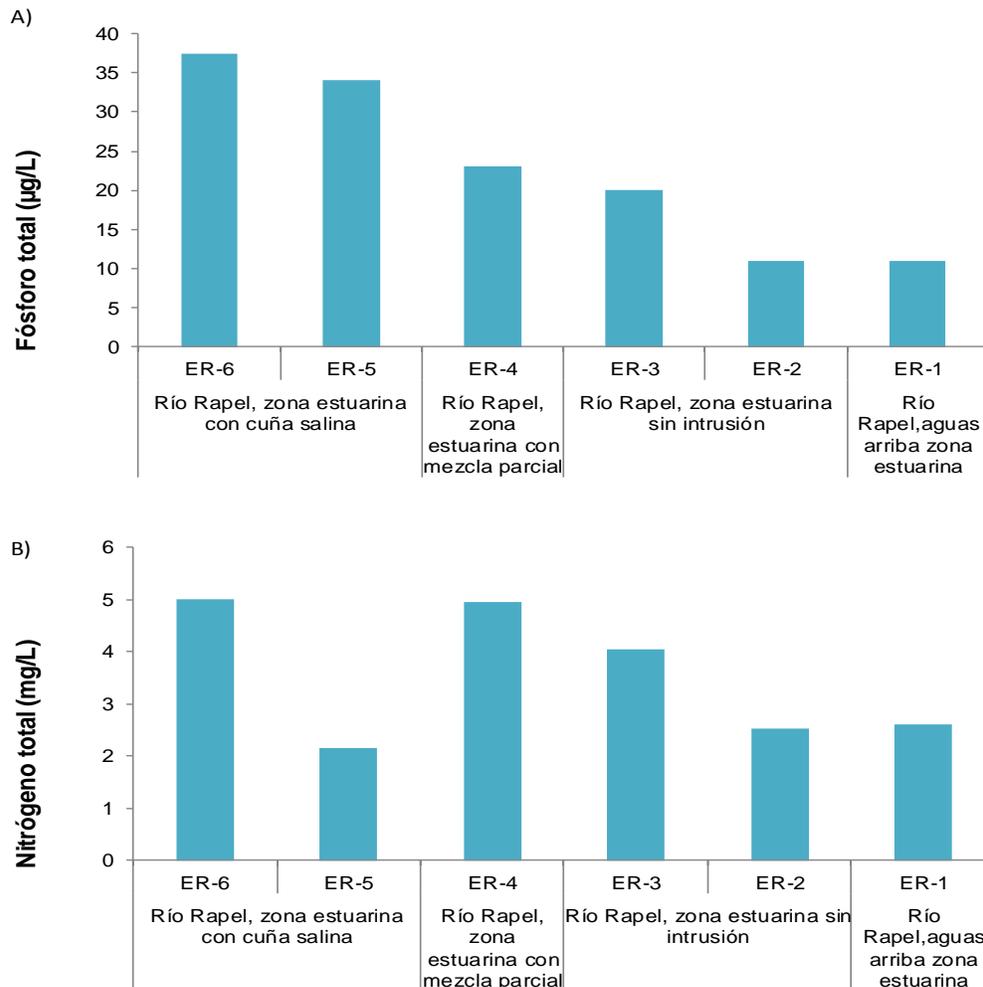


Figura 4-20 Nutrientes analizados en el estuario del río Rapel. Primavera 2016. A) Fósforo total, B) Nitrógeno total.

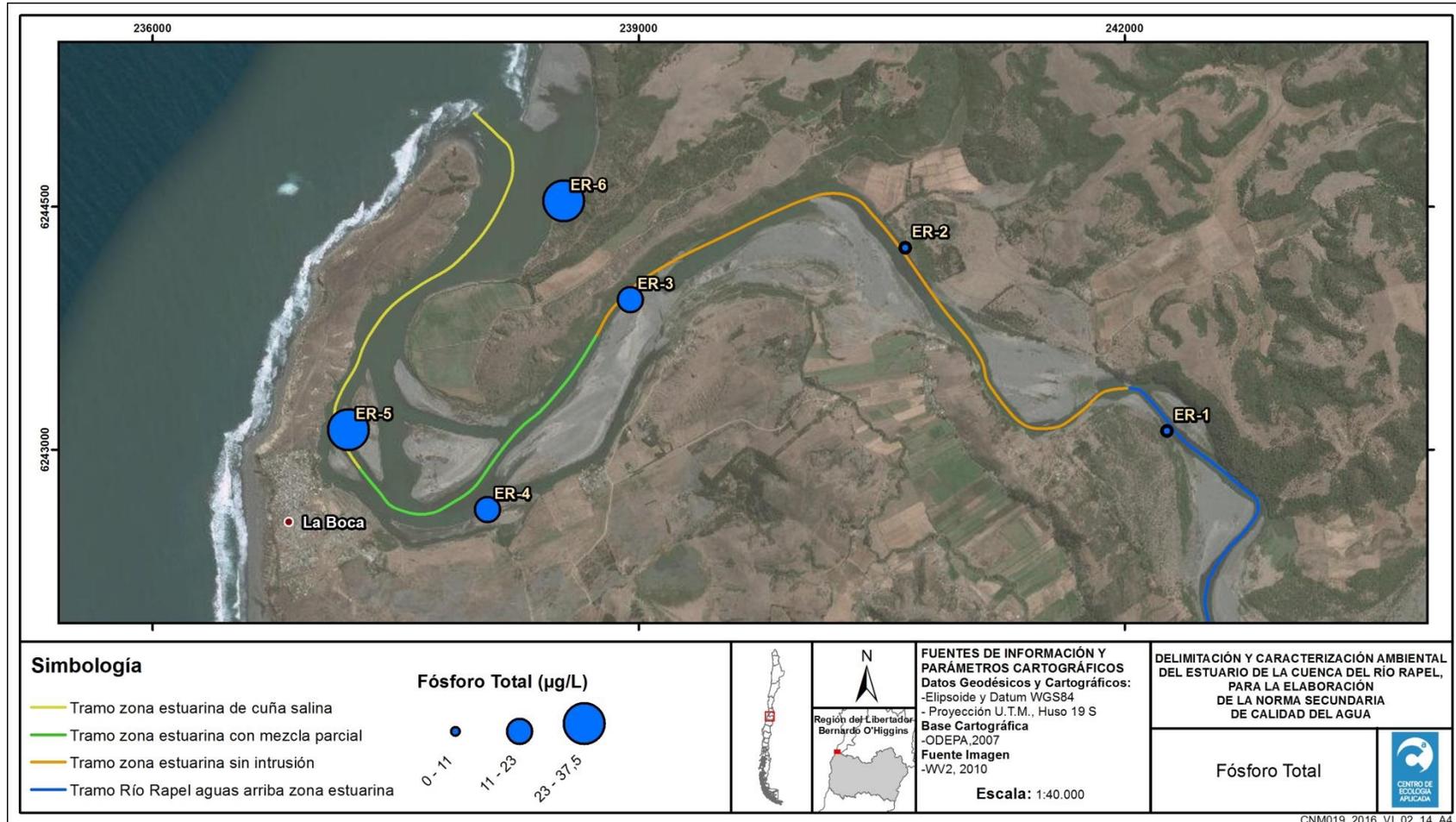


Figura 4-21 Rangos de fósforo total a lo largo del río Rapel en su estuario. Primavera 2016.

4.4.2.2 Parámetros microbiológicos

Los valores de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), se presentaron en todos los tramos del estuario del río Rapel, en concentraciones inferiores al límite de detección (<2 mg/L) (Anexo digital 1).

Los valores de clorofila "a" presentan un aparente aumento de las concentraciones en dirección del flujo del agua a excepción del último punto de muestreo, ubicado más cerca de la desembocadura, que presentó concentraciones inferiores al punto ER-5 ubicado dentro del mismo tramo. Concretamente los valores de clorofila se presentaron en concentraciones desde $0,6$ $\mu\text{g/L}$ aguas arriba de la zona estuarina, y $10,7$ $\mu\text{g/L}$ en el punto ER-5, ubicado en la zona con cuña salina (**Figura 4-22**).

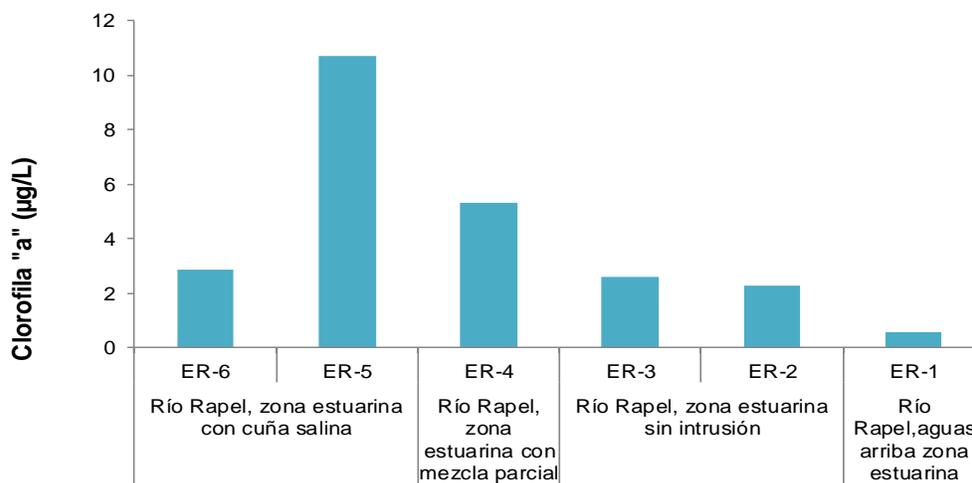


Figura 4-22 Clorofila "a" analizada en el estuario del Río Rapel. Primavera 2016.

4.4.2.3 Elementos mayoritarios

Los valores de carbonato presentaron concentraciones similares entre la mayoría de los puntos de muestreo independiente de los tramos del estuario, a excepción del punto ER-5 en la zona con cuña salina, donde se presentó la concentración más elevada. Específicamente, los valores de este parámetro se registraron entre $7,3$ mg/L y $22,0$ mg/L (**Figura 4-23 A**).

Las concentraciones de sulfato, presentaron un aumento en dirección del flujo del agua, siendo la zona estuarina con cuña salina, la que registró las mayores concentraciones de este parámetro en ambos puntos de muestreo. Concretamente, los valores de sulfato, se registraron entre 114 mg/L aguas arriba de la zona estuarina y en la zona sin intrusión, y 1244 mg/L registrados en la zona estuarina con cuña salina (**Figura 4-23 B**). Este comportamiento se observa espacialmente en la **Figura 4-24**.

Los cationes analizados, calcio, potasio, magnesio y sodio, presentaron un comportamiento similar, registrando las mayores concentraciones en el punto de muestreo ubicado más cercano a la desembocadura, en la zona con cuña salina, es decir ER-6; mientras que el resto de puntos de todos los tramos, presentaron concentraciones

similares entre ellos (**Figura 4-23 C, D, E, F**). El calcio en el área de estudio se presentó en concentraciones desde 57,2 mg/L en la zona sin intrusión, hasta 99,7 mg/L en la zona con cuña salina (**Figura 4-23 C**). Las concentraciones de potasio disuelto se presentaron en valores que van desde 4,8 mg/L aguas arriba de la zona estuarina, hasta 44,2 mg/L en la zona con cuña salina (**Figura 4-23 D**). El magnesio se presentó en concentraciones desde 10,1 mg/L aguas arriba de la zona estuarina, hasta 140,1 mg/L registrados en la zona con cuña salina (**Figura 4-23 E**). Finalmente, las concentraciones de sodio registradas en el área de estudio se registraron entre 22,8 mg/L aguas arriba de la zona estuarina y 824,6 mg/L en la zona con cuña salina (**Figura 4-23 F**).

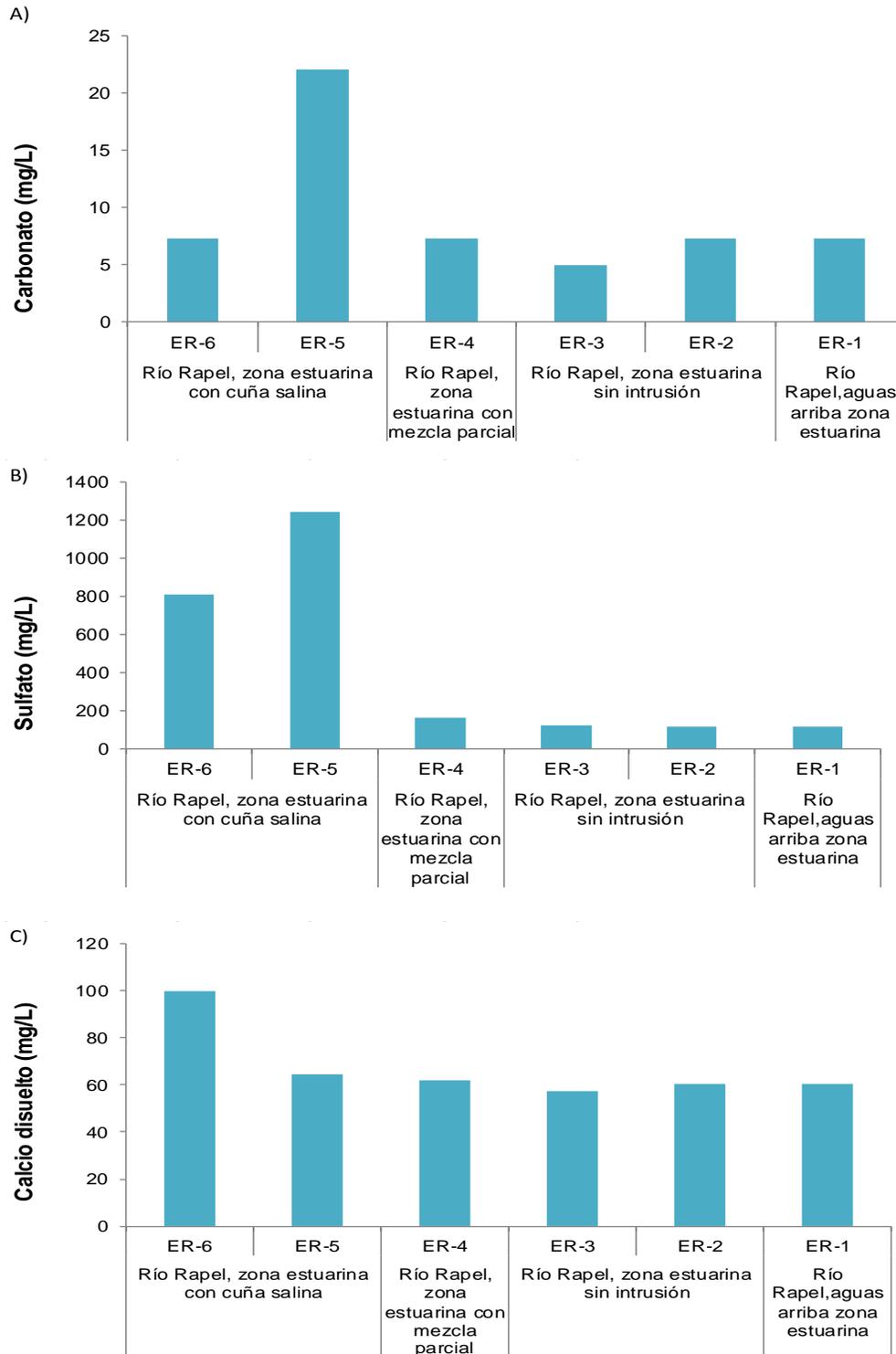


Figura 4-23 Elementos mayoritarios analizados en el estuario del río Rapel. Primavera 2016.
A) Carbono, B) Sulfato, C) Calcio disueltos

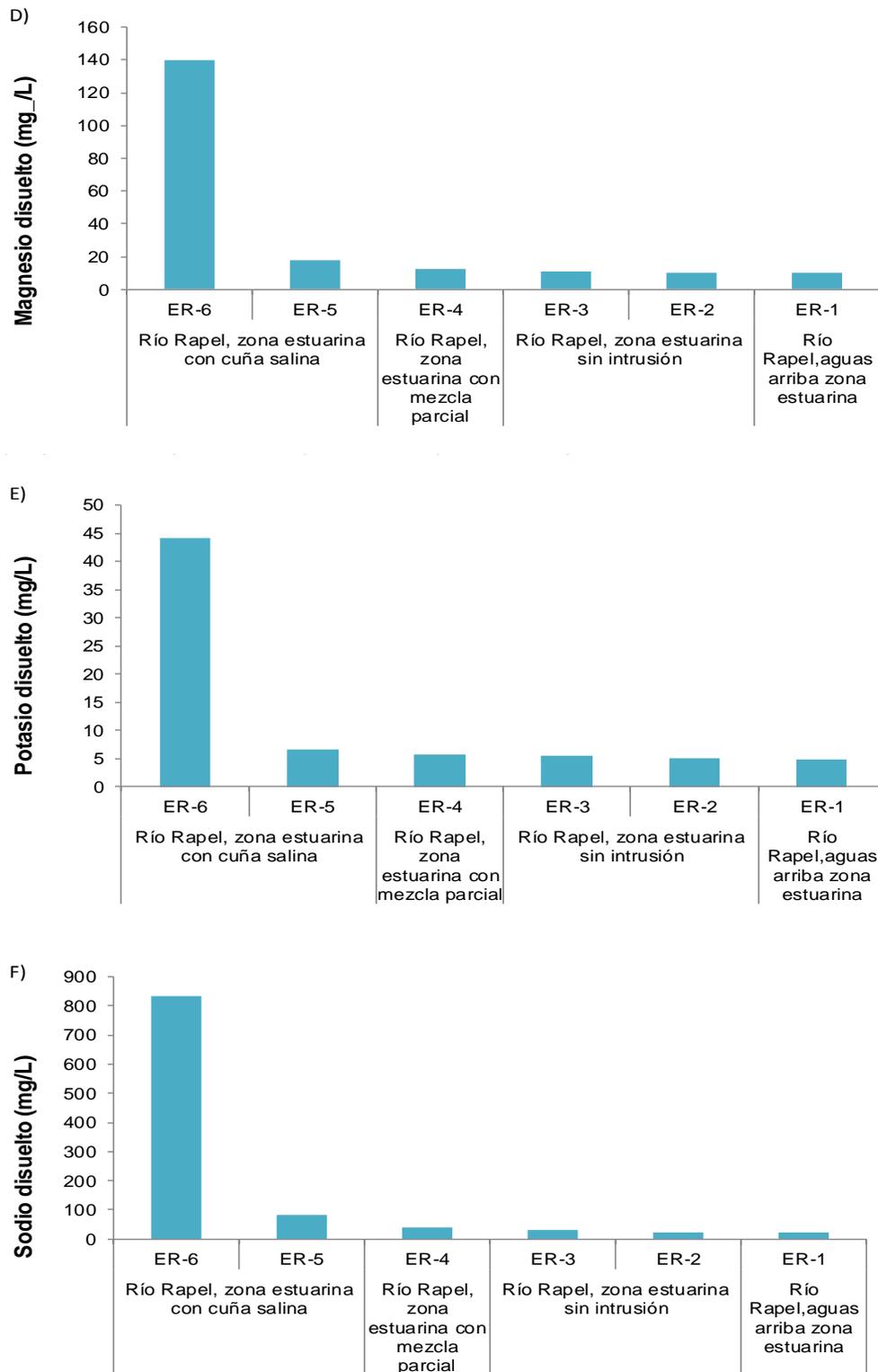


Figura 4-23 Elementos mayoritarios analizados en el estuario del río Rapel. Primavera 2016. (Continuación). D) Magnesio disueltos, E) Potasio disuelto, F) Sodio disuelto.

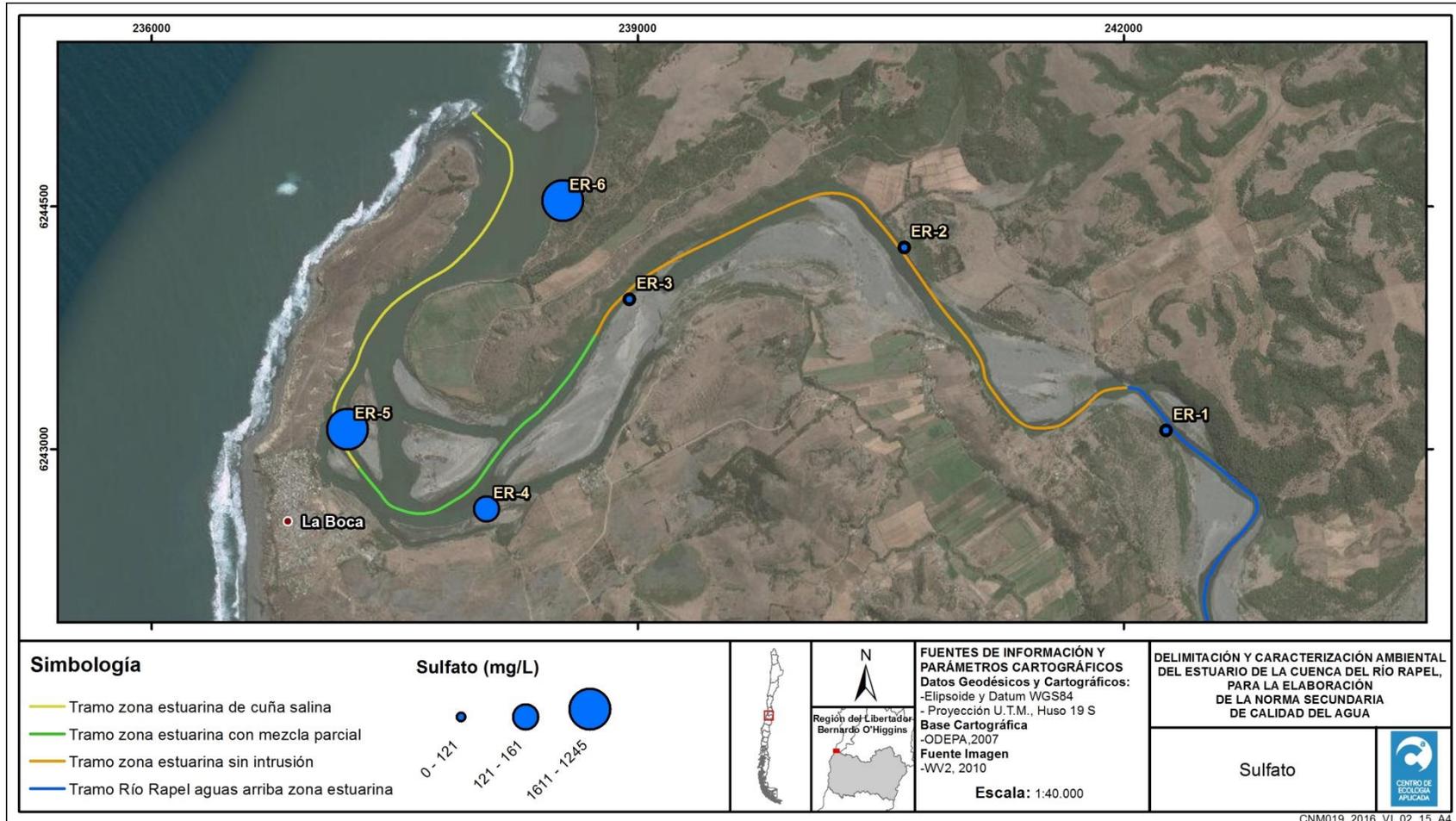


Figura 4-24 Rangos de concentraciones de sulfato a lo largo del río Rapel en su estuario.

