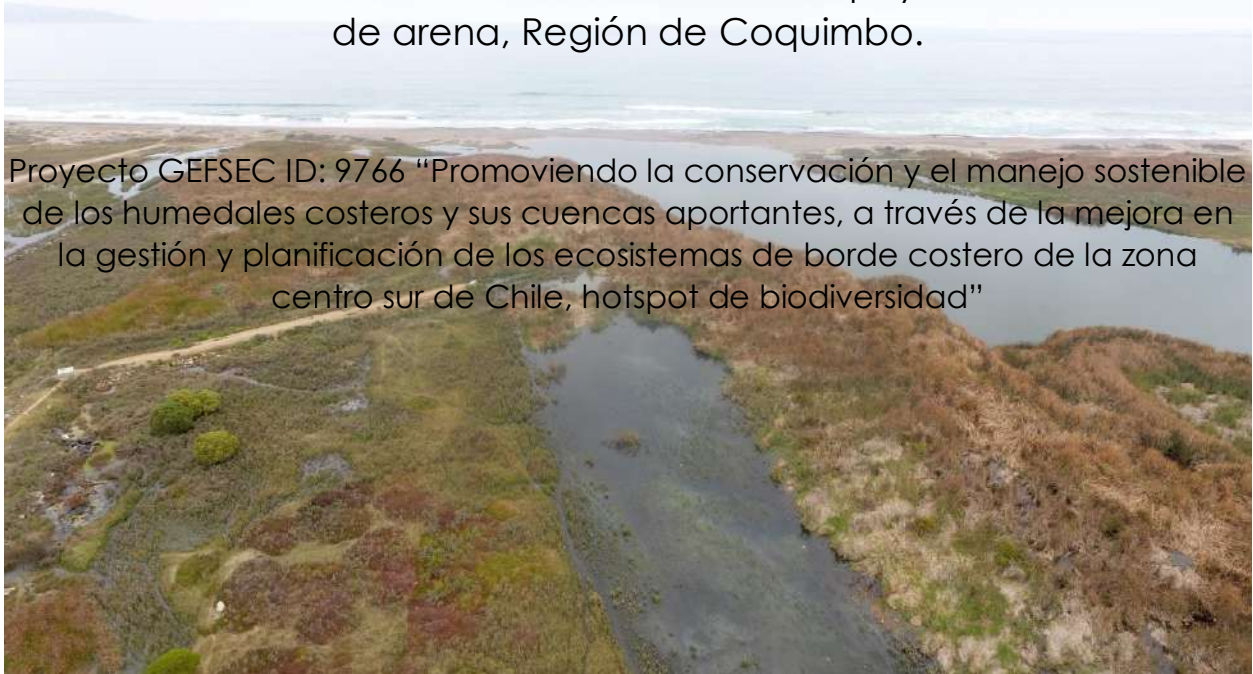


## Consultoría 01/2021 Coquimbo

---

Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo.

Proyecto GEFSEC ID: 9766 "Promoviendo la conservación y el manejo sostenible de los humedales costeros y sus cuencas aportantes, a través de la mejora en la gestión y planificación de los ecosistemas de borde costero de la zona centro sur de Chile, hotspot de biodiversidad"



**Informe de Final-V4**

**20 Febrero 2022**



El proyecto GEFSEC ID:9766 “Promoviendo la conservación y el manejo sostenible de los humedales costeros y sus cuencas aportantes, a través de la mejora en la gestión y planificación de los ecosistemas de borde costero de la zona centro sur de Chile, hotspot de biodiversidad” solicita hacer un estudio el “**Diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo** (Proceso Selección 01/2021 Coquimbo)”. El Equipo consultor estuvo conformado por 5 académicos de las universidades de Valparaíso, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Playa Ancha y de La Serena y 5 profesionales de apoyo, bajo la coordinación de Dinámica Costera E.I.R.L. (Figura 1). Los profesionales son los siguientes (una reseña curricular se incluye en el Anexo 9.1.):

- Equipo responsable
  - Manuel Contreras-López
  - Roberto Agredano Martín
  - Patricio Winckler Grez
  - Francisco Cabrera Cona
  - Carlos Zuleta Ramos
  - Christian Jofré Pérez
- Equipo Asistente
  - Nathalie Duarte Gutiérrez
  - Alfredo Navarro Aravena
- Colaboradores
  - Bárbara Romero Guzmán
  - Yisset Rabeiro Rodríguez
- Edición
  - Manuel Contreras-López
  - Patricio Winckler Grez

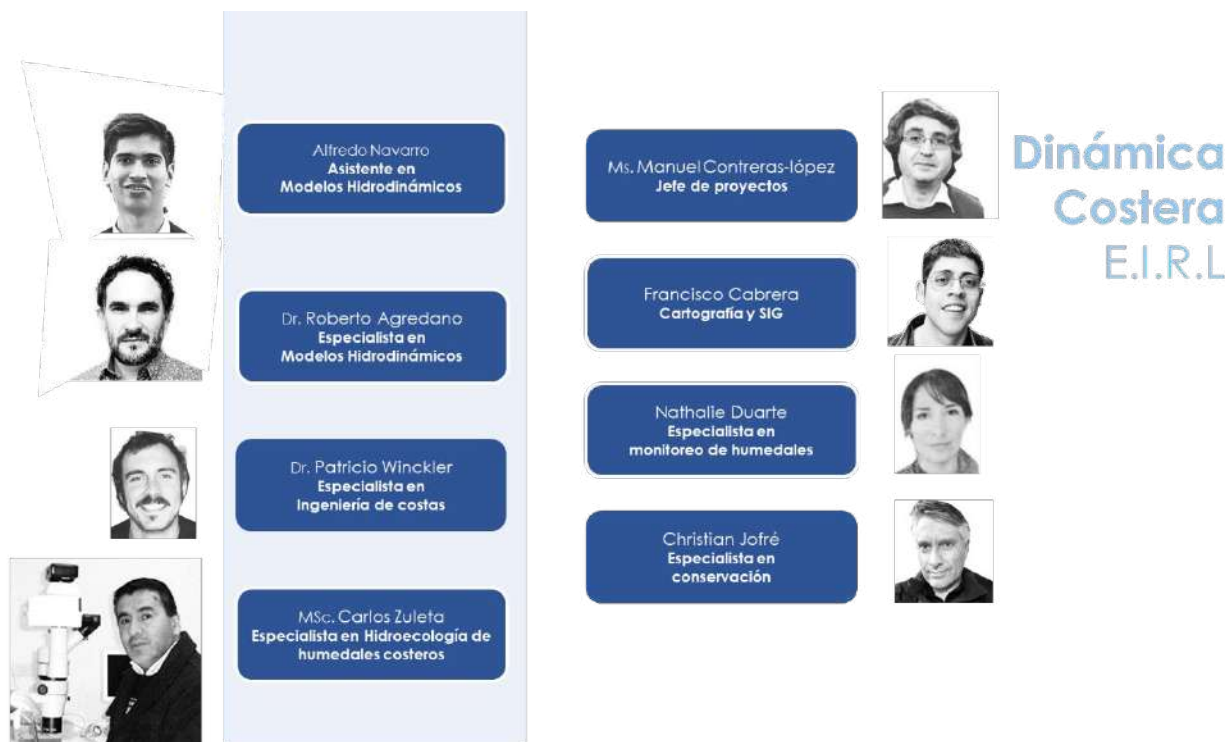


Figura 1: Equipo de trabajo Dinámica Costera E.I.R.L.

**Agradecimientos:**

Se agradece y reconoce la activa participación de todas y todos los integrantes del Comité Técnico Local del Humedal del Río Elqui en los talleres técnicos de este estudio. Sus aportes contribuyeron significativamente en el desarrollo de este estudio.

La contraparte del proyecto, representada por Carolina Vega Schweizer, Coordinadora Local del Proyecto GEF Humedales – y los profesionales de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región de Coquimbo: Sergio Troncoso Layi y Claudia Accini Muñoz, cuyas observaciones, dedicación y participación continua en las reuniones mensuales de coordinación del proyecto, hicieron posible avanzar en el desarrollo de esta consultoría.

Un especial reconocimiento a Rudy Vergara B., quien nos proporcionó en forma oportuna información valiosísima sobre la desembocadura del Río Elqui.

Sugerencia para citar este estudio: MMA – ONU Medio Ambiente (2022). Diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo. Informe Final. Estudio elaborado por Dinámica Costera y solicitado por Ministerio del Medio Ambiente – Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente en el marco del proyecto GEFSEC ID:9766.

## RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del proyecto GEFSEC ID: 9766 “*Promoviendo la conservación y el manejo sostenible de los humedales costeros y sus cuencas aportantes, a través de la mejora en la gestión y planificación de los ecosistemas de borde costero de la zona centro sur de Chile, hotspot de biodiversidad*”, el humedal costero del río Elqui fue escogido como uno de los cinco ecosistemas pilotos seleccionados para el desarrollo de programas integrales, coordinados y participativos, que establezcan medidas concretas de restauración, monitoreo, planificación territorial y manejo sustentable. Dinámica Costera E.I.R.L se adjudicó la consultoría “**Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfoodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo**”<sup>1</sup>, que complementa los estudios ejecutados a partir del año 2020 y ya terminados:

- “*Delimitación y caracterización de usos del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región de Coquimbo*”, e
- “*Identificación y priorización de áreas de restauración ecológica para el Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas aportantes, en la Región de Coquimbo*”,

El proyecto se desarrolló en paralelo y se coordinó con el estudio:

- “*Diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del humedal costero del río Elqui, Región de Coquimbo*”.

El objetivo de esta consultoría fue caracterizar el comportamiento morfoodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra de arena terminal, y proponer estrategias y protocolos de manejo. Este informe final reporta todas las actividades orientadas al cumplimiento de todos los objetivos propuestos:

- Caracterización del comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y sus subcuencas aportantes (objetivo 1).
- Implementación de un modelo numérico para la caracterización de la morfología y el comportamiento morfoodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena (objetivo 2).
- Identificación de estrategias de manejo y gestión del humedal, enfocado en su comportamiento hidrodinámico y morfoodinámico (objetivo 3).

Las principales conclusiones de esta consultoría son:

- La desembocadura del río Elqui ha experimentado aperturas artificiales desde el año 2011, sin regulación apropiada. Estas aperturas tienen como consecuencia una disminución en el tamaño del espejo de agua del humedal.
- La distribución y densidad de la vegetación palustre resulta importante para definir la hidrodinámica y morfoodinámica del humedal, actuando como zonas de atenuación tanto de la velocidad de escurrimiento como del avance de la erosión, sedimentación y salinidad en las áreas ocupadas por ella. Por este motivo la vegetación palustre debe ser monitoreada y gestionada.
- Las zonas de erosión en las simulaciones se concentran a) en la entrada del río Elqui al humedal producto del flujo de ingreso a alta velocidad y b) en la barra terminal de arena, donde el sobrepaso en condiciones de año normal y húmedo produce al erosión y rotura de la barra, generando un canal de desagüe cuya magnitud depende de la magnitud del caudal del río Elqui.
- La apertura de la barra previa a una crecida para año normal o húmedo reduce el tiempo en que el humedal está al nivel máximo de la barra de arena, ya que el desagüe del humedal está canalizado previamente. Si no existe la apertura previa, esta se forma con el avance del flujo desde el río Elqui, pero más tardíamente.

---

<sup>1</sup> Proceso de Selección 01/2021 Coquimbo.

- En las simulaciones no se produce entrada del agua de océano al humedal ya que el nivel del mar no alcanza la máxima cota de la barra en la situación actual. El sobrepaso sí se produce por efecto del run-up o ascenso del oleaje durante marejadas extremas.
- Luego de un evento de sobrepaso de oleaje al humedal, se crea un gradiente de salinidad pequeño en la vertical, que no alcanza a formar estratificación.
- El cierre o apertura artificial de la barra puede realizarse en forma manual con una cuadrilla de trabajadores (entre 7 y 27, dependiendo del tamaño del canal de conexión), en un lapso entorno a las 3 horas de trabajo, lo que es adecuado para el régimen de mareas del río Elqui.

Del total de medidas identificadas para gestionar la desembocadura del río Elqui y su barra de arena, se priorizan las siguientes por ser más factibles de implementar en el corto y mediano plazo:

- Cierre manual de la barra de arena cuando se encuentra artificialmente abierta, para evitar los impactos que supone un cierre mecanizado.
- Apertura manual de la barra de arena cuando se determine sea necesario abrirla artificialmente, para evitar los impactos que supone una apertura mecanizada.
- Registrar los cambios de nivel del agua de la desembocadura del río Elqui con ayuda una regla limnómetro, para contar con antecedentes objetivos que permita tomar las decisiones de apertura y cierre de la barra.
- Monitoreo semanal de la desembocadura, centrado en controlar cambios de las propiedades de la columna de agua.
- Gestión y restauración de la vegetación hidrófila del humedal, que debe responder a una evaluación (al menos) semestral de cubierta y densidad. La restauración debe ser realizada en forma gradual.
- Monitoreo de la playa, controlando la pendiente y cota de las dunas en las inmediaciones de la desembocadura y la barra en relación con el nivel de reducción de sonda, como referencia de un plano de marea en el lugar.
- Disminuir las posibilidades del ingreso de agua de mar al humedal y las alteraciones que conlleva a la biota el cambio abrupto de salinidad por marejadas mediante la restauración de dunas en el entorno de la desembocadura y la barra de arena.
- Restricción del tránsito de vehículos por la playa y la barra de arena de la desembocadura.
- Implementación de pasarelas elevadas para mitigar el tránsito continuo de personas, especialmente sobre las dunas para acceder a la playa.

## Contenido

1	INTRODUCCIÓN	8
2	OBJETIVOS	9
3	METODOLOGÍA POR OBJETIVOS	10
3.1	Área de estudio	10
3.2	Actividades generales asociadas al objetivo general de la consultoría	11
3.2.1	<i>Revisión Bibliográfica</i>	11
3.2.2	<i>Revisión Cartográfica</i>	13
3.2.3	<i>Cartografía y SIG</i>	13
3.3	Actividades asociadas con el objetivo específico 1	15
3.3.1	<i>Revisión Bibliográfica antecedentes río Elqui</i>	15
3.3.2	<i>Revisión de información de los caudales asociados al humedal y la pluviometría de la cuenca</i>	16
3.3.3	<i>Revisión de información de pozos asociados al humedal</i>	20
3.3.4	<i>Revisión condición administrativa de acuíferos asociados al humedal</i>	20
3.3.5	<i>Análisis de marea</i>	21
3.3.6	<i>Análisis del nivel del mar a largo plazo (actividad adicional)</i>	22
3.3.7	<i>Análisis del oleaje (actividad adicional)</i>	23
3.3.8	<i>Representación entradas/salidas de agua del humedal</i>	24
3.3.9	<i>Comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal</i>	25
3.3.10	<i>Contribución de Cauces</i>	25
3.3.11	<i>Conceptualización modelo para estudiar el comportamiento hidrodinámico del humedal</i>	27
3.4	Actividades asociadas con el objetivo específico 2	27
3.4.1	<i>Información histórica barra terminal del humedal</i>	27
3.4.2	<i>Modelamiento de la topografía del humedal (actividad adicional)</i>	30
3.4.3	<i>Modelamiento de la batimetría del humedal</i>	30
3.4.4	<i>Modelo comportamiento hidrodinámico y morfodinámico del humedal y su barra terminal</i>	31
3.4.5	<i>Transporte de sedimentos</i>	35
3.4.6	<i>Caracterización comportamiento barra terminal de arena</i>	36
3.5	Actividades asociadas con el objetivo específico 3	38
3.5.1	<i>Revisión bibliográfica</i>	38
3.5.2	<i>Identificación elementos y variables relevantes para el manejo de humedal</i>	38
3.5.3	<i>Propuestas de estrategias de implementación</i>	38
3.5.4	<i>Variables forzantes</i>	38
3.5.5	<i>Identificación de potenciales impactos</i>	39
3.5.6	<i>Estimación de costos</i>	39
3.5.7	<i>Brechas de información</i>	39
4	GESTIÓN DEL PROYECTO	40
4.1	Reuniones coordinación contraparte	40
4.1.1	<i>Reunión Coordinación Inicial: lunes 2 agosto 2021</i>	40
4.1.2	<i>Segunda reunión de coordinación: lunes 13 septiembre 2021</i>	40
4.1.3	<i>Tercera reunión de coordinación: lunes 4 octubre 2021</i>	41
4.1.4	<i>Cuarta reunión de coordinación: lunes 8 noviembre 2021</i>	41
4.1.5	<i>Quinta reunión de coordinación: lunes 6 diciembre 2021</i>	41

4.1.6	<i>Sexta reunión de coordinación: lunes 10 enero 2022</i>	41
4.1.7	<i>Séptima reunión de coordinación: lunes 31 enero 2022</i>	42
4.1.8	<i>Octava reunión de coordinación: lunes 7 marzo 2022</i>	42
4.2	Reuniones técnico – académicas	42
4.3	Charlas y Seminarios	43
4.4	Talleres	45
4.4.1	<i>Taller Técnico 1: miércoles 25 agosto 2021</i>	46
4.4.2	<i>Taller Técnico 2: miércoles 17 noviembre 2021</i>	49
4.4.3	<i>Taller Técnico 3: miércoles 16 marzo 2022</i>	52
4.4.4	<i>Taller Difusión miércoles 23 marzo 2022</i>	54
4.5	Terrenos	57
4.5.1	<i>Terreno Inicial: 2 al 5 septiembre 2021</i>	57
4.5.2	<i>Terreno Barra: 7 octubre 2021</i>	62
4.5.3	<i>Terreno Barra: 29 octubre 2021</i>	64
4.5.4	<i>Terreno Barra: 11 noviembre 2021</i>	66
4.5.5	<i>Terreno Barra: 21 noviembre 2021</i>	67
4.5.6	<i>Terreno Barra: 25 noviembre 2021</i>	68
4.5.7	<i>Terreno Barra: 8 diciembre 2021</i>	70
4.5.8	<i>Terreno Barra: 14 diciembre 2021</i>	71
4.5.9	<i>Terreno Barra: 30 diciembre 2021</i>	72
4.5.10	<i>Terreno Barra: 7 enero 2022</i>	73
4.5.11	<i>Terreno cobertura vegetal desemboadura: 17 febrero 2022</i>	74
5	RESULTADOS POR OBJETIVOS	76
5.1	Resultados Actividades asociadas con el objetivo específico 1	76
5.1.1	<i>Revisión Bibliográfica</i>	76
5.1.2	<i>Revisión de información de los caudales asociados al humedal y la pluviometría de la cuenca</i>	97
5.1.3	<i>Revisión de información de pozos asociados al humedal</i>	112
5.1.4	<i>Revisión condición administrativa de acuíferos asociados al humedal</i>	117
5.1.5	<i>Análisis de marea</i>	117
5.1.6	<i>Análisis del nivel del mar a largo plazo (actividad adicional)</i>	120
5.1.7	<i>Análisis del oleaje (actividad adicional)</i>	121
5.1.8	<i>Representación entradas y salidas de agua del humedal</i>	123
5.1.9	<i>Comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal</i>	126
5.1.10	<i>Contribución de cauces</i>	127
5.1.11	<i>Conceptualización del modelo hidrodinámico del humedal</i>	127
5.2	Resultados actividades asociadas con el objetivo específico 2	129
5.2.1	<i>Información histórica barra terminal del humedal</i>	129
5.2.2	<i>Modelamiento de la topografía del humedal (actividad adicional)</i>	132
5.2.3	<i>Modelamiento de la batimetría del humedal</i>	136
5.2.4	<i>Modelo comportamiento morfodinámico del humedal y su barra terminal</i>	137
5.2.5	<i>Transporte de sedimentos</i>	163
5.2.6	<i>Caracterización comportamiento barra terminal de arena</i>	164
5.3	Resultados actividades asociadas con el objetivo específico 3	168
5.3.1	<i>Revisión bibliográfica manejo y gestión</i>	168
5.3.2	<i>Identificación de elementos y variables relevantes para el manejo de humedal</i>	170
5.3.3	<i>Propuestas de estrategias de implementación</i>	171
5.3.4	<i>Brechas de información</i>	188

5.4	Cartografía y SIG	191
5.4.1	<i>Capas de información utilizada</i>	191
5.4.2	<i>Formatos de entrega</i>	192
5.4.3	<i>Organización de información</i>	196
6	DISCUSIÓN	198
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	204
8	BIBLIOGRAFÍA	206
9	ANEXOS	218
9.1	CURRICULUM EQUIPO DE TRABAJO	218
9.2	ACTAS REUNIONES	220
9.2.1	<i>Reunión Inicial: Lunes 2 agosto 2021</i>	220
9.2.2	<i>Reunión N°2: Lunes 13 septiembre 2021</i>	224
9.2.3	<i>Reunión N°3: Lunes 4 octubre 2021</i>	227
9.2.4	<i>Reunión N°4: Lunes 8 noviembre 2021</i>	230
9.2.5	<i>Reunión N°5: Lunes 6 diciembre 2021</i>	233
9.2.6	<i>Reunión N°6: Lunes 10 enero 2022</i>	235
9.2.7	<i>Reunión N°7: Lunes 31 enero 2022</i>	237
9.2.8	<i>Reunión N°8: Lunes 7 marzo 2022</i>	240
9.3	RESPALDO REALIZACIÓN TALLER	242
9.3.1	<i>Taller Técnico 01: Miércoles 25 agosto 2021</i>	242
9.3.2	<i>Taller Técnico 02: Miércoles 17 noviembre 2021</i>	243
9.3.3	<i>Taller Técnico 03: Miércoles 16 marzo 2022</i>	244
9.3.4	<i>Taller Difusión Final: Miércoles 23 marzo 2022</i>	245
9.4	RESPALDO REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	248
9.5	RESPALDO REVISIÓN CARTOGRÁFICA	252
9.6	CARTOGRAFÍA Y SIG	284



## 1 INTRODUCCIÓN

El humedal de Desembocadura del Río Elqui (29,9°S) es un humedal costero urbano que se ubica aproximadamente a 3 km al noroeste del casco fundacional de La Serena, en el centro de la Bahía de Coquimbo, Comuna de La Serena. El humedal abarca una superficie de 568,1 hectáreas (Figueroa *et al.* 2021), de las cuales 26,2 hectáreas corresponden a la desembocadura propiamente tal. El área de la cuenca de captación es de 9.302 km<sup>2</sup> y la longitud del cauce principal es de 8,81 km (Zuleta-Ramos *et al.* 2020). El origen del agua de la laguna proviene principalmente del Río Elqui, con aportes de escurrimiento pluvial, agua subterránea y agua marina en pleamar (DGA 2004, Figueroa *et al.* 2021). El estudio que delimita al sistema de la desembocadura del Río Elqui con una superficie de 568,1 ha (Figueroa *et al.* 2021), incorpora áreas de inundación temporal, con alrededor de 300 hectáreas y el humedal permanente con 140 hectáreas. Finalmente, el 27% de la superficie restante se encuentra distribuida en 6,7 hectáreas para la laguna costera, playas y dunas con 30 hectáreas, mientras que 111,6 hectáreas son áreas de vegetación ripariana (Figueroa *et al.* 2021). La laguna de su desembocadura se encuentra delimitada en su ribera norte por campos agrícolas que están siendo alcanzados por la trama urbana, de la cual recibe diferentes tipos de presiones que amenazan su funcionalidad, entre las que destacan: la fragmentación y pérdida de hábitats, la contaminación de sus aguas y el cambio del uso del suelo (Zuleta-Ramos *et al.* 2020). Entre las presiones naturales que afectan al estuario del Río Elqui destaca el tsunami de septiembre de 2015, que inundó el humedal con sobrepasos de más de 300 metros y un *runup*<sup>2</sup> de 2 m (Contreras-López *et al.* 2016). Por otra parte, entre 1986 y 2017, este humedal ha perdido casi un 11% de su espejo de agua (Winckler *et al.* 2019) debido a los períodos de sequía, la sobreexplotación del recurso hídrico, la intervención del caudal y el cambio climático.

El litoral de la Región de Coquimbo se caracteriza por contar con un clima templado cálido con lluvias invernales, estación seca prolongada y gran nubosidad (Contreras-López *et al.* 2019). La geomorfología del estuario está representada básicamente por suelos arenosos consolidados, y está expuesta permanentemente al viento y al oleaje durante temporales intensos y tsunamis (Niemeyer 1980; Cereceda 1984; Contreras-López *et al.* 2016). La playa inmediata a la desembocadura se encuentra en un estado de erosión continua, con una tasa de pérdida de 0,3 m/año (Winckler *et al.* 2019). El estuario del Río Elqui se caracteriza por sustentar una importante riqueza de aves acuáticas, mamíferos y flora nativa (Zuleta-Ramos *et al.* 2020). Las comunidades humanas aledañas al estuario del Río Elqui utilizan las aguas para riego, piscinas y otros fines, agua que es extraída del sistema mediante pozos. También hay un desarrollo agrícola y ganadero importante en sus riberas (Zuleta-Ramos *et al.* 2020). Uno de los valores ecosistémicos de este humedal es que constituye un importante sitio de nidificación, descanso y alimentación para aves acuáticas y migratorias. Además, provee diversos servicios culturales y recreativos, junto con ser una zona natural apropiada para la recreación y el desarrollo del turismo sustentable (CONAF 2010).

El presente informe final corresponde al reporte de los resultados finales que Dinámica Costera E.I.R.L. realiza a la **Consultoría No. 01/2021 Coquimbo del proyecto GEF Humedales Costeros “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”**, cuyo objetivo fue caracterizar el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra de arena terminal, y proponer estrategias y protocolos de manejo. Para asegurar el cabal cumplimiento de los objetivos se conformó un equipo de ocho académicos y profesionales, con amplia trayectoria académica y profesional tanto en humedales costeros, como en modelación hidrodinámica de estuarios y zonas costeras, cuatro de los cuales conforman el núcleo solicitado en las bases:

- Experto en modelación hidrodinámica de estuarios y zonas costeras;
- Experto en erosión de playas;
- Experto en ecología e hidrología de humedales costeros; y

---

<sup>2</sup> Diferencia entre la cota del punto de máxima inundación alcanzada por el tsunami y el nivel del mar al momento de su impacto.

- Geógrafo con experiencia en planificación territorial.

Se agrega además un jefe de proyecto con amplia experiencia en conducir proyectos asociados a humedales costeros, una ingeniera ambiental especializada en el monitoreo de humedales, un ingeniero civil con mención en sistemas hídricos y medio ambiente, y un experto en biodiversidad y conservación.

## 2 OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto es caracterizar el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra de arena terminal (Figura 2), y proponer estrategias y protocolos de manejo. Para cumplir con este objetivo general, se plantean tres Objetivos Específicos (OE):

- **OE 1)** Caracterizar el comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y sus subcuencas aportantes.
- **OE 2)** Caracterizar la morfología y el comportamiento morfodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena.
- **OE 3)** Proponer estrategias de manejo y gestión del humedal, enfocado en su comportamiento hidrodinámico y morfodinámico.



Figura 2: Ortomosaico de la Desembocadura del Río Elqui, basada en un vuelo Drone aerofotogramétrico 2018-2019. Fuente: Zuleta-Ramos & Bravo-Naranjo (2020).

### 3 METODOLOGÍA POR OBJETIVOS

#### 3.1 Área de estudio

La desembocadura del río Elqui y su barra terminal de arena, se encuentran en la comuna de La Serena, Región de Coquimbo. Comprende aproximadamente 26 Hectáreas que se encuentran en la zona costera dentro de los límites del humedal del Río Elqui de 568,1 hectáreas totales, que abarca desde la desembocadura en el Océano Pacífico hasta la localidad de Altovalsol (Figura 3). El humedal del río Elqui, se emplaza en la extensa cuenca del río Elqui. Para cumplir con los objetivos de este estudio, se analiza el tramo de la cuenca que comprende desde su desembocadura hasta el Embalse Puclaro, debido a que la regulación del caudal provocada por el Embalse implica que las variaciones de caudal del río aguas arriba del embalse, ya no tienen injerencia sobre el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la desembocadura y su barra terminal de arena.

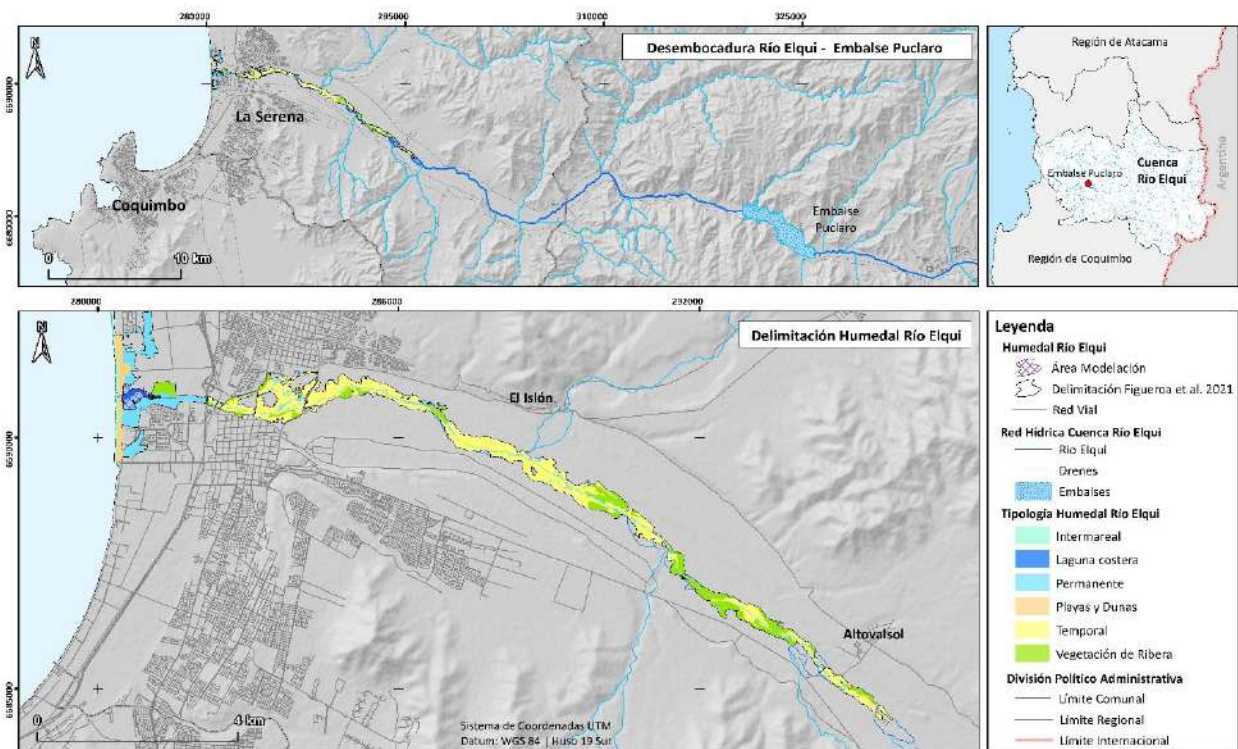


Figura 3: Área de estudio de la consultoría. Arriba, de izquierda a derecha: Área comprendida entre la desembocadura del Río Elqui, hasta el Embalse Puclaro y, ubicación a nivel regional de la Cuenca del Río Elqui. Abajo: extensión del Humedal Río Elqui en función de su tipología a partir del Estudio *de Delimitación y caracterización de usos del humedal desembocadura del río Elqui y sus subcuencas aportantes, Región de coquimbo* (Figueroa, et al. 2021) y localización del área de modelación, representada en la leyenda como un polígono líneas cruzadas color violeta. Fuente: Elaboración propia a partir de Figueroa, et al. (2021), SUBDERE (2019, 2021), MOP (2021), DGA (2021) y Secretaría Ejecutiva SNIT (2022).

En el momento que se desarrolló este estudio, el río Elqui se encontraba seco o con un caudal superficial muy disminuido, interrumpiéndose su curso en varios tramos dentro de la delimitación del Humedal del Río Elqui. Esto provocó que en solo 17 Ha de las 26 que conforman la desembocadura propiamente tal, se encontrase el estuario, es decir la porción del río que es afectada por las mareas, la que comprende desde la boca – en este caso cerrada

por una barra de arena - hasta la cabeza del estuario – que es el punto donde se pierde la influencia de marea y comienza la porción del río regida exclusivamente por su caudal. Este punto se encontraba definido por el primer segmento desde poniente a oriente donde el caudal superficial se pierde. En esta porción de 17 Ha, se implementó el modelo numérico que fue implementado en ésta consultoría.

### 3.2 Actividades generales asociadas al objetivo general de la consultoría

#### 3.2.1 Revisión Bibliográfica

La búsqueda y análisis de literatura técnica, académica y científica, estuvo basada en la metodología de Revisión Sistemática de Denyer & Tranfield (2009), la cual incluye los siguientes 5 pasos: alcance, búsqueda, selección, análisis y reporte. Este tipo de búsqueda consiste en detectar, obtener y consultar bibliografía, documentos y otros materiales que pueden ser útiles para los propósitos de la consultoría. La búsqueda sistematizada de información asegura la inclusión de los documentos relevantes y asegura también la pertinencia de lo encontrado respecto del objetivo de la búsqueda. Posteriormente, se realiza la búsqueda con palabras clave predefinidas, con un proceso iterativo para acotar el alcance y la información relevante se extrae mediante formularios estandarizados. Las fuentes secundarias de información que dieron la partida a la revisión provinieron de los estudios ya realizados por el equipo consultor. Para asegurar que el listado final fuera lo más completo posible, se realizó una consulta a especialistas identificados por el equipo consultor en base a su experiencia previa en el área, a los que se sumaron los miembros del comité técnico local.

Toda la información recabada fue digitalizada, llevada a un repositorio digital y ordenada en una base de datos (Anexo 9.4), que permite la clasificación de los documentos bajo una serie de criterios, facilitando así su acceso y gestión. La base de datos se construyó con el software Excel, de Microsoft Office. Una base de datos como esta permite la actualización constante, pues puede seguir incluyendo los documentos, nuevas categorías o textos. Los campos utilizados en la base de datos se muestran en la Tabla 1 y para cada uno se indica si se trata de un dato abierto o cerrado<sup>3</sup>. Los campos cerrados permiten la clasificación de la información, para lo cual el ingreso de la información fue riguroso para asegurar que permitan un correcto filtrado de las celdas.

Tabla 1: Campos usados en la base de datos bibliográfica. Fuente: Elaboración propia.

Campo	Tipo de campo	Ejemplo o descripción de contenido
ID	Cerrado	Número correlativo utilizado para identificar archivo de respaldo digital.
Tipo de documento	Cerrado	Estudio/Investigación/Proyecto/Programa/Artículo científico/Informe técnico/Otros.
Autores	Abierto	Apellido e Iniciales autores separados por coma.
Título	Abierto	Título del documento.

<sup>3</sup> Un campo es de tipo cerrado cuando existe un listado conocido previamente de alternativas del valor que podría asumir. Por ejemplo, el tipo de documento podría corresponder a una de las siguientes siete alternativas: estudio, investigación, proyecto, programa, artículo científico, informe técnico u otros. Cuando no es posible conocer las alternativas del contenido que contendrá el campo, este es Abierto. Los datos cerrados permitirán la clasificación de la información, para lo cual, el ingreso de la información asegurará que los campos cerrados permitan un correcto filtrado de las celdas.

Campo	Tipo de campo	Ejemplo o descripción de contenido
Año	Cerrado	Año de publicación.
Palabras clave	Abierto	Lista de descriptores claves del documento.
Formato archivo de respaldo	Cerrado	PDF/Word/Link/Otro/Sin archivo de respaldo.
Fuente de información	Abierto	Fuente a través de la cual se adquirió la información, como instituciones, revisión bibliográfica, consulta a informantes claves, etc.
Copyright	Cerrado	Uso libre/Requiere autorización/Requiere ser comprado/Uso libre con cita/Otro.
Descripción general	Abierto	Descripción o resumen general del documento, se establecerá límite de palabras.
Observaciones	Abierto	Información complementaria no incluida en los otros campos.

La información levantada fue sistematizada y analizada siguiendo la metodología de UNEP (2017) de identificación de hotspot bibliográfico, con el objetivo de identificar los antecedentes más relevantes para ser considerados en este estudio. La metodología consiste en listar todos los temas relevantes que se identifican en cada documento revisado, y a cada uno de ellos calificarlos en función de una jerarquía preestablecida, para determinar cuáles de ellos serán percibidos como puntos críticos. Los atributos para clasificar los temas se muestran en la Tabla 2. En función de la repetición (frecuencia) y calificación de los temas levantados, se establece una lista de aspectos priorizados, de donde se podrán seleccionar los primeros como hotspots bibliográficos.

Tabla 2: Propuesta de atributos para clasificar temas relevantes e identificar hotpost bibliográficos. Fuente: Elaboración propia.

Calidad de la fuente	Antigüedad de la fuente
1.- Publicaciones indexadas en revistas de alto impacto y revisión por pares.	1. Menor a 3 años
2. Fuentes oficiales nacionales (ejemplo: reportes públicos ministeriales) o internacionales oficiales	2. Entre 4 y 7 años
3.- Publicaciones académicas en revistas locales o de bajo impacto	3.- Entre 8 y 12 años
4. Estudios realizados por empresas, asociaciones de empresas, o agencias internacionales sin revisión de tercera parte.	4.- Entre 13 y 19 años
5.- Tesis y otros estudios.	5. Mayor a 20 años

### 3.2.2 Revisión Cartográfica

La revisión cartográfica realizada tuvo como objetivo hacer un registro y análisis de los antecedentes disponibles con información espacial. Para esta actividad se generaron dos tablas:

- Tabla 1: Revisión de documentos, donde se puede encontrar lo siguiente:
  - Información del documento: contiene el título del documento, autor(es), el año de la publicación o desarrollo del estudio, existencia o no de una base de datos espaciales o un Sistema de Información Geográfico (SIG) para utilizar y, finalmente, el objetivo del estudio.
  - Antecedentes-Evidencias: material cartográfico encontrado al interior del documento.
  - Tópicos: frases o ideas generales que reflejen el contenido de la cartografía revisada con el objetivo de poder después establecer conceptos que permitan entender qué áreas están siendo representadas espacialmente.
- Tabla 2: Revisión de capas de información, donde se pueden encontrar lo siguiente:
  - Información capa: título de la capa, fuente de origen y año.
  - Descripción: una descripción general de la capa y de los datos que existen.
  - Representación: representación gráfica de los datos.

Las tablas por su extensión son incorporadas en el anexo 9.5.

### 3.2.3 Cartografía y SIG

El Sistema de Información Geográfica (SIG) del proyecto tiene por objetivo sistematizar, generar y analizar información, junto con la construcción de una Base de Datos que contenga la información geoespacial para el área de estudio. Se consideraron insumos entregados por la contraparte técnica, así como también la nueva información levantada y elaborada por el equipo consultor en el marco de esta consultoría.

Para la elaboración de los productos cartográficos se utilizaron los softwares de ArcGIS v10.6 y QGIS, esto quiere decir que los resultados obtenidos se pueden encontrar disponibles (como formato editable y producto cartográfico) en ambos programas. Esto permite validar que las capas elaboradas en la consultoría se pueden leer sin inconvenientes independiente del software que los usuarios tengan acceso, además de ampliar el acceso a la información.

Para una correcta fluidez entre la información recibida y la que se generó, se consideraron los siguientes aspectos de estandarización de referencia espacial de acuerdo con las Especificaciones Técnicas Para Productos Cartográficos del Ministerio del Medio Ambiente:

- Sistema de Coordenadas: UTM (Universal Transversal Mercator).
- Datum: WGS 84.
- Huso: 19 Sur.
- Escala: Según la escala requerida para cada proyecto en particular.
- Formato de coberturas: .SHP, .TIFF, Geodatabase (ArcGIS) y Geopackage (QGIS).

Con relación a los archivos shape (.SHP) y ráster (.TIFF) que han sido utilizados en la presente consultoría, estos han sido introducidos en dos bases de datos, según el software a utilizar por los futuros usuarios. Por una parte, está la Geodatabase de ArcGIS y, por la otra el Geopackage de QGIS. Ahora bien, con esta información contenida en la

Geodatabase y el Geopackage se ha elaborado la planimetría oficial para cada fase del proyecto, con objeto de georreferenciar todos los componentes necesarios para cartografiar el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra.

La cartografía elaborada corresponde a:

- Estaciones fluviométricas de la cuenca del río Elqui con datos disponibles en banco integrado de información de la Dirección General de Aguas.
- Red de estaciones de meteorológicas clasificadas según fuente de información (Dirección Meteorológica de Chile, Dirección General de Aguas, Armada de Chile, Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas)
- Dominio de la malla del humedal para modelación.
- Resultados de los talleres de validación a través del método de cartografía participativa.
- Batimetría del Humedal del Río Elqui.
- Datos de Oxígeno Disuelto, Potencial de Hidrogeno (pH) y Salinidad del Humedal del Río Elqui extraídos a partir de un levantamiento realizado con un multiparamétrico.
- Cambios en la desembocadura y cambios en el volumen del agua del Humedal del Río Elqui a partir de datos levantados en terrenos entre el 4 de septiembre 2021 y el 7 de enero de 2022.
- Cuenca Hidrográfica del Río Elqui, subcuencas y afluentes.
- Distribución espacial de los pozos de la cuenca del río Elqui, clasificados según el destino del predio en el que se encuentran.
- Delimitación de los acuíferos en la cuenca del río Elqui.
- Subcuencas del río Elqui.
- Evolución espejo de agua del Humedal del Río Elqui para los años 1977-2015-2018- 2021.
- Clasificación de la vegetación pajonal y baja al interior del área de modelación del Humedal del Río Elqui, como insumo para modelación.
- Comparación entre los polígonos de delimitación del humedal del río Elqui y el área de modelación relevante para la hidrodinámica, considerando el espejo de agua presente en septiembre 2021.
- Comparación entre la distribución de vegetación hidrófila identificada por el equipo consultor relevante para la hidrodinámica del humedal y la distribución identificada por la consultoría de delimitación del humedal.

Finalmente, se hace entrega de los siguientes subproductos (Anexo 9.6) que surgen a partir de la construcción del SIG de la consultoría:

- **Metadatos** según norma ISO19110 2003 en formato XML contruidos a partir del software ArcGIS, entregados en un archivo independiente y a su vez incorporados en la Geodatabase.
- **Proyectos editables** en formatos .QGZ (QGIS), .MXD y .MPK (ArcGIS 10.6).
- **Planimetría** en formato JPG y PDF, exportadas desde ambos softwares, los archivos PDF se encuentran georreferenciados.

- **Catálogo de coberturas y proyectos:** planilla Excel considerando los siguientes aspectos: quién gestiona la información, nombre de la cobertura (.shp), nombre alternativo, fuente, año creación, escala y alcance territorial (local, comunal o nacional).
- **Diccionario de datos:** -sólo para la nueva información generada- en una planilla Excel, con el significado de los nombres de los atributos que tiene cada cobertura y el formato de éste.
- **Capas SIG:** información resumen de las capas utilizadas en la elaboración de la planimetría, considerando tanto las elaboradas por el equipo consultor como por terceros (formato planilla Excel). Las capas además se entregan en formato Geodatabase, Geopackage, shape y GEOTIFF.

La Figura 4 presenta un esquema general de la construcción del SIG del proyecto y los formatos en los que se hará la entrega de la información.

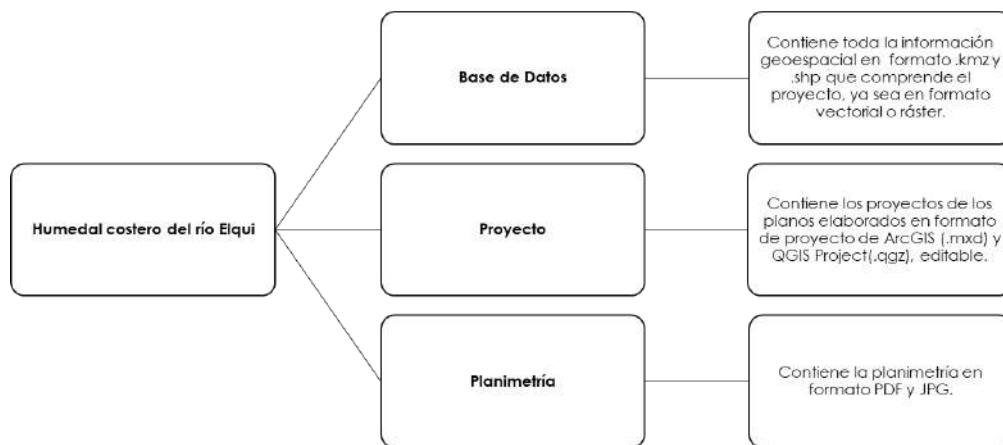


Figura 4: Esquema construcción del SIG del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Actividades asociadas con el objetivo específico 1

Para el cumplimiento del objetivo específico OE1: “Caracterizar el comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y sus subcuencas aportantes”, se realizaron las siguientes actividades:

#### 3.3.1 Revisión Bibliográfica antecedentes río Elqui

La obtención de datos para la desembocadura y humedal costero del río Elqui en la comuna de La Serena se realizó mediante búsqueda bibliográfica, cuya finalidad fue la obtención de información de notas biológicas y ecológicas, así como de aspectos batimétricos, geológicos, hidrológicos, hidrodinámicos, morfológicos y sedimentológicos. Se siguió la metodología descrita en detalle en la actividad general 3.2.1.

Se consultaron revistas científicas nacionales vinculadas al área ecológica y de historia natural (e.g.: Revista Chilena de Historia Natural, Revista de Biología Marina y Oceanografía), realizando también una búsqueda retroactiva en sus artículos publicados. Luego, se realizó una búsqueda de publicaciones en la plataforma Clarivate Analytics – Web of Science (ex Thomson Reuters ISI – Web of Knowledge) para los años 1975-2021 con los siguientes términos de búsqueda: “río Elqui AND (desembocadura OR estuario OR humedal). Del mismo modo, estos términos de búsqueda se utilizaron en idioma inglés: “Elqui river AND (mouth OR estuary OR wetland). Dado que la base de datos es de



acceso restringido, la búsqueda se extendió a Google Scholar<sup>4</sup> y Scielo<sup>5</sup>, ambas de acceso libre. Para maximizar la obtención de datos para la desembocadura y humedal costero del río Elqui, la recopilación de literatura científica incluyó términos de búsqueda de localidades cercanas al área de estudio (e.g.: Punta Teatinos).

Finalmente, se realizó una revisión manual de todos los artículos y otros documentos, seleccionando exclusivamente aquellos que coincidieron con los límites o proximidad a la desembocadura y humedal del río Elqui. Algunos de los antecedentes revisados son los siguiente:

- Informes estudio DOP (2021) “Diagnóstico mejoramiento Playa La Serena, Comuna de La Serena”, realizado por Aguas Consultores SpA.
- Estudio de vulnerabilidad y definición de un plan de manejo de cauces para la cuenca del río Elqui, región de Coquimbo (Arrau Ingeniería SpA 2018).
- Informe final “Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo” (CONIC-BF 2013).
- Informes de las consultorías locales (N°1/2020 y N°2/2020 Coquimbo).
- Informe Final Consorcio de Ingeniería INGENDESA-EDIC (1994): “Proyecto Embalse Puclaro”.
- Capítulo 4: “Estuario Río Elqui”, disponible en: Zuleta-Ramos C & Bravo-Naranjo V (eds.) “Atlas Humedales Costeros de Coquimbo: Territorio & Biodiversidad” (Bravo *et al.* 2020).
- Libro “Humedales Costeros de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación” (Zuleta & Contreras-López 2021).
- Publicaciones científicas indexadas.
- Información gris (tesis, noticias de prensa, informes técnicos, entre otros).

La revisión cartográfica consistió en la revisión de 21 documentos entregados tanto por la contraparte como los encontrados por el equipo consultor. Se revisaron aquellas secciones que contemplaban algún tipo de representación espacial de información, principalmente mapas o ilustraciones, para construir así tablas en donde se colocó estos elementos como evidencias de lo que se recolectó. Asociado a esto se incorporaron también descripciones sobre las temáticas que estaban relacionadas a estos elementos cartográficos, estas descripciones se transformaron en tópicos y estos posteriormente en conceptos que permiten tener una visión global sobre qué aspectos se ha elaborado información espacial vinculada al área de estudio.

### 3.3.2 Revisión de información de los caudales asociados al humedal y la pluviometría de la cuenca

Para la revisión, análisis y sistematización de datos históricos y actualizados de caudales del río Elqui se utilizaron dos fuentes de información:

- Banco integrado de información de la Dirección General de Aguas (DGA), quien dispone de registros fluviométricos y de sedimentos en suspensión en varias estaciones en la cuenca del río Elqui (Figura 5).
- Información de juntas de vigilancia de Agua Potable Rural (APR).

---

<sup>4</sup> <https://scholar.google.com/>

<sup>5</sup> <https://scielo.org/>

La información de estaciones DGA se utiliza para el análisis de los caudales y sedimentos en suspensión. Las estaciones seleccionadas se identifican en función de la calidad y extensión de la información fluviométrica registrada. De esta forma, se seleccionan al menos tres estaciones para ser utilizadas en el presente estudio:

- Río Elqui en Algarrobal, ubicada aguas arriba del embalse Puclaro.
- Río Elqui en Almendral, ubicada justo aguas abajo del embalse.
- Río Elqui en La Serena, ubicada en la desembocadura de la cuenca.

Se descargaron del banco integrado de información de la DGA las series disponibles para la cuenca del río Elqui:

- Reportes Calidad de Aguas
  - Parámetros Físico-Químicos (Mensual)
- Reportes Fluviométricos
  - Caudales Medios Mensuales
  - Altura y Caudal Instantáneo (Diario)
  - Caudales Medios Diarios
- Reportes Meteorológicos
  - Temperaturas Medias Mensuales
  - Temperaturas Medias Diarias de Valores Sinópticos
  - Temperaturas Diarias Extremas
  - Precipitaciones Mensuales
  - Precipitaciones Máximas Anuales en 24 horas
  - Precipitaciones Diarias
- Reportes Pozos
  - Niveles Estáticos en Pozos (Mensual)
- Reportes Sedimentos
  - Muestreo Rutinario (Diario)

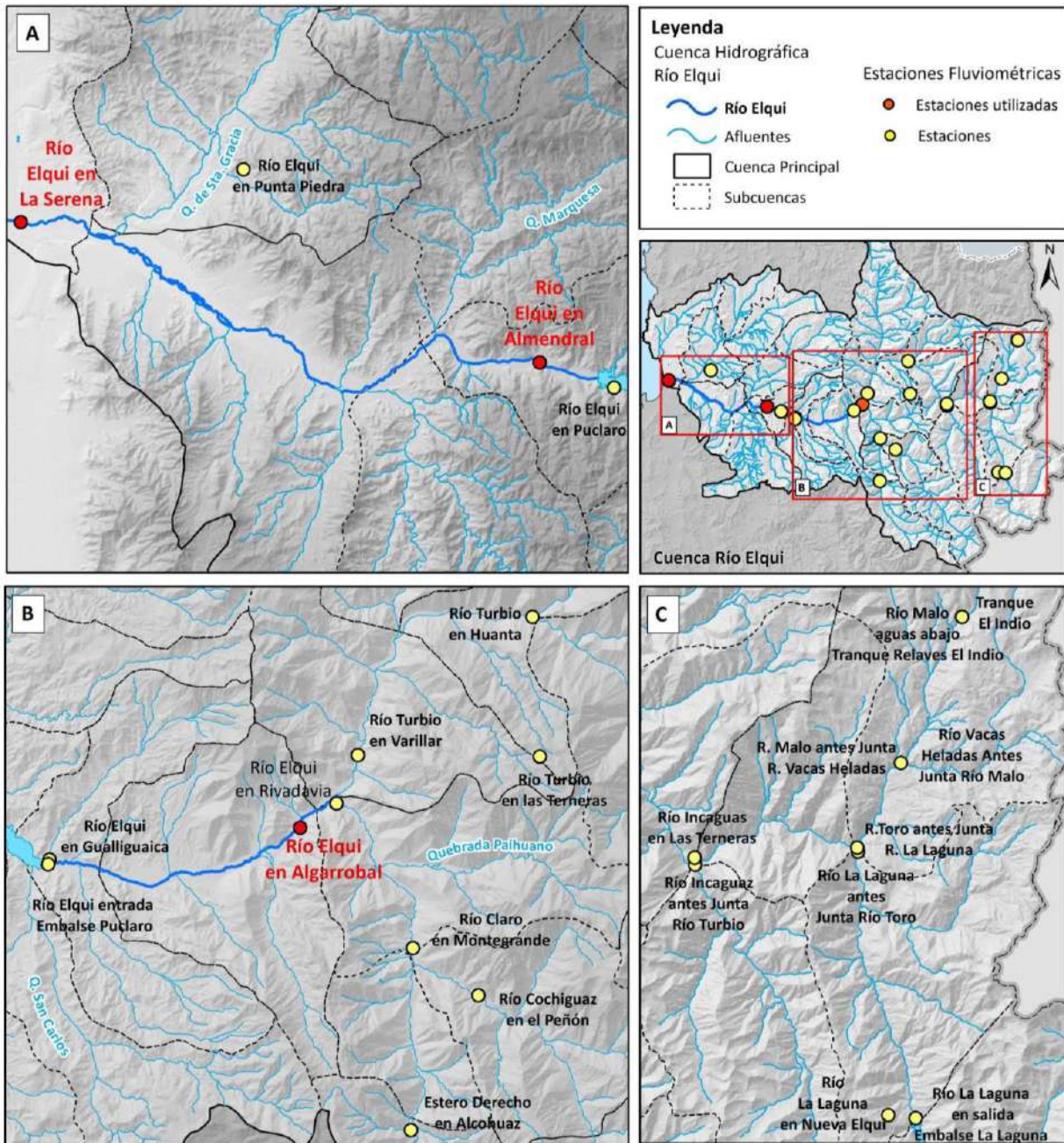


Figura 5: Estaciones fluviométricas de la cuenca del río Elqui con datos disponibles en banco integrado de información de la Dirección General de Aguas. Fuente: DGA (Julio 2021)<sup>6</sup>.

Para el análisis de la pluviometría de la cuenca del río Elqui, se revisaron cuatro fuentes de datos (Figura 6):

- Reportes meteorológicos del banco integrado de información de la DGA.

<sup>6</sup> <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

- Estadística CR<sup>2</sup>MET (Centro de Clima y Resiliencia, CR<sup>2</sup>), que consiste en reconstrucciones climáticas de 0,05° de resolución espacial con una extensión temporal entre 1975 y 2018, para la precipitación y las temperaturas diarias extremas (CR<sup>2</sup>, 2018).
- Red de Estaciones de Monitoreo del Centro de Estudios de Zonas Áridas, CEAZAMET.
- Estadísticas de las estaciones meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile.

Las series de caudal, temperatura y precipitación fueron analizadas en el dominio del tiempo para estimar tendencias asociadas al cambio climático, comportamientos estacionales y cíclicos, variabilidad climática y eventos transientes como la construcción del embalse Puclaro. Este análisis se utilizó para definir los casos de simulación: Año El Niño (aumento de precipitaciones y caudal), Año Normal, Año La Niña (disminución de precipitaciones y caudal).

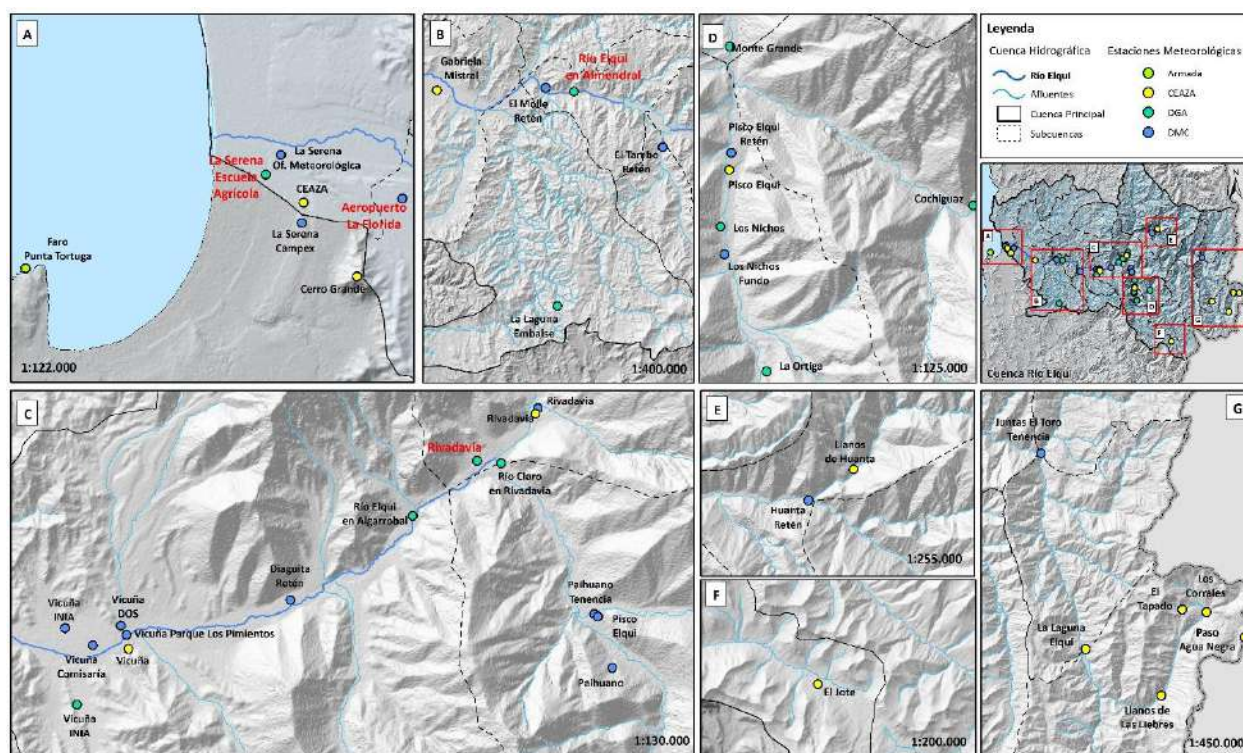


Figura 6: Red de estaciones de meteorológicas clasificadas según fuente de información. Verde: Armada, Amarillo: Centro de Estudios de Zonas Áridas<sup>7</sup>, Celeste: Dirección General de Aguas, y Azul: Red Meteorológica de Chile para la cuenca del río Elqui<sup>8</sup>. Fuente: Elaboración propia.

Se contrastó la evolución de las anomalías de estas series de tiempo con representatividad local al río Elqui y en especial con su desembocadura, con la evolución del Índice Oceánico El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) que tiene una representatividad general a la escala de cuenca del oceánica del Pacífico, entre 1950 y 2021 (Figura 7). La Serie ONI, marca períodos cálidos (positivos) y fríos (negativos) basados en un umbral de +/- 0,5°C, calculado con una media móvil de 3 meses de anomalías de Temperatura Superficial del Mar en la región del Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-

<sup>7</sup> <http://www.ceazamet.cl/>

<sup>8</sup> <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/informacion/mapaDeEstaciones/>

170°W), basado en períodos base centrados de 30 años actualizados cada 5 años. El ONI es una medida de El Niño-Oscilación del Sur, y otros índices pueden confirmar si características consistentes con un fenómeno acoplado océano-atmósfera acompañaron estos períodos (por ejemplo, el Índice de Oscilación Sur para las variaciones de la presión atmosférica, o El Niño Oscilación Sur, Zona 3.4 -ENOS<sup>9</sup> 3.4- para la temperatura superficial del mar). Este análisis se utilizó para complementar las definiciones de los casos de simulación: Año El Niño (aumento de precipitaciones y caudal), Año Normal, Año La Niña (disminución de precipitaciones y caudal).

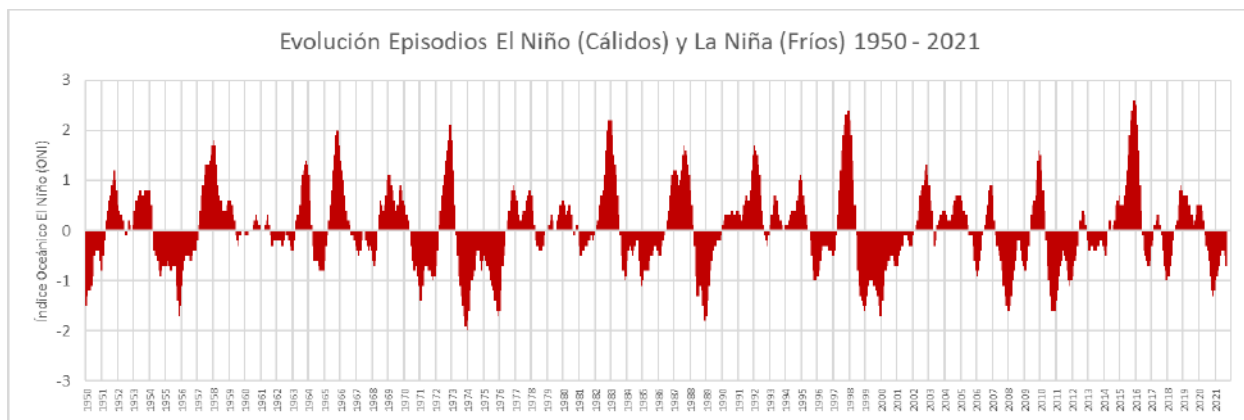


Figura 7: Evolución episodios cálidos (positivos) y fríos (negativos) del índice oceánico El Niño entre 1950 a 2021. Fuente: Climate Prediction Center, NOAA<sup>10</sup>.

### 3.3.3 Revisión de información de pozos asociados al humedal

Para la revisión y sistematización de información histórica y actualizada de niveles freáticos de pozos cercanos al humedal, se exploró el banco integrado de información de la DGA, seleccionando todos los pozos de la cuenca y graficando las series mensuales de Niveles Estáticos en Pozos. Posteriormente, las series más largas fueron analizadas para identificar tendencias asociadas al cambio climático, comportamientos estacionales y cíclicos, y variabilidad climática asociada principalmente a eventos ENOS.

### 3.3.4 Revisión condición administrativa de acuíferos asociados al humedal

Se hizo una revisión y sistematización de la condición administrativa de los acuíferos costeros de Elqui y de estadísticas de solicitudes de derechos consuntivos de agua en la cuenca del río Elqui, registrados y actualizados al año 2021 en la Dirección General de Aguas (Figura 8). Para ello, se procedió a descargar la base de datos de la DGA para la región de Coquimbo y se filtró la información disponible para la cuenca del río Elqui. La base de datos de la DGA contempla los siguientes campos:

- Código de Expediente
- N° Solicitud
- Nombre Solicitante

<sup>9</sup> ENOS 3.4 es el nombre de un índice para El Niño – Oscilación Sur, que se refiere a la región del océano Pacífico que es utilizada para calcularlo (Pacífico Sur Oriental).

<sup>10</sup> [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)

- Fecha de Resolución/ Envío al Juez/ Inscripción C.B.R.
- N° Resolución/ Oficio/ Fojas | N° CBR
- Fecha Toma Razón
- Tipo Derecho
- Naturaleza del Agua
- Clasificación Fuente
- Caudales
- Uso del Agua
- Cuenca, SubCuenca, SubSubCuenca
- Acciones en el Cauce
- Acciones en la Fuente
- Coordenadas UTM

Se confeccionaron diferentes estadísticas para caracterizar los derechos consultivos y su condición administrativa. Además, se confeccionó un mapa para georreferenciar los derechos concedidos.



Figura 8: Portal Derechos de Agua, DGA<sup>11</sup>.

### 3.3.5 Análisis de marea

Las mareas de origen astronómico explican las oscilaciones rítmicas que sufre el nivel de los océanos a partir de la interacción gravitacional entre La Tierra, La Luna y El Sol. La teoría que explica esta interacción y los efectos sobre el nivel del mar se conoce desde Newton (1687) a partir de su teoría de la gravitación y permite realizar pronósticos precisos al conocer las posiciones relativas de la Tierra, la Luna y el Sol (Doodson & Warburg 1941, Foreman & Henry

<sup>11</sup> [https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos\\_historicos/Paginas/default.aspx](https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)

1989). La propagación de las mareas a través de estuarios como la desembocadura del río Elqui ha sido ampliamente estudiada y se sabe que es alterada por la forma y batimetría del estuario, y efectos de fricción (Godin 1972, 1984, 1991, 1999; Dronkers 1986; Lu & Luo 2018).

La onda de marea astronómica es semidiurna en las costas de Coquimbo: existen dos mareas altas o pleamar y dos mareas bajas o bajamar en cada día. Además de esta fluctuación semidiurna, las mareas sufren cambios de rango a la escala del mes Lunar (28 días): en mareas de sicigia (luna llena o nueva) las mareas sufren cambios de amplitud más drásticos que en mareas de cuadratura (luna creciente y menguante), es decir las mareas de sicigia son más altas en pleamar y más bajas en bajamar que en períodos de cuadratura. Por último, debido a que las posiciones relativas entre la Tierra, la Luna y el Sol se repiten cada 18 años aproximadamente, existe un ciclo inter-decadal, conocido como Ciclo de Metón que puede alterar hasta 30 cm las mareas en costas abiertas (Peng *et al.* 2019).

Debido a la concurrencia de estos ciclos a diferentes escalas temporales (semidiurno, mensual, inter-decadal), para comprender cómo alteraciones de la marea inciden en las extensiones que experimenta el intermareal en el tiempo, se recurre a los planos de marea. Una sección litoral es cubierta horizontalmente por las aguas en forma más frecuente en el umbral del promedio de todas las pleamares (la mayoría de los días de un mes), que el promedio de las pleamares en Sicigia (sólo unos pocos días cada mes). Por lo tanto, conocer los planos de mareas da un indicio de la frecuencia con que sectores litorales se encuentran cubiertos o descubiertos por las aguas.

Para el análisis de la marea se determinaron los planos de marea más importantes (nivel medio, rango de mareas, niveles de pleamar y bajamar) en el puerto de Coquimbo, donde se encuentra el mareógrafo más cercano al entorno del humedal Desembocadura del Río Elqui.

Se solicitó al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile la serie horaria del registro mareográfico del puerto de Coquimbo en los últimos 40 años (1980-2020). Dicha serie fue analizada siguiendo el procedimiento del análisis de constituyentes no armónicas de la marea (SHOA 1999) y el Análisis Armónico. El análisis armónico consiste en determinar las constituyentes más energéticas asumiendo que la marea observada corresponde a la sumatoria de un número finito de constituyentes armónicos que modelan la onda de marea, la cual se caracteriza por una amplitud, fase y velocidad angular, determinadas a partir de argumentos astronómicos. La metodología utilizada es la propuesta por Godin (1972) y Foreman (1977), utilizando las rutinas en MATLAB T-tide (Pawlowicz *et al.* 2002), que son una traducción de las rutinas originales en fortran de Foreman (1977).

### 3.3.6 Análisis del nivel del mar a largo plazo (actividad adicional)

La tendencia de largo plazo de registros mareográficos costeros permite estimar las tasas de cambio del nivel medio del mar (NMM) en el litoral. En una costa estable, donde los eventos del ciclo sísmico son menores, se espera que las pendientes de estas tendencias sean positivas como efecto del cambio climático (y de esta forma se constata el alza del NMM). Sin embargo, la evolución mensual que ha experimentado el NMM en Coquimbo muestra una leve tendencia negativa de  $-0,03 \pm 0,03$  cm/año con datos actualizados al año 2016 (Contreras-López *et al.* 2017b), es decir, el nivel del mar estaría disminuyendo (o permaneciendo estable) y no alzando como es de esperar (Figura 9).

Se realizó una inspección de la calidad de los datos, teniendo especial cuidado en cambios en el nivel de referencia. Se estima el nivel medio del mar mensual, usando la media aritmética de los registros horarios disponibles en cada mes. Para calcular las tendencias se usa el método de mínimos cuadrados y la incertidumbre de la pendiente se calcula al 95% de confianza, siguiendo a Contreras-López *et al.* (2017). La pendiente de la tendencia lineal se calcula mediante la ecuación:

$$Mm = \frac{\sum_{i=1}^N [(t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}$$

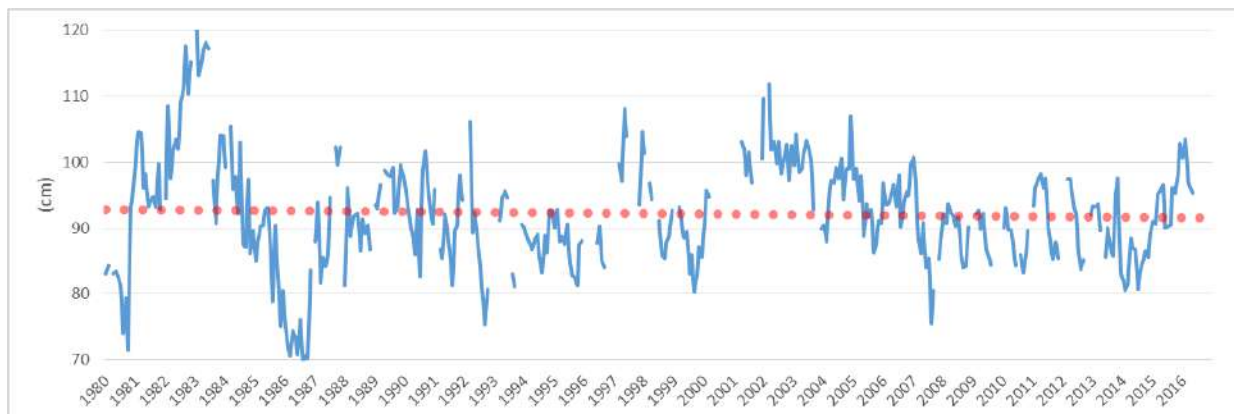


Figura 9: Evolución del Nivel Medio del Mar registrado en el Puerto de Coquimbo entre 1980 y 2016. Fuente: Contreras *et al.* (2019).