4.4.2.4 Elementos totales

Entre los elementos totales, el mercurio, aluminio, cromo, cadmio y plomo, presentaron más del 50% o el 50% de los datos con concentraciones inferiores a los límites de detección, por tanto, y de acuerdo a la metodología, no se graficaron en el presente apartado. Sin embargo, las concentraciones de estos parámetros se presentan en el **ANEXO 3 BASE DE DATOS CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE AGUA Y SEDIMENTOS**. A continuación se describen solamente los elementos que presentaron concentraciones cuantificables en más del 50% de los datos.

Las concentraciones de arsénico disuelto presentaron un comportamiento independiente del flujo del agua en el estuario del río Rapel. Los valores de este parámetro se presentaron desde <0,005 mg/L registrados en la zona con cuña salina, hasta 0,015 mg/L registrados en esta misma zona (**Figura 4-25 A**).

Las concentraciones de cobre presentaron una disminución en dirección del flujo del agua, es decir, fueron mínimas hacia la desembocadura. Concretamente, las concentraciones se presentaron en valores entre 0,007 mg/L en la zona con cuña salina y 0,016 mg/L registrados aguas arriba de la zona estuarina (**Figura 4-25 B**). Este comportamiento espacial se observa en la **Figura 4-26**.

Al igual que para el cobre total, para el hierro se presentó una disminución en dirección del flujo del agua, en este caso a excepción del punto ER-5 que presentó una concentración levemente superior a ER-4. Las concentraciones de hierro en su fracción total en el área de estudio, se presentaron desde 0,0507 mg/L en la zona con cuña salina, hasta 0,302 mg/L aguas arriba de la zona estuarina (**Figura 4-25 C**).

Las concentraciones de zinc no presentaron un comportamiento definido de acuerdo al flujo del agua, es decir, de los tramos. Concretamente los valores de este parámetro se presentaron entre 0,0067 mg/L en la zona con cuña salina y 0,069 mg/L registrados en la zona estuarina sin intrusión (**Figura 4-25 D**).

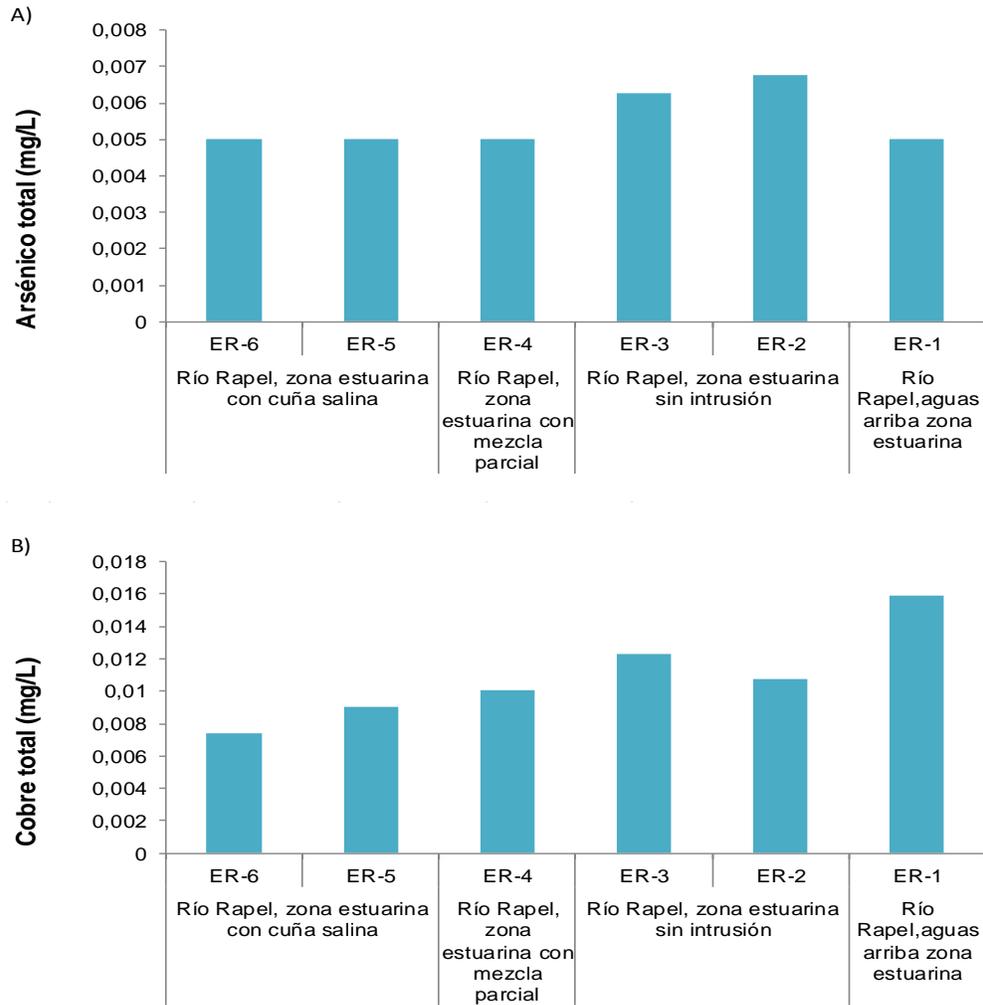


Figura 4-25 Elementos totales analizados en el estuario del río Rapel. Primavera 2016.
A) Arsénico total, B) Cobre total.

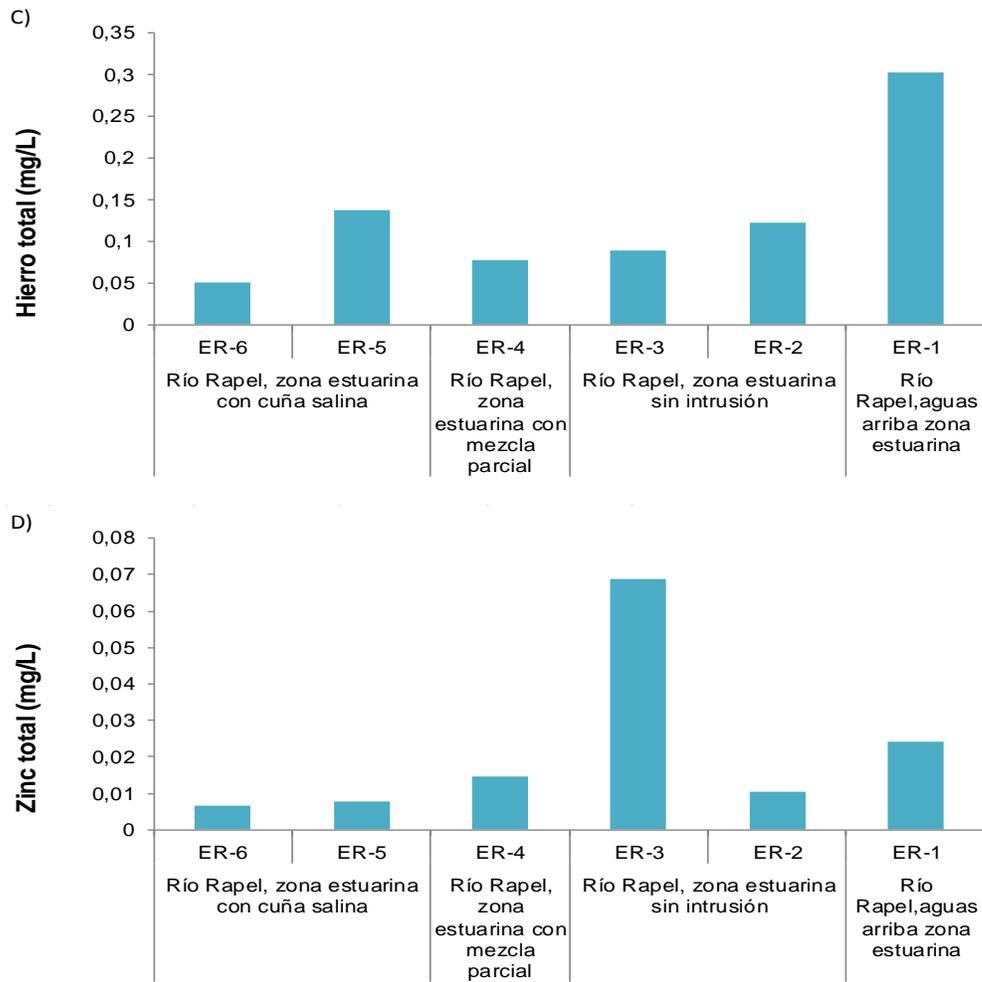


Figura 4-25 Elementos totales analizados en el estuario del río Rapel. Primavera 2016. (Continuación). D) Hierro total, E) Zinc total.

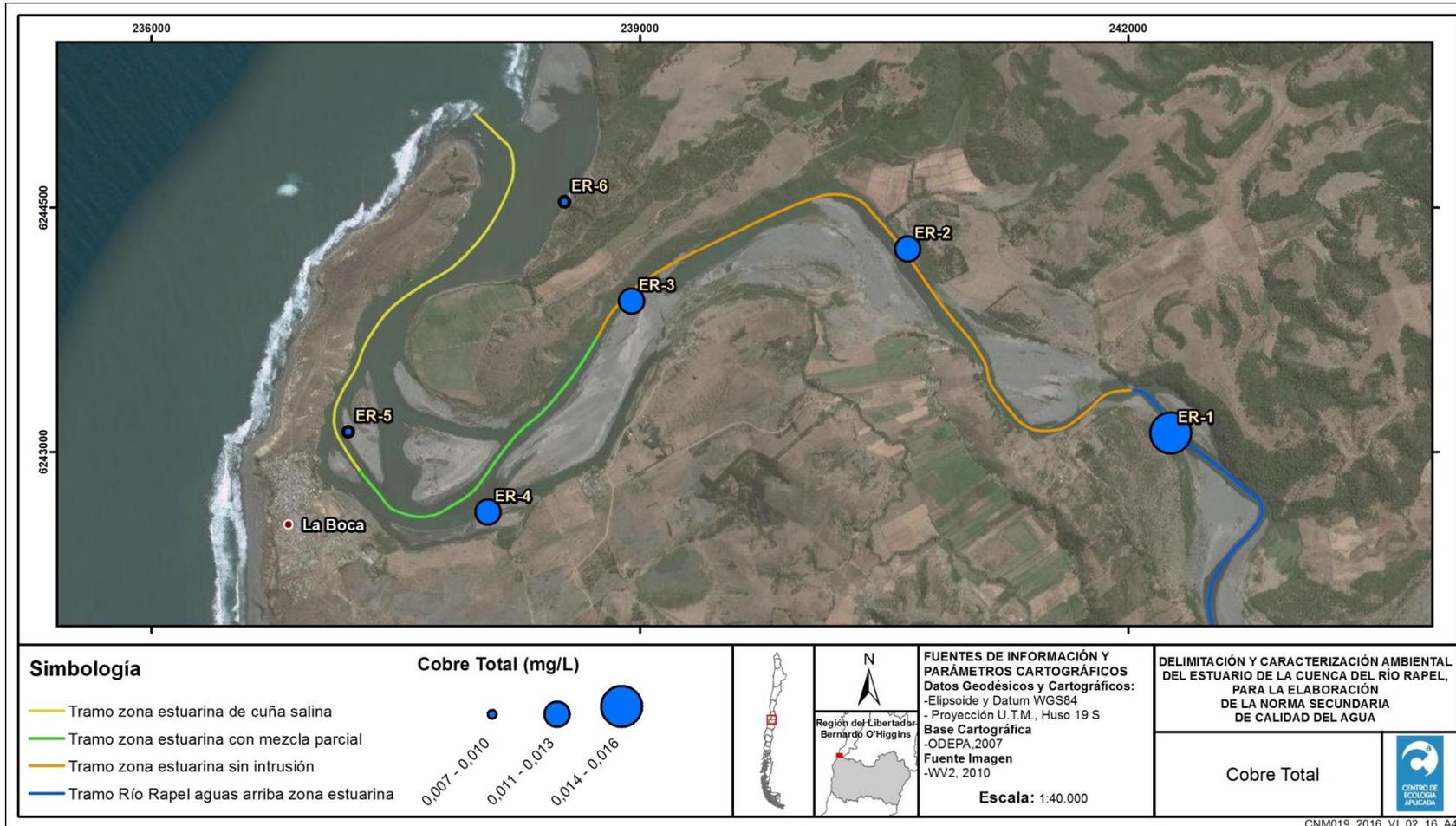


Figura 4-26 Rangos de concentraciones de cobre total a lo largo del río Rapel en su estuario.

4.4.2.5 Elementos disueltos

Entre los elementos disueltos, el mercurio, aluminio, arsénico, cadmio, plomo presentaron más del 50% de los valores inferiores al límite de detección, por lo que no fueron graficados en el presente apartado. No obstante, los datos de estos parámetros se presentan en el **ANEXO 3 BASE DE DATOS CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE AGUA Y SEDIMENTOS**. A continuación se describen el resto de elementos mayoritarios que sí fueron graficados, es decir, que presentaron más del 50% de los datos cuantificables.

Las concentraciones de cobre disuelto, no presentaron un aumento o disminución a lo largo del curso de agua, de hecho, su valor mínimo fue inferior al límite de detección (<0,003 mg/L) en la zona estuarina con mezcla parcial y en la zona sin intrusión, y el valor máximo se registró aguas arriba de la zona estuarina con 0,007 mg/L (**Figura 4-27 A**).

Las concentraciones de hierro disuelto se presentaron desde inferiores al límite de detección (<0,002 mg/L) en la zona con mezcla parcial y en la zona sin intrusión, hasta 0,036 mg/L en el punto ER-2 ubicado también en la zona sin intrusión. No se observó un comportamiento acorde al flujo del agua en dirección a la desembocadura (**Figura 4-27 B**).

El zinc disuelto tampoco presentó un comportamiento direccional con el flujo del agua. Para este parámetro no es posible establecer un valor mínimo en el área de estudio ya que los puntos ER-4 y ER-3 presentaron valores inferiores al límite de detección (<0,002 mg/L para metodología de agua dulce) y el punto ER-5 presentó un valor cuantificable pero inferior al mencionado límite. Esto es debido a que los puntos ER-5 y ER-6 presentan mayores conductividades y por tanto el tratamiento de la muestra es diferente, modificándose así el límite de detección. El máximo valor registrado de este parámetro durante la campaña de primavera fue 0,010 mg/L en la zona estuarina sin intrusión (**Figura 4-27 C**).

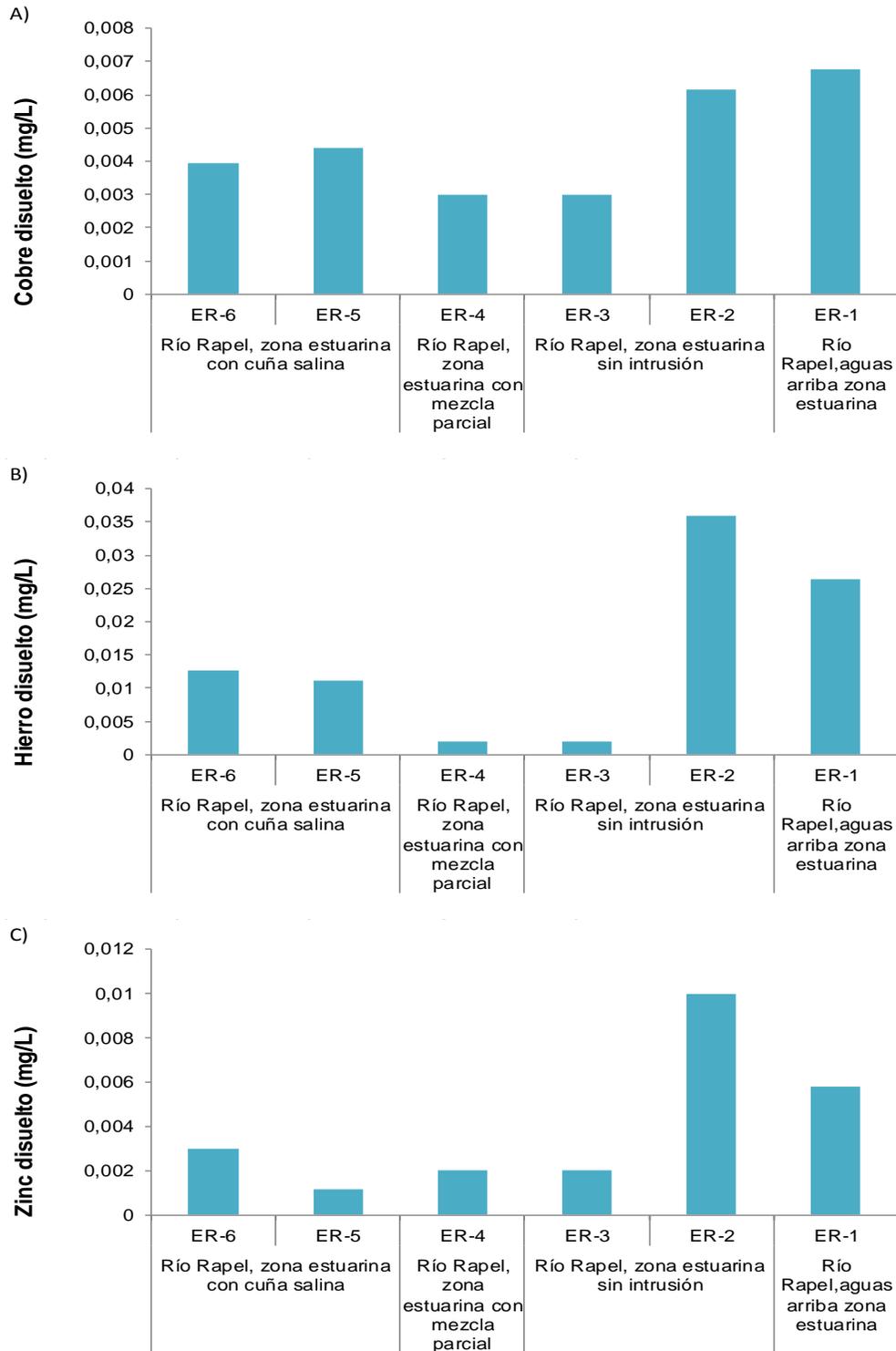


Figura 4-27 Elementos disueltos analizados en el estuario del río Rapel. Primavera 2016.
A) Cobre disuelto, B) Hierro disuelto, C) Zinc disueltos.

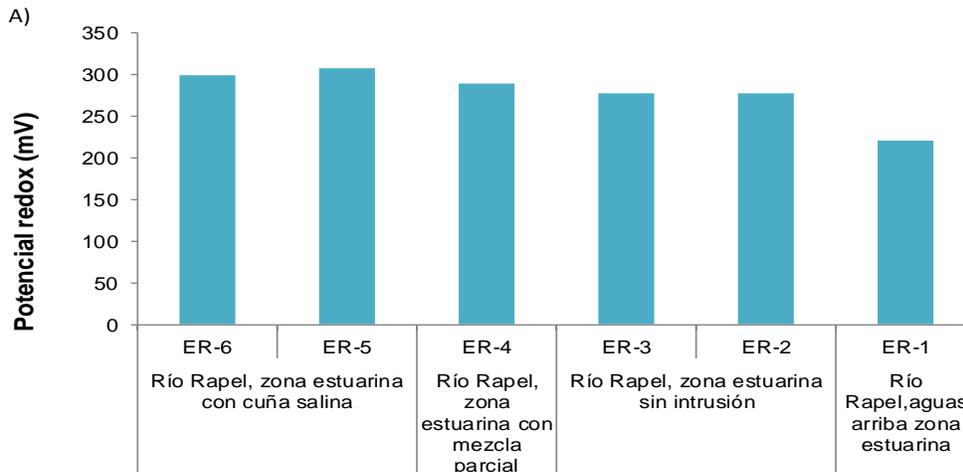
4.4.3 Calidad física y química de sedimentos

Es importante destacar que el río se encuentra regulado por el embalse y junto al proceso de generación determinan en buena medida el régimen del caudal del río aguas abajo del embalse. Es fundamental indicar que una buena parte de los sedimentos gruesos, que forman parte de lo transportado por la masa de agua, se encuentra en el embalse. En consecuencia, los valores actuales de granulometría deben considerarse en este contexto.

4.4.3.1 *In situ*

Los valores de potencial redox medidos en los sedimentos del estuario del río Rapel se presentaron en todos los tramos en condiciones oxidantes, es decir, valores positivos de este parámetro. No obstante, a lo largo del curso de agua se observó un leve aumento de los valores de potencial redox en dirección a la desembocadura. Los valores en el área de estudio se registraron entre 222 mV, aguas arriba de la zona estuarina, y 308 mV en la zona con cuña salina (**Figura 4-28 A**).

Los valores de temperatura medidos en los sedimentos del área de estudio se presentaron entre 17,1 °C en la zona con cuña salina y 22,9 °C aguas arriba de la zona estuarina. No se observó un comportamiento en conjunto con la dirección del flujo del agua (**Figura 4-28 B**).



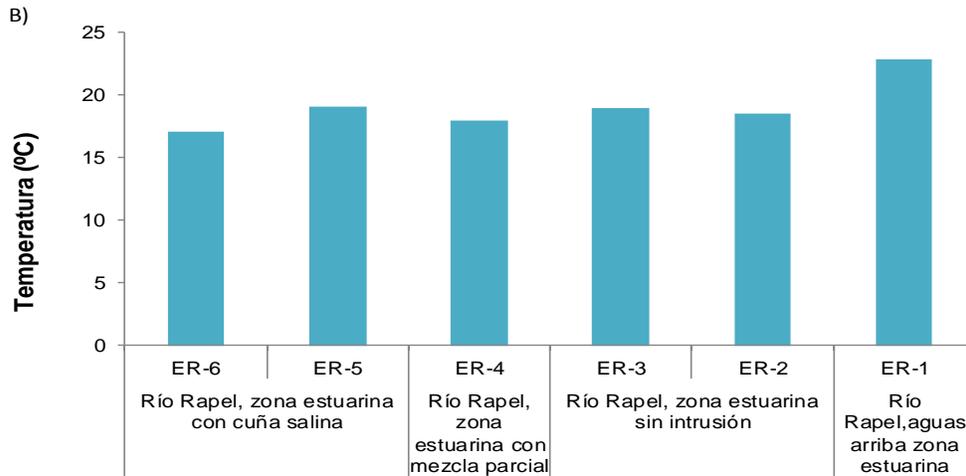


Figura 4-28 Parámetros in situ medidos en sedimentos en el estuario Rapel. Primavera 2016.