Donde  $t_i$  es el instante donde se registró la observación  $y_i$ . La incertidumbre en la pendiente se calcula como el producto del error estándar ( $SE$ ) y el valor crítico ( $VC$ ) que se obtiene de la distribución t-Student con  $N-2$  grados de libertad, donde  $N$  es el número de observaciones:

$$Incertidumbre = SE \times VC.$$

El error estándar se calcula utilizando la ecuación:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{(N - 2) \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}}$$

Donde  $\hat{y}_i$  son los valores estimados a partir del ajuste de la recta por el método de mínimos cuadrados.

### 3.3.7 Análisis del oleaje (actividad adicional)

El oleaje es el principal agente modelador de los procesos litorales en las costas abiertas de Chile central. Se caracteriza con parámetros estadísticos como altura significativa, dirección y período. El oleaje generado por el viento es un proceso altamente persistente, pero variable y que explica en gran medida la variabilidad de los campos de viento en la superficie del océano. Las marejadas, bravezas de mar o temporales se definen como eventos de olas de gran altura formadas por fuertes vientos en el área oceánica o en condiciones locales y que se propagan fuera de la zona de generación llegando a las costas de Chile (Paskoff 2010). Estos eventos se presentan con mayor frecuencia que otras catástrofes como terremotos y tsunamis. Tienen la capacidad de producir diversos efectos dañinos sobre humedales costeros como inundación del cuerpo de agua, erosión de la anteduna o barra de arena protectora que usualmente está presente y la playa de arena donde se encuentra, entre otros.

Molina *et al.* (2011) indican que en Chile central se habrían producido aumentos de 10 cm en la altura significativa y una alteración de  $12^\circ$  en la dirección del oleaje durante 20 años; variaciones que son también alteradas por el fenómeno ENSO. Winckler *et al.* (2020), por su parte, indican que, entre 1980 y 2015 la frecuencia de marejadas se incrementó en todo Chile; en particular frente a Coquimbo se identificó una tasa de aumento de 0,2 eventos por año, equivalente a 7 eventos más en un período de 35 años.



En lo relativo a proyecciones, Molina *et al.* (2011) estiman, a partir de una extrapolación de datos históricos, que al año 2031 el clima medio de oleaje en condición normal de ENSO presentaría variaciones de hasta  $-22,6^{\circ}$  en las direcciones respecto a las condiciones medias actuales, mientras que en condiciones extremas de ENSO se presentarían variaciones de hasta  $-28,2^{\circ}$ . CEPAL (2011), por su parte, encuentra tendencias para el aumento de las alturas significativas medias mensuales al año 2070 entre 30 mm en la zona norte y central del país. Finalmente, Church *et al.* (2013, AR5) prevé aumentos del orden del 5% en la altura significativa promedio para la mayoría del territorio chileno.

Para efectos de esta consultoría, se disponen de 35 años de datos de oleaje reconstruido frente a las costas de Chile, gracias al “Atlas de Oleaje para Chile” (Beyá *et al.* 2016), existiendo datos frente a Los Vilos para la región de Coquimbo<sup>12</sup>. Estos datos son usados para comprender los cambios a largo plazo que se encuentra experimentando el oleaje. Además, se cuenta con un registro corto (años 2020 – 2021) de estados de mar (Altura ola significativa, dirección, oleaje incidente y período), registrados en el Faro Punta Tortuga, los que son usados para contrastar el comportamiento de largo plazo con la situación actual.

Como elemento adicional, la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso dispone de un pronóstico a corto plazo<sup>13</sup> en la bahía de Coquimbo, que –si bien no permite establecer un análisis a largo plazo del comportamiento del oleaje- puede ser útil de cara a la gestión de emergencias en la bahía.

### 3.3.8 Representación entradas/salidas de agua del humedal

Para caracterizar las entradas y salidas de agua del humedal de la desembocadura del río Elqui, se construye una representación unifilar utilizando los antecedentes recabados del Atlas de Humedades Costeros de Coquimbo (Zuleta & Bravo 2020, Figura 61) y aquellos recabados en la DGA, complementando y ampliando la revisión de antecedentes secundarios realizado por Figueroa *et al.* (2021). En este tipo de diagramas, las entradas representan afluentes y restituciones, descargas de efluentes, remanentes de la agricultura (retornos) y trasvase de cuencas, entre otros. Las salidas representan captaciones artificiales, donde se hace uso del recurso hídrico mediante aprovechamiento no consuntivo o consuntivo para riego, abastecimiento de agua potable y recreación, entre otros.

En forma complementaria al terreno efectuado entre el jueves 2 y el sábado 4 de septiembre de 2021 (sección 0), cuyo objetivo fue levantar la información *in situ* necesaria para alimentar los modelos batimétricos, hidrodinámico y morfodinámico, se realizaron a lo largo de la consultoría 9 terrenos para verificar el estado de conexión de la barra, llenando una ficha de chequeo que considera:

- Estado de la marea.
- Presencia de marejadas.
- Signos de erosión y/o sobrepasos.

En un terreno final se prospectó la densidad de la vegetación hidrófila ribereña en la desembocadura del río Elqui, para alimentar adecuadamente las condiciones del modelo numérico elaborado.

Dado que el desarrollo de esta consultoría se contempla solo para la época estival, se reconstruye el comportamiento de la barra a través de imágenes satelitales disponibles (2004–2020), de manera de construir antecedentes que faciliten una discusión sobre el comportamiento de la barra en época invernal.

---

<sup>12</sup> <https://oleaje.uv.cl/descargas.html>

<sup>13</sup> <https://marejadas.uv.cl/index.php/pronosticos/cl12co>

### 3.3.9 Comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal

Para analizar el comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal, este equipo consultor realizó con anterioridad diversas campañas (2017 a 2019) en la desembocadura del humedal, registrando parámetros fisicoquímicos. Adicionalmente, entre el jueves 2 y el sábado 4 de septiembre de 2021, se efectuó una campaña intensiva para analizar *in situ* el comportamiento hidrológico e hidrodinámico del río Elqui y su influencia en el humedal costero (a través de la medición de variables fisicoquímicas, cuña salina, etc.). En esta campaña se recorrió la cuenca del río Elqui hasta el embalse Puclaro, siguiendo la ruta Ch-41 para realizar mediciones e inspeccionar la cuenca. En el entorno del humedal se emplazaron equipos de registro multiparamétrico para registrar pH, temperatura, conductividad/salinidad y oxígeno durante un ciclo completo de marea y una cámara trampa. Además, se constató que la barra estaba siendo intervenida con equipamiento mecánico, lo que se constató por las marcas recientes existentes en la arena.

Como material adicional al solicitado en la consultoría, durante la visita se generaron videos de carácter educativo, que permiten comprender algunos de los elementos más relevantes<sup>14</sup>.

#### 3.3.10 Contribución de Cauces

La existencia de humedales en zonas semiáridas, como en la cuenca del río Elqui, se ve limitada por la disponibilidad de agua, que a su vez está controlada por los procesos hidrológicos que gobiernan el flujo de agua superficial y subterráneo que se producen en la cuenca aportante. Es así, como el estudio del balance hídrico en humedales requiere entender no solamente el entorno del humedal que se estudia, sino que también las condiciones climáticas del humedal y la cuenca que lo alimenta. El balance hídrico en un humedal está controlado por la ecuación de conservación de la masa. Esta indica que la suma de los flujos que ingresan menos los flujos que salen del humedal equivalen a la variación de agua almacenada en este cuerpo de agua:

$$\left( Q_{sp} + Q_{sb} + \frac{P + R}{\Delta t} * A \right) - \left( Q_{ef} - Ex - In - \frac{Ev}{\Delta t} * A \right) = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Los ingresos de agua que recibe el humedal corresponden a los caudales superficiales que provienen desde la cuenca aportante ( $Q_{sp}$ ), incluyendo los canales de regadío y otros aportes de aguas superficiales existentes; los flujos de aguas subterráneas que ingresan al humedal ( $Q_{sb}$ ), la precipitación pluvial ( $P$ ) y el rocío de la neblina o camanchaca ( $R$ ) que cae sobre el espejo de agua ( $A$ ) en un determinado tiempo ( $\Delta t$ ), por ejemplo, un mes. Las salidas corresponden a los caudales efluentes del cuerpo de agua ( $Q_{ef}$ ), las extracciones antrópicas ( $Ex$ ), la infiltración a través del lecho ( $In$ ) y la evaporación desde la superficie del agua ( $Ev$ ). La variación del volumen de almacenamiento ( $\Delta V/\Delta t$ ) depende, por ende, del tamaño del humedal y del equilibrio existente entre ingresos y salidas de agua.

La escorrentía superficial puede ser un importante aporte de agua en el caso de los humedales existentes en los cauces de ríos y esteros, como es el caso del río Elqui. El caudal que escurre superficialmente en un determinado cauce depende de los procesos que controlan el régimen hídrico:

<sup>14</sup> Video las inmediateces del embalse Puclaro: [www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/594864828197454](https://www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/594864828197454)

Video aguas debajo del embalse Puclaro: [www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/396761868514407](https://www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/396761868514407)

Video vuelo en dron sector desembocadura y faro: [www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/828669101150244](https://www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/828669101150244)

Video sector faro y desembocadura: [www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/172135318330593](https://www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/172135318330593)

Video de registro de escenografía costera: [www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/324110989405064](https://www.facebook.com/patricio.w.grez/videos/324110989405064)

- La escorrentía se produce ante la ocurrencia de precipitación; muchos cauces que están normalmente secos se activan, evacuando excedentes de agua lluvia que caen en la cuenca. Un ejemplo de esta condición son los aluviones que ocurrieron en el Norte de Chile durante los años 2015 y 2017.
- El deshielo en zonas altas de la Cordillera de Los Andes, durante la primavera y el verano, dependiendo de la velocidad con que se derrite el manto nival o los glaciares.

El flujo base es el caudal que se mantiene en el río durante los meses de estiaje. Este caudal se puede producir por derretimiento de glaciares o liberación de aguas subterráneas almacenadas en la parte superior de la cuenca. En cuencas de media a baja altitud, el flujo base se produce únicamente en los procesos de almacenamiento y liberación de aguas subterráneas, pues a dicha altitud no existe aporte nival o glaciar. La combinación de escorrentía, deshielo y flujo base a lo largo del año genera la escorrentía superficial total que posee un cauce.

Para la mantención de los ecosistemas costeros la existencia de un flujo base es un aspecto crítico, por lo que estos ecosistemas son dependientes de la liberación de agua subterránea almacenada en acuíferos porosos o en sistemas de agua subterránea (Távora-Espinoza & Sanz 2010, Gmati *et al.* 2011, Andermann *et al.* 2012, Muñoz-Villers *et al.* 2012). Es por lo anterior que los oasis, puquios u ojos de agua constituyen humedales dependientes de las aguas subterráneas. Esta agua subterránea puede haber sido recargada localmente por infiltración de lluvias recientes, como lo es el caso del humedal costero de Ritoque, en la Región de Valparaíso (Arumí 1992), o puede ser precipitación más antigua que recargó el acuífero en épocas húmedas y que, tras un proceso de transporte de miles de años, alimenta los manantiales costeros del norte de Chile (Herrera & Custodio 2014).

Las pérdidas de agua por evaporación desde un humedal pueden llegar a ser el factor limitante en zonas áridas o semiáridas. De acuerdo con el balance hídrico de Chile (DGA 1987), la evaporación desde un espejo de agua varía una superficie entre 1500 a 2000 mm/m<sup>2</sup> por año. Como referencia, para un humedal de 1 hectárea, esto significa una pérdida de agua de 15.000 a 20.000 m<sup>3</sup> por año, equivalente al riego de dos a tres hectáreas agrícolas. Las pérdidas de evaporación desde el espejo de agua se producen como una respuesta al desbalance térmico cuando la superficie terrestre recibe mayor energía que la atmósfera.

En condiciones de humedad, la evaporación es entonces el principal mecanismo que compensa este desbalance, transportando energía desde la superficie a la atmósfera. Por ello, la tasa de evaporación depende de la radiación solar y del viento. Las pérdidas de agua por evaporación pueden alcanzar valores significativos en grandes cuerpos de agua. Por ejemplo, en el caso de la Laguna del Laja, Pérez (2017) estimó pérdidas de hasta 5 m<sup>3</sup>/s desde este cuerpo de agua. Por otro lado, y a diferencia del caso anterior, la presencia de Camanchaca limita las pérdidas por evaporación desde humedales costeros, permitiendo la mantención de estos cuerpos de agua, incluso bajo limitados aportes de agua.

Respecto de la contribución de flujos detríticos (caudal sólido), se revisó el estudio INH (2020), el cual reporta aportes totales por año y número de eventos de flujos detríticos al año. Se seleccionaron los caudales sólidos que corresponden con los caudales líquidos seleccionados para cada situación de las simulaciones.

Dentro de las simulaciones se identificaron las zonas de mayor probabilidad de embanque y socavo producidos tanto por la hidrodinámica como por la morfodinámica, mediante las variaciones del fondo entre la situación inicial de simulación y la situación en distintos períodos de avance del modelo.

### 3.3.11 Conceptualización modelo para estudiar el comportamiento hidrodinámico del humedal

Se analizó, desde un punto de vista conceptual, el comportamiento hidrodinámico más plausible para las condiciones de simulación en las situaciones de año seco, año normal y año húmedo.

El sistema se divide en un cuerpo de agua principal, rodeado hacia norte y sur por extensiones de vegetación (totora y vegetación baja halófitas). Se analizaron también las posibles implicancias hidrodinámicas que aporta esta vegetación al comportamiento general del sistema.

## 3.4 Actividades asociadas con el objetivo específico 2

Para el cumplimiento del objetivo específico OE2) “Caracterizar la morfología y el comportamiento morfodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena”, se realizaron las actividades descritas a continuación.

### 3.4.1 Información histórica barra terminal del humedal

Para comprender los cambios en el tiempo en invierno y verano<sup>15</sup>, se utilizaron imágenes satelitales de la base de datos de Google Earth Engine (GEE), procesadas a través del CoastSat, un código abierto que se apoya en Python. Partiendo de imágenes satelitales, el software obtiene la línea de costa mediante un algoritmo de detección con resolución de subpíxeles robusto y genérico (Vos *et al.* 2019). Las etapas de procesamiento son:

- Acceso y recuperación de imágenes del archivo GEE.
- Preprocesamiento de imágenes multiespectrales.
- Extracción de la línea de costa con resolución de subpíxel.
- Análisis temporal de la posición de la línea de costa a lo largo de los transectos trazados.
- Salida de las líneas costeras como un archivo. Geojson, las cuales se importan a un GIS.

### Acceso y recuperación de las imágenes del archivo GEE

Se inicia el proceso definiendo el área de estudio para reducir el tamaño de los archivos individuales y se recortan las imágenes mientras se encuentran en el servidor GEE. En la descarga se incluyen las bandas espectrales que se requieren para la detección de la costa: las tres bandas visibles (R, G, B), la banda de infrarrojo cercano (NIR) y la banda de infrarrojos de onda corta (SWIR1). El kit de herramientas de CoastSat proporciona una interfaz a la API (Application Programming Interface) de GEE para permitir un fácil acceso a todas las imágenes de reflectancia, TOA (Top-of-Atmosphere) de las colecciones Landsat 5 (TM), Landsat 7 (EMT+) y Landsat 8 (OLI) Tier 1, así como los productos Sentinel-2 (MSI) Level-1C. Las imágenes TOA están calibradas para proporcionar una comparación estandarizada entre imágenes adquiridas por diferentes sensores en diferentes fechas (Chander *et al.* 2009), por lo que son adecuadas para el análisis de series de tiempo (Vos *et al.* 2019).

---

<sup>15</sup> Este equipo consultor ha realizado estudios en el estuario del humedal de Elqui desde 2017, junto a otros humedales costeros de las regiones de Valparaíso y Coquimbo. Estos estudios han sido a nivel comparativo y también han apuntado a la determinación del contraste entre las condiciones de invierno y verano.

## Preprocesamiento de las imágenes multiespectrales.

Antes de extraer la línea de costa, las imágenes TOA se preprocesan a través de una evaluación de calidad del producto descargado, donde se tiene en cuenta el enmascaramiento de nubes y la nitidez de la imagen.

- Enmascaramiento de nubes: cada imagen se complementa con una banda de evaluación de calidad, calculada previamente por el proveedor de datos (USGS para Landsat o ESA para Sentinel-2), que contiene una máscara de nube por píxel. Con esta información, el porcentaje de nubosidad se calcula en función del número de píxeles nublados dentro de la región de interés y se utiliza un umbral de nubosidad definido por el usuario para descartar todas las imágenes que lo superan (Vos *et al.* 2019).

Nitidez de imagen pancromática y muestreo descendente: Partiendo del hecho de que las imágenes son ortorectificadas por el proveedor de datos, en este paso se mejora la resolución espacial de la imagen para lograr una detección óptima de la costa (Vos *et al.* 2019). Para imágenes Landsat 5 (TM), que a diferencia de los demás satélites no posee una banda pancromática, se realiza una interpolación bilineal, donde las bandas de 30 m se muestrean a 15 m, mejorando la precisión de la detección de la costa. Para imágenes Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI), la banda pancromática de mayor resolución se utiliza para aumentar la resolución de las demás bandas, cuya porción del espectro electromagnético está cubierta por la banda pancromática de 30 a 15 m. Las bandas multiespectrales se muestrean a 15 m (por interpolación bilineal) y se descomponen en componentes principales (Tu *et al.* 2001). Luego, el primer componente principal se reemplaza por la banda pancromática y después de hacer coincidir los histogramas, se vuelve a transformar en el espacio multiespectral original. Para imágenes Sentinel-2, la banda SWIR1 de 20 m se muestrea mediante interpolación bilineal, de modo que todas las bandas tengan una resolución de 10 m (Vos *et al.* 2019).

## Extracción de línea de costa con resolución de subpíxel

La línea de costa se define como la interfaz instantánea entre el agua y la arena capturada en el instante de la adquisición de la imagen (Vos *et al.* 2019). El método se fundamenta en la identificación de esta interfaz a partir de diferencias espectrales existentes entre el agua y la tierra, en el espectro infrarrojo de las imágenes, en este caso sobre la banda 5 del Landsat 5 y 7, la banda 6 del Landsat 8 y la banda 11 del Sentinel-2 (Alonso 2021). El algoritmo se basa en la segmentación del borde de subpíxeles de Liu *et al.* (2017), propuesto originalmente por Cipolletti *et al.* (2012). El método que se implementa dentro de CoastSat introduce un nuevo componente de clasificación de imágenes que refina la detección de la costa.

Se etiqueta cada píxel de la imagen con las 4 clases identificadas 'arena', 'agua', 'aguas bravas' y 'otras características de la tierra' (ej., vegetación, edificios, promontorios rocosos). Según Vos *et al.* (2019), se utiliza un conjunto de 20 variables explicativas como entradas para el clasificador, que incluyen la intensidad de píxeles en 5 bandas multiespectrales (R, G, B, NIR, SWIR1), 5 índices espectrales de uso común (ej., índice de agua, índice de vegetación) y la varianza (calculada mediante una ventana móvil de  $3 \times 3$ ) de cada banda multiespectral e índice espectral. Esta clasificación arroja como resultado la imagen original (Figura 10A), la imagen clasificada (Figura 10B) en la que cada píxel se etiqueta con su clase ('arena', 'aguas bravas' y 'agua' y píxeles no etiquetados), y la imagen con los valores del Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificada, MNDWI (Figura 10C).

La detección de la línea de costa se extrae utilizando el MNDWI a cada una de las imágenes clasificadas. Los valores de MNDWI oscilan entre -1 y 1 en el cual los valores menores a cero corresponden a cuerpos de agua. La salida del índice MNDWI (Figura 11), es a través de un histograma de valores con los píxeles etiquetados ubicados dentro de una distancia predefinida (100 m). La función de densidad de probabilidad (PDF) de los píxeles de arena se centra en valores positivos de MNDWI, mientras que los píxeles de agua tienen valores de MNDWI negativos. El umbral de

arena-agua se calcula aplicando el algoritmo de umbral de Otsu (1979) para encontrar el valor MNDWI que maximiza la varianza entre las distribuciones arena y agua, excluyendo por adelantado los píxeles que pertenecen a la clase aguas blancas y otras características de la tierra (Vos *et al.* 2019). El paso final en la detección de la línea de costa es calcular el contorno isovaluado en la imagen MNDWI para un nivel igual al umbral de 'arena'/'agua'. Esta operación se realiza a una resolución de subpíxeles aplicando el algoritmo Marching Squares (Lorensen & Cline 1987, Cipolletti *et al.* 2012, Vos *et al.* 2019).

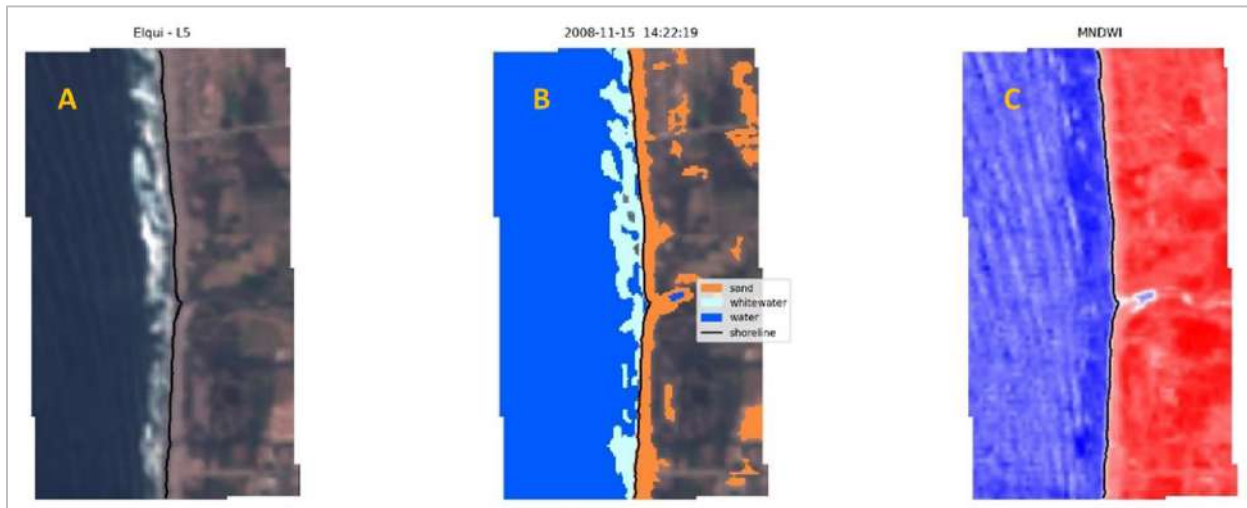


Figura 10: Región de interés dentro de la imagen RGB, Elqui. Fuente: Elaboración propia.

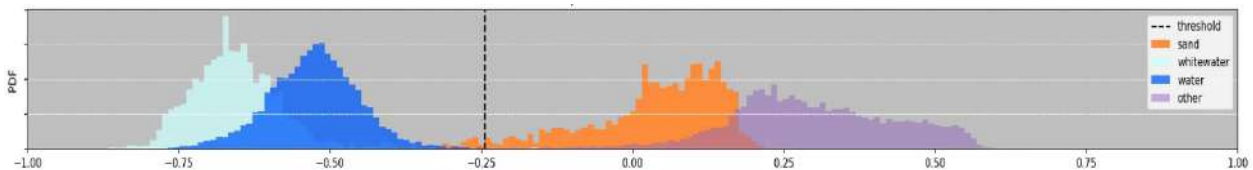


Figura 11: Histograma calculado a partir de la misma región de interés, que muestra la función de densidad de probabilidad (PDF) de los valores de MNDWI para cada una de las cuatro clases etiquetadas ('agua', 'arena', 'aguas bravas' y 'otras características de la tierra'). Fuente: Elaboración propia.

### Análisis temporal de la posición de la línea de costa a lo largo de los transectos trazados.

CoastSat genera cada línea costera mapeada como un vector de coordenadas 2D en el sistema de referencia espacial WGS84. Este ofrece la opción de visualizar, corregir, aceptar o rechazar cada línea costera detectada mediante la aplicación de una herramienta gráfica interactiva (Vos *et al.* 2019). Una vez extraídas las líneas de costa, se intersectan con transectos perpendiculares a la costa y se extraen los cambios del litoral, creando una serie de tiempo. Los transectos se pueden integrar al sistema de forma manual o importar sus coordenadas desde un archivo separado. Para minimizar el efecto del oleaje en el frente de la playa (swash), la intersección entre la línea costera instantánea y los transectos normales se calcula como el promedio a lo largo de la costa de los puntos de la línea costera ubicados dentro de los 25 m del transecto (Vos *et al.* 2019).

### Exportación de líneas costeras mapeadas a un GIS

Como parte final del procesamiento de las líneas de costa, los resultados son exportados en un archivo con formato geojson. Estos archivos se trabajan en QGIS agregándole los atributos que debe tener un mapa a la hora de su salida.

### 3.4.2 Modelamiento de la topografía del humedal (actividad adicional)

En el marco de los estudios realizados previamente por este equipo consultor en el estuario del humedal de Elqui desde 2017, ya se contaba con un DEM (modelo de elevación digital) para el entorno de la desembocadura del humedal (Figura 12). Además, en diversas oportunidades se levantaron perfiles topográficos en la playa inmediata del humedal. Estos perfiles fueron levantados con un nivel topográfico y miras parlantes, posicionados con un GPS con chip de alta resolución espacial para obtener un error inferior a 1 m en la horizontal e inferior a 1 decímetro en la vertical. Todos los perfiles fueron referenciados al Nivel de Reducción de Sonda (NRS) para el puerto de Coquimbo. Estos datos fueron complementados con mediciones batimétricas para configurar las cotas de toda el área de trabajo a incluir en los modelos hidrodinámicos y morfodinámicos.

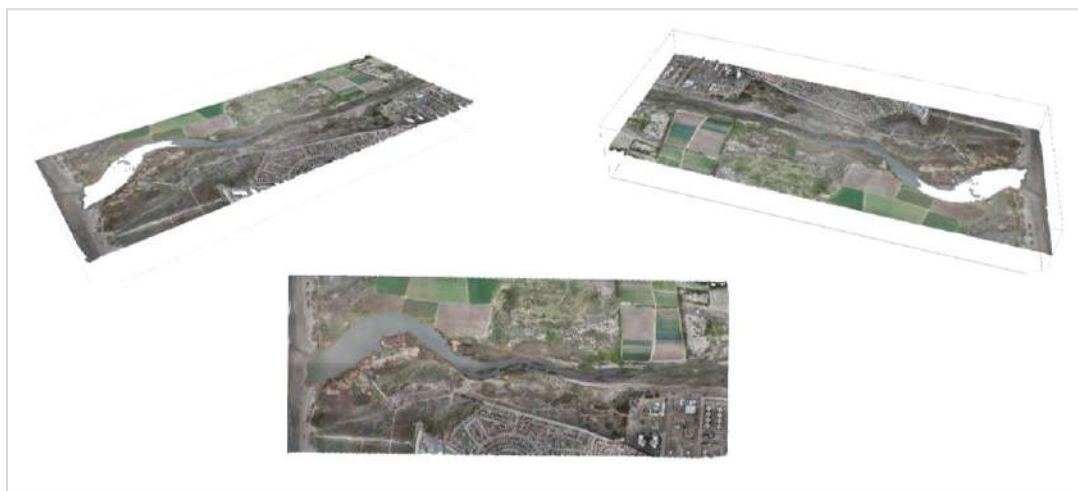


Figura 12: Ejemplo de diferentes vistas del DEM con que cuenta Dinámica Costera para el humedal del río Elqui en su desembocadura. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3 Modelamiento de la batimetría del humedal

Entre el jueves 2 y el sábado 4 de septiembre de 2021 se realizó un levantamiento batimétrico del área de la desembocadura. Para ello se utilizaron GPS's con chips de alta resolución espacial, trabajando con errores de posicionamiento horizontal de 1 a 3 m, junto con reglas, escandallos y/o ecosondas, de acuerdo con la profundidad de la columna de agua medida. La medición de cada punto fue rotulada y grabada simultáneamente a la posición marcada por el GPS (waypoint). En profundidades mayores a un metro, se utilizó un bote inflable para navegar sobre el humedal, dotado con sensor de profundidad manual Cole-Parmer AO-99756-40 y escandallo (Figura 13) Una vez levantada la información y efectuado el posterior control de calidad de los puntos, se realizó un cruce de información entre los waypoints registrados por el GPS y lo recopilado por los instrumentos utilizados para registrar la profundidad del cuerpo de agua. Para esto, se utilizó Microsoft Office Access, que permite cruzar la información teniendo como punto de encuentro la hora, el minuto y el segundo exacto en que se obtuvieron los datos. El

resultado de este proceso indica la coordenada geográfica en donde se levantaron determinados datos en terreno. Con este proceso se obtiene el insumo bruto para poder graficar la profundidad.



Figura 13: Elementos utilizados para realizar el levantamiento batimétrico.

### 3.4.4 Modelo comportamiento hidrodinámico y morfodinámico del humedal y su barra terminal

En este estudio se seleccionó la herramienta de modelado hidrodinámico y transporte Delft3D (Lesser *et al.* 2004, Delft Hydraulics 2007). El modelo tridimensional Delft3D-FLOW es la herramienta con la que se simulan los escenarios solicitados para año seco, año normal y año lluvioso. Las simulaciones realizadas para modelar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico del humedal del río Elqui se establecen en la Tabla 3.

Tabla 3: Listado de simulaciones realizadas considerando la combinación de las 5 variables: condición de la barra, caudal de cabecera, nivel del mar, oleaje y horizonte temporal. Se establece una codificación para cada escenario de simulación en la última columna. Fuente: Elaboración propia.

Situación	Escenario Hidrológico	Escenario Oceanográfico		Horizonte Temporal	Código
	Caudal Cabecera	Nivel del Mar	Oleaje		
Cerrada(C)/ Abierta(A)	Seco(Q-) / Normal(Q) / Húmedo(Q+)	No/Actual / ANM* fin de siglo	Sí/No	Histórico(H) / Futuro (F)	
Barra Cerrada	Año seco	No	No	Histórico	CHQ-
	Año normal	No	No	Histórico	CHQ
	Año húmedo	No	No	Histórico	CHQ+
	Año seco	ANM fin de siglo	Sí	Futuro	CFQ-
	Año húmedo	ANM fin de siglo	Sí	Futuro	CFQ+
Barra Abierta	Año seco	Actual	Sí	Histórico	AHQ-
	Año normal	Actual	Sí	Histórico	AHQ
	Año húmedo	Actual	Sí	Histórico	AHQ+
	Año seco	ANM fin de siglo	Sí	Futuro	AFQ-
	Año húmedo	ANM fin de siglo	Sí	Futuro	AFQ+

\* ANM o aumento del nivel del mar



Para las simulaciones de la Tabla 3 se consideran dos situaciones, barra terminal de arena abierta y cerrada, y para ambos se simularon las condiciones de año seco, año húmedo y año normal donde sólo se considera escenario oceanográfico (niveles de marea y oleaje) en la situación de barra abierta. Adicionalmente, se incluyen dos simulaciones más para un horizonte temporal a futuro (fines de siglo), que incorporan las proyecciones de aumento del nivel del mar. Para las simulaciones de escenarios futuros se incorpora el escenario oceanográfico tanto en barra abierta como cerrada.

Por otro lado, se incluyen 3 simulaciones complementarias (Tabla 4), 2 dirigidas a modelar el sobrepaso del oleaje sobre la barra de arena y la evolución de la salinidad para las situaciones actuales con la vegetación presente y sin ella, y una tercera para modelar el tiempo de mezcla de la salinidad una vez cesado el sobrepaso y considerando únicamente el forzante viento.

La condición sin vegetación se incluye para evidenciar el efecto que ésta tiene en los procesos de mezcla de salinidad por ejercer un rol importante en la hidrodinámica del humedal.

Tabla 4: Casos adicionales de sobrepaso del oleaje sobre la barra de arena y tiempo de mezcla de salinidades.  
Fuente: Elaboración propia.

Situación	Escenario Hidrológico	Escenario Oceanográfico		Vegetación	Código
	Caudal Cabecera	Nivel del Mar	Oleaje		
	Seco(Q-) /Normal(Q)/Húmedo(Q+)	No/Actual	Sí/No	Con(V+)/Sin(V-)	
Sobrepaso (S)	Año seco	Actual	Sí	Con	SHQ-/V+
	Año seco	Actual	Sí	Sin	SHQ-/V-
Tiempo de mezcla (M)	Año seco	No	No	Con	MHQ-/V+

### 3.4.4.1 Descripción general del modelo

Delft3D es un sistema de modelado integrado de flujo y transporte, orientado al medioambiente acuático. En el módulo de flujo, Delft3D-FLOW, se resuelven las ecuaciones no lineales 2D (promediadas en profundidad) y 3D para aguas someras (shallow water equations) que derivan de las ecuaciones tri-dimensionales de Navier-Stokes para flujo incompresible de superficie libre. Este módulo es importante ya que proporciona las bases hidrodinámicas para otros módulos como los de oleaje y morfología. El modelo hidrodinámico Delft3D-FLOW es capaz de simular fenómenos de transporte tridimensionales resultantes de forzamientos de marea y/o forzamientos meteorológicos, incluyendo los efectos de la diferencia de densidades debidas a distribuciones de temperatura y salinidad. Además, permite simular problemas de transporte donde el campo de flujo horizontal muestra variación significativa en la dirección vertical.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo corresponden a la ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0,$$

y las ecuaciones de conservación de momentum:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C_b h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_H \frac{\partial U}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + g \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C_b h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_H \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_H \frac{\partial V}{\partial y} \right),$$

donde  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas longitudinal, transversal y vertical, respectivamente,  $t$  el tiempo,  $U$  y  $V$  las componentes horizontales de la velocidad promediadas en la profundidad,  $g$  la gravedad,  $C_b$  el coeficiente de fricción de fondo,  $h$  la profundidad y  $v_H$  la viscosidad turbulenta. Por otra parte, la ecuación tridimensional de advección-difusión para sedimento en suspensión es

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0$$

donde  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las componentes de la velocidad de flujo en tres dimensiones, en m/s,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$  las difusividades de Eddy de la fracción de sedimentos, en m<sup>2</sup>/s,  $c$  la concentración de masa de la fracción de sedimentos, en kg/m<sup>3</sup> y  $w_s$  la velocidad de sedimentación de la fracción de sedimento, en m/s.

### 3.4.4.2 Generación de malla

Se establecieron dos tipos de malla: una horizontal que cubre la totalidad del sistema y otra vertical para incorporar los cambios en la columna de agua sólo para las simulaciones de sobrepaso del oleaje hacia el interior del humedal (Tabla 4). La malla horizontal se generó mediante la herramienta Delft3D-RFGRID como una malla estructurada ortogonal de tamaño de celda 2,5 x 2,5 m, capaz de captar los fenómenos de transporte de sedimento. Sobre esta malla se construyó la topo-batimetría del área de estudio, donde la batimetría corresponde a datos medidos en la campaña de terreno y la topografía a datos obtenidos del modelo de elevación digital del estuario Río Elqui (Figura 2). La malla para simulaciones con la barra cerrada se presenta en la Figura 14 (izquierda). Para la barra abierta se amplía su extensión hacia la zona oceánica a modo de incluir las forzantes de marea (Figura 14, derecha). El mallado vertical consiste en una discretización de 5 capas en profundidad que se genera como contorno a medida entre el fondo y la superficie libre en movimiento.

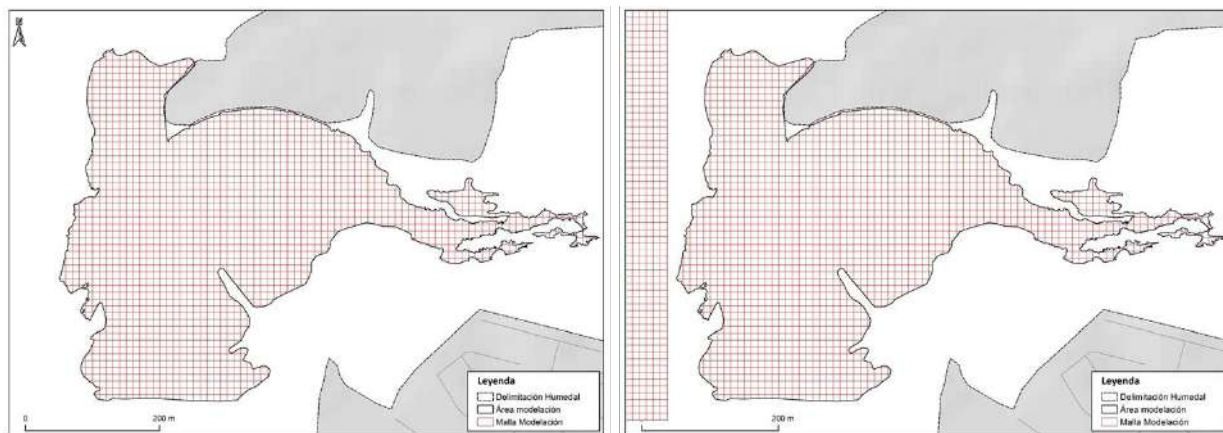


Figura 14: Dominio de la malla del humedal del Río Elqui en su desembocadura de 2,5 x 2,5 m de tamaño de celda. El polígono negro indica el contorno del humedal para efectos de la hidrodinámica (cuerpos de agua y vegetación halófito). Malla para simulaciones sin interacción con el océano (izquierda) y con interacción con el océano (derecha) Fuente: elaboración propia.

### 3.4.4.3 Flujo de simulaciones

Se plantean dos esquemas de simulación, dependiendo de si existe o no interacción entre el humedal y el océano, las cuales están representadas en la Figura 15 y Figura 16. Esta interacción va a depender de factores como el nivel del agua del estuario, el nivel del mar en la desembocadura y las condiciones de entrada en los cursos fluviales (caudales) y en el extremo costero (mareas y eventos de marejada).

La Figura 15 muestra el esquema sin conexión con el océano, donde se parte por las forzantes atmosféricas e hidrológicas como datos de entrada o inputs del modelo. Éstas se modelan con el módulo “FLOW” (o flujo) del software Delft3D, el cual entrega resultados de cambios de niveles y corrientes que se retroalimentan con los mismos datos de entrada. Estos resultados a su vez se transfieren al módulo de “Transporte de sedimentos”, donde se modelan tanto los cambios en la columna de agua como en el fondo, con resultados de erosiones y/o sedimentaciones generadas por las corrientes. Por último, todo este proceso se retroalimenta en cada paso de tiempo definido en la configuración del modelo.

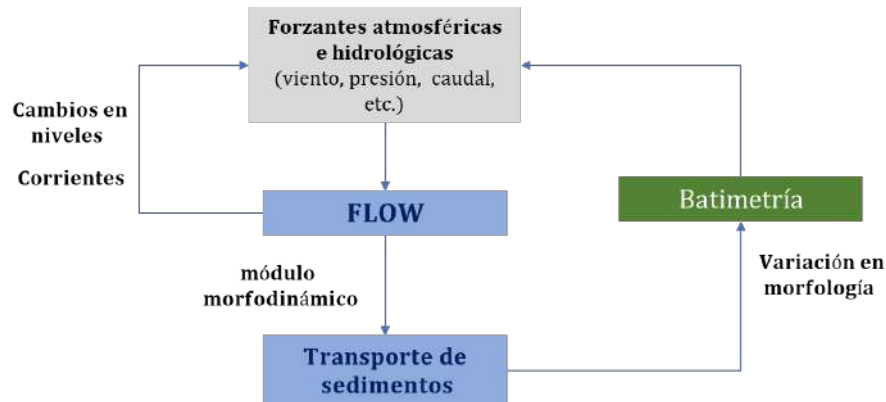


Figura 15: Esquema teórico de procedimiento para simulación hidromorfo dinámica en los casos sin interacción entre el humedal y el océano (barra cerrada) con el software Delft3D. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 16 se refiere al mismo proceso anterior, pero incluyendo en el ciclo el input del océano, tanto por los cambios de niveles atribuidos a la marea como a los oleajes.

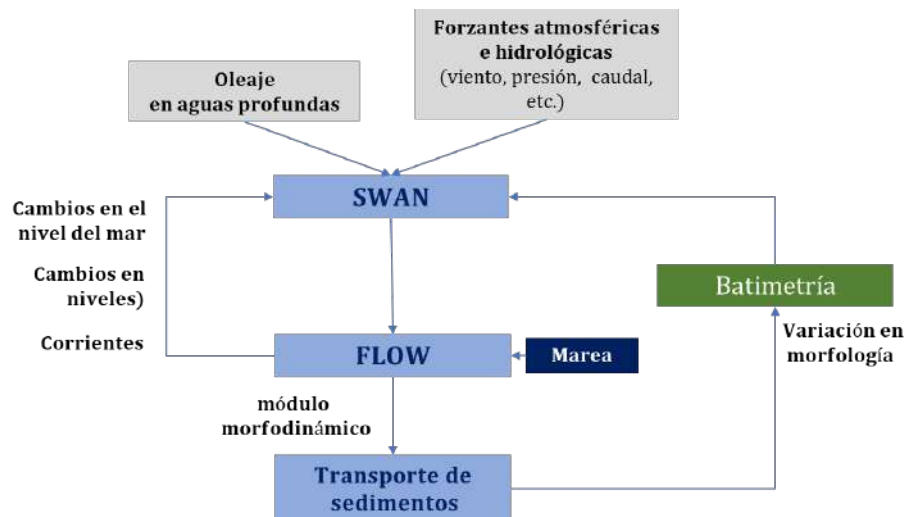


Figura 16: Esquema teórico de procedimiento para simulación hidromorfo dinámica en los casos con interacción entre el humedal y el océano (barra abierta) con el software Delft3D. Fuente: elaboración propia.

### 3.4.4.4 Cálculo de sobrepasos del oleaje. Run-up

Para el cálculo del volumen de sobrepaso del agua de mar hacia el interior del estuario se utilizó una formulación empírica. Primero se calcula el run-up,  $R_{u2\%}$  (Stockdon *et al.* 2006), o elevación máxima del oleaje sobre el perfil de playa respecto del nivel medio. Si este valor supera la cota máxima de coronación de la barra terminal de arena entonces habrá sobrepaso.

$$R_{u2\%} = 1.1 \left( 0.35 \beta_f (H_0 L_0)^{1/2} + \frac{[H_0 L_0 (0.563 \beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right)$$

Donde  $\beta_f$  es la pendiente del frente de playa (barra de arena),  $H_0$  es la altura de ola en aguas profundas y  $L_0$  es la longitud de onda en aguas profundas. Posteriormente se estima el área de sobrepaso con apoyo de la topografía, considerando un área igual a la longitud de la barra por la diferencia de alturas entre la cota de coronación de la barra de arena y el run-up. Por último, se estimó la velocidad del sobrepaso ( $v_A$ ) mediante la formulación de Pullen *et al.* (2007).

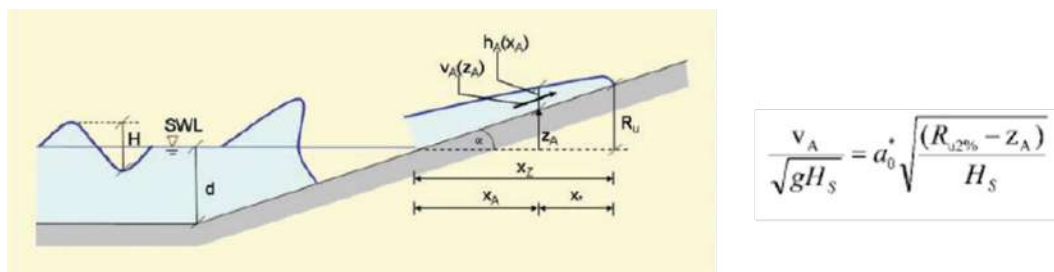


Figura 17: Esquema y formulación para el cálculo de la velocidad de sobrepaso del agua del océano sobre estructuras. En este caso aplicada al sobrepaso sobre la barra de arena. Fuente: Pullen *et al.* (2007).

### 3.4.5 Transporte de sedimentos

Para abordar el transporte de sedimentos hasta la desembocadura del río Elqui, se analizaron los factores que influyen la producción de sedimento en las distintas zonas de la cuenca y la capacidad de transporte de dichos sedimentos hasta la playa. Influyen sobre estos dos fenómenos las características geológicas y morfológicas de las cuencas, la actividad sísmica, el régimen de caudales líquidos, factores ambientales como el viento, las temperaturas y la precipitación, y factores antrópicos como el uso de suelos, la extracción de áridos, entre otros factores antropogénicos y no-antropogénicos. Así, para estimar el volumen de sedimentos totales transportados hasta la desembocadura del río Elqui, se identificaron fuentes y sumideros de sedimentos, entre los que se cuenta:

- Actividades agrícolas.
- Actividades mineras.
- Movimiento de áridos.

La capacidad de transporte de sedimentos está controlada por el régimen de caudales líquidos en los cauces al interior de la cuenca, esperándose la mayor capacidad de transporte durante crecidas y en los cauces con mayores

pendientes. Para visualizar esto se estudia el régimen de caudales de la cuenca a nivel diario y los eventos aluvionales registrados en la cuenca en las estaciones DGA.

### 3.4.6 Caracterización comportamiento barra terminal de arena

Al igual que la mayoría de los humedales de Chile central (Contreras *et al.* 2022, Andrade & Grau 2005), la dinámica del estuario desembocadura del río Elqui, tiene un comportamiento estacional (Figura 18), donde se combina el efecto de los forzantes correspondientes al aporte de agua dulce, marea astronómica y marejadas, principalmente. Para caracterizar esta dinámica, se recopilaron imágenes aéreas disponibles en el Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Área (SAF), GoogleEarth y las imágenes Landsat 5 (TM), Landsat 7 (EMT +) y Landsat 8 (OLI) Tier 1, y Sentinel-2 (MSI) Level-1C.



Figura 18: Variación de las condiciones del humedal de Elqui en diferentes meses del año, mostrando los cambios estacionales que sufre el humedal. Fuente: Google Earth.

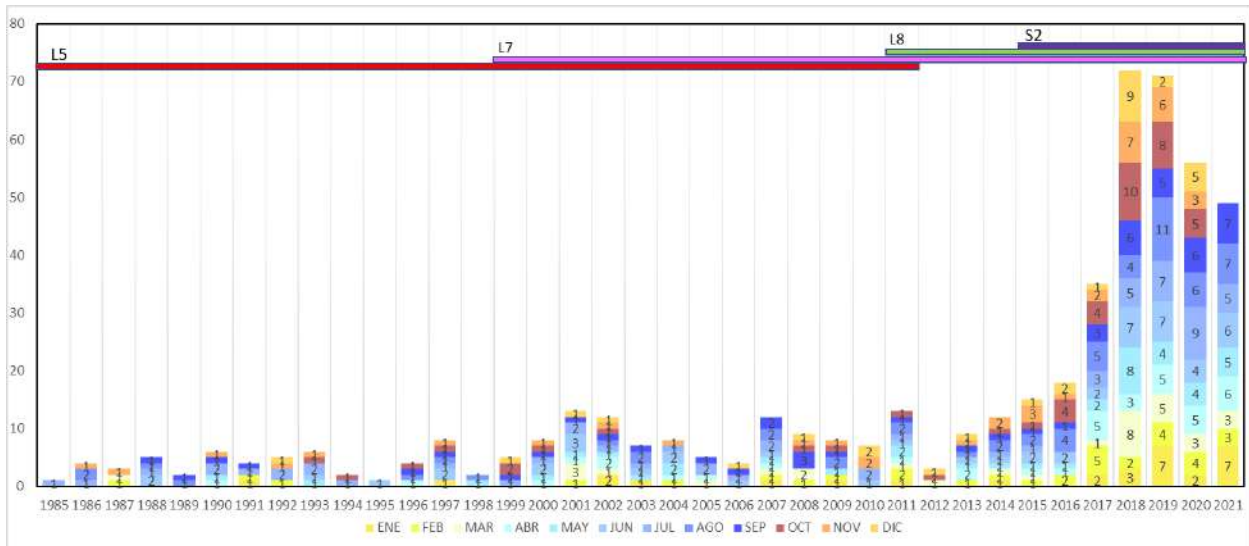


Figura 19: Disponibilidad de imágenes por año y mes de captura utilizadas para la caracterización del comportamiento de la barra terminal de arena. Se indica la cobertura de misión satelital utilizada. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 19 ilustra la disponibilidad de imágenes por año y mes de captura y la Figura 20 muestra la disponibilidad de imágenes por año y misión satelital, utilizadas para la caracterización del comportamiento de la barra. Estas imágenes son correlacionadas con los registros de nivel del mar (mareas), ocurrencia de eventos extremos de oleaje (marejadas), caudal y pluviosidad de la cuenta y ocurrencia de aluviones en la cuenca (aportes extraordinarios de sedimentos). Se presentan los resultados de la construcción de una serie de tiempo marcando la conexión/desconexión del humedal con el mar; el tipo de conexión (natural / artificial) y la presencia o no de una pluma de dispersión de material sedimentario en suspensión.

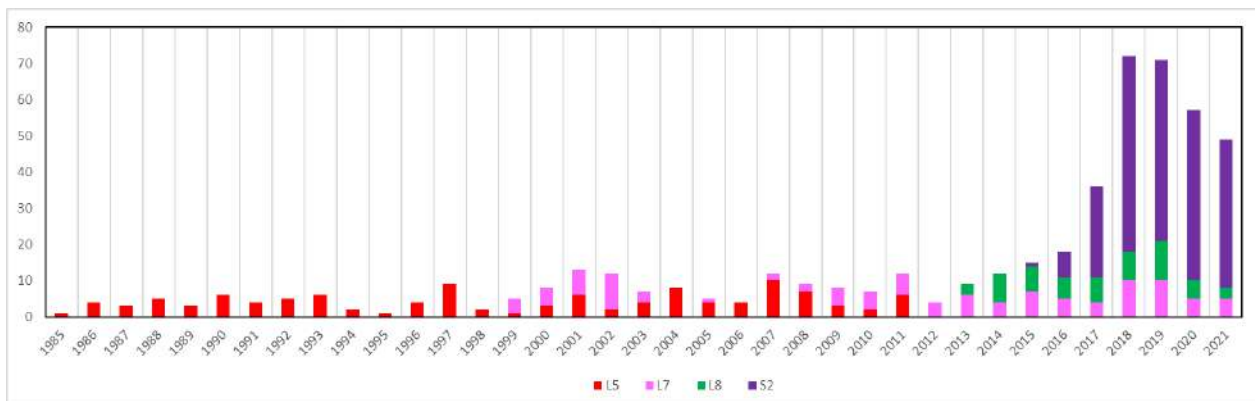


Figura 20: Disponibilidad de imágenes por año y misión satelital, utilizadas para la caracterización del comportamiento de la barra terminal de arena. Fuente: Elaboración propia

### **3.5 Actividades asociadas con el objetivo específico 3**

Para el cumplimiento del objetivo específico OE3) “Proponer estrategias de manejo y gestión del humedal, enfocado en su comportamiento hidrodinámico y morfodinámico”, se realizaron las actividades descritas a continuación:

#### **3.5.1 Revisión bibliográfica**

Se efectúan una revisión y sistematización de literatura nacional e internacional sobre medidas de manejo en humedales en torno a la eco hidrología, eco hidráulica, entre otras. Se replica la metodología de análisis bibliográfico propuesto en la sección 3.3.1, esta vez para identificar medidas de manejo de humedales.

#### **3.5.2 Identificación elementos y variables relevantes para el manejo de humedal**

Para la identificación de elementos y variables de manejo del humedal, el equipo consultor analizó los resultados levantados a partir de la revisión bibliográfica y especialmente los resultados de las otras consultorías desarrolladas en la cuenca. Con juicio experto se elaboró un listado de elementos y variables, los cuales fueron sometidos a evaluación en el tercer taller técnico con el Comité Técnico Local (Sección 4.4.3).

#### **3.5.3 Propuestas de estrategias de implementación**

Se elaboró un listado de propuestas de estrategias de implementación para el manejo de la desembocadura del río Elqui. Cada propuesta fue sistematizada en una ficha, que incorpora:

- Nombre de la propuesta.
- Descripción de la propuesta de manejo.
- Objetivos.
- Variables forzantes.
- Potenciales impactos.
- Potenciales involucrados.
- Estimación de costos.
- Identificación de aspectos críticos y análisis de factibilidad de implementación.

Las medidas propuestas fueron jerarquizadas de acuerdo con sus potenciales impactos, beneficios, costos y factibilidad de implementación.

#### **3.5.4 Variables forzantes**

Del análisis de los resultados de la consultoría y la revisión bibliográfica, para cada una de las medidas propuestas, se identificó las variables forzantes que deben ser controladas o monitoreadas. Las variables son listadas en las fichas de sistematización de cada medida (sección 5.3.3).

### **3.5.5 Identificación de potenciales impactos**

El equipo consultor, mediante su criterio experto y el análisis de la revisión bibliográfica, identificó los potenciales impactos de los manejos y estrategias propuestas. Estos son listados en las fichas de sistematización de cada medida (sección 5.3.3).

### **3.5.6 Estimación de costos**

Para las medidas de mayor factibilidad de implementación durante el desarrollo del proyecto GEF-Humedales, se realizó una estimación de costos de implementación. Estos también son listados en las fichas de sistematización de cada medida (sección 5.3.3).

### **3.5.7 Brechas de información**

Sobre la base de la revisión bibliográfica y de los resultados de esta consultoría, se identificaron brechas de información y se realizan algunas propuestas para abordarlas.



## 4 GESTIÓN DEL PROYECTO

### 4.1 Reuniones coordinación contraparte

Para asegurar el logro de los objetivos propuestos en las Bases Técnicas, se mantuvo una permanente y expedita coordinación con la contraparte técnica del Proyecto GEF de Humedales Costeros. Esta coordinación se materializó con la realización de ocho reuniones con periodicidad mensual, que fueron realizadas en las siguientes fechas:

- Lunes 02-08-2021: Reunión Inicial
- Lunes 13-09-2021: Reunión Coordinación 2
- Lunes 04-10-2021: Reunión Coordinación 3
- Lunes 08-11-2021: Reunión Coordinación 4
- Lunes 06-12-2021: Reunión Coordinación 5
- Lunes 10-01-2022: Reunión Coordinación 6
- Lunes 31-01-2022: Reunión Coordinación 7
- Lunes 07-03-2022: Reunión Coordinación 8

Los principales aspectos tratados en estas reuniones se detallan a continuación. En el Anexo 9.2, se transcriben sus respectivas actas.

#### 4.1.1 Reunión Coordinación Inicial: lunes 2 agosto 2021

La primera reunión de coordinación se llevó a cabo el lunes 2 de agosto de 2021, de acuerdo con lo establecido en el contrato. En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Presentación del equipo profesional consultor (en adelante consultora).
- Presentación de la metodología de trabajo en detalle por parte de la consultora.
- Presentación de la contraparte técnica de la presente licitación (en adelante contraparte).
- Revisión y ajustes eventuales del plan de trabajo, en acuerdo con la contraparte.
- Revisión del calendario de la licitación y propuesta de fechas para talleres, terrenos y reuniones.
- Solicitud de antecedentes por parte del equipo consultor.
- Varios.

#### 4.1.2 Segunda reunión de coordinación: lunes 13 septiembre 2021

La segunda reunión de coordinación se realizó el lunes 13 de septiembre 2021, de acuerdo con lo programado. En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Informar actividades primer terreno.
- Observaciones informe avance 1.
- Varios.

#### **4.1.3 Tercera reunión de coordinación: lunes 4 octubre 2021**

La tercera reunión de coordinación se realizó el lunes 4 de octubre 2021, de acuerdo con lo programado. Esta reunión tuvo como objetivo transmitir resultados preliminares y coordinar esfuerzos con la consultora GESNAT a cargo de la consultoría paralela “Diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del humedal costero del río Elqui”. En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Informar resultados primer terreno.
- Informar avances implementación modelo numérico.
- Varios.

#### **4.1.4 Cuarta reunión de coordinación: lunes 8 noviembre 2021**

La cuarta reunión de coordinación se realizó el día lunes 8 de noviembre 2021, de acuerdo a lo programado. Esta reunión tuvo como objetivo coordinar la realización del segundo taller técnico y revisar los avances de la consultoría chequeando los avances presentados en el segundo informe de avance. En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Coordinar realización segundo taller técnico.
- Revisar aspectos sobre la entrega del segundo informe de avance.
- Varios.

#### **4.1.5 Quinta reunión de coordinación: lunes 6 diciembre 2021**

La quinta reunión de coordinación se realizó el día lunes 6 de diciembre 2021, de acuerdo a lo programado. Esta reunión tuvo como objetivo presentar los resultados de avance. En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Presentación resultados avance.
- Varios.

#### **4.1.6 Sexta reunión de coordinación: lunes 10 enero 2022**

La sexta reunión de coordinación se realizó el día lunes 10 de enero 2022, de acuerdo a lo programado. Esta reunión tuvo como objetivo presentar los resultados alcanzados en el segundo informe de avance y coordinar realización seminario día jueves 20 de enero. En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Presentación resultados modelación numérica.
- Realización seminario divulgación.

- Varios.

#### **4.1.7 Séptima reunión de coordinación: lunes 31 enero 2022**

La séptima reunión de coordinación se realizó el lunes 31 de enero 2022, adelantándose en una semana de acuerdo a lo programado debido a problemas de agenda. Esta reunión tuvo como objetivo presentar y discutir los resultados alcanzados en esta consultoría con el equipo consultor del estudio realizado en paralelo (GESNAT). En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Presentación resultados Dinámica Costera.
- Presentación resultados GESNAT.
- Varios.

#### **4.1.8 Octava reunión de coordinación: lunes 7 marzo 2022**

La octava reunión de coordinación se realizó el día lunes 7 de marzo 2022, de acuerdo a lo programado. Esta reunión tuvo como objetivo presentar los resultados finales del modelo numérico y coordinar la realización del tercer taller técnico y el taller de difusión final. En esta reunión se trataron los siguientes puntos:

- Presentación resultados finales.
- Coordinación realización de talleres.
- Varios.

## **4.2 Reuniones técnico – académicas**

El miércoles 18 de agosto, entre las 10:00 y 11:30 horas, se participó en la reunión mensual del comité técnico local del humedal costero del Río Elqui. En dicha oportunidad se presentó el equipo consultor y se efectuó una breve presentación exponiendo los objetivos de la consultoría y algunos detalles metodológicos.

El día lunes 13 de septiembre, entre las 11:00 y 13:00, se participó en la reunión convocada por la contraparte técnica para escuchar la charla “Estado de proyecto Paseo Costero El Faro La Serena”, de la Dirección de Obras Portuarias de Coquimbo. Acudieron profesionales de distintos servicios, académicos, autoridades y representantes de la sociedad civil.

El miércoles 10 de noviembre, entre las 15:00 y 16:30, se realizó una reunión convocada por la contraparte técnica para tratar aspectos sobre el cauce del río Elqui en el tramo correspondiente al poniente de la ruta 5 Norte hasta la desembocadura. Fueron invitados profesionales de las Seremías del Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas y el Ministerio de Bienes Nacionales, de la IM La Serena y Directemar. Los integrantes del equipo consultor, Carlos Zuleta y Roberto Agredano, expusieron avances de la consultoría con directa injerencia en la delimitación de la desembocadura del humedal.

### 4.3 Charlas y Seminarios

El equipo consultor estuvo disponible durante toda la ejecución de la consultoría para la realización de charlas para el Ministerio del Medio Ambiente, Comités Técnicos del Proyecto GEF Humedales Costeros y otros actores claves, de acuerdo con lo acordado por la contraparte Técnica.

En este marco, la contraparte solicitó la realización de una exposición en el seminario “Experiencias de manejo de humedales costeros: manejo de barras de arena”, que organizaron la iniciativa Humedales Costeros, el Centro Neotropical de Entrenamiento en Humedales y el Proyecto GEF Humedales Costeros. Esta charla se realizó el viernes de 20 de agosto, y estuvo a cargo de Roberto Agredano, quien expuso la charla “Erosión costera en la bahía de Coquimbo: análisis histórico, proyecciones y medidas de adaptación”. A su vez, el día jueves 16 de septiembre 2021, el Dr. Patricio Winckler expone la charla “Bahía de Coquimbo. Una mirada desde la ingeniería costera” en el marco del seminario “Tsunami 2015. Bahía de Coquimbo. Lecciones por aprender” (Figura 21).

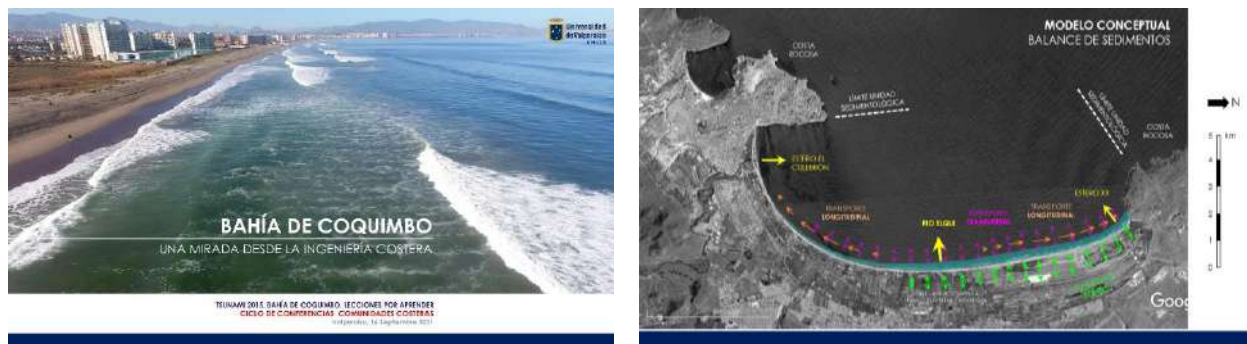


Figura 21: Presentación efectuada por Patricio Winckler, Tsunami 2015. Bahía de Coquimbo. Lecciones por aprender ciclo de conferencias comunidades costeras, el 16 septiembre 2021<sup>16</sup>.

El jueves 20 de enero 2020 se realizó el “Seminario Interdisciplinario sobre humedales costeros en Chile Central: Experiencias de investigación en humedales costeros de Chile central” (Figura 22), en el cual expusieron los miembros del Equipo consultor: Patricio Winckler, Carlos Zuleta, Christian Jofré y Roberto Agredano. El seminario fue impartido en modalidad virtual utilizando la plataforma ZOOM y en paralelo fue transmitido en vivo por el Facebook del Proyecto GEF Humedales Costeros. Los temas tratados en el seminario fueron:

- Humedales y cuencas costeras en riesgo: El caso de la bahía de Coquimbo
- Vulnerabilidades y amenazas del estuario del Río Elqui
- Entomofauna en los humedales costeros de Chile central: explorando sus potencialidades como bioindicadores
- Hidrodinámicas de humedales costeros desde la perspectiva de modelación
- Cambio Climático y Humedales Costeros de Chile Central

<sup>16</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=oqYf13e5Vso>



Figura 22: Afiche seminario Interdisciplinario sobre humedales costeros en Chile Central. Fuente: GEF-Humedales.

#### 4.4 Talleres

Para la realización de esta consultoría, se propuso la realización de tres talleres técnicos participativos con el Comité Técnico Local del Humedal Piloto Elqui del Proyecto GEF Humedales Costeros y un cuarto taller de divulgación abierto a la comunidad. A continuación, se presentan los principales resultados de cada taller y en el Anexo 9.3 se presenta la evidencia que respalda su realización. Debido a las restricciones de aforos permitidos por la pandemia, los talleres se realizaron en modalidad virtual. Los tres talleres técnicos incorporaron la realización de actividades participativas utilizando Zoom y herramientas como FunRetro<sup>17</sup>, LucidChart<sup>18</sup> o Jamboard<sup>19</sup>. Estas herramientas permitieron organizar grupos de trabajo y generar pizarras virtuales para emular actividades presenciales utilizando, por ejemplo, mapas participativos y post-it virtuales (Figura 23). Estas actividades dinámicas se fueron realizadas en grupos pequeños con 1 moderador/facilitador en cada grupo. Los talleres realizados son los siguientes:

- Miércoles 25-08-2021: Taller Técnico de Inicio, donde se presentó la propuesta técnica y el equipo consultor, y además se aprovechó de recabar antecedentes con el Comité Técnico Local (realizado según lo programado).
- Miércoles 17-11-2021: Taller Técnico de Avance, cuyo objetivo fue la presentación de avances y participación del Comité Técnico Local (realizado según lo programado).
- Miércoles 16-03-2022: Taller Técnico Final, cuyo objetivo fue presentar y validar los resultados con el Comité Técnico Local (realizado según lo programado).
- Miércoles 23-03-2022: Taller de Difusión, cuyo objetivo fue difundir resultados a un público más amplio que el Comité Técnico Local.

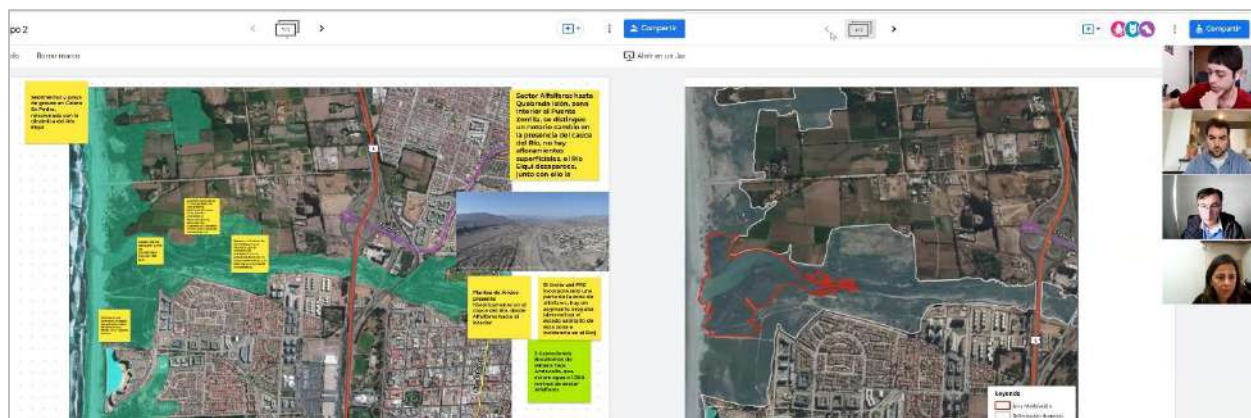


Figura 23: Ejemplo de taller realizado en esta consultoría. La imagen corresponde al Taller Técnico N°1 realizado el 17 de noviembre de 2021 a la sala del grupo 2 de tres. Fuente: Elaboración propia.

<sup>17</sup> <https://funretro.io/features>

<sup>18</sup> <https://www.lucidchart.com/pages/>

<sup>19</sup> <https://jamboard.google.com/>

#### 4.4.1 Taller Técnico 1: miércoles 25 agosto 2021

A este taller asistieron 25 personas, principalmente miembros del comité técnico local, acompañados de la contraparte y miembros del equipo consultor. Los objetivos de este taller fueron:

- Presentar el equipo consultor y la metodología de trabajo propuesta.
- Levantar información/antecedentes relevantes del comité técnico local.

El taller se inició con una presentación de los miembros de la consultora y la metodología propuesta para la realización de la consultoría. Se abrió un espacio para preguntas que respondió el equipo consultor. Posteriormente se realizó una actividad participativa en tres grupos, utilizando la metodología de Mapas Participativos, guiados cada grupo por un facilitador. En esta actividad, se presentó a los asistentes una cartografía de la cuenca del Elqui (Figura 24) y se les consultó a los participantes sobre:

- Antecedentes que la consultora deba revisar (cambios en la barra y alteraciones en aportes sedimentarios)
- Intervenciones existentes sobre la cuenca.



Figura 24: Cartografía utilizada en la actividad grupal participativa durante el Taller Técnico 01. Fuente: Elaboración propia.

Durante la actividad práctica se logró hacer una conceptualización de las ideas expuestas por cada uno de los participantes que permitieron generar la cartografía con la metodología de mapas participativos en función de 14 conceptos (Figura 25, Tabla 5). Se rescatan principalmente aquellos relacionados a la extracción de áridos, extracción de agua y el desarrollo inmobiliario. Finalmente, se elaboró un mapa con los resultados, que fue utilizado como guía durante el terreno realizado a comienzos de septiembre a lo largo de cuenca del Río Elqui (Figura 26).