4.4.3.2 Granulometría

La composición granulométrica de los sedimentos registrada en el área de estudio no fue característica por tramos ni diferente en los distintos tramos. En la zona estuarina con cuña salina y en la zona con mezcla parcial, predominaron las arenas medias y arenas finas, en la zona sin intrusión, ER-3 se presentó predominancia de arenas medias y gruesas mientras que en ER-2 predominaron las arenas finas y muy finas, y finalmente aguas arriba de la zona sin intrusión predominaron las arenas medias y gruesas (**Figura 4-29**).

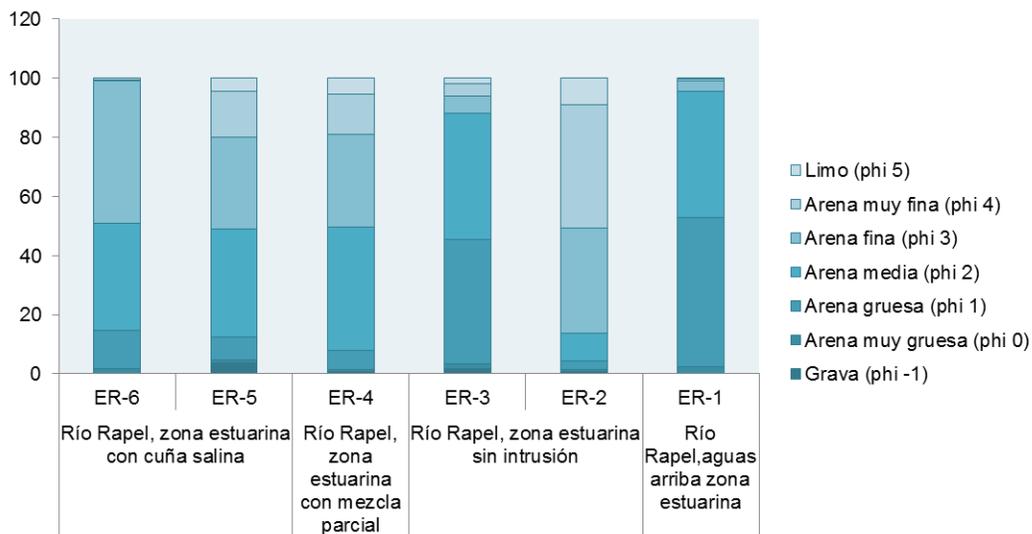


Figura 4-29 Composición granulométrica de los sedimentos del estuario del río Rapel. Primavera 2016.

4.4.3.3 Materia orgánica

Las concentraciones de materia orgánica no presentaron un comportamiento en dirección del flujo del agua. Los valores de este parámetro se presentaron desde 5,2 g/kg aguas arriba de la zona estuarina, hasta 38,3 g/kg en la zona sin intrusión (**Figura 4-30**).

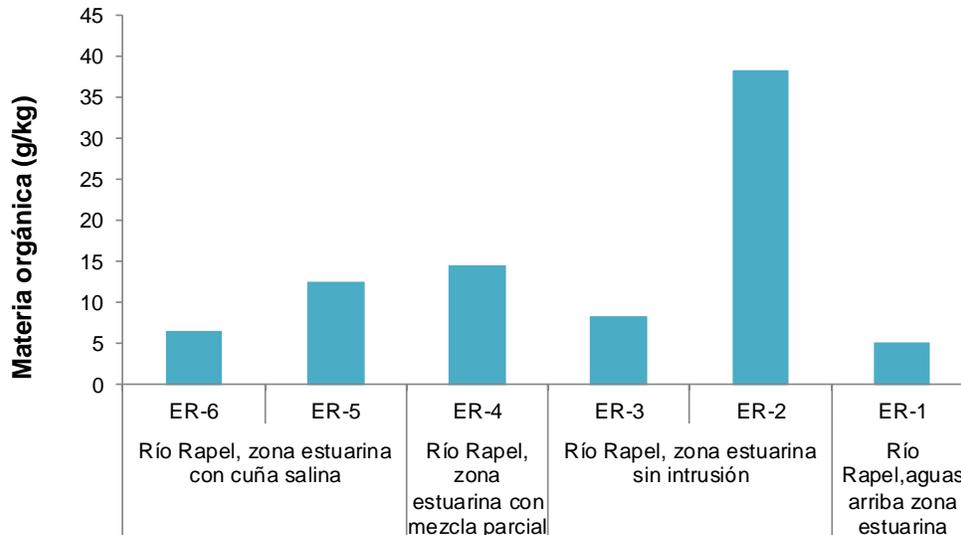


Figura 4-30 Materia orgánica de los sedimentos del estuario del río Rapel. Primavera 2016

4.4.3.4 Nutrientes

El comportamiento del fósforo total analizado en los sedimentos del área de estudio se presentó en general en aumento en dirección del flujo del agua, excepto por el punto ER-6 ubicado cercano a la desembocadura, donde la concentración disminuyó con respecto al punto anterior. Las concentraciones de este parámetro se registraron entre 192,6 mg/kg aguas arriba de la zona estuarina, y 560,9 mg/kg en la zona con cuña salina (**Figura 4-31 A**).

Las concentraciones de nitrógeno no presentaron un comportamiento de aumento o disminución en dirección del flujo del agua. Los valores registrados se presentaron entre 35 mg/kg en la zona con cuña salina y 1237 mg/kg registrados en la zona sin intrusión (**Figura 4-31 B**).

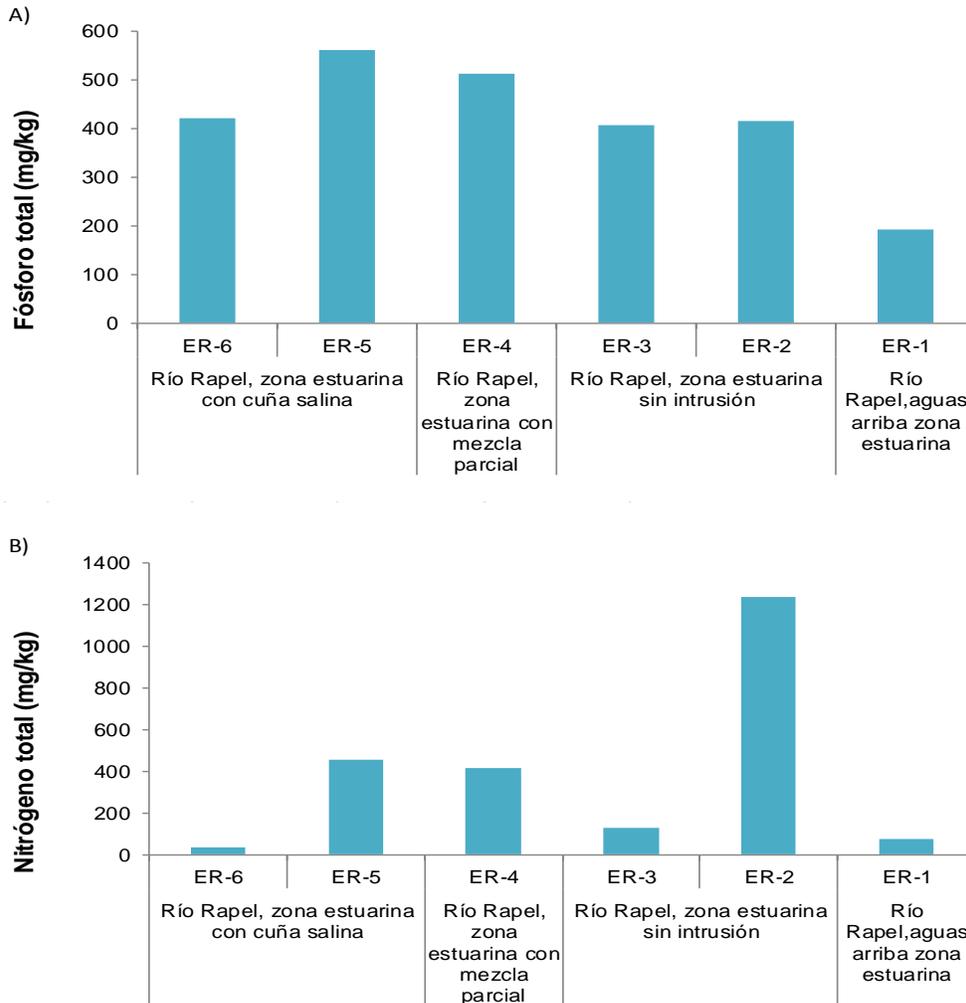


Figura 4-31 Nutrientes analizados en los sedimentos del estuario del río Rapel. Primavera 2016. A) Fósforo total, B) Nitrógeno total.

4.4.3.5 Elementos totales

Entre los elementos totales analizados en los sedimentos, el mercurio y el cromo presentaron valores inferiores a los límites de detección en la totalidad de los puntos de muestreo del sector de estudio. En el caso del arsénico, un 50% de los valores fueron inferiores al límite de detección. Por tanto, estos tres parámetros no fueron graficados en el presente informe. Sin embargo, sus valores se presentan en **ANEXO 3 BASE DE DATOS CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE AGUA Y SEDIMENTOS**.

En cuanto a las concentraciones de aluminio, presentaron un aumento en dirección del flujo del agua excepto por el punto de muestreo ER-2 que presentó mayores concentraciones que el punto ubicado inmediatamente aguas abajo del mismo. Las

concentraciones registradas se presentaron en el rango desde 6024 mg/kg aguas arriba de la zona estuarina, hasta 19535 mg/kg en la zona con cuña salina (**Figura 4-32 A**).

Las concentraciones de cadmio, no presentaron un comportamiento de acuerdo al flujo del agua, es decir, no se observó un aumento o disminución en dirección a la desembocadura. Las concentraciones de este parámetro analizadas durante la campaña de muestreo se presentaron entre 0,4 mg/kg aguas arriba de la zona estuarina, y 0,9 mg/kg de concentración máxima, registrada en la zona con mezcla parcial (**Figura 4-32 B**).

Las concentraciones de cobre analizadas en los sedimentos tampoco responden a un comportamiento en dirección del flujo del agua. Estas, se presentaron en valores desde 19,5 mg/kg aguas arriba de la zona estuarina, hasta 65,6 mg/kg en la zona estuarina sin intrusión (**Figura 4-32 C**).

El hierro analizado en los sedimentos del estuario del río Rapel, no presentó un aumento o disminución de sus concentraciones a lo largo del curso de agua. Los valores de este parámetro se registraron desde 143554 mg/kg aguas arriba de la zona estuarina, hasta 464870 mg/kg en la zona con mezcla parcial (**Figura 4-32 D**).

Las concentraciones de plomo medidas en los sedimentos no presentaron un aumento o disminución en dirección aguas abajo. Los valores de plomo se presentaron desde inferiores al límite de detección (<0,7 mg/kg) aguas arriba de la zona estuarina, y 11,5 mg/kg en la zona sin intrusión (**Figura 4-32 E**).

El comportamiento del zinc tampoco responde a un aumento o disminución en dirección aguas abajo a lo largo del curso de agua. Las concentraciones registradas fueron desde inferiores al límite de detección (<0,2 mg/kg) aguas arriba de la zona estuarina hasta 22,8 mg/kg registrados en la zona con mezcla (**Figura 4-32 F**).

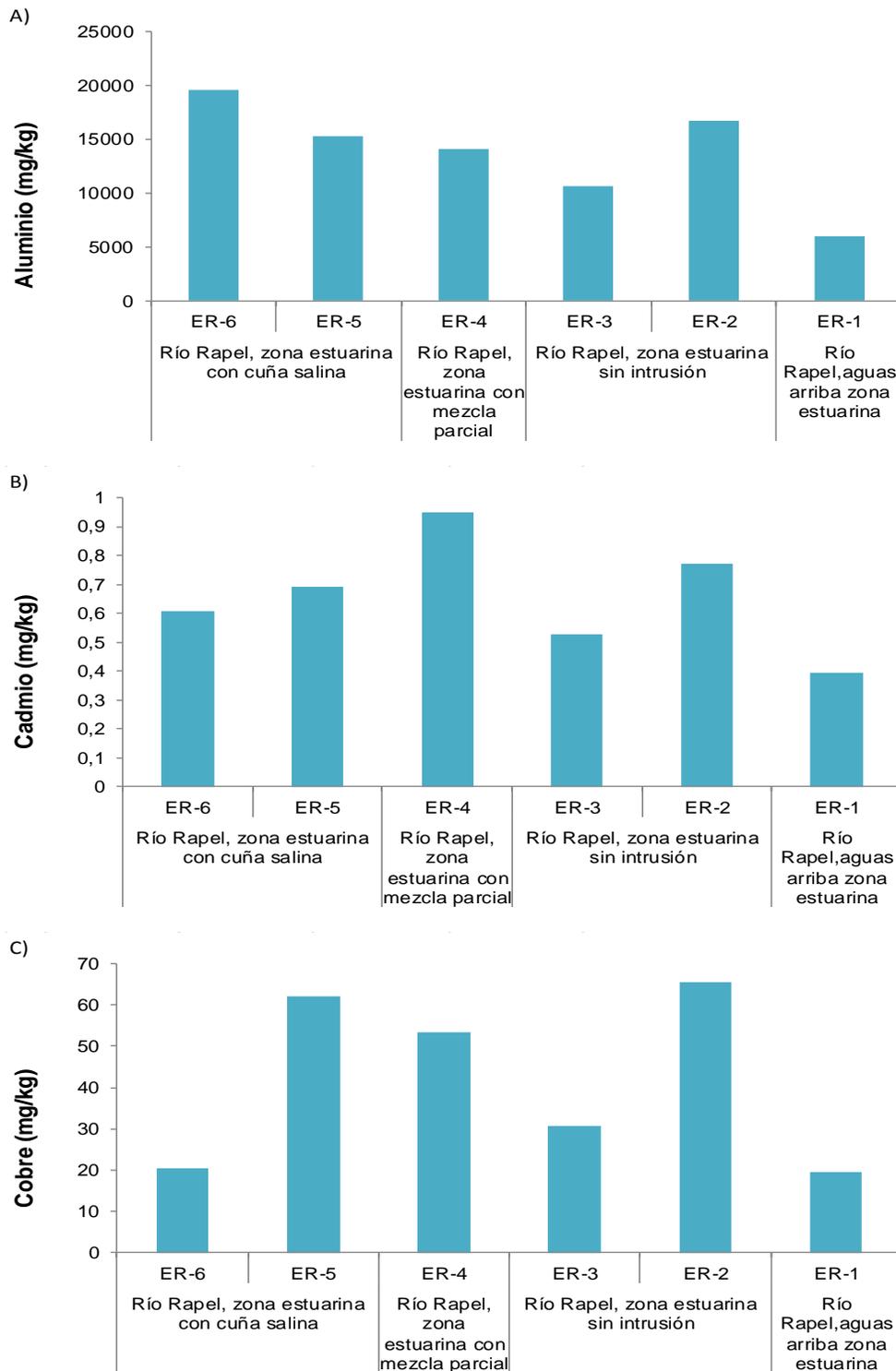


Figura 4-32 Elementos analizados en los sedimentos del estuario del río Rapel. Primavera 2016.

A) Aluminio, B) Cadmio, C) Cromo

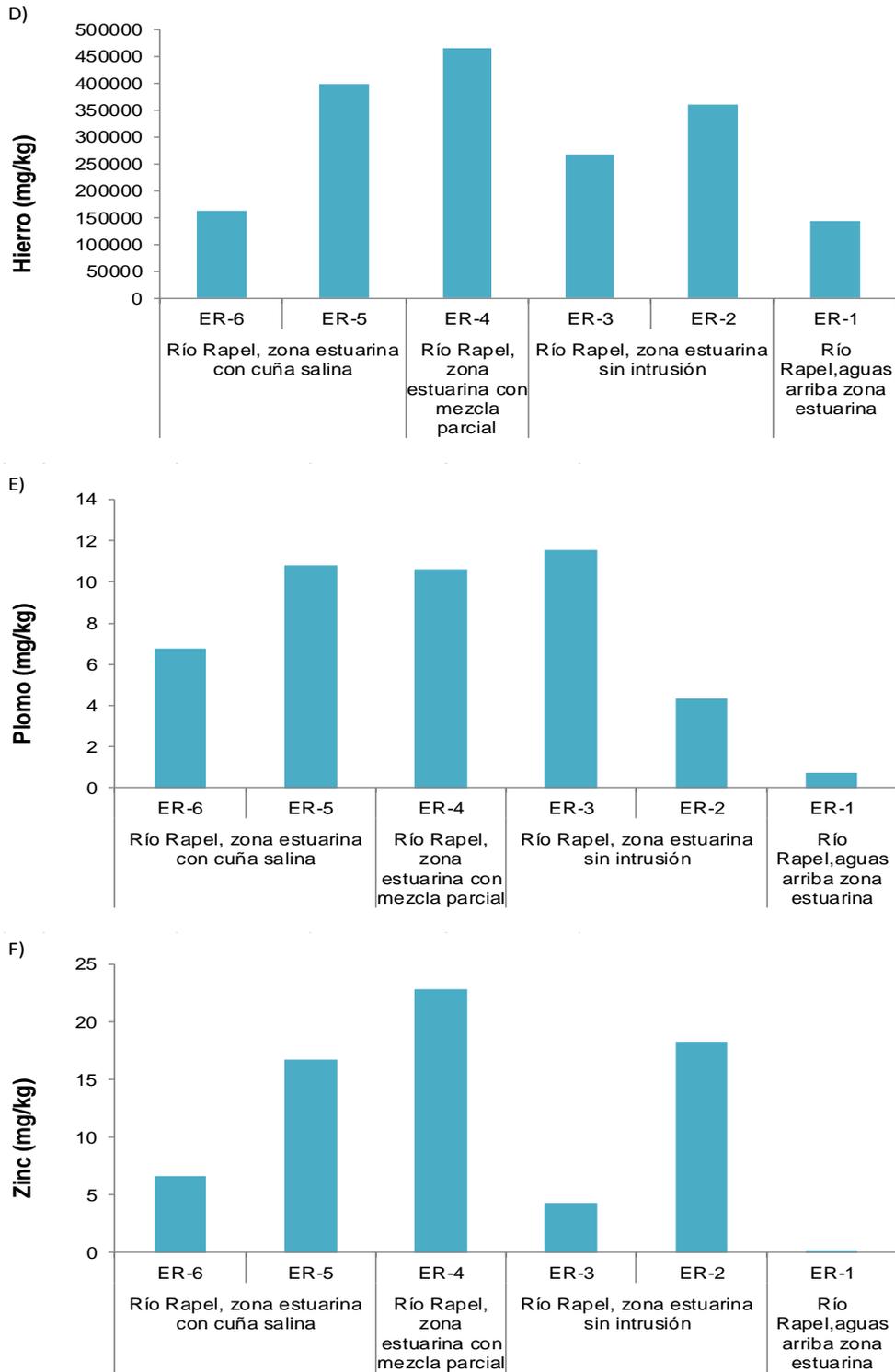


Figura 4-32 Elementos analizados en los sedimentos del estuario del río Rapel. Primavera 2016. (Continuación) D) Hierro, E) Plomo, F) Zinc

4.5 Establecer una línea de base biológica de las comunidades acuáticas del estuario.

En el presente acápite se entregan los resultados de la caracterización del hábitat, de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos, fitoplancton y fauna íctica.

4.5.1 Caracterización del Hábitat

En las **Tabla 4.2** y **Tabla 4.3** se muestra las características del hábitat e hidrobiológicas de cada punto de muestreo ejecutado. Además, se entrega un registro fotográfico de estos puntos (**ANEXO 1 FOTOGRAFICO**).

- Río Rapel, aguas arriba de la zona de mezcla parcial

La caracterización de este sector se realizó en pleamar. En esta zona se estableció el punto ER-1, que correspondería al río Rapel, posee una morfología de meandros con aguas de corriente de baja profundidad y claras. El lecho del río en esta zona se compone principalmente por una matriz de arena con piedras y gravas, los fondos están cubiertos por macrófitas enraizadas subemergentes (**Tabla 4.2**). En este punto el río tiene 25 m de ancho y una profundidad máxima de 1 m (**Tabla 4.3**). La vegetación ribereña se compone de sauces y especies de bosque esclerófilo, además de zarzamora, mientras que en el lecho del río se observaron algas verdes filamentosas en forma dominante pero también se encontraron macrófitas (**Figura 4-33**). En el entorno se pudieron observar aves como tordos, jotes, churrín del norte, chirihues y pato real (**Figura 4-34**).

- Zona sin intrusión salina

La caracterización de este sector se realizó en pleamar. En esta zona se establecieron los puntos ER-2 y ER-3, que correspondería a la zona estuarina del río Rapel, sin intrusión salina. En esta zona el río posee una morfología de meandros con aguas de corriente de baja profundidad y claras. El lecho del río en esta zona se compone principalmente por una matriz de arena con piedras y gravas, los fondos están cubiertos por macrófitas enraizadas subemergentes (**Tabla 4.2**). El ancho del río en el punto ER-2 es de 120 m y la profundidad medida fue de 0,8 metros, mientras que en el punto ER-3 la profundidad del disco Secchi fue de 1,2 metros (**Tabla 4.3**). En el punto ER-2 Las plantas arbustivas del género *Baccharis* dominaron la vegetación ribereña, pero también se observaron eucaliptus. En la vegetación acuática se observaron algas verdes filamentosas (**Figura 4-33**). En las aves solamente se observaron gaviotas dominicanas (**Figura 4-34**). En el punto R-3, se detectó presencia de cirrípedos en las rocas, organismos bentónicos que por estar fijos al sustrato no aparecen en las muestras recolectadas con los métodos utilizados (ver metodología). La vegetación ribereña estuvo dominada por plantas arbustivas del género *Baccharis*, además es especies de bosque esclerófilo. En la

vegetación acuática se observan algas verdes filamentosas aunque con dominancia de macrófitas subemergentes (**Figura 4-33**). Dentro de las aves se observaron churretes y gansos (**Figura 4-34**).