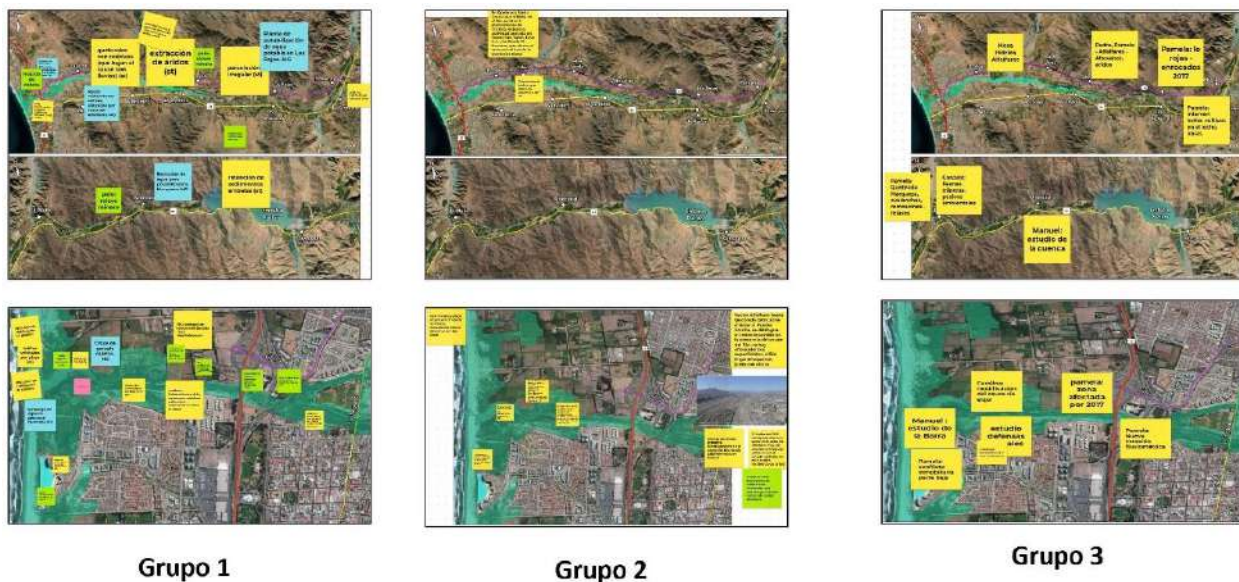


Figura 25: Resultados mapas participativos elaborados por cada grupo del taller técnico 1, a partir de la resolución de preguntas guía para el área comprendida entre la desembocadura del Río Elqui hasta el Embalse Puclaro. A la izquierda se presentan los resultados del Grupo 1, al centro el Grupo 2, y la derecha los resultados del Grupo 2. Con relación a los colores de las notas adhesivas, estos no tienen un significado en particular. La Tabla 5 ilustra la sistematización de los conceptos levantados mediante estos mapas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Sistematización de conceptos levantados por cada grupo en la actividad de mapas participativos. Se presentan observaciones asociada a la biota (celdas verdes), presiones antrópicas (celdas beige) y de morfología (celdas moradas). Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Mapa Desembocadura	Tipo	Mapa Puclaro	Tipo
1	Área de nidificación del Pilpilén	Fauna	Majada de cabras	Fauna
	Tráfico de Vehículos por la playa	Antrópico	Lavado de vehículos. Extracción de agua por camiones aljibes	Antrópico
	Descarga de aguas de piscina al humedal	Antrópico	Modificación de cauce (defensas fluviales)	Morfología
	Descargas residuales y recambio de aguas piscinas	Antrópico	Quebradas con residuos que bajan con el cauce con lluvias	Antrópico
	Modificación de riberas y cauce	Morfología	Aguas subterráneas salinas, utilizadas por casas de Alfalfares	Antrópico
	By Pass Aguas del Valle	Antrópico	Extracción de áridos	Antrópico
	Aliviadero de tormenta sanitaria	Antrópico	Relave minero	Antrópico
	Cruce de ganado caprino	Fauna	Parcelación irregular	Antrópico
	Desarrollo inmobiliario cercano al río	Antrópico	Relave minero que infiltra	Antrópico
	Vestigio de cementerio diagüita (Inca, Huentelauquén)	Antrópico	Planta de potabilización de agua potable en Las Rojas	Antrópico
	Área agrícola (extracción de agua, pesticidas, basura, otros)	Antrópico	Uso habitacional cercano al río	Antrópico
	Modificación de ribera ante crecidas del río	Morfología	Relave minero	Antrópico



Grupo	Mapa Desembocadura	Tipo	Mapa Puclaro	Tipo
	Aceites e hidrocarburos al río, descarga y residuos peligrosos, adyacentes en todo el cauce.	Antrópico	Extracción de agua para potabilización, Marquesa.	Antrópico
	Extracción de agua por camiones aljibes y lavado de autos	Antrópico	Retención de sedimentos en el embalse	Morfología
	Contaminantes río arriba (pesticidas, basura)	Antrópico	Actividad minera y agrícola, extracción irregular. Cuenca Santa Gracia.	Antrópico
2	Sedimentos y playa de gravas en Caleta San Pedro, relacionada con la dinámica del Río Elqui	Antrópico	En Quebrada Santa Gracia que tributa en el Río, existen 2 plantaciones de Cítricos, extensas, actividad agrícola en Fundo San Pablo, Dole S.A. y la Planta El Romero, que afecta al recurso hídrico de la Quebrada Santa Gracia	Antrópico
	Eliminación de excedente de agua (previo tratamiento de desarenado) desde Condominio Laguna del Mar	Antrópico	Extracción de áridos que altera la dinámica del río.	Antrópico
	La indefinición de los límites del Bien de uso público, destinado al cauce, entre puente Libertador y Desembocadura, dado que los propietarios ribereños alteran dicho deslinde a discreción.	Antrópico		
	Bypass o Aliviador de tormentas, el cual funciona por el aumento de precipitaciones o población flotante en temporada estival, y la falta de una planta de tratamientos.	Antrópico		
	Sector Alfalfares hasta Quebrada Islón, zona interior al Puente Zorrilla, se distingue un notorio cambio en la presencia del cauce del Río, no hay afloramientos superficiales. El Río Elqui desaparece, junto con ello la presencia de vegetación (en los estudios no consideran esta zona precisamente por que correspondería a otro ambiente) pero históricamente es un área que ha sufrido impacto.	Morfología		
	Plantas de Áridos presente históricamente en el cauce del Río, desde Alfalfares hacia el interior	Antrópico		
	El límite del PRC incorpora solo una parte de la zona de alfalfares, hay un segmento irregular (determinar el estado sanitario de esta zona e incidencia en el Río)	Antrópico		
3 Captaciones Bocatomas de Minera Teck Andacollo, que extrae agua a 1.300 metros de sector Alfalfares	Antrópico			
3	<b>Mapa Desembocadura</b>	<b>Tipo</b>	<b>Mapa Puclaro</b>	<b>Tipo</b>
	Estudio de barra	Morfología	Mesa Hídrica Alfalfares	Antrópico
	Conflicto inmobiliario parte baja	Antrópico	Alfalfares, Altovalsol, áridos	Antrópico
	Modificación del cauce del río Elqui	Morfología	Lo Rojas - Enrocados 2017	Antrópico
	Estudio defensas fluviales	Antrópico	Intervención del lecho, cultivos en el lecho, obras.	Morfología
	Inmobiliaria, 2 torres de 15 pisos	Antrópico	Quebrada Marqueza, avalanchas, remociones, relaves	Morfología
	Zona afectada por 2017	Morfología	Estudio de la Cuenca	Morfología
	Nueva estación fluviométrica	Antrópico		

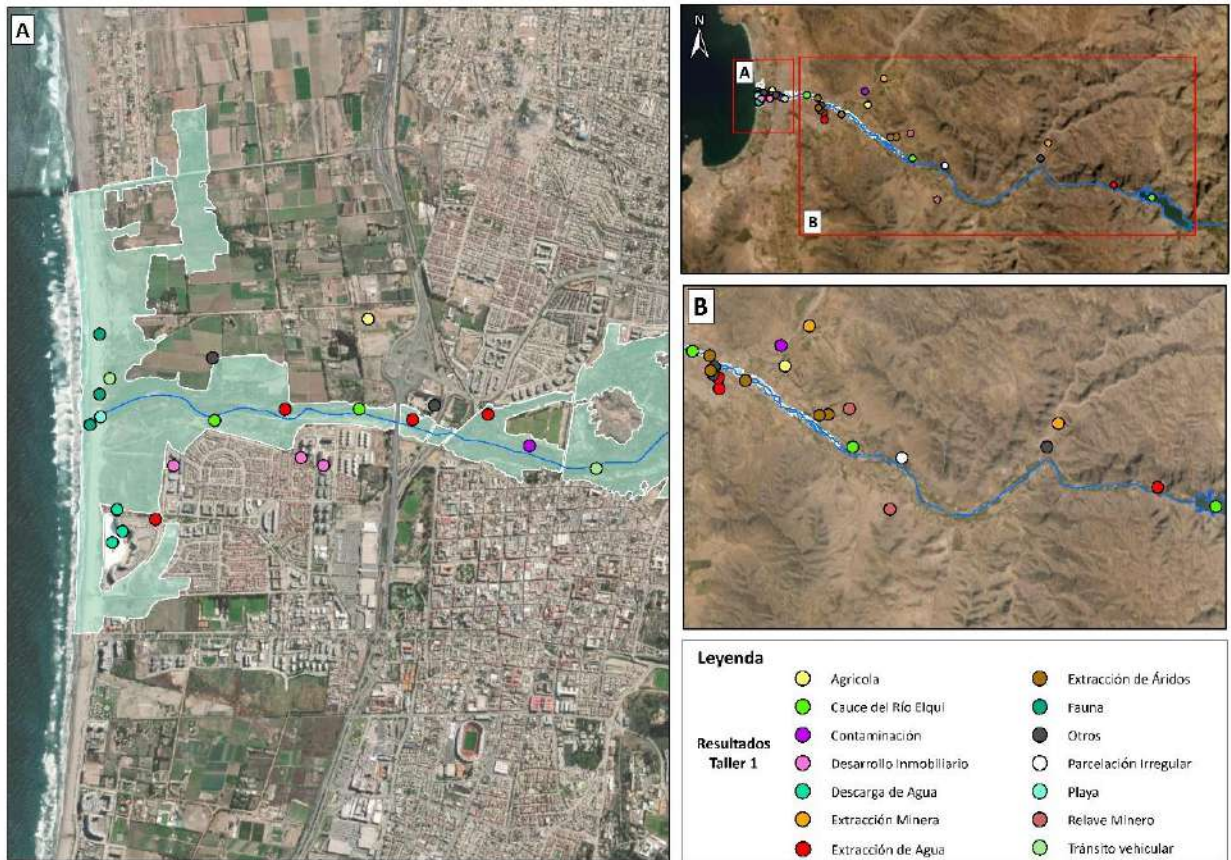


Figura 26: Mapa resultados del taller técnico 1. Los círculos de colores señalan las localizaciones georreferenciadas de las distintas perturbaciones y cambios que han afectado la cuenca del río Elqui. Cada color corresponde a una categoría diferente. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a partir de la actividad participativa se lograron mapear las principales situaciones y/o posibles intervenciones existentes sobre la cuenca del Río Elqui (Figura 26), que los participantes lograron plasmar sobre las cartografías de apoyo. En este sentido, para el área de la desembocadura del humedal destacan los aspectos vinculados a fauna, como el cruce de ganado Caprino y los nidos de pilpilenes, las descargas de agua que podrían estar afectando el área y el desarrollo inmobiliario que presenta el sector. En cambio, río arriba, destacan principalmente dos tipos de actividades extractivas, vinculadas a la extracción de agua y de áridos. Este material, buscaba nutrir al equipo consultor para tener noción de ciertas actividades o situaciones para tener en cuenta, particularmente durante la actividad de terreno que se llevaría a cabo durante los días 2 al 5 de septiembre, a partir de la recolección de información/percepción de la población local.

#### 4.4.2 Taller Técnico 2: miércoles 17 noviembre 2021

A este taller asistieron 26 personas, principalmente miembros del comité técnico local, acompañados de la contraparte y miembros del equipo consultor: Los objetivos de este taller fueron:

- Presentar los resultados de la revisión bibliográfica.
- Presentar avances de la implementación del modelo numérico.

Con el mismo formato de trabajo que en el taller técnico 1, la consultora realizó una presentación sintetizando los principales avances y resultados de la consultoría. Se abrió un espacio para preguntas que respondió el equipo consultor. Posteriormente se realizó una actividad participativa en tres grupos, utilizando la metodología de Mapas Participativos, guiados cada grupo por un facilitador. En esta actividad, se presentó a los asistentes la misma cartografía de la cuenca del Elqui utilizada en el taller anterior (Figura 27) y se les consultó a los participantes sobre:

- ¿Qué cambios ha apreciado en la desembocadura?
- ¿Qué efectos se aprecian en la cuenca durante años El Niño (lluvioso), Normal y La Niña (seco)?

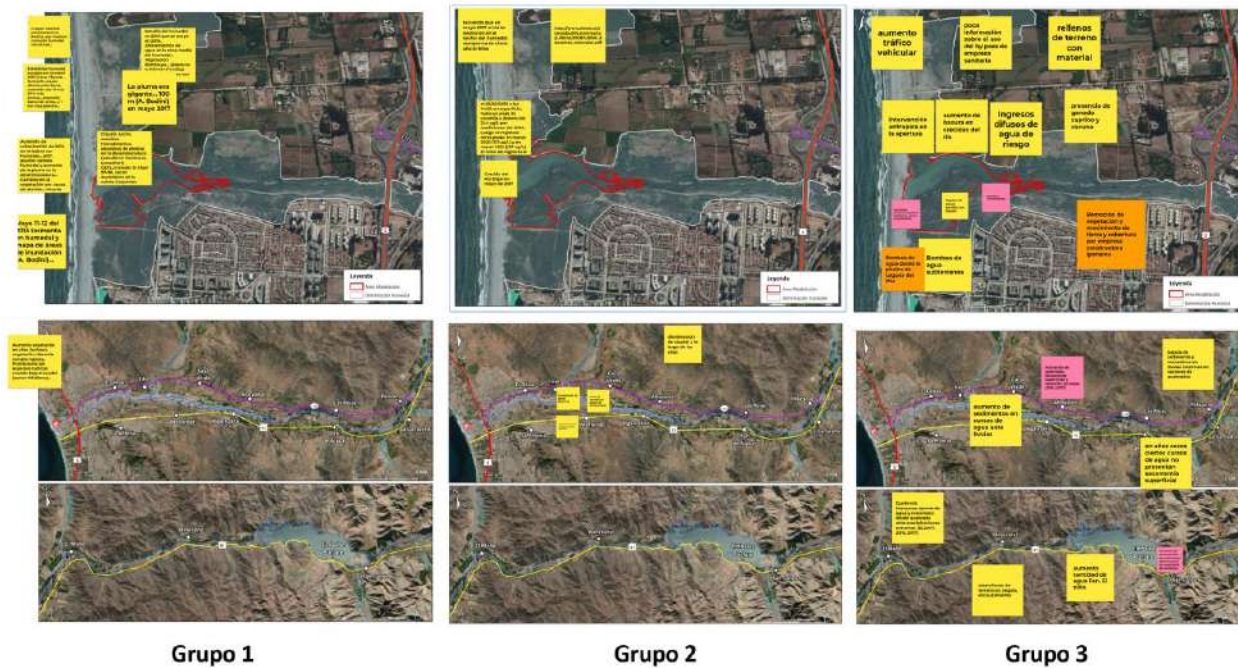


Figura 27: Resultados de los mapas participativos elaborados por cada grupo del taller técnico 2, a partir de la resolución de preguntas guía para el área comprendida entre la desembocadura del Río Elqui hasta el Embalse Puclaro. A la izquierda se presentan los resultados del Grupo 1, al centro el Grupo 2, y la derecha los resultados del Grupo 2. Con relación a los colores de las notas adhesivas, estos no tienen un significado en particular. Fuente: Elaboración propia.

De la actividad participativa grupal se conceptualizaron las ideas de los participantes y se agruparon en 7 conceptos de los cuales destacan los de lluvias y sequías, relacionados principalmente a el transporte de sedimentos y la ausencia de escorrentía en algunos cursos de agua. Algunos de los comentarios realizados por los participantes sobre los resultados del taller (Figura 28) fueron los siguientes:

- Perturbaciones antrópicas ocasionales en la vegetación en la cuenca, particularmente de la vegetación ribereña a nivel de Alfalfares. También los eventos Niño-Niña producen cambios en la vegetación, con mayor cobertura y diversidad en los años Niño.
- Se observan cambios en los caudales, con mayor escorrentía en años Niño, que arrastra material de áridos acumulados en la cuenca e inundaciones sector Sur del río.

- Discontinuidad del cauce del río por extracción de agua por pozos. Esto se acrecienta en años Niña, Remoción de áridos que se acumulan en la playa.
- Se menciona la presencia de “ratadas” y otras irrupciones poblacionales en años Niño-NIÑA.
- Durante períodos de sequía se realizan intervenciones del cauce río Elqui, facilitando la ocupación de suelos inundables para diversos usos, particularmente agricultura y vivienda. También se materializan construcciones de defensas fluviales (DOH), que quedan sobre el cauce de forma permanente, sin mayores consideraciones sobre efectos ecológicos sobre los escurrimientos del río.

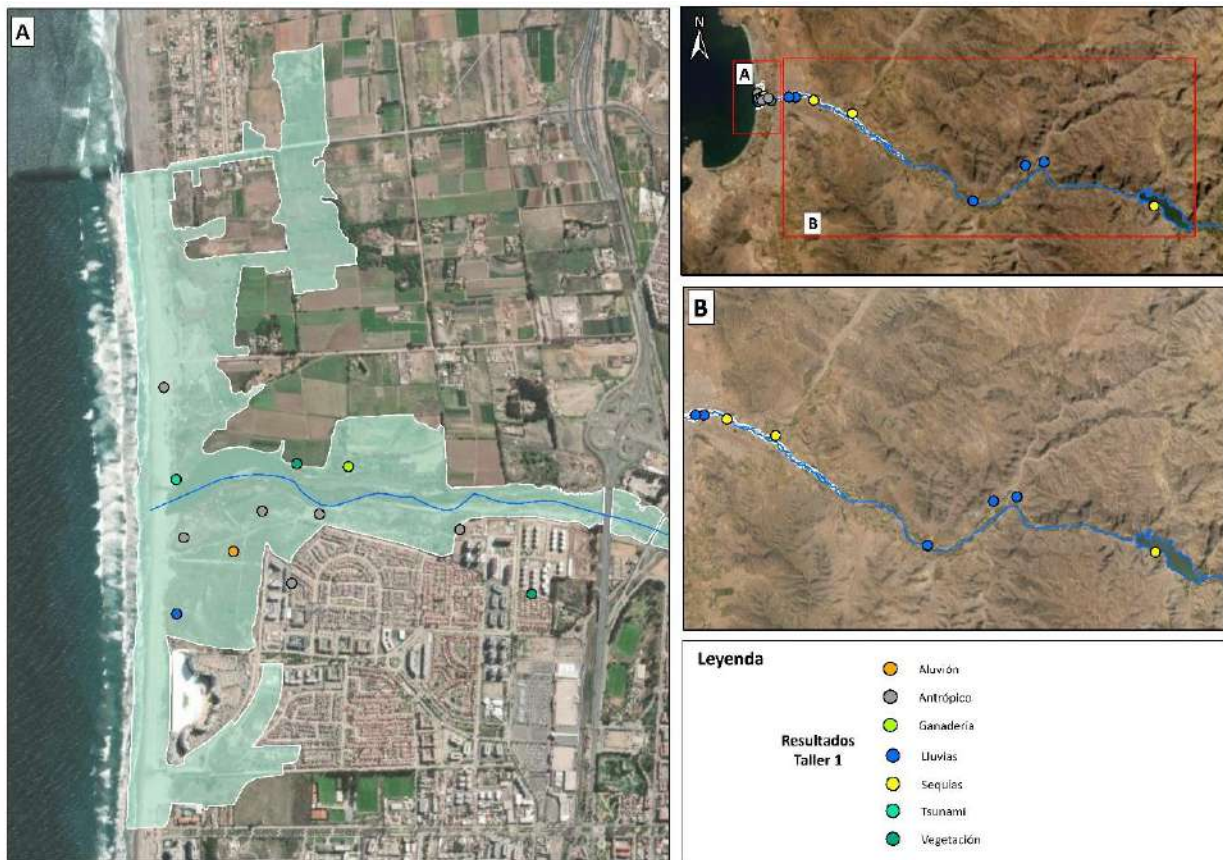


Figura 28: Mapa resultados del taller técnico 2. Los círculos de colores señalan las localizaciones georreferenciadas de las distintas perturbaciones y cambios que han afectado la cuenca del río Elqui. Cada color corresponde a una categoría diferente. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los participantes fueron capaces de ubicar en qué partes de la cuenca han podido identificar cambios a partir de instancias climáticas como también antrópicas, lo que fue llevado a cartografías temáticas (Figura 28). En este sentido a nivel de la desembocadura se identificaron aspectos antrópicos como aumento en el tránsito vehicular y efectos sobre la fauna, intervenciones en la apertura de la barra y cambios en el volumen del agua, bombeo de agua, puntos de basura, entre otros. En tanto, río arriba, se vincularon situaciones a episodios de lluvias, cuando los participantes hicieron mención al aumento de caudales, bajada de sedimentos de quebradas y posibles fenómenos de remoción en masa. Mientras que, los episodios de sequías se asociaron a cursos de agua que dejaban de tener escorrentía superficial durante estos periodos y la extensión de los terrenos que antes eran ocupados por el agua.

#### 4.4.3 Taller Técnico 3: miércoles 16 marzo 2022

A este taller asistieron 38 personas, principalmente miembros del comité técnico local, acompañados de la contraparte y miembros del equipo consultor. Debido a que el taller se alargó levemente de lo programado, finalizaron la actividad 23 asistentes. Los objetivos de este taller fueron:

- Conocer los resultados finales de la consultoría.
- Validar las propuestas de manejo de la desembocadura.

La consultora realizó una presentación sintetizando los principales resultados de la consultoría. Se abrió un espacio para preguntas que respondió el equipo consultor. Posteriormente se realizó una actividad participativa, que debido a la reducción de participantes se efectuó en un solo grupo. Se pidió a los asistentes que se pronunciaran sobre las medidas propuestas:

- Manejo de la barra.
  - Aperturas controladas
  - Evitar aperturas
  - Evitar sobrepasos
- Manejo vegetación.
- Monitoreo humedal.
- Manejo playa.
  - Evitar tránsito
  - Restaurar anteduna
  - Monitoreo playa.

Para motivar la discusión se realizaron las siguientes preguntas:

- ¿Está usted de acuerdo con las medidas propuestas en la presente consultoría?
- ¿Qué elementos cree usted que son fundamentales para complementar las propuestas presentadas?

Los resultados fueron sistematizados utilizando la metodología de Mapas Participativos, guiados por un facilitador (Figura 29, Tabla 6), que en esta ocasión se optó por figuras que apoyaran la discusión frente a las medidas propuestas. En la Figura 29 se muestra arriba en el centro, la contribución de los participantes sobre el manejo de la barra, que se refiere a la gestión de realizar o no aperturas controladas o actuaciones conducentes a evitar los sobrepasos desde el mar al humedal. Abajo en el centro (Figura 29), el manejo de la vegetación tiene que ver con los posibles cambios que puede sufrir la composición físico-química del agua y que afecten a la distribución y tipo de vegetación presente en el humedal, y que por tanto requiera de un manejo para controlar dichos cambios. Arriba a la derecha, el monitoreo del humedal hace alusión a las continuas mediciones de parámetros físico-químicos del humedal que reporten la evolución del sistema y; abajo a la derecha, el manejo de la playa que va en la dirección del seguimiento y control de las actividades encaminadas a mantener o mejorar las condiciones ecológicas de la misma, ya sea por la prohibición del tránsito de vehículos, la restauración de la duna, etc. Con relación a los colores de las notas adhesivas, estos no tienen un significado en particular, sino que eran de libre elección de los participantes. La Tabla 6 ilustra el proceso de validación realizado mediante estos mapas.

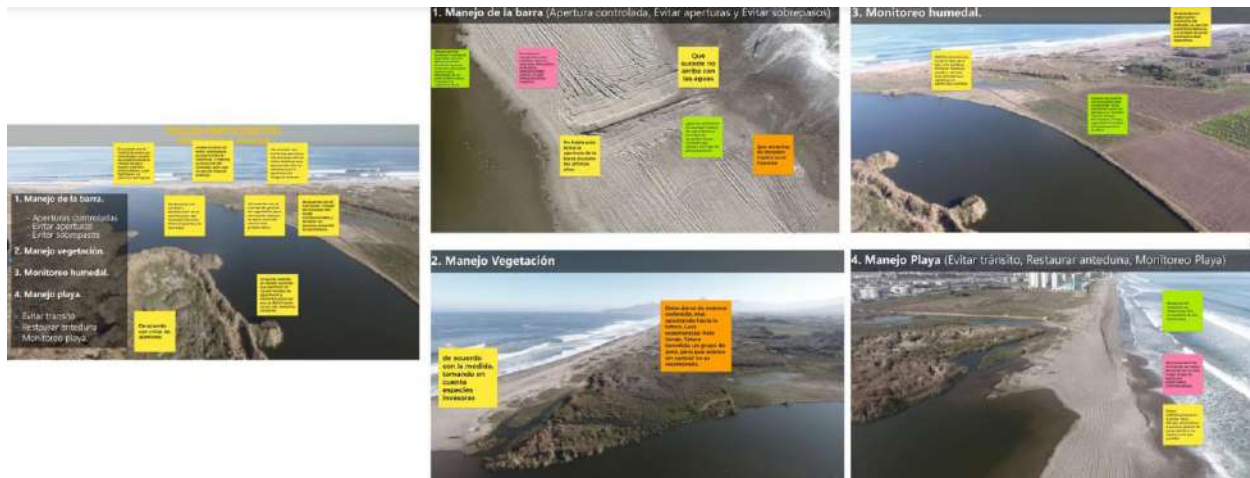


Figura 29: Resultados de la actividad participativas elaborados durante el taller técnico 3. Se muestran las contribuciones sobre manejo de barra, manejo de la vegetación, monitoreo del humedal y manejo de la playa. Los resultados son sistematizados en la Tabla 6. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Sistematización resultados proceso de validación tercer taller técnico para las medidas: manejo de barra, manejo de la vegetación, monitoreo del humedal y manejo de la playa. Fuente: Elaboración propia.

Participación	Medida	Idea
De acuerdo con la medida de aperturas controladas, cuando las condiciones de la calidad de agua superen umbrales pre-acordados, y que signifiquen un deterioro del hábitat	<b>Manejo de la barra</b>	Los participantes están de acuerdo con el manejo de la barra, especialmente con que sea del tipo controlado, teniendo en consideración que idealmente es algo que no debe realizarse de forma antrópica. Se menciona también indicar en qué épocas del año la apertura no debiese nunca hacerse. Un aspecto relevante de la participación fue que se hizo mención que hace un par de años la apertura de la barra no había sido tema en la ciudad y que es algo sobre lo cual recientemente se ha tomado noción de las implicancias que puede llegar a tener esto.
Aclarar el tema de evitar sobrepasos, ya que la idea es mantener o mejorar la situación del humedal, pero que no sea de manera artificial		
¿Qué tan prioritario es manejar la barra de arena frente a otro tipo de acciones? En un contexto que existen otro tipo de perturbaciones		
No había sido tema la apertura de la barra durante los últimos años		
¿Modelo permite remplazar medidas de seguridad como por ejemplo pretils? Simulación permite tomar una alternativa versus la otra. Elaboración de un pretil conlleva varios impactos a la vegetación, entre otros		
De acuerdo con evitar las aperturas		
De acuerdo con evitar las aperturas, sin embargo, ello se debe destacar que épocas del año no debiese ocurrir aperturas de ninguna manera		
De acuerdo con la medida, tomando en cuenta especies invasoras	<b>Manejo vegetación</b>	Los participantes están de acuerdo con el manejo de la vegetación, especialmente de especies invasoras e incluso considerar la Totorá y su presencia en el humedal. Este manejo debe ser lo menos invasivo posible preocupándose principalmente de las situaciones más problemáticas.
Debe darse de manera sostenida, más apuntando hacia la totora. Leer experiencias: Palo Verde. Totorá beneficia un grupo de aves, pero que avance sin control no se recomienda.		

Participación	Medida	Idea
De acuerdo con el manejo de gestión de vegetación, pero de manera natural, es decir controlar solo lo más problemático		
De acuerdo con el monitoreo "simple" del humedal con sonda multiparámetro, y de tener los recursos aumentar los parámetros	<b>Monitoreo humedal</b>	Los participantes están de acuerdo con el monitoreo del humedal pensando en que es vital detectar patrones de comportamiento a través de un monitoreo constante en el tiempo a través de parámetros básico y en caso de existir más recursos otros que sean más específicos. Se menciona un aspecto importante el de poder caracterizar el vínculo con las intrusiones marinas y la relación acuífero-río a través de estos monitoreos.
De acuerdo con implementar monitoreo del humedal, ya sea con parámetros básicos y si existen recursos, parámetros más específicos.		
Conocer la conexión con el acuífero para comprender otros elementos como por ejemplo a la intrusión marina. Vínculo Río-Acuífero. El flujo superficial no sería el principal aporte al acuífero		
Definitivamente esto nos da la idea de si hay o no cambios. Plantear hipótesis ayuda a ver con más claridad que cambia y no. Detectar un patrón.		
Restauración anteduna se observó en otra consultoría es una buena idea.	<b>Manejo Playa</b>	Los participantes están de acuerdo, pensando en que es importante una apertura controlada de la barra, bajo un enfoque en que en ocasiones podría ser un bien mayor. Adicionalmente se menciona el buscar alternativas a quienes deciden igualmente transitar sobre la playa en vehículos, en una lógica de no prohibir este tipo de prácticas.
Abrir un canal de no más de un metro de ancho. Es un bien mayor el que se busca con aperturas controladas.		
Evitar definitivamente el tránsito. Pero brindar alternativas a quienes gustan de estas prácticas. La lógica no va por prohibir		
Una quinta medida es realizar acciones que permitan un caudal mínimo de agua hacia la desembocadura.	<b>Comentarios adicionales</b>	Es fundamental para varios de los participantes tener nociones de las implicancias de estas medidas, como un aspecto fundamental para poder definir si están de acuerdo o no con lo que se propone.
Necesitamos operativizar estas medidas. Cómo se logra esto. Profundizar en plazos, implicaciones, costo. Lo que implican estas medidas		
Qué tanto hay de intrusión marina en el humedal.		

#### 4.4.4 Taller Difusión miércoles 23 marzo 2022

A este taller asistieron 55 vía zoom, junto con más de 200 reproducciones y 430 personas alcanzadas vía Facebook. Debido a que el objetivo principal de este taller fue difundir los resultados de la consultoría, se cursaron invitaciones a la comunidad en general, además del comité técnico local (Figura 30). El taller fue difundido en las redes sociales del proyecto GEF-Humedales y transmitido por Facebook a quienes no lograron inscribirse en la plataforma zoom. Posteriormente el Proyecto GEF Humedales subió el video del seminario a su canal de youtube



Figura 30: Afiche talle de difusión final de los resultados de la consultoría. Fuente: GEF-Humedales.

Algunas de las observaciones y preguntas realizadas durante el desarrollo de este seminario de difusión fueron las siguientes:

- El límite sur del borde del espejo de agua o de la zona saturada es un camino de acceso a la playa. Hay un efecto importante de la barra en la superficie del espejo y como este varía de acuerdo a lo presentado hoy. En ese contexto, es posible incorporar en el modelo cambios en el espejo si uno "eliminara" el camino que mencioné arriba. Lo pregunto, porque ese camino opera casi como un pretil y evita que el agua superficial fluya naturalmente al sector más al sur ¿Ese camino podría eliminarse, a propósito de que permite el ingreso al humedal en áreas sensibles, pero sacar ese "pretil" podría ocasionar cambios en el espejo que modelaron ustedes? Respuesta: Efectivamente en el modelo se pueden hacer cambios en la topobatimetría para ver qué cambios se podrían producir. En caso de que ese camino se elimine, si es que funciona de límite del espejo de agua, efectivamente el agua escurriría más al sur hasta encontrarse con las cotas que le impidan seguir fluyendo. Esto habría que verlo en detalle con más datos topográficos. Los que tenemos no llegan mucho más al sur de ese camino.
- En el río Lingue, comuna de Mariquina, región de Los Ríos tenemos la solicitud de "abrir" la barra del río dado que los pescadores acceden al mar a través de ella y se encuentra cada vez más embancada... queremos realizar una consultoría de prefactibilidad para ver si podemos o no abrir la barra, ¿qué estudios me pueden sugerir realizar en dicho estudio?
- ¿El software para modelar es de código abierto? lo pregunto por si a futuro cambia la topo-batimetría del humedal, el espejo de agua o establecen medidas de manejo que cambien la hidrodinámica del humedal (e.g. manejo de vegetación) que lo hagan variar, y sería necesario actualizar el modelo.
- En relación a los sedimentos, aún hay sedimento que llega a la desembocadura (aún hay plumas de sedimento durante eventos de lluvia) pero seguramente desde fuentes locales. Evaluar las fuentes locales (aguas abajo el embalse Puclaro) de sedimento ¿puede ser una opción alternativa? El informe de



geoquímica de sedimentos de la cuenca del Elqui (Sernageomin) puede servir para inferir las fuentes que están activas hoy.

- Han modelado la morfodinámica con y sin plantas y su efecto en la difusión salina en el humedal, sin embargo, me intriga saber si pueden modelar, o si lo han hecho, para medir la expansión de la totora como especie exótica y su modificación de la morfodinámica del humedal, como por ejemplo en provocar la extinción de los microhábitats de fangal o de muy baja profundidad que son fundamentales para la alimentación de aves playeras
- Se podría elaborar (como un siguiente paso y basado en la conclusiones de los estudios) .. una guía de criterios para obras hidráulicas y costeras que desarrollan el MOP y lo Municipios ...
- La ley de Humedales urbanos y los Santuarios de la Naturaleza incluyen maritorio (se ha hecho y se puede seguir haciendo). Para el primer caso, hasta 6 metros de profundidad para el caso de los Humedales Urbanos, debe revisarse el plan regulador comunal respectivo, si el límite comunal incluye territorio marítimo en alguna porción.
- La experiencia en costa rica de Michael McCoy trata el tema del manejo de la totora en Costa Rica.

## 4.5 Terrenos

Durante el desarrollo de esta consultoría se desarrollaron once terrenos en la desembocadura del río Elqui, que corresponden a:

- Un terreno intensivo a lo largo de la cuenca y la desembocadura para levantar información necesaria para implementar el modelo numérico.
- Nueve terrenos de monitoreo del estado del sector de la barra del humedal.
- Un terreno final para estudiar la densidad de la flora ribereña de la desembocadura del río Elqui.

### 4.5.1 Terreno Inicial: 2 al 5 septiembre 2021

este terreno tuvo como objetivo levantar la información para configurar el modelo numérico que se elaboró en este estudio. Las principales actividades realizadas fueron:

- Jueves 2 de septiembre: Recorrido de la cuenca desde la desembocadura hasta el embalse Puclaro. En algunos puntos se tomaron registros de parámetros fisicoquímicos (Figura 31, Figura 32).
- Viernes 3 de septiembre: Levantamiento batimétrico del sector desembocadura, vuelos de drone, registros multiparamétricos de la columna de agua a lo largo del eje del río en su desembocadura; instalación de una cámara trampa para constatar cambios en la desembocadura (Figura 33, Figura 34, Figura 35).
- Sábado 4 de septiembre: Levantamiento topográfico de la barra de arena. Recorrido de la bahía de Coquimbo desde Punta Teatinos hasta el Puerto de Coquimbo.
- Domingo 5 de septiembre: recuperación de equipos instalados.

Durante el recorrido de la cuenca, se pudieron constatar múltiples intervenciones en el álveo del Río Elqui, entre las que se cuenta principalmente las extracciones de áridos y ocupaciones irregulares. Durante el levantamiento en la desembocadura del río Elqui (Figura 33), se constató que la laguna se encontraba desconectada del mar, pero existía un canal de comunicación construido artificialmente. Este canal fue inspeccionado en las estoas<sup>20</sup> de pleamar<sup>21</sup> y bajamar<sup>22</sup> para verificar su estado (Figura 34).

Durante el terreno se levantaron los datos para construir la batimetría del cuerpo de agua, insumo fundamental para la modelación del comportamiento. Para ello en las partes más someras del humedal, se recorrió a pie, mientras que en las zonas más profundas, navegando (Figura 35). La batimetría reflejó que el humedal tenía profundidades en torno a los 3 m en la ribera norte y zonas bastante someras entorno a la barra. Además, se constató la presencia de abundante vegetación palustre en la ribera, la cual se encontraba en zonas de profundidades superiores a 1 m (Figura 36).

---

<sup>20</sup> Estoa: Minutos antes y minutos después del horario en que la marea llega a su altura máxima (pleamar) y a su altura mínima (bajamar) los niveles de marea permanecen estables, no se registran corrientes de mareas horizontales. Este momento se denomina estoa.

<sup>21</sup> Pleamar: Fin del movimiento creciente de la marea, cuando el agua alcanza su nivel más alto.

<sup>22</sup> Bajamar: Fin del movimiento descendente de la marea, cuando el agua alcanza su nivel más bajo.



Figura 31: A) extracción y venta de áridos en la ribera del río Elqui, cercana a la localidad de Altovalsol, cruce Ruta D-315 y Ruta 41. B) otra operación de movimientos de áridos en el río Elqui cercana a la localidad de Altovalsol, cruce Ruta D-315 y Ruta 41., C) Ocupación irregular en el lecho seco del Río Elqui (ribera sur), frente a la localidad de Las Rojas. Fotografías del Equipo consultor.

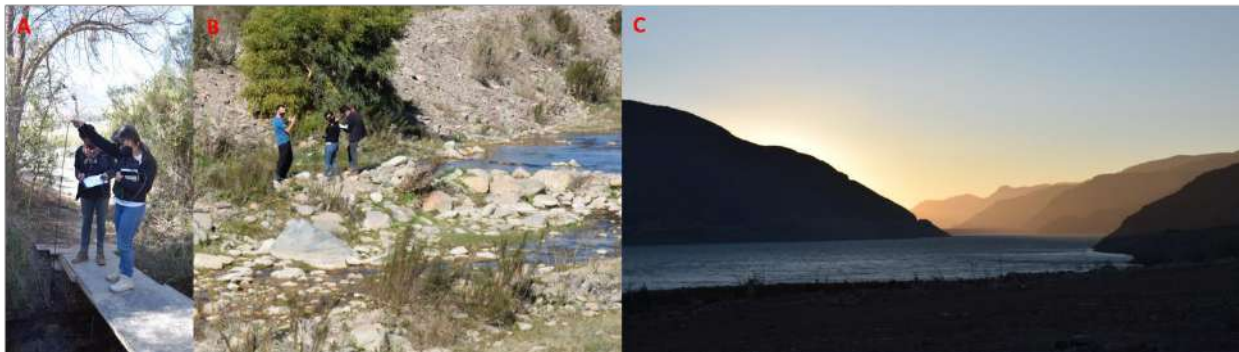


Figura 32: A) Toma de parámetros fisicoquímicos en el río Elqui y B) Parte del equipo consultor analizando intervenciones en el lecho del río en el sector sur de la ribera, frente a la localidad de Las Rojas, C) Embalse Puclaro, sector cercano a la localidad de Gualliguaica. Fotografías del Equipo consultor.



Figura 33: A) Dr. Patricio Winckler preparando un vuelo drone en el sector de la desembocadura del río Elqui. B) Parte del equipo consultor conversando con un lugareño del humedal. C) Navegación en el humedal para levantar transectos de parámetros fisicoquímicos y sondas batimétricas. Fotografías del Equipo consultor.



Figura 34: A) Estado del canal de comunicación entre el humedal y el mar en la estoa de bajamar del día 3 de septiembre 2021. B) Situación del canal en la estoa de pleamar del día 4 de septiembre 2021. C) Mismo canal en la estoa de bajamar del día 5 de septiembre 2021. Fotografías del Equipo consultor.



Figura 35: Actividades de levantamiento de sondas batimétricas y multiparámetro en el humedal del río Elqui. Fotografías del equipo consultor.

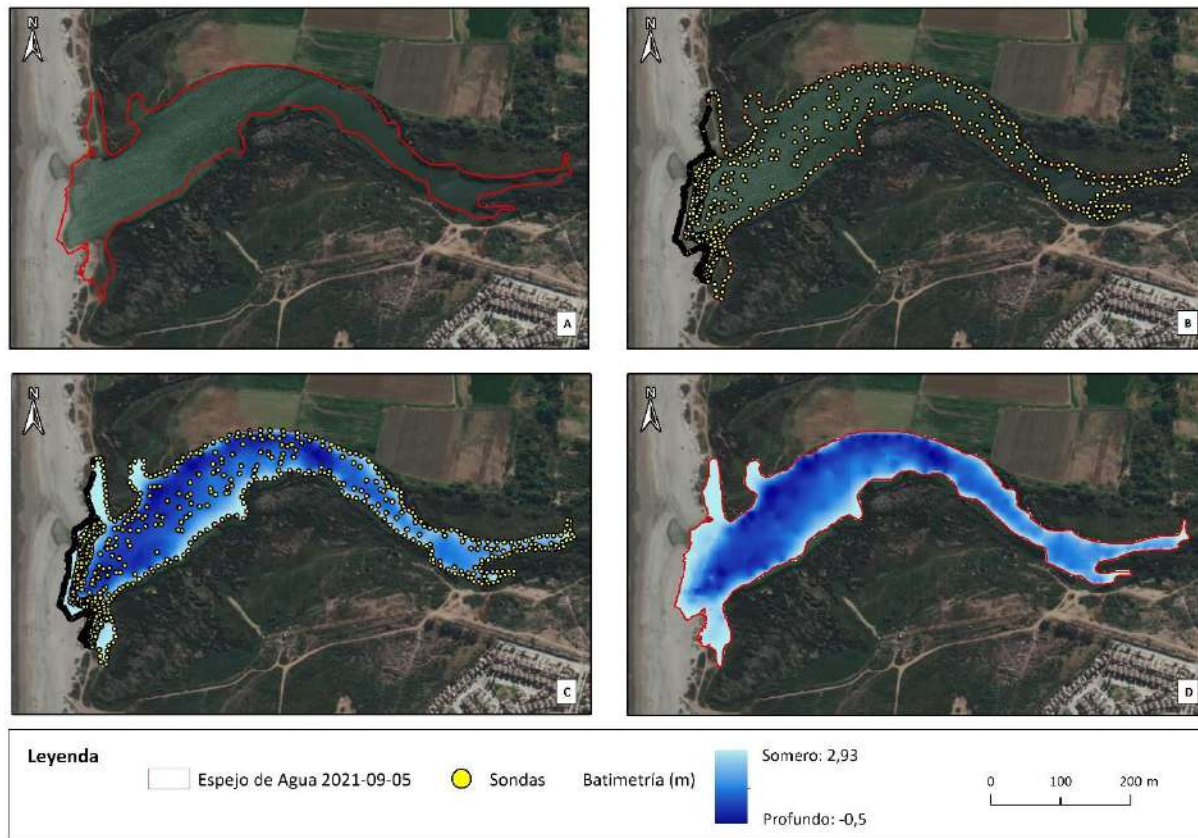


Figura 36: Batimetría preliminar levantada en la desembocadura del río Elqui. A) polígono de delimitación del cuerpo de agua el día de la medición; B) identificación de la posición de los puntos de medición batimétrica; C) identificación de la posición de los puntos de medición batimétrica e interpolación en escala de azules para todo el polígono del espejo de agua, y; D) interpolación en escala de azules para todo el polígono del espejo de agua. Fuente: Elaboración propia.

Los transectos para medir las variaciones espaciales del potencial de Hidrógeno (pH), oxígeno disuelto (ppm) y salinidad (PSU), otorgan indicios de vertidos de aguas menos salinas en varios puntos del humedal (Figura 37). También zonas donde el pH desciende a valores cercanos 7,5, y que son coincidentes con un lugar donde se detectó vertido de basuras. En el momento del monitoreo, el humedal no se encontraba estratificado, con una salinidad uniforme entorno a los 4 PSU. El pH en general fue bajo (7,9) en comparación a otros humedales, pero se encuentra en el rango de lo observado anteriormente en el sector debido, posiblemente, a las múltiples presiones agrícolas e inmobiliarias presentes en su ribera (Zuleta & Bravo 2020).

Con la cámara trampa y un sensor de presión de agua, se pudo constatar una influencia de la marea inferior a 2 cm al interior del humedal (Figura 38). Durante el desarrollo de la actividad realizada entre las 8h00AM y 20h00PM, resaltó la gran cantidad de tránsito de vehículos en la playa.

Al igual que lo estimado visualmente por Figueroa *et al.* (2021), el levantamiento topográfico revela que el espejo de agua del humedal se encuentra más alto que el nivel del mar, sin embargo, la barra que los separa es baja, con una cresta que solo se encuentra a 60 cm de altura con respecto a la cota de la última inundación marcada en la playa. Esto hace suponer ingresos de agua de mar durante el desarrollo de marejadas intensas y una conectividad vía aguas subterránea entre el mar y la laguna cuando la barra está cerrada (Figura 39).

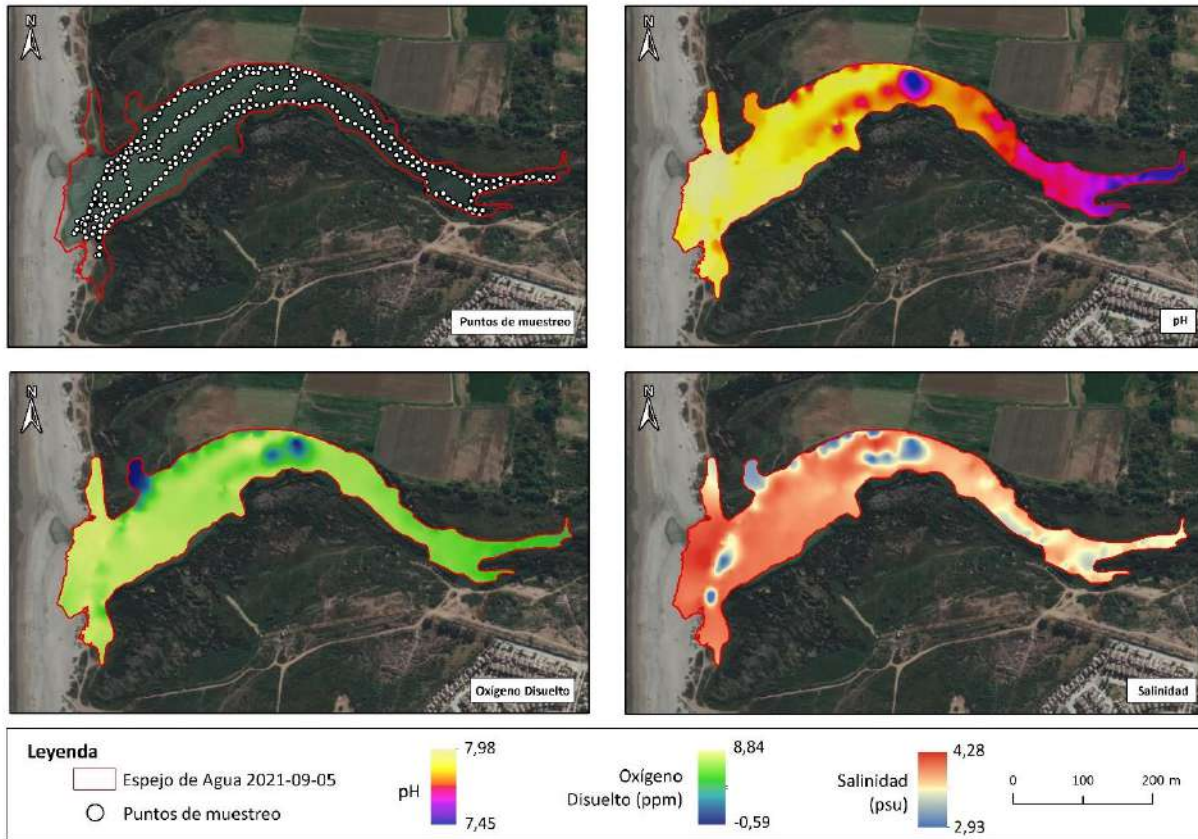


Figura 37: Transecto de parámetros fisicoquímicos del espejo de agua desembocadura del río Elqui. Se muestran los puntos de muestreo, potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto y salinidad. Fuente: Elaboración propia.



Figura 38: Imágenes de la cámara trampa instalada en la desembocadura del río Elqui. Fuente: Elaboración propia.



Figura 39: Topografía de la barra de arena de la desembocadura del río Elqui, referida al Nivel de Reducción de Sonda del Puerto de Coquimbo. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.2 Terreno Barra: 7 octubre 2021

Durante la tarde del 5 de octubre, el equipo consultor recibió un mensaje de uno de los lugareños de la desembocadura del río Elqui, informando que en la barra había aparecido un canal de comunicación con el mar, aparentemente profundizado con maquinaria. La contraparte acudió a la desembocadura del río Elqui el día 6 de octubre, en compañía de funcionarios de la Dirección General de Aguas y de la Gobernación Marítima de Coquimbo. En la visita, se constató la creación de una zanja para la evacuación del agua de la laguna costera que forma el río en su etapa terminal. En esta visita se estimó que la zanja estaría evacuando alrededor de 3lt/s. La zanja tenía una extensión, hasta la línea de más alta marea, de 53 m y un ancho variable de hasta 2 m. Al día siguiente se realiza un terreno en el lugar, constatando que la zanja se encontraba ya completamente cerrada (Figura 40).



Figura 40: A) Zanja abierta el día 5 de octubre. Fotografía: Rudy Vergara. B) Inspección de la zanja abierta realizada por la contraparte el día 6 de octubre. Fotografía: Carolina Vega. C) Estado de la barra cerrada el día 7 de octubre. Fotografía: Equipo consultor.

En este terreno se constató el retroceso de la ribera del humedal por el descenso de las aguas y se procedió a posicionar la nueva ribera con un GPS para comparar los cambios con respecto al levantamiento realizado en el mes de septiembre (Figura 41). Se estimó que el descenso fue de 15 cm, correspondientes a una pérdida de  $13.000\text{m}^3$ , lo que significa un promedio de vertido de 50 l/s (suponiendo 72 horas de apertura).

El estado del mar en el momento de observación (9h48 AM) era rizado con marea, llegando a la estoa de bajamar. Se aprecia la presencia de una pequeña trinchera o escarpe<sup>23</sup> en la playa en el lado sur del estuario que no se encontraba presente en el terreno del mes de septiembre. Se constata la presencia de dos perros, pescadores deportivos y huellas de tránsito de vehículos por la playa. Se registra la presencia de playero vuelvepedras (*Arenaria interpres*) y de cuervo del pantano (*Plegadis chihi*), especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN 2019 y MMA (2020).

<sup>23</sup> Cambio de la pendiente mayor a 45° dando la apariencia de un escalón o cambio de nivel de la playa.



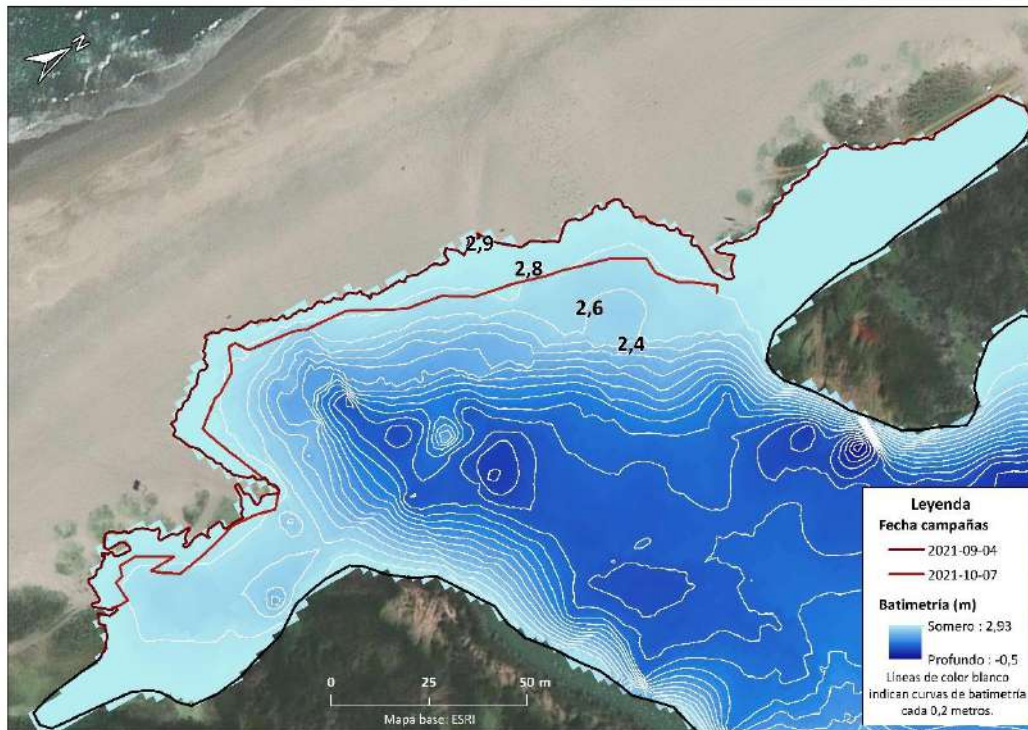


Figura 41: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 7 de octubre 2021. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.3 Terreno Barra: 29 octubre 2021

Este terreno se realizó a las 16h10 PM, cerca de la estoa de bajamar, con marejadilla<sup>24</sup>. Se constata que los accesos a la playa están cerrados y hay delimitaciones de advertencia de nidificaciones del pilpilén. Hay registro de playero vuelvepedras (*Arenaria interpres*), gaviota andina (*Chroicocephalus serranus*), gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*) y pilpilén común (*Haematopus palliatus*), especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN 2019 y MMA (2020).

Se avistan cuatro perros en el entorno de la desembocadura y la presencia de pescadores deportivos. El humedal no se encontraba conectado con el mar y la zanja de conexión aparece completamente cubierta. No hay rastros de sobrepasos ni conexiones desde la realización del terreno anterior. Como la barra ha permanecido cerrada, el agua inunda todos los bordes de la ladera norte, alcanza al camino que lo bordea y se acerca hasta la descarga de emergencias de Aguas del Valle en la parte superior. Sin embargo, la ribera vuelve nuevamente a retroceder (Figura 42), como consecuencia de la bajamar, adicionalmente es posible observar restos de un muelle y piedras esparcidas cercano al borde sur del humedal (Figura 43).

<sup>24</sup> Estado del mar similar al de la marejada, pero con olas de menor tamaño y fuerza.

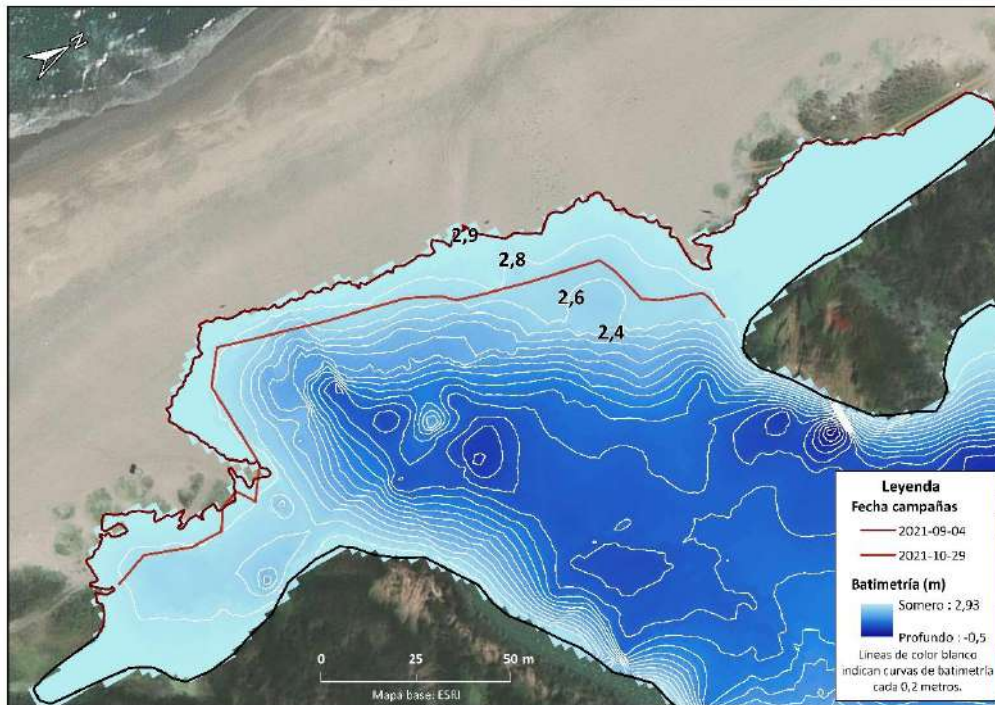


Figura 42: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 29 de octubre 2021. Fuente: Elaboración propia.



Figura 43: A) Vista al norte desde la desembocadura del río Elqui. B) Vista al sur desde la desembocadura. C) Lugar donde se encontraba la zanja en el terreno anterior. D) Restos de un muelle y piedras que aparecieron debido a la bajamar. Fotografías Equipo Consultor.

#### 4.5.4 Terreno Barra: 11 noviembre 2021

Se recorre la playa a las 16h15, hora cercana a la estoa de bajamar. Se percibe marejadilla. El humedal no se encuentra conectado y ya no hay evidencias de la zanja abierta en octubre. En el lado sur se aprecia una profundización de la zanja y evidencia de erosión por marejadas (Figura 44). La ribera de la desembocadura retrocede levemente con respecto al terreno anterior (Figura 45).



Figura 44: A) Estado de la zanja de la desembocadura completamente cerrada. B) Trinchera o escarpe presente en el lado sur de la desembocadura. Fotografías Equipo Consultor.

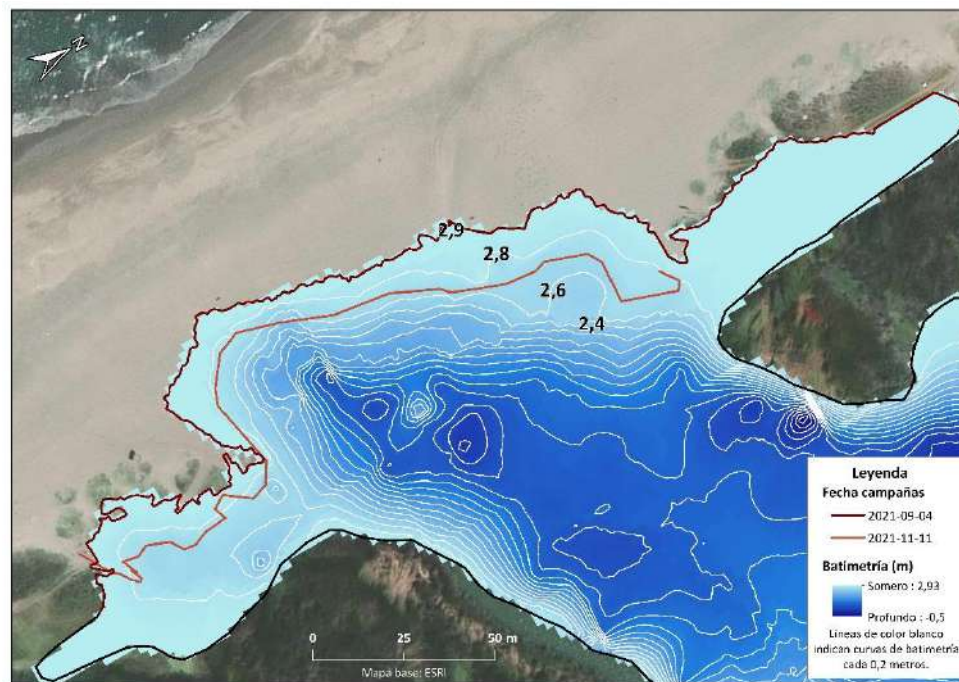


Figura 45: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 11 de noviembre 2021. Fuente: Elaboración propia.

Se registra la presencia de playero ártico (*Calidris canutus*), gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*), gaviotín sudamericano (*Sterna hirundinacea*), pilpilén común (*Haematopus palliatus*) y dos bandurrias (*Theristicus melanopus*), especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019) y MMA (2020). También se avistó varios ejemplares de gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*), especie catalogada como Vulnerable en Chile

(MMA 2020) y de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019). Se avistan dos perros y personas transitando en el sector (Figura 46).



Figura 46: A) Vista del sector norte de la desembocadura del humedal. B) Vista hacia el sur de la desembocadura del humedal. Fotografías Equipo Consultor.

#### 4.5.5 Terreno Barra: 21 noviembre 2021

Se inicia el recorrido de la playa a las 11h12. El mar se encontraba rizado y había señales de sobrepasos de hasta 10 m por sobre la línea de más alta marea por una marejada en los días previos (Figura 47A). La desembocadura no se encontraba conectada y al canal de conexión abierto recientemente había desaparecido (Figura 47B). Se observan delimitaciones de advertencia de nidificaciones del pilpilén en los relictos de duna (Figura 47C). El espejo de agua nuevamente disminuye con respecto al terreno anterior (Figura 48). Sin embargo, es posible observar que en la ribera nororiente de la desembocadura hay una anegación que alcanza hasta el camino que lo bordea y se acerca hasta la bomba de agua en la parte superior. Esta agua puede provenir de afloramientos del acuífero (Figura 47D).



Figura 47: A) Vista del sector norte de la desembocadura del humedal. B) Vista al sector sur. C) Vista sector suroriente, dunas de anidación de pilpilén demarcadas. D) Vista sector oriente, con señales de anegación. Fotografías Equipo Consultor.

Se observan rayadores (*Rynchops niger*), gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*) y pilpilén común (*Haematopus palliatus*), especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019) y MMA (2020). También se avistó varios ejemplares de gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*), especie catalogada como Vulnerable en Chile (MMA 2020) y de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019). No se observa tráfico de vehículos en la playa, pero si un aumento de las huellas de tráfico de vehículos debido a la ausencia del canal de conexión. Fue posible observar cuatro perros en las inmediaciones del humedal.

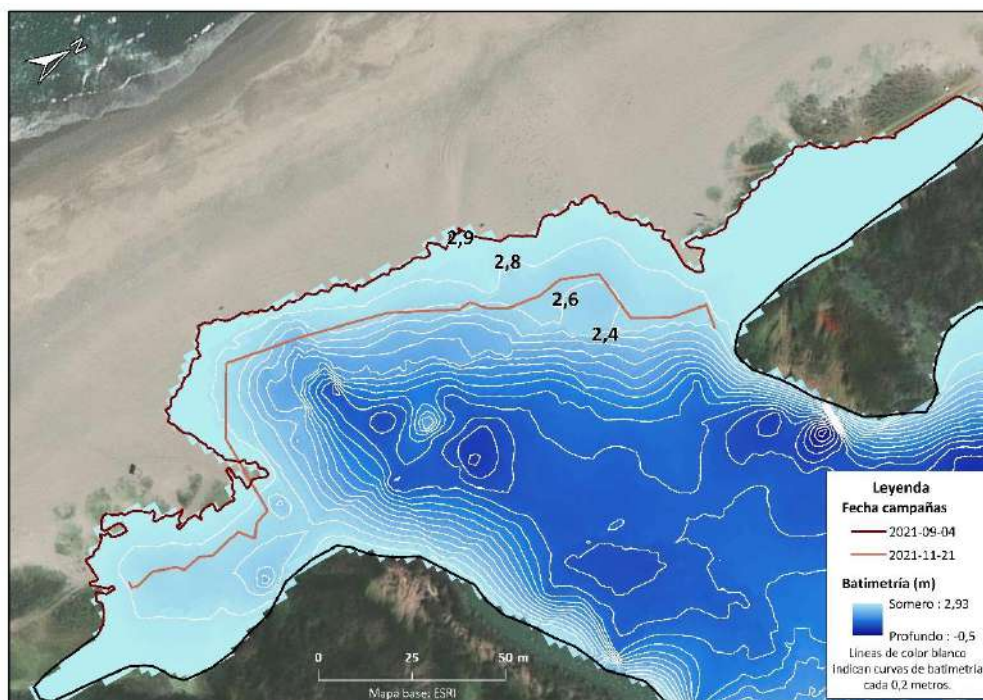


Figura 48: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 21 de noviembre 2021. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.6 Terreno Barra: 25 noviembre 2021

El terreno se realiza a las 17h15 cerca de la estoa de pleamar. El mar se encontraba rizado y no ocurrieron marejadas en los días previos. El humedal no estaba conectado y el canal seguía ausente (Figura 49A). Aun se aprecian las demarcaciones de advertencia de nidificación de pilpilén (Figura 49B). Nuevamente el espejo de agua del humedal retrocede con respecto al terreno anterior (Figura 50). Durante este terreno se observó el tráfico de 5 vehículos por la playa, restos de una fogata en la inmediación de la desembocadura, tres perros y una persona pescando lisas en el estuario (Figura 49C).

Se observaron rayadores (*Rynchops niger*), gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*), pilpilén común (*Haematopus palliatus*) y un vari (*Circus cinereus*) sobrevolando el pajonal del humedal; especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019) y MMA (2020). También se avistaron varios ejemplares de gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*), especie catalogada como Vulnerable en Chile (MMA 2020) y de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019).



Figura 49: A) Vista hacia el norte desde la desembocadura del río Elqui. B) Vista hacia el sur. C) Pescador al interior del humedal. Fotografías Equipo Consultor.

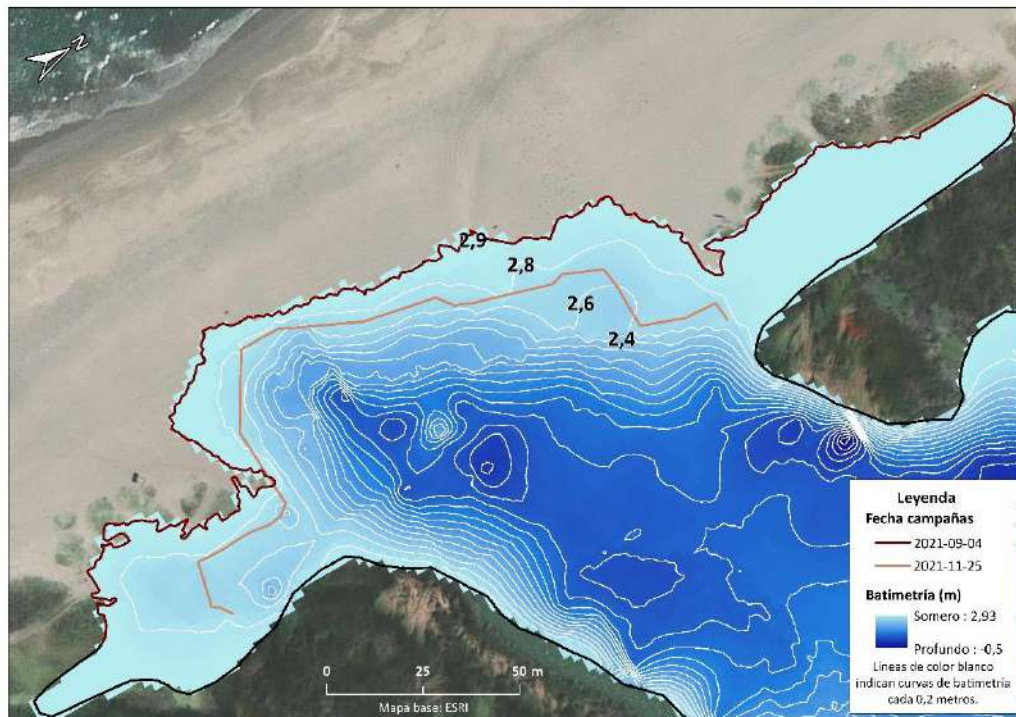


Figura 50: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 25 de noviembre 2021. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.7 Terreno Barra: 8 diciembre 2021

El terreno se realiza a las 11h50 en un día soleado y con mar rizada. Pese a que hubo una marejada en los días previos, no había señales de erosión en la desembocadura (Figura 51). El humedal no estaba conectado y el canal sigue ausente. El espejo de agua se mantuvo estable con respecto al terreno anterior (Figura 52). Se pudo apreciar el paso de 2 vehículos por la playa y varias personas realizando actividades en torno al humedal. Se observa un perro y restos de fogatas en la desembocadura. Se avistó pilpilén común (*Haematopus palliatus*) en el espejo de agua y anidando, especie catalogada como de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019) y MMA (2020). También se avistaron varios ejemplares de chorlo nevado (*Charadrius nivosus*) y gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*), especies catalogadas como Vulnerable en Chile (MMA 2020) y de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019).



Figura 51: A) Vista hacia el norte desde la desembocadura del río Elqui. B) Vista hacia el sur. Fotografías Equipo Consultor.