- Zona de mezcla parcial

La descripción de esta zona se realizó en baja mar muestreando el punto ER-4. En este tramo el río Rapel presenta una morfología de trenzados, en los cuales se observa una variación en su ancho y profundidad. El ancho del río fue de 200 m en el punto analizado. Las aguas mantienen su característica de corrientosas con un aumento de la turbidez, las plantas acuáticas colonizan las orillas del cauce (**Tabla 4.2**). La vegetación ribereña se compuso de Juncáceas y Lupinos, mientras que la vegetación acuática estuvo dominada por algas verdes filamentosas (pelillo verde) con la aparición de macrófitas como consecuencia de la disminución de la salinidad en este tramo, donde ya no se detectan macroalgas pardas, rojas, ni verdes, a excepción de aquella de morfología filamentosas, que al parecer es tolerante a un amplio rango de salinidad por encontrarse incluso aguas arriba del estuario (**Figura 4-33**). Entre las aves se avistaron gaviotas dominicanas y gaviota Cáhuil (**Figura 4-34**).

- Zona de cuña salina

La descripción de esta zona se realizó cuando la marea estaba subiendo. A medida que el río Rapel llega a su desembocadura, la forma del río comienza a cambiar de una morfología trenzada a un curso recto. En los puntos ER-5 y ER-6 el lecho presenta profundidades superiores a 1 metro y un ancho que alcanza los 280 m en ER-6. Las aguas se tornan turbias con presencia de macrófitas en las orillas y algas marinas en el fondo del punto ER-6 (**Tabla 4.2**). El ancho del río aumenta a medida que se acerca a la desembocadura, llegando hasta 280 m en el punto medido en ER-6. El disco Secchi mostró una profundidad de 1,7 y 1,25 m en ER-5 y ER-6 respectivamente (**Tabla 4.3**). En el punto R-5 la vegetación ribereña se constituyó principalmente de Juncáceas y suculentas, mientras que la vegetación acuática estuvo dominada por algas verdes filamentosas, aunque también se observaron otras especies de macroalgas (**Figura 4-33**). En este punto y sus alrededores se avistaron aves de nombres comunes: perrito, gaviota Cáhuil, Golondrina chilena, pilpilén, colegial, gaviota dominicana y churrín (**Figura 4-34**). En el Punto ER-6 la vegetación ribereña se compuso de plantas juncáceas, herbáceas y suculentas, con pinos y eucaliptus en planicies. La vegetación acuática estuvo compuesta de una variedad de macroalgas marinas, reconociéndose algas verdes de morfología filamentosas (por ejemplo *Enteromorpha* sp.), y folioso (*Ulva* sp.), algunas algas pardas, como *Macrocystis* sp. y *Lessonia* sp., y algas rojas, entre las cuales se identificaron como *Sarcothalia crispata*, *Laurencia chilensis* y *Ahnfeltiopsis* sp. (**Figura 4-33**). En los alrededores de este punto se avistaron la gaviota de Cáhuil, cisnes, piqueros y pelícanos, estos dos últimos característicos de ambientes marinos (**Figura 4-34**).

Tabla 4.2. Características del hábitat.

| Punto de muestreo/ característica del medio | Tramos | Forma del río y condición | Transparencia del agua | Característica del sedimento | Vegetación de ribera dominante | Vegetación acuática dominante | Presencia de aves | Contaminación aparente |
|---|--|--|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------|
| ER-1 | Río Rapel, aguas arriba del estuario | Cauce recto con aguas de corriente | Aguas claras | Arenoso | Árboles y arbustos | Macrófitas enraizadas subemergentes | Aves carroñeras | No |
| ER-2 | Zona estuarina sin intrusión | Cauce recto con aguas de corriente | Aguas claras | Fangoso | Arbustos | Macrófitas enraizadas subemergentes | Aves marinas | No |
| ER-3 | | Cauce trezado con aguas de corriente | Semi-turbia | Arenoso | Árboles | Macrófitas enraizadas subemergentes | Sin presencia | No |
| ER-4 | Zona estuarina de mezcla parcial | Cauce trezado con aguas de corriente | Semi-turbia | Arenoso | Arbustos | Macrófitas enraizadas subemergentes | Aves marinas | No |
| ER-5 | Zona estuarina con cuña salina | Cauce trezado con aguas de corriente | Turbia | Arenoso | Herbáceas | Algas verdes filamentosas | Aves Marinas y acuáticas | No |
| ER-6 | | Cauce en estuario con aguas posadas y corriente | Turbia | Arenoso | Macrófitas | Algas verdes filamentosas y foliosas, algas rojas filamentosas y foliosas, algas pardas talosas. | Aves Marinas y acuáticas | No |

Tabla 4.3. Características hidrofísicas.

| Tramo | Punto de muestreo /característica Hidrobiológicas | Ancho (m) | Profundidad (m) | Profundidad Disco Secchi (m) |
|--------------------------------------|--|-----------|-----------------|---------------------------------|
| Río Rapel, aguas arriba del estuario | ER-1 | 25 | 1 | - |
| Zona estuarina, sin intrusión salina | ER-2 | 120 | 0,8 | - |
| | ER-3 | 70 | >1 | 1,2 |
| Zona estuarina con mezcla parcial | ER-4 | 200 | 0,8 | - |
| Zona estuarina con cuña salina | ER-5 | 170 | >1 | 1,7 |
| | ER-6 | 280 | >1 | 1,25 |

- La profundidad de la estación es demasiado baja para observar la profundidad a la que el disco Secchi deja de ser visible.

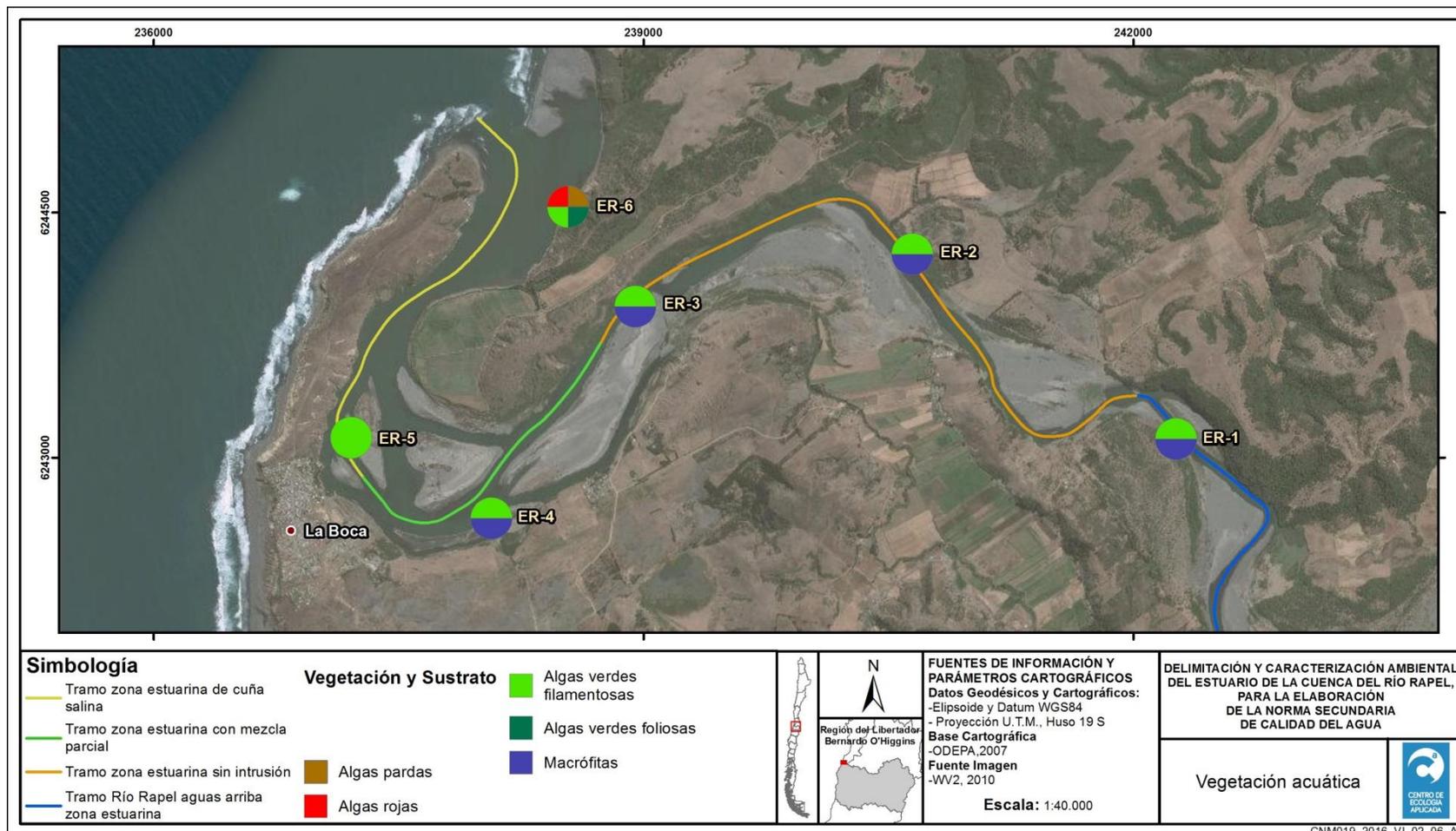
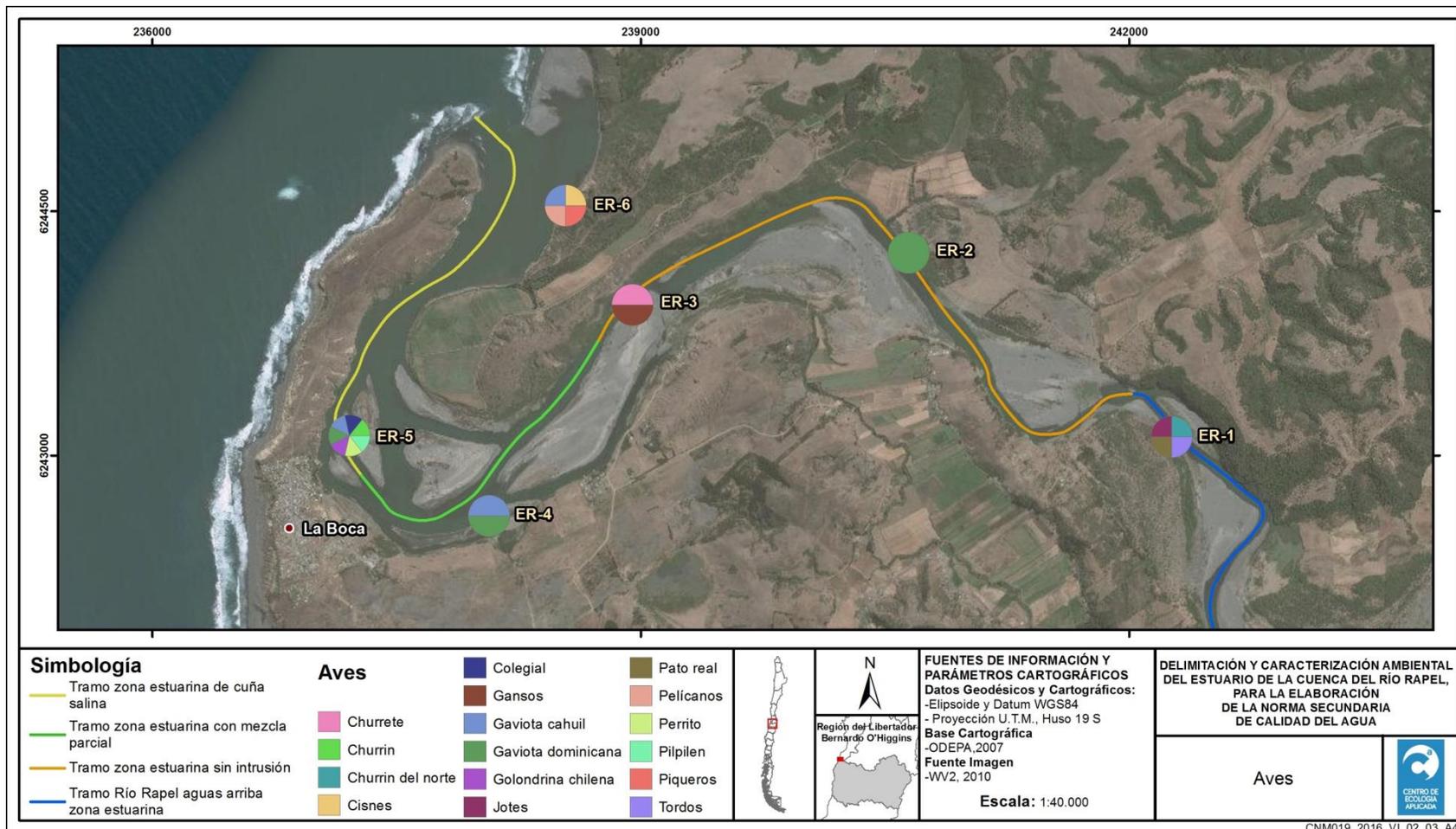


Figura 4-33. Vegetación acuática en el área de estudio.



CNM019_2016_V1_02_03_A4

Figura 4-34. Aves avistadas por puntos de muestreo y por tramos

4.5.2 Macroinvertebrados bentónicos

Los resultados del muestreo de fauna bentónica realizada en cada punto de monitoreo se muestran en la **Tabla 4.4**. El tramo con mayor riqueza de especies fue aquel ubicado el río Rapel, aguas arriba de la zona estuarina (ER-1) con 9 taxa, seguido del tramo de la zona estuarina sin intrusión de aguas marinas (ER-2 y ER-3), ambos con 8 taxa. En zona estuarina con cuña salina se detectó la menor riqueza con solo 1 taxón en el punto más cercano a la desembocadura. Por otro lado, la mayor abundancia de este grupo se encontró en la zona de mezcla parcial del estuario (ER-4) seguido de la zona estuarina con cuña salina (ER-5) (**Figura 4-35**). La composición de taxa cambio de acuerdo los diferentes tramos del río Rapel y su estuario, es así como en los tramos más alejados de la desembocadura hubo una alta presencia y abundancia de insectos, en el tramo de mezcla parcial se detectaron grupos de organismos semejantes a lo observado en el río Rapel y en la zona sin intrusión salina (**Figura 4-36**). En la zona de cuña salina se detectó una especie de decápodo que habita en ambientes estuarinos y también poliquetos que también estaban presentes en el punto de la zona de mezcla parcial (Pulgar *et al.*, 1995).

4.5.3 Fitoplancton

Los resultados del muestreo del fitoplancton realizado en cada punto de monitoreo se muestran en la **Tabla 4.5**. La mayor riqueza taxonómica se encontró en el punto ER-4, ubicado en la zona de mezcla parcial, denotando la probablemente existencia tanto de comunidades marinas como de agua dulce. Por otro lado, la zona de cuña salina mostró la menor riqueza de taxa. Por otro lado la mayor abundancia total de este componente se determinó en la zona estuarina con cuña salina en el punto cercano a la zona de mezcla parcial (ER-5), mientras que la menores abundancias se registraron en el punto más cercano a la desembocadura (ER-6) y en la zona sin intrusión salina (ER-2) (**Figura 4-37**). En cuanto a la composición de las comunidades, se pudo observar que la mayoría de las taxa se distribuye en los distintos ambientes que determinan los tramos del estuario y del río (**Figura 4-38**).

Tabla 4.4. Listado taxonómico, riqueza y abundancia de fauna bentónica en cada punto de muestreo.

| | | | | TRAMOS | | | | | |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|---------------|----------------|-------------|
| | | | | Aguas arriba de estuario | Sin intrusión salina | | | Mezcla parcial | Cuña salina |
| Phylum o Clase | Orden | Familia | Taxa | ER-1 | ER-2 | ER-3 | ER-4 | ER-5 | ER-6 |
| Arachnida | Acari (Subclase) | - | Acari indet. | 0,0 | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Gastropoda | Basommatophora | Chilinidae | <i>Chilina</i> sp. | 14,8 | 66,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Littorinimorpha | Cochliopidae | <i>Littoridina</i> sp. | 85,2 | 0,0 | 3,7 | 185,2 | 0,0 | 0,0 |
| Insecta | Coleoptera | Elmidae | Elmidae adulto indet. | 0,0 | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | Diptera | Chironomidae | Chironominae indet. | 29,6 | 125,9 | 29,6 | 463,0 | 0,0 |
| | | | Diamesinae (heptagyiae) indet. | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Dolichopodidae | | Dolichopodidae indet. | 0,0 | 0,0 | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Empididae | | Empididae indet. | 0,0 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tipulidae | Tipulidae indet. | 0,0 | 0,0 | 33,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Trichoptera | Hydroptilidae | <i>Hydroptila pulestoni</i> | 0,0 | 48,1 | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Malacostraca | Amphipoda | Hyalellidae | <i>Hyalella</i> sp. | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | Melitidae | <i>Melita gayi</i> | 0,0 | 0,0 | 14,8 | 185,2 | 0,0 | 0,0 |
| | Decapoda | Aeglidae | <i>Aegla</i> sp. | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | Paleomonidae | <i>Cryphiops caementarius</i> | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | Varunidae | <i>Hemigrapsus crenulatus</i> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 92,6 | 92,6 |
| Nematoda | - | - | Nematoda indet. | 0,0 | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Oligochaeta | Haplotaxida | Naididae | <i>Nais</i> sp. | 159,3 | 59,3 | 14,8 | 185,2 | 0,0 | 0,0 |
| | Lumbriculida | Lumbriculidae | Lumbriculidae indet. | 14,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Polychaeta | Phyllodocida | Nereidae | <i>Perinereis</i> sp. | 0,0 | 0,0 | 22,2 | 3148,1 | 1203,7 | 0,0 |
| | Spionida | Spionidae | <i>Pronospio patagonica</i> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 277,8 | 0,0 | 0,0 |
| Riqueza de Taxa | | | | 9 | 8 | 8 | 6 | 2 | 1 |
| Abundancia(Ind./m²) | | | | 322,2 | 318,5 | 125,9 | 4444,4 | 1296,3 | 92,6 |

Tabla 4.5. Listado taxonómico, riqueza y abundancia del fitoplancton en cada punto de muestreo.

| | | TRAMOS | | | | | |
|------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| | | Aguas arriba del estuario | Sin intrusión salina | | | Mezcla parcial | Cuña salina |
| Clase | Género/especie | ER-1 | ER-2 | ER-3 | ER-4 | ER-5 | ER-6 |
| Chlorophyceae | <i>Oedogonium</i> sp. | 21,8 | 0,0 | 0,0 | 89,7 | 0,0 | 0,0 |
| | <i>Pediastrum boryanum</i> | 21,8 | 0,0 | 39,9 | 34,0 | 0,0 | 73,0 |
| | <i>Pediastrum duplex</i> | 1323,5 | 1171,2 | 476,2 | 536,1 | 3202,8 | 836,9 |
| | <i>Scenedesmus</i> sp. | 21,8 | 44,9 | 0,0 | 73,4 | 51,0 | 0,0 |
| | <i>Stigeoclonium</i> sp. | 241,7 | 164,6 | 522,3 | 131,8 | 0,0 | 72,5 |
| Chrysophyceae | <i>Dinobryon divergens</i> | 184,7 | 196,9 | 2235,5 | 880,8 | 1277,1 | 441,8 |
| Conjugatophyceae | <i>Closterium</i> sp. | 228,6 | 62,3 | 39,9 | 0,0 | 15,9 | 0,0 |
| | <i>Cosmarium</i> sp. | 21,8 | 53,6 | 59,2 | 95,2 | 0,0 | 0,0 |
| | <i>Spirogyra</i> sp. | 240,2 | 150,7 | 78,5 | 115,5 | 0,0 | 0,0 |
| | <i>Staurastrum</i> sp. | 1155,3 | 612,4 | 841,5 | 516,5 | 1675,3 | 567,8 |
| Cyanophyceae | <i>Merismopedia</i> sp. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 135,8 | 46,8 | 0,0 |
| | <i>Oscillatoria limosa</i> | 33,3 | 0,0 | 0,0 | 17,0 | 0,0 | 0,0 |
| | <i>Oscillatoria</i> sp. | 3497,8 | 1412,3 | 2043,1 | 1377,5 | 279,2 | 477,1 |
| Dinophyceae | <i>Ceratium hirundinella</i> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,1 | 0,0 | 0,0 |
| | <i>Peridinium</i> sp. | 0,0 | 31,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,5 |
| | <i>Protoperidium oceanicum</i> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,2 |
| Ulvophyceae | <i>Cladophora</i> sp. | 131,2 | 115,9 | 21,8 | 109,5 | 0,0 | 0,0 |
| | <i>Ulothrix</i> sp. | 0,0 | 22,5 | 0,0 | 25,1 | 2446,9 | 508,4 |
| Chlorophyceae | <i>Scenedesmus</i> spp. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,3 | 0,0 | 0,0 |
| | Riqueza de taxa | 13 | 12 | 10 | 16 | 8 | 9 |
| | Abundancia (Cel. /L) | 7123,5 | 4038,4 | 6358,1 | 4213,1 | 8995,1 | 3100,1 |

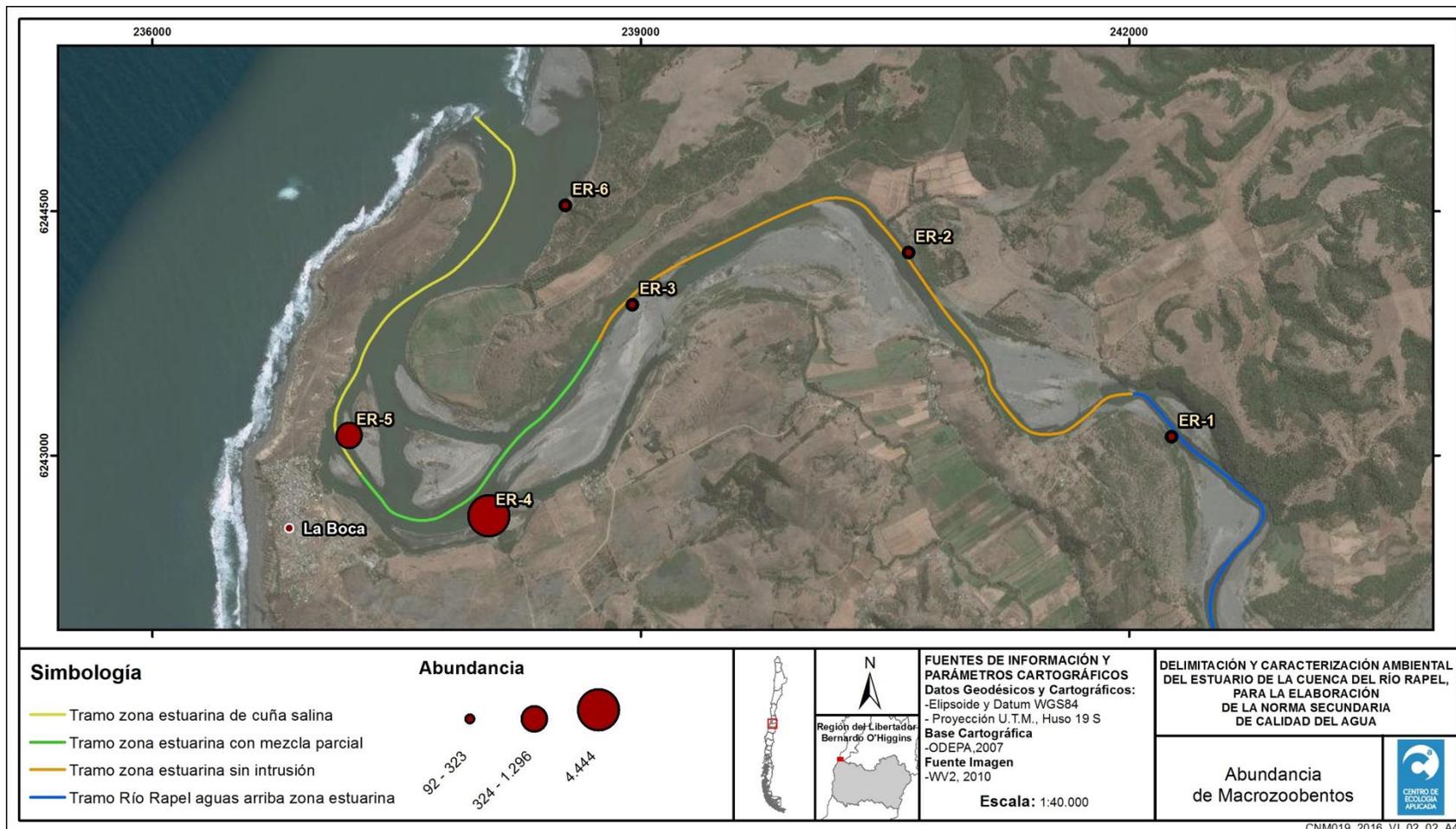
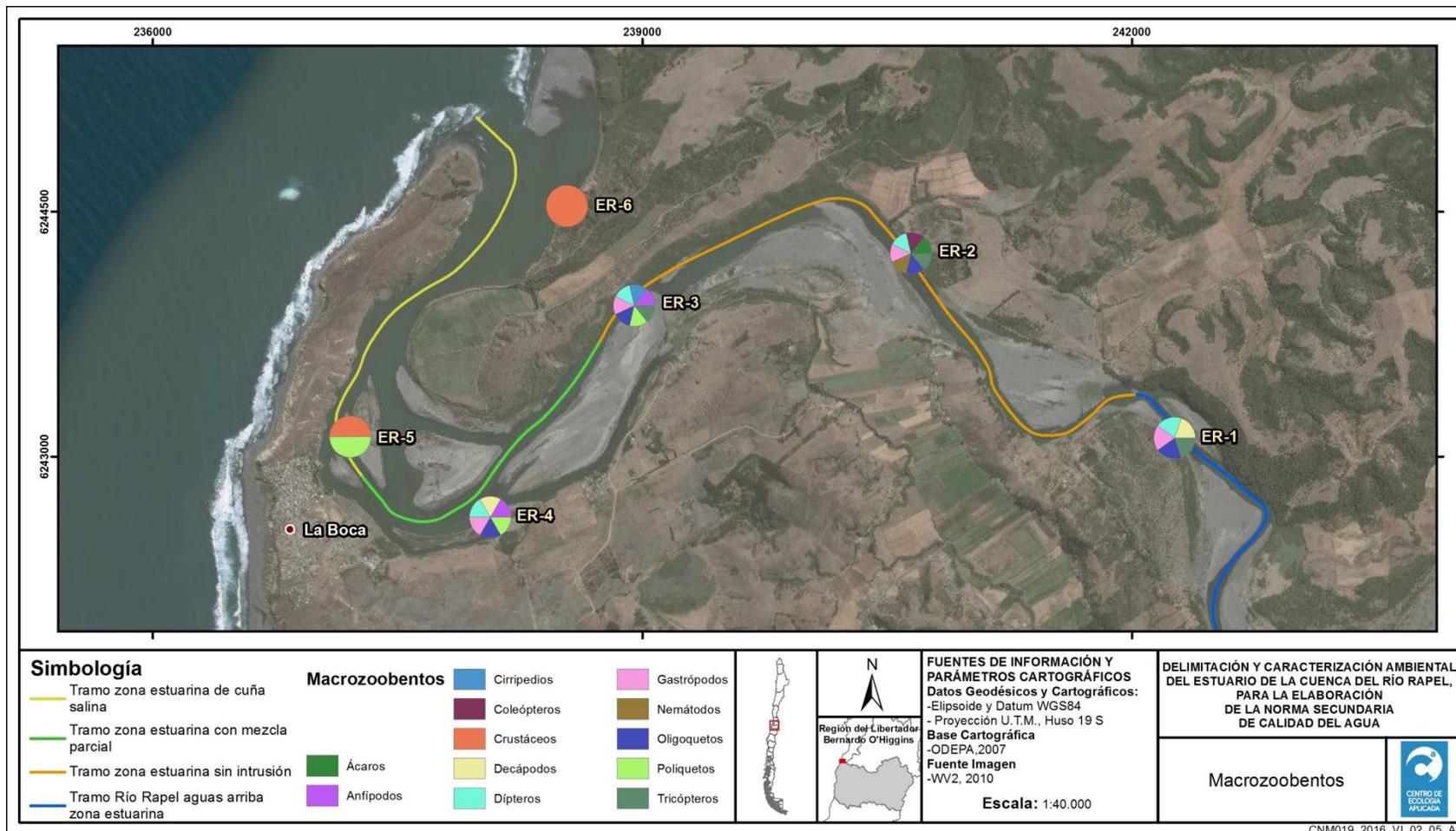


Figura 4-35. Abundancia del macrozoobentos (ind/m²) por punto de muestreo y por tramo.



CNM019_2016_VI_02_05_A4

Figura 4-36. Composición del macrozoobentos por punto de muestreo y por tramo.

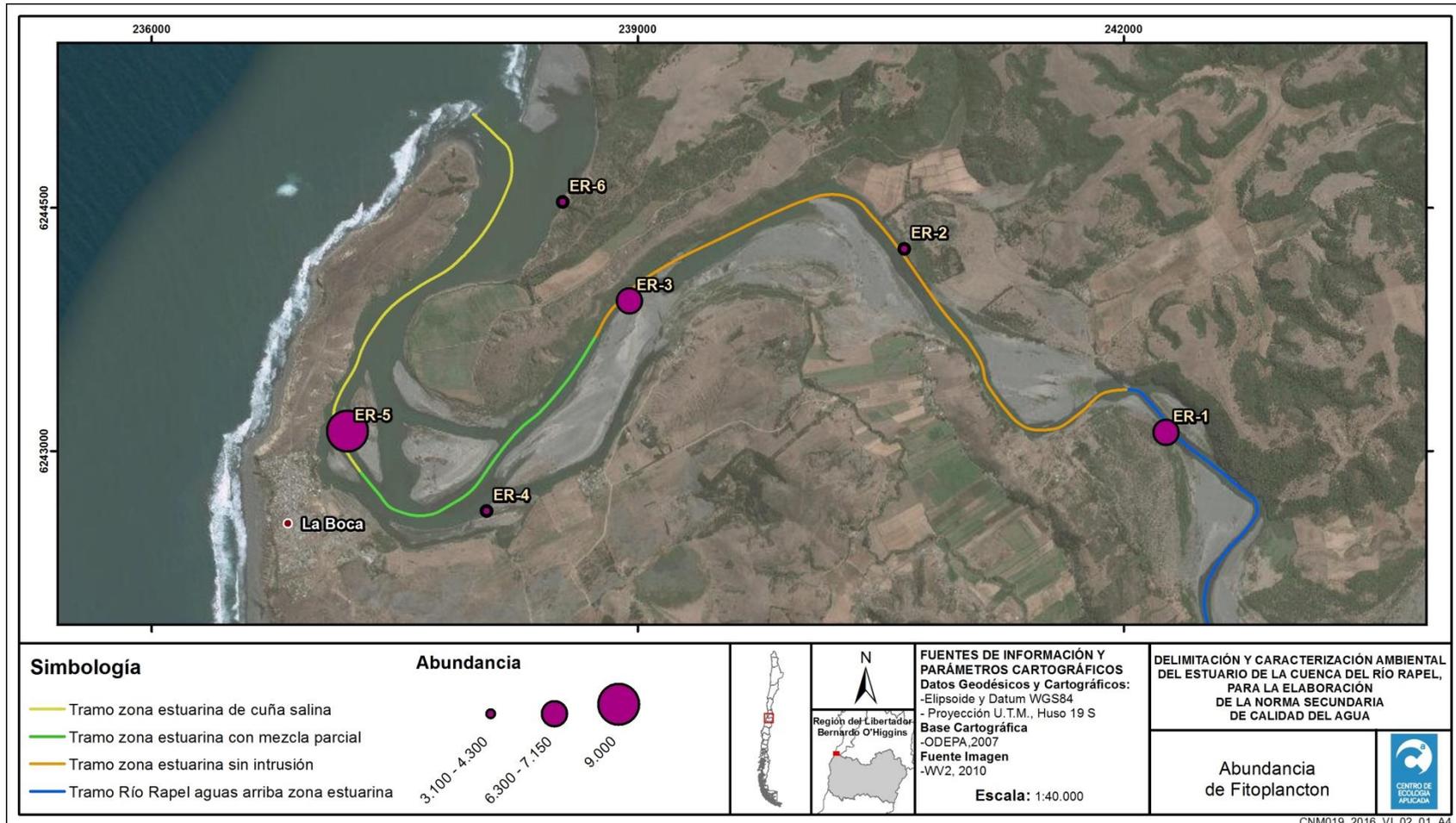


Figura 4-37. Abundancia del fitoplancton (cél/L) por punto de muestreo y por tramo.

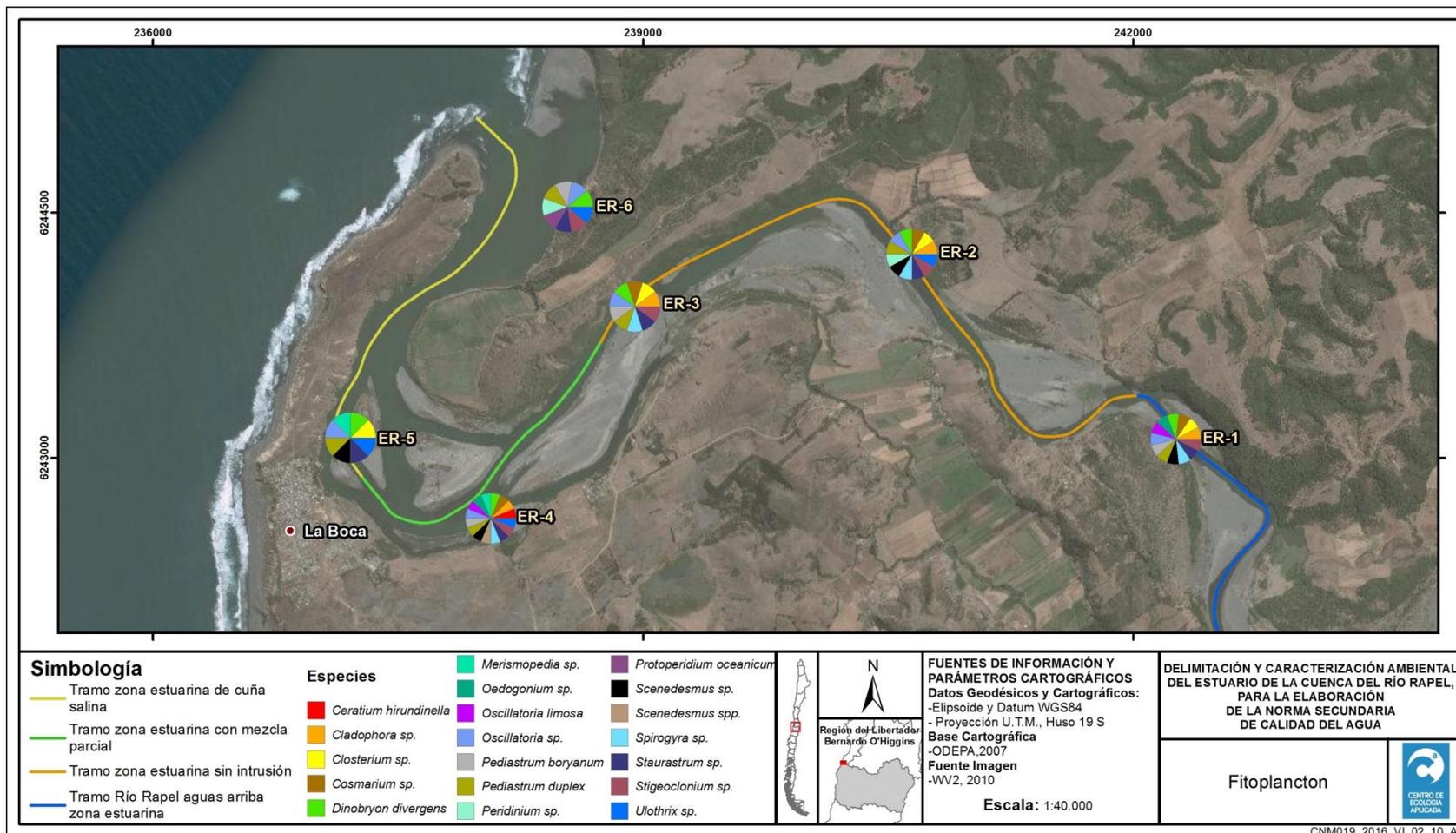


Figura 4-38. Composición del macrozoobentos por punto de muestreo y por tramo.

4.5.4 Fauna íctica

El muestreo de ictiofauna realizada en el área de estudio dio cuenta de la presencia de un total de 4 especies, dos nativas y dos introducidas (**Tabla 4.1**). Según el Reglamento para la Clasificación de Especies (RCE), las dos especies nativas se encuentran en estado de conservación, *Trichomycterus areolatus* como Vulnerable y *Percilia gillissi* En Peligro.

En cuanto a la distribución espacial se observó que las zonas del río aguas arriba del estuario, y en la zona del estuario sin intrusión salina presentaron la mayor riqueza de especies (solo 2 especies) en los puntos ER-1 y ER-2 (ver **Tabla 4.6**). En la zona de cuña salina no se colectaron individuos mediante las artes de pesca utilizada, no obstante, se realizó consultas sobre la pesca del día pescadores, y la información proporcionada constata de la presencia de dos especies nativas, el róbalo (*Eleginops maclovinus*) y la Lisa (*Mugil cephalus*), ambas clasificadas por la RCE en estado Preocupación menor (ver anexo **fotográfico** y

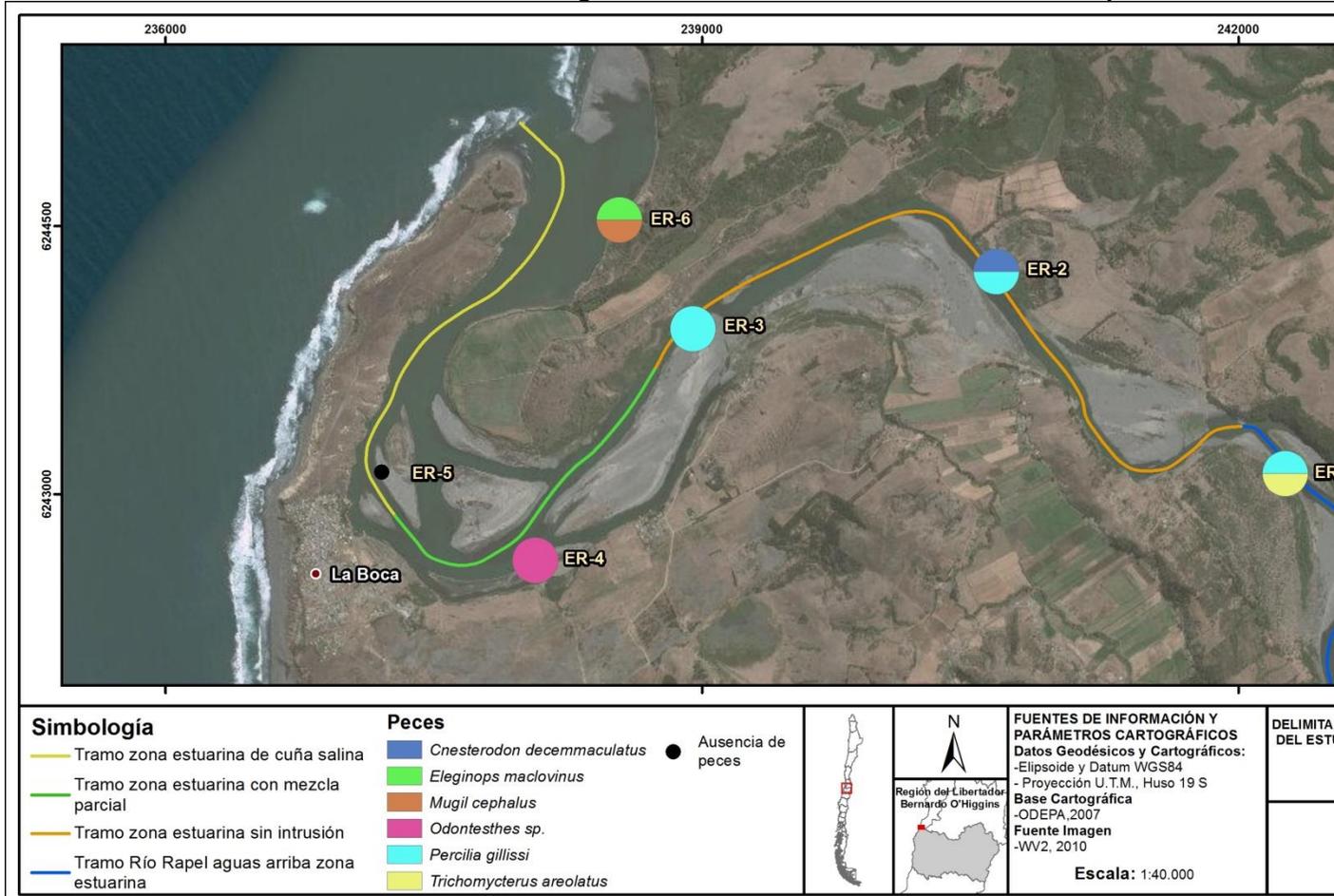


Figura 4-40). La mayor abundancia se observó en la zona de mezcla parcial, con un total de 19 individuos correspondientes a las especies *P. gillissi* y *Odontesthes bonariensis*. Esta última especie obtuvo la mayor colecta de individuos, registrándose un total de 18 especímenes (ver **Tabla 4.7**). Dentro de las especies recolectadas, la mayor abundancia

relativa la presentó *O. bonariensis* con un 51% de las capturas, seguida de *P. gillissi* y *T. areolatus* con un 23% y 20% de las capturas, respectivamente (**Figura 4-39**).

Tabla 4.6. Especies de ictiofauna identificadas en el área de estudio.

| Clase | Orden | Familia | Especie | Nombre común | Estado de conservación |
|------------------------------|--------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------------|
| Especies nativas | | | | | |
| Actinopterygii | Siluriformes | Trichomycteridae | <i>Trichomycterus areolatus</i> | Bagre chico | Vulnerable |
| Actinopterygii | Perciformes | Perciliidae | <i>Percilia gillissi</i> | Carmelita | En Peligro |
| Especies introducidas | | | | | |
| Actinopterygii | Atheriniformes | Atherinopsidae | <i>Odontesthes bonariensis</i> | | No Aplica |
| Actinopterygii | Cyprinodontiformes | Poeciliidae | <i>Cnesterodon decemmaculatus</i> | Gambusia manchada | No Aplica |

Tabla 4.7. Abundancia y distribución de ictiofauna en el área de estudio por tramos.

| Nombre científico | Nombre común | Aguas arriba del estuario | | | Zona sin intrusión salina | | Zona de mezcla parcial | Zona de cuña salina | | Total por especie |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|------|------|---------------------------|------|------------------------|---------------------|----|-------------------|
| | | ER-1 | ER-2 | ER-3 | ER-4 | ER-5 | ER-6 | | | |
| Especies nativas | | | | | | | | | | |
| <i>Trichomycterus areolatus</i> | Bagre chico | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | |
| <i>Percilia gillissi</i> | Carmelita | 1 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | |
| Especies introducidas | | | | | | | | | | |
| <i>Odontesthes bonariensis</i> | - | 0 | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 18 | |
| <i>Cnesterodon decemmaculatus</i> | Gambusia manchada | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | |
| Abundancia total | | 8 | 8 | 1 | 18 | 0 | 0 | 0 | 35 | |
| Riqueza de especies | | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | |

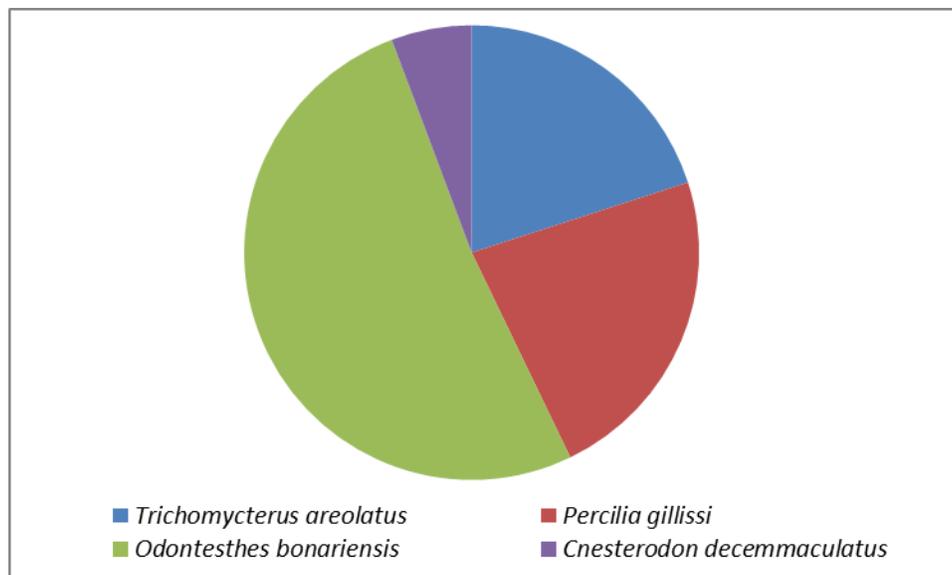


Figura 4-39. Abundancia relativa especies ictiofauna presentes en el área de estudio.