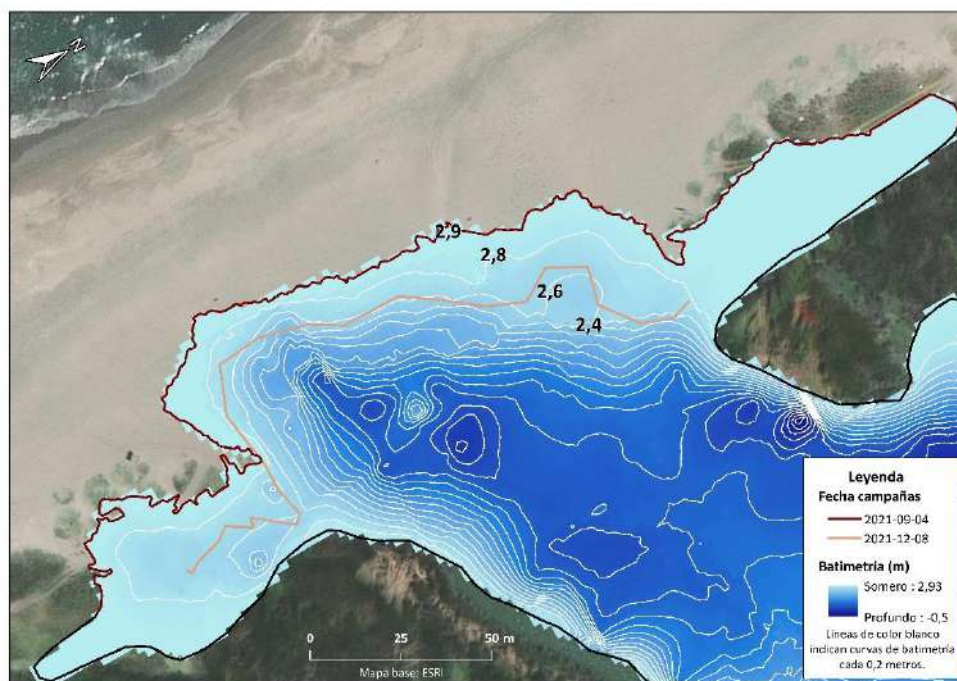


Figura 52: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 8 de diciembre 2021. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.8 Terreno Barra: 14 diciembre 2021

El terreno se realiza a las 19h30 con el mar rizado. El humedal no estaba conectado y no ocurrieron marejadas en los últimos días (Figura 53). El espejo de agua descendió con respecto al terreno anterior (Figura 54). Fue posible observar el tránsito de tres vehículos y dos perros en las inmediaciones de la desembocadura. Personas paseando, restos de fogatas y basura. Se avistaron gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*) y pilpilén común (*Haematopus palliatus*) con dos crías, especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019) y MMA (2020). También se avistaron varios ejemplares de gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*), especie catalogada como Vulnerable en Chile (MMA 2020) y de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019).



Figura 53: A) Vista hacia el norte desde la desembocadura del río Elqui. B) Vista hacia el sur. Fotografías Equipo Consultor.

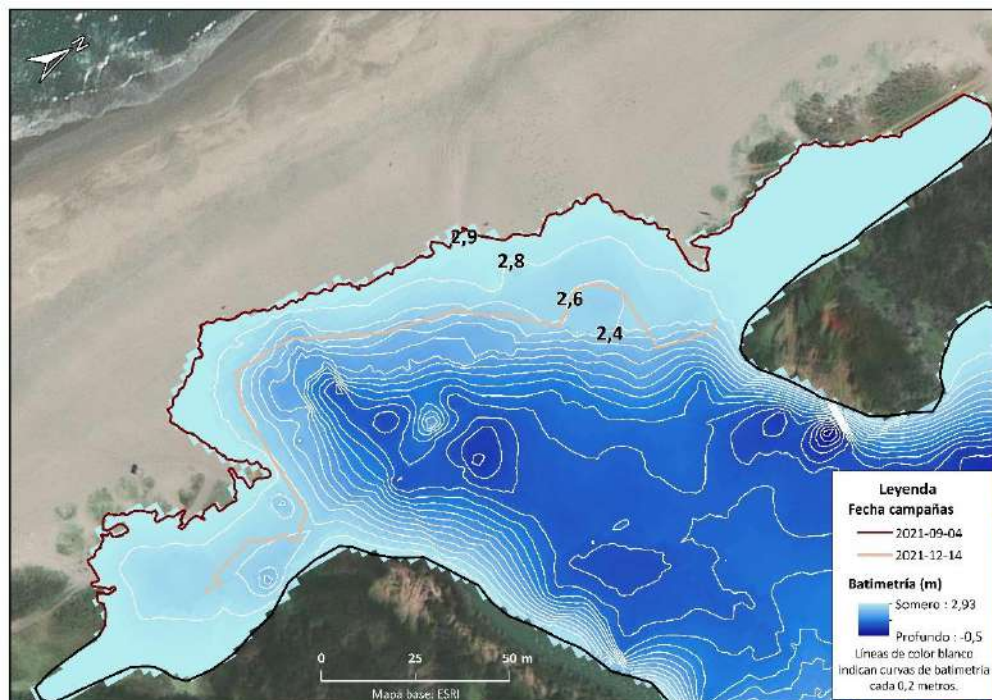


Figura 54: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 14 de diciembre 2021. Fuente: Elaboración propia.



#### 4.5.9 Terreno Barra: 30 diciembre 2021

El terreno se realizó a las 15h30 cerca de la estoa de bajamar con el mar rizado (Figura 55). El espejo de agua nuevamente desciende (Figura 56). Se observó gran cantidad de huellas de tránsito por la playa y un vehículo pasando. Dos perros en las inmediaciones de la desembocadura. Presencia de rayadores (*Rynchops niger*), gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*) y pilpilén común (*Haematopus palliatus*); especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019) y MMA (2020). También se avistaron varios ejemplares de gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*), especie catalogada como Vulnerable en Chile (MMA 2020) y de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019). Hay una gran concentración de gaviotas dominicanas (*Larus dominicanus*) alimentándose de una varazón de machas (*Mesodesma donacium*).



Figura 55: A) Vista hacia el norte desde la desembocadura del río Elqui. B) Vista hacia el sur. Fotografías Equipo Consultor.

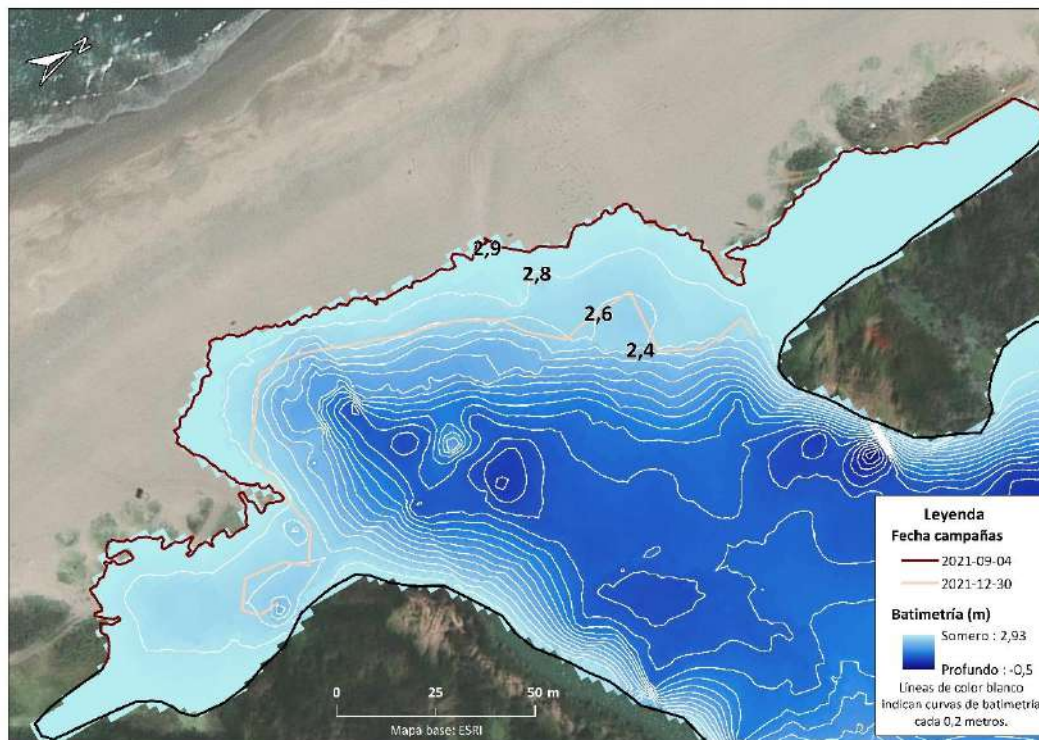


Figura 56: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 30 de diciembre 2021. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.10 Terreno Barra: 7 enero 2022

El terreno se realiza a las 15h40 cerca de la estoa de bajamar. El mar se encontraba rizado y no ocurrieron marejadas en los días anteriores. El humedal no estaba conectado y no hay señales del canal (Figura 57). El espejo de agua se mantiene prácticamente de la misma extensión con respecto al terreno anterior (Figura 58).



Figura 57: A) Vista hacia el norte desde la desembocadura del río Elqui. B) Vista hacia el sur. Fotografías Equipo Consultor.

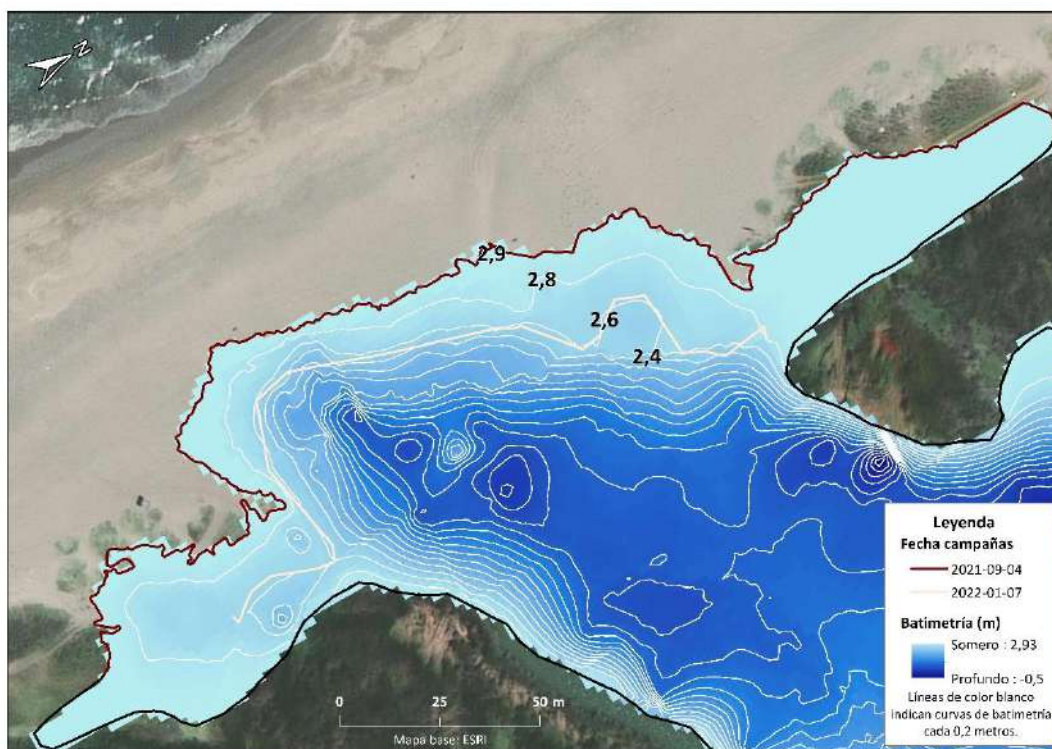


Figura 58: Comparación transectos posicionados con GPS de la ribera en la desembocadura del Río Elqui entre los terrenos del 4 septiembre y el del 7 de enero 2022. Fuente: Elaboración propia.

Se registraron rayadores (*Rynchops niger*), gaviota de Franklin (*Leucophaeus pipixcan*) y pilpilén común (*Haematopus palliatus*); especies catalogadas como de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019) y MMA (2020). También se avistaron varios ejemplares de gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*), especie catalogada como Vulnerable en Chile (MMA 2020) y de Preocupación Menor (LC) por IUCN (2019). En las inmediaciones de la desembocadura se

podieron avistar tres perros, el paso de 2 vehículos por la playa y mucha actividad de ocio en la ribera del humedal (Figura 59). Hay mayor presencia de basura y más residuos de fogatas en la playa.



Figura 59: Actividades recreativas realizadas en la ribera de la desembocadura del río Elqui. Fotografía equipo consultor.

#### 4.5.11 Terreno cobertura vegetal desembocadura: 17 febrero 2022

Para evaluar la densidad de la cobertura vegetal superficial del estuario del río Elqui, se estimó mediante parcelas de un metro cuadrado, la vegetación alta o pajonal (*Typha angustifolia*, totora) y la vegetación rala o arbustiva (*Tessaria absinthioides*, Brea) según las recomendaciones de Wildi (2013). El número de plantas se consideró desde el tallo principal a nivel del suelo (Figura 60). En cada unidad o parcela se determinó la cobertura superficial de plantas, contando el número de ejemplares y midiendo la altura de la planta desde el tallo principal a nivel del suelo (particularmente de los juncos), independientemente que tuvieran 2 o más ramificaciones aéreas o subterráneas. Para ello se dispusieron 4 parcelas de 1m<sup>2</sup> para cada tipo de vegetación, situados en lugares aleatorios, pero representativos de cada unidad vegetacional (Pajonal y Rala).



Figura 60: Terreno cobertura vegetal ribera humedal. A) Delimitación parcelas. B) Medición altura vegetación alta. C) Medición altura vegetación baja. D) Medición pajonal. Fuente: fotografías equipo consultor.

Tabla 7: Resultados terreno cubierta vegetal en la desembocadura del humedal de la desembocadura del río Elqui.  
Fuente: Elaboración propia,

Parcelas	Número Plantas	Altura (cm)
Parcela-1: Vegetación Rala	24	96
Parcela-1: Vegetación Rala	24	91
Parcela-1: Vegetación Rala	24	104
Parcela-1: Vegetación Rala	24	89
Parcela-1: Vegetación Rala	24	112
Parcela-1: Pajonal	14	228
Parcela-1: Pajonal	14	176
Parcela-1: Pajonal	14	188
Parcela-1: Pajonal	14	223
Parcela-1: Pajonal	14	195
Parcela-2: Vegetación Rala	11	81
Parcela-2: Vegetación Rala	11	72
Parcela-2: Vegetación Rala	11	148
Parcela-2: Vegetación Rala	11	132
Parcela-2: Vegetación Rala	11	96
Parcela-2: Pajonal	18	310
Parcela-2: Pajonal	18	228
Parcela-2: Pajonal	18	257
Parcela-2: Pajonal	18	296
Parcela-2: Pajonal	18	189
Parcela-3: Vegetación Rala	35	104
Parcela-3: Vegetación Rala	35	116
Parcela-3: Vegetación Rala	35	113
Parcela-3: Vegetación Rala	35	139
Parcela-3: Vegetación Rala	35	125
Parcela-3: Pajonal	64	188
Parcela-3: Pajonal	64	222
Parcela-3: Pajonal	64	203
Parcela-3: Pajonal	64	156
Parcela-3: Pajonal	64	287
Parcela-4: Vegetación Rala	42	99
Parcela-4: Vegetación Rala	42	84
Parcela-4: Vegetación Rala	42	98
Parcela-4: Vegetación Rala	42	75
Parcela-4: Vegetación Rala	42	64
Parcela-4: Pajonal	56	387
Parcela-4: Pajonal	56	400
Parcela-4: Pajonal	56	235
Parcela-4: Pajonal	56	310
Parcela-4: Pajonal	56	268

El número de plantas de la vegetación rala fue de 112 individuos y su altura promedio fue de 102 cm. La densidad de la vegetación rala alcanza a 11.2 ind/m<sup>2</sup>. Mientras que el número de plantas del pajonal fue de 152 individuos y su altura promedio fue 247,3 cm. La densidad del pajonal alcanza a 15,2 ind/m<sup>2</sup> (Tabla 7).

## 5 RESULTADOS POR OBJETIVOS

### 5.1 Resultados Actividades asociadas con el objetivo específico 1

Se reportan a continuación los resultados de las actividades asociadas para caracterizar el comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y sus subcuencas aportantes.

#### 5.1.1 Revisión Bibliográfica

##### 5.1.1.1 Clasificación de documentos

Se encontraron 432 documentos publicados entre 1953 y 2021 con información relativa a la cuenca del río Elqui, la desembocadura y el humedal costero que conforma. Estos documentos fueron seleccionados del amplio listado de estudios que los buscadores Google Scholar y Web of Science entregaron como resultado del uso de los términos de búsqueda empleados. Por ejemplo, sólo Google Scholar entrega 5.970 resultados al usar los términos “río Elqui”. Por lo tanto, del extenso listado de documentos que coincidieron con las búsquedas, se excluyeron todos aquellos estudios en donde no se pudo obtener información relevante tanto para la cuenca del río Elqui, así como para el río Elqui y su desembocadura. Los tipos de documentos revisados fueron:

- artículos científicos (48) publicados entre 1997 y 2021, en revistas nacionales (9) y extranjeras (39)
- capítulos de libros (4), de los cuales tres fueron publicados en Chile
- libros (3), de los cuales dos son nacionales
- informes técnicos (10)
- resúmenes de congresos científicos (2)
- tesis de pregrado (9), en su mayoría realizadas en dos universidades chilenas
- tesis de postgrado (2)
- otros documentos (16)

La desembocadura y el humedal costero del río Elqui han sido escasamente estudiados si se les compara con el conocimiento geológico, hidrológico y de otros temas abordados para la cuenca y el río Elqui. Mayoritariamente, los estudios se han concentrado en aspectos de contaminación del río Elqui, en sus distintos sectores, así como en el conocimiento de los acuíferos de la cuenca. También hay una importante data para la caracterización fluviométrica e hidrológica del río Elqui, la que se basa principalmente en informes técnicos provenientes de organismos públicos.

La desembocadura ha sido estudiada básicamente en aspectos ecológicos (e.g.: biodiversidad) y en contaminación. En este sentido, la investigación llevada a cabo por Rech *et al.* (2015) mostró que el río Elqui es el más contaminado en su desembocadura por basura (de origen plástico) y vertederos de basura (pequeños y grandes) entre 4 ríos de Chile (Elqui, Maipo, Maule y Biobío). El III Informe de la basura en ríos de los científicos de la basura (Ergas & Thiel 2022) revela que el río Elqui, se encuentra en la zona con mayores proyecciones de acumulaciones de basura por 10.000m<sup>2</sup> de ribera proyectados (alcanzando los 50 objetos).

El análisis de hotspot de las publicaciones encontradas (Tabla 8), revela que 4 publicaciones destacan por su relevancia (publicaciones científicas en revistas de alto impacto con revisión de pares) y antigüedad (publicadas en los últimos tres años). Dichas publicaciones son:

- Fernández *et al.* (2019): Damage assessment of the 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake in the North-Central Chile.
- Ganju (2019): Marshes Are the New Beaches: Integrating Sediment Transport into Restoration Planning
- Lazzus *et al.* (2020): Variability and forecasting of air temperature in Elqui Valley (Chile)
- Rossi *et al.* (2021): Assessment of a conservative mixing model for the evaluation of constituent behavior below river confluences, Elqui River Basin, Chile.
- Schmidt-Rhaesa *et al.* (2019): First report of marine Gastrotricha from Chilean beaches

Tabla 8: Análisis hotspot de las publicaciones encontradas y revisadas para la cuenca del río Elqui. Fuente: Elaboración propia.

		Antigüedad de la Fuente				
		1	2	3	4	5
Relevancia de la fuente	1	5	10	17	5	1
	2	1	1	6	1	1
	3	5	5	24	7	2
	4	2	5	5	8	4
	5	1	6	8	1	1

A continuación, se expone una síntesis de la información contenida en los principales documentos obtenidos en la revisión bibliográfica, cuya sistematización se encuentra en el Anexo 9.4.

#### 5.1.1.2 Composición fluvial de la cuenca del Río Elqui

La cuenca del Río Elqui es uno de los tres sistemas hidrográficos principales de la Región de Coquimbo. Con una extensión de 9825 km<sup>2</sup>, abarca el 27,9% del área total de la región. El Río Elqui escurre por una cuenca exorreica cuyo cauce tiene una longitud de 75 km desde la junta de sus dos tributarios principales (Niemeyer 1980). La forma de la red de drenaje de la cuenca del Río Elqui es de avenamiento dendrítico equidimensional y orientación general de oriente a poniente (Zuleta & Bravo 2020, Figura 61), con cauces afluentes que siguen los lineamientos de la tectónica regional (Contreras-López *et al.* 2019). El río Elqui tiene un caudal medio anual de 11,2 m<sup>3</sup>/s, medido en la estación fluviométrica Algarrobal. Registra 25.342 acciones de agua superficiales de tipo consuntivo y 22 derechos no consuntivos, lo que equivale a un caudal otorgado de 19.762 l/s y 32.245 l/s, respectivamente (DGA 2015). La diferencia del caudal medio entre la Entrada y Salida de la cuenca es de 8,1 a 1,0 m<sup>3</sup>/s (DGA 2004).

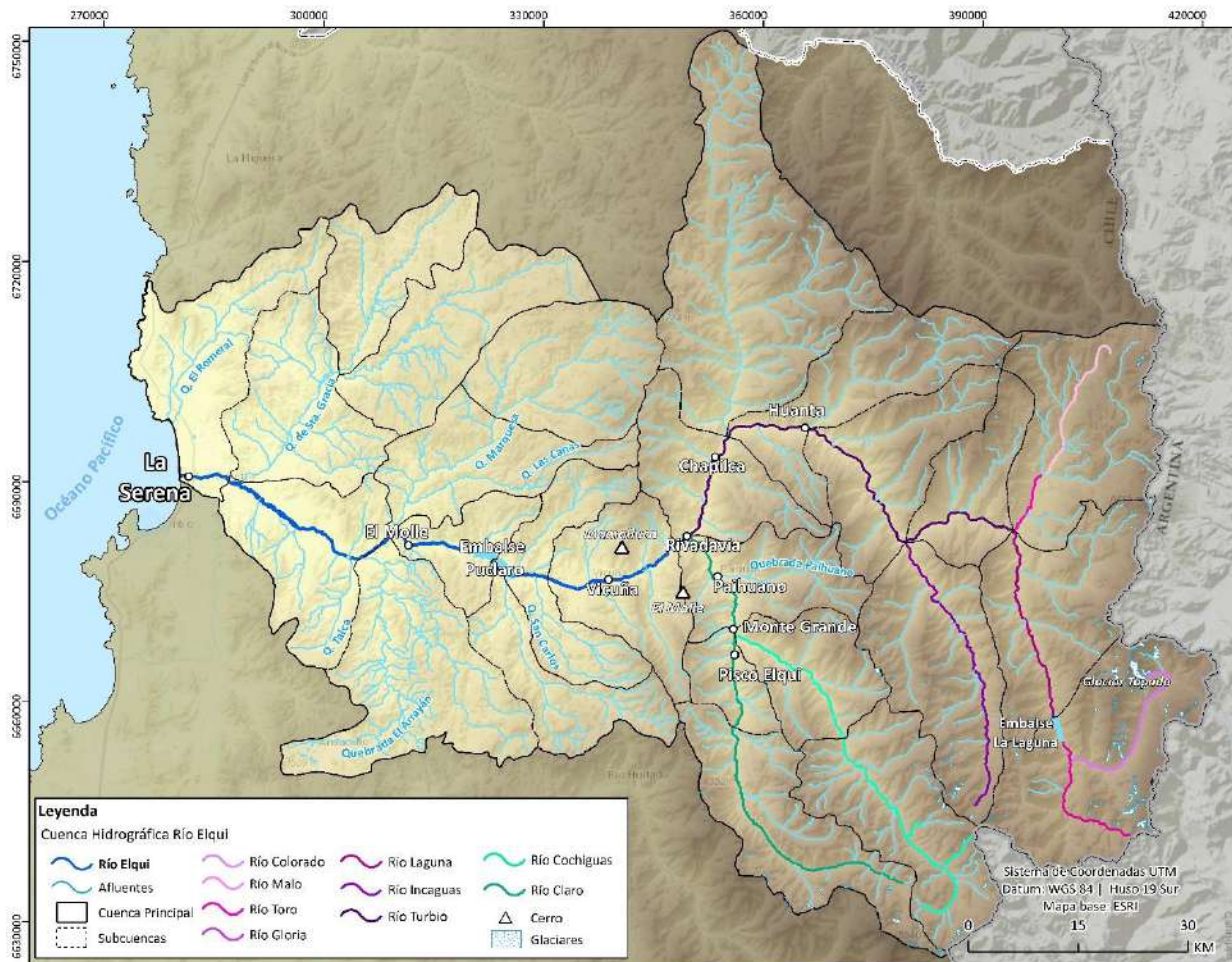


Figura 61: Mapa de la Cuenca Hidrográfica del Río Elqui, subcuencas y afluentes. Fuente: Elaboración propia a partir de BCN (2018), DIFROL (2021) & SUBDERE (2019).

Los principales cauces tributarios del Río Elqui son los ríos Turbio y Claro. Aguas abajo de la unión de dichos cauces se habla de Río Elqui; esta junta se ubica a 815 msnm, casi 2 km aguas arriba del poblado de Rivadavia y aproximadamente 75 km aguas arriba de la ciudad de La Serena (Zavala & Trigos 2019). Los principales cursos de agua de la cuenca del Río Turbio corresponden a los ríos Toro y La Laguna, los que se juntan a una altitud de 2.050 msnm, punto a partir del cual se lo denomina Río Turbio. Aguas abajo de dicho punto, el Río Incaguaz tributa al Río Turbio, lo que ocurre en el sector de Las Terneras y la Quebrada del Calvario, cuya cuenca posee respaldo principalmente pluvial (Zavala & Trigos 2019). A partir de esta junta, a la altitud de la localidad de Huanta, el Río Turbio toma rumbo norte-sur, que es la prolongación del rumbo que trae la quebrada tributaria del Calvario. Los ríos La Laguna, Toro e Incaguaz tienen un régimen marcadamente nival, lo que hace que el régimen hidrológico de escurrimiento de dichos cauces y del propio Río Turbio, sea de tipo permanente (Zavala & Trigos 2019). Estos cauces tienen su origen en el lado norte del área cordillerana de la cuenca, en los límites con Argentina. El Río Toro drena la zona nororiente y sus principales tributarios son el Estero Tambo, que cambia de denominación a Río Vacas Heladas, y los ríos Malo y Toro Muerto (Zavala & Trigos 2019). El Río La Laguna se ubica al sur de la cuenca del Río Toro. En uno de los cauces de cabecera de este río se ubica el glaciar El Tapado, el único glaciar blanco existente en el área (Zavala & Trigos 2019). Otros cauces tributarios del Río La Laguna son los ríos Colorado y La Gloria. Por su parte, las principales localidades ubicadas en la cuenca del Río Turbio son Huanta, Chapilca y Varillar, con poblaciones

humanas pequeñas. El desarrollo y explotación de recursos, la agricultura, la red de canales y la actividad turística son claramente más limitadas en esta cuenca que en la del Río Claro (Zavala & Trigos 2019).

El Río Claro se forma de la unión de los ríos Cochiguaz y Derecho en las cercanías de Montegrande, a 1.223 msnm. La subcuenca del Río Cochiguaz colinda con la subcuenca del Río La Laguna y su nacimiento es en la alta cordillera, en zonas vecinas a Argentina; su único afluente es el Río Cochiguaz (Zavala & Trigos 2019). El Río Derecho (o Claro-Derecho) limita al sur con la cuenca del Río Hurtado (subcuenca de la cuenca del Río Limarí). Además del principal aporte de origen nival, aguas abajo de Montegrande, el Río Claro recibe, como aporte a la Quebrada de Paihuano, a la altitud de la localidad del mismo nombre. Las principales localidades existentes al interior de la subcuenca del Río Claro son Pisco Elqui, Paihuano y Montegrande (Zavala & Trigos 2019). En la cuenca del Río Claro no existen embalses, solamente existe el proyecto Tranque Piuquenes en la parte alta del Río Derecho, cuya presa se ubicaría a ~3.000 msnm, con una cuenca aportante de 110,9 km<sup>2</sup> (Arrau del Canto 1997; MN Ingenieros 1999).

Finalmente, el Río Elqui desde Rivadavia a La Serena, se desarrolla casi en dirección Este-Oeste y prácticamente no recibe afluentes, salvo de algunas quebradas de considerable desarrollo, normalmente secas y que sólo le aportan agua en caso de lluvia directa en los años muy húmedos (Cabezas *et al.* 2007). Así, un área cercana a 3.900 km<sup>2</sup> del total de 9.302 km<sup>2</sup> de la cuenca, participa directamente del comportamiento hidrológico del Río Elqui, a tratarse de tierras bajas o que conforman el álveo del curso de agua. Por la ribera norte las dos quebradas más importantes son las quebradas Marquesa y Santa Gracia, que le caen en su curso medio e inferior, respectivamente. Por el sur recibe las quebradas San Carlos, Arrayán y Talca, aparte de otras menores (Niemeyer & Cereceda 1984). El cauce del Río Elqui cruza la ciudad de La Serena para desembocar, formando una pequeña laguna al Este de la conurbación. El régimen de propiedad de este humedal es privado y público (Figuroa *et al.* 2009). El origen del agua de la laguna proviene principalmente del Río Elqui, con aportes de escurrimiento pluvial, agua subterránea y agua marina en pleamar (DGA 2004). El estuario del Río Elqui, que al igual que los estuarios de la zona mediterránea de Chile central tiene su origen en la zona andina, debería permanecer abierto todo el año. Sin embargo, por regulaciones del cauce y del grado de embancamiento de la desembocadura, la laguna estuarina del Río Elqui presenta un comportamiento intermitente en la abertura de su barra (Stuardo *et al.* 1993).

### **5.1.1.3 La hidrología de la cuenca del Río Elqui**

La precipitación media anual de las cuencas alcanza a 222 mm/año y la disponibilidad de agua a unos 1.411 m<sup>3</sup>/hab/año (FAO 2000). Las precipitaciones medias anuales de la cuenca del Río Elqui se ubican en el rango de los 60 a los 170 mm/año, con una tendencia hacia una mayor precipitación a mayor altitud (Zavala & Trigos 2009). Igualmente, se observa en todas las estaciones que la precipitación media de la cuenca es mayor que la precipitación con probabilidad de excedencia 50%, es decir, la mediana. Esto se debe al efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones (Zavala & Trigos 2009). Puesto que la cuenca del Río Elqui no recibe, a la fecha ni en ninguna época, trasvase de aguas desde otras cuencas vecinas, ni existen sistemas de desalinización en la zona, todas las actividades desarrolladas se realizan con el aporte de agua que proveen las precipitaciones, de por sí escasas y variables entre años (Zavala & Trigos 2009). Esto implica acentuadas variabilidades en el régimen de escorrentía superficial de los cauces naturales, existiendo años secos proclives a generar sequías, así como años con elevadas precipitaciones. La DGA concluye que "todas las estaciones fluviométricas muestran un régimen nival y presentan sus menores caudales en el mismo período". Luego continúa, este régimen "Corresponde íntegramente a toda la hoya hidrográfica del río Elqui, incluyendo sus principales afluentes: río Claro, estero Derecho, río Cochiguaz, río Turbio, río La Laguna y río Del Toro (DGA 2004). En todos estos cauces se observa un régimen nival, con los mayores caudales entre noviembre y febrero, en años húmedos. En años secos los caudales tienden a ser más uniformes, sin mostrar variaciones estacionales importantes. El período de estiaje ocurre en meses de invierno, en el trimestre dado por junio, julio y



agosto (DGA 2004, Zavala & Trigos 2008). Los años lluviosos recargan los sistemas hídricos, pero son proclives a experimentar crecidas y aluviones frecuentes (Pérez *et al.* 2009).

Dentro de la cuenca del Elqui se distinguen 6 sectores hidrogeológicos de aguas subterráneas, que suman un almacenamiento total de 134,7 millones de m<sup>3</sup>, con caudales subterráneos que llegan hasta los 0,24 m<sup>3</sup>/s (Sacha *et al.* 2005). En la cuenca alta del Río Turbio, cerca del límite con Argentina, se construyó el embalse Laguna, destinado a regular las aguas del Elqui. En su curso medio y bajo recibe las aguas de alguna vertiente, cuyo aporte va desde unos pocos litros por segundo hasta más de 200 l/s. Las aguas de este río, que desemboca en el Pacífico a un costado de la ciudad de La Serena (Contreras-López *et al.* 2019), son principalmente de origen nival y sus caudales máximos ocurren en verano por efecto del deshielo.

En la parte alta de la cuenca, destaca la presencia del glaciar El Tapado (Zavala & Trigos 2019). Este glaciar tiene una superficie de 3,6 km<sup>2</sup> y está ubicado en la parte alta de la subcuenca del Río La Laguna. Desde el punto de vista hidrológico, su principal importancia tiene que ver con la capacidad de almacenamiento de agua (Ginot *et al.* 2006).

La permeabilidad de la cuenca alta es muy baja debido a la existencia de rocas metamórficas y sedimentarias, volcánicas, plutónicas e hipabisales del período paleozoico, motivo por el cual el escurrimiento subterráneo ocurre paralelo a los cauces (DGA 2004). Destacan claramente tres escurrimientos: uno en dirección ESW (este-sureste) paralelo al río Turbio hasta el poblado de Rivadavia con una profundidad promedio de 45 m y productividad de 50 m<sup>3</sup>/h/m (Contreras-López *et al.* 2019). Este acuífero escurre a través de rocas de permeabilidad muy baja encauzándose paralelo al río Turbio. En dirección Sur a Norte por un lecho de rocas plutónicas, escurren aguas subterráneas paralelas al Río Claro o Derecho hasta la confluencia con el Río Turbio en Rivadavia (DGA 2004).

Desde Rivadavia hasta la desembocadura del Río Elqui en La Serena, el acuífero escurre en dirección W (oeste) por depósitos no consolidados o rellenos, con profundidades freáticas que varían de los 17 a los 3 m, encajonados por rocas sedimentario-volcánicas de muy baja productividad (Contreras-López *et al.* 2019). En este sector, el acuífero freático se extiende ininterrumpidamente a lo largo de todo el valle, sólo mostrando un leve grado de confinamiento en el sector terminal (La Serena). Dicho acuífero presenta valores de transmisividad variables entre 4.200 y 100 m<sup>2</sup>/día, estimándose como valor medio unos 500 m<sup>2</sup>/día. Existe un último acuífero que escurre en dirección norte-suroeste, paralelo a la Cordillera de la Costa por rocas volcánico-sedimentarias del período Cretácico, para juntarse al flujo subterráneo principal en las cercanías de La Serena (DGA 2004).

En el sector del nacimiento del Río Elqui (confluencia de los ríos Claro y Turbio) la precordillera andina presenta importantes alturas, destacando el Cerro Mamalluca (2.330 msnm) por el norte y el Cerro El Molle (2.630 msnm) por el sur del Río Elqui. Desde el sector de Paihuano hasta la desembocadura en La Serena, el Río Elqui posee un curso general de tipo recto y escurrimiento en sentido Oriente-Poniente (DGA 2004a). En el tramo final del río (desde el sector de El Molle hasta su desembocadura en el mar), el cauce principal presenta escurrimiento de tipo anastomosado y valles con mayores amplitudes, cuyo material de sedimentación fluvial ha originado amplias terrazas laterales de significativa importancia humana y económica para el área (Contreras-López *et al.* 2019). Estas terrazas se encuentran claramente desarrolladas a unos 25 km río arriba de la desembocadura el nivel superior tiene unos 30 m de altitud en sus inicios, disminuyendo en dirección al mar con una pendiente de 7%, hasta alcanzar unos 120 a 130 m cerca de la desembocadura. Las diferencias de altitud en el valle transversal oscilan entre los 700 m por el norte del cauce principal de la cuenca y 260 m por el sur de este mismo curso fluvial (DGA 2004).

Varios trabajos han establecido una relación entre años El Niño y el aumento de las precipitaciones, y la disminución de éstas con el evento de La Niña (revisión en Zavala & Trigos 2009). Para el caso de la cuenca del Río Elqui,

considerando todos los eventos como independientes, se tuvo, en el período 1950-1996, 15 eventos de El Niño y 10 eventos de La Niña, con un promedio de 11,8 meses y 13,3 meses, respectivamente (Zavala & Trigos 2009). Si se agrupan eventos por su cercanía temporal entre ellos, se tiene para el mismo período, un total de 14 eventos de El Niño y 8 eventos de La Niña, con un promedio de 12,9 meses y 15,8 meses, respectivamente (Zavala & Trigos 2009). Independientemente de la duración de los eventos, La Niña tiene una mayor duración e impacto, dada las características del régimen pluviométrico de la cuenca (i.e., pocos eventos de precipitación al año, tanto en años secos como lluviosos).

En los años húmedos, las mayores precipitaciones permiten la recarga del sistema y la generación de crecidas, las que pueden ser catastróficas cuando alcanzan niveles peligrosos (Pérez *et al.* 2009), aunque del total de años El Niño (i.e., 21 años), sólo en la mitad de ellos (10) se tiene año húmedo (Zavala & Trigos 2009). En ambos casos la duración del evento de El Niño no es relevante, pero sí lo es la cantidad de agua caída. Por otro parte, es irrelevante que los cambios en la temperatura en el Océano Pacífico se extiendan por un período mayor, dado que la época de lluvias en la cuenca es entre abril y septiembre (6 meses), a lo máximo ocho meses (marzo a octubre). Una situación distinta ocurre con el evento de La Niña, donde la duración es un punto relevante, la cual se asocia a precipitaciones bajas y riesgo de sequía. Aun así, se observa que, del total de 14 años, en aproximadamente la mitad de ellos (6), se tuvo año seco (Zavala & Trigos 2009). Por lo tanto, dependiendo de la duración de la condición de precipitación baja y de cuánto disminuye ésta, se puede estar o no efectivamente en condición de sequía.

#### **5.1.1.4 Los riesgos naturales en la cuenca del Río Elqui**

En su dimensión natural, los tipos de riesgos biogeofísicos y las fuentes de vulnerabilidad están asociados principalmente a las condiciones climáticas, fisiográficas y ecológicas de la cuenca (Cepeda *et al.* 2009b). Entre las climáticas se encuentran la baja pluviometría anual (~120 mm de promedio), su gran variabilidad interanual (coeficiente de irregularidad ~2,5) y la dinámica hidrológica (Zavala & Trigos 2009). Esta condición no sólo está sujeta a la precipitación líquida, mayoritariamente invernal, sino también al deshielo y a las incursiones de El Niño (Zavala & Trigos 2009). Adicionalmente, la insolación de la cuenca es elevada. Por ejemplo, el índice UV-B a la altitud de La Serena, al mediodía de verano, muestra valores sobre 6, correspondiente a riesgo extremo para seres humanos (MeteoChile 2007). Dado la transparencia de la atmósfera, la insolación tiende a aumentar hacia la media y alta montaña (Fiebig-Wittmaack *et al.* 2009). Finalmente, la desertificación es moderada y sigue una tendencia progresiva en algunos sectores de la cuenca (CONAF 1999).

Históricamente, en la cuenca del río Elqui se han desencadenado flujos aluvionales y remociones en masa, los cuales han afectado asentamientos humanos, carreteras e infraestructura esencial. Así, entre 1900 y 1981 ocurrieron 522 eventos de inundación en la Región de Coquimbo, 373 de ellos en la cuenca del Elqui. Posteriormente, los temporales de 1997 -año de ocurrencia del evento ENOS más intenso del siglo XX- causaron aludes e inundaciones que fueron producto de las crecidas de algunas de las quebradas que conforman la cuenca del Elqui, como la bajada de la Quebrada Santa Gracia, en la localidad de Islón, y el alud en el sector de El Almendral (Pérez *et al.* 2009). Por otra parte, los principales cauces con recurrencia de eventos de aluviones son la Quebrada la Marquesa, río Elqui, río Turbio, río Claro o Derecho y Río Cochiguaz (Aguas Consultores SpA 2029). De los eventos ocurridos destaca el aluvión de 18 de junio de 1997, el cual destruyó completamente el pueblo El Almendral, generando 2 fallecidos y 140 albergados. Entre el 24 al 26 de marzo de 2015 se generó, por otra parte, una serie de aluviones que afectaron a gran parte de los poblados de la cuenca. Este evento se gatilló por el cambio en la isoterma 0°C, generando que en sectores donde habitualmente precipita nieve, precipitara agua líquida. Los cauces afectados correspondieron a la Quebrada Marquesa, río Elqui, río Cochiguaz y río Turbio, todos estos cauces aguas arriba del embalse Puclaro (Aguas

Consultores SpA 2029). Un evento similar se volvió a generar 2 años después, afectando a los mismos cauces antes mencionados.

Las condiciones fisiográficas de la cuenca son complejas, particularmente en su sección superior. Por ejemplo, su pendiente promedio es pronunciada (~1%), cambiando, en menos de 150 km lineales de territorio, desde el nivel del mar (hito El Faro de La Serena) hasta los 4.780 msnm (hito cruce fronterizo del Agua Negra), con algunos cerros en el límite con Argentina que bordean los 6.300 msnm (Cepeda *et al.* 2009a). Esto facilita la remoción de masas, aludes de barro, rastrojos e inundaciones frecuentes (Pérez *et al.* 2009). El paisaje está dominado por cerros de diferente altura, complejidad y energía potencial gravitacional. La mayoría de los valles son estrechos y están encajonados por cerros altos y de pendientes pronunciadas. La mayor parte de los suelos, con excepción de los valles principales, tiene un desarrollo incipiente y poseen baja cobertura vegetal, por lo que son vulnerables a la acción del agua y del viento, lo cual se agrava como consecuencia de los impactos de fenómenos telúricos y del ENOS (Cepeda *et al.* 2009b). La topografía y la geología son heterogéneas (Cabezas *et al.* 2007). Los cursos de agua, particularmente aquellos de la media y alta montaña, son rápidos, poseen una fuerza erosiva elevada, y descienden cargados de sales minerales y sedimentos (e.g. ríos Turbio y Malo) (Zavala & Trigos 2009).

#### **5.1.1.5 Los usos de la cuenca del Río Elqui**

La estructura de consumo de cada cuenca (agrícola, agua potable, industria, minería y forestal) modifican los aportes naturales y el balance hídrico de cada humedal (Contreras-López *et al.* 2019). Así, la agricultura y la minería explican el principal consumo de agua de la cuenca del Elqui, con un 6.09 y 0.60 m<sup>3</sup>/s, lo que representa un 87.4 y 8.6 % del caudal, respectivamente (Contreras-López *et al.* 2019). En la cuenca de Elqui se registran 279 explotaciones con actividad frutícola, en un total de 6.530 hectáreas de los 9.302 km<sup>2</sup> del área total de la cuenca. El 46% de las explotaciones en la cuenca tiene entre 5 y 50 hectáreas, agrupando el 16% de la superficie, mientras que el 22% de las explotaciones supera las 50 hectáreas y concentra el 82% de la superficie (FIA 2020). Utilizando procesamiento de imágenes satelitales y de terreno, se identificaron alrededor de 68.411 hectáreas cultivadas en las principales cuencas de la Región de Coquimbo (ULS-PROMMRA 2017), presentando la cuenca del Río Elqui una superficie de aproximadamente 17.278 hectáreas cultivadas. Así, los cultivos que presentan las mayores extensiones superficiales en la cuenca del Río Elqui corresponden a vid de mesa, mandarinas, limones y paltos, con unas 4.800, 2.304, 1.816 y 1.539 ha plantadas, respectivamente (ULS-PROMMRA 2017).

La administración de los canales y derechos de agua de la totalidad de la cuenca del Río Elqui está conformada por tres asociaciones: la Junta de Vigilancia del Río Elqui, Junta de Vigilancia del Estero Derecho y los Regantes de Río Claro y Cochiguaz (DGA 2012). La Junta de Vigilancia del Río Elqui que administra todos los recursos hídricos de la cuenca y tiene potestad sobre todos los canales, salvo aquellos ubicados en las subcuencas del Río Derecho y de la Quebrada Paihuano, las que poseen autoridad sobre el manejo interno de sus recursos hídricos y que no están obligadas a entregar flujos aguas abajo (Zavala & Trigos 2009, DGA 2012). Independientemente del año hidrológico (i.e. húmedo, medio o seco), las precipitaciones se concentran durante la época de otoño e invierno (Zavala & Trigos 2009). Por otro lado, los mayores requerimientos hídricos ocurren en los meses de mayor calor (i.e. primavera y verano), esto a contrapelo del régimen de precipitaciones. Cada una de estas problemáticas lleva a que el sistema hídrico tenga diversas fuentes de fragilidad y que por ello el manejo hídrico sea crucial tanto para la sustentabilidad como para la planificación y gestión del recurso. Por otra parte, el río Elqui tiene caudales medios mínimos de 3,11 m<sup>3</sup>/s en octubre (DGA 2013), lo que explica que su desembocadura ha permanecido cerrada la mayor parte del año (Contreras-López *et al.* 2019).

La actividad agrícola se restringe notoriamente a zonas cercanas al cauce del Río Elqui. Al analizar la información recopilada, se observa que entre 1996 y 2007 aproximadamente el 40% del área cultivada de la cuenca se ubica en la comuna de La Serena, es decir, aguas abajo del embalse (Aguas Consultores SpA 2020). En este periodo, se observa un incremento de la superficie agrícola del 8% en las comunas de La Serena y Vicuña, lo que se explica por la seguridad de riego que aporta el embalse. Por otro lado, en Coquimbo se observa un aumento del 17%. A pesar de lo anterior, en el año 2019 la superficie total disminuye en relación con el año 1996 y 2007, llegando en las comunas de La Serena y Coquimbo al 47% y 50% de lo observado en 2007, respectivamente. Lo anterior podría explicarse tanto por la sequía que se mantiene desde el año 2010 como por la conversión de zonas agrícolas a zonas urbanas. En Paihuano sólo se observa una disminución del 4% (Aguas Consultores SpA 2020). La actividad agrícola descrita anteriormente genera extracciones de agua desde el río, ya sea de manera directa o a través del sistema relacionado al embalse Puclaro. Lo anterior también genera cambios en la capacidad de transporte de sedimento debido a la disminución de los caudales y su capacidad de transporte. En el presente estudio esta información se integra al analizar las estaciones Río Elqui en Algarrobal, Río Elqui en Almendral y Río Elqui en La Serena, las cuales permiten realizar una comparación entre lo registrado aguas arriba y aguas abajo del embalse, así como en la desembocadura (Aguas Consultores SpA 2020).

#### **5.1.1.6 La infraestructura hidráulica del Río Elqui**

La infraestructura del sistema hídrico de la cuenca del Río Elqui está formada por una extensa red de canales y dos embalses conectados entre sí: La Laguna y Puclaro. La Laguna fue el primer embalse construido para el riego en la provincia de Elqui, en el año 1929. Se ubica a 3.130 msnm, en la localidad de La Estancia. Se alimenta del río La Laguna, afluente del río Turbio. Una vez contenida, el agua es liberada para alimentar al río Elqui, del cual la toman los canales derivados. En la actualidad, posee la capacidad de embalsar aproximadamente 40 millones de m<sup>3</sup> de agua, que con la operación conjunta del embalse Puclaro son capaces de regar una superficie del orden de 18 mil hectáreas (FIA 2020).

El embalse Puclaro, ubicado a unos 50 km al oriente de la ciudad de La Serena y a 500 msnm, fue construido en el año 2000, con el propósito de retener los recursos hídricos que escurren sin uso libremente hasta el mar y regular las cuencas ante la importante irregularidad de precipitaciones. Su localización aprovecha la angostura de la zona de Puclaro y sus características geológicas y estratégicas. La zona de inundación tiene 760 hectáreas, con longitud máxima de 7 km, y abarcó las localidades de Manchigue y Gualiguica, incluidas las bocatomas de los canales del mismo nombre y los canales Puclaro y Polvada, además de parte del sector de Punta Azul. Tiene una capacidad útil de 200 millones de m<sup>3</sup>, con una capacidad máxima de vertido de 2.300 m<sup>3</sup>/s, capaz de absorber una crecida afluente de 2.500 m<sup>3</sup>/s. Esta obra es íntegramente revestida. Su puesta en marcha significó duplicar el área regada. Por otra parte, desde el año 2008 opera la Hidroeléctrica Puclaro, que durante años produjo en promedio 30 millones de kilowatt/hora de electricidad, de los cuales 23 KV eran inyectados a la red de distribución de CONAFE, abasteciendo cerca de 12 mil viviendas (INDAP 2008, FIA 2020). Actualmente esta central no se encuentra en operaciones, entre otros factores, debido a la escasa agua presente.

En síntesis, dadas las características biogeofísicas de la cuenca del Elqui, esta es una de las más vulnerables de la Región de Coquimbo, dada la ocurrencia de una serie de eventos naturales que son fuente de riesgo y alteración frecuentes para las comunidades naturales y humanas de la cuenca, entre las que destacan: 1) eventos meteorológicos (e.g. aguaceros, sequía, inundaciones), 2) eventos geomorfológicos (e.g. avalanchas, aludes, crecidas de barro), 3) eventos biológicos y ecosistémicos (desertificación, ratadas), y otros eventos (e.g., incendios, tsunamis, terremotos, derrumbes y arrastres de relaves mineros) (Cepeda-Pizarro *et al.* 2009b, Salas *et al.* 2012). Los análisis climáticos indican que la precipitación en Chile central sigue una tendencia secular decreciente y las simulaciones

recientes de escenarios futuros pronostican: 1) un aumento de la temperatura del aire (máximas y mínimas), 2) una reducción del área andina capaz de almacenar nieve debido al desplazamiento en altitud de la línea de nieve, 3) crecidas invernales de los ríos con cabecera andina, y 4) una disminución creciente de la precipitación, particularmente la invernal (Cepeda-Pizarro *et al.* 2009b). Los análisis de series locales de tiempo sobre el comportamiento de la temperatura del aire, la precipitación y los caudales de los ríos coinciden con estos pronósticos (Vargas-Baecheler 2017).

#### **5.1.1.7 La fauna de la cuenca del Río Elqui**

En esta subsección se revisa la fauna en toda la extensión de la cuenca, ampliando la revisión realizada por Figueroa *et al.* (2021), quienes revisan la fauna presente a una escala geográfica del área delimitada para humedal. La cuenca del Río Elqui presenta una riqueza taxonómica de artrópodos de al menos 16 órdenes, 73 familias, 104 géneros y 129 especies, de las cuales 105 son insectos. Por su parte, los vertebrados tienen 25 órdenes, 60 familias, 140 géneros y 209 especies. El taxón más diverso de la cuenca es Aves, con 17 órdenes, 41 familias, 113 géneros y 169 especies. La riqueza de mamíferos y reptiles es intermedia. En cambio, Amphibia tiene la menor riqueza, con 2 familias, 2 géneros y 3 especies (Zuleta *et al.* 2009). La riqueza filética de artrópodos y vertebrados disminuye con la altitud, lo cual concuerda con lo documentado en la literatura y con la mayor severidad del ambiente en la alta montaña. Por ejemplo, la desembocadura del Río Elqui tiene un 60% de los vertebrados del valle, mientras que la vega altoandina Tambo-Puquíos, la cual se encuentra en el sector conocido como Cordillera de Doña Ana a unos 3.800 msnm (Cepeda *et al.* 2009), tiene alrededor de 20% de las aves y mamíferos, y solo un 7% de los reptiles del Valle del Elqui (Zuleta *et al.* 2009).

Los eventos ecosistémicos más relevantes corresponden a la desertificación de algunos sectores esteparios de la media y baja montaña, y en los últimos años, la extensión de sectores cultivados, particularmente viñedos y parronales, hacia laderas de cerros circundantes a los valles (Cepeda *et al.* 2009b). Documentos y la memoria de la gente local muestran que los principales eventos biológicos que han ocurrido en la cuenca corresponden a ratadas, brotes de algunas especies de ácaros e insectos (Pérez *et al.* 2009) y la presencia de zoonosis latentes (Pizarro *et al.* 2009; Alfaro *et al.* 2011, Alcayaga *et al.* 2013). Así, uno de los primeros trabajos sobre irrupciones poblacionales (plagas) ocurridas en la Región de Coquimbo se refiere precisamente a las ratadas. Éstas ocurrieron en los pisos inferiores de la cuenca de Elqui (e.g. Ceres y Colonia Alfalfares) en los años 1972 y 1973 (Péfaur *et al.* 1979). Las especies nativas involucradas fueron *Oligoryzomys longicaudatus*, *Phyllotis darwini*, *Abrothrix olivaceus* y *Octodon degus*, y en menor medida los mурidos *Mus musculus* y *Rattus rattus* (Pérez *et al.* 2009). Estas ratadas, de 1.710-1.802 individuos por hectárea, causaron serios daños a los cultivos y provocaron alarma pública en los poblados rurales del sector, lo que desencadenó una serie de medidas de control de parte de las agencias estatales. Desde entonces, no hay antecedentes de ratadas de esta magnitud en el área. La ocurrencia de ratadas ha sido relacionada con factores climáticos, particularmente con el evento ENOS (Lima *et al.* 1999, 2002; Jaksic, 2001). En el secano del sur de la región se ha reportado la ocurrencia de plagas de langostas (e.g., *Elasmoderus wagenknechti*). Esta langosta, propia del Norte Chico, es endémica y erémica de Chile (i.e., langosta de Combarbalá). Sus brotes ocasionalmente causan alarma pública y desencadenan intensos controles de parte de las agencias estatales (Moroni 1972; Cepeda-Pizarro *et al.* 2006, 2007).

El humedal costero de la cuenca del Río Elqui es el más vulnerable y el que presenta el mayor número de amenazas de la Región de Coquimbo (Contreras-López & Zuleta-Ramos 2019), a pesar de ser una zona de alta biodiversidad. Así, el estuario del Río Elqui presenta una gran variedad de vertebrados (Zuleta-Ramos *et al.* 2019), entre las que destacan aves migratorias y residentes como gaviotas, gaviotines, taguas, chorlos, rayadores y patos (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). Varias de ellas se reproducen en estos ecosistemas (García-Walther *et al.* 2017). El estuario resulta también de interés debido a los frecuentes registros de especies raras, ocasionales o errantes que utilizan en diferentes épocas del año este sistema. Sin embargo, desde mediados del 2006 se inició la segmentación de los

terrenos de la desembocadura para el desarrollo inmobiliario, comenzando en el sector sureste del humedal (Paleczek-Alcayaga *et al.* 2019). En este sector, la urbanización que es una de las amenazas más graves, ha ido ganando terreno de la ribera del río produciendo una cascada de efectos adversos para la integridad ecológica del estuario, por lo que su valor jerárquico de amenaza es muy alto (Bravo-Naranjo *et al.* 2020).

En la desembocadura del Río Elqui, la riqueza de vertebrados comprende al menos: 4 clases, 18 órdenes, 41 familias y 120 especies (Bravo-Naranjo *et al.* 2020), de las cuales 11 especies presentan problemas de conservación (9,2%). Aves es el taxón con mayor riqueza (104) específica, seguido de Mammalia (7), Reptilia (6) y Amphibia con 3 especies (*Calyptocephalella gayi*, *Pleurodema thaul* y *Rhinella arunco*). El estuario alberga 117 especies de vertebrados terrestres nativos, de los cuales sólo un 6% (7 especies) son endémicas para Chile (Bravo-Naranjo *et al.*, 2020). Para la desembocadura del Río Elqui se han descrito al menos 10 especies de vertebrados acuáticos (Zuleta-Ramos *et al.* 2019): las 3 especies de anfibios mencionados, un mamífero (*Myocastor coipus*) y 6 especies de peces dulceacuícolas y estuarinos como la pocha (*Cheirodon pisciculus*), el pejerrey del norte (*Basilichthys microlepidotus*) la carpa (*Cyprinus carpio*), pejerrey de mar (*Odontesthes regia*), la gambusia (*Gambusia holbrooki*) y la lisa (*Mugil cephalus*). Sin embargo, un 20% de los vertebrados acuáticos de la desembocadura son especies introducidas (2) y algunas de ellas pueden ser consideradas como especies invasoras como la carpa (*Cyprinus carpio*) que depreda sobre aves, peces nativos e invertebrados, junto con modificar la biomasa y diversidad de macrófitas, y zooplancton (Vilizzi *et al.* 2014, Maceda-Veiga *et al.* 2017).

La avifauna del estuario Río Elqui y sectores adyacentes comprendió 12 órdenes, 30 familias y 104 especies (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). Los taxa con mayor riqueza son Charadriiformes con 33 especies (32%) y los Passeriformes con 26 especies (25%). De acuerdo con su estatus, se observan 78 especies de aves residentes (75%) y 26 especies migratorias (25%). De las especies visitantes, siete (*Cygnus melanocoryphus*, *Netta peposaca*, *Oxyura vittata*, *Larus serranus*, *Butorides striatus*, *Fulica ardesiaca* y *Pelecanus occidentalis*) corresponden a especies visitantes accidentales. Con relación a la estacionalidad, 76 especies se observan durante todo el año (73%). Veintitrés especies de aves son visitantes de verano (22%) y 5 son visitantes invernales (4,8%) (Bravo-Naranjo *et al.* 2020).

La fauna de micromamíferos comprende el marsupial *Thylamys elegans* (yaca), dos múridos introducidos (*Mus* y *Rattus*) y dos roedores nativos: *Abrothrix olivaceus* (laucha olivácea) y *Oligoryzomys longicaudatus* (ratón colilargo). En el estuario en algunas ocasiones es posible avistar zorro chilla (*Lycalopex griseus*) ambulando por los basurales y algunos conejos (*Oryctolagus cuniculus*) (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). La herpetofauna del humedal está representada por los tropidúridos (*Liolaemus nitidus*, *L. platei* y *L. zapallarensis*). Pastén & López-Morgado (2016) mencionan la presencia del lagarto llorón (*Liolaemus chiliensis*) en el humedal costero del Río Elqui, aunque sin registro fotográfico de la especie. Por otra parte, en algunos sectores con mayor vegetación y piedras se observaron algunos ejemplares de *Homonata gaudichaudi* (salamanqueja), especie catalogada como de Precaución Menor (LC) para el norte de Chile (MMA 2020). También es posible observar, aguas arriba cerca del borde ripariano, las dos especies de culebras (*Philodryas chamissonis* y *Tachymenis chilensis*) de Chile central (Bravo-Naranjo *et al.* 2020), especies que se encuentran en la condición de Preocupación Menor (MMA 2020).

Cabe mencionar que, dentro de los elementos de la fauna nativa de los humedales costeros de la Región de Coquimbo, los invertebrados son el taxón predominante, aunque el menos estudiado (Figueroa *et al.* 2009). Especial atención merecen las poblaciones del camarón de río del norte (*Cryphiops caementarius*) en los humedales de Elqui, Limarí y Choapa. Este crustáceo es el único representante de la familia Palaemonidae en Chile. Su estado de conservación es En Peligro para la Región de Valparaíso y Metropolitana, y Vulnerable para el resto de su rango de distribución (MMA 2020). También la ocurrencia de una especie rara de caracol (*Omalogyra atonus*) que está muy pobremente representada en Chile, junto con la gran diversidad de macro-invertebrados presentes en el río Elqui, como *Penaphlia chilensis* y *Smicridea chilensis* (Jara 2002; Donoso 2007), así como de varios Anfípodos y Decápodos que habitan los humedales costeros y cuya biología se desconoce, sugieren que estos ecosistemas pueden albergar una riqueza filética importante que es necesario estudiar y conservar.

### 5.1.1.8 La flora de la cuenca del Río Elqui

En esta subsección se revisa la flora en toda la extensión de la cuenca, ampliando la revisión realizada por Figueroa *et al.* (2021), quienes revisan la flora presente a una escala geográfica del área delimitada para humedal.

El clima y la orografía cumplen un papel fundamental en varios procesos biológicos y ecológicos que ocurren en la cuenca de Elqui. Por ejemplo, producto del clima, la vegetación es mayoritariamente esteparia (Cepeda *et al.* 2009b). Por formar parte de una cuenca transicional, las formaciones vegetales representan tanto influencias vegetacionales del norte como del sur. Para la mayoría de las formaciones, el índice de diferencia normalizada de la vegetación es bajo (NDVI <0,09) (Cabezas *et al.* 2007), existiendo un fuerte contraste vegetacional entre el sector estepario dominante y los hábitats asociados a cuerpos de agua o sectores cultivados. Ello configura un paisaje dotado de una matriz árida extensa, la que encierra un conjunto de unidades espaciales menores de características méxicas. Estas unidades constituyen focos de productividad (e.g., sectores cultivados) o focos de riqueza y diversidad biológica (e.g., humedales costeros y altoandinos).

La vegetación de la cuenca del Elqui también muestra fuertes cambios espaciales y temporales debido al fuerte gradiente altitudinal. En la zona andina del Valle de Elqui, la vegetación tiene su límite cerca de los 4.500 msnm (Squeo *et al.* 2009). A menores altitudes se suceden varios cinturones o pisos de vegetación: En el piso andino superior (4.200- 4.500 msnm), encontramos pequeñas plantas herbáceas con crecimiento en roseta y con raíces poco profundas. En el piso andino inferior (3.500-4.200 msnm) aparecen las plantas en cojín, como las llaretas (*Azorella madreporica*), las adesmias (*Adesmia subterranea*) y arbustos postrados que no superan los 30 cm de altura (e.g. *Adesmia aegiceras*). Los arbustos altos de hasta 1,5 m, como la varilla brava (*Adesmia hystrix*) y el pingo-pingo (*Ephedra breana*), crecen en el piso subandino (2700-3500 msnm) (Squeo *et al.* 2009). La vegetación bajo el piso subandino también está influenciada por variables climáticas ligadas a la altitud. Ejemplo de esto es la cactácea columnar que produce el copao (*Eulychnia acida*), que alcanza su límite superior a los 1.500 msnm, poco más arriba de Rivadavia, la cual parece estar relacionada con factores térmicos.

Por su parte, la desembocadura del Río Elqui está localizada en el matorral desértico mediterráneo de *Oxalis gigantea* y *Heliotropium stenophyllum* (Piso 17). El estado actual de este piso vegetacional corresponde a fases sucesionales de otras unidades de mayor desarrollo (Cea *et al.* 2019). Pasten *et al.* (2016) distinguen 18 unidades vegetacionales en el estuario, con una cobertura de un 80 % del suelo. La mayor parte de ella corresponde a plantas herbáceas y, en una menor proporción, a plantas leñosas. La vegetación del estrato herbáceo que rodea el espejo de agua del estuario del Río Elqui (Bravo-Naranjo *et al.* 2020), se encuentra dominada por las herbáceas *Distichlis spicata* (grama brava), *Ambrosia chamissonis* (chinquihue) y el arbusto *Tessaria absinthioides* (brea), las cuales están acompañadas de las herbáceas *Apium nodiflorum* (berraza), *Baccharis glutinosa* (chilquilla), *Carpobrotus aequilaterus* (doca), *Cortaderia speciosa* (cortadera), *Cotula coronopifolia* (botón de oro), *Phyla nodiflora* (hierba de la virgen), *Heliotropium curassavicum* (cama de sapo), *Malvella leprosa* (malva amarilla), *Plantago major* (llantén mayor), *Rumex maricola* (romaza), *Sellieria radicans*, *Verbena litoralis* (verbena). El estrato Leñoso bajo suma a *Frankenia chilensis* (salitre) (Bravo-Naranjo *et al.* 2020).

En las dunas adyacentes al humedal dominan las especies herbáceas perennes tales como *Ambrosia chamissonis* (chinquihue), *Distichlis spicata* (grama brava), acompañadas de *Cristaria glaucophylla* (malvilla), *Solanum heterantherum* (tomatillo) y el arbusto *Lycium chilense* (coralillo). En los sectores inundados del humedal crece principalmente *Typha angustifolia* (totora), *Schoenoplectus californicus* (junco), *Juncus acutus* (junquillo), *Juncus* sp. y *Phragmites australis* (carrizo) (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). Finalmente cabe destacar que la diversidad de plantas acuáticas identificadas en el Río Elqui -en las áreas de vigilancia de la NSCA-, comprende un total de 78 especies: 44 locales (4 endémicas y 40 nativas) y 34 introducidas (Figueroa *et al.* 2021). Sin embargo, estas estaciones de vigilancia no incluyen la desembocadura en su parte terminal.

#### 5.1.1.9 Oceanografía costera en la bahía de Coquimbo

En el litoral de Chile Central resalta la presencia del Sistema Corriente Perú-Chile, o Sistema de Corriente Humboldt (HCS). Este sistema es una de las corrientes fronterizas orientales más productivas del mundo (Pauly & Christensen 1995) como consecuencia de eventos de surgencia impulsados por el viento que ocurren con diferente intensidad y frecuencia en el área sureste del Pacífico (Daneri *et al.* 2000), generando además alteraciones en la temperatura costera (Sobarzo *et al.* 2007), ya sea por efectos locales como también remotos (Hormazabal *et al.* 2001). Se sabe que eventos de variabilidad climática global como ENOS intensifican este tipo de sistemas (Vargas *et al.* 2007). El HCS se caracteriza por corrientes que traen aguas de las regiones tropicales y subpolares, que muestran una evidente variabilidad interanual y estacional (Mayol *et al.* 2012). El sistema está compuesto por i) la corriente de Humboldt predominantemente alejada de la costa ecuatorial, y que se mueve a una velocidad superficial media de 6 cm / s, ii) corrientes costeras cercanas a la costa formadas por la contracorriente Perú-Chile y la corriente continua Perú-Chile y iii) la Corriente costera ecuatoriana Perú-Chile. Las corrientes hacia los polos son responsables de transportar las aguas subsuperficiales subtropicales y ecuatoriales a las costas chilenas, mientras que el flujo hacia el Ecuador trae aguas intermedias antárticas y antárticas frías. El HCS está controlado, en gran medida, por los vientos costeros ecuatoriales vinculados al anticiclón subtropical del Pacífico, que promueven la surgencia costera y a través de ella, la productividad primaria- en el norte y centro de Chile, extendiendo su influencia al sur de Chile en verano.

En torno a la zona tropical occidental del Pacífico existen interacciones océano-atmósfera que repercuten a nivel planetario. El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), corresponde a un patrón climático consistente en la oscilación de los parámetros meteorológicos del Pacífico ecuatorial que ocurre con irregularidad cada cierto número de años. El ENOS se caracteriza por dos fases opuestas: una de calentamiento y lluvias en el Pacífico oriental conocida como El Niño y una segunda de enfriamiento y años secos llamada La Niña.

Durante la fase Niña, las temperaturas elevadas ( $>27^{\circ}\text{C}$ ) en la superficie tropical oceánica oeste del Pacífico, frente a Asia, se traducen en altas temperaturas del aire, un incremento en la evaporación y en la generación de un sistema de bajas presiones denominado celda de Walker. En el Pacífico este, frente a América, las aguas comparativamente más frías enfrían el aire, generando vientos alisios que soplan desde zonas de altas presiones en América, a zonas de bajas presiones en Asia. Este proceso, junto a las ondas ecuatoriales (relacionadas con la anulación en los trópicos de la fuerza de Coriolis), produce una circulación oceánica superficial que “acumula” aguas sobre el borde asiático del Pacífico tropical, generando un nivel medio del mar 50-60 centímetros mayor que en América. La fase Niña está acompañada por surgencias (upwelling) de aguas oceánicas sub-superficiales ricas en nutrientes, una alta productividad primaria de fitoplancton y una alta productividad secundaria (zooplancton y toda la cadena trófica a partir de allí). Climatológicamente esto va acompañado de sequías, disminución de las precipitaciones y de los caudales de ríos en Chile (Pizarro 2004).

Cada aproximadamente 3 a 8 años, como consecuencia del debilitamiento de los vientos alisios, la celda de Walker se desplaza hacia el Pacífico tropical central y la circulación oceánica se revierte, con pulsos de diferentes intensidades y duraciones. Así, las aguas superficiales más cálidas del Pacífico tropical asiático comienzan a “acumularse” sobre el borde Americano, que eleva su nivel medio del mar y en donde la termoclina desciende en profundidad. A esta fase se le denomina Fenómeno de El Niño. Dependiendo de la intensidad de la ocurrencia de eventos El Niño, cuñas de masas de agua cálida, superficial y sub-superficial, de decenas a cientos de metros de profundidad, se desplazan hacia latitudes más altas del Pacífico Sur-oriental, impidiendo las surgencias de aguas sub-superficiales. Lo anterior se acompaña de cambios en las direcciones predominantes de los vientos desde componentes suroeste hacia componentes del oeste; propiciando el hundimiento de las masas de agua en lugar de



surgencias, y con ello produciéndose una baja de la productividad oceánica. Desde el punto de vista del clima, esto va acompañado, entre otros, con periodos de altas precipitaciones y eventos extremos en Chile (Pizarro *et al.* 2004).

#### **5.1.1.10 Presiones antrópicas y naturales en la desembocadura del río Elqui**

El estuario del río Elqui se encuentra delimitado por campos agrícolas que están siendo alcanzados por la mancha urbana, de la cual recibe diferentes tipos de presiones que amenazan su funcionalidad, debido a caza ilegal, contaminación de sus aguas, fragmentación y pérdida de hábitats, tránsito de vehículos y exceso de visitación (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). En su trabajo, Bravo-Naranjo *et al.* (2020) identificaron siete presiones que afectan directamente los atributos naturales de la desembocadura del río Elqui. De estas, la fragmentación del suelo junto con la pérdida de cobertura vegetal fueron las que obtuvieron una mayor gravedad, seguida del deterioro de la calidad del agua. Dentro de los factores que producen estas presiones, la basura inorgánica produce efectos en la compactación y fragmentación del suelo, pérdida de fauna y cobertura vegetal, siendo en esta última de una contribución muy alta (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). Varios sectores del humedal son utilizados como depósitos de escombros, cuyo aumento ha ido de la mano con el crecimiento urbano de la ciudad. De forma similar, la basura orgánica tiene una contribución media al deterioro de la calidad del agua debido a la presencia de un desagüe de aguas servidas. La irreversibilidad de este factor es muy alta, ya que existe un alto costo económico asociado (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). Por su parte, Figueroa *et al.* (2021) identificó las siguientes presiones y amenazas:

- De orden físico:
  - Modificación de cauce
  - Existencia del Embalse
  - Rellenos del cauce debido a la urbanización
  - Existencia de diferentes alteraciones en el drenaje del cauce.
  - Impermeabilización de suelos inundables
  - Existencia de basurales, microbasurales y vertederos a lo largo del álveo del río.
- De orden químico:
  - Residuos líquidos desde basurales
  - Eutrofización debido a las descargas sanitarias
  - Contaminación de agua y suelos debido a la minería y relaves mineros
- De orden biológico:
  - Depredación y alteración del hábitat por parte de animales domésticos
  - Residuos inmobiliarios domiciliarios e industriales
  - Alteración del hábitat por vegetación exótica.