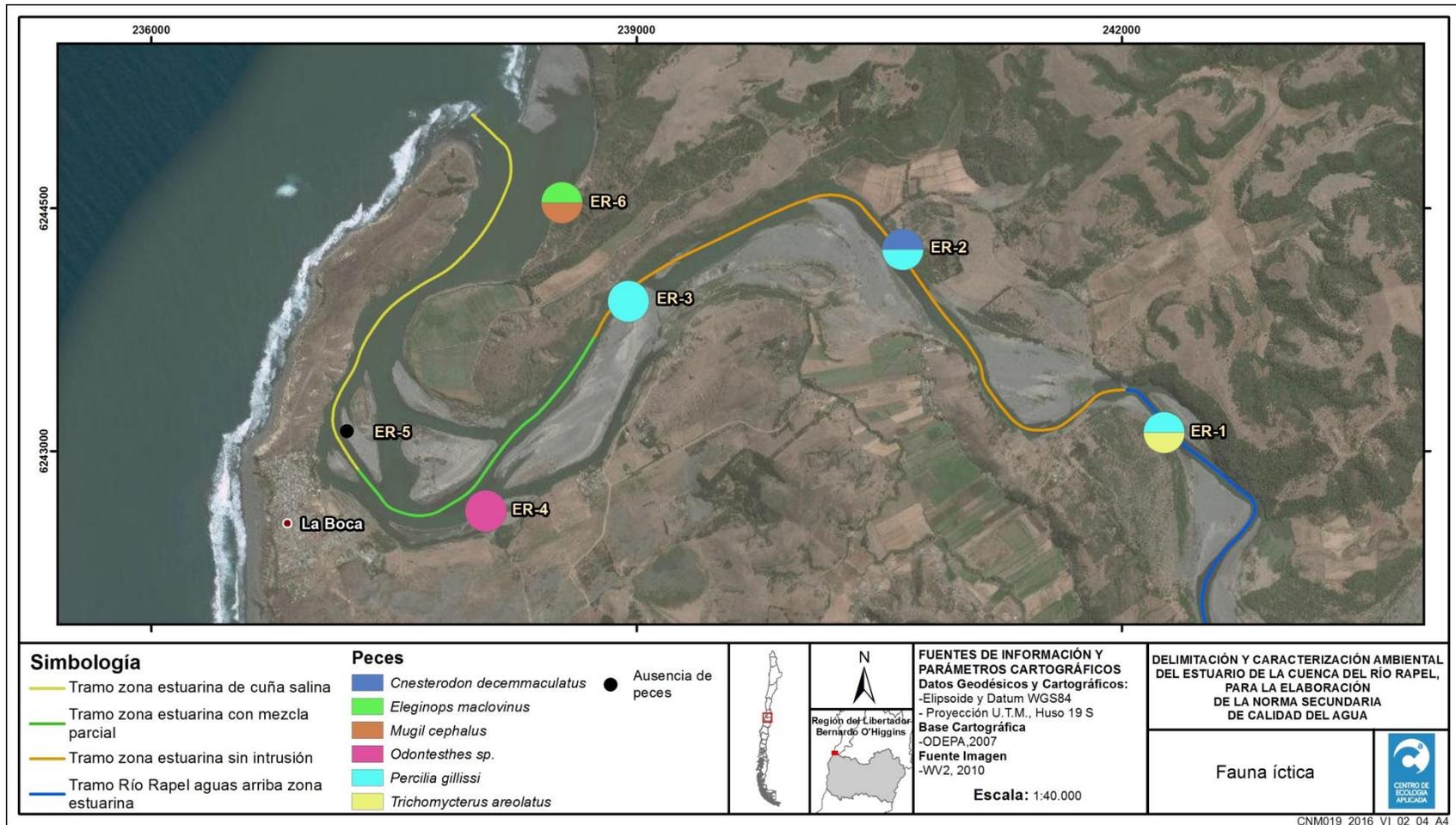


Figura 4-40. Composición de las comunidades ícticas por punto de muestreo y por tramo.

4.6 Proponer parámetros y límites de calidad acordes a la zona estuarina, en las normas de calidad secundaria de aguas de la cuenca Rapel.

4.6.1 Relación de la biota acuática con los parámetros físico químicos de calidad del agua

Como vimos con anterioridad (**Figura 4-15**), el estuario fue delimitado con un máximo de extensión de 9 km, donde, de acuerdo a la morfología e influencia del mar en el ecosistema, fue posible diferenciar tres zonas: La zona sin cuña salina, zona de mezcla parcial y cuña salina. Estas zonas se condicen en mayor o menor medida con los otros parámetros evaluados en este estudio, es decir, con la calidad de agua y biota acuática.

De acuerdo a los resultados de Calidad de agua sólo algunos parámetros responden al comportamiento esperado dentro de un estuario, es decir, que aumentan su concertación en la columna aguas abajo. Sin embargo, particularmente en este sistema, tenemos que considerar los pulsos de inundación generados por el Embalse situado aguas arriba del estuario, que movilizan grandes cantidades de agua en pocos minutos diariamente, lo que influye en la dilución de componentes presentes en el agua. Entre los parámetros que presentaron un comportamiento de aumento de concentración aguas abajo, es decir desde la zona del río y sin intrusión, hasta la cuña salina pasando por la zona de mezcla son: los Carbonato, la Conductividad eléctrica, el Fósforo total, la DQO, el Nitrógeno total, el Cobre total, el Cobre disuelto, el Hierro total, el Hierro disuelto, algunos de los cuales se grafican a continuación (**Figura 4-41**):

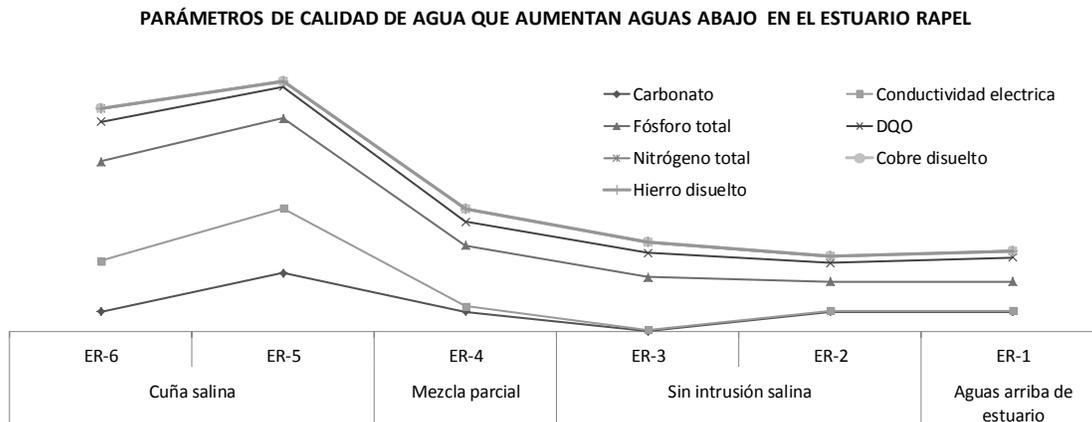


Figura 4-41 Parámetros de calidad de agua que aumentan su concentración aguas abajo, en relación a las zonas establecidas hidrológicamente en este estudio

En general, este comportamiento responde a una condición esperada dentro del sistema, donde los nutrientes como el fósforo y nitrógeno ingresan al agua producto de los variados usos del suelo en la cuenca que contiene al río Rapel. Esto genera un proceso acumulativo desde el embalse hasta llegar a la desembocadura, donde los nutrientes son

incorporados por especies que componen una alta biodiversidad en la zona de cuña salina y de mezcla. Por otro lado, los carbonatos incluyen el grupo de especies iónicas más abundantes en el agua de mar y en los estuarios comienzan a hacerse disponibles para diferentes especies que necesitan una alta concentración de ellos para producir conchas y valvas. Los metales como el cobre posiblemente responden a la estructura del suelo presente en la cuenca.

En relación a lo anterior, existe relación directa entre la calidad del agua y los sedimentos y los organismos que habitan el ecosistema acuático. Un ejemplo de ellos es la relación de los organismos acuáticos con la salinidad. En este sentido la biota acuática más fuertemente relacionada con la calidad del agua y sedimentos es el macrozoobentos. Estas especies por vivir en el fondo y por tener una movilidad reducida, son altamente sensibles a los cambios en su medio, por lo que son utilizadas como indicadores ambientales, es decir nos permiten evaluar el estado del ecosistema por medio de su abundancia, riqueza y distribución. Como se ha sido ampliamente descrito la salinidad es el factor estructurador de los sistemas acuáticos estuarinos. En este sentido, vemos que esto se representa también en el área de estudio, donde especies del macrozoobentos de comportamiento salino (estuarino), dulce – salino y de agua dulce se distribuye conforme a las zonas determinadas hidrológicamente en este estudio (**Figura 4-42**).

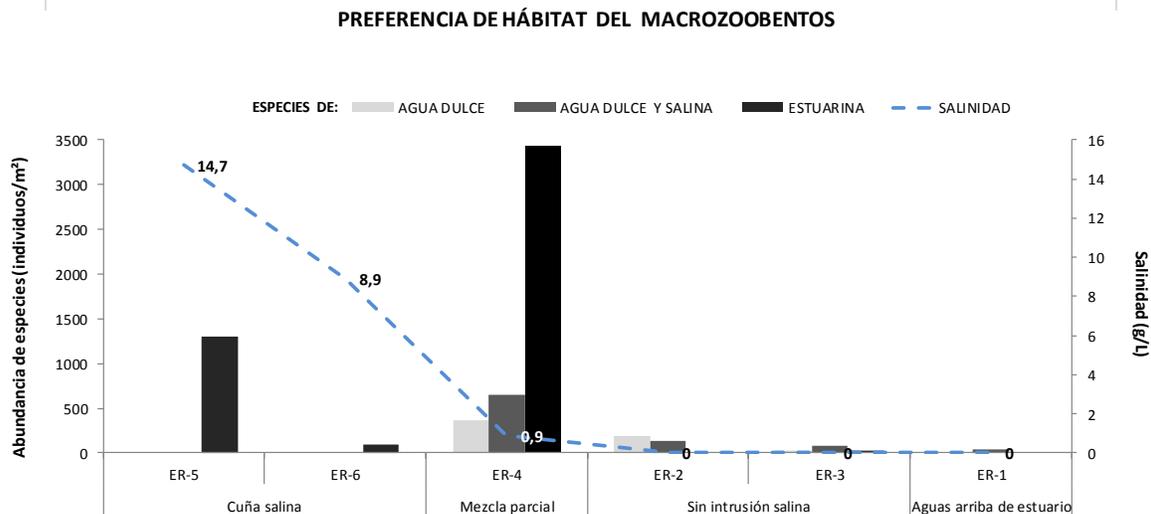


Figura 4-42 Relación de distribución de macrozoobentos en el estuario del Río Rapel con la salinidad presente en la columna de agua en los diferentes puntos de muestreo.

En el gráfico podemos observar el sentido biológico de la delimitación de zonas dentro del estuario, donde la zona de mezcla parcial es aquella que puede reunir especies tanto de ambientes salinos como dulceacuícolas, lo cual refuerza el concepto de alta biodiversidad en los estuarios.

En cuanto a las especies de mayor movilidad como la fauna íctica estas al igual que el macrozoobentos responden a esta zonificación (Cuña salina, Mezcla parcial y Sin

intrusión salina). Sin embargo, su facilidad de desplazamiento, puede generar que en un tiempo determinado que estén presentes en más de una zona colindante. No obstante, siempre en zonas de baja salinidad en el caso de la " Carmelita" (*Percilia gillissi*) y en "Bagre chico" (*Trichomycterus areolatus*).

Las consideraciones anteriormente expuestas son necesarias al momento de proponer rangos de parámetros de calidad de agua y sedimentos para un estuario, ya que estos deben garantizar permanencia de la biota presente en el área de interés. La relación de los organismos con diferentes componentes presentes en la columna de agua y sedimentos está determinada por diferentes factores.

En base a lo anterior, hay que recordar que los estuarios son ambientes sumamente cambiantes, distintos y de naturalezas únicas entre sí, y que poseen potentes gradientes ambientales, con diferencias en rangos de salinidades, temperaturas y tipo de sedimentos. Además de ello, son afectados por distintos procesos y variables tanto físicas como químicas, lo cual dificulta establecer límites de calidad de agua en base a información sobre otras zonas estuarinas que no sea la del mismo estuario del río Rapel. De esta manera, para describir el real estado de calidad del agua y los contaminantes presentes en el sistema se debe tener en cuenta el tipo de contaminante que se evalúa y la forma en la que se encuentra, ya sea disuelto como ion, como compuesto, formando un complejo o bien como material particulado (precipitado o adsorbido). También es necesario tener al tanto la presencia de otros metales y si producen un efecto antagónico, aditivo o sinérgico; para finalmente establecer si el estado en que se encuentran puede afectar potencialmente a la fisiología de los organismos, considerando además factores como la salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y pH (i.e. Bryan, 1971; Lin & Dunson, 1993).

A continuación se presenta una recopilación de información bibliográfica, la cual fue encontrada en base a la revisión de ensayos de toxicidad, con el fin de que sirva de apoyo o base inicial para proponer parámetros y límites de calidad de la zona estuarina del río Rapel. Posterior a ello se realizó un análisis de las actuales normas de calidad de agua que rigen en Chile.

4.6.1.1 Relación de la biota acuática con los metales pesados

En cuanto a los metales pesados, es importante mencionar que su efecto principal está dado en la cadena trófica, por bioacumulación de un eslabón al siguiente. Algunos de los metales detallados en la NCh 1333 son aluminio, boro, cadmio, cobre, cromo, litio, mercurio, plomo y zinc, cuyas concentraciones máximas deben ser de 5, 0.75, 0.01, 0.2, 0.1, 2.5, 0.001, 5 y 2 mg/L, respectivamente.

La susceptibilidad de especies a los metales pesados varía enormemente, ya que distintos organismos utilizan de distinta manera los metales en las diferentes funciones metabólicas. Por ejemplo, la toxicidad de cobre en forma de citrato de la larva nauplio de *Elminius modestus* y del copépodo *Acartia clausi* son de 10 ppt y 0,3 ppt respectivamente (Bryan, 1971). Uno de los factores con los que hay que tener cuidado al considerar y fijar límites de calidad de agua en un ambiente estuarino es la salinidad, ya que este tipo de sistemas posee un fuerte gradiente desde el agua dulce proveniente del río hasta el límite con el agua de mar. Por ejemplo, en animales estuarinos, la toxicidad del cadmio varía con la salinidad aumentando la concentración letal media (LC₅₀) a medida que aumenta la salinidad (i.e. Theede, 1980; Reardon & Harrell, 1990). Es así como Lin & Dunson (1993)

analizaron el efecto de la salinidad en la toxicidad del cadmio de un estuario tropical, sobre el pez *Rivulus marmoratus* y definieron la inversa relación entre la cantidad de electrolitos disueltos y la toxicidad del cadmio, de acuerdo a los autores esta regla se aplica de manera general a metales pesados disueltos en distintos gradientes de salinidad, donde a mayores concentraciones de electrolitos, mayor es LC_{50} (mortalidad a 50% de concentración del tóxico), por lo tanto, menor toxicidad posee un metal pesado en sistemas más salobres. Zirino & Yamamoto (1972) determinaron que en agua 100% de mar, el ion Cd (Cd^{2+}), que es la forma más tóxica de cadmio, puede serlo a una concentración tan baja como 2.5%. Además, la relación inversa entre la toxicidad de cadmio y la salinidad se debe en gran parte a la complejación de metales con el cloro a altas salinidades (Sunda *et al.*, 1978; Engel & Fowler, 1979; todos *fide in* Lin & Dunson, 1993).

Otros análisis realizados sobre la tolerancia de Cd, Cu y Zn en el pez *Fundulus heteroclitus* encontraron que el cobre es el metal más tóxico en cuanto a la LC_{50} a concentraciones de 3,2 mg Cu/L bajo salinidades entre 24 y 5,5 ppt (Lin & Dunson, 1993). Se han descrito, sin embargo, concentraciones que representan límites letales de distintos metales pesados, además de describirse efectos sub-letales para distintos organismos presentes en sistemas estuarinos de diversos lugares geográficos. Algunos casos como estos pueden ser revisados en el **(ANEXO 5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA)**.

En consideración con lo mencionado anteriormente, es necesario tener en cuenta además, factores como la condición del organismo, en cuál estadio de vida se encuentra, el tipo del ciclo de vida, el tamaño, la actividad, y el tipo de aclimatación al contaminante que este posee en los distintos estadios (Bryan, 1971).

En consecuencia, y considerando la relación directa entre el efecto de los contaminantes con la salinidad, se estima prudente que el establecimiento de los límites de los parámetros que determinan la calidad del agua se realice conforme a los distintos tramos definidos para el estuario Rapel y sus concentraciones salinas.

4.7 Estado de Norma de calidad de Agua en Estuarios de Chile

Considerando que Chile aún no existen normas de calidad para estuarios, podemos revisar experiencias en otros continentes. Por ejemplo en Europa en el marco de la implementación de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60 CE) se establecen algunas guías para indicar las condiciones de referencia de cada uno de los tramos o masas de agua en todo tipo de cuerpos, ríos, lagos, cuerpos modificados artificialmente como embalses, aguas costeras, y aguas de transición. En esta última clase se encuentran los estuarios. En el documento guía N°5 (European Communities, 2003), se indica que las condiciones de referencia deberían resumir el rango de variabilidad espacial y temporal, por lo que en muchos casos se deben representar como rangos, no como valores temporales. Entre los métodos para establecer estos datos basales o condiciones de referencia en las masas de agua, la Unión Europea plantea las siguientes opciones (European Communities, 2003, documento guía N°10):

- Condiciones de referencia basados en datos medidos en los lugares de monitoreo.
- Condiciones de referencia basados en modelos predictivos.
- Condiciones de referencia basados en datos históricos o datos provenientes de paleolimnología o una combinación de ambos.
- Combinación de los anteriores.

Este documento guía N°10, establece que para los casos donde no sea posible utilizar estos métodos, las condiciones de referencia pueden ser establecidas a juicio experto.

De acuerdo a las normas desarrolladas en Chile: El Decreto 38 de 2013 que aprueba el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión, las normas secundarias de calidad ambiental (NSCA) indica que son *aquellas que establecen los valores de las concentraciones y periodos, máximos o mínimos, permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza*. Según el artículo 29 de este decreto, *en la determinación de las normas secundarias de calidad ambiental, se recopilarán los antecedentes y se encargará la preparación de estudios o investigaciones técnicas y científicas, toxicológicas y otras que sean necesarias para establecer los niveles de exposición o carencia para la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza*. Este informe constituye un primer paso para la recopilación de antecedentes técnico-científicos sobre la calidad ambiental en el estuario del río Rapel.

Entre los parámetros a proponer y en vista de que es necesario disponer de mayor cantidad de antecedentes en el estuario del río Rapel, se sugiere mantener como parámetros de referencia al menos los que están considerados en el anteproyecto de normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Rapel (**ANEXO 11**). Además de estos parámetros, se sugiere incluir otros parámetros que bajo diferentes escenarios son de relevancia. Por ejemplo, el análisis de carbonatos junto con el pH nos permite saber cómo se comporta el sistema frente a un escenario de cambio climático, donde la acidificación del agua influiría en la disponibilidad del CaCO_3 , lo cual puede tener diversos efectos en las especies con exoesqueleto calcáreo en la zona estuarina. Además se sugiere incluir el ortofosfato como nutriente fosforado, debido a la presencia de cultivos en el área de estudio principalmente aguas arriba del embalse Rapel. La utilización de fertilizantes en los cultivos podría introducir nutrientes en las aguas de la cuenca por contaminación difusa, es por ello, que se propone incluir en el listado de parámetros a considerar en una norma secundaria de calidad de agua. Además la presencia de nutrientes en las aguas podría generar la proliferación de productores primarios en exceso y la consiguiente eutrofización y disminución en oxígeno disuelto por consumo del mismo. Finalmente y de acuerdo a la revisión realizada en este estudio, en cuanto a la asimilación y efectos de la incorporación de metales de diferentes especies acuáticas (**ver 4.6.1.1 y ANEXO 5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**), se sugiere incluir cobre, plomo y cadmio en su fracción disuelta.

Tal como se señaló anteriormente, pese a que resulta necesaria la obtención de mayor cantidad de antecedentes para establecer los valores límites de una norma secundaria de calidad ambiental para conservar los ecosistemas, los datos recopilados en el presente informe constituyen un primer paso para conseguir dicho objetivo. En consideración a ello, podemos hacer ciertas estimaciones que orienten la elaboración de normas y seguimiento de la condición fisicoquímica del cuerpo de agua.

Según lo observado en este estudio, se distingue un gradiente desde la parte alta del río hasta la desembocadura en algunos parámetros (DQO, fósforo total, nitrógeno total, clorofila "a" y sulfato, entre otros). Bajo este criterio, podemos definir tres zona para calidad de agua: i) una zona de agua dulce, que en este estudio es definida como zona

estuarina sin intrusión y zona aguas arriba de ella, (sitios ER-1, ER-2, ER-3), ii) una zona de transición entre el agua dulce y salina (sitios ER-4 y ER-5), que no coincide de manera exacta con la zona definida bajo criterio hidrológico y una iii) tercera zona en la desembocadura (E-6) caracterizada por presentar una alta concentración de sal, lo que modela la configuración en la cual podemos encontrar ciertos componentes (ver **Figura 4-41**). Es importante considerar que esta zonificación responde a un comportamiento puntual, por lo que debe ser considerada de manera tentativa, hasta corroborar que este comportamiento u otro, permanece a través del tiempo.

De manera conjunta a lo anterior, a continuación, en la **Tabla 4.8** y **Tabla 4.9** se presentan los rangos de los parámetros analizados durante la primavera 2016 que podrían servir como base preliminar para el establecimiento de una norma secundaria de calidad ambiental, teniendo en cuenta que estos rangos corresponden a una única estación del año para un momento concreto y por tanto no reflejan posibles variaciones intra-diarias, intra-anales (estacionales) e inter-anales ocurriendo en el sistema.