Para comprender el avance del cambio de uso del suelo, Paleczek-Alcayaga *et al.* (2019) compararon entre los años 2004 y 2017 los cambios en el paisaje de la última porción del estuario (1,4 km por el eje del río), mediante la generación de polígonos de los parches de vegetación, superficie construida y polilíneas para el caso de los caminos. Dicho análisis reveló que la superficie urbana tuvo un incremento de 14,4 ha por cada año transcurrido, cambios que se mantuvieron constantes durante el periodo 2004-2005. Sin embargo, este crecimiento urbano se duplicó hacia el año 2011 y creció exponencialmente hasta el periodo 2014-2015, donde las pérdidas del hábitat y las construcciones ocurrieron principalmente en el sector sur-oriente del humedal, alcanzando a cubrir parte de su álveo histórico (Paleczek-Alcayaga *et al.* 2019; Figura 62, Figura 63).

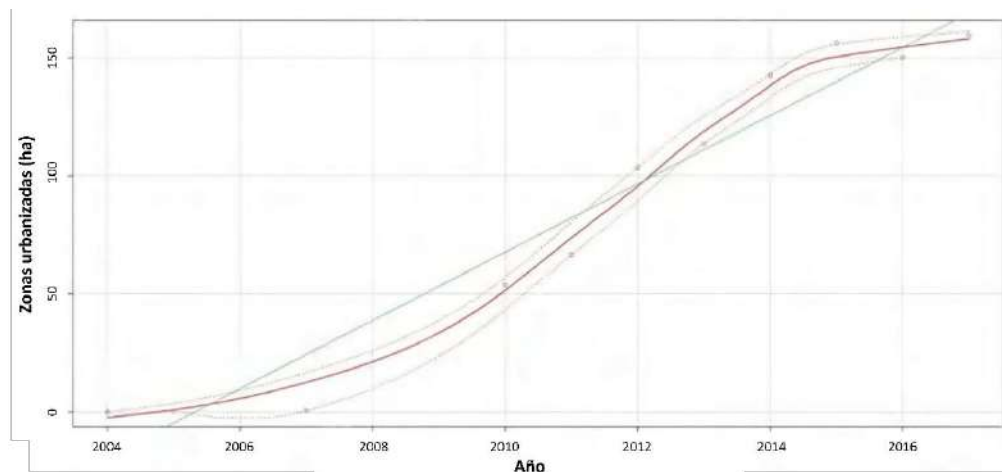


Figura 62: Avance de la zona urbanizada en el estuario del Río Elqui. La línea verde representa la tendencia, la línea roja continua el ajuste de la curva de regresión y las líneas rojas punteadas los intervalos de confianza (95%) del ajuste. Fuente: Paleczek-Alcayaga *et al.* (2019).

La longitud de los caminos es otro factor que reportó un aumento considerable con 31.000 metros construidos en 10 años (Paleczek-Alcayaga *et al.* 2019). La pérdida de parches de vegetación por el aumento de senderos y caminos presentó una tendencia muy similar a la generada por el incremento de la superficie urbana. Obviamente existe una relación entre la urbanización del sector oriente, con el aumento de caminos, el turismo desregulado, y el paso de visitantes del humedal sin considerar demarcaciones para evitar perturbaciones a la avifauna del sector (Bravo-Naranjo *et al.* 2020).

Contrariamente a lo ocurrido con la superficie y caminos construidos, la superficie de los parches vegetacionales, disminuyeron a una tasa de 3,18 ha/año (Paleczek-Alcayaga *et al.* 2019), los que, junto con el exceso de visitación, ha favorecido la fragmentación del suelo y la pérdida de hábitats. La contribución de esta fuente va de MEDIA a ALTA ya que el humedal recibe gran cantidad de visitantes que van a realizar varias actividades: recreación, caza, pastoreo y pesca (Bravo-Naranjo *et al.* 2020). En los últimos años, la observación de vida silvestre en el lugar se ha incrementado, especialmente gracias a facilidad de intercambio de información a través de las redes sociales. La pérdida de cobertura vegetal está relacionada, además, con el pastoreo por ganado doméstico entre los cuáles se observó: equinos, bovinos y caprinos (Bravo-Naranjo *et al.* 2020).

Entre las presiones naturales que afectan al estuario del Río Elqui destaca el tsunami de septiembre de 2015, que afectó a este humedal con sobrepasos de más de 300 metros y un runup de 2 m (Contreras-López *et al.* 2016). Por otra parte, entre 1986 y 2017, este humedal ha perdido casi un 11% de su espejo de agua (Winckler *et al.* 2019) debido a los períodos de sequía, la sobreexplotación del recurso hídrico, la intervención del caudal y los efectos del cambio climático. Por último, la modificación del cauce debido a la construcción de la doble vía en la ruta 5 produjo una pérdida de especies vegetales que eran características de zonas húmedas en la zona poniente de la carretera.

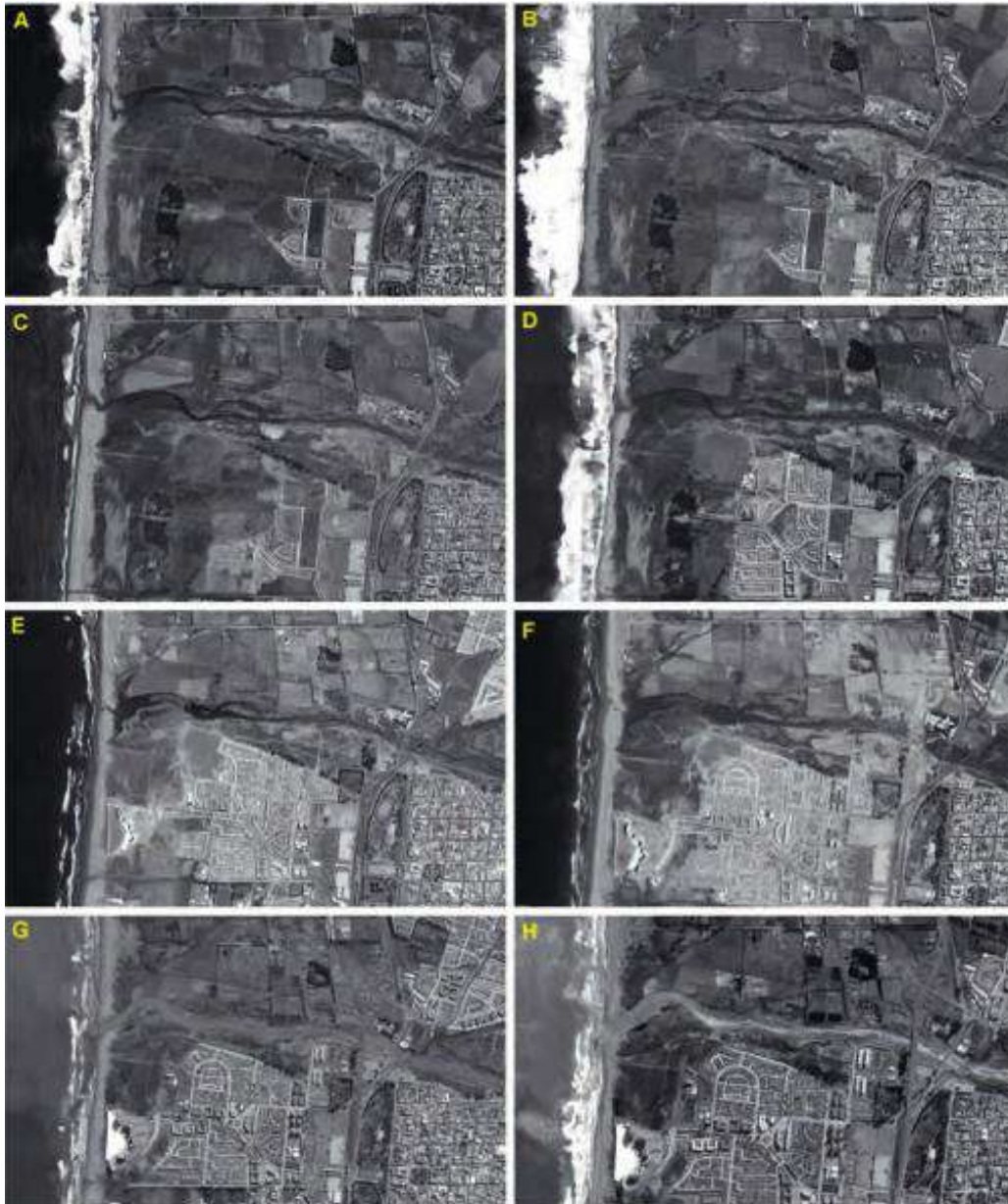


Figura 63: Serie de tiempo de imágenes satelitales del humedal Desembocadura Río Elqui que muestran el avance del área urbana. A= 2004, B= 2005, C= 2007, D= 2010, E= 2012, F= 2014, G= 2015, H= 2017. Fuente: Paleczek-Alcayaga *et al.* (2019).

#### 5.1.1.11 La delimitación de la desembocadura del río Elqui

En relación con la delimitación de la desembocadura del Río Elqui, Figueroa *et al.* (2021) propone una zonificación del sistema del humedal del río Elqui que incluye el área de la desembocadura y el sistema léntico (fluvial), dividiéndolo en temporal (278,9 ha), permanente (135,9 ha), laguna costera (6,7 ha), vegetación ripariana (106,4 ha) y playas y dunas (30 ha). Adicionalmente, se incluyó el sistema intermareal (10,2 ha), la cual responde a una dinámica marina más que continental y sugiere su caracterización y delimitación para evaluar y considerar la continuidad ecológica del sistema costero.

Este estudio permitió definir los límites ecológicos de la desembocadura del río Elqui, en un área que abarca 568,1 hectáreas (Figueroa *et al.* 2021), considerando varios criterios como: la hidrología, vegetación, geomorfología y edafología, más un proceso participativo del Comité Técnico Local del proyecto. Los límites de la propiedad fiscal y privada han sido informados en base a datos públicos del SII y CIREN, aunque existe cierto grado de discordancia entre ambas fuentes. Los tipos de humedales considerados en esta delimitación, de acuerdo con la Convención Ramsar, corresponde a los tipos marino-costeros (Playas de arena: E), del intermareal (bajos de arena y suelos salinos: G), lagunas (J) y estuario (F); los tipos marinos, estrictamente salinos: A y B (< 6 m de profundidad y vegetación submarina, respectivamente), deben ser caracterizados en lo sucesivo, considerando la batimetría del área (Figueroa *et al.* 2021).

Realizadas las correcciones, la propuesta de delimitación de la desembocadura del humedal quedó con un área total de 568,1 hectáreas de superficie (Figueroa *et al.* 2021), que se extiende al sistema palustre y ribereño más allá de la influencia costera. El humedal temporal, es el más representativo con alrededor de 300 hectáreas, sigue el humedal permanente, es decir, zonas que se encuentran permanentemente inundadas que se distribuyen en 140 hectáreas. Ambas zonas son las más características del sistema humedal, concentrando el 73% de su superficie. Esta superficie no incluye las superficies agrícolas y de relleno en el sistema humedal, por no constituir características biofísicas de humedal. Ambas zonas deben ser consideradas, sin embargo, al momento de definir la gestión para la conservación y restauración de áreas, ya que se han emplazado en la zona de inundación del sistema costero y fluvial, respectivamente (Figueroa *et al.* 2021). Finalmente, el 27% de la superficie restante se encuentra distribuida en 6,7 hectáreas para la laguna costera, playas y dunas con 30 hectáreas, mientras que 111,6 hectáreas son áreas de vegetación ripariana.

#### **5.1.1.12 Revisión Cartográfica**

Los resultados de la revisión cartográfica realizada son consignados en las siguientes dos tablas:

- Tabla 1: Revisión de documentos, donde se puede encontrar lo siguiente:
  - Información del documento: contiene el título del documento, autor(es), el año de la publicación o desarrollo del estudio, existencia o no de una base de datos espaciales o un Sistema de Información Geográfico (SIG) para utilizar y, finalmente, el objetivo del estudio.
  - Antecedentes-Evidencias: material cartográfico encontrado al interior del documento.
  - Tópicos: frases o ideas generales que reflejen el contenido de la cartografía revisada con el objetivo de poder después establecer conceptos que permitan entender qué áreas están siendo representadas espacialmente.
- Tabla 2: Revisión de capas de información, donde se pueden encontrar lo siguiente:
  - Información capa: título de la capa, fuente de origen y año.
  - Descripción: una descripción general de la capa y de los datos que existen.
  - Representación: representación gráfica de los datos.

Las tablas por su extensión son incorporadas en el anexo 9.5. No obstante, en la Figura 64 y Figura 65 se ilustran los resultados de esta revisión cartográfica. En los 21 documentos revisados, que corresponden principalmente a informes finales de consultorías, se identificaron 124 figuras que contenían información espacial, relacionadas principalmente con las siguientes áreas:

- Provincia de Coquimbo

- Provincia del Elqui
- Cuenca Hidrográfica del Río Elqui
- Subcuencas hidrográficas del Río Elqui
- Humedal Río Elqui.




Tabla °1: Revisión de documentos	
Información documento #1	
<p><b>Título:</b> Identificación y Priorización de Áreas de Restauración Ecológica para el Humedal Desembocadura del río Elqui y sus Subcuencas aportantes, Región de Coquimbo.</p> <p><b>Autores:</b> GesNat</p> <p><b>Año:</b> 2021</p> <p><b>SIG:</b> disponible.</p> <p><b>Objetivo:</b> El objetivo principal del estudio fue identificar y prioriza áreas de restauración ecológica para el Humedal Costero del río Elqui y sus subcuencas aportantes.</p>	
Antecedentes-Evidencias	
<p>Área de estudio, entre el Humedal Costero del río Elqui y la quebrada de Talca y quebrada Santa Gracia.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui</p>	
<p>Mapa de formaciones vegetacionales presentes en el humedal del río Elqui y sus subcuencas aportantes.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Formaciones Vegetacionales.</p>	
<p>Mapa de los pisos vegetacionales presentes en el área del Humedal del río Elqui y sus subcuencas aportantes.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Pisos Vegetacionales.</p>	

Figura 64: Ejemplo de tabla de Revisión de documentos. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla °2: Revisión de capas de información.**

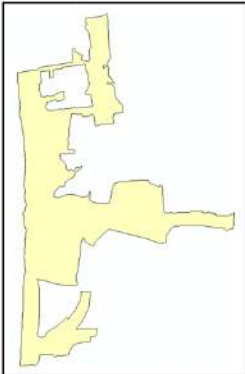




Información capa	Descripción	Representación
<p><b>Título:</b> Cartografía propuesta para el reconocimiento del río Elqui como humedal urbano.  <b>Fuente:</b> Ministerio del Medio Ambiente  <b>Año:</b> 2021</p>	<p>Capa shape de la propuesta de delimitación de humedal urbano del río Elqui.</p>	
<p><b>Título:</b> Ortoimagen Satelital Spotmaps con Propiedades Rurales y Suelos Agrológicos, marcos 1750-B y 1751-A, Región de Coquimbo.  <b>Fuente:</b> CIREN  <b>Año:</b> 2021</p>	<p>Capa shape de propiedades Rurales Servicio de Impuestos Internos, Bases de Datos CIREN año 2014.</p>	
<p><b>Fuente:</b> CIREN  <b>Año:</b> 2021</p>	<p>Capa shape de suelos Agrológicos CIREN, año 2021.</p>	
<p><b>Título:</b> Imágenes OneTasking de SkySat  <b>Fuente:</b> Ministerio del Medio Ambiente.  <b>Año:</b> 2020</p>	<p>Imagen satelital de alta resolución del río Elqui.</p>	
<p><b>Título:</b> Plan Regulador Intercomunal, provincia de Elqui, Región de Coquimbo  <b>Fuente:</b> Ministerio de Vivienda y Urbanismo  <b>Año:</b> 2018</p>	<p>Cartografía en PDF del Plan Regulador Intercomunal, provincia de Elqui, Región de Coquimbo</p>	

Figura 65: Ejemplo de tabla de Revisión de capas de información. Fuente: elaboración propia.

En este contexto para comprender sobre qué áreas o temáticas se han hecho representaciones espaciales de diferentes datos o situaciones, se procedió a establecer una serie tópicos que permitieran extraer la idea general sobre el contenido de las distintas cartografías revisadas. Esto se hizo con el objetivo de posteriormente generar conceptos generales que agruparan tópicos de un carácter más específico. La Tabla 9 presenta un ejemplo de cómo se hizo esta agrupación conceptual a partir de los tópicos por figura detectada.

Tabla 9: Ejemplo de la relación entre tópicos y conceptos de la revisión cartográfica. Fuente: Elaboración propia.

Tópicos	Conceptos
Pisos vegetacionales	Vegetación
Tipos vegetacionales	
Tipología humedal	Hidrografía
Delimitación humedal	
Ecosistemas acuáticos priorizados	
Cuencas Hidrográficas	
Usos del Suelo humedal	Usos del Suelo
Uso del suelo subcuencas	
Endemismo	Biodiversidad
Servicios Ecosistémicos	Servicios Ecosistémicos
Eventos de remoción en masa	Amenaza de Remoción en Masa
Modelo de elevación digital	Geomorfología
Variación línea de costa	
Perfil de playa	
Batimetría Bahía de Coquimbo	Océano
Oleaje Bahía Coquimbo	
Estaciones fluviométricas	Registros de datos históricos
Estaciones meteorológicas	

Con la agrupación final de todos los tópicos, 143 en total, se generaron 20 conceptos que permitieron comprender sobre qué áreas temáticas se han realizado estudios y representaciones cartográficas tanto de la Región de Coquimbo como del Río Elqui. Como se revisaron documentos que estaban vinculados directa o indirectamente al Humedal del Río Elqui, varios de ellos contienen una visión sistémica, por lo cual incorporan información por ejemplo a nivel de subcuencas hídricas como aspectos oceánicos en caso de la amenaza de tsunamis. La Tabla 10 presenta un listado de los conceptos generados, ordenados de mayor a menor según la cantidad de veces que se asoció algún concepto a los tópicos establecidos en la revisión cartográfica.

Tabla 10: Conceptos generados a partir de la identificación de tópicos de la revisión cartográfica. Fuente: Elaboración propia.

N°	Concepto	Cantidad
1	Hidrografía	36
2	Amenaza de Tsunami	21
3	Registros de datos históricos	16
4	Geomorfología	11
5	Restauración Ecosistema	9
6	Amenaza de Remoción en Masa	7
7	Usos del Suelo	6
8	Vegetación	6
9	Amenaza de Inundación	5
10	Biodiversidad	4
11	Marco normativo comunal	4
12	Amenaza de Licuefacción	3
13	Gravimetría	3
14	Océano	3
15	Agricultura	2
16	Geología	2

N°	Concepto	Cantidad
17	Minería	2
18	Amenaza de Terremoto	1
19	Amenazas	1
20	Servicios Ecosistémicos	1
	Total	143

Ahora bien, la Figura 66 presenta estos conceptos ordenados de mayor a menor a partir de porcentajes para facilitar la expresión de estos resultados. Las principales áreas en las que se ha presentado información espacial en los documentos revisados están vinculadas principalmente a los siguientes conceptos:

- Hidrografía (51,5%)
- Amenaza de Tsunami (30,0%)
- Registros de datos históricos (22,9%)
- Geomorfología (15,7%)
- Restauración ecosistémica (12,9%)
- Amenaza de remoción en masa (10,0%)

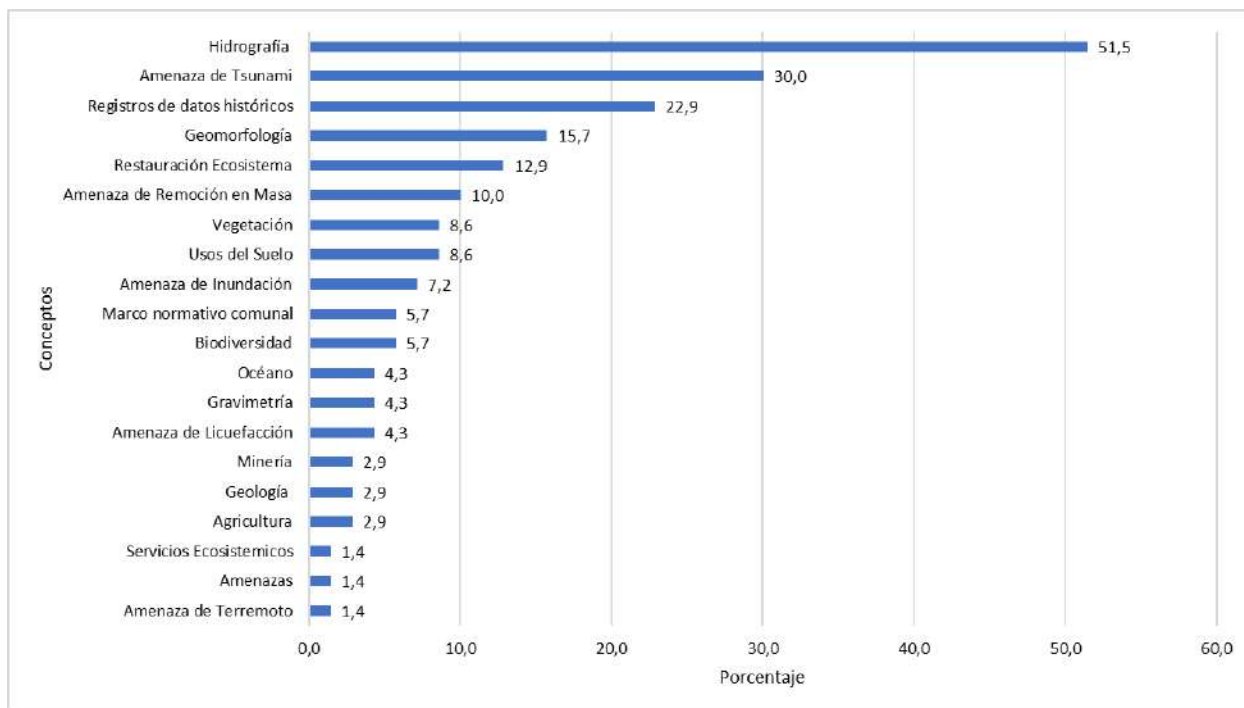


Figura 66: Jerarquización de conceptos encontrados en la revisión cartográfica. Fuente: Elaboración propia.

En función de lo revisado existe amplia información respecto a la cuenca y subcuencas del Río Elqui, especialmente para poder contextualizar la presentación de los diversos resultados de los estudios que se revisaron, por esta razón aparece Hidrografía representando aproximadamente un 50% de los conceptos generados.



Un aspecto importante por destacar es lo que aporta el concepto de Registros de datos históricos, el cual hace relación principalmente a la localización de estaciones meteorológicas, fluviométricas, entre otras. En la presente consultoría se optó por generar capas propias respecto a este elemento para poder corroborar que la localización de estas tuviese una correcta ubicación en función de las coordenadas obtenidas.

Finalmente, cabe mencionar que de la revisión cartografía el documento desde el cual se rescató más información corresponde al estudio de Delimitación y caracterización de usos del humedal desembocadura del río Elqui y sus subcuencas aportantes, Región de Coquimbo (Figueroa *et al.* 2021). Esto se debe a que gran parte de sus resultados se vinculaban con información levantada por la presente consultoría como, por ejemplo: delimitación del humedal y tipos vegetacionales, por lo cual se utilizó tanto información directa como también se compararon resultados.

### 5.1.2 Revisión de información de los caudales asociados al humedal y la pluviometría de la cuenca

En la Tabla 11 se muestra las 24 estaciones con registros de caudales disponibles en la DGA. Por su extensión y localización, se seleccionaron tres de ellas para el análisis: a) Río Elqui en La Serena, cercano a la desembocadura; b) Río Elqui en Almendral, en el tramo interior comprendido entre la desembocadura y el embalse Puclaro; y c) Río Elqui en Algarrobal, aguas arriba del Embalse Puclaro. Además, se analiza el caudal en el Río Claro en Rivadavia.

En la estación La Serena, más cercano a la desembocadura, el registro se inicia el año 1985 y termina debido a los descensos extremos del caudal el año 2017 (Figura 67). En general, el caudal registrado en esta estación es inferior a 20 m<sup>3</sup>/s y solo en dos oportunidades superó los 60 m<sup>3</sup>/s. Durante el evento El Niño 1988, alcanzó 120 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 11: Estaciones fluviométricas disponibles en la cuenca con datos de caudales. Se destacan las seleccionadas por su longitud y calidad de registro para ser utilizadas en el presente análisis. Fuente: Elaboración propia.

N	Nombre Estación	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (m)	Año Inicio	Año Fin
1	Río Claro en Montegrande	-30,08972222	-70,49277778	1120	1972	1983
2	Río Claro en Rivadavia	-29,9825	-70,55555556	820	1949	2020
3	Río Cochiguaz en El Peñon	-30,12527778	-70,43777778	1360	1983	2021
4	Río Elqui en Algarrobal	-30,00027778	-70,58666667	760	1950	2020
5	Río Elqui en Almendral	-29,98444444	-70,90055556	395	1954	2019
6	Río Elqui en Gualliguaica	-30,02083333	-70,79916667	490	1949	2021
7	Río Elqui en La Serena	-29,89555556	-71,2525	20	1985	2018
8	Río Elqui en Puclaro	-30	-70,85	445	1963	1965
9	Río Elqui en Punta De Piedra	-29,86666667	-71,1	160	1972	2021
10	Río Elqui Entrada Embalse Puclaro	-30,02416667	-70,80027778	512	2020	2021
11	Río Incaguaz Antes Junta Río Turbio	-29,98916667	-70,24944444	0	1969	2021
12	Río Ingaguas en Las Terneras	-29,98333333	-70,25	0	1946	1948
13	Río La Laguna Antes Junta Río Del Toro	-29,98	-70,09333333	0	1969	2021
14	Río La Laguna en Nueva Elqui	-30,2	-70,06666667	3100	1928	1931
15	Río La Laguna en Salida Embalse La Laguna	-30,20277778	-70,04027778	3130	1975	2021
16	Río Malo Aguas Abajo Tranque Relaves El Indio	-29,78444444	-69,99166667	0	1994	2021
17	Río Malo Antes Junta Río Vacas Heladas	-29,90611111	-70,05138889	0	1995	2021
18	Río Toro Antes Junta Río La Laguna	-29,97666667	-70,09416667	2165	1971	2021
19	Río Turbio en Huanta	-29,84694444	-70,38805556	1195	1972	2021
20	Río Turbio en Las Terneras	-29,95	-70,38333333	0	1946	1948
21	Río Turbio en Varillar	-29,94722222	-70,53694444	890	1969	2021
22	Río Vacas Heladas Antes Junta Río Malo	-29,90611111	-70,05138889	0	1995	2021
23	Dren G Tranque El Indio (2-D Drenes)	-29,78444444	-69,99138889	0	1997	2021
24	Estero Derecho En Alcohuaz	-30,22388889	-70,49638889	1645	1900	2021

Al considerar los promedios anuales, se observa una tendencia negativa, confirmando la reducción sistemática del caudal en esta estación (Figura 68). La Estacionalidad (Figura 69), muestra una crecida en época estival asociada al porte de los deshielos mucho mayor que la crecida en la época invernal asociada al aporte de las precipitaciones. Con todo se constata un cambio de comportamiento en las últimas décadas: aporte de crecida estival es cada vez menor, lo que es consistente con la reducción del promedio anual de los caudales y la crecida de la época invernal además de disminuir, parece estar adelantándose cada vez más. Al comparar las anomalías del caudal con el índice ONI (medida del fenómeno El Niño), se puede apreciar que la mayoría de los caudales mayores a lo esperado, se encuentran relacionados con fases cálidas de ONI (ocurrencia de eventos El Niño), mientras que los déficits de caudal con la fase fría (ocurrencia de La Niña). Sin embargo, existe una diferencia fundamental entre los excesos de caudal, que suelen ser severos, pero de corta persistencia, con los déficits de caudal que, aunque no son dramáticos persisten durante años en forma continua (Figura 70).



Figura 67: Caudal promedio mensual ( $m^3/s$ ) Río Elqui en La Serena. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

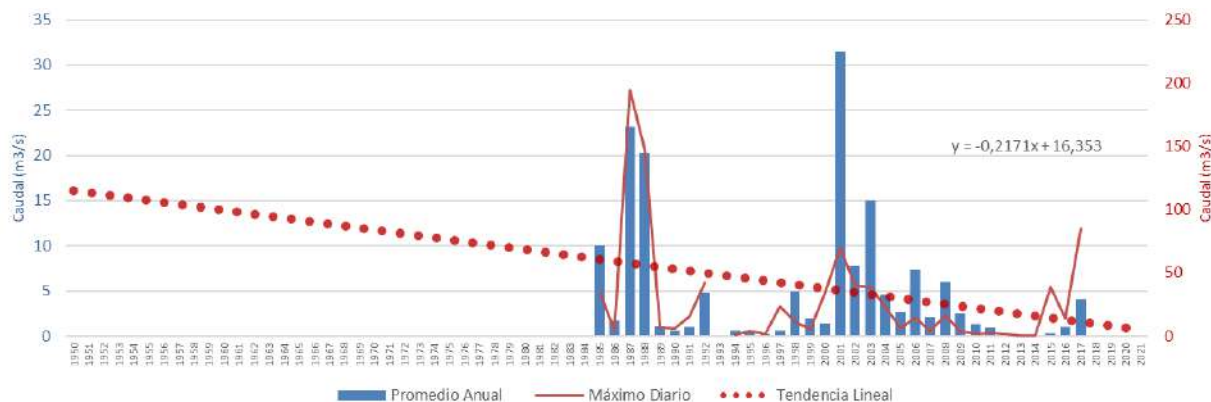


Figura 68: Caudal promedio anual ( $m^3/s$ ) Río Elqui en La Serena, tendencia lineal y máximos diarios registrados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

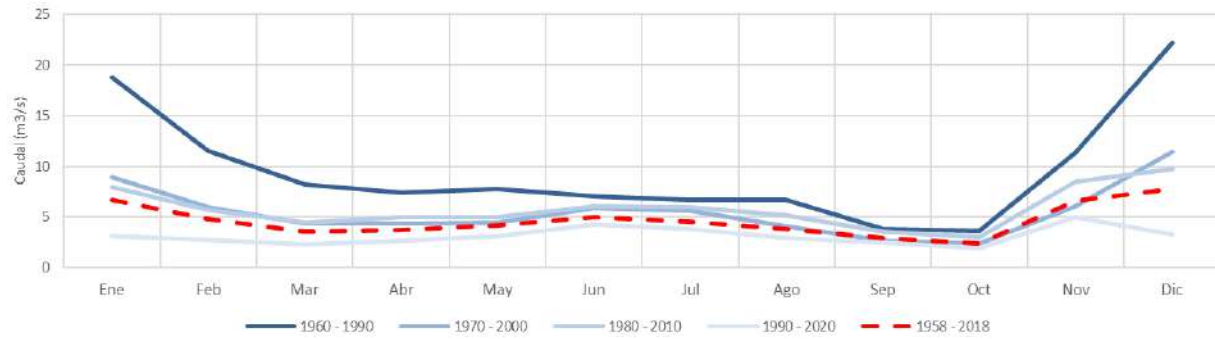


Figura 69: Evolución Estacionalidad del caudal ( $m^3/s$ ) río Elqui en la Serena. Se muestran estacionalidades promedio por períodos de tres décadas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

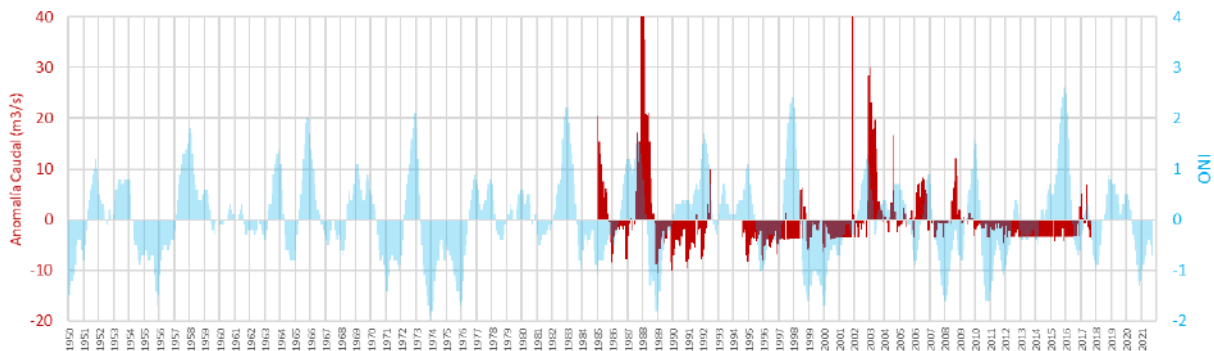


Figura 70: Anomalía del caudal del río Elqui en La Serena, comparado con el índice Oceánico de El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

El registro en El Almendral se inicia el año 1954 y se discontinúa el año 2019. Nuevamente se observa que el caudal es inferior a los 20  $m^3/s$ , pero en general no llega a secarse como es el caso de la estación La Serena. En 5 oportunidades el caudal ha superado los 40  $m^3/s$ , llegando el año 1988 a casi 100  $m^3/s$  (Figura 71).

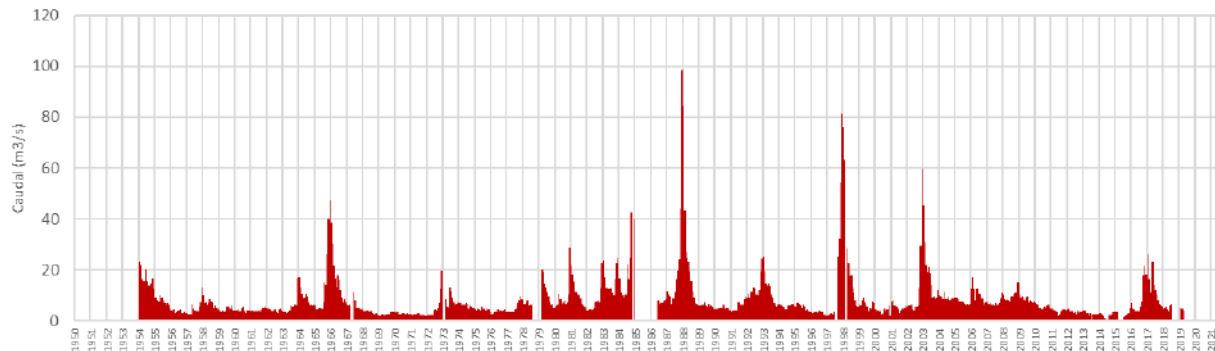


Figura 71: Caudal promedio mensual ( $m^3/s$ ) Río Elqui en El Almendral. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Al observar los promedios anuales, se verifica una leve tendencia positiva, que probablemente es el reflejo del manejo del agua de la cuenca a raíz de la construcción del embalse Puclaro (Figura 72). La Estacionalidad (Figura 73),

muestra nuevamente una crecida en época estival asociada al porte de los deshielos mucho mayor que la crecida en la época invernal asociada al aporte de las precipitaciones. Sin embargo, se constata que, a mediados del siglo 20, esa crecida era comparable al aumento del caudal en la época invernal, para pasar en la década de 1990 a la situación actual, probablemente reflejo del manejo realizado por el embalse Puclaro (cuya construcción se inicia el año 1996) y que explica la tendencia positiva del promedio anual del caudal. Al comparar las anomalías del caudal con el índice ONI (medida del fenómeno El Niño), se puede apreciar nuevamente que la mayoría de los caudales mayores a lo esperado, se encuentran relacionados con fases cálidas de ONI (ocurrencia de eventos El Niño), mientras que los déficits de caudal con la fase fría (ocurrencia de La Niña). Sin embargo, existe una diferencia fundamental entre los excesos de caudal, que suelen ser severos, pero de corta persistencia; mientras que, los déficits de caudal, aunque no son dramáticos persisten durante años en forma continua (Figura 74).

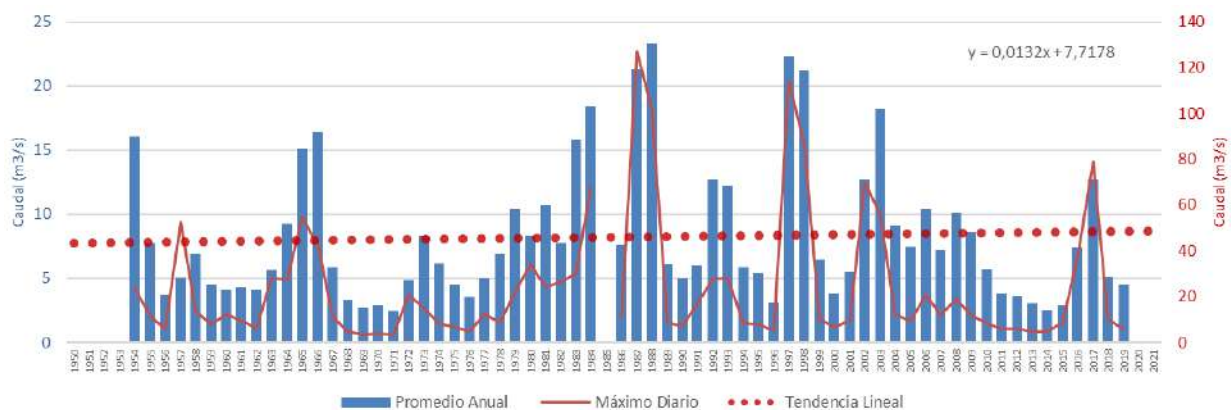


Figura 72: Caudal promedio anual Río Elqui en El Almendral, tendencia lineal y máximos diarios registrados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

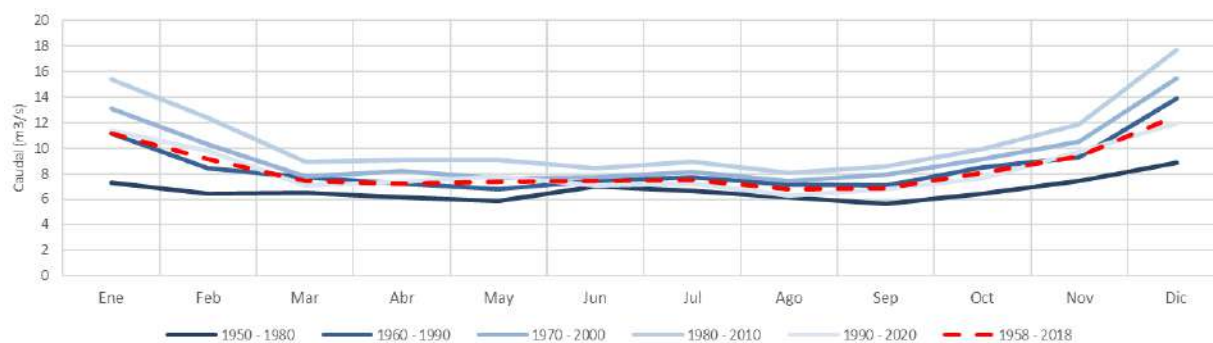


Figura 73: Evolución Estacionalidad del caudal del río Elqui en El Almendral. Se muestran estacionalidades promedio por períodos de tres décadas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

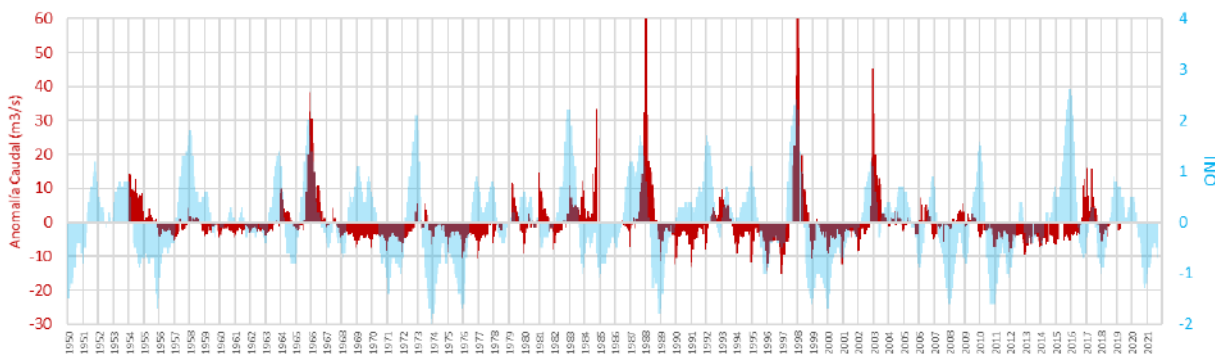


Figura 74: Anomalía del caudal del río Elqui en El Almendral, comparado con el índice Oceánico de El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Agua arriba del embalse Puclaro, pero bajo la influencia del embalse La Laguna, se observa que el caudal promedio mensual del Río Elqui en Algarrobal tiene un comportamiento similar a la estación El Almendral (Figura 75). La mayoría de las veces el caudal es inferior a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ; sin embargo, en contadas ocasiones llega a superar los  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  e incluso alcanzó a superar  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  el año 1988.

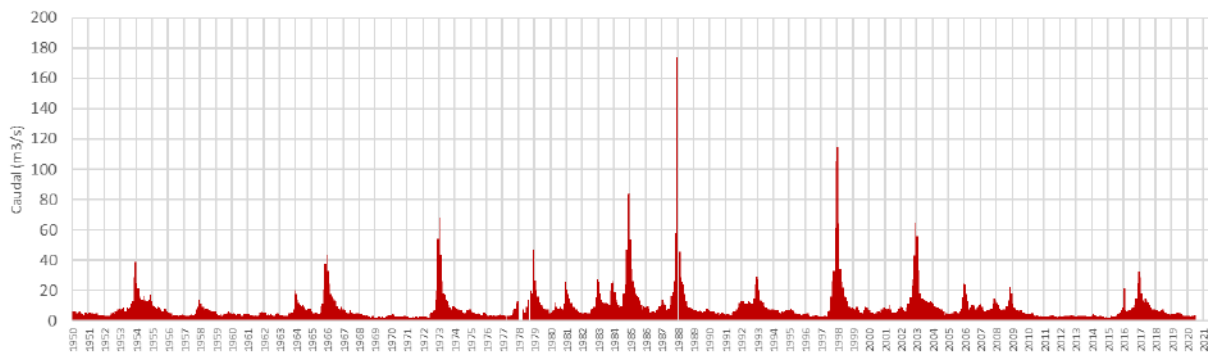


Figura 75: Caudal promedio mensual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) Río Elqui en El Algarrobal. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Nuevamente se observa una tendencia lineal positiva ajustada a los caudales promedios anuales (Figura 76), una estacionalidad que se incrementa con el paso del tiempo en la época estival (Figura 77) y anomalías que se vinculan con la fase cálida de El Niño (superávit de crecidas de caudal cortas en el tiempo, pero intensas), y la fase fría (déficit de caudal persistente en el tiempo, Figura 78).

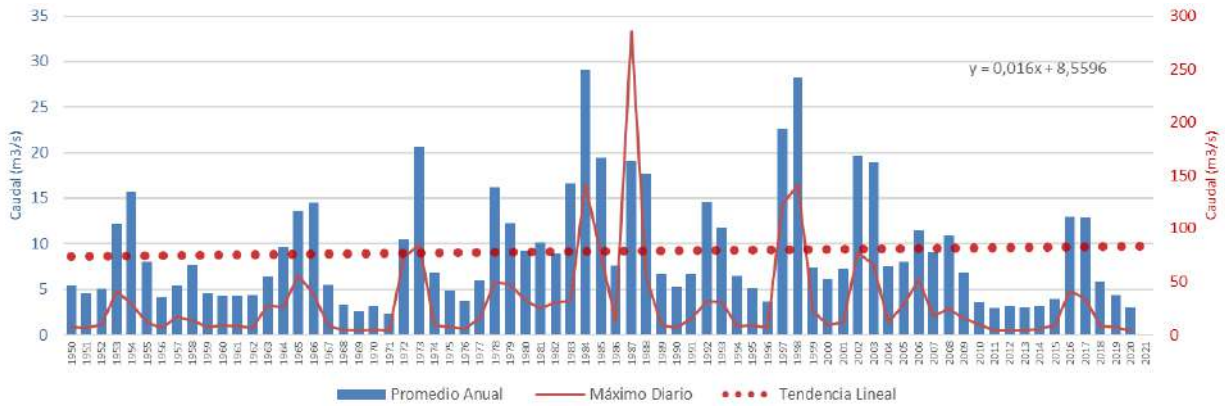


Figura 76: Caudal promedio anual Río Elqui en El Algarrobal, tendencia lineal y máximos diarios registrados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

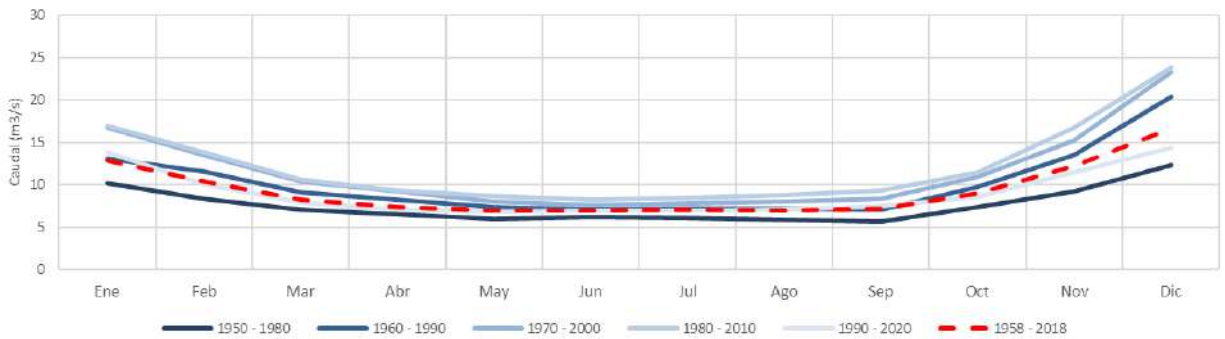


Figura 77: Evolución Estacionalidad del caudal del río Elqui en El Algarrobal. Se muestran estacionalidades promedio por períodos de tres décadas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

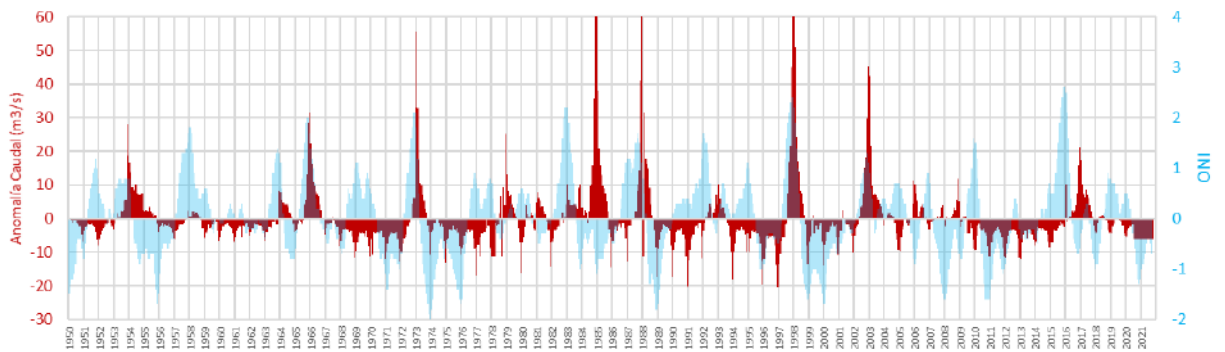


Figura 78: Anomalía del caudal del río Elqui en El Algarrobal, comparado con el índice Oceánico de El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

La estación del afluente Río Claro en Rivadavia, aunque con caudales menores que El Elqui (el otro afluente importante es el Río Turbio), presenta un comportamiento similar a la estación del Río Elqui en Algarrobal tanto en los promedios mensuales (Figura 79), como anuales (Figura 80), estacionalidad (Figura 81) y anomalías (Figura 82).

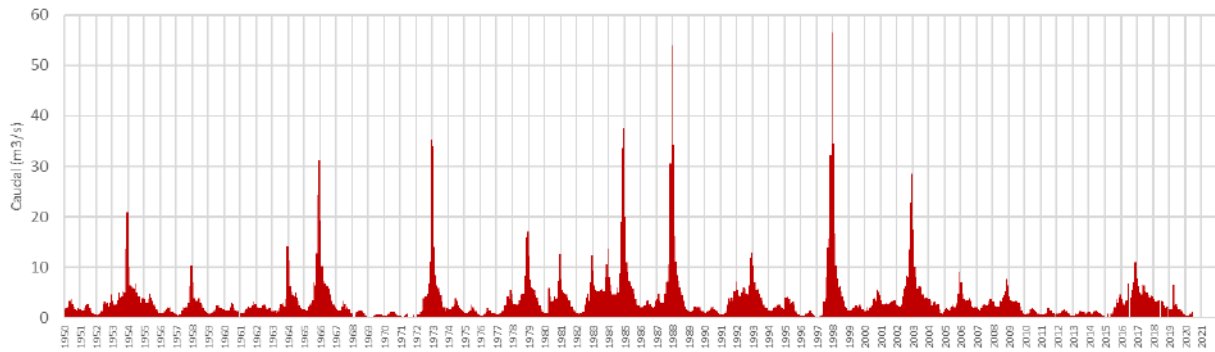


Figura 79: Caudal promedio mensual (m<sup>3</sup>/s) Río Claro en Rivadavia. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

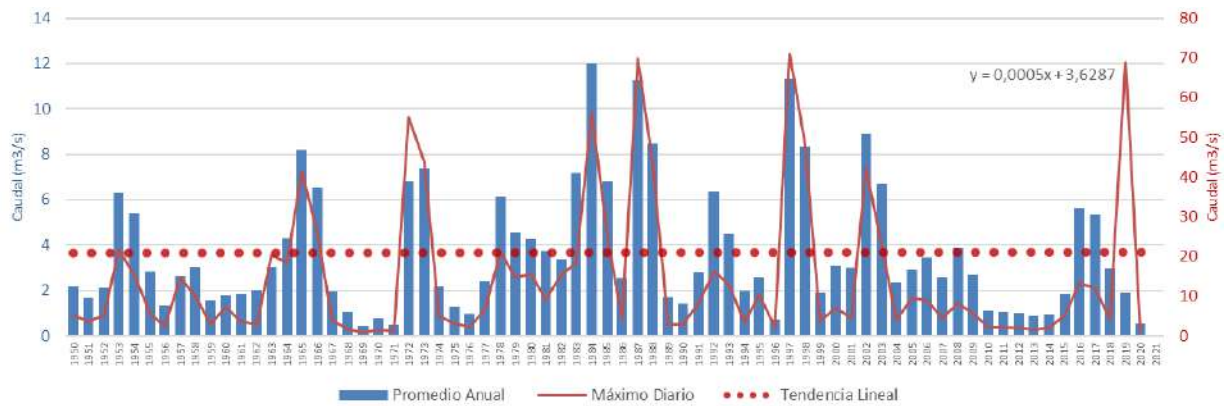


Figura 80: Caudal promedio anual Río Claro en Rivadavia, tendencia lineal y máximos diarios registrados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

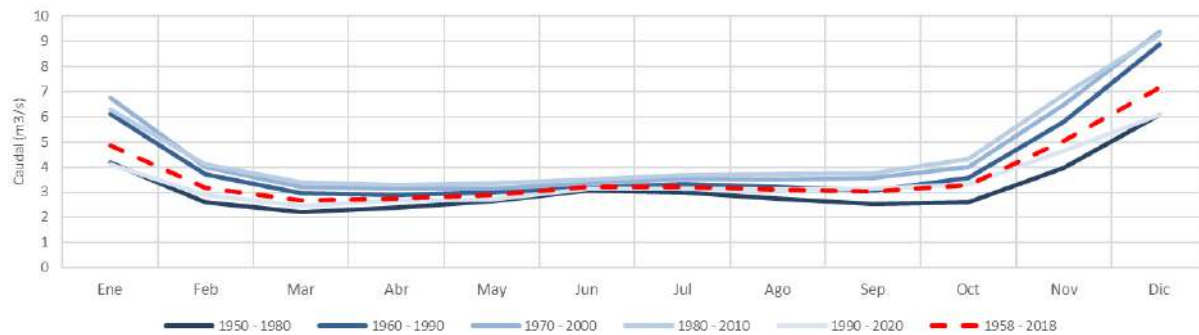


Figura 81: Evolución Estacionalidad del caudal del río Claro en Rivadavia. Se muestran las estacionalidades promedio por períodos de tres décadas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.



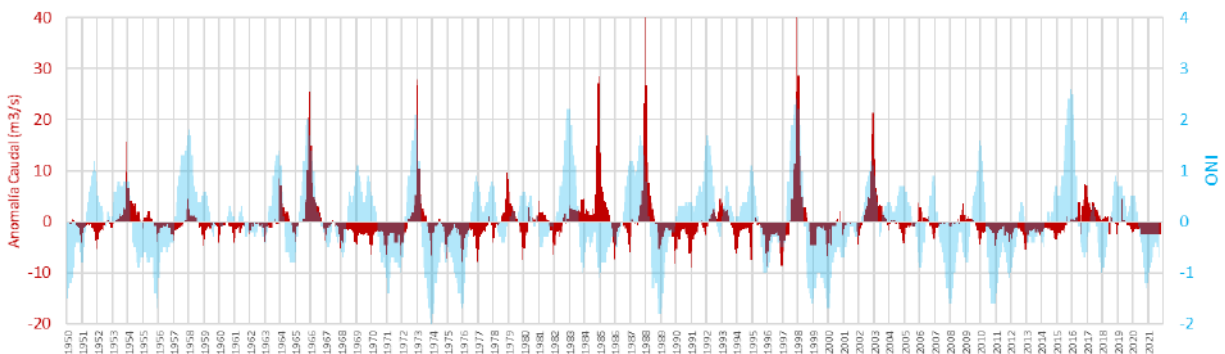


Figura 82: Anomalia del caudal del río Claro en Rivadavia, comparado con el índice Oceánico de El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Para el análisis de las precipitaciones en la cuenca, se encontraron 46 estaciones de registro, de las cuales se seleccionó por su localización, calidad y duración de registro (Tabla 12):

- Escuela Agrícola de La Serena, en las inmediaciones de la desembocadura.
- Aeropuerto La Florida, aguas arriba de la desembocadura.
- Río Elqui en Almendral, entre la desembocadura y aguas abajo del embalse Puclaro.
- Río Elqui en Rivadavia, aguas arriba del embalse Puclaro.

Tabla 12: Estaciones meteorológicas disponibles en la cuenca con datos de precipitaciones. Se destacan las seleccionadas por su longitud y calidad de registro para ser utilizadas en el presente análisis. Fuente: Elaboración propia.

N	Nombre Estación	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (m)	Año Inicio	Año Fin	Propietario
1	Faro Punta Tortuga	-29,933888	-71,342777	24	1969	2021	Armada
2	La Serena Oficina Meteorológica	-29,900000	-71,250000	32	1947	1954	DMC
3	La Serena Campex	-29,921388	-71,243055	96	1970	1975	DMC
4	Aeropuerto La Florida	-29,914444	-71,206666	137	1950	2021	DMC
5	El Molle Retén	-29,977777	-70,951944	370	1970	2010	DMC
6	El Tambo Retén	-30,040833	-70,814722	565	1970	1973	DMC
7	Vicuña INIA	-30,031110	-70,720832	605	1970	1980	DMC
8	Vicuña Comisaria	-30,036944	-70,710277	634	1979	2007	DMC
9	Vicuña D.O.S.	-30,030554	-70,699444	649	1959	1979	DMC
10	Vicuña Parque Los Pimientos	-30,033610	-70,697221	642	2017	2021	DMC
11	Diaguítas Retén, Vicuña	-30,022777	-70,634166	709	1970	1973	DMC
12	Rivadavia	-29,960000	-70,538055	900	2013	2013	DMC
13	Pisco Elqui	-30,028888	-70,517499	978	2002	2004	DMC
14	Paihuano Tenencia	-30,029721	-70,516111	982	1970	1985	DMC
15	Paiguano	-30,046944	-70,510833	1222	2020	2021	DMC
16	Pisco Elqui Fundo	-30,095277	-70,500833	1185	1959	1980	DMC
17	Pisco Elqui Retén	-30,123610	-70,493888	1245	1975	2011	DMC
18	Los Nichos Fundo	-30,156111	-70,496944	1337	1959	2021	DMC

N	Nombre Estación	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (m)	Año Inicio	Año Fin	Propietario
19	Huanta Retén	-29,847499	-70,388610	1216	1970	1980	DMC
20	Juntas El Toro Tenencia	-29,976388	-70,094166	2091	1980	2013	DMC
21	La Serena Escuela Agrícola	-29,906100	-71,255600	15	1971	2019	DGA
22	Río Elqui en Algarrobal	-29,995300	-70,586700	760	2011	2020	DGA
23	Río Claro en Rivadavia	-29,978100	-70,552500	825	2015	2020	DGA
24	Río Turbio en Varillar	-29,945800	-70,532800	890	2014	2019	DGA
25	Rivadavia	-29,977200	-70,561700	820	1940	2019	DGA
26	Monte Grande	-30,089400	-70,493900	1120	1958	2019	DGA
27	Vícuca INIA	-30,056700	-70,716700	730	1971	2019	DGA
28	Los Nichos	-30,147200	-70,498300	1330	1977	2019	DGA
29	La Ortiga	-30,193900	-70,481900	1560	1979	2019	DGA
30	Juntas	-29,976900	-79,094400	2150	1990	2018	DGA
31	La Laguna Embalse	-30,202300	-70,942200	3160	1964	2019	DGA
32	Cochiguaz	-30,141400	-70,404700	1560	1989	2019	DGA
33	Río Elqui en Almendral	-29,982200	-70,918600	370	1958	2019	DGA
34	El Jote	-30,405266	-70,279483	3360	2019	2021	CEAZA
35	Pisco Elqui	-30,129028	-70,494712	1240	2004	2021	CEAZA
36	Rivadavia	-29,961730	-70,539081	900	2010	2020	CEAZA
37	Vícuña	-30,038318	-70,696553	634	2004	2021	CEAZA
38	Gabriela Mistral	-29,978520	-71,080386	198	2004	2021	CEAZA
39	Cerro Grande	-29,938475	-71,223505	513	2015	2020	CEAZA
40	CEAZA	-29,915015	-71,242214	90	2014	2021	CEAZA
41	Llanos de Huanta	-29,827418	-7,354471	1696	2010	2020	CEAZA
42	La Laguna Elqui	-30,203112	-70,037224	3209	2013	2021	CEAZA
43	Llano de Las Liebres	-30,257406	-69,936986	3565	2017	2021	CEAZA
44	El Tapado	-30,158300	-69,908179	4306	2013	2021	CEAZA
45	Los Corrales	-30,161408	-69,875994	3982	2016	2021	CEAZA
46	Paso Agua Negra	-30,190704	-69,825530	4774	2014	2021	CEAZA

Los registros de precipitación en las inmediaciones de la desembocadura de la Estación Escuela Agrícola se inician el año 1971 y se interrumpen el año 2019. Se observa que la precipitación acumulada mensual no supera los 50 mm de agua caída en los meses de la estación lluviosa y en contadas ocasiones supera los 100 mm mensuales, llegando a un máximo el año 1992 (Figura 83).

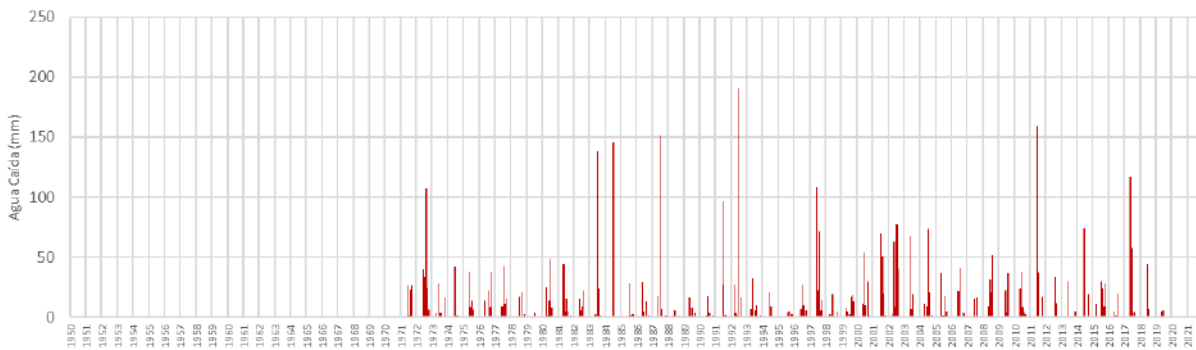


Figura 83: Precipitación acumulada mensual en la Estación Escuela Agrícola en las inmediaciones de la desembocadura del río Elqui. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Al revisar los valores acumulados anuales, la tendencia ajustada resulta positiva, presumiblemente por lo corto de la señal y la interrupción de los registros en los últimos años que han sido especialmente secos (Figura 84). Con todo se constata un aumento de la frecuencia de eventos diarios de precipitaciones intensas. La evolución de la estacionalidad (Figura 85), revela un adelanto en un mes (de julio a junio) de la ocurrencia del máximo de precipitaciones registradas en esta estación. Al igual que la señal de la anomalía de caudales, se observa que la anomalía de precipitaciones se comporta en forma disímil en épocas de superávit de precipitaciones que tienden a ser muy intensas pero cortas; con el déficit de precipitaciones, que tienden a perdurar en el tiempo, aunque los déficits no son tan dramáticos como los superávits. Además, se puede constatar que, en épocas cálidas de acuerdo al índice oceánico El Niño, normalmente se encuentra asociado a periodos extraordinariamente lluviosos; mientras que épocas frías, se encuentran vinculadas con déficit de precipitaciones (Figura 86).

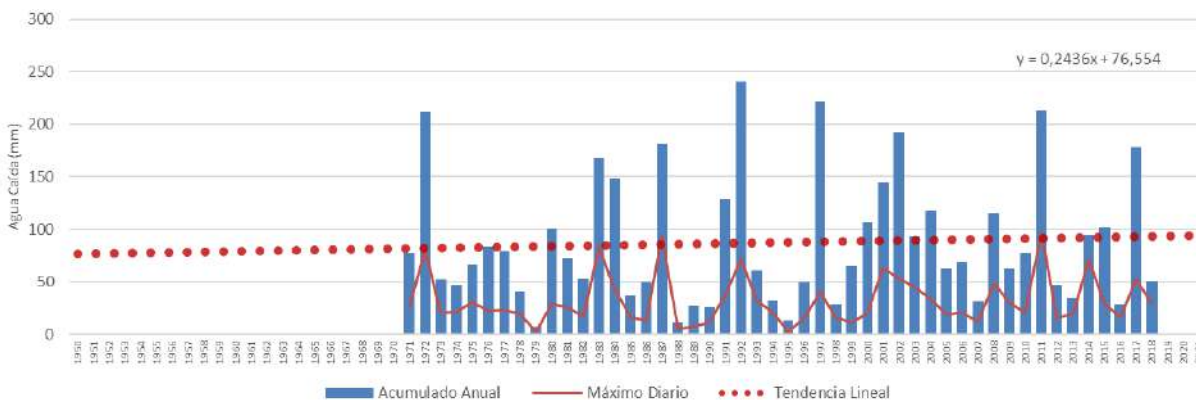


Figura 84: Precipitación acumulada anual registrada en la Estación Escuela Agrícola en las inmediaciones de la desembocadura del río Elqui. Se muestra además la tendencia lineal ajustada y los máximos diarios registrados por año. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.



Figura 85: Evolución de la estacionalidad de precipitaciones registrada en la Estación Escuela Agrícola en las inmediaciones de la desembocadura del río Elqui, por períodos de 30 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

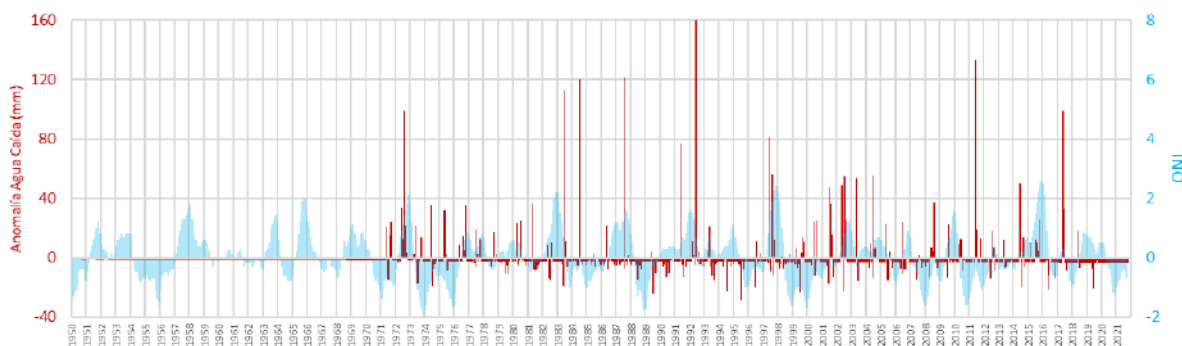


Figura 86: Anomalía de las precipitaciones registradas en la Estación Escuela Agrícola en las inmediaciones de la desembocadura del río Elqui, versus índice Oceánico El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

El registro de precipitaciones aguas arriba de la desembocadura, en la estación La Florida, se inicia el año 1950 y perdura hasta el día de hoy (Figura 87). Al analizar la tendencia lineal ajustada a las precipitaciones anuales, se observa una tendencia negativa (Figura 88). Por ser este registro el de mayor extensión y calidad, se asume que este comportamiento, de disminución de precipitaciones, es el que mejor representa la cuenca del Elqui. Nuevamente se constata un adelanto de un mes en el máximo de las precipitaciones (Figura 89) y un comportamiento de las anomalías asociadas con las fases cálida y fría del ONI (Figura 90).

El registro de la estación del río Elqui en el Almendral (Figura 91), se interrumpe en el año 2019 y presenta un vacío entre los años 1968 y 1972. Además, se inicia el año 1958. Estas tres circunstancias explican que en esta estación se estime una tendencia lineal positiva ajustada a las precipitaciones anuales acumuladas (Figura 92). Nuevamente se constata un adelanto en un mes del máximo de precipitaciones (Figura 93) y una relación entre ONI y las anomalías de las precipitaciones (Figura 94).

Por último, el registro de precipitaciones del río Elqui en Rivadavia se inicia el año 1954 y finaliza el año 2017 (Figura 95), lo que induce a estimar un ajuste lineal positivo en las precipitaciones (Figura 96), el cual seguramente se revertiría si se contará con los registros de los últimos años. Se constata un adelanto de julio a junio del máximo de precipitaciones (Figura 97) y anomalías que se encuentran explicadas por las fases cálida y fría del ONI (Figura 98), con un comportamiento similar a lo detectado en los caudales en este tramo de la cuenca.

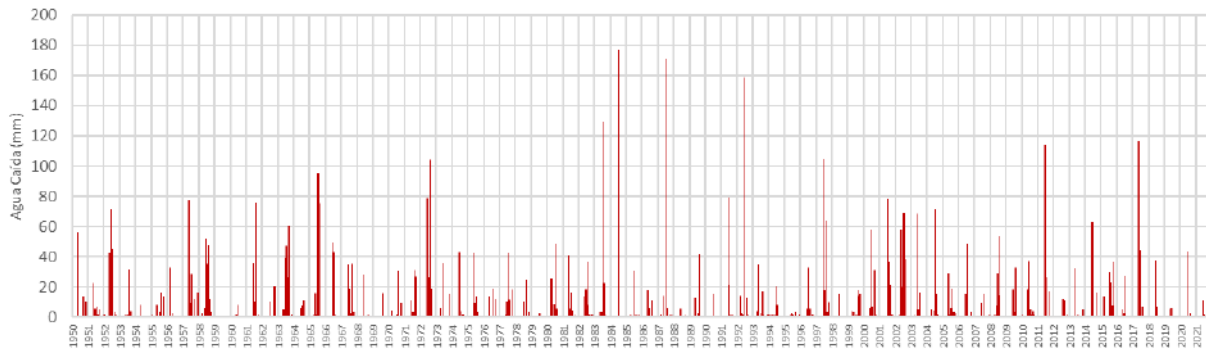


Figura 87: Precipitación acumulada mensual en la Estación La Florida aguas arriba de la desembocadura del río Elqui.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos DMC.

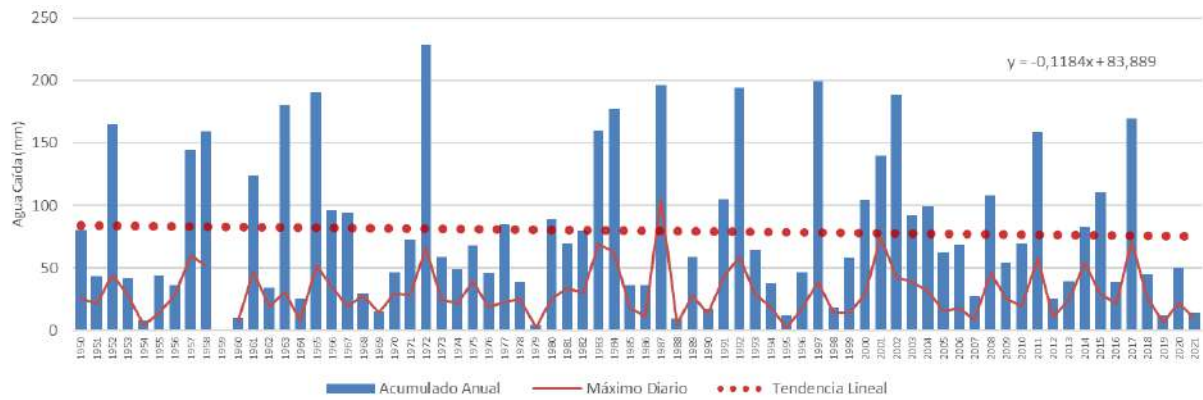


Figura 88: Precipitación acumulada anual registrada en la Estación La Florida aguas arriba de la desembocadura del río Elqui. Se muestra además la tendencia lineal ajustada y los máximos diarios registrados por año. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DMC.

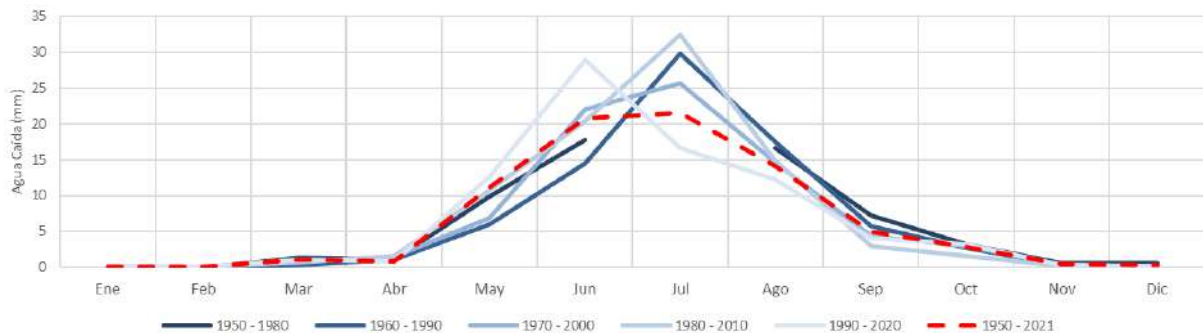


Figura 89: Evolución de la estacionalidad de precipitaciones registrada en la Estación La Florida aguas arriba de la desembocadura del río Elqui, por períodos de 30 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DMC.

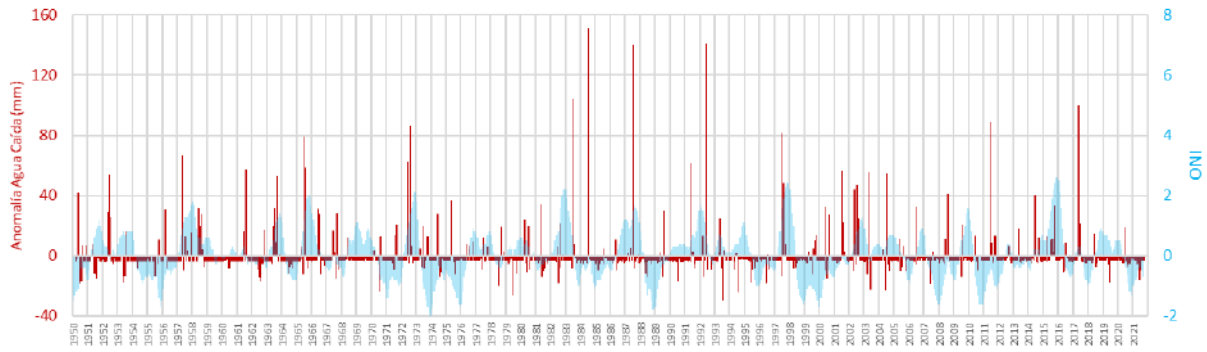


Figura 90: Anomalía de las precipitaciones registradas en la Estación La Florida aguas arriba de la desembocadura del río Elqui, versus índice Oceánico El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DMC.

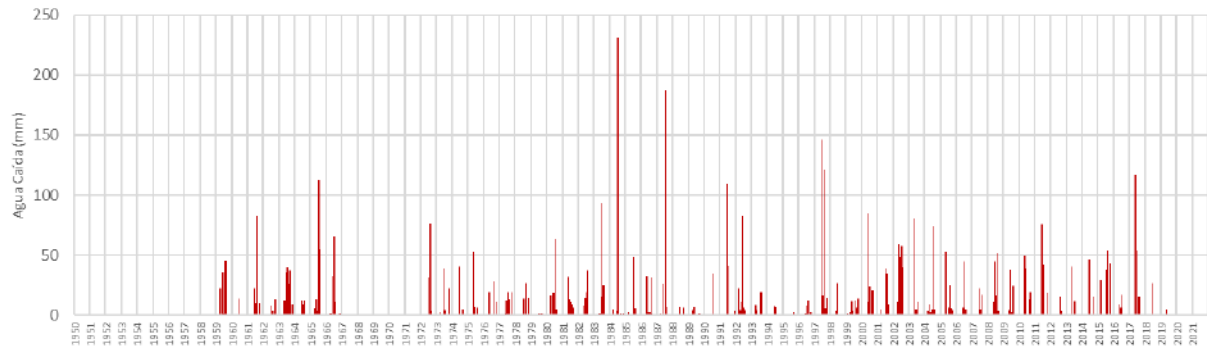


Figura 91: Precipitación acumulada mensual en la Estación Almendral aguas abajo del embalse Puclaro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

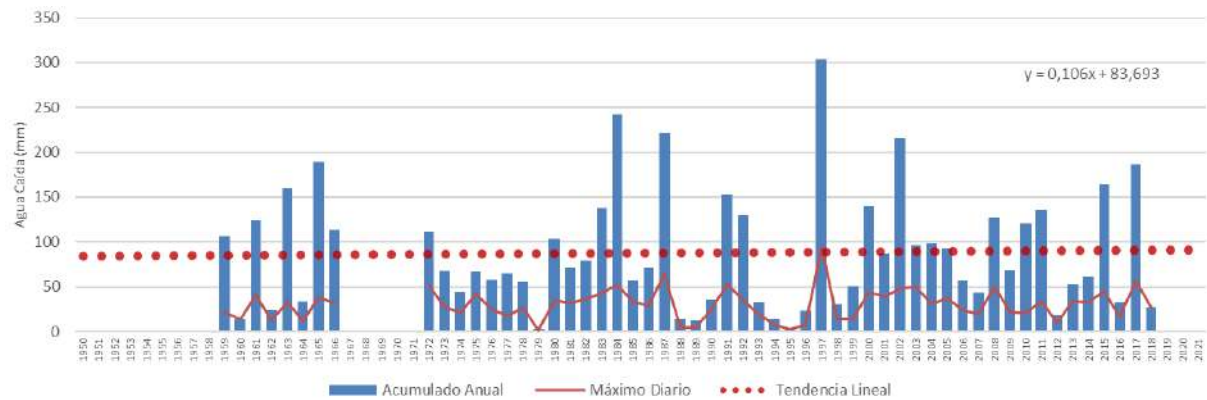


Figura 92: Precipitación acumulada anual registrada en la Estación Almendral aguas abajo del embalse Puclaro. Se muestra además la tendencia lineal ajustada y los máximos diarios registrados por año. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

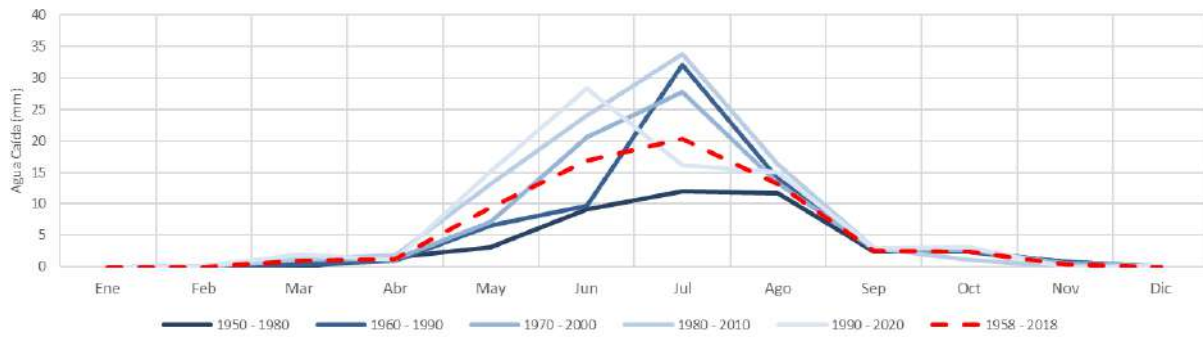


Figura 93: Evolución de la estacionalidad registrada en la Estación Almendral aguas abajo del embalse Puclaro, por períodos de 30 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

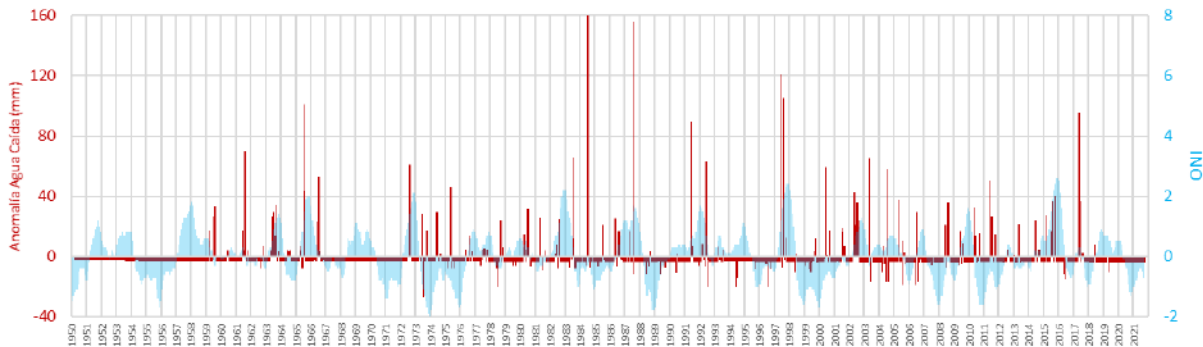


Figura 94: Anomalia de las precipitaciones registradas en la Estación Almendral aguas abajo del embalse Puclaro, versus índice Oceánico El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

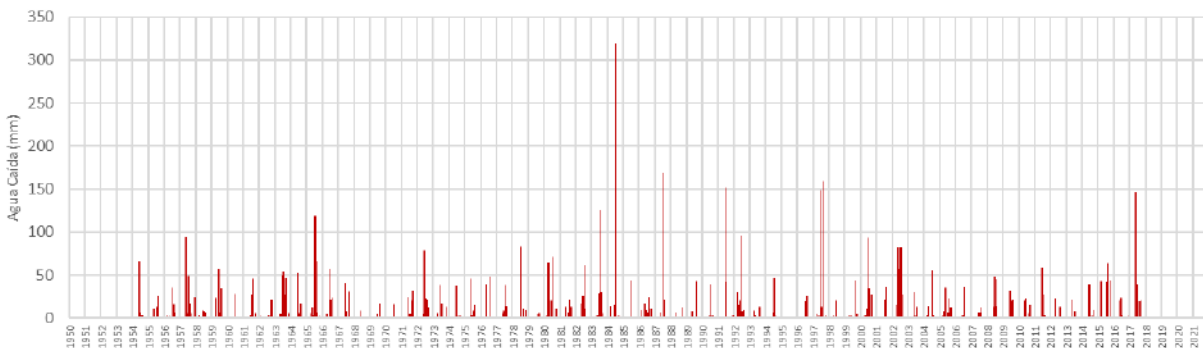


Figura 95: Precipitación acumulada mensual en la Estación Rivadavia aguas arriba del embalse Puclaro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

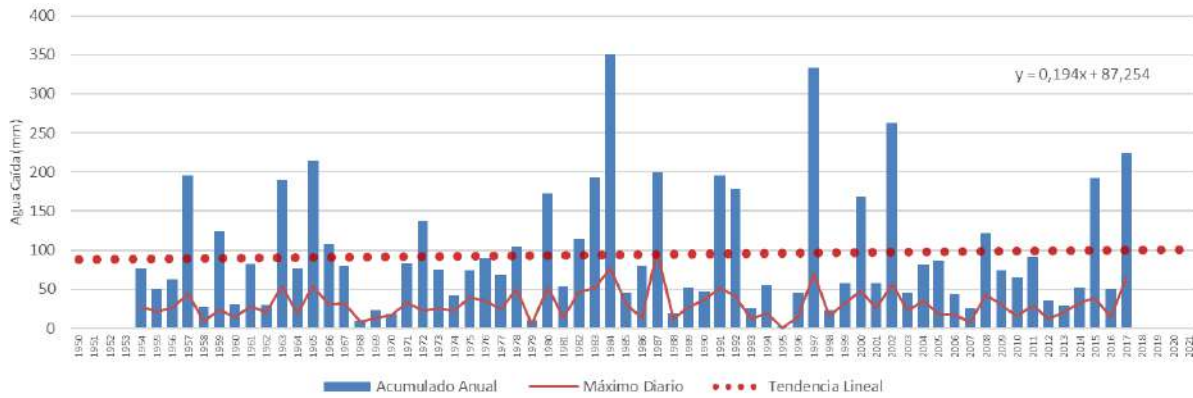


Figura 96: Precipitación acumulada anual registrada en la Estación Rivadavia aguas arriba del embalse Puclaro. Se muestra además la tendencia lineal ajustada y los máximos diarios registrados por año. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

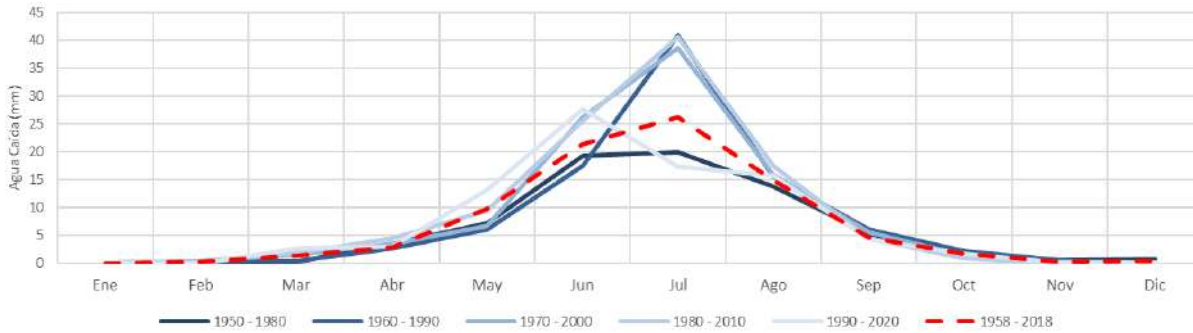


Figura 97: Evolución de la estacionalidad registrada en la Estación Rivadavia aguas arriba del embalse Puclaro, por períodos de 30 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

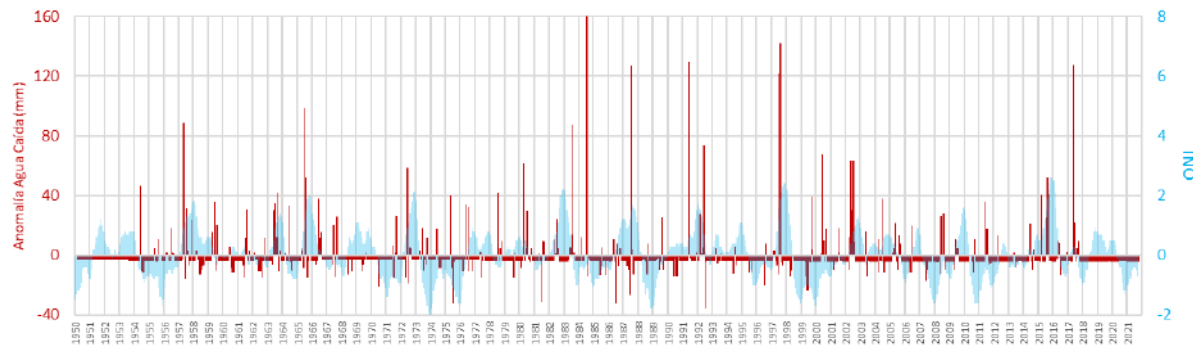


Figura 98: Anomalía de las precipitaciones registradas en la Estación Rivadavia aguas arriba del embalse Puclaro, versus índice Oceánico El Niño. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.



Al analizar la correlación existente entre ONI y las anomalías en las 4 estaciones de precipitaciones, se constata la evidente relación con las fases cálida y fría del índice oceánico El Niño: años lluviosos se encuentran vinculados con ONI positivo; años secos, ONI negativo. Sin embargo, se constata la existencia de notables excepciones: años La Niña pueden ser lluviosos; Años El Niño, pueden ser secos (Figura 99).

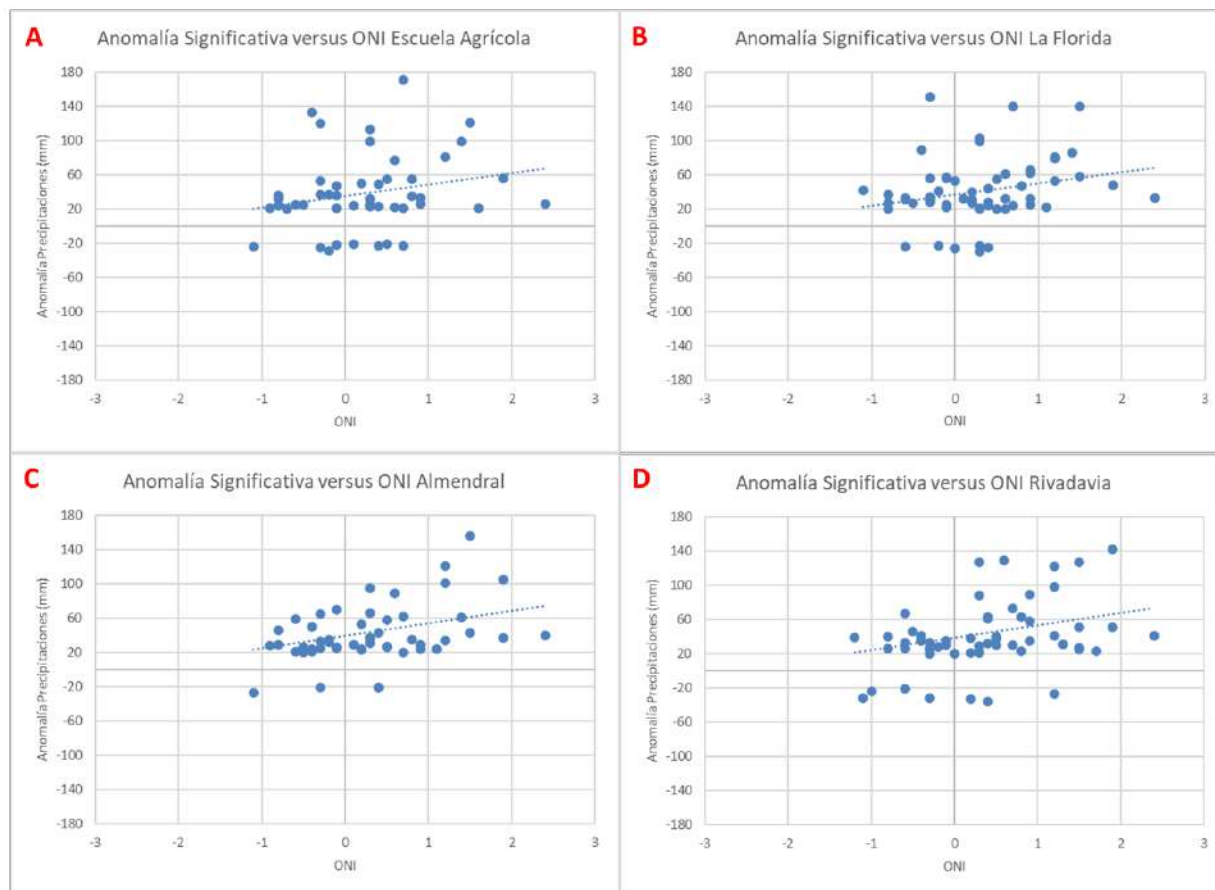


Figura 99: Comparación de las anomalías de precipitaciones versus el índice oceánico El Niño, junto a las rectas de regresión estimadas. A) Sector desembocadura Río Elqui. B) Aguas arriba de la desembocadura. C) Aguas abajo embalse Puclaro. D) Aguas arriba embalse Puclaro. Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.3 Revisión de información de pozos asociados al humedal

La Dirección General de Aguas tiene registro de niveles en 58 pozos a lo largo de la cuenca del río Elqui (Tabla 13). Varios de ellos se han interrumpido en el tiempo. Debido a su extensión, se escogió el pozo de Agua Potable Piedra C-17 (ver Fig. 100) para realizar un análisis de la tendencia en el tiempo de sus niveles (Figura 100). Los resultados muestran que a partir de la década 2010, el pozo ha profundizado drásticamente su nivel estático, pasando de niveles de 2 a 5 m a mediados del siglo 20 a valores superiores a 40 m en los últimos años. Este pozo se encuentra en las inmediaciones del río Elqui en el tramo medio de la cuenca comprendido entre la desembocadura y el embalse Puclaro (Figura 101). Al cruzar la distribución espacial de los pozos, con la base de datos del SII, se constata que el 8,5% de los pozos se encuentran emplazados en áreas urbanas, mientras que el 91,5% en predios rurales. Por destino del predio, se deduce que el 78,7% se emplaza en predios con destino agrícola, mientras que el resto se reparte en predios con destino habitacional, sitios eriazos, comercio, educación, entre otros (Figura 101).

Tabla 13: Pozos con registros de niveles mensuales disponibles en la cuenca de El Qui. Se destaca el pozo utilizado para el análisis. Fuente: Elaboración propia.

N	Código B.N.A:	Nombre Estación	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Año Inicio	Año Fin
1	04331017-8	Punta de Piedra C-12	-29,9605556	-71,1133333	1965	2021
2	04335008-0	A.P. La Serena	-29,8944444	-71,2430556	1952	2003
3	04335009-9	A.P. La Serena	-29,8938889	-71,2430556	1950	2003
4	04320007-0	A.P. Peralillo	-30,1136111	-70,6600000	1972	2021
5	04331007-0	A.P. Piedra	-29,9250000	-71,0911111	1900	2003
6	04331010-0	A.P. Piedra C-17	-29,9644444	-71,1061111	1900	2021
7	04331006-2	A.P. Piedra C-3	-29,9636111	-71,0911111	1900	2021
8	04320009-7	A.P. Vicuña	-30,0377778	-70,7055556	1968	2021
9	04331008-9	Alfalfares	-29,9258333	-71,1644444	1900	2021
10	04320004-6	Algarrobal	-29,9991667	-70,5891667	1970	2021
11	04331015-1	Algarrobito	-29,9402778	-71,1400000	1972	2003
12	04331018-6	Algarrobito	-29,9405556	-71,1327778	1972	2003
13	04323009-3	Almendral	-29,9866667	-70,8922222	1973	2021
14	04323010-7	Almendral	-29,9666667	-70,8805556	1973	2003
15	04323008-5	Almendral 1	-29,9666667	-70,8833333	1973	2003
16	04331009-7	Altovalsol	-29,9236111	-71,0916667	1900	2003
17	04331011-9	Altovalsol	-29,9236111	-71,0930556	1900	2003
18	04331016-K	Asentamiento Gabriela Mistral	-29,9916667	-71,0194444	1971	2003
19	04320010-0	Asentamiento Victoria	-30,0305556	-70,7172222	1968	2003
21	04320012-7	Asentamiento Victoria	-30,0055556	-70,6783333	1900	2003
21	04320011-9	Asentamiento Victoria B-13	-30,0311111	-70,7430556	1972	2021
22	04314006-K	Asentamiento Huracán	-29,9888889	-70,5861111	1972	2003
23	04307001-0	Bocalume	-29,8561111	-70,5008333	1970	2021
24	04335010-2	Caleta San Pedro	-29,8805556	-71,2622222	1970	2003
25	04335005-6	Chda. de Peñuelas N°1 (La Pampa)	-29,9511111	-71,2513889	1971	2003
26	04335007-2	Chda. de Peñuelas N°2	-29,9505556	-71,2666667	1972	2003
27	04320006-2	Diaguitas	-30,0247222	-70,6344444	1970	2021
28	04323011-5	El Molle	-29,9802778	-70,9547222	1971	2021
29	04331013-5	El Rosario	-29,9888889	-71,0616667	1900	2021
30	04321003-3	El Tambo A-1	-30,0327778	-70,7577778	1969	2021
31	04321002-5	El Tambo B-9	-30,0358333	-70,7425000	1971	2021
32	04308005-9	Escuela Rivadavia	-29,9805556	-70,5619444	1980	2021
33	04331012-7	Gabriela Mistral	-29,9277778	-71,0111111	1900	2003
34	04321005-K	Gualliguayca	-30,0250000	-70,8000000	1974	2003
35	04320015-1	Hacienda Huancara B-2	-30,0338889	-70,7350000	1900	2021
36	04320016-K	Hacienda Huancara B-8	-30,0322222	-70,7250000	1900	2021
37	04320013-5	Huancara B-17	-30,0316667	-70,7286111	1900	2021
38	04335004-8	La Antena 1	-29,9011111	-71,1838889	1973	2003
39	04335003-K	La Antena 2	-29,9000000	-71,2172222	1973	2003
40	04335006-4	La Pampa	-29,8666667	-71,2583333	1971	2003

N	Código B.N.A:	Nombre Estación	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Año Inicio	Año Fin
41	04314004-3	Monte grande	-30,1002778	-70,4916667	1975	2021
42	04330001-6	Pelicana	-29,9888889	-70,9916667	1980	2003
43	04320014-3	Pueblo Andacollito	-30,0241667	-70,6272222	1900	2021
44	04314005-1	Pueblo de Paihuano	-30,0263889	-70,5111111	1972	2021
45	04334002-6	Pueblo El Islón	-29,8988889	-71,1908333	1900	2021
46	04321004-1	Pueblo El Tambo	-30,0277778	-70,7794444	1966	2021
47	04321006-8	Pueblo Gualliguyaca	-30,0025000	-70,7638889	1900	2003
48	04320005-4	Pueblo La Campana	-30,0158333	-70,6138889	1972	2021
49	04331005-4	Pueblo Las Rojas	-29,9786111	-71,0600000	1972	2021
50	04308004-0	Pueblo Rivadavia	-29,9772222	-70,5586111	1981	2021
51	04311006-3	Quebrada de Paihuano	-30,1805556	-70,4700000	1970	1987
52	04314007-8	Quebrada Paihuano	-30,0294444	-70,4688889	1970	2021
53	04331014-3	Quebrada Talca	-30,0013889	-71,0350000	1900	2021
54	04320008-9	San Isidro	-30,0291667	-70,6913889	1972	2021
55	04304003-0	Tambillos	-30,0819444	-70,2305556	1969	2003
56	04323012-3	Tranque Puclaro	-29,9988889	-70,8513889	1900	2003
57	04323013-1	Tranque Puclaro	-29,9988889	-70,8533333	1900	2003
58	04308006-7	Varillar	-29,9455556	-70,5361111	1900	2021

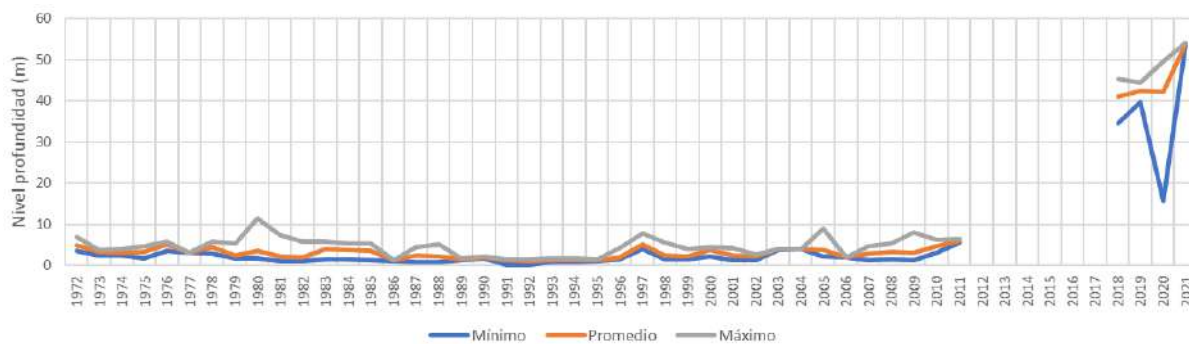


Figura 100: Evolución temporal del nivel estático registrado en el Pozo Agua Potable Piedra C-17. Se muestran el nivel mínimo, promedio y máximo anual. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

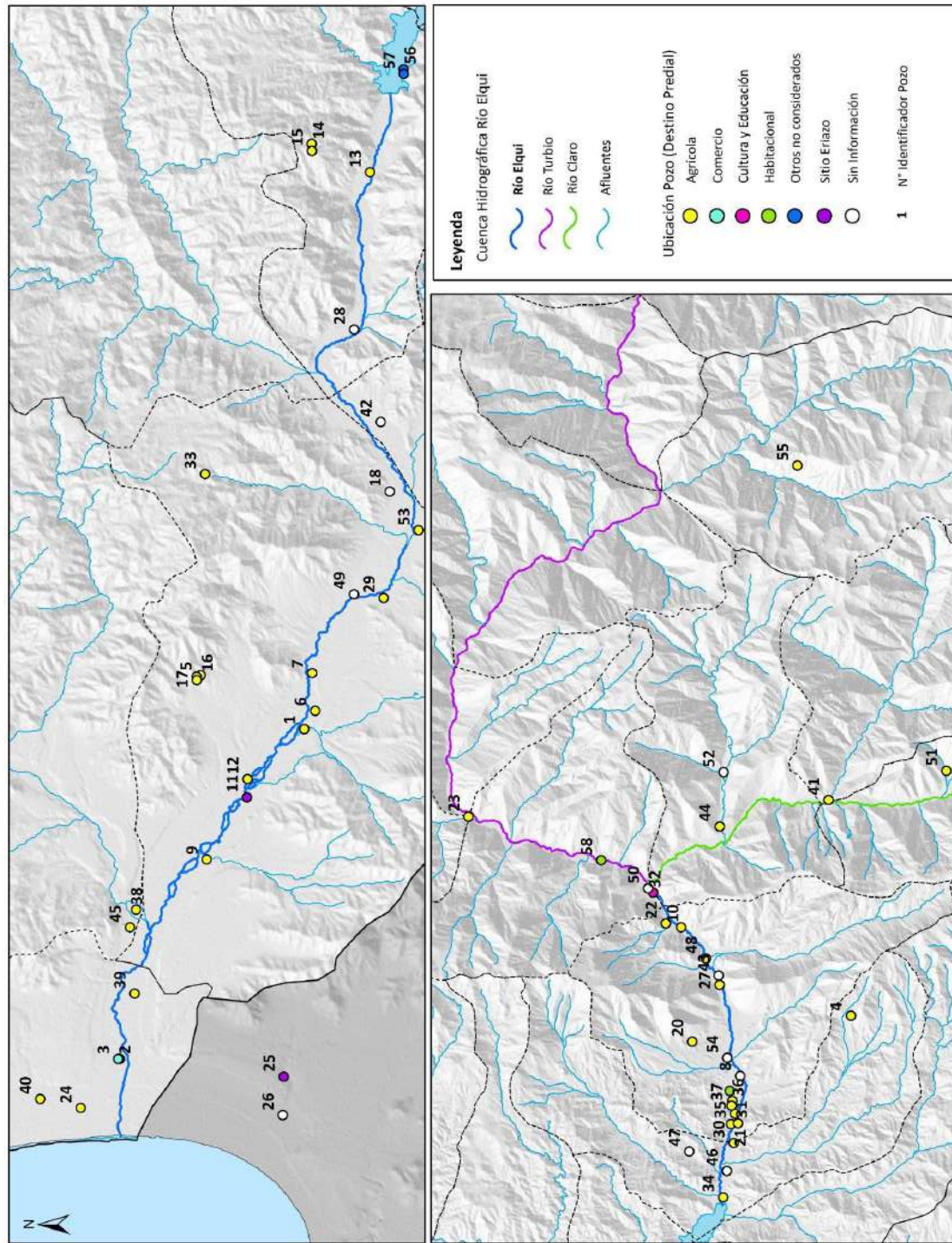


Figura 101: Distribución espacial de los pozos de la cuenca del río Elqui, clasificados según el destino del predio en el que se encuentran. Fuente: elaboración propia a partir de datos DGA y del SII.



### 5.1.4 Revisión condición administrativa de acuíferos asociados al humedal

Al revisar la condición administrativa de los acuíferos de la cuenca del río Elqui, se constata que el humedal se emplaza en una zona de restricción hídrica (Figura 102).

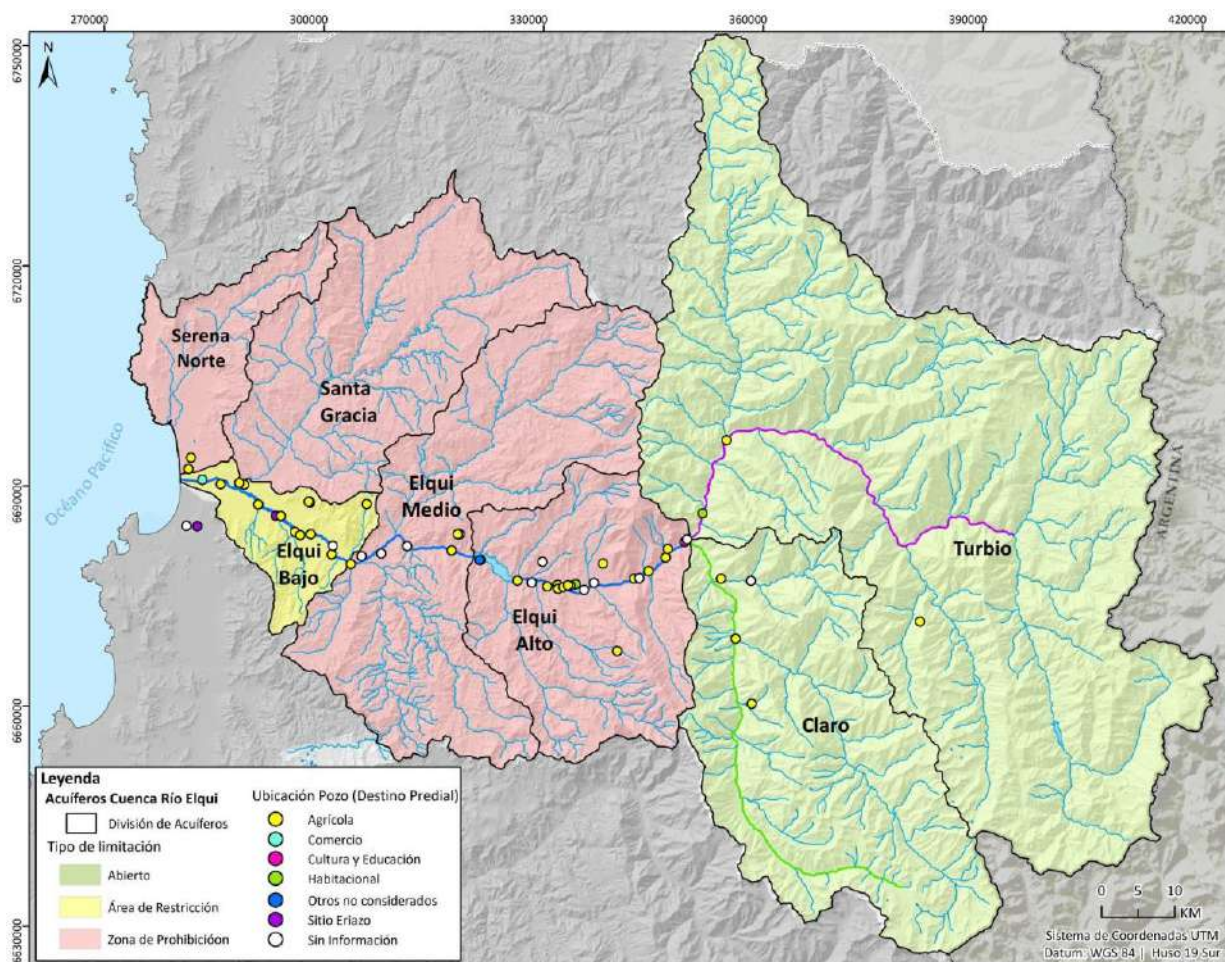


Figura 102: Delimitaciones a los acuíferos en la cuenca del río Elqui. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

### 5.1.5 Análisis de marea

La marea observada en la bahía de Coquimbo corresponde a una marea mixta principal semidiurna, con coeficiente de Courtier  $F = 0,440$  (Tabla 14), una amplitud máxima de 1,825 m y con nivel medio del mar a 0,902 m (Tabla 14) con respecto al Nivel de Reducción de Sonda (N.R.S.). En la Figura 103 se representan los planos de marea.

Tabla 14: Amplitudes (m) de constituyentes armónicos de marea estimados para Playa La Serena. Fuente: INH (2000) y el Puerto de Coquimbo. Fuente Elaboración propia a partir de datos SHOA.

Constituyente	Símbolo	INH (2020)	Este estudio (datos SHOA)
Declinación Luni-Solar	$K_1$	0,153	0,152
Diurna Lunar Principal	$O_1$	0,089	0,087
Lunar Principal	$M_2$	0,414	0,422
Solar Principal	$S_2$	0,132	0,121
Courtier	F	0,443	0,440

Tabla 15: Valores No Armónicos de marea estimados para playa La Serena. Fuente: INH (2000) y el Puerto de Coquimbo. Fuente Elaboración propia a partir de datos SHOA.

Plano de Marea	INH (2020)	Este estudio (datos SHOA)
Pleamar máxima	1,829	1,827
Altura media pleamar máxima	1,492	1,491
Altura media pleamar	1,393	1,392
Nivel medio del Mar	0,906	0,902
Nivel medio de la marea	0,898	0,893
Altura media de la bajamar	0,369	0,365
Altura media de la bajamar mínima	0,411	0,320
Nivel Reducción de Zonda (baja mar mínima)	0,000	0,002
Amplitud Máxima de la marea	1,829	1,825

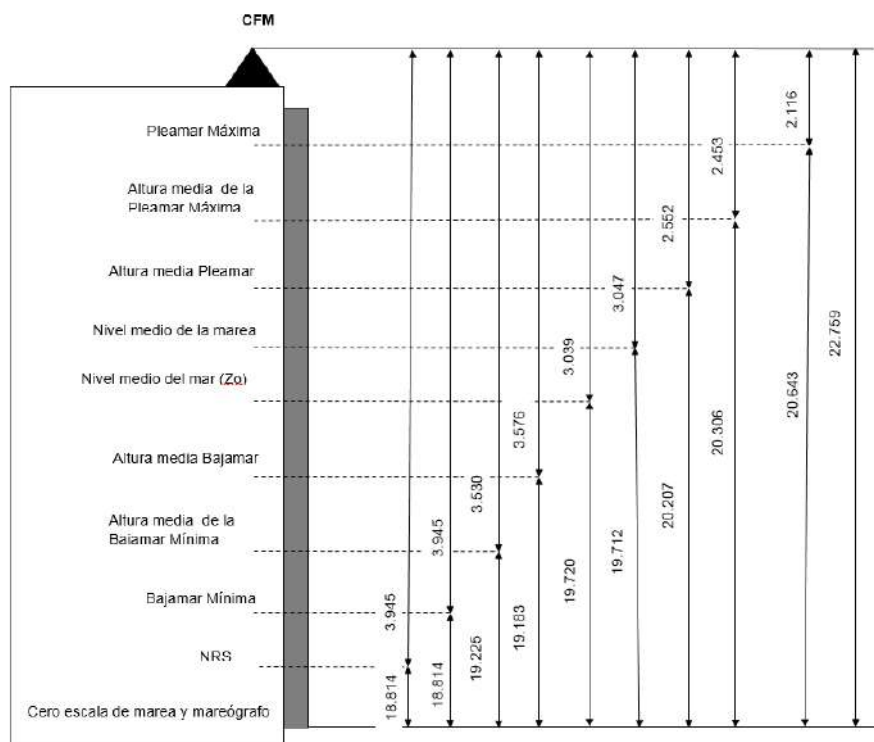


Figura 103: Planos de marea para bahía de Coquimbo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos SHOA.



### 5.1.6 Análisis del nivel del mar a largo plazo (actividad adicional)

A diferencia de la tendencia lineal estimada para el nivel medio del mar, con anterioridad al sismo Mw 8.3 del 16 de septiembre de 2015 que era negativa, el registro del mareógrafo SHOA en el Puerto de Coquimbo muestra una leve tendencia positiva (incremento de 0,46 mm/año). Este cambio en la tendencia se debe a fluctuaciones del nivel del mar entre 90 a 105 cm en los últimos años (2015 en adelante), mientras que en el pasado fluctuaba entre 80 a 100 cm (Figura 104). En años de ocurrencia de evento El Niño (1982/83, 1997/98, 2002) se aprecia un notable incremento del nivel del mar, de hasta 30 cm. Mientras que en años La Niña (1986/87, 1999/2000, 2007/08), se observa un descenso de hasta 20 cm.

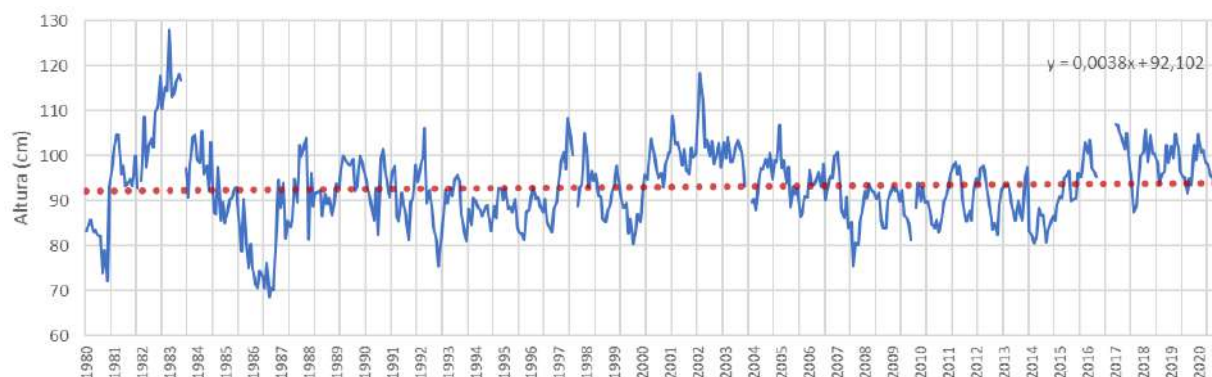


Figura 104: Evolución del Nivel Medio del Mar en el Puerto de Coquimbo entre 1980 a 2020 y tendencia lineal estimada. Fuente: Elaboración propia a partir de datos SHOA.

El NMM en la región de Coquimbo sufre además una pequeña fluctuación estacional de unos 5 cm, alcanzando un máximo en febrero y un mínimo en agosto (Figura 105). Esta fluctuación es equivalente a un avance o retroceso en unos 15 años del efecto del cambio climático para el NMM en la zona (Contreras-López *et al.* 2017b) y se puede superponer a otros fenómenos como El Niño-Oscilación Sur (ENSO), capaz de modificar en algunas decenas de cm el NMM (Contreras *et al.* 2012), y las variaciones rítmicas semidiurnas asociadas a la marea astronómica que provocan cambios del orden de 1,3 metros entre la pleamar y la bajamar (SHOA 2016). Si esto se suma a la ocurrencia de una marejada, con olas superiores a 2 o 3 m, los efectos pueden ser devastadores en la desembocadura del río Elqui, tal como ocurrió en agosto de 2015 (Winckler *et al.* 2017) y generar sobrepasos importantes de agua de mar al interior del humedal. Es por lo que, el modelo hidrodinámico para la desembocadura del humedal consideró una situación futura con el NMM más alto que el actual (3.4.4.4). Para ello, las proyecciones de aumento del nivel del mar a mediados (2026-2045) y finales de siglo (2081-2100), para Coquimbo se reportaron aumentos de 14 cm y 58 cm respectivamente MMA (2019b) (Figura 106). Se hizo uso de este dato de aumento de nivel del mar a finales de siglo para las simulaciones con horizonte temporal futuro de la desembocadura del río Elqui.

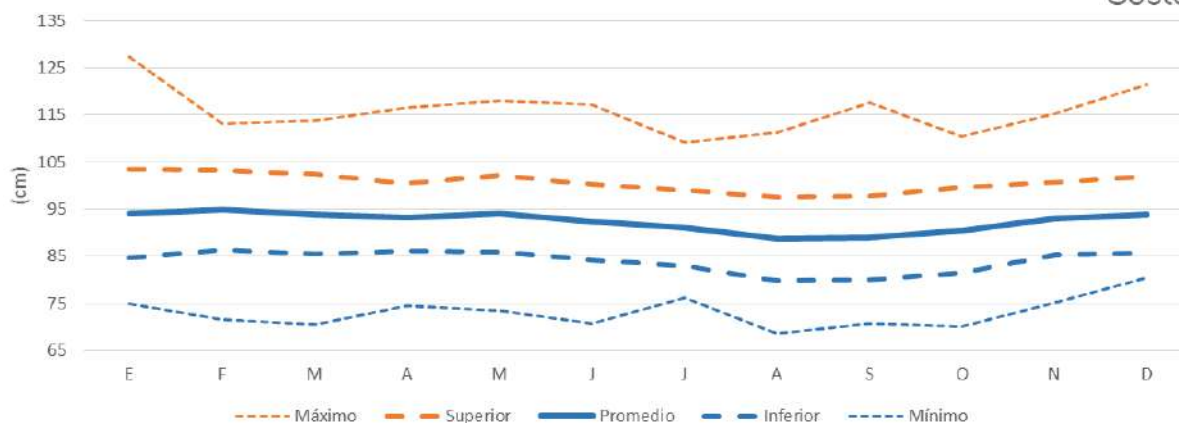


Figura 105: Estacionalidad del NMM en el Puerto de Coquimbo. Promedios 1980 – 2016. Fuente: Contreras *et al.* (2019).

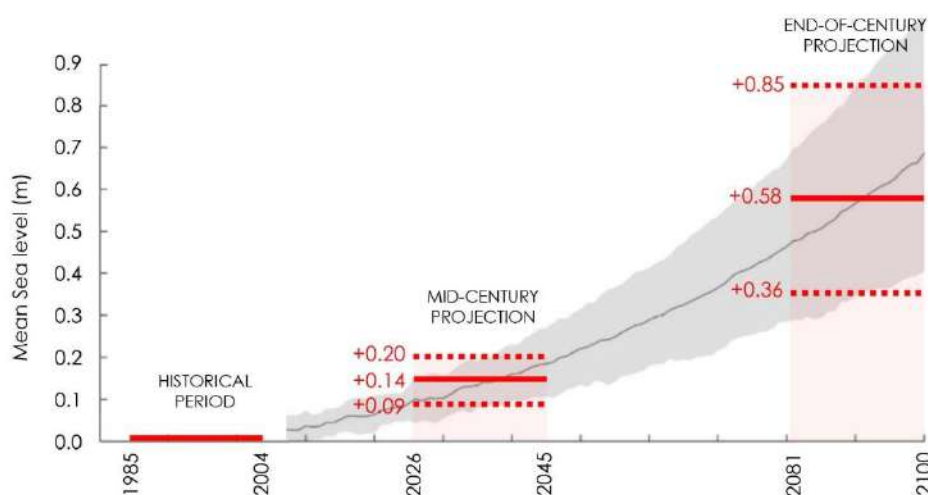


Figura 106: Aumento del nivel del mar proyectado para Coquimbo. Fuente: MMA (2019b).

### 5.1.7 Análisis del oleaje (actividad adicional)

En la Figura 107, se muestra una estimación del número de marejadas anormales o extremas que han ocurrido frente a Los Vilos entre 1980 y 2015 (el nodo más cercano a la Bahía de Coquimbo), a partir de datos del Atlas de Olas para Chile (Beyá *et al.* 2017). Se puede apreciar un sutil incremento del 30% en estos sucesos extremos. Así, el número de marejadas anormales se estaría incrementando como efecto del cambio climático (Martínez *et al.* 2017) y por lo tanto su capacidad erosiva. Esto se condice con el registro de estados de mar llevados a partir de abril de 2020 en el Faro Punta Tortuga. Al graficar el promedio mensual de la altura significativa de oleaje registrado, se observa un incremento de los valores medios (Figura 108). De esta forma, el humedal de la desembocadura del río Elqui se puede encontrar amenazado por el incremento de las marejadas.

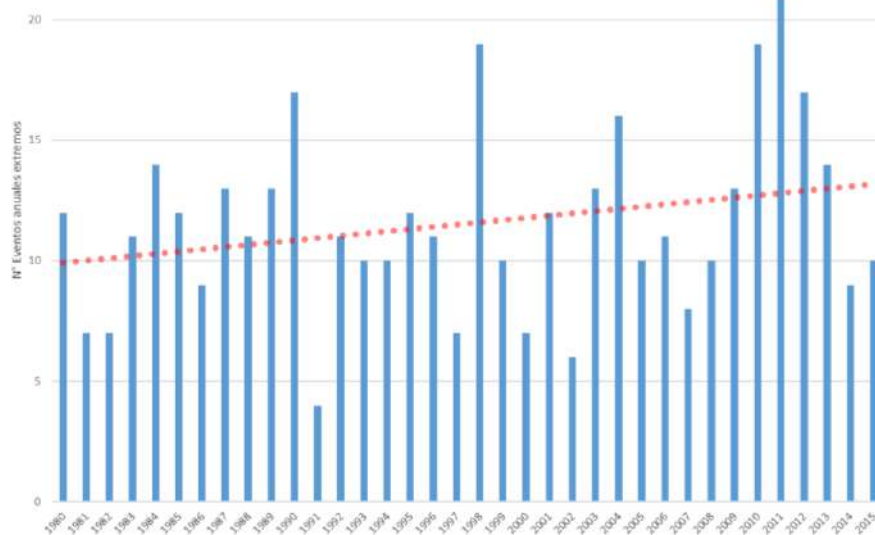


Figura 107: Número de marejadas anuales entre 1980 a 2015 estimadas frente a Los Vilos a partir del oleaje reconstruido por el Atlas de Olas para Chile.

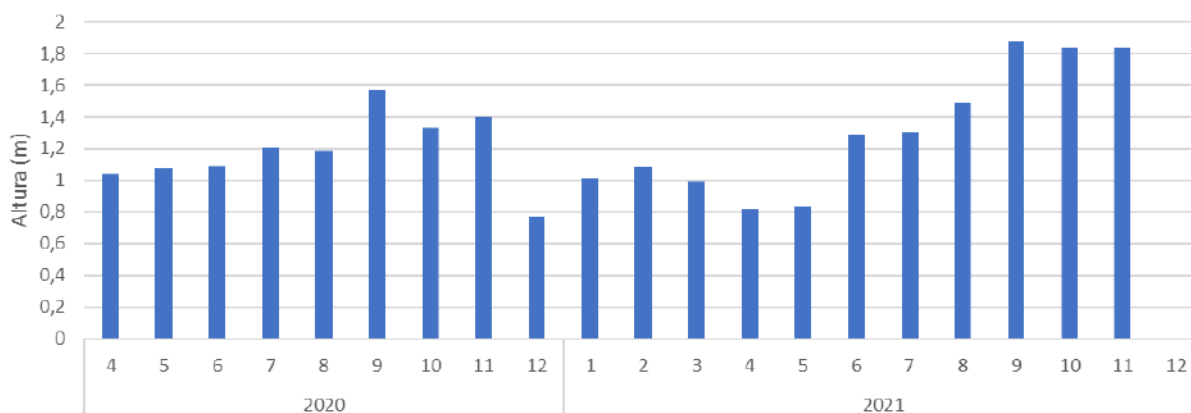


Figura 108: Evolución del promedio mensual de la altura significativa de oleaje registrado en el Faro Punta Tortuga, Coquimbo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DMC.

Para efectos del oleaje extremo en las proximidades de la desembocadura del río Elqui, se presentan los datos obtenidos en el estudio INH (2020). En este estudio se analizó el oleaje extremo en el Nodo 35 (Figura 109) obteniéndose parámetros de altura de ola para distintos periodos de retorno. Para el uso en el presente estudio se consideró la altura de ola con período de retorno de 100 años ( $H_s = 5\text{m}$ ), trasladándose ese dato proporcionalmente al nodo 34 (más cercano a la desembocadura) y quedando la altura con período de retorno de 100 años en  $H_s = 6\text{m}$ . Este último dato es el considerado para las simulaciones con influencia del oleaje. Tanto el periodo como la dirección del oleaje se mantienen respecto de lo analizado en INH (2020) con  $T_p = 13,7\text{ s}$  y dirección de  $268,7^\circ$ . La razón por la que fue considerado un período de retorno de 100 años es porque este oleaje puede asimilarse al evento extremo ocurrido durante el 8 de agosto de 2015, el más intenso reportado en el pasado reciente.



Nodo	Promedio altura significativa (m)	Promedio periodo peak (s)	Promedio dirección peak (grados)
30	1.3	13.4	253.0
31	1.1	13.4	268.3
32	1.4	13.6	267.1
33	1.3	13.6	262.0
34	1.2	13.7	268.7
35	1.0	13.7	275.8
36	0.8	13.7	286.9
37	0.5	13.7	310.1

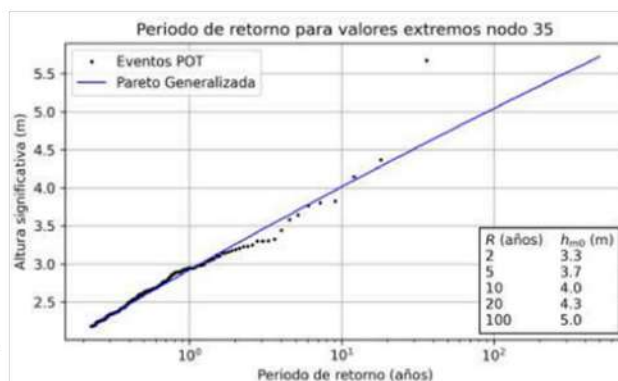


Figura 109: Análisis de oleaje extremo para la bahía de Coquimbo. Fuente: INH (2020).

### 5.1.8 Representación entradas y salidas de agua del humedal

Para construir la representación de las entradas y salidas de agua del humedal, se debe tener presente que éste se encuentra en la desembocadura de una compleja y extensa cuenca que se inicia en la cordillera de Los Andes, con diversos aportes de efluentes asociados a subcuencas y acuíferos (Figura 110), conformando una compleja red hidrográfica. Actualmente, la cuenca del río Elqui se encuentra regulada por dos embalses: La Laguna y El Puclaro. Para el humedal, se considera sólo el Puclaro como sistema regulador en la práctica. Además de los aportes de ríos y quebradas, también se cuenta con descargas directas al humedal, las cuales no son posibles de identificar y cuantificar debido a la intermitencia y falta de información de estas<sup>25</sup>. Por último, se debe tener en cuenta el aporte de las precipitaciones.

<sup>25</sup> Por ejemplo, se cree que existe comunicación subterránea entre las subcuencas El Romeral y la desembocadura del Río Elqui. Existiendo una discusión abierta sobre el aporte de la subcuenca El Romeral, en el sentido si toda la subcuenca desemboca en Punta Teatinos o solo una parte lo realiza en dicho lugar y el resto en la desembocadura del Elqui; además no existen registros en los últimos años de los caudales en las inmediaciones de la desembocadura.

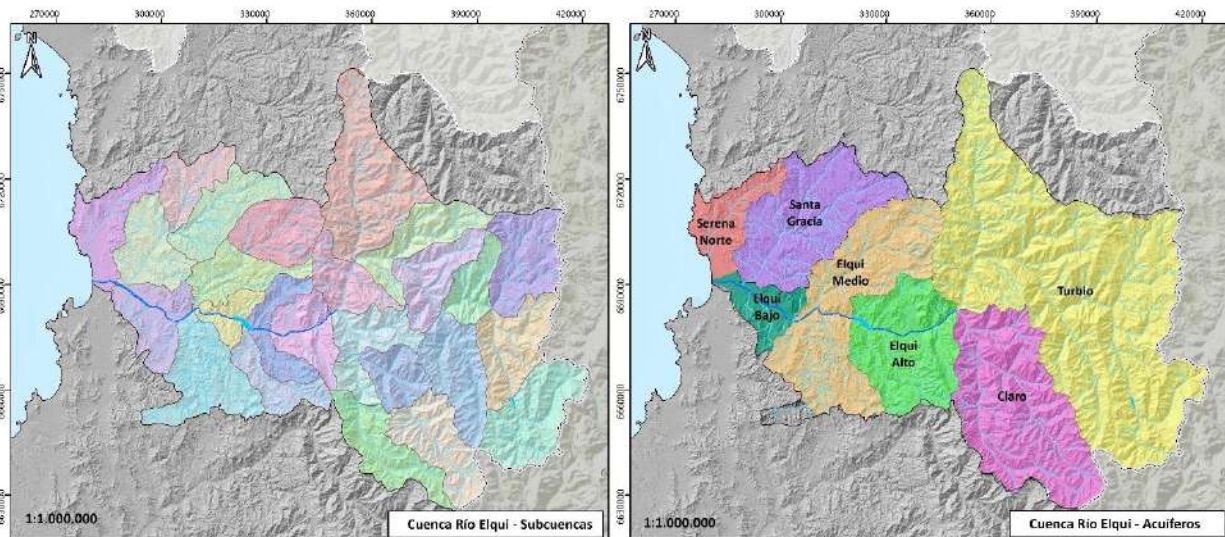


Figura 110: Subcuencas potencialmente aportantes y Acuíferos del Río Elqui. Se incluye la Quebrada El Romeral, para la cual no existe consenso si es o no un aporte al río Elqui. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

En el sector costero se tiene un aporte y una salida: El aporte es debido a la marea cuando actúa en conjunto con marejadas, provocando sobrepaso, mientras que las salidas son identificadas por eventos puntuales de apertura natural o artificial de la barra de arena. Además, se deben considerar las pérdidas por evaporación y los aportes por descarga de acuíferos.

La Figura 111 muestra el esquema de entradas y salidas de agua al humedal, así como las secciones principales de aporte de la cuenca. Para el sector continental, el tramo de línea discontinua del Río Elqui en la entrada del humedal representa la desconexión superficial entre ambos sistemas, mientras que la línea discontinua de la Quebrada El Romeral representa la falta de información respecto de si son o no sistemas realmente conectados en ese punto.

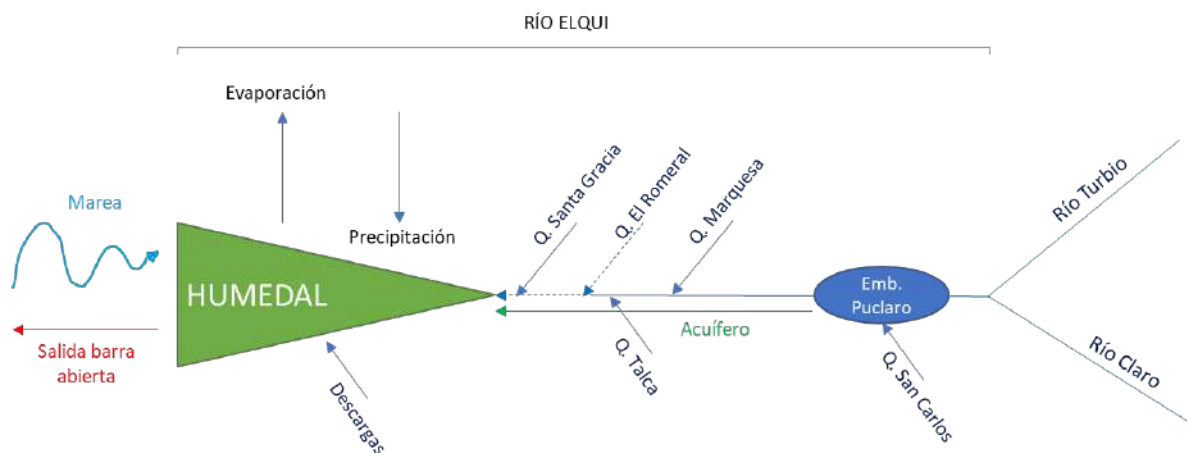


Figura 111: Esquema unifilar de entradas y salidas de agua al humedal. Bajo el principio precautorio, se ha incluido la Quebrada El Romeral, aun cuando no existe consenso si es o no un aporte al río Elqui. Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.9 Comportamiento hidrológico e hidrodinámico del humedal

En el presente apartado se centra en explicar los comportamientos asociados a las pérdidas reportadas por apertura de la barra, dejando el análisis del más profundo sobre el comportamiento hidrodinámico en la sección 5.2.

Se cuantificó la potencial descarga del humedal al mar, aprovechando la apertura artificial realizada en los primeros días de octubre de 2021 y su posterior cierre. Esto permitió realizar un seguimiento de los retrocesos de la ribera de la desembocadura, impulsados por la pérdida de agua vertida al mar y la evaporación (durante esos días no se registraron precipitaciones y el río Elqui interrumpía su flujo superficial a la altura del puente de la carretera 5 norte). Al vincular dichos retrocesos medidos en las fechas, 7 y 9 de octubre y 11 de noviembre (líneas en Figura 112) con la batimetría levantada en terreno el 4 de septiembre, es posible estimar las pérdidas por evaporación y apertura (Tabla 16).

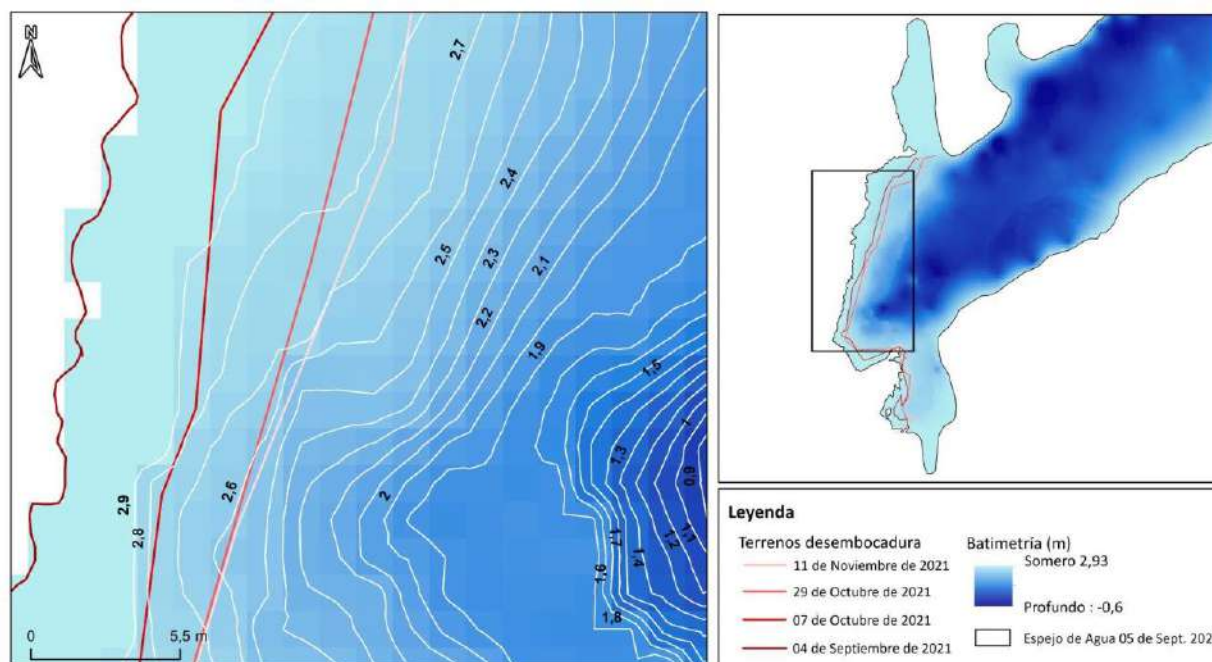


Figura 112: Evolución (retroceso) de la ribera de la desembocadura por evaporación y por apertura de la barra. Fuente: Elaboración propia en base a los datos levantados en terreno.

Tabla 16: Pérdidas debidas a apertura artificial de la barra y evaporación para tres períodos de tiempo durante el desarrollo de esta consultoría. Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Intervalo	Tipo de pérdida	Profundidad de pérdida (cm)	Volumen de pérdida (m <sup>3</sup> )
04/09/21	33 días	Apertura barra (72 horas)	15	13800
07/10/21		Evaporación		7400
07/10/21	22 días	Evaporación	5	5800

Fecha	Intervalo	Tipo de pérdida	Profundidad de pérdida (cm)	Volumen de pérdida (m3)
29/10/21				
29/10/21	12 días	Evaporación	2	2200
11/11/21				

### 5.1.10 Contribución de cauces

Para simulaciones, se obtuvieron los datos representativos de caudales, tanto líquidos como sólidos, para las situaciones de año seco, año normal y año húmedo.

Para un **año seco** se consideran los caudales mínimos registrados en la estación Río Elqui en la Serena (la más cercana a la desembocadura), los cuales son  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  al año de caudal líquido (Figura 68) con una carga sedimentaria de  $0 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Para el **año normal**, se consideran las anomalías de las precipitaciones mensuales para identificar los años. Para ello se tomó como referencia el registro de precipitaciones en la estación La Florida (Figura 90) entre enero 1970 y diciembre 2021. Para cada mes del año, se calculó la anomalía restando a las precipitaciones mensuales totales el promedio histórico (1970 – 2021) de dicho mes. Las anomalías mensuales se acumularon para obtener un índice de anomalía anual de precipitaciones, el que permitió definir los años en una escala semi-cuantitativa, donde el año normal queda definido como:

- Anomalías superiores a  $-25 \text{ mm}/\text{año}$  e inferiores a  $+25 \text{ mm}/\text{año}$
- Intervalo del 67% de confianza, correspondiente a una anomalía inferior a una desviación estándar

Los años normales identificados resultaron ser los siguientes: 1971, 1973, 1975 – 1977, 1980, 1989, 1999 – 2000, 2003-2004, 2006, 2008 – 2010, 2013-2014 y 2020.

Por último, para **año húmedo** se hizo uso del máximo caudal anual registrado en la estación Río Elqui en la Serena, el cual corresponde con un caudal de  $32 \text{ m}^3/\text{s}$  registrado el año 2001. Respecto de la carga sedimentaria, del estudio del INH (2020) se comprobó la existencia de un único evento de flujo detrítico el año 2001, el cual correspondía con una carga sedimentaria de  $1400 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

### 5.1.11 Conceptualización del modelo hidrodinámico del humedal

A priori se espera que el comportamiento hidrodinámico del humedal responda principalmente al forzante viento en aquellas simulaciones sin interacción con el océano y para año seco, mientras que para año normal y año húmedo se espera que la hidrodinámica responda al flujo de entrada desde el río Elqui al humedal, con direcciones principalmente desde el río a la barra de arena y con velocidades máximas en el eje del cuerpo de agua principal (mayores profundidades). Esto se corroborará en el apartado de resultados de las simulaciones (sección 5.2.4.2).



La vegetación colindante con el cuerpo de agua principal cumplirá el rol de reducir las velocidades del flujo y actuar de límite para efectos de sedimentación de material detrítico transportado con el flujo. Este hecho se evidenció en simulaciones preliminares donde se buscó relevar la importancia de la inclusión de la vegetación en el modelo. En la Figura 113 hace una comparación de la hidrodinámica para el área con y sin vegetación incorporada. Como se aprecia, los campos espaciales de velocidad varían de forma considerable. Las zonas de vegetación contribuyen a la disminución de las velocidades, y por tanto generarán límites para la retención de sedimentos en casos con carga sedimentaria en suspensión o por arrastre en eventos extremos de caudal.

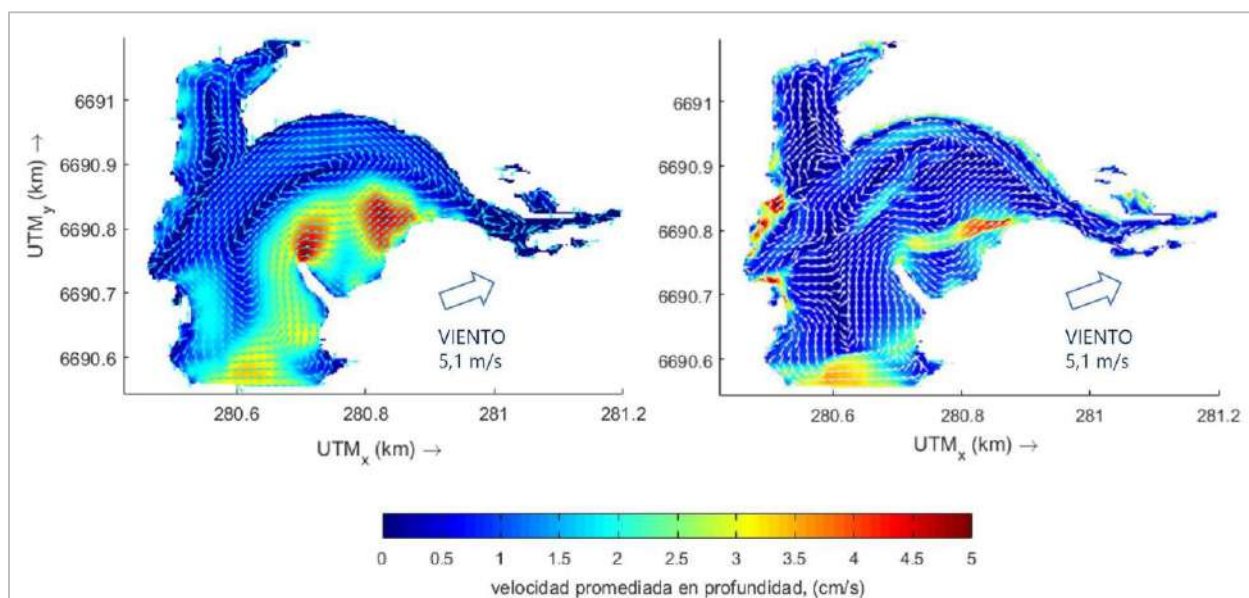


Figura 113: Comparación de las velocidades de la corriente promediada en profundidad para el caso de simulación sin vegetación (izquierda) y con vegetación (derecha). Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Resultados actividades asociadas con el objetivo específico 2

Para el cumplimiento del objetivo específico OE2) “Caracterizar la morfología y el comportamiento morfodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena”, se obtuvieron los siguientes resultados:

### 5.2.1 Información histórica barra terminal del humedal

Desde la desecación de las denominadas “Vegas Norte” y “Vegas Sur” en las inmediaciones de la desembocadura del río Elqui impulsadas por Videla (1953) en el “Plan Serena” (Figura 114), la barra terminal de arena ha experimentado diversos cambios impulsados, entre otros, por a) la rigidización de la playa, especialmente desde el Faro Monumental hasta Peñuelas, b) la disminución del transporte de sedimentos desde la construcción del embalse Puclaro, c) el incremento de marejadas y d) la ocurrencia del tsunami del 16 de septiembre de 2015.



Figura 114: Vista área de la desembocadura del río Elqui año 1947. Fuente: Videla (1953).

Un segundo antecedente se encuentra en la fotografía SAF del año 1977 (Figura 115). En esta fotografía se observan campos de cultivo donde se encontraban las vegas norte y sur, y el entorno de la desembocadura se observa sin urbanización, lo que contrasta con la situación actual (Figura 116). Al estimar la evolución del espejo de agua en la desembocadura del río Elqui, se observa una tendencia negativa, disminuyendo a una tasa de 0,05 há/año (Figura 117).



Figura 115: Imagen SAF de la desembocadura del río Elqui: 1977-08-17.

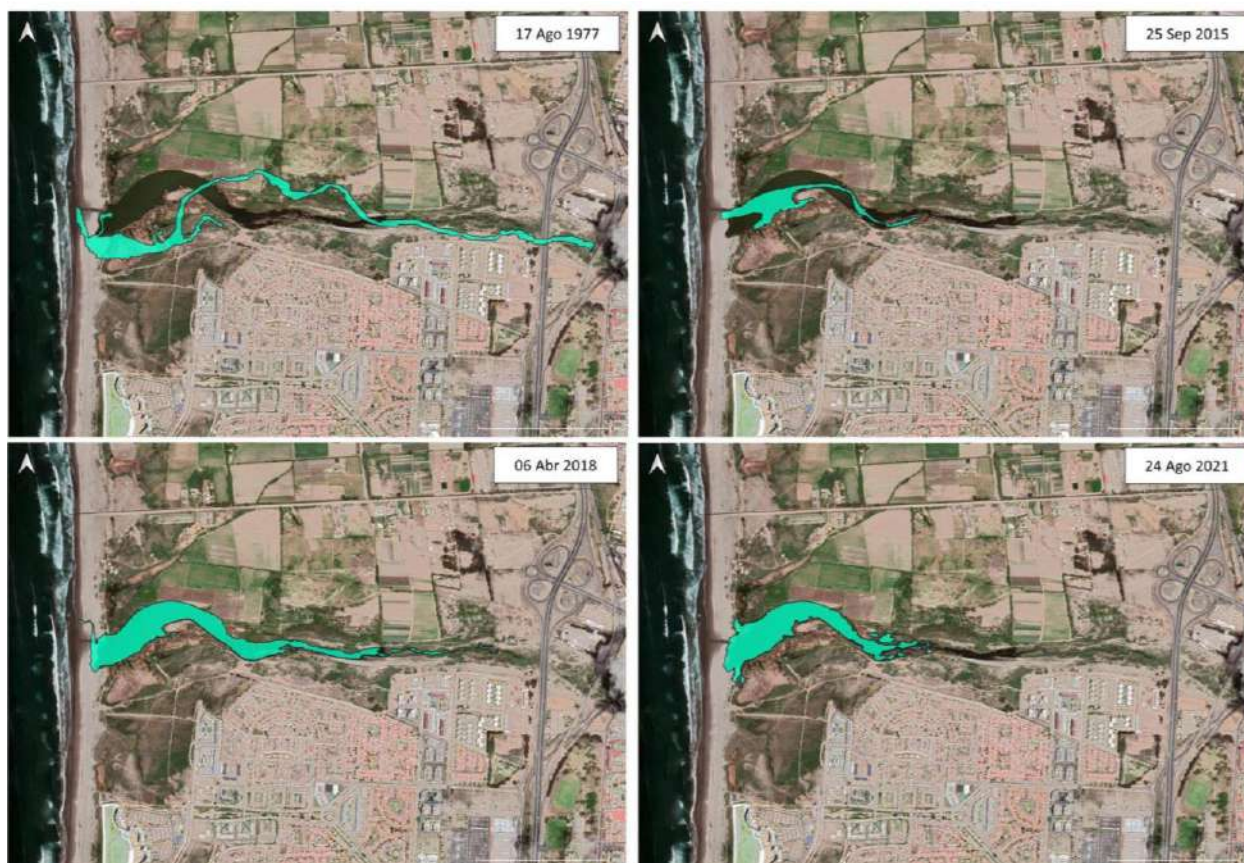


Figura 116: Espejos de agua (en celeste) en los años 1977, 2015, 2018 y 2021, superpuestos sobre la urbanización presente el año 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Google Earth.

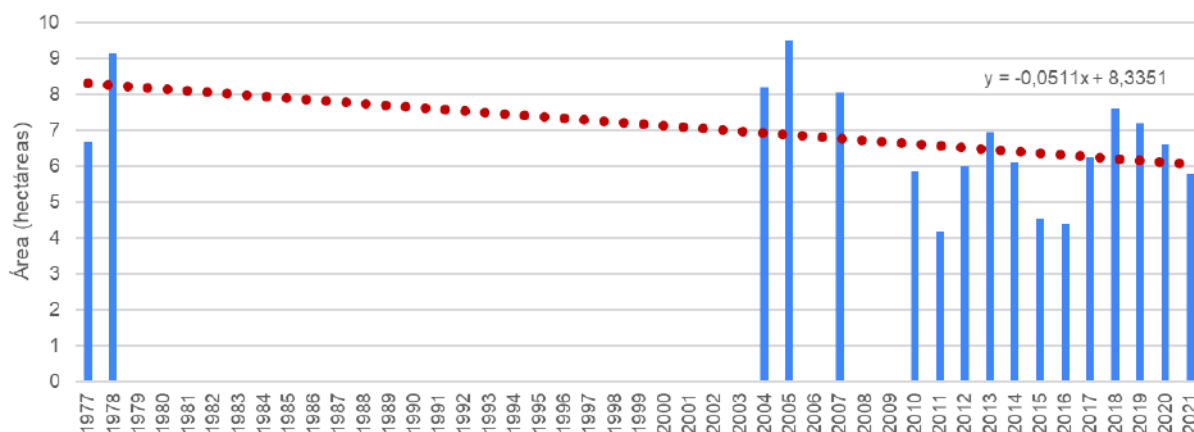


Figura 117: Evolución del espejo de agua del humedal desembocadura del río Elqui. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes Google Earth.

Los resultados obtenidos con el algoritmo CoastSat muestran que playa La Serena, en la desembocadura del río Elqui, ha experimentado notorios cambios entre 1985 y 2021 (Figura 118). Las tasas de cambio en los transectos analizados se muestran en la Figura 119. Se observa una estacionalidad, con acreción en la época estival de ~15 m promedio en los transectos analizados y una erosión de ~10 m en la época invernal. Además, los perfiles al sur de la desembocadura, en el entorno del Faro Monumental, presentan una tendencia a erosión, mientras que los perfiles al norte de la desembocadura presentan una tendencia a la acreción.



Figura 118: Cambios en la Línea de Playa en el entorno de la desembocadura del río Elqui 1985 – 2021. Fuente: Elaboración propia en base a CoastSat.

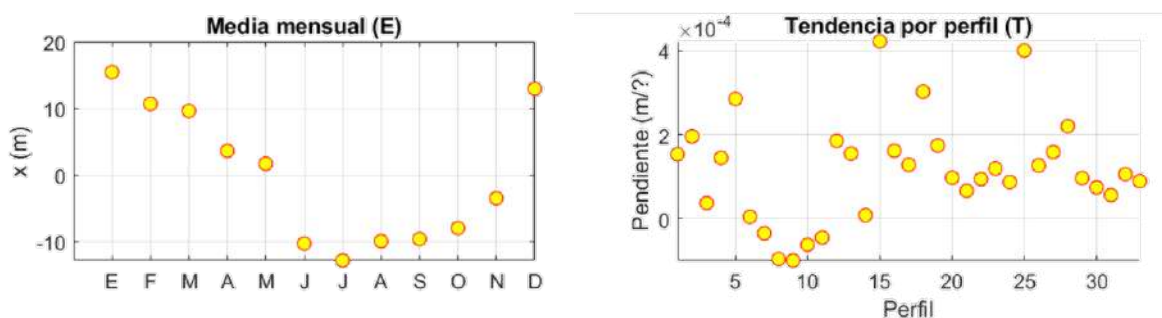


Figura 119: Estacionalidad y tendencia de los perfiles de playa analizados en el entorno de la desembocadura del río Elqui. Fuente: Elaboración propia en base a CoastSat.

### 5.2.2 Modelamiento de la topografía del humedal (actividad adicional)

El modelamiento de la topografía del humedal consistió en la generación de un Modelo de Elevación Digital (DEM), con el software Agisoft Metashape a partir de un ortofotomosaico del área del estudio, el cual se sometió a una

clasificación manual de la cobertura del suelo, con el objetivo de poder extraer toda la información que cubriera la superficie y que distorsione la topografía del área. Para este procedimiento se utilizaron las siguientes categorías<sup>26</sup>:

- *Suelo desnudo*: aquellas áreas que no se encuentran cubiertas por vegetación, asfalto, edificios o agua. En el área de estudio está correspondió principalmente a arena.
- *Agua*: aquellas áreas que representaban cuerpos de agua o mar.
- *Vegetación baja*: vegetación herbácea (se excluyen pajonales).
- *Vegetación media*: *pajonal y arbustiva*.
- *Vegetación alta*: arbórea.
- *Edificaciones*: estructuras que cubren la superficie como casas o edificios en altura.
- *Vehículos*: se consideran vehículos motorizados del tipo: autos, camiones y/o, buses.
- *Objetos hechos por el hombre*: elementos antrópicos de bajo impacto en la imagen, como bodegas pequeñas, kioscos, sillas, basureros, entre otros.

La Figura 120 muestra un ejemplo de esta clasificación a partir de las distintas categorías utilizadas (letra A), comparado con la superficie existente, lo que finalmente determinó el porqué de tal clasificación (letra B). En color azul se indica el *agua*, color café *suelo desnudo*, color verde oscuro *vegetación baja*, verde claro *vegetación media*, verde claro intenso *vegetación alta*, celeste *vehículos*, rojo *edificaciones* y amarillo claro *objetos hechos por el hombre*. De esta forma, la clasificación permitió obtener un Modelo de Elevación Digital, eliminando los posibles errores producidos a partir de la presencia de vegetación u objetos construidos sobre la superficie, y obtener una imagen lo más próxima de la topografía.

Finalmente, como subproducto del DEM y a partir de esta clasificación manual se digitalizaron polígonos relevantes con la ayuda de Google Earth Pro de las siguientes áreas:

- Vegetación Baja
- Pajonales
- Agua
- Cuerpo de Agua principal (digitalizado a partir de la imagen satelital más reciente disponible a la fecha del 24 de agosto de 2021 en Google Earth).

La identificación de estas áreas, particularmente de cuerpos de agua fuera del espejo de agua principal que compone el humedal, ayudaron a definir un área de delimitación para la modelación de la batimetría (Figura 121), que involucrase aquellas áreas que independiente de que estén cubiertas por vegetación podrían estar inundadas en su base.

---

<sup>26</sup> Estas categorías vienen por defecto al momento de hacer algún tipo de clasificación de elementos durante el proceso de la generación del Modelo de Elevación Digital, por lo que el usuario debe determinar un área en particular e indicarle al programa que esa corresponde a una de las categorías predeterminadas. Por ejemplo, vegetación baja se consideró como toda superficie relacionada a vegetación herbácea o que esté a ras de suelo, a excepción de los pajonales que por su altura fueron considerados como vegetación media.



Figura 120: Clasificaciones del suelo para la elaboración del Modelo de Elevación Digital. Fuente: Elaboración propia.

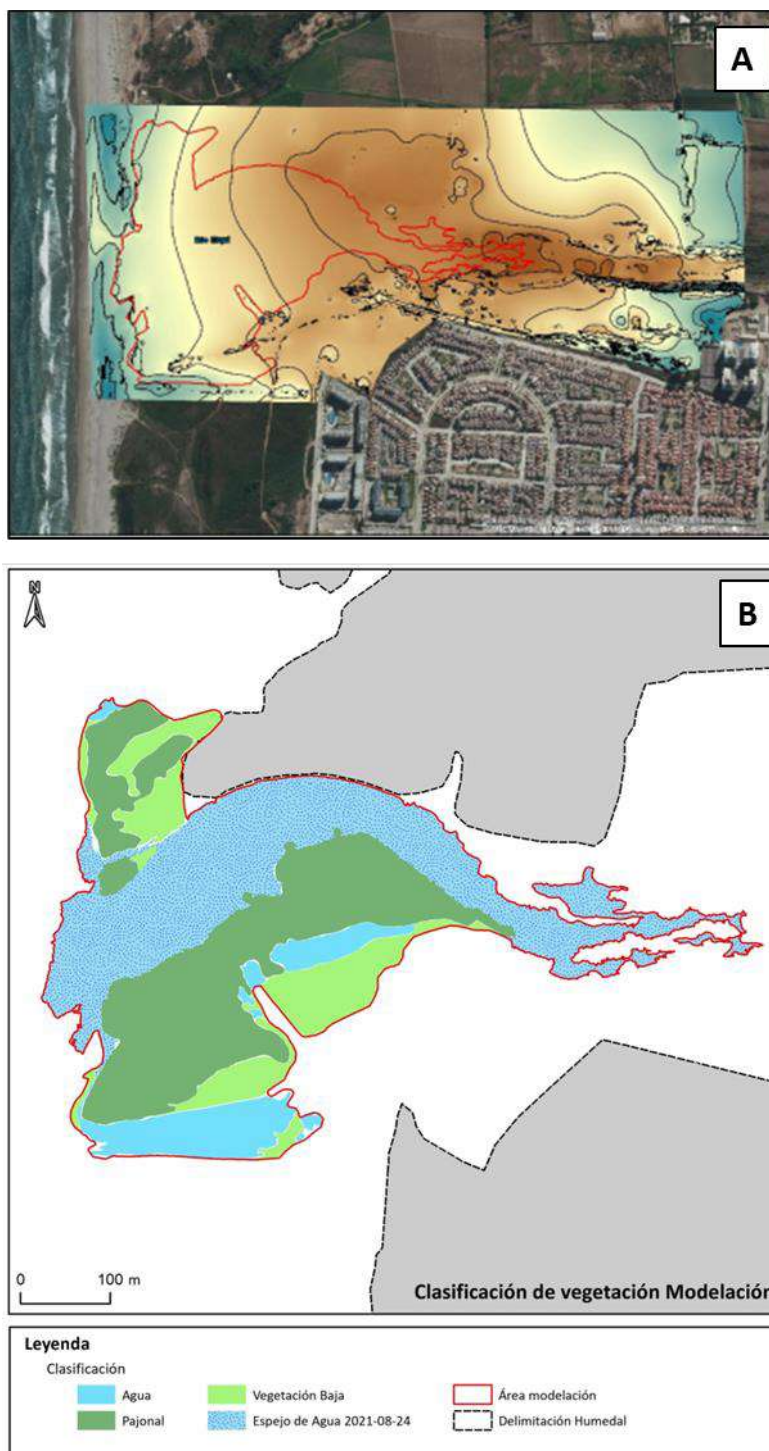


Figura 121: Modelo de elevación digital (A) y clasificaciones de suelo en el área de modelación de la Desembocadura del Río Elqui (B). Fuente: Elaboración propia.



### 5.2.3 Modelamiento de la batimetría del humedal

En un principio se consideró sólo el cuerpo de agua principal detallado como “Espejo de Agua 2021-09-05” en la Figura 122 para efectos de la modelación hidro-morfodinámica, resultado de la campaña realizada a inicio de septiembre de 2021. Sin embargo, posteriormente se identificaron otros cuerpos de agua fuera del espejo de agua principal y bajo la vegetación presente (considerados como pajonal y vegetación baja en Figura 121). Con esta información adicional se procedió a expandir la superficie de la batimetría levantada durante el terreno de septiembre, quedando el área completa de batimetría representada en la Figura 123.

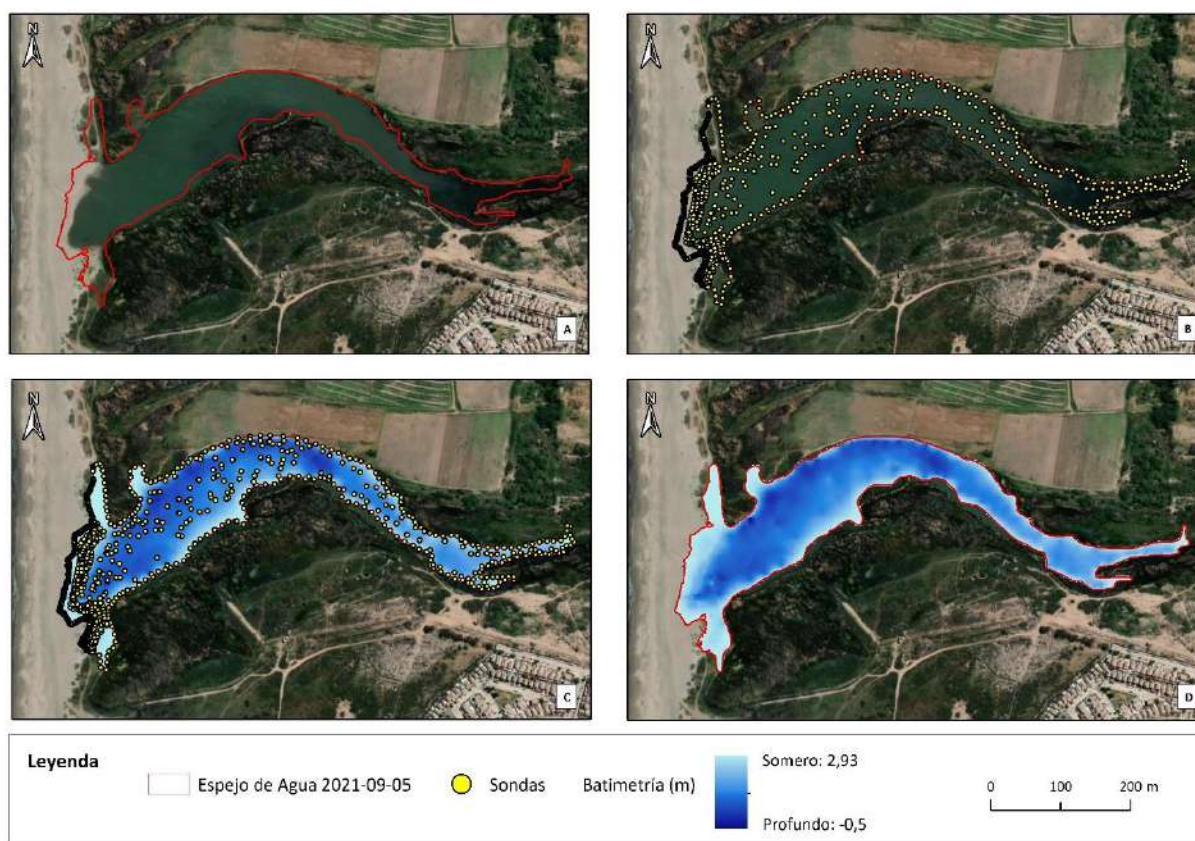


Figura 122: Batimetría del cuerpo de Agua del Humedal del Río Elqui para el 05 de Septiembre de 2021, realizada durante la campaña del 2 al 5 de Septiembre de 2021. Fuente: Elaboración propia.

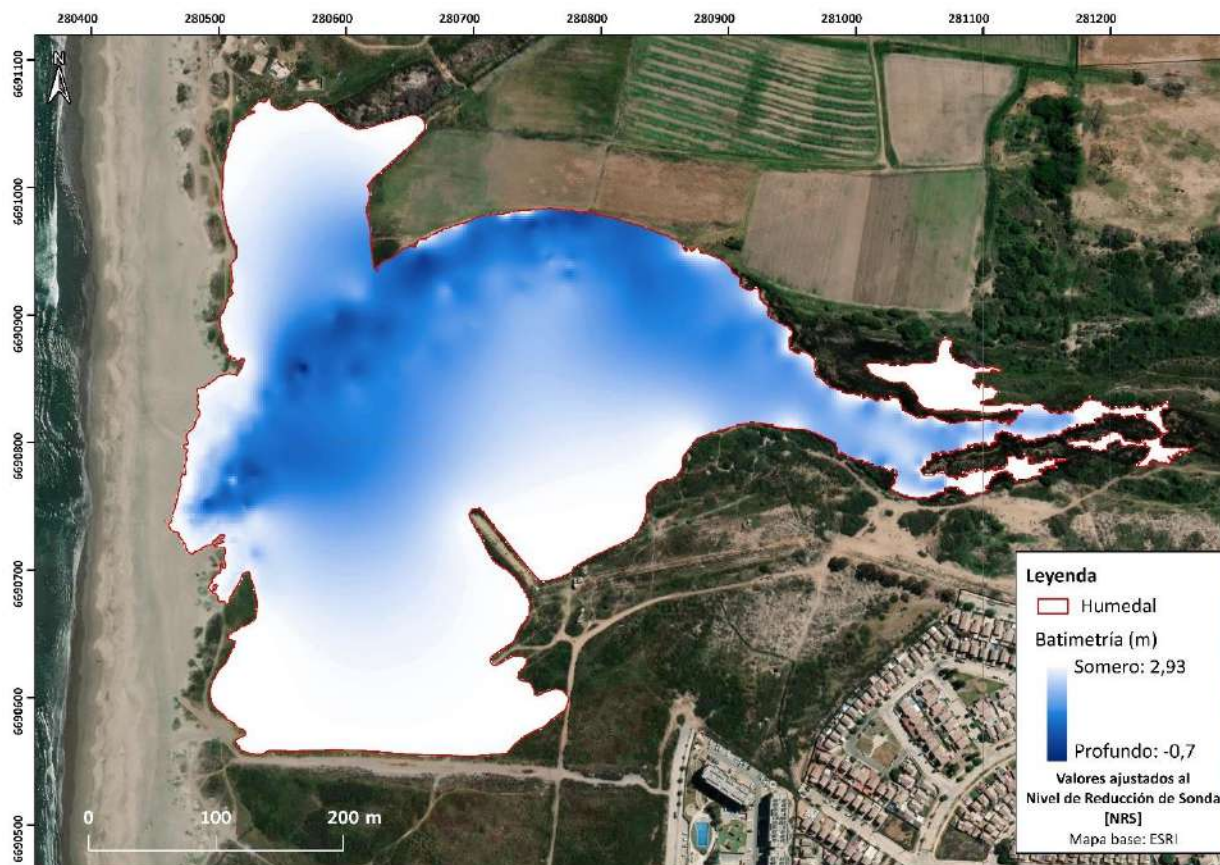


Figura 123: Modelo batimétrico de la desembocadura del río Elqui referido al NRS para Coquimbo. Fuente: Elaboración propia.

## 5.2.4 Modelo comportamiento morfodinámico del humedal y su barra terminal

En esta sección se exponen los resultados de los modelos hidrodinámico y morfodinámico en conjunto, de modo de facilitar la interpretación de las simulaciones. La estructura de esta parte considera la configuración del modelo (Sección 5.2.4.1) y los resultados de cada simulación (Sección 5.2.4.2).

### 5.2.4.1 Configuración del modelo

Los datos de entrada de cada simulación se agrupan en cinco categorías:

- Datos meteorológicos: velocidad y dirección del viento, porcentaje de humedad relativa, temperatura del aire y radiación solar.
- Datos hidrológicos: caudal líquido, caudal sólido (flujos detríticos) y salinidad.
- Datos oceanográficos: nivel del mar y oleaje.
- Datos topo-batimétricos: topo-batimetría inicial sin y con apertura artificial de la barra de área.
- Distribución de la vegetación dentro del humedal.

### Datos meteorológicos:

Debido a lo cambiante y caótico que suele ser el **viento**, se optó por modelar la condición de viento más frecuente. Para ello, se construyeron histogramas bivariados con datos históricos de 2 estaciones cercanas a la zona de estudio (Tabla 12; Figura 124).

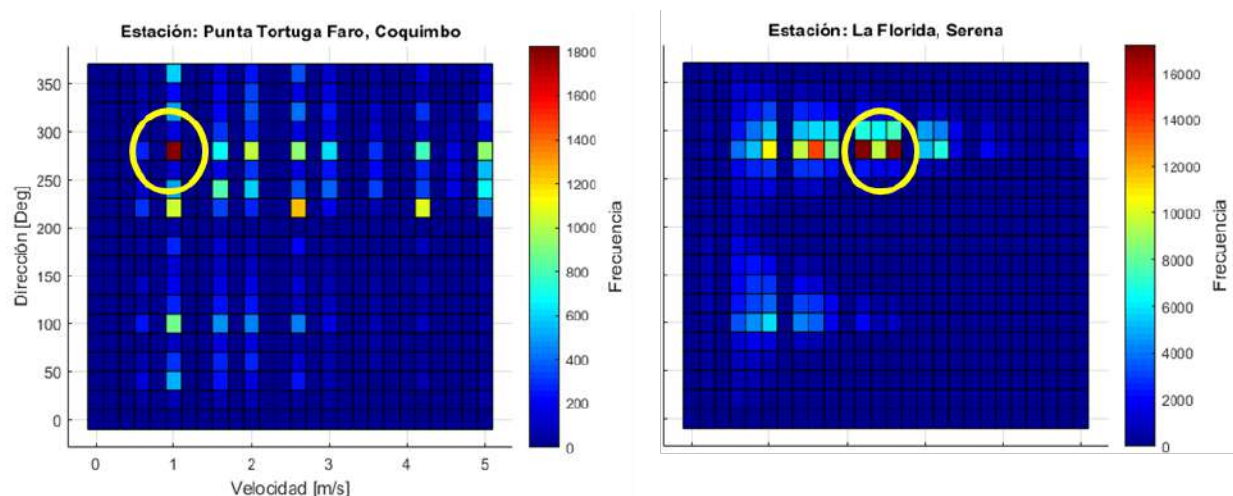


Figura 124: Histogramas bivariados de velocidad y dirección del viento para las estaciones meteorológicas de Punta Tortuga Faro entre 1969 y 2021 (izquierda) y La Florida entre 1950 y 2021 (derecha). Observar que se ha discretizado la rapidez del viento en intervalos de 0.2 m/s (eje horizontal), mientras que la dirección del viento en intervalos de 20° (eje vertical). Fuente: Elaboración propia.

El viento más frecuente presenta magnitudes de 2,6 m/s y dirección proveniente de 280° en la Estación La Florida y 1 m/s y misma dirección en la Estación Faro Punta Tortuga. Por estar más cercana al humedal, se selecciona la velocidad de 2,6 m/s en la Estación La Florida.

El porcentaje de humedad relativa y temperatura del aire (°C) se obtuvieron de la estación costera Faro Punta Tortuga mientras que la radiación solar ( $\text{watt/m}^2$ ) sólo fue registrada en la estación La Florida, que es menos representativa del ambiente costero. Dada la escasa variación de estas tres variables entre condiciones estivales e invernales (Figura 125), se descartó duplicar simulaciones para ambos períodos, pues las variaciones en los resultados no son relevantes.

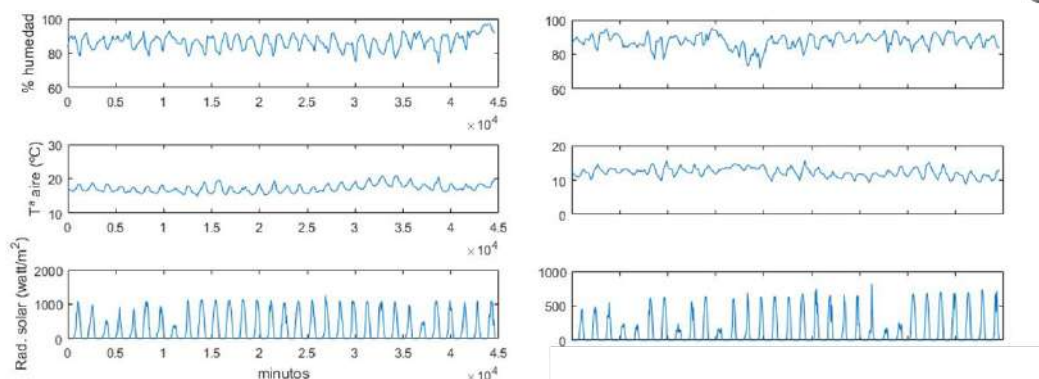


Figura 125: Series representativas de las variables de porcentaje (%) de humedad relativa, temperatura del aire y radiación solar para verano (izquierda) e invierno (derecha). Fuente: Elaboración propia.

**Datos hidrológicos:**

El caudal líquido y caudal sólido para las distintas simulaciones (sección 5.1.10) se exponen en la Tabla 17. Todas las simulaciones parten con los datos de salinidad medidos en terreno (Figura 37, pág. 61).

Tabla 17: Datos de caudales líquidos y sólidos para los distintos escenarios hidrológicos. Fuente: Elaboración propia.

	Caudal líquido ( $Q_L$ )	Caudal sólido ( $Q_S$ )
	$m^3/s$	$kg/m^3$
Año seco	0	0
Año Normal	7.4	1323
Año húmedo	32	1400

**Datos oceanográficos:**

Estos datos se detallaron en las secciones 5.1.6 y 5.1.7. El nivel del mar actual (0,00 m en Figura 106) se utiliza para las simulaciones históricas y el proyectado a finales de siglo (+0,58 m) para las simulaciones futuras.

El oleaje se incluyó para las simulaciones con barra abierta y las simulaciones futuras con los parámetros de altura de ola,  $H_s = 6$  m, período peak,  $T_p = 13,7$  s, y dirección peak de  $268,7^\circ$ .

**Datos topo-batimétricos:**

El modelamiento de la topografía y de la batimetría se encuentran en las secciones 5.2.2 y 5.2.3, respectivamente. En la Figura 126 se muestran las modificaciones en la topo-batimetría de la barra de arena para casos simulados con barra abierta desde el inicio de la simulación.

Se consideran dos tipos de apertura artificial. La primera tiene un ancho de 2,5 m (coincidente con el tamaño mínimo de celda del modelo y con la dimensión aproximada de las aperturas artificiales identificadas a través de imágenes satelitales y en terreno, Figura 34) y se implementa para casos de barra abierta en año seco, donde sólo se produce desagüe del humedal al océano a través de la barra. La segunda tiene un ancho de 5 m, y se usa para años normal y

húmedo, donde la descarga del río al humedal requiere de una apertura más ancha de la barra para una canalización más efectiva de la descarga al océano.

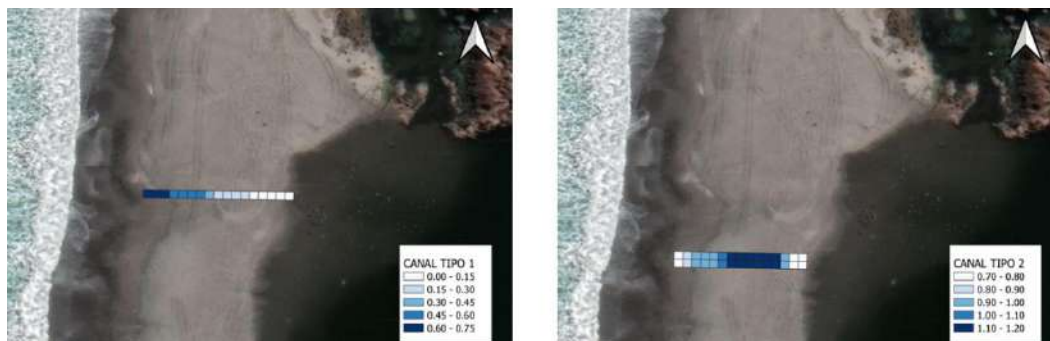


Figura 126: Aperturas creadas de forma artificial en las simulaciones con barra abierta. Excavación para apertura en simulaciones de año seco (izquierda) y simulaciones en año normal y húmedo (derecha). Fuente: Elaboración propia.

#### **Distribución de la vegetación dentro del humedal:**

La distribución de la vegetación en la situación actual fue definida en la Figura 121 (pág. 135) y está presente en todas las simulaciones, excepto en de sobrepaso **SHQ-/V-**.

#### **5.2.4.2 Resultados de cada simulación**

Los resultados se presentan para todos los casos ilustrados en la Tabla 3, pág. 31.

##### **5.2.4.2.1 CHQ- (Barra cerrada / histórico/ año seco)**

Para este caso no se profundiza ya que es la simulación más simple de todas, donde la única respuesta del sistema es la mezcla de salinidad inicial (Figura 37) por efecto del viento, única forzante. La salinidad inicial está entre 2,9 y 4,3 ppt, y alcanza 4,0 ppt una vez que se logra la mezcla completa<sup>27</sup>.

##### **5.2.4.2.2 CHQ (Barra cerrada / histórico/ año normal)**

Para un año normal (Figura 127 a Figura 130), el nivel del humedal sobrepasa la cota de la barra a las 6 horas y se mantiene por aproximadamente un día, para luego sufrir una bajada brusca hasta el nivel inicial en la hora 18 del segundo día. Desde ahí en adelante el nivel disminuye más lenta y gradualmente hasta el final de la simulación, después de 3 días. El sentido de la corriente es desde la entrada del río Elqui hacia la barra de arena. Las velocidades máximas son de 1,8 m/s, coincidentes con la descarga brusca de agua desde el humedal al océano producto de la erosión de la barra, que genera un canal de desagüe (Figura 130). La hidrodinámica provoca acumulación de sedimentos en las proximidades de la entrada del flujo desde el río Elqui al humedal y erosión en el canal de salida

<sup>27</sup> La salinidad tiene implicancias sólo en las simulaciones de sobrepaso. Por ende, sólo se mostrarán para cuando este ocurre.

hacia el océano (Figura 130). En menor medida, se aprecia acumulación de sedimentos en la playa debido al desborde desde el humedal. Las magnitudes oscilan entre 1 m de acumulación cerca de la entrada del flujo hasta 2 m de erosión en el canal de salida.

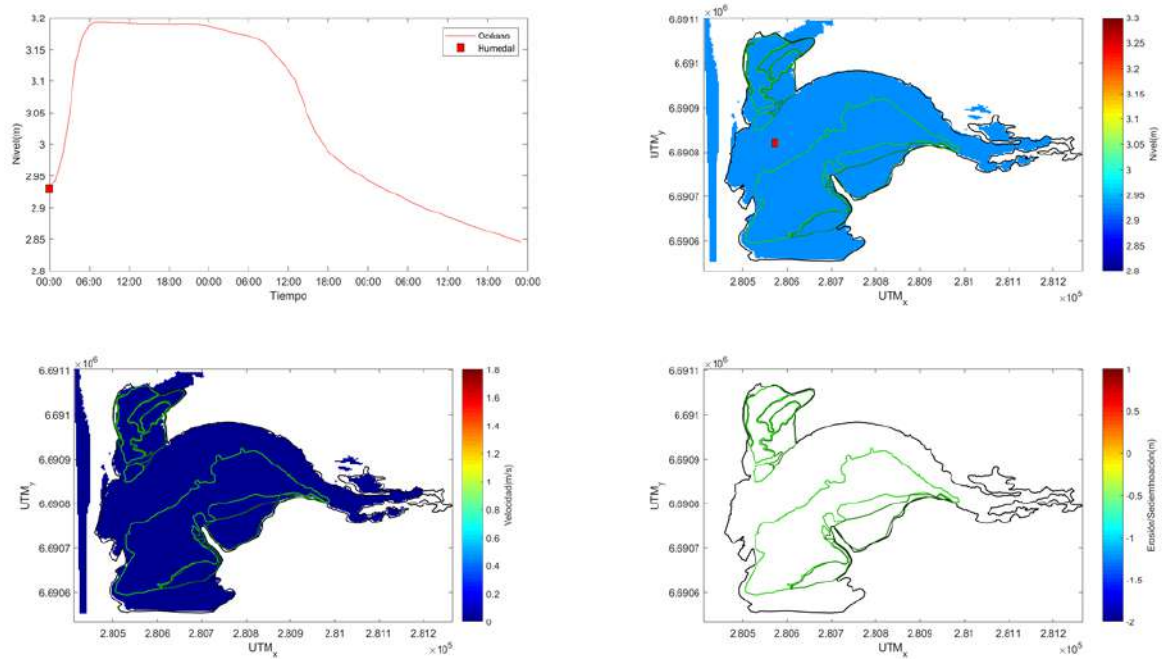


Figura 127: Condición inicial de la simulación CHQ. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). En las tres últimas imágenes, el polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

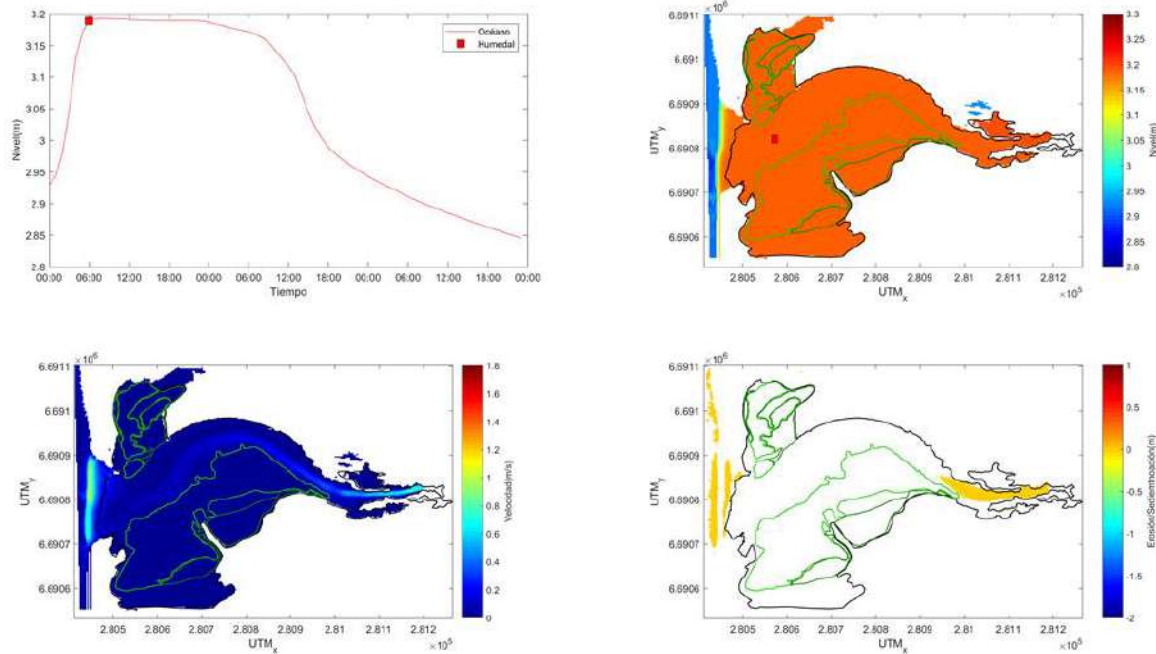


Figura 128: Simulación CHQ a las 6 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

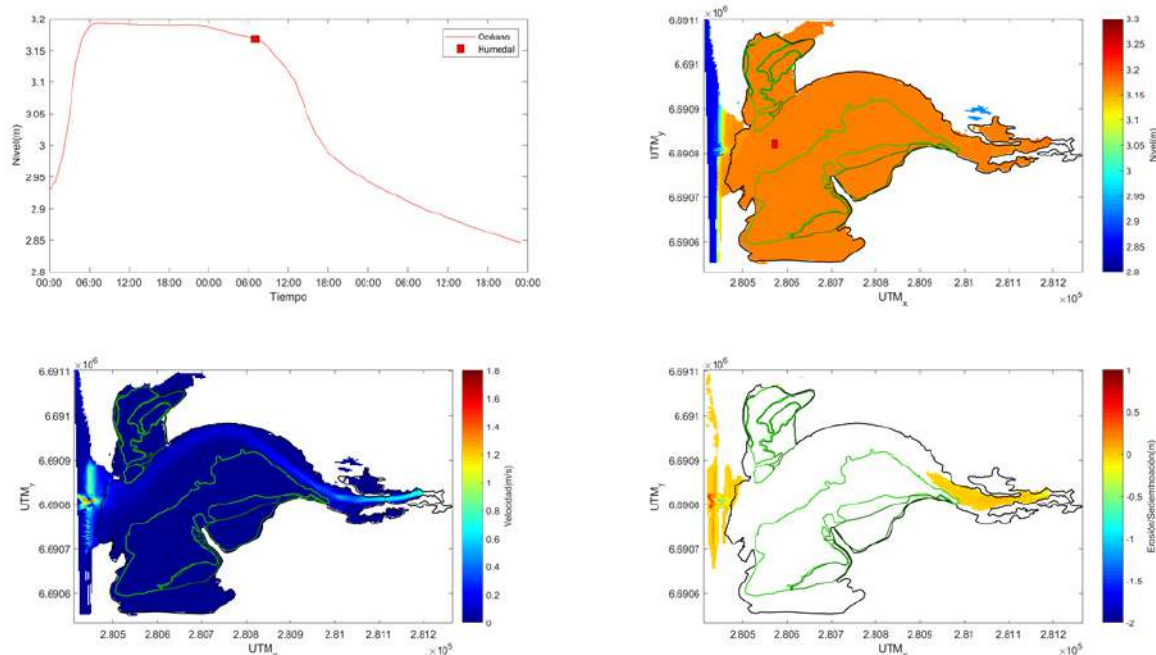


Figura 129: Simulación CHQ a las 6 horas del segundo día. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

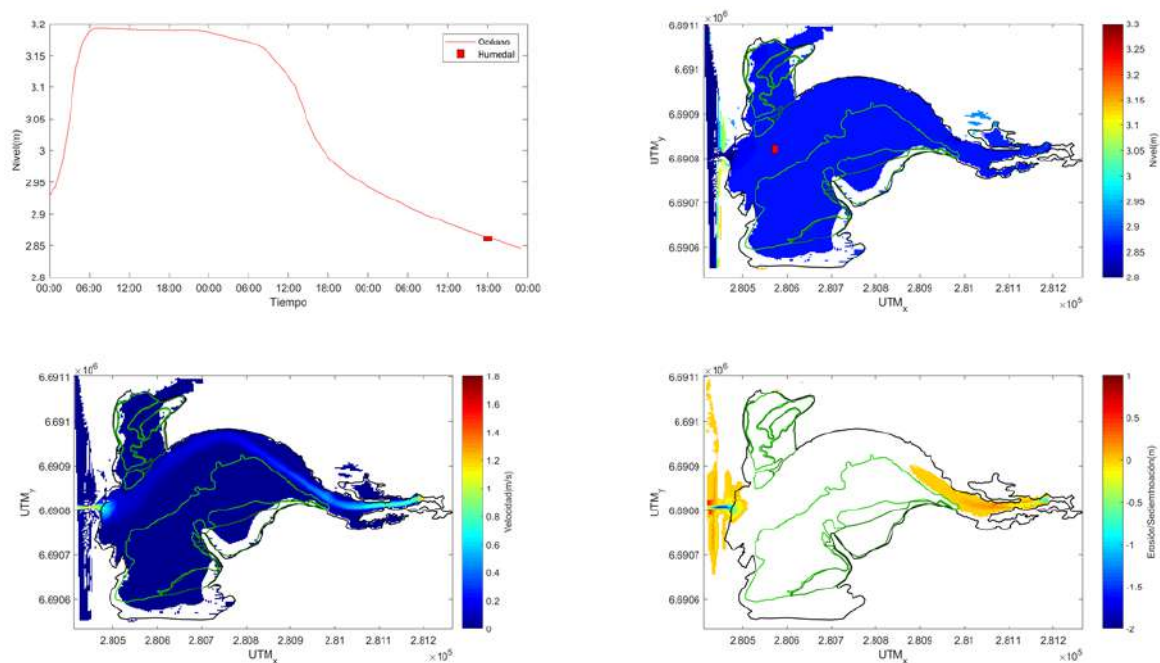


Figura 130: Simulación CHQ a las 18 horas del segundo día. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4.2.3 CHQ+ (Barra cerrada / histórico/ año húmedo)

Para un año húmedo (Figura 131 a Figura 134), el comportamiento es similar al caso CHQ, con la diferencia que el mayor caudal es capaz de sobrepasar el nivel máximo de la barra de arena, y socavarla con más rapidez. El nivel máximo se consigue a las 6 horas de iniciado el evento y comienza a disminuir instantáneamente (Figura 132 y Figura 133). Se alcanzan velocidades máximas de 2,5 m/s. El canal formado por erosión coincide con el formado en CHQ, pero adicionalmente se genera un canal secundario más al norte (Figura 134). Los cambios del lecho son evidentemente mayores y abarcarían la totalidad de la zona del cuerpo de agua principal y desembocadura, con magnitudes de sedimentación de hasta 2 m y erosión de hasta 2,5 m (Figura 134).



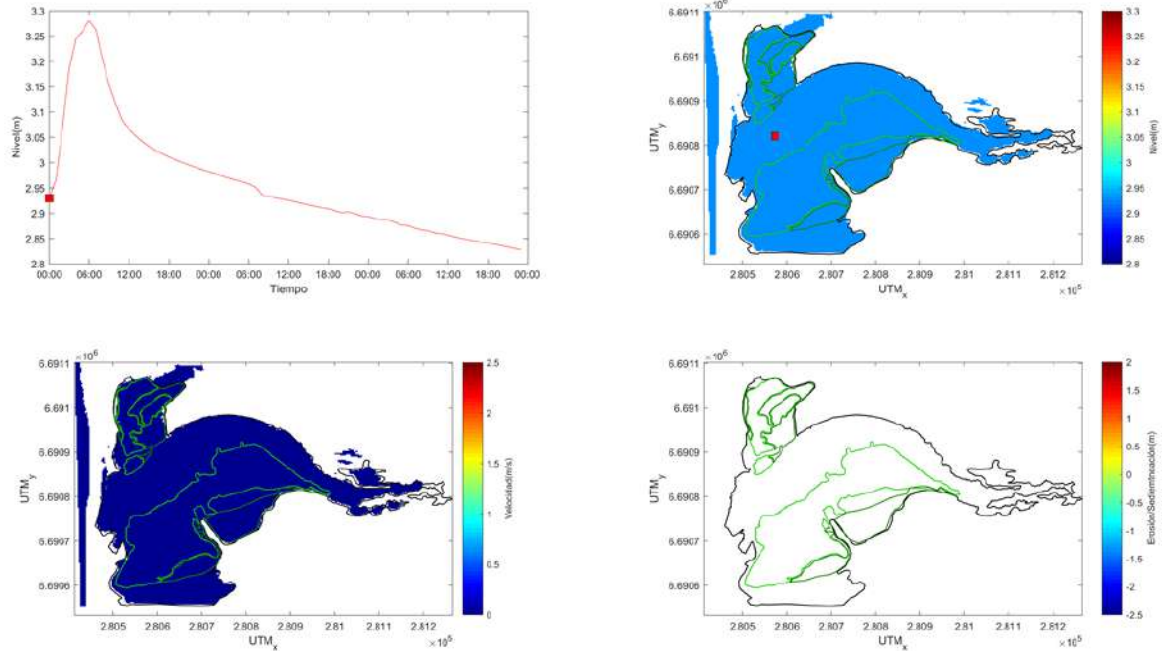


Figura 131: Condición inicial de la simulación CHQ+. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

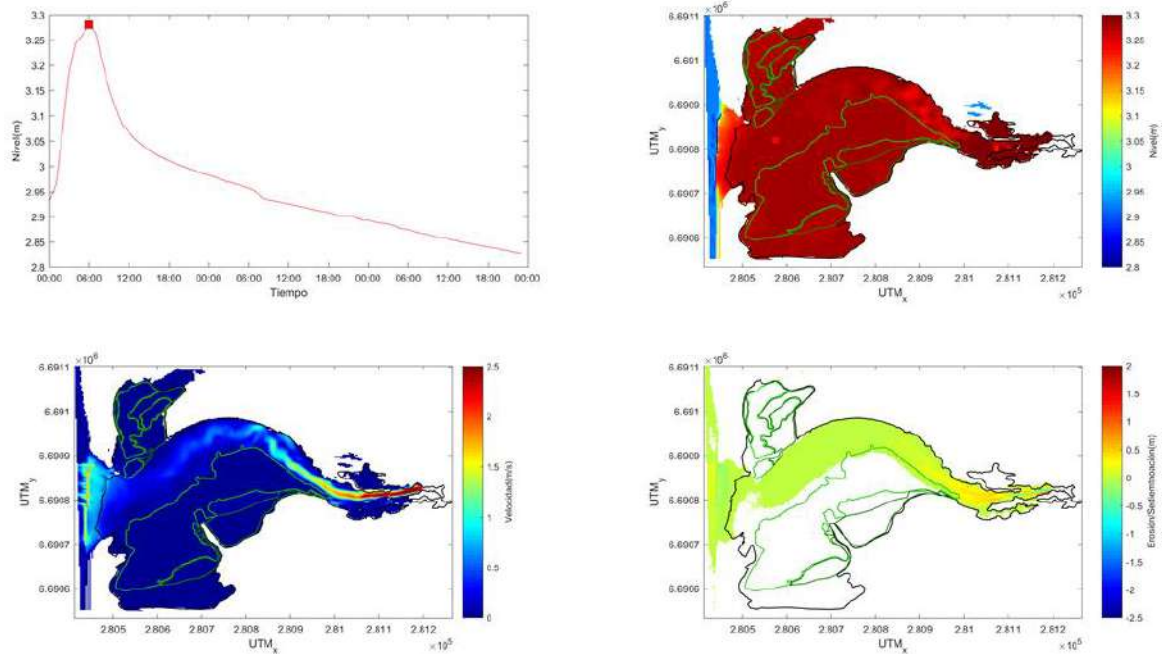


Figura 132: Simulación CHQ+ a las 6 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden

con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófila, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

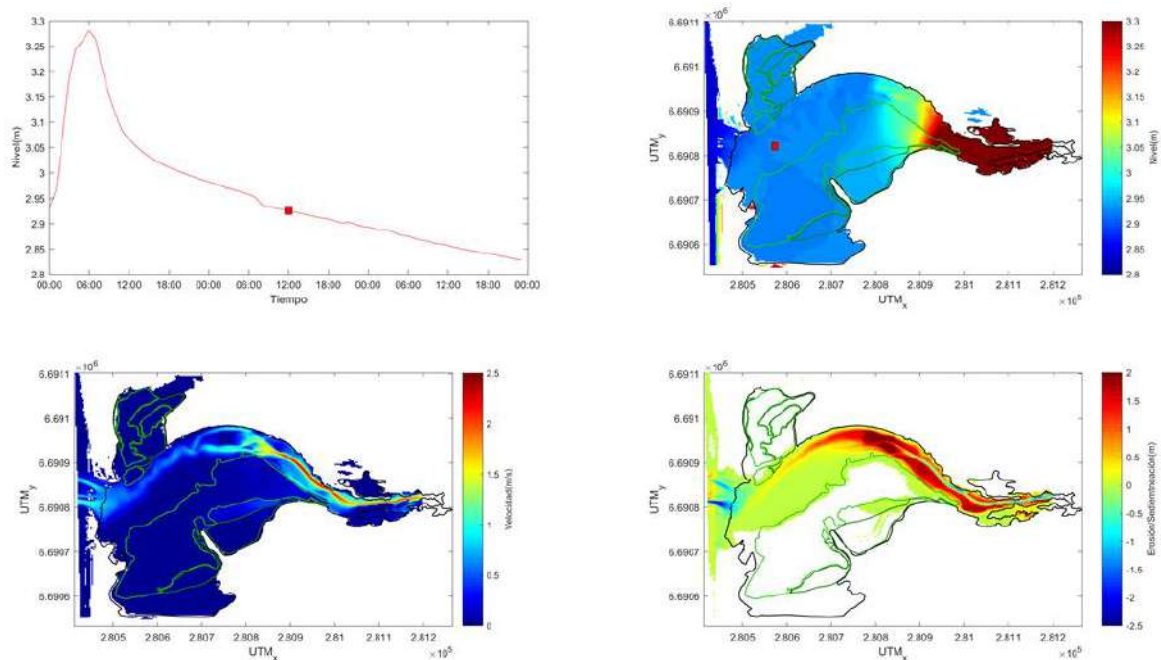


Figura 133: Simulación CHQ+ a las 12 horas del segundo día. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófila, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

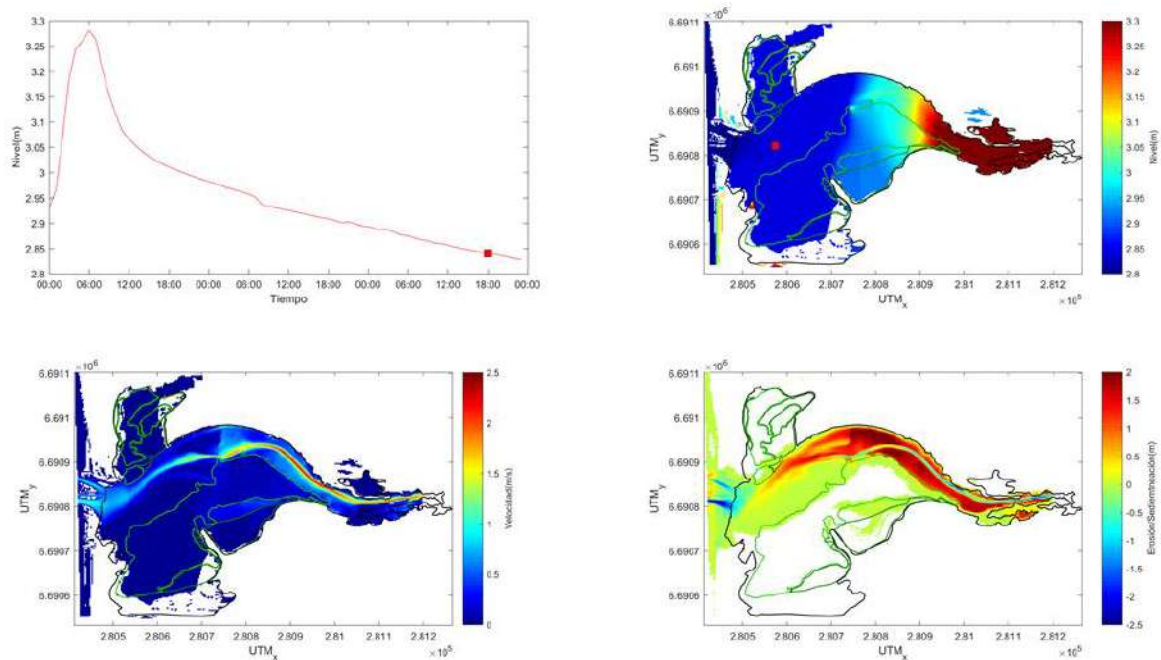


Figura 134: Simulación CHQ+ a las 18 horas del segundo día. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba,

izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4.2.4 AHQ- (Barra abierta / histórico/ año seco)

Las tres siguientes simulaciones corresponden con la situación de barra abierta. Para esta simulación de año seco se introdujo el canal de apertura en la topo-batimetría de la barra (Figura 126, izquierda). La Figura 135 y Figura 136 muestran la condición inicial y al cabo de 2 días y medio. Al no haber dinámicas del río actuantes, la descarga se produce por los desniveles entre el espejo del agua del humedal y del océano. La descarga es lenta y progresiva debido a lo somero de la excavación del canal, con magnitudes inferiores a 1 m/s en la zona del canal y sin erosiones o acumulaciones de sedimento dentro del humedal.

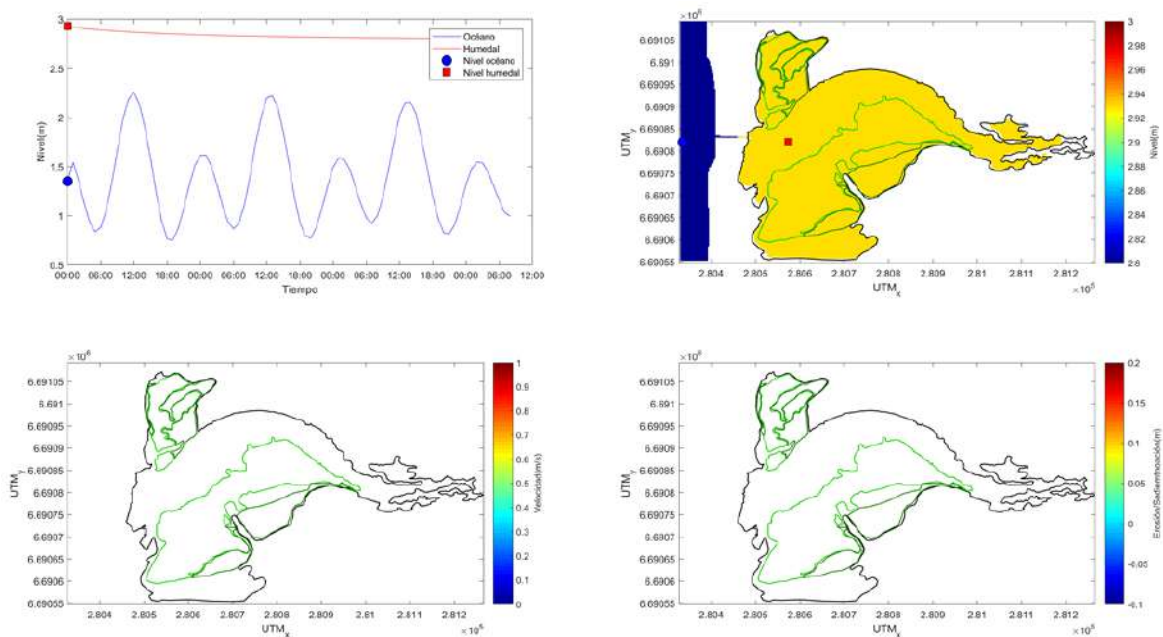


Figura 135: Condición inicial de la simulación AHQ-. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

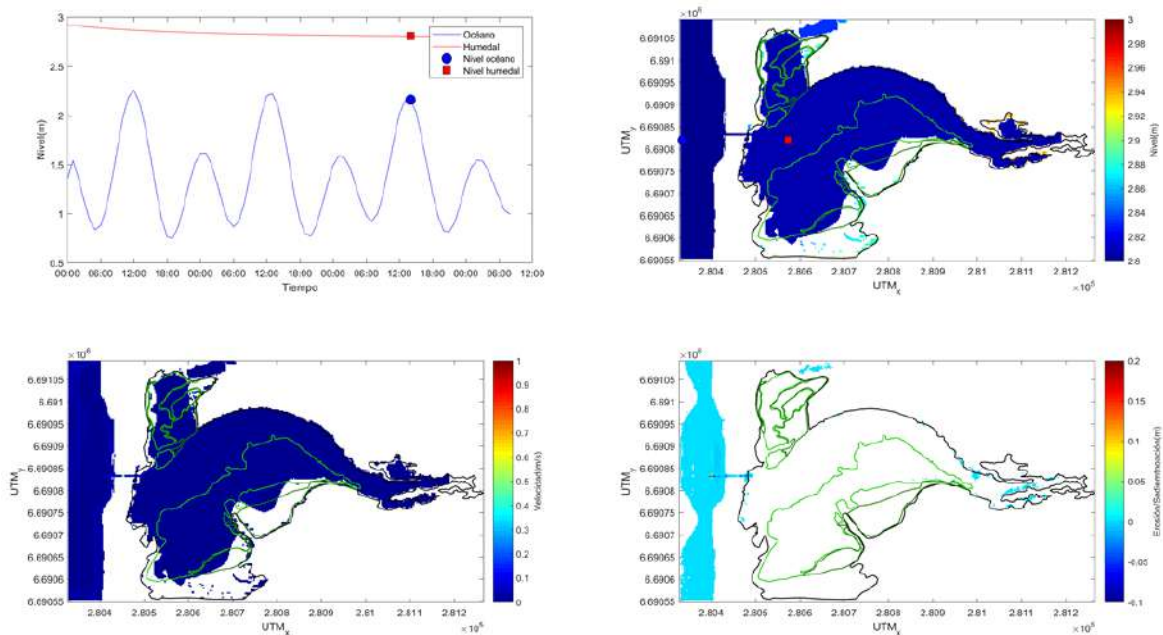


Figura 136: Simulación AHQ- a las 12 horas del tercer día. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4.2.5 AHQ (Barra abierta / histórico/ año normal)

En la simulación de año normal se usó el canal de apertura artificial de la barra (Figura 126, derecha). Si bien se ve una disminución inicial del nivel del humedal, este alcanza un máximo que se mantiene por alrededor de 15 horas (Figura 138). Una vez pasado este tiempo se produce el desagüe brusco hasta niveles similares con la marea, modulándose con ella en adelante (Figura 140). Si bien los niveles del humedal y marea son similares, no se interrumpe la salida de agua del humedal hacia el océano por el canal, la cual impide que la marea entre al humedal. Durante el ascenso de la marea, esta ralentiza la salida de agua desde el humedal al océano provocándose una acumulación del agua que entra al humedal desde el río Elqui. Durante la simulación, las velocidades alcanzan 4,5 m/s en la apertura, lo cual provoca una socavación del canal de hasta ~3 m (Figura 140). De nuevo, la acumulación de sedimentos es generalizada, con magnitudes de hasta 1 m, en el cuerpo de agua principal y en toda la parte del océano incluida en el dominio.

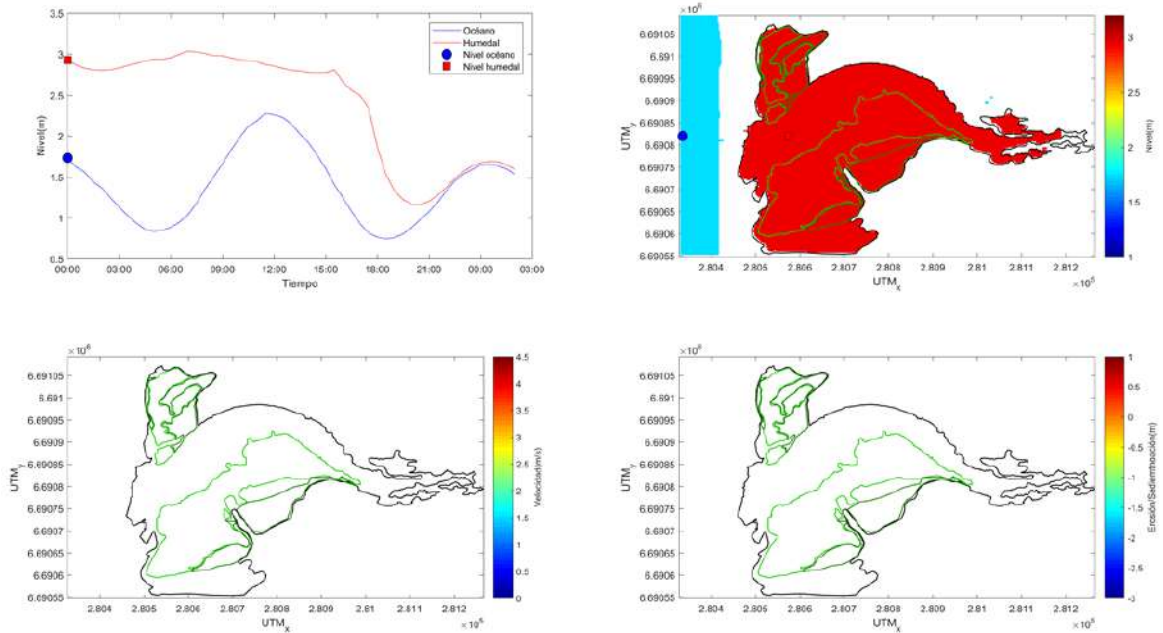


Figura 137: Condición inicial de la simulación AHQ. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

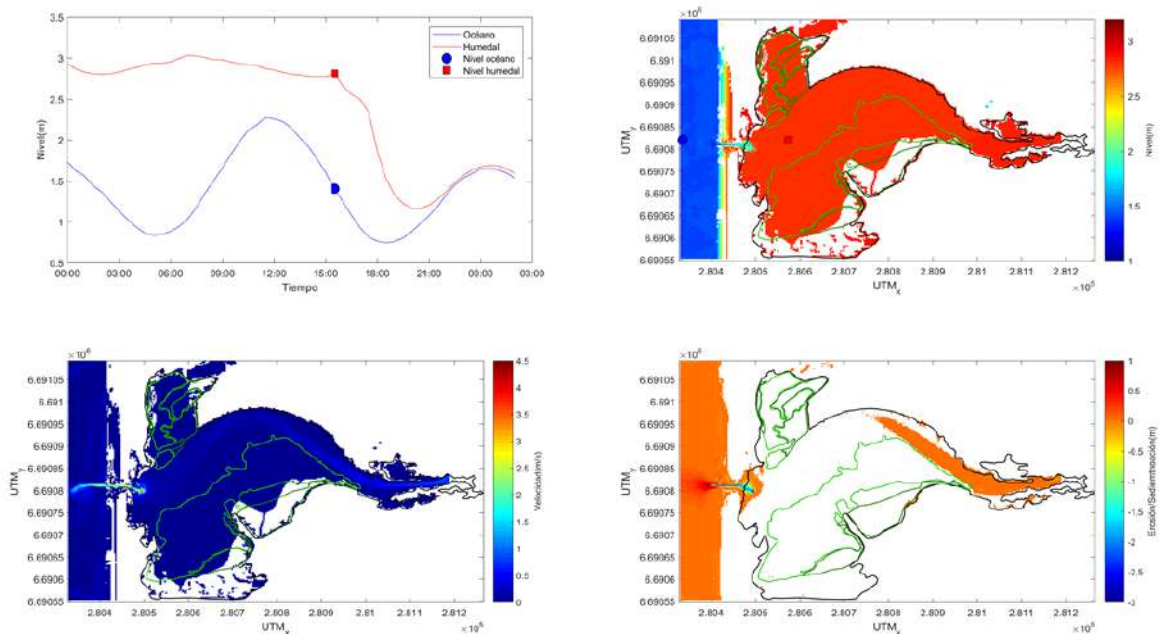


Figura 138: Simulación AHQ a las 15 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

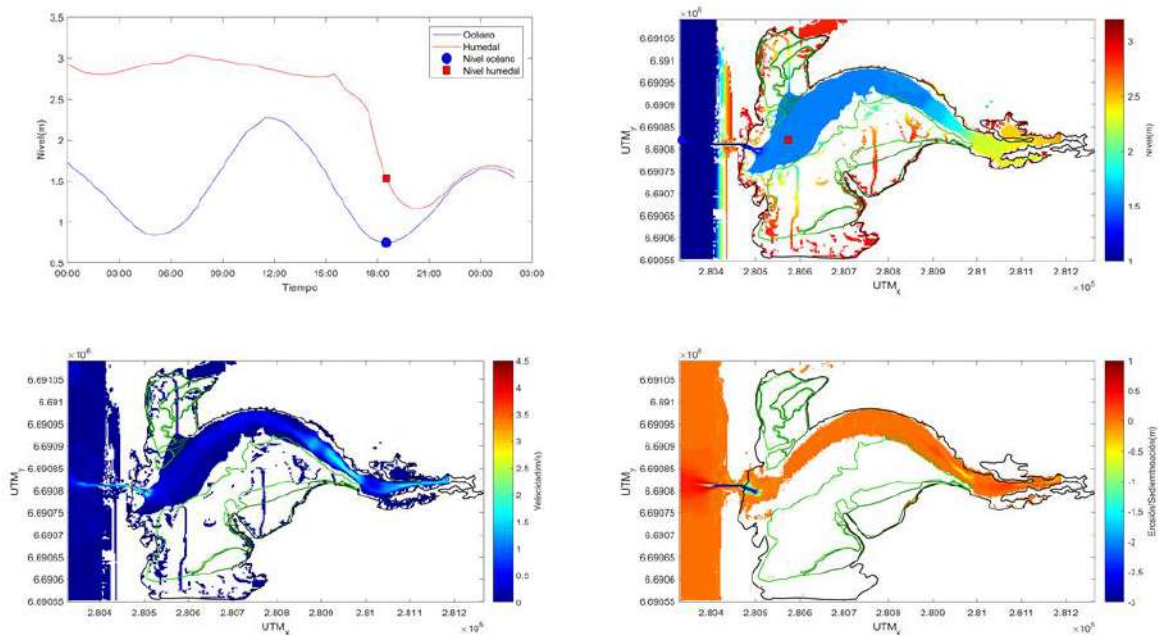


Figura 139: Simulación AHQ a las 18 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

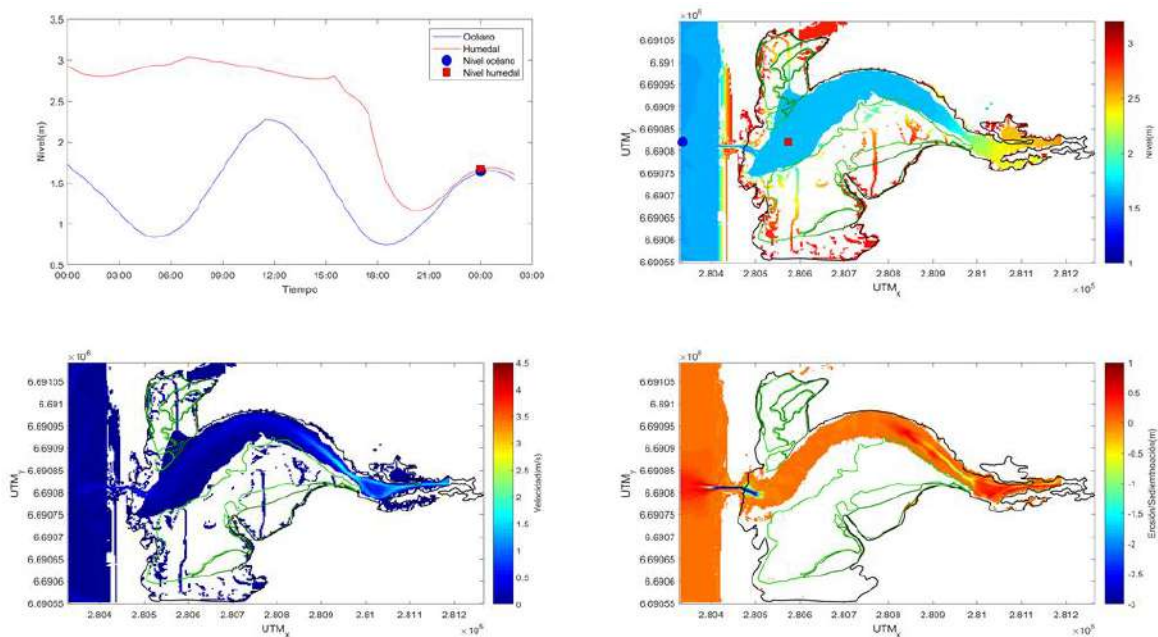


Figura 140: Simulación AHQ a las 0 horas del segundo día. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófila, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.4.2.6 AHQ+ (Barra abierta/ histórico/ año húmedo)

En la simulación de año normal se usó el canal de apertura artificial de la barra (Figura 126, derecha). En esta simulación se describe un comportamiento similar al caso CHQ+, con la particularidad que el mayor caudal del río Elqui provoca una erosión más temprana del canal de apertura, provocando un desagüe y consiguiente modulación con la marea en menos tiempo. Dados los altos caudales desde el río, la modulación tiene una diferencia instantánea de alrededor de 20 cm entre los niveles de marea y del humedal. Las velocidades máximas rondan los 5 m/s en la barra, provocando una erosión de hasta 3 m de profundidad. Las sedimentaciones en el cuerpo de agua principal son generalizadas, observándose canales de escurrimiento con cierto grado de erosión (Figura 144).