Tabla 4.8 Rangos de parámetros medidos en la columna de agua del estuario del río Rapel.

| Parámetro | Unidad | Mínimo | Máximo |
|--------------------------------|--------|----------|--------|
| Aluminio disuelto | mg/L | <0,15 | <0,15 |
| Aluminio total | mg/L | <0,15 | 0,31 |
| Arsénico disuelto | mg/L | <0,005 | 0,006 |
| Arsénico total | mg/L | <0,005 | 0,015 |
| Cadmio total* | mg/L | 0,00006 | <0,001 |
| Cadmio disuelto* | mg/L | <0,00005 | <0,001 |
| Calcio disuelto | mg/L | 57,2 | 99,7 |
| Carbonato | mg/L | <5,0 | 22 |
| Clorofila a | µg/L | 0,6 | 10,7 |
| Cobre disuelto* | mg/L | <0,003 | 0,007 |
| Cobre total* | mg/L | 0,007 | 0,016 |
| Conductividad eléctrica (25°C) | mS/cm | 0,5 | 24,5 |
| Cromo disuelto | mg/L | <0,002 | <0,002 |
| Cromo total | mg/L | <0,002 | 0,009 |
| DBO5 | mg/L | <2 | <2 |
| DQO | mg/L | 7 | 15 |
| Fósforo total | µg/L | 11 | 38 |
| Hierro disuelto* | mg/L | <0,002 | 0,036 |
| Hierro total* | mg/L | 0,051 | 0,302 |
| Magnesio disuelto | mg/L | 10,1 | 140,1 |
| Mercurio | mg/L | <0,001 | <0,001 |
| Mercurio disuelto | mg/L | <0,001 | <0,001 |
| Nitrógeno total | mg/L | 2,14 | 5 |
| Oxígeno disuelto | mg/L | 9,78 | 10,98 |
| pH | - | 8,53 | 8,94 |
| Plomo disuelto* | mg/L | 0,0006 | <0,008 |
| Plomo total* | mg/L | 0,0007 | <0,008 |
| Potasio disuelto | mg/L | 4,8 | 44,2 |
| Potencial redox (Eh) | mV | 280 | 284 |
| Salinidad | g/L | 0 | 14,7 |
| Sodio disuelto | mg/L | 22,8 | 834,6 |
| Sólidos totales suspendidos | mg/L | 0,8 | 5,9 |
| Sulfato | mg/L | 114 | 1244 |
| Temperatura | °C | 16,9 | 18,6 |
| Zinc disuelto* | mg/L | <0,002 | 0,01 |
| Zinc total* | mg/L | 0,0067 | 0,069 |

* Distinta matriz dependiendo de la salinidad. Para el análisis de los elementos zinc, plomo, hierro, cobre y cadmio, se obtienen distintos límites de detección para los puntos de la zona estuarina con cuña salina y para el resto de zonas, debido a que los puntos ER-5 y ER-6 corresponden a matriz de agua salada y el resto corresponden a matriz de agua dulce.

Tabla 4.9. Rangos de parámetros medidos en los sedimentos del estuario del río Rapel.

| Parámetro | Unidad | Mínimo | Máximo |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| Aluminio total | mg/kg | 6024 | 19535 |
| Arsénico total | mg/kg | <0,4 | 14,2 |
| Cadmio total | mg/kg | 0,4 | 0,9 |
| Cobre total | mg/kg | 19,5 | 65,6 |
| Cromo total | mg/kg | <0,2 | <0,2 |
| Fósforo total | mg/kg | 192,6 | 560,9 |
| Hierro total | mg/kg | 143554 | 464870 |
| Materia orgánica | g/kg | 5,2 | 38,3 |
| Mercurio | mg/kg | <0,01 | <0,01 |
| Nitrógeno total | mg/kg | 35 | 1237 |
| Plomo total | mg/kg | <0,7 | 11,5 |
| Potencial redox (Eh) | mV | 222 | 308 |
| Temperatura | °C | 17,1 | 22,9 |
| Zinc total | mg/kg | <0,2 | 22,8 |
| Granulometría | | | |
| Grava (phi -1) | % | 0 | 3,7 |
| Arena muy gruesa (phi 0) | % | 0,4 | 2,5 |
| Arena gruesa (phi 1) | % | 2,8 | 50,2 |
| Arena media (phi 2) | % | 9,3 | 43 |
| Arena fina (phi 3) | % | 3,5 | 48,2 |
| Arena muy fina (phi 4) | % | 0,4 | 41,7 |
| Limo (phi 5) | % | 0,2 | 9,1 |

5 DISCUSIÓN

El concepto de “*river continuum*”, que define el comportamiento del río desde su cabecera hasta su desembocadura, comienza por una zona de ritón, la cual se ensancha aguas abajo hasta llegar, en algunos casos, a una boca que forma estuario (Vannote *et al.*, 1980). Desde la zona alta hasta la zona más baja del sistema acuático es posible observar, entre otras cosas, un cambio en el sustrato de fondo, un aumento en la turbidez y también aumento de componentes que ingresan al río. Estos, comúnmente son retenidos en la zona potamal y refugiados en el fondo y, de variadas formas y pulsos, son liberados a la columna de agua e incorporados por las especies que viven en el sistema, especialmente en áreas “lagunares” propias de zonas estuarinas.

La diversidad generalmente también se distribuye respecto a la estructura previamente descrita, con especies adaptadas a zonas de menor oxígeno, mayor profundidad y turbidez en la zona potamal y organismos adaptados a mayor claridad del agua, oxigenación, turbulencia y mayor pendiente en la zona alta o ritral del río, todo esto en un sistema natural. Nos obstante, el área de estudio se presenta fragmentada por una central hidroeléctrica de embalse.

La presencia del embalse Rapel, genera una discontinuidad de los procesos físicos asociados al régimen natural del caudal, ya alterado por el uso consuntivo del agua por la agricultura, que genera un aumento de las oscilaciones del caudal natural, en la temporada de riego. Para dar cuenta de estos procesos de regulación del curso del río, se ha propuesto un concepto complementario al *river continuum*, el de *discontinuidad serial*. Este último concepto tiene varios supuestos entre los cuales están: i) las hipótesis o ideas del *river continuum* y *espiralamiento de nutrientes* son correctos y sus supuestos son válidos; ii) la cuenca está libre de contaminación, solo está el embalse; iii) el resto de los tramos no fue perturbado por la construcción del embalse. Se considera que el represamiento del agua es la alteración mayor del proceso *continuum*, sin otros factores que complejicen el modelo. En general un embalse de gran tamaño modifica las condiciones aguas abajo, y con ello los procesos ecosistémicos y componentes biológicos. Hay un aumento en la estabilidad del sustrato, la descarga de aguas transparentes o más claras crea desequilibrios hidrodinámicos produciendo la remoción de partículas finas, los embalses cambian la composición y calidad de los sedimentos (Ward & Stanford, 1983).

Dado lo anterior, lo que actualmente observamos en ecosistema evaluado es el resultado de la presencia de la represa, que se encuentra aguas arriba del estuario desde el año 1968 formando parte del Sistema Interconectado Centra (SIC). La influencia de las hidroeléctricas tipo represas sobre los ríos ha sido ampliamente descrita (Bond & Cottingham, 2008; Stanley & Doyle, 2003), ya que estas estructuras funcionan bajo una dinámica de contención y liberación abundante de agua en cortos periodos de tiempo, causando en primera instancia, retención de nutrientes que son alojados en el fondo del embalse y en segunda instancia una liberación de agua con alto poder de arrastre que ingresa al sistema modificando principalmente el sustrato de fondo y la estructura alimentaria y de hábitat. Es por ello que, actualmente las áreas bajos los embalses pueden ser definidas como zonas “reseteadas” ecosistémicamente hablando, ya que el sistema acuático aguas abajo de un embalses de este tipo, se asemejarían, en una longitud menor a la original, a tramos observados en ríos no intervenidos, es decir con presencia de una zona alta de mucha energía (cerca de la liberación de agua del

embalse), una zona media o transición y una zona baja más somera o potamal hasta llegar a la desembocadura y estuario.

De acuerdo a los resultados de este estudio fue posible definir diferentes zonas en función de las características hidrológicas, biológicas y de calidad del agua. Conforme a lo observado en los análisis hidrológicos se observa que el sistema actúa en rangos generales a lo esperado es decir, modulado por las diferencias que causa la intrusión del mar en un cuerpo de agua dulce desde la desembocadura dirección aguas arriba. Dando origen a variabilidad en la profundidad del sistema en zonas donde convergen dos masas de agua, marcando así una zona estuarina de cuña salina, una zona de mezcla parcial y luego un área del estuario sin intrusión salina. Nos obstante, el pulso artificial generado por el embalse hace que las zonas más alejada de la boca (E1 y E2) presenten alta variabilidad en profundidad y amplitud del cauce a escala de minutos, lo que se refleja también en la boca, pero con menor intensidad. Por tanto, este sistema es controlado por tres variaciones de agua en diferentes horas del día (bajamar, pleamar y pulso de inundación del embalse Rapel).

Los pulsos de inundación artificiales pueden tener diferentes efectos sobre el cuerpo de agua, entre ellos la inundación de la planicie referida a la dimensión lateral del río, favorece el ingreso constante de material alóctono al cuerpo de agua considerando material de origen natural (sedimento, vegetación entre otros) y artificial (pesticidas, desechos u otros). Otro efecto es la modelación del sustrato de fondo, dada la permanente fuerza de ingreso del agua, que remueve el sustrato desplazándolo, de manera sinérgica a cada pulso, por largas distancias, lo que posiblemente explique lo observado en la zona baja del río, con presencia de bolones en los puntos E4 y E5, donde debería existir principalmente sustratos finos y arenoso. De mismo modo, este arrastre causado por el agua desprende partículas orgánicas desde el sustrato rocoso disminuyendo la disponibilidad de alimento para diferentes especies (Ponsatí *et al.*, 2014). Junto con lo anterior, el llenado de la planicie del río causa desplazamiento de especies lateralmente (Faush *et al.*, 2002), que en cosa de minutos, pueden quedar aisladas en condición de sequía producto de esta “falsa inundación” que es modificada por un nuevo evento de retención de agua en pocas horas. A macro escala la fuerte variación de caudal puede producir que la cuña salina desarrollada en el estuario varíe frecuentemente su extensión, es decir, modifica el patrón estacional del estuario (Baldó *et al.*, 2005).

La extensión de la cuña salina fue estimada a partir de la formulación que considera un estuario de pendiente constante, por lo que ciertas limitaciones que impone la forma del terreno no quedan representadas en el alcance de la cuña salina, y por lo tanto, el resultado teórico sobrestima el alcance real de la cuña. La extensión del estuario y las zonas del estuario identificadas, como lo son la zona de cuña salina, zona de mezcla parcial y zona sin intrusión, fueron un referente para la descripción de las características físico-químicas del agua y sedimentos, así como de la biota acuática presente, y fueron consideradas en la propuesta de norma secundaria de este estudio. Sin embargo, se debe tener presente que los estuarios son sistemas dinámicos, y por lo tanto el alcance de la intrusión salina que presenta, ya sea en forma de cuña salina o mezclada, varía según las forzantes a las que se ve sometido.

De acuerdo a los resultados de calidad física y química de agua, para algunos parámetros se observaron diferencias claras entre los tramos definidos. Concretamente en conductividad, salinidad, DQO, fósforo total, nitrógeno total, clorofila “a” y sulfato se

observó un aumento en dirección del flujo del agua siendo el tramo con cuña salina el que presentó las mayores concentraciones de estos parámetros. Contrariamente el hierro y cobre total presentaron una disminución en dirección aguas abajo en el estuario, lo que puede estar asociado a la litología de la cueca. Para el resto de parámetros no se observó un comportamiento diferenciado entre los distintos tramos del estuario, presentando en general concentraciones o valores similares entre los distintos tramos delimitados. Se sabe que los ríos introducen material disuelto en proporciones diferentes a las concentraciones en sistemas marinos, al igual que material sedimentario que puede reaccionar en distintas formas con los materiales disueltos, particulados y coloidales. En los metales, el cambio de salinidad afecta directamente al comportamiento de ellos en la columna de agua (Campos, 1990). Esto es debido a que en el agua dulce, los metales se encuentran asociados a determinados ligandos o materia orgánica, y al entrar en contacto con aguas de alta salinidad sufren un proceso de desorción, seguido de adsorción a otros iones presentes en mayor proporción en agua marina como cloruros y sulfatos, habiendo así una competición por los sitios de adsorción del metal (Hamelink *et al.*, 1992).

En el caso de los cationes mayoritarios, es decir, magnesio, calcio, potasio y sodio el punto ubicado más cercano a la desembocadura (ER-6), dentro del tramo con cuña salina mostró un valor sustancialmente más elevado respecto del resto de puntos. En este sentido cabe destacar que el punto ER-5 ubicado en el tramo con cuña salina y aguas arriba de ER-6, no presentó una concentración similar de estos cationes a la registrada para ER-6. Estos cationes, en general, son proporcionalmente más elevados en agua marina que en agua dulce. Por tanto, este fenómeno podría ser explicado y justificar la teoría de que el estuario es dinámico y de que la cuña salina varía su extensión, ya que los elementos mayoritarios y trazas, tanto totales como disueltos.

En cuanto a los sedimentos, no se observó una diferenciación clara de las características físicas y químicas entre los tramos delimitados. Solamente el potencial redox, fósforo total y aluminio, presentaron un ligero aumento de sus valores en dirección aguas abajo, pero sin cambiar las condiciones de óxido-reducción, siendo a lo largo del curso condiciones oxidantes, lo que es comúnmente observado en humedales costeros (CEA, 2006). En cuanto a la granulometría, a lo largo del curso de agua predominaron las arenas en distintos tamaños.

La distribución de organismos en humedales costeros tipo estuario está modelada principalmente por el alcance de la cuña salina (Kimmerer *et al.*, 2009). En cuanto a la biota en el estuario y en el río Rapel, la composición de las comunidades bióticas, a excepción del fitoplancton, describieron un recambio de especies entre tramos, con una marcada diferenciación del tramo de la cuña salina. Por ejemplo, en la composición de la vegetación acuática, las macroalgas marinas fueron indicadoras de la mayor salinidad de este tramo. La misma situación se observó en el macrozoobentos, que presentó mayor riqueza taxonómica en los tramos de mezcla parcial (E4), lo cual ocurre porque en estas zonas pueden vivir especies tolerantes a la salinidad como los poliquetos y otros organismos más bien adaptados a agua dulce, por ello los sistemas estuarios poseen una alta biodiversidad (Lalli & Parson, 2008).

En la zona de la boca se registró solo dos especies, con mayor abundancia de crustáceos, esto puede estar relacionado, entre otras características del hábitat, a la disponibilidad de carbonatos en el agua, lo cual favorece la formación de la estructura externa en artrópodos (Whiteley, 2011). La distribución de riqueza y abundancia de este

grupo en el área de estudio demuestra que la salinidad puede constituir una barrera para la colonización. En este sentido, se observó también que la composición del sustrato del fondo podría estar jugando un rol importante, ya que la mayor parte del sistema se compone de piedras y gravas, con pocos bancos de sedimentos arenosos o limosos que permitan el refugio de macroinfauna. Este tipo de sustrato atípico para un estuario, puede ser el reflejo de la actividad del embalse Rapel, que modula el caudal del río y que en condiciones de máximo caudal de operación podría ocasionar el arrastre de las piedras y de las gravas hacia la zona de la desembocadura. El caudal también podría estar impidiendo el asentamiento de organismos en los sedimentos. Por otro lado, se observa una relación de cambio en el orden de especies, entre zonas con mayor disponibilidad de materia orgánica, donde la riqueza aumenta gracias a la presencia de grupos más tolerantes a condiciones de menor oxígeno en el agua. Por otra parte, la baja variabilidad en la composición del fitoplancton en los distintos tramos se explica por la alta tolerancia a variaciones en salinidad de los géneros de diatomeas (Williams, 1998), ya que muchos de ellos suelen estar presentes en un amplio rango de distribución en este estudio.

En relación a la caracterización de especies ícticas, en el estuario fue posible identificar dos especies introducidas (*Odontesthes bonariensis* y *Cnesterodon decemmaculatus*) y dos nativas (*Trichomycterus areolatus*, *Percilia gillissi*). Estas últimas se distribuyen diferenciadamente dentro del estuario. En la parte alta, aguas arriba de la zona estuarina sin intrusión, fue registrada la especie *Trichomycterus areolatus* actualmente clasificada como Vulnerable (DS 51/2008, MINSEGPRES) y en la parte baja, aguas arriba de la zona estuarina con intrusión salina, es decir, en la zona estuarina sin intrusión salina se encuentra *Percilia gillissi*, especie actualmente clasificada como En Peligro (DS 33/2012 MMA). Es importante destacar que debido a la alta vagilidad de las especies ícticas su distribución es menos restringida que otras especies, por lo tanto encontrarlas en determinadas zonas clasificadas en este estudio, no implica que no pueden moverse a otras áreas presentes en este ecosistema. Respecto a lo anterior, el humedal tendría una amplia área de interés de conservación.

Al considerar la distribución de organismos y su tolerancia a condiciones químicas del agua y sedimentos, la literatura indica que la toxicidad por metales pesados puede afectar diferenciadamente a las especie, de acuerdo a: su estado de desarrollo, ciclo de vida, ubicación que toman en el estuario y al tipo de contaminante de que se trate, de modo que es recomendable establecer límites para cada uno de ellos una vez que se reconozcan claramente las composiciones y dinámicas de las comunidades presentes bajo los distintos posibles escenarios y presiones a las que se enfrentan. Cabe mencionar que la alta variedad de condiciones hidrológicas a las que se enfrenta el estuario, y los organismos que los habitan, requieren de un estudio que represente la mayor gama de condiciones ambientales posibles, considerando las mareas y los caudales de flujo del río, así como las distintas estaciones del año.

Los resultados de este estudio constituyen un primer paso para la elaboración de los límites de la norma secundaria de calidad ambiental para el estuario del río Rapel, así como también, proporciona valiosos antecedentes respecto a la caracterización del ecosistema en el medio acuático, para posibles medidas de conservación. Sin embargo, debemos destacar que los datos de esta investigación fueron tomados en un tiempo concreto bajo unas condiciones determinadas de marea y en el estrato superficial, lo que induce un sesgo espacial y temporal en los resultados y su interpretación. Lo más idóneo es establecer condiciones de referencia por tramos, basándose en una base de datos lo

más extensa posible donde estuvieran representadas las variaciones naturales diarias, estacionales, anuales e incluso inter-anuales del sistema y las artificiales causadas por los pulsos de agua generados por el embalse. Esto constituye especial importancia en sistemas estuarinos. Del mismo modo, es necesario ampliar el estudio e incluir componentes biológicos que interactúan con el humedal de manera no permanente como la fauna semiacuática y terrestre.

6 CONCLUSIONES

El presente documento entrega los resultados del estudio “Delimitación y caracterización ambiental del estuario de la cuenca del río Rapel para la elaboración de la norma secundaria de calidad del agua”. Las conclusiones emanadas a partir de la revisión de los antecedentes recabados son las siguientes:

- Existe un efecto regulador del embalse sobre los fenómenos observados en el estuario en las componentes físicas, químicas y biológicas, el que junto a la influencia marina, da lugar a un sistema altamente complejo y dinámico espacial y temporal.
- La caracterización hidrodinámica del sistema, junto con el aporte de evidencia de terreno reveló una desconexión hidráulica activa bajo condiciones normales de caudal en el estuario, esto permitió definir una cota para el alcance de la zona de estuario bajo las condiciones forzantes registradas durante los terrenos realizados en el contexto del estudio.
- Se determinó el alcance estimado del estuario, a través del avance de la onda de marea y consideraciones geográficas. Determinando que el estuario tiene una extensión entre 6 km y 9 km, dependiendo de la condición de mareas y caudales del río Rapel.
- La cuña salina presente en el estuario permitió identificar 3 zonas en el estuario o compartimentos en el sistema: zona de cuña salina, zona de mezcla parcial y zona sin intrusión.
- Conforme a las zonas hidráulicas definidas para el estuario, la calidad de agua describe aguas moderadamente alcalinas con una buena oxigenación y contenidos de salinidad conductividad, salinidad, DQO, fósforo total, nitrógeno total, clorofila “a” y sulfato que en general, aumentan en dirección a la boca del estuario, es decir desde la zona sin intrusión hasta la cuña salina.
- En los sedimentos no se observa una diferenciación gradual desde la zona alta a la zona terminal del estuario exceptuando, en alguna medida, el potencial redox, fósforo total y aluminio.
- La distribución de los organismos acuáticos en general fue relacionada a la concentración de sal en el agua en los diferentes tramos definidos en este estudio. Donde especies adaptadas a aguas salinas como macroalgas se encontraron solo en la zona denominada cuña salina junto con organismos estuarinos como Poliquetos (*Perinereis* sp.), Crustáceos (*Hemigrapsus crenulatus*) y peces (*Mugil cephalus*) que también estaban presentes en la zona de transición, mientras que aquellas especies adaptadas al agua dulce, eran abundantes en zona estuarina sin intrusión salina.
- La fauna íctica fue el único taxa acuático en presentar especies en categoría de conservación de acuerdo a la Clasificación de Especies Silvestres (RCE). Estas

fueron las especies nativas: *Trichomycterus areolatus* en estado Vulnerable (DS 51/2008 MINSEGPRES) y *Percilia gillissi* En Peligro (DS 33/2012 MMA). Esta última presente en la zona estuarina sin intrusión salina y *T. areolatus* aguas arriba de esta zona.

- En relación al establecimiento de rangos de parámetros para la creación de una Norma Secundaria de Calidad de Agua (NSCA) para el estuario del río Rapel. Si bien se presentan los rangos de los parámetros analizados en este estudio, se debe señalar que es necesario obtener antecedentes adicionales de las propiedades físicas y químicas el agua, de los sedimentos, y de la biota acuática, que den cuenta de la dinámica espacio-temporal del sistema, para poder elaborar y proponer límites y parámetros para la realización de una Norma Secundaria de Calidad de Agua.
- En relación al posibles establecimiento de un plan de seguimiento o monitoreo de Calidad de agua para el desarrollo de NSCA, se sugieren tres zonas, de acuerdo al comportamiento diferenciado observado en algunos parámetros (nutrientes, carbonatos, conductividad, metales disueltos entre otros). Una zona de agua dulce (sitios ER-1, ER-2, ER-3), una zona de transición entre el agua dulce y salina (ER-4 y ER-5), y una tercera zona en la desembocadura (E-6).
- Se sugiere considerar como base para la realización de la Norma secundaria de Calidad de Agua los mismos parámetros que en el anteproyecto del río Rapel, agregando además algunos parámetros como metales en su fracción disuelta o asimilable por los organismos (Cadmio, Plomo y Cobre), la Salinidad, de relevancia para la presencia y distribución de especies en diferentes zonas del estuario y los Carbonatos, cuya disponibilidad para crustáceos y bivalvos depende de la acidez del agua (pH) en la zona estuarina.
- Es recomendable el levantamiento de mayor cantidad de información para reafirmar las definiciones presentadas en este estudio, que fue realizado en condiciones particulares existentes. Ello, con el objetivo de aumentar la resolución espacial, como también, para aumentar la resolución temporal, permitiendo la inclusión de un rango de condiciones forzantes más amplio, como la influencia de la represa Rapel en la actual condición del estuario.