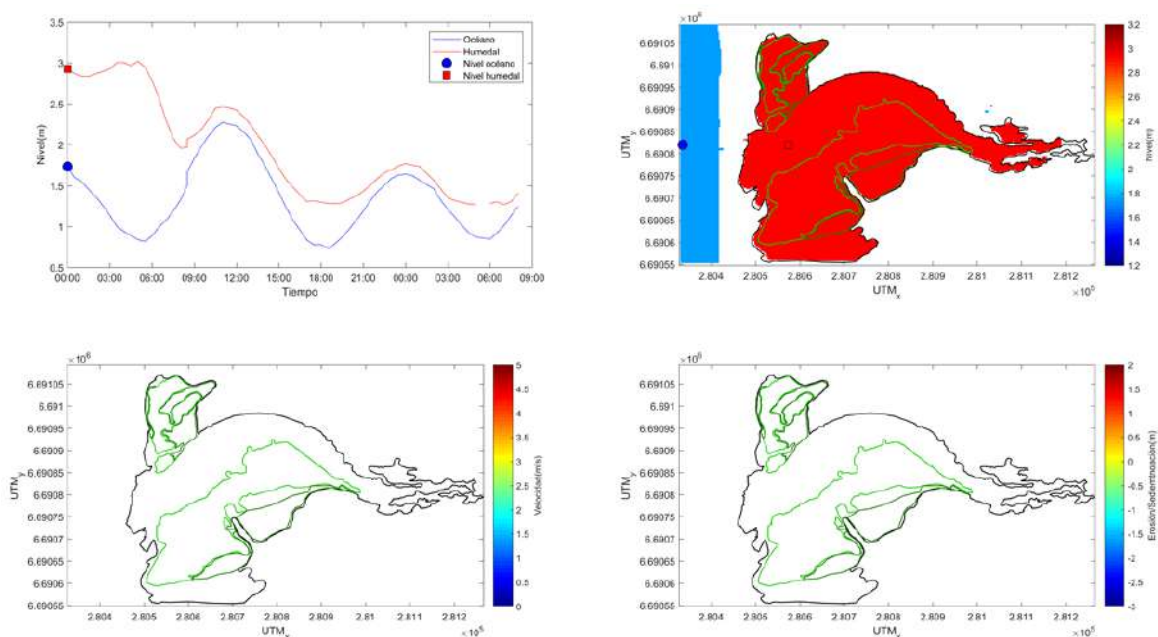


Figura 141: Condición inicial de la simulación AHQ+. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófila, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

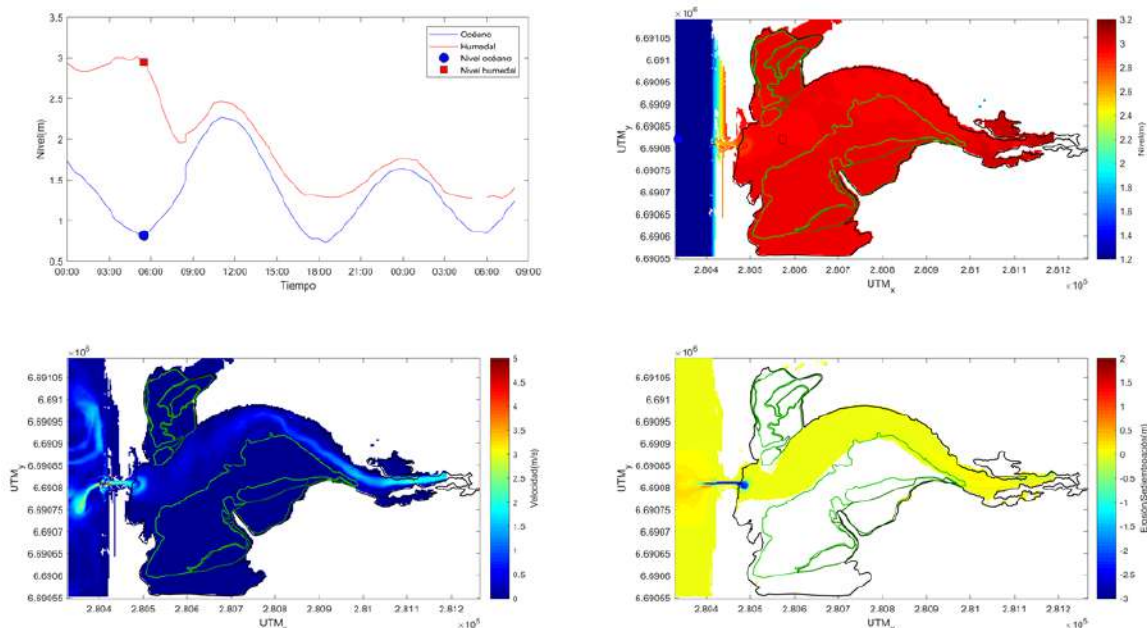


Figura 142: Simulación AHQ+ a las 6 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

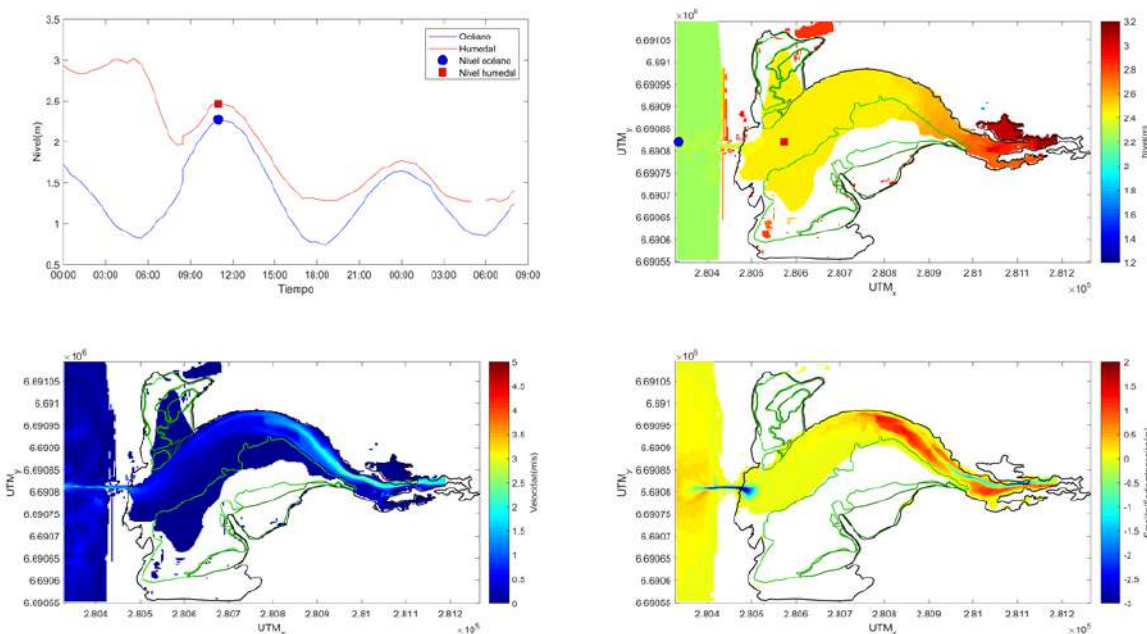


Figura 143: Simulación AHQ+ a las 12 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.



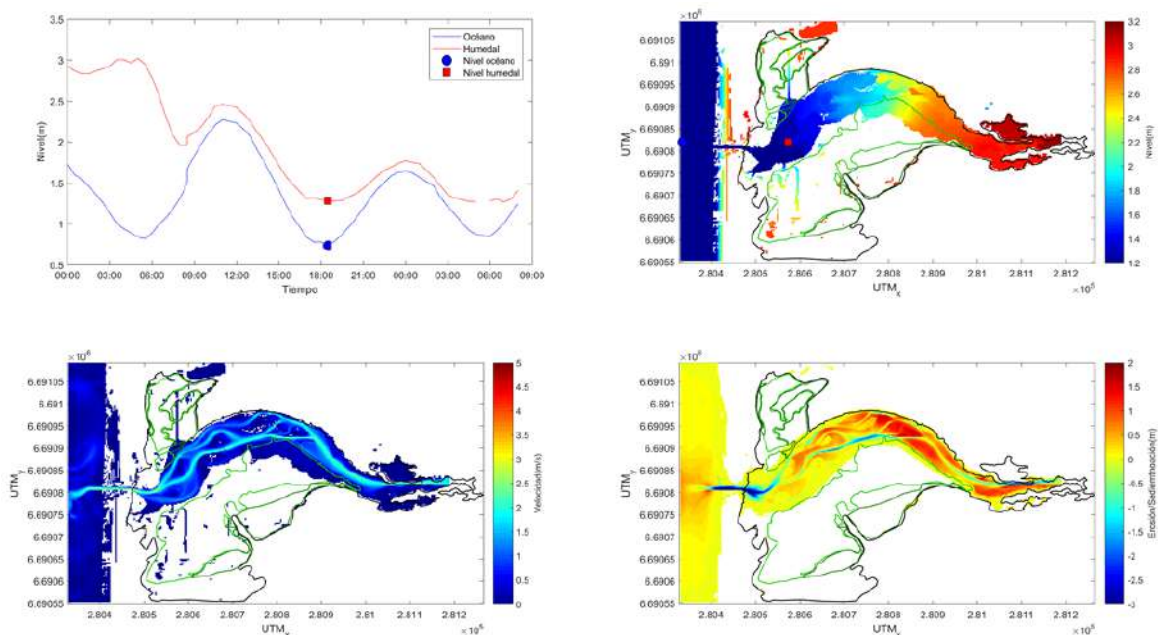


Figura 144: Simulación AHQ+ a las 18 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4.2.7 CFQ- (Barra cerrada/ futuro/ año seco)

Esta simulación tiene como única forzante actuante el viento, sin evidenciar cambios significativos ni relevantes que mostrar.

#### 5.2.4.2.8 CFQ+ (Barra cerrada/ futuro/ año húmedo)

Los resultados de esta simulación (Figura 145 a Figura 148) son similares a la simulación AHQ+. Aquí el canal de apertura se genera de forma completa, alcanzando similar modulación con la marea y al mismo tiempo (~9 horas). Este caso incorpora el aumento del nivel del mar a finales de siglo, lo que impacta en los niveles, pero sin generar sobrepaso desde el océano al humedal.

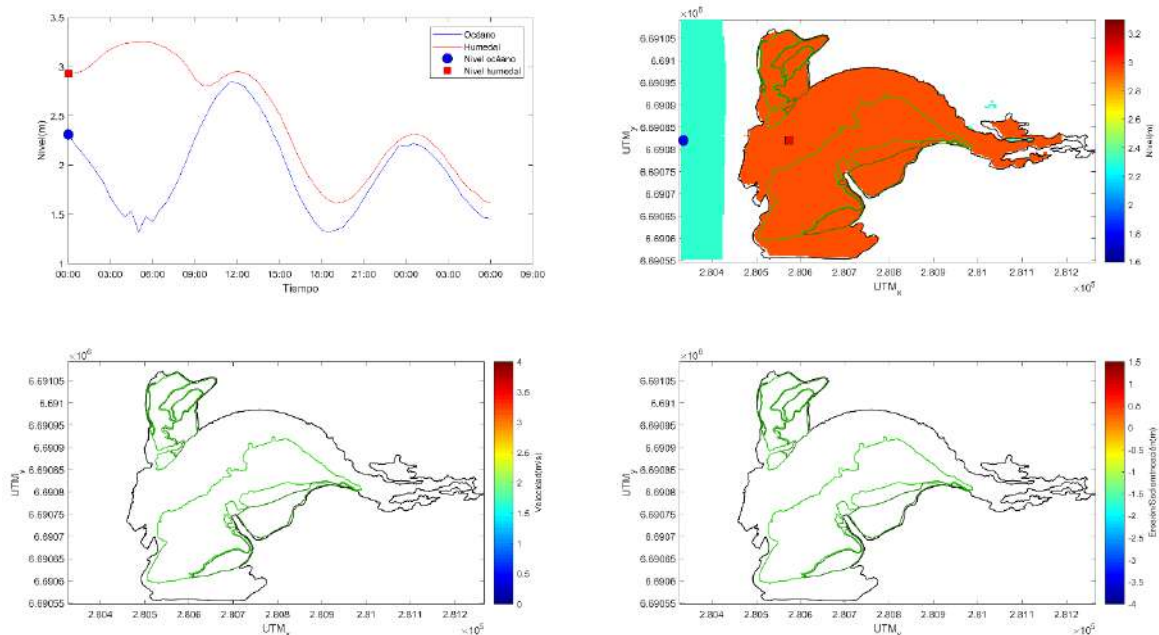


Figura 145: Condición inicial de la simulación CFQ+. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

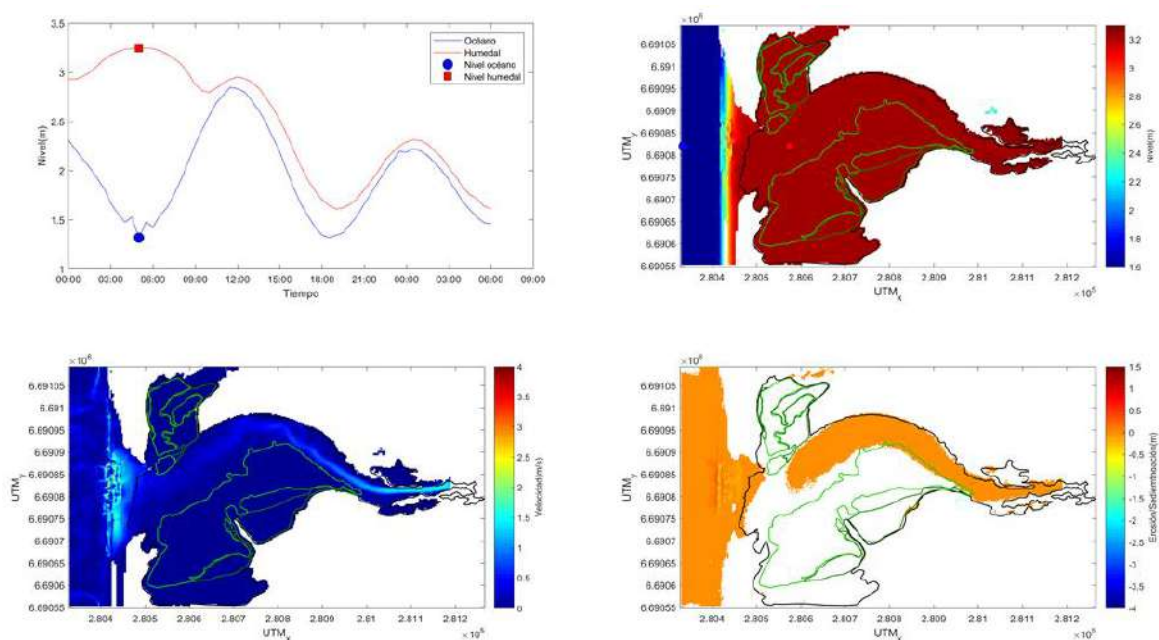


Figura 146: Simulación CFQ+ a las 5 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

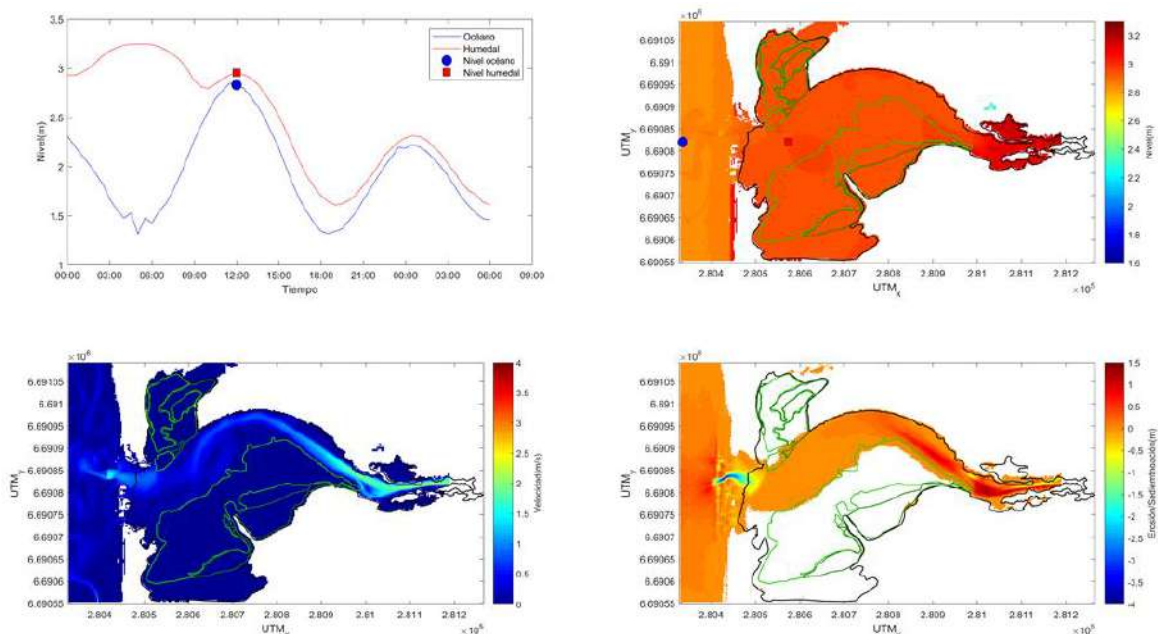


Figura 147: Simulación CFQ+ a las 12 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

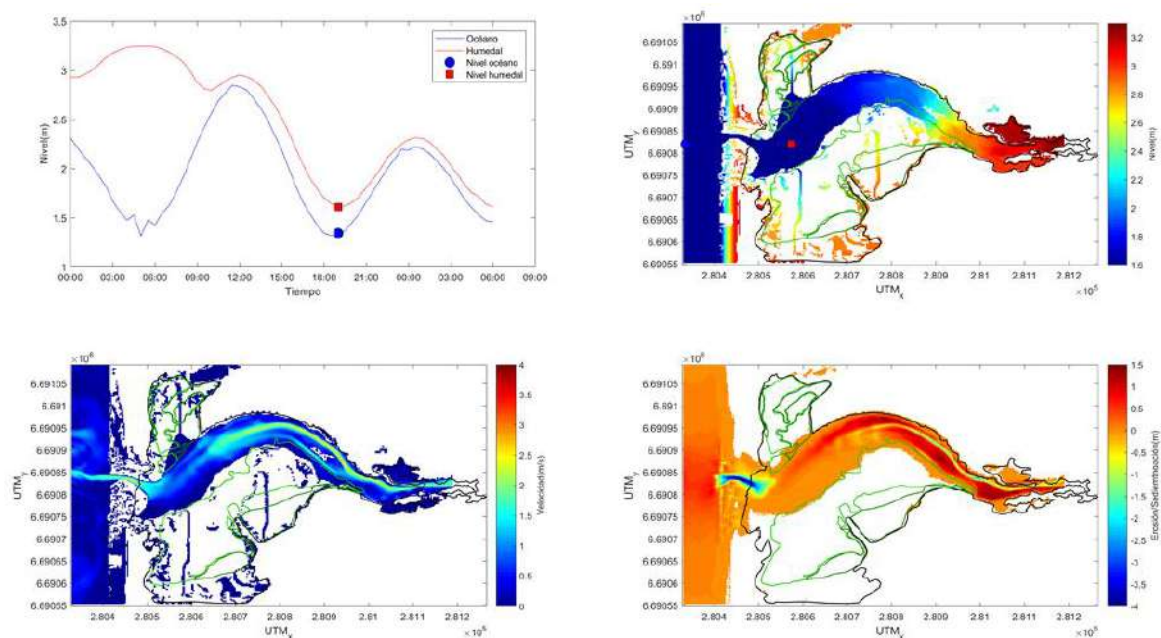


Figura 148: Simulación CFQ+ a las 19 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.4.2.9 AFQ- (Barra abierta/ futuro / año seco)

Esta simulación es muy similar a la AHQ-, pero con mayores niveles producto del aumento del nivel del mar a fin de siglo.

### 5.2.4.2.10 AFQ+ (Barra abierta/ futuro / año húmedo)

Los resultados de esta simulación (Figura 149 a Figura 152) son similares a la simulación AHQ+ y CFQ+, pero este caso inicia con el canal de apertura de la barra. Esto favorece que el nivel máximo inicial del humedal dure menos tiempo (3 horas en lugar de 6 horas para casos anteriores). El resto es similar, con modulación de la marea y erosión del canal.

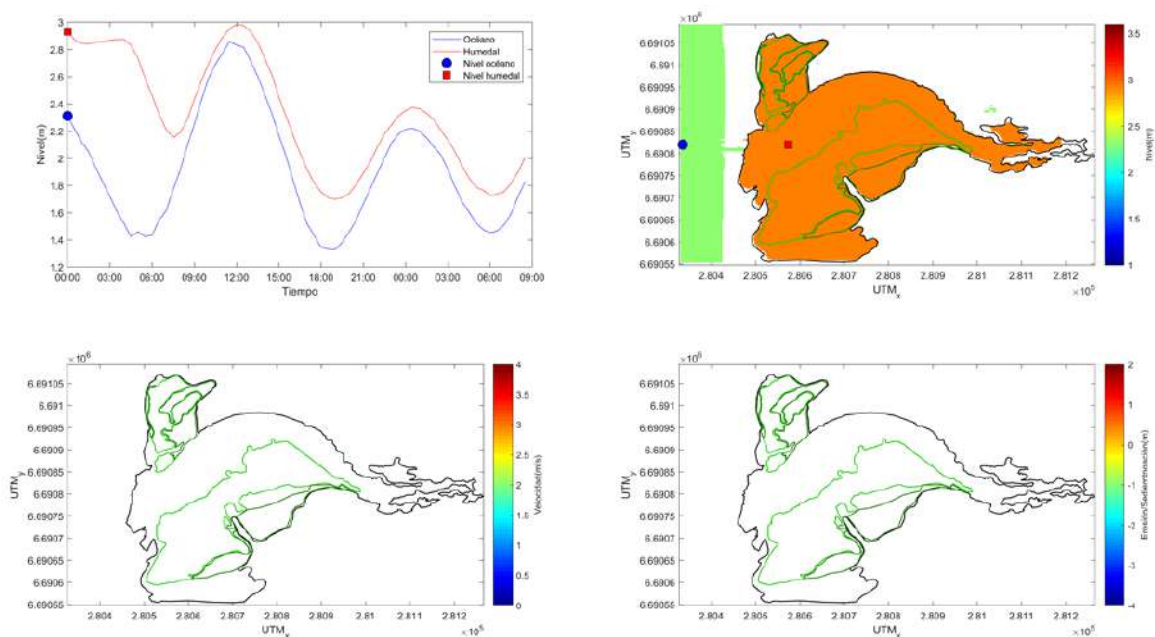


Figura 149: Condición inicial de la simulación AFQ+. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

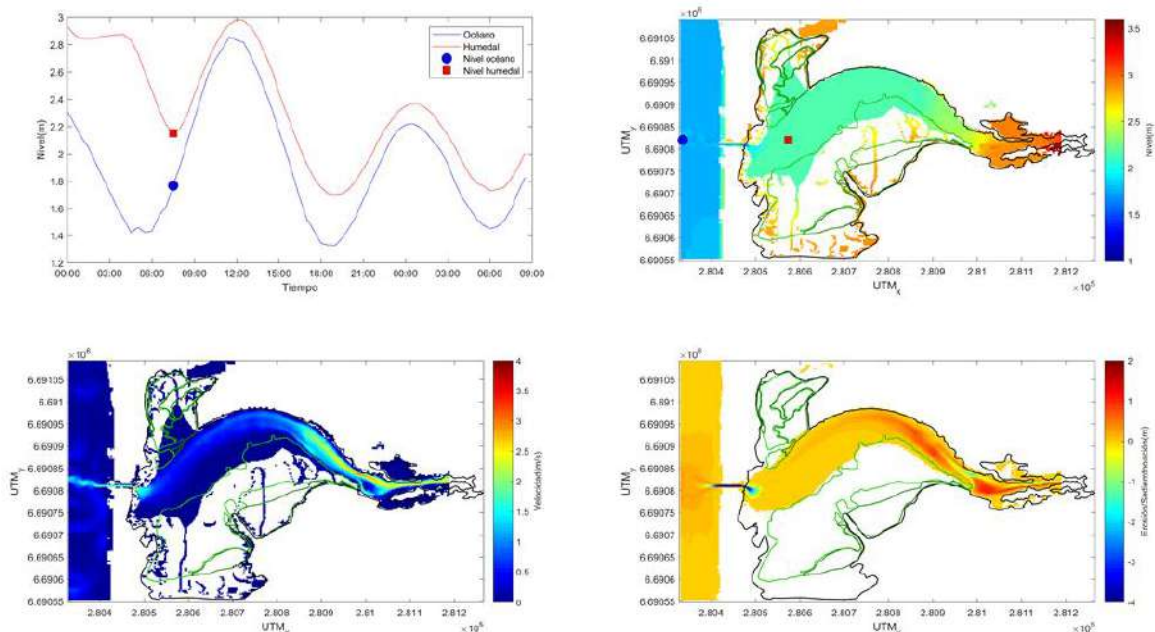


Figura 150: Simulación AFQ+ a las 7 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

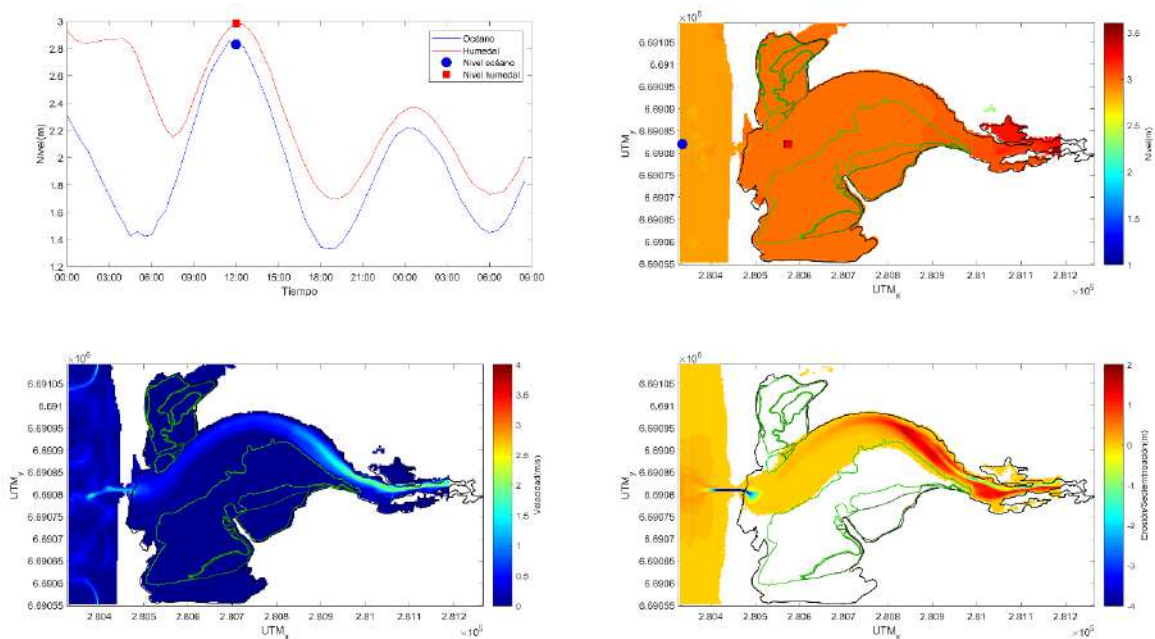


Figura 151: Simulación AFQ+ a las 12 horas. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

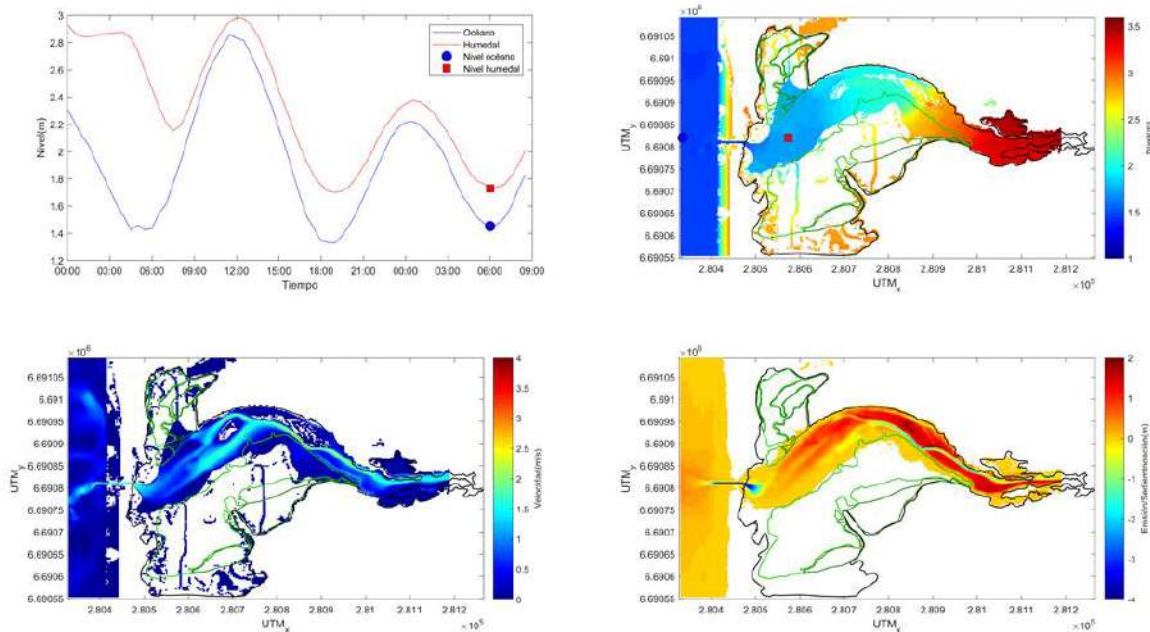


Figura 152: Simulación AFQ+ a las 6 horas del segundo día. Niveles en un punto dentro del humedal (arriba, izquierda), niveles en planta (arriba, derecha), velocidad (abajo, izquierda) y erosión y/o sedimentación (abajo derecha). El polígono negro demarca el humedal registrado en la campaña de terreno. Los polígonos verde claro y verde oscuro corresponden con la vegetación de pajonal y vegetación baja halófitas, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4.2.11 SHQ-/V+ Y SHQ-/V- (Sobrepaso / histórico / año seco / con y sin vegetación)

Se presentan los resultados de la simulación del sobrepaso del oleaje sobre la barra de arena y descargando agua salada en el interior del humedal. Siguiendo la metodología de la Sección 3.4.4.4, el run-up,  $R_{0.2\%}$ , fue de 3,25 m sobre el nivel medio del mar. Dado que la cota máxima de la barra en la zona de sobrepaso fue en promedio de 3,1 m, se obtuvo una profundidad del sobrepaso de 0,15 m. El sobrepaso cubrió 44 celdas de 2,5 m cada una, totalizando una sección de 110 m. Con esto se obtuvo una sección del sobrepaso de  $0,15 \text{ m} \times 110 \text{ m} = 16,5 \text{ m}^2$ . Adicionalmente, la velocidad de sobrepaso fue de 12 m/s para un porcentaje de excedencia del 50%, lo que resultó en una descarga de  $12 \text{ m/s} \times 16,5 \text{ m}^2 = 198 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada ola de sobrepaso. Según los datos del oleaje, el período de este es de 13,7 s, por lo tanto, la secuencia de descarga se realizó también en períodos coincidentes como muestra la Figura 153.

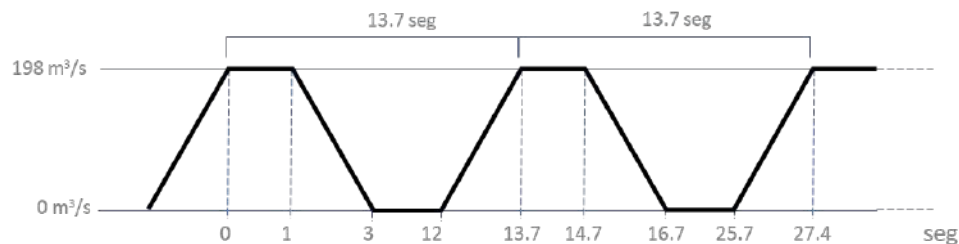


Figura 153: Secuencia de descarga del oleaje al humedal por efecto del run-up para un evento de oleaje extremo.  
Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos se realizó una simulación durante 24 horas con sobrepaso de una ola cada 13,7 s. Se configuró la simulación para un caso con vegetación y otra ficticia sin vegetación, con el objetivo de evaluar la influencia de esta en el proceso de mezcla de salinidad. El modelo se configuró con 5 capas homogéneas del 20% de la profundidad en cada celda. Como muestra la Figura 154, el gradiente horizontal a lo largo del humedal es evidente. La estratificación vertical, por el contrario, es muy leve alcanzando una diferencia menor a 0,20 ppt entre la superficie y el fondo en las zonas más profundas. Estos resultados no implican que no puedan producirse en otras condiciones. En la Figura 155 se observa que, al estar presente la vegetación, la salinidad avanza más lentamente por el humedal, quedando más concentrada en el cuerpo de agua principal cercano a la descarga. A las 24 horas se aprecia que la salinidad del agua de mar tiene influencia en zonas más alejadas de la descarga que para la situación con vegetación.

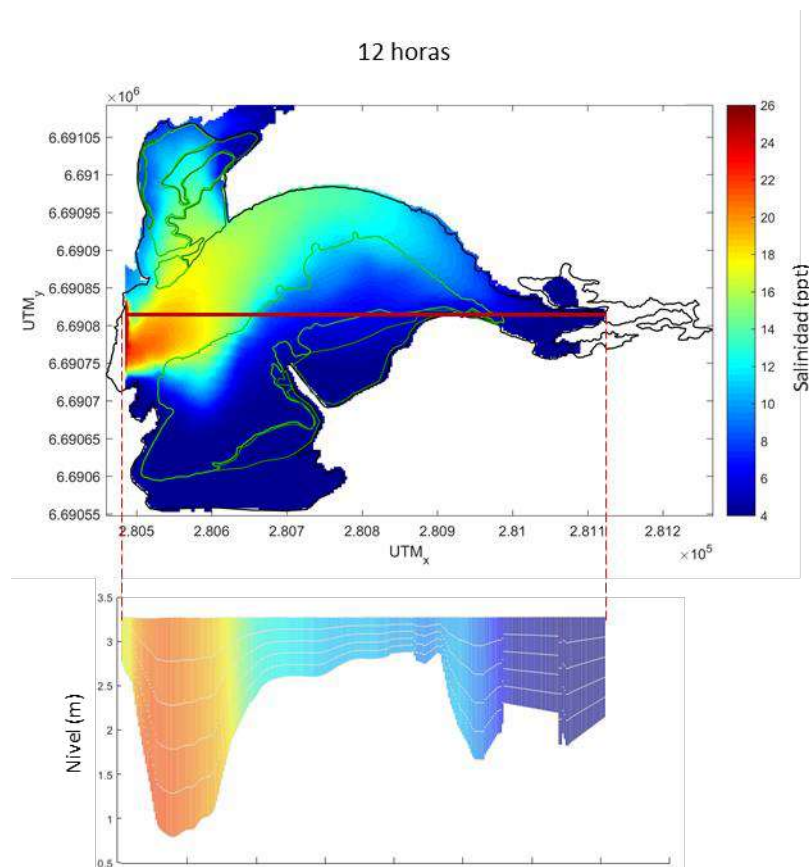


Figura 154: Perfil longitudinal y vertical de salinidad en la simulación del sobrepaso a 12 horas del inicio de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

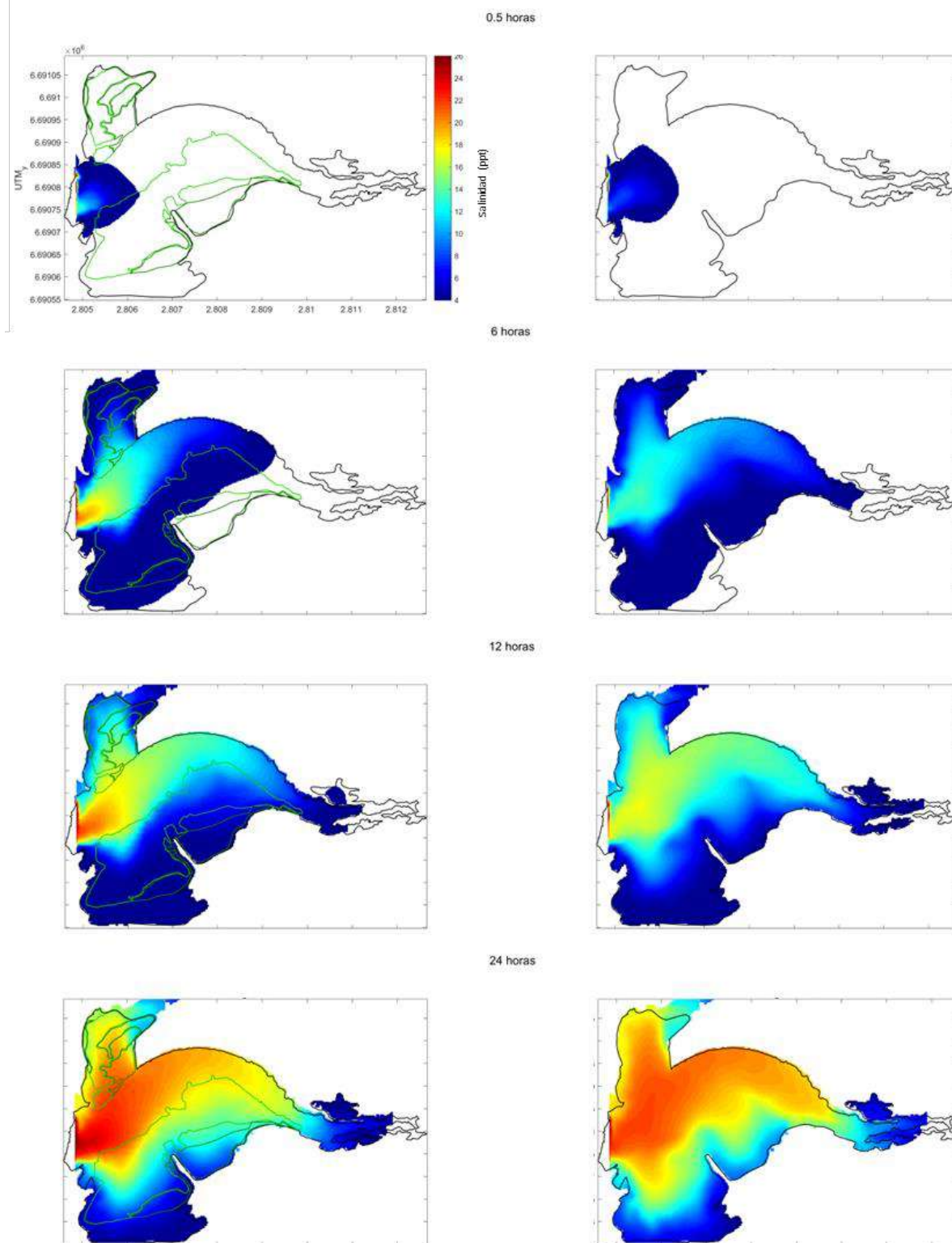


Figura 155: Evolución de la salinidad por sobrepasado de olas individuales durante un evento de oleaje extremo. Situación de humedal con vegetación (izquierda) y sin vegetación (derecha). Fuente: Elaboración propia.



#### **5.2.4.2.12 MHQ-/V+ (Mezcla Salinidades / histórico / año seco/ con vegetación)**

Por último, se configuró una simulación para calcular el tiempo en alcanzar una salinidad homogénea después del evento de sobrepaso, considerando que no existe entrada de flujo desde el río Elqui y la única forzante actuante es el viento. Como se ve en la Figura 156, la mezcla completa hasta las zonas más alejadas de la barra de arena se consigue después de 15 días.

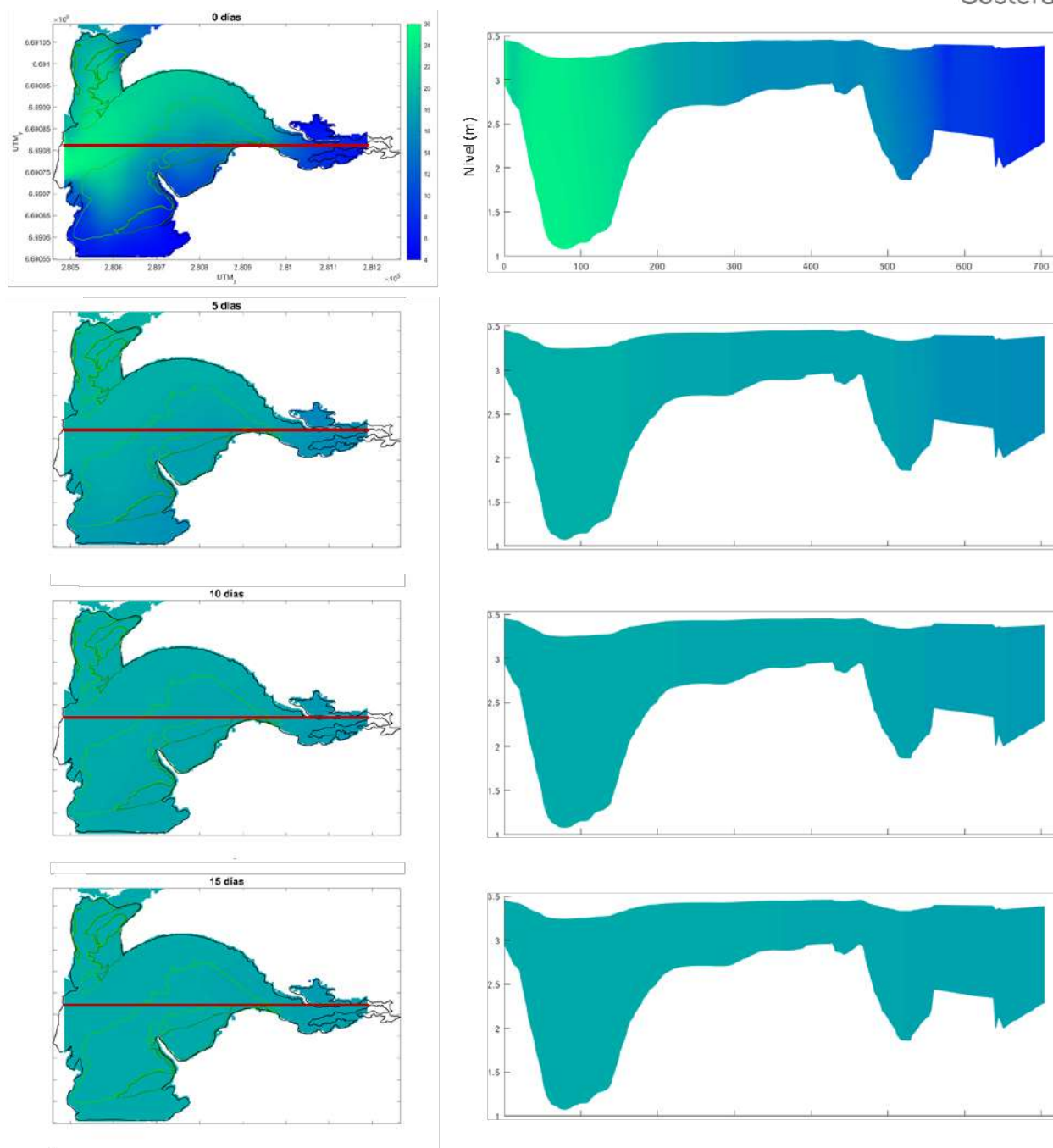


Figura 156: Evolución de salinidad una vez terminado el evento extremo con sobrepaso de oleaje. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4.2.13 Resumen de casos simulados para barra abierta y cerrada

La Tabla 18 resume los resultados de las simulaciones para casos con barra abierta y cerrada.

Tabla 18: Resumen de rangos de resultados por simulación. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Barra cerrada Histórico			Barra abierta Histórico			Barra cerrada Futuro		Barra abierta Futuro	
	CHQ-	CHQ	CHQ+	AHQ-	AHQ	AHQ+	CFQ-	CFQ+	AFQ-	AFQ+
Nivel máximo (m)	2.93	3.19	3.27	2.93	3.10	3.10	2.93	3.25	2.93	3.00
Tiempo desde el inicio (h)	0	6	6	0	6	5	0	5.5	0	12
Nivel mínimo (m)	2.93	2.85	2.83	2.85	1.20	1.30	2.93	1.70	2.80	1.70
Tiempo desde el inicio (h)	0	72	72	72	20*	30*	0	19*	72	19*
Velocidad (m/s)	0 - 0.025	0 - 1.8	0 - 2.5	0 - 1	0 - 4.5	0 - 5	0 - 0.06	0 - 4	0 - 1	0 - 4
Acreción máxima (m)	0.0	1.0	2.0	0.2	1.0	2.0	0.0	1.5	0.2	2.0
Erosión máxima (m)	0.0	2.0	2.5	0.1	3.0	3.0	0.0	4.0	0.05	4.0
Inicio de sobrepaso desde el humedal al océano (h)	-	4	3	-	-	-	-	3	-	-

\* Nivel cuando empieza la modulación con la marea. Por lo tanto, el nivel puede ser menor en condición de más baja marea.

A continuación, se resumen resultados relevantes de las simulaciones:

- El transporte de sedimento existe para todas aquellas simulaciones con flujo de entrada desde el río Elqui, tanto en año normal como en año húmedo.
- Las velocidades son variables dependiendo justamente de la entrada desde el río, con velocidades máximas de entre 2,0 m/s y 4,5 m/s.
- Las velocidades y magnitudes de erosión/sedimentación para años normales son menores que para años húmedos, pero en todos los casos los cambios del fondo se generan en la zona del cuerpo de agua principal y en la barra de arena.
- La socavación es relevante en la cabecera del humedal, donde se genera un canal por excavación, y en la barra de arena que sufre una erosión mayor producto del sobrepaso del agua, generando un canal de entre 3 y 4 m de profundidad respecto de la posición inicial del terreno (Figura 157). Los embanques, por su parte, se producen en el fondo del cuerpo de agua principal, con depósitos máximos de 1 m en simulaciones de año normal y hasta 2 m en años húmedos, lo cual es relevante dado lo somero del cuerpo de agua.

- Tanto las velocidades como las erosiones/sedimentaciones se ven reducidas o impedidas en las zonas de presencia de vegetación, que actúa como un límite de atenuación hidrodinámica y de ahí su importancia dentro del sistema.

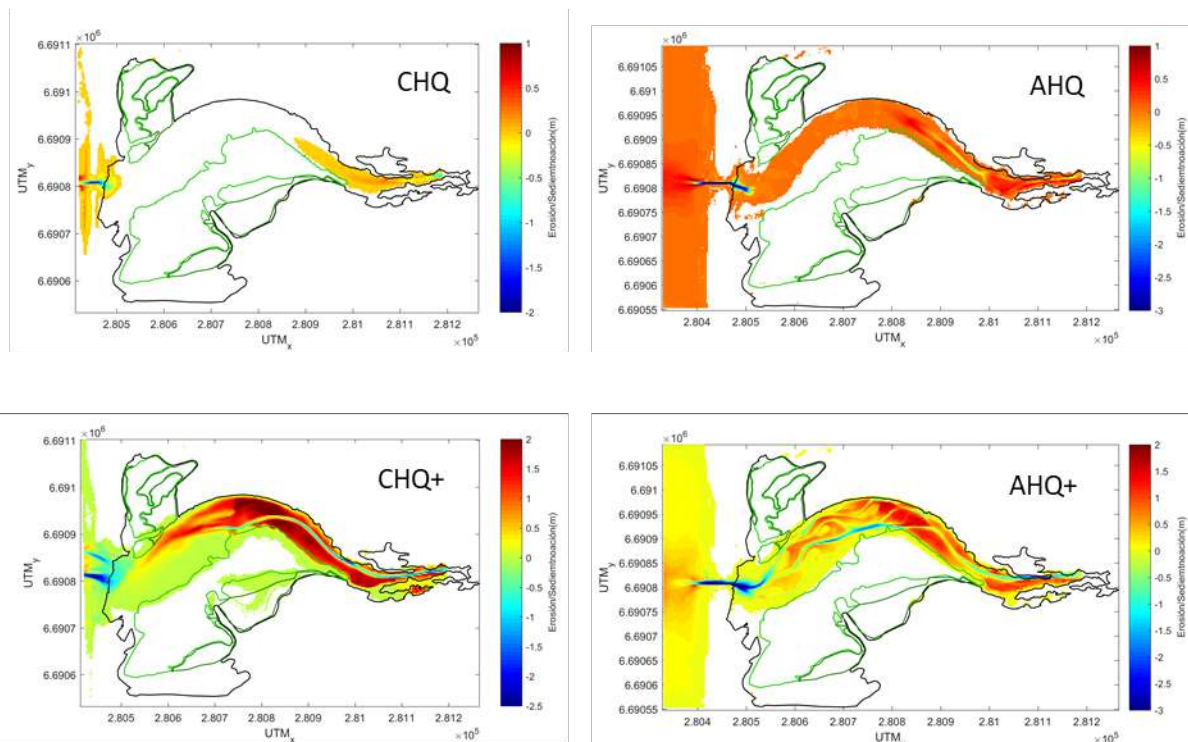


Figura 157: Erosión sedimentación para casos de año seco y año húmedo en el período histórico. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.5 Transporte de sedimentos

Históricamente, en la cuenca del río Elqui se han desencadenado flujos aluvionales y remociones en masa, los cuales han afectado asentamientos humanos, carreteras e infraestructura esencial. Así, entre 1900 y 1981 ocurrieron 522 eventos de inundación en la Región de Coquimbo y 373 en la cuenca del Elqui. Posteriormente, los temporales de 1997, año de ocurrencia del evento ENOS más intenso del siglo XX, causaron aludes e inundaciones producto de las crecidas de algunas de las quebradas que conforman la cuenca del Elqui, como la bajada de la Quebrada Santa Gracia, en la localidad de Islón y el alud en el sector de El Almendral (Pérez *et al.* 2009). Por otra parte, los principales cauces con recurrencia de aluviones son la Quebrada la Marquesa, Río Elqui, Río Turbio, Río Claro o Derecho y Río Cochiguaz (Aguas Consultores SpA 2019). Destaca el aluvión de 18-06-1997, que destruyó completamente el pueblo El Almendral, generando 2 fallecidos y 140 albergados. Entre el 24 al 26 de marzo de 2015 ocurrieron una serie de aluviones que afectaron a gran parte de los poblados de la cuenca. Este evento se activó por la elevación de la isoterma 0°C, generando que en sectores donde habitualmente precipita nieve precipitara agua líquida. Los cauces afectados correspondieron a la Quebrada Marquesa, Río Elqui, Río Cochiguaz y Río Turbio, todos estos ubicados

aguas arriba del embalse Puclaro (Aguas Consultores SpA 2019). Un evento similar por las mismas causas (precipitaciones intensas y aumento de la isoterma 0°C) se volvió a generar 2 años después, afectando a los cauces antes mencionados.

Después de la construcción del embalse Puclaro, el río Elqui queda dividido, donde las cuencas aguas arriba del embalse quedan con influencia nival y las cuencas agua abajo quedan con influencia pluvial, cambiando drásticamente el comportamiento de las crecidas. Por ejemplo, entre 1880 y 2017 se registraron 84 eventos de flujos detríticos (principalmente aluviones) aguas abajo del embalse Puclaro y 60 aguas arriba del embalse. Por otra parte, se registraron 11 eventos antes de la construcción del embalse (1999) y 133 después de la construcción, estando el 81% de ellos concentrados en 2015 y 2017.

La actividad agrícola se ve restringida una vez instalado el embalse, cambiando la cantidad y distribución temporal de los caudales. Entre 1996 y 2007 aproximadamente el 40% del área cultivada de la cuenca se ubica en la comuna de La Serena, mientras que en el año 2019 la superficie disminuye llegando en las comunas de La Serena y Coquimbo al 47% y 50% de lo observado en 2007. Esto último podría ser una consecuencia de la sequía por un lado y la instalación de zonas urbanas por otro (Aguas Consultores SpA, 2019).

Por otra parte, el embalse se comporta como una barrera que impide el paso de los sedimentos desde la cuenca alta a la baja, disminuyendo también el régimen de caudales aguas abajo, que limita de nuevo el transporte de sedimentos. La estimación realizada por Aguas Consultores SpA (2019) fue de una acumulación de  $7,7 \times 10^5 \text{ m}^3$  de sedimentos desde el inicio de llenado del embalse hasta el 2018, donde también se estimó, para el mismo período, un transporte de sedimentos a la costa de  $3,6 \times 10^5 \text{ m}^3$ , lo que da cuenta de la magnitud del déficit de sedimentos que está llegando a la desembocadura. A esta falta de sedimentos en la costa se suma además la extracción de áridos en la cuenca baja, la cual se presenta principalmente entre los puentes Zorrilla y Altovalsol, cubriendo un tramo aproximado de 12 km del río Elqui. El volumen total autorizado para extracción entre 2009 y 2020 fue igual a  $3,25 \times 10^6 \text{ m}^3$ , siendo muy probable que este volumen fuera superior por la existencia de puntos de extracción no autorizados por la I. Municipalidad de La Serena (Aguas Consultores SpA, 2019).

### 5.2.6 Caracterización comportamiento barra terminal de arena

La barra de arena de la desembocadura del río Elqui puede encontrarse abierta o cerrada. En la Figura 158 se muestra el porcentaje de días en que la imagen satelital revela que la barra se encuentra abierta. Estos porcentajes son una estimación basada en imágenes obtenidas de las misiones Landsat y Sentinel, que no pasan todos los días sobre el humedal y, en ocasiones son cubiertas por la nubosidad.

En la Figura 160 se muestran algunos ejemplos de identificación de la barra abierta. Durante el período 1985–2021, la mayoría de los años (24 de 36 años), el Elqui se encontraba con la barra abierta sobre el 50% de los días con que se cuenta con fotografías satelitales. Entre los años 1996-1997 y 2012, la totalidad de las imágenes muestran al Elqui con su barra abierta; mientras que el período 2013 -2016 destaca porque en la mayoría de los casos la barra se encuentra cerrada. La apertura de la barra puede ser natural o artificial. Para identificar ambos casos se consideró el siguiente criterio, que se ilustra en la Figura 161:

- Apertura Natural: Si la apertura es irregular, con curvas y una inclinación hacia el norte o el sur.

- **Apertura Artificial:** Si la apertura es completamente recta perpendicular a la línea de playa y angosta (en el caso de ser ancha, se considera que ocurrió una apertura natural).

El análisis permite constatar que el porcentaje de veces por año con aperturas artificiales ha aumentado en los últimos años, en coincidencia con el desarrollo inmobiliario en el entorno de la desembocadura (Figura 159). En los últimos 10 años, en 6 de ellos, el porcentaje de aperturas artificiales detectadas supera el 80%, destacándose los años 2013 a 2015, donde el 100% de las aperturas fueron artificiales.

Por último, se identificó los años en que se observaba una pluma con material sedimentable en suspensión (Figura 162), eventos que parecen estar disminuyendo en el tiempo (Figura 163).

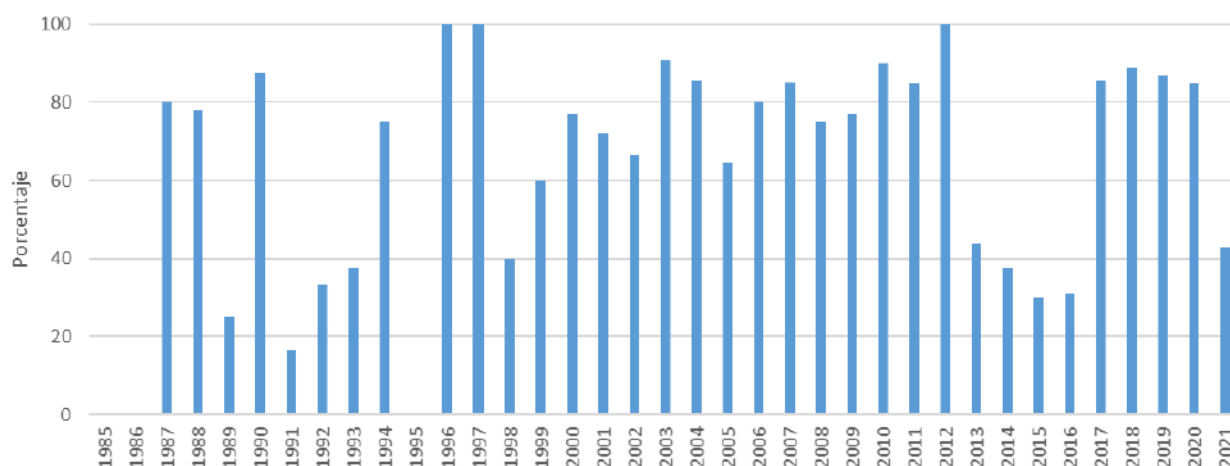


Figura 158: Porcentaje de imágenes por año conteniendo la desembocadura del río Elqui abierta al Mar. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Landsat y Sentinel.

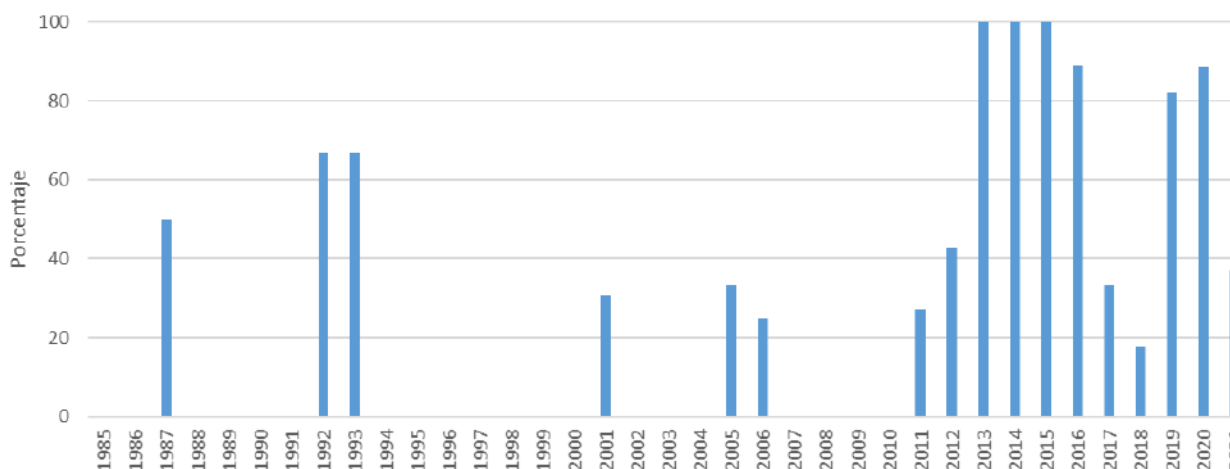


Figura 159: Porcentaje de imágenes por año conteniendo la desembocadura del río Elqui abierta artificialmente al Mar. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Landsat y Sentinel.



Figura 160: Ejemplos de la barra abierta. A) 2015-08-18, B) 2016-10-24, C) 2017-01-02, D) 2017-08-08 y E) 2017-10-01. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Lansat y Sentinel.

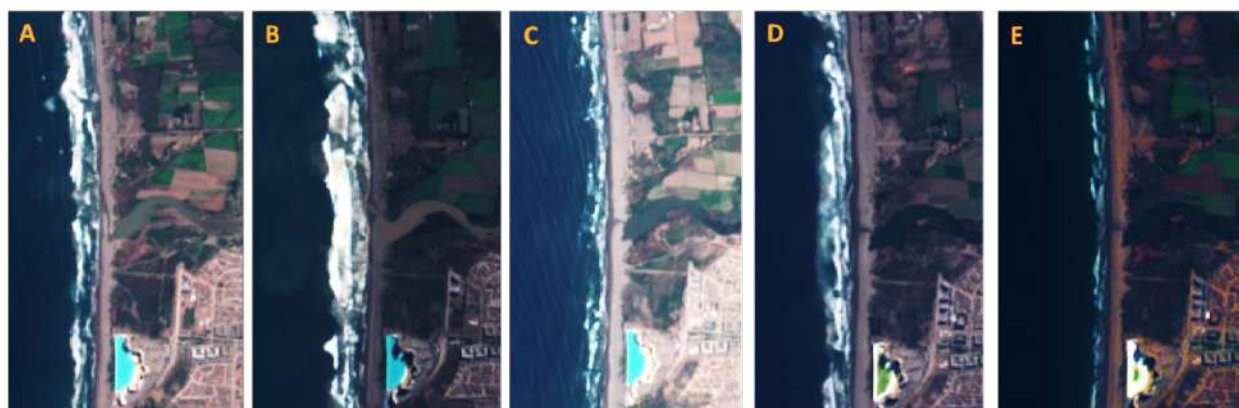


Figura 161: Ejemplos de barra abierta naturalmente: A) 2017-08-07, B) 2018-06-11 y artificialmente: C) 2019-12-15; D) 2020-06-12 y E) 2020-07-30. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Lansat y Sentinel.

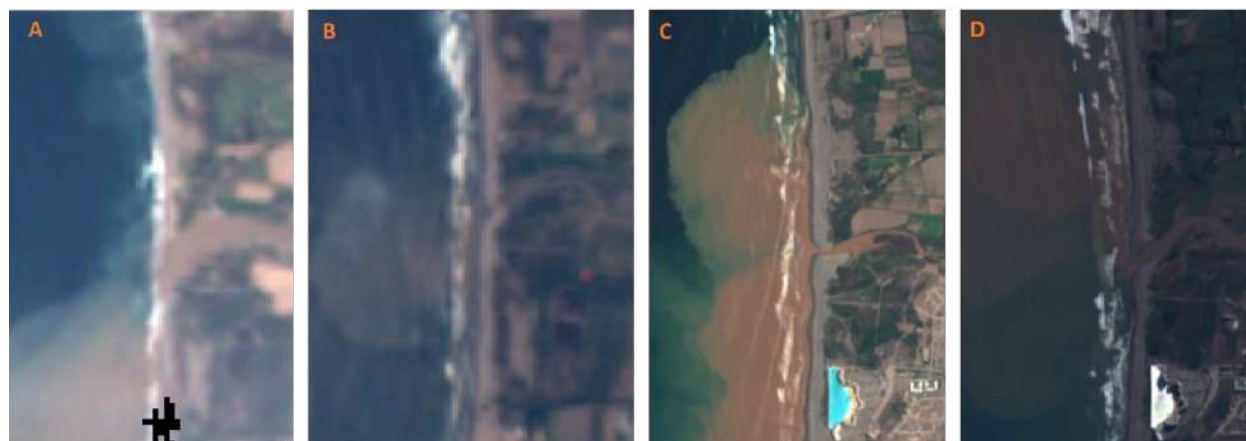


Figura 162: Ejemplos de plumas de dispersión de la desembocadura identificadas. A) 1997-10-16, B) 2002-12-09, C) 2016-12-10, D) 2017-05-19. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Lansat y Sentinel.

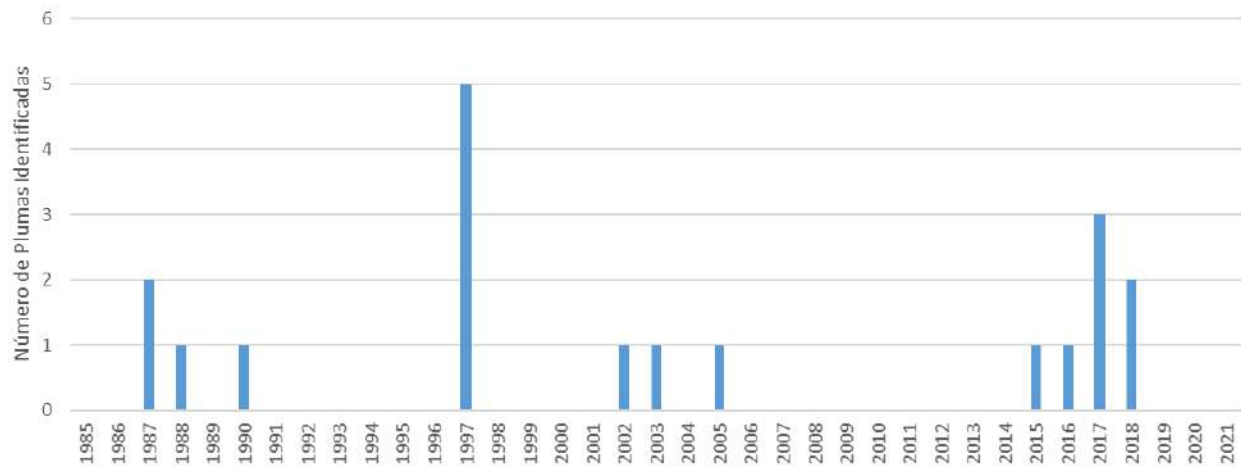


Figura 163: Evolución del número de imágenes por año conteniendo plumas de dispersión en la desembocadura del río Elqui. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Landsat y Sentinel.



### 5.3 Resultados actividades asociadas con el objetivo específico 3

Para el cumplimiento del objetivo específico OE3) “Proponer estrategias de manejo y gestión del humedal, enfocado en su comportamiento hidrodinámico y morfodinámico”, se obtuvieron los siguientes resultados:

#### 5.3.1 Revisión bibliográfica manejo y gestión

En Chile, los estudios acerca de la configuración de las desembocaduras en la zona central son relativamente escasos. Destacan las contribuciones de Araya-Vergara (1971, 1981, 1982, 1996), Stuardo & Valdovinos (1989) y Andrade & Grau (2005). Araya-Vergara propone una zonificación de los estuarios según sus características morfoclimáticas, distinguiendo la zona de los deltas distales del desierto, la zona de las rías progradadas del Norte Chico (desde el río Copiapó hasta el Maipo), la zona de los deltas estuariales en la zona de transición entre clima