7 REFERENCIAS

- APHA-AWWA-WEF. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition.
- ARAYA VERGARA, J. 2014. Contribución al estudio de los procesos estuariales en las desembocaduras de los ríos Rapel y Maipo. Investigaciones Geográficas. (20): 17-38.
- ARITA, M. & JIRKA, G. 1987(b). Two-Layer Model of Saline Wedge. II: Prediction of Mean Properties. Journal of Hydraulic Engineering, 113(10): 1249-1263.
- BERTRAND, H. 1995. Les insectesaquatiquesd"Europe.EncyclopédieEntomologique. Volume II: Trichoptères, Lepidoptères, Diptères, Hyménoptères.Paul LechevalierEditeur (Paris). 543 pp.
- BOLUND, P. & HUNHAMMAR, S. 1999. Ecosystem services in urban areas. Ecological Economics. 29: 293-301.
- BUSTAMANTE, C. A. 2008. Efectos ambientales generados por la construcción de un embalse. Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Trabajo de Grado Modalidad Monografía para optar al título de ingeniero civil. 78 pp.
- CAMPOS, N.H. 1990. LA CONTAMINACION POR METALES PESADOS EN LA CIENAGA GRANDE DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. A. A. 1016, Santa Marta, Colombia. Caldasia. 16 (77): 231-244.
- CEA .2006. Conceptos y criterios para la evaluación de humedales. Gobierno de Chile, Ministerio de Agricultura. 81 pp.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA), UNIVERSIDAD DE CHILE. 2009. Análisis metodológico para determinar caudales de dilución en zonas estuarinas.
- ERICKSON, S.J., N. LACKIE, & MALONEY, T.E. 1970. A screening technique for estimating copper toxicity to estuarine phytoplankton. Journal (Water Pollution Control Federation), R270-R278.
- EUROPEAN COMMUNITIES. 2003. Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance Document N° 10. Rivers and lakes- Typology, reference conditions and classification systems. 270 pp.
- EUROPEAN COMMUNITIES. 2003. Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance Document N°5. Transitional and Coastal Waters- Typology, reference conditions and classification systems. 270 pp.
- GREENFIELD, S.S. 1942. Inhibitory effects of inorganic compounds on photosynthesis in *Chlorella*. American Journal of Botany. 121-131.

- GUZMÁN, C.A. 2013. Incorporación de consideraciones ambientales en la operación horaria del embalse Rapel. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. 30 pp.
- HAUENSTEIN, E. 2006. Estado de conocimiento de las macrófitas dulceacuícolas de Chile. *Gayana*. 70: 16-23.
- HOLLIBAUGH, J. T., D. L. R., SEIBERT, & THOMAS, W. H. 1980. A comparison of the acute toxicities of ten heavy metals to phytoplankton from Saanich Inlet, BC, Canada. *Estuarine and Coastal Marine Science*. 10(1): 93-105.
- HOUNSLOW, A. 1995. *Water Quality Data analysis and interpretation*. Lewis Publishers, United States of America. 168-171.
- KIMMERER, W.J. 2002. Physical, biological, and management responses to variable freshwater flow into the San Francisco Estuary. *Estuaries* 25(6B):1275–1290.
- KRAMMER, K. & LANGE-BERTALOT, H. 1986–1991. Bacillariophyceae 1. (1986); Bacillariophyceae 2 (1988); Bacillariophyceae 3 (1991); Bacillariophyceae 4 (1991). En: Ettl, H. *et al.*, (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, G.Fischer, Jena.
- KREBS, C.J., 1989. *Ecological methodology*. Harper Collins Publishers, New York, New York, USA. 654 pp.
- LALLI, C.M. & T.R. PARSONS 1997. *Biological Oceanography, an Introduction*, 2nd Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington, MA. 314 pp.
- LANGE-BERTALOT, H. 2001. Diatoms of Europe. *Navicula sensu stricto 10 Genera Separated from Navicula sensu lato*. *Frustulia*. Lange Bertalot (ed.). 526 pp.
- LIN, H-C & DUNSON, W.A. 1993. The Effect of Salinity on the Acute Toxicity of Cadmium to the Tropical, Estuarine, Hermaphroditic Fish, *Rivulus marmoratus*: A Comparison of Cd, Cu, and Zn Tolerance with *Fundulus heteroclitus*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 25: 41-47.
- LOPRETTO, E. & TELL, G. 1995. *Ecosistemas de Aguas Continentales*. Tomo III. Ediciones Sur. La Plata, Argentina. 1401 pp.
- LUGO-ORTIZ, C.R. & CAFFERTY, M.C. 1999. Revision of South American species of Baetidae (Ephemeroptera) previously placed in Baetis Leach and Pseudocloeon Klapálek. *Ann Limnol.* 35: 257-262.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Opportunities and Challenges for Business and Industry*. World Resources Institute, Washington, DC. 31 pp.
- MITSCH, W. J. & GOSSELINK, J. G. 2007. *Wetlands*. Wiley, New York. 920 pp.
- MOREIRA, S.M. 2005. A short-term sublethal in situ toxicity assay with *Hediste diversicolor* (polychaeta) for estuarine sediments based on postexposure feeding. *Environmental Toxicology and Chemistry*. Vol. 24 (8) 2010-2018.

- NIÑO, Y. & TAMBURRINO, A. 2004. Apuntes del curso Hidrodinámica Ambiental. Universidad de Chile.
- PONSATÍ, L., V. ACUÑA, I. ARISTI, M. ARROITA, E. GARCÍA-BERTHOU, D. VON SCHILLER, A. ELOSEGI, S. SABATER. 2015. Biofilm Responses to Flow Regulation by Dams in Mediterranean Rivers. *River Research and Applications*. (31) 8: 1003–1016.
- PRESCOTT, G.W. 1970. *Algae of the Western Great Lakes area*. WMC Brown Co. Buque. Iowa. 977 pp.
- PULGAR, J., M. ALDANA, E. VERGARA, & GEORGE-NACIMIENTO. M. 1995. La conducta de la jaiba estuarina *Hemigrapsus crenulatus* (Milne-Edwards 1837) en relación al parasitismo por el acantocéfalo *Profilocollis antarcticus* (Zdzitowiecki 1985) en el sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 68: 439 – 450.
- REARDON, I. S. & R.M. HARRELL. 1990. Acute toxicity of formalin and copper sulfate to striped bass fingerlings held in varying salinities. *Aquaculture*. 87(3): 255-270.
- RIVERA, P. 1983. A Guide for References and Distribution for the Class Bacillariophyceae in Chile between 18°28'S and 58°S. *Bibliotheca Diatomologica* Vol.3, 386 pp.
- RODRÍGUEZ, E.M., J.M. MONSERRAT, D.A. MEDESANI, R. BIGI, P.A. RODRÍGUEZ MORENO, L.S. LÓPEZ, V.S. STELLA, C.O. CERVINO & ANSALDO, M. 1998. Efectos letales y subletales de plaguicidas y metales pesados en cangrejos de estuario. Revisión de una década de investigaciones. Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadiva” e Instituto Nacional de Investigación de las Ciencias Naturales. Nueva Serie, 150: 1-17.
- RODRÍGUEZ E.M., R. BIGI, D.A. MEDESANI, V.S. STELLA, L.S.L. GRECO, P.A.R. MORENO, J.M. MONSERRAT, G.N. PELLERANO & ANSALDO, M. 2001. Acute and chronic effects of cadmium on blood homeostasis of an estuarine crab, *Chasmagnatus granulata*, and the modifying effect of salinity. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 24:509-519 pp.
- ROUND, F.E., R.M. CRAWFORD & MANN, D.G. 1996. *The Diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 735 pp.
- RUMRICH, U., H. LANGE-BERTALOT & M. RUMRICH. 2000. *Iconographia Diatomologica* 9. Diatomeen der Anden (von Venezuela bis Patagonien/ Tierra del Fuego). Lange Bertalot (ed.). 671 pp.
- SECRETARÍA DE LA CONVENCION DE RAMSAR. 2006. *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*, 4a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- SIMONSEN, R., 1987. *Atlas and Catalogue of the Diatom Types of Friedrich Hustedt*. J. Cramer, Berlin & Stuttgart, 1: 525 pp, 2: 597, 3: 619.

- SMITH, V.H., G.D. TILMAN & NEKOLA, J.C. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100: 179-196.
- STANLEY, E. H. & DOYLE, M. W. 2003. Trading off: The ecological effects of dam removal. *Front. Ecol. Environ.* 1: 15– 22.
- TEEB. 2014. Glossary of terms. the economics of ecosystems and biodiversity. <http://www.teebweb.org/>.
- THEEDE, H. 1980. Physiological responses of estuarine animals to cadmium pollution. *Helgo Wiss Meeresunters.* 33:26-35.
- VALLE-LEVINSON, A. (ed). 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press. 1-11.
- VANNOTE, R.L., G. W. MINSHALL, K. W. CUMMINS, J.R. SEDELL & D. E. GUSHING. 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 130-137.
- VITALE, A. M., J. M. MONSERRAT, P. CASTILHO & RODRIGUEZ, E.M. 1999. Inhibitory effects of cadmium on carbonic anhydrase activity and ionic regulation of the estuarine crab *Chasmagnathus granulata* (Decapoda, Grapsidae). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology.* 122(1):121-129.
- WETZEL, R. G. & LIKENS, G.E. 1991. *Limnological analysis*. (2nd edn).Springer-verlag, New York. 391pp. ISBN 0-387-97331-1.
- WHITELEY N. M. 2011. REVIEW Physiological and ecological responses of crustaceans to ocean acidification. *Marine Ecology Progress Series.* 430: 257–271.
- WILLIAMS, W.D. 1998. Salinity as a determinant of the structure of biological communities in salt lakes. *Hydrobiologia.* 381: 191-201.
- ZIRINO, A. & S. YAMAMOTO. 1972. A pH-dependent model for the chemical speciation of copper, zinc, cadmium, and lead in seawater. *Limnology and Oceanography.* 17(5): 661-671.

8 ANEXO 1 FOTOGRAFICO

8.1 Puntos de muestreo



ER-1 (zona sin intrusión salina)



ER-2 (zona sin intrusión salina)



ER-3 (zona de mezcla parcial)



ER-4 (zona de mezcla parcial)



ER-5 (zona de cuña salina)



ER-6 (zona de cuña salina)

8.2 Fotografías Ictiofauna



Trichomycterus areolatus



Percilia gillissi



Cnesterodon decemmaculatus



Especie superior (*Eleginops maclovinus*),
especie inferior (*Mugil cephalus*)



Odontesthes bonariensis

9 ANEXO 2 PERMISO DE PESCA



AUTORIZA A CENTRO DE ECOLOGÍA APLICADA LTDA. PARA REALIZAR PESCA DE INVESTIGACIÓN QUE INDICA.

VALPARAÍSO, 28 DIC. 2015

R. EX: N° 3529

VISTO: Lo solicitado por Centro de Ecología Aplicada Ltda., mediante carta, C.I. SUBPESCA N° 13.664, de fecha 18 de noviembre de 2015; lo informado por la División de Administración Pesquera de esta Subsecretaría en Informe Técnico N° 244/2015, contenido en Memorandum Técnico (P.I.N.V.) N° 244/2015, de fecha 2 de diciembre de 2015; los Términos Técnicos de Referencia del Proyecto **"Solicitud de Pesca de Investigación para Flora y Fauna Acuática en Cuerpos y Cursos de Aguas Continentales e Insulares del Territorio Nacional"**, elaborados por el peticionario y aprobados por esta Subsecretaría; lo dispuesto en la Ley N° 19.880; lo dispuesto en la Ley General de Pesca y Acuicultura N° 18.892 y sus modificaciones cuyo texto refundido fue fijado por el D.S. N° 430 de 1991, lo dispuesto en el D.F.L. N° 5 de 1983 y el D.S. N° 461 de 1995 y el Decreto Exento N° 878 de 2011, todos del actual Ministerio de Economía, Fomento y la Resolución Exenta N° 332 de 2011, del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura.

CONSIDERANDO:

Que Centro de Ecología Aplicada Ltda., ingresó mediante carta citada en Visto, una solicitud para desarrollar la pesca de investigación conforme los Términos Técnicos de Referencia del Proyecto denominado **"Solicitud de Pesca de Investigación para Flora y Fauna Acuática en Cuerpos y Cursos de Aguas Continentales e Insulares del Territorio Nacional"**.

Que mediante Memorandum Técnico (P.I.N.V.) N° 244/2015, la División de Administración Pesquera de esta Subsecretaría, informa que las actividades planteadas en la solicitud califican como pesca de investigación de acuerdo a lo definido en el artículo 2° número 29 de la Ley General de Pesca y Acuicultura, por cuanto es una actividad extractiva sin fines de lucro, cuya finalidad es obtener datos e información para generar conocimiento científico, para proteger la biodiversidad y el patrimonio sanitario el país.

Que el interés del estudio, son todas las especies de peces de agua dulce (nativas e introducidas), Fitobentos, Zoobentos, Zooplancton y Fitoplancton, presentes en los cuerpos de aguas continentales e insulares del territorio nacional; en particular, en aquellas zonas donde se requiera ejecutar estudios de línea base o seguimientos ambientales.

10 ANEXO 3 BASE DE DATOS CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE AGUA Y SEDIMENTOS

Anexo digital 1. Base de datos calidad física y química de agua y sedimentos.

11 ANEXO 4 PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA CONTENIDOS EN EL ANTEPROYECTO DEL RÍO RAPEL Y PARÁMETROS SUGERIDOS EN ESTE ESTUDIO (*)

| |
|-----------------------------------|
| IN SITU |
| Conductividad eléctrica |
| Salinidad* |
| pH |
| Temperatura* |
| Oxígeno disuelto |
| FÍSICOS Y QUÍMICOS |
| Potencial redox* |
| Sólidos suspendidos totales |
| Sólidos disueltos |
| DQO |
| MACROELEMENTO |
| Carbonatos* |
| Sulfato |
| Cloruro |
| ORGÁNICOS |
| Aceites y grasas |
| Detergentes (SAAM)* |
| METALES |
| Aluminio |
| Arsénico |
| Cobre disuelto* |
| Cadmio disuelto* |
| Cromo |
| Hierro |
| Manganeso |
| Molibdeno |
| Zinc |
| Plomo disuelto* |
| NUTRIENTES Y CLOROFILA "a" |
| Fósforo Total |
| Ortofosfatos |
| N-Amonio |
| N-Nitrito |
| N-Nitrato |
| Nitrógeno Total |
| Clorofila "a" |
| MICROBIOLÓGICOS |
| Coliformes fecales |
| DBO5 |

12 ANEXO 5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Estudios describen concentraciones que representan límites letales y sub-letales de distintos metales pesados evaluados en este estudio, para organismos en diferentes niveles tróficos presentes en sistemas estuarinos. A continuación se presentan algunos ejemplos extraídos de investigaciones realizadas en estuarios en otras zonas geográficas.

Cadmio

En 2001 en el estuario del Río de la Plata en Argentina, se encontró niveles de cadmio de un 82% por sobre el límite permisible, es decir, en un rango de 2 a 4 $\mu\text{g/L}$. En los sedimentos superficiales del estuario se encontró un valor de $9.43 \pm 4.63 \mu\text{g/g}$ y un $11.91 \pm 6.39 \mu\text{g/g}$ en el material suspendido de aguas muy contaminadas. En este estuario se encuentran concentraciones de salinidad del rango de los 12 a los 30 ppt, rango considerado dentro del estuario Rapel que se estudia en este informe. Se valora a continuación, un estudio que mide el efecto del cadmio sobre la homeostasis del cangrejo de estuario *Chasmagnathus granulata* (Decapoda, Brachyura, Grapsidae), y el efecto de la salinidad sobre esto. Aquí se menciona que el cadmio, como otros metales pesados, presenta una alta absorción por parte de sedimentos finos como la arcilla (*Comisión Administradora Del Río De La Plata, 1990 fide in Rodríguez et al., 2001*). Este punto es importante a considerar ya que este organismo habita en el bentos del estuario y se alimenta de especies presentes en los sedimentos así como también del detrito. Se establece en este artículo, basado en bibliografía anterior que el LC_{50} para altas salinidades (30 ppt) es mayor a 50 mg/L de cadmio (Vitale *et al.*, 1999). Lo destacable de este y otros artículos considerados en esta revisión en cuanto a los efectos del cadmio, es que este tiene efectos sobre los procesos metabólicos de los distintos organismos, ya que compite con el Ca^{++} debido a que utilizan las mismas vías de absorción. Otro de los efectos que produce el cadmio es la acidosis plasmática, probablemente causada por la unión de Cd a proteínas plasmáticas (hemocianina). Otros son la disminución de la presión de CO_2 y aumento de la presión de O_2 , disminución del consumo de oxígeno, además de hiperplasia, necrosis y telangiectasia de las branquias, sin embargo, estos efectos sub letales siempre fueron mucho mayores a bajas salinidades (12 ppt en este caso).

Otro artículo de Rodríguez *et al.*, (1998) que utilizó el mismo organismo estuarino (*C. granulata*), también definió concentraciones letales de cadmio, sin embargo, en este caso no se consideró la salinidad sino los estadios de vida. Así, se puso a prueba cangrejos adultos durante la inter muda y adultos durante la fase post muda que fueron expuestos a solución stock de cadmio (no se especifica concentración) durante 96 horas y 20 días respectivamente a una salinidad de 12 g/L. La LC_{50} para adultos inter muda expuestos a 96-h fue de 25,33 mg/L mientras que para adultos PM fue de 0,20 mg/L. Lo que indica que la CL_{50} para los cangrejos adultos durante la post-muda resultó ser 127 veces menor que para los adultos durante la inter-muda. Además, se determinó que el cadmio se acumula tanto en las branquias como en el caparazón de los cangrejos. Asimismo este trabajo encontró que la actividad de la Na, K-ATPasa fue inhibida a concentraciones de Cd^{2+} de 0,25 mg/L y la LC_{50} de Cd^{2+} (a 65 minutos) fue de 18,88 mg/L para cangrejos inter muda y para cangrejos post muda fue de 21,55 mg/L; estos valores no presentaron diferencias significativas, sin embargo, se observó una tendencia a una mayor inhibición de la actividad de esta enzima branquial a mayores concentraciones de cadmio. El cadmio también tuvo un efecto inhibitorio de la anhidrasa carbónica del 68% a 30 g/L de

salinidad y de 79,9% a 2,5 g/L de salinidad (Rodríguez *et al.*, 1988). Efectos *in vitro* de cadmio, zinc y cobre sobre la anhidrasa carbónica han sido determinados como LC₅₀ de 2,15 a 10⁻⁵M, 1,62 a 10⁻⁵M y 3,75 a 10⁻⁶ M para Cd, Zn y Cu respectivamente (Vitale *et al.*, 1999).

Cobre

También existen estudios de toxicidad de metales pesados en microalgas en estuarios. El cobre, por ejemplo, a pesar de ser un elemento traza esencial para el crecimiento de microalgas, en exceso se vuelve tóxico (Erickson *et al.*, 1970), habiendo sido incluso usado como alguicida para controlar proliferaciones algales nocivas en el pasado (Moore & Kellerman, 1904; Bartsch, 1954; Mc Veigh & Brown, 1954; todos fide in Erickson *et al.*, 1970). Por ejemplo, un estudio demostró que la fotosíntesis de *Chlorella vulgaris* se inhibe a 6,4 µg Cu/L (Greenfield, 1942). En aguas estuarinas, el cobre varía enormemente con la salinidad y el pH (Erickson *et al.*, 1970), y a medida que la salinidad y el pH aumentan, la toxicidad disminuye (Erickson *et al.*, 1970). Los resultados de un estudio realizado sobre fitoplancton estuarino indicaron que el cobre es altamente tóxico a bajas concentraciones, influyendo en la composición cualitativa y cuantitativa de estas comunidades, especialmente en condiciones de baja salinidad y pH. No obstante, la tolerancia al cobre varía entre especies y grupos taxonómicos, es así como *Chlorella* sp. Tolera concentraciones de cobre mucho mayores que *Isochrysis galbana* (Erickson *et al.*, 1970). Esto afecta a los eslabones tróficos superiores ya que por ejemplo, las larvas de ostras prefieren a *I. galvana* antes que a *Chlorella* sp. (Loosanoff & Davis, fide in Erickson *et al.*, (1970). Otro estudio de toxicidad aguda den 10 metales pesados (Cu, Hg, Pb, Cd, Zn, Ni, Cr, Se, Sb y As) realizado sobre la diatomea *Thalassiosira aestevalis*, demostró que hubo inhibición del crecimiento a 30 nM de Hg y a >1000 nM de Se, Sb, Cr y Ni (Hollibaugh *et al.*, 1980).

Se ha descrito también que la concentración letal media de cobre (LC₅₀) fue de 241 µg/L luego de 48 horas de exposición y 125 µg/L luego de 96 horas de exposición para el poliqueto Nereidido *Hediste diversicolor* presente en sedimentos estuarinos. Además, se midió el efecto sub letal de alimentación post-exposición, donde se obtuvo una concentración inhibitoria media (IC₅₀) de 52 µg/L luego de 48 horas de exposición y de 25 µg/L luego de 20 días de exposición *in situ* a distintas concentraciones de cobre. Se registró además, un 10% de mortalidad con 23 µg/L y un 50% de mortalidad con 39 µg/L de cobre durante los últimos 5 días de exposición. Cabe destacar que donde se reportó mayor depresión de alimentación fue en sectores considerados por las autoridades locales como los más afectados; en ellos se pueden encontrar niveles de hasta 40 µg/L de compuestos orgánicos semi-volátiles y altas concentraciones de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, 0.007, 2.2, 1.2, 0.2, 0.6 y 3.1 mg/g de la fracción de sedimento seco). Además se menciona que la razón más probable para la depresión de alimentación serían cambios perjudiciales en mecanismos fisiológicos, afectando enzimas como la acetilcolinesterasa lo cual tiene efectos en las funciones neuromusculares o causando daños en órganos sensoriales y receptores que puedan afectar los comportamientos alimenticios (Moreira, 2005).

13 ANEXO 6 CERTIFICADOS DE LABORATORIO

Los certificados de laboratorio de los diferentes análisis realizados en agua y sedimentos son presentados en el **Anexo digital 1**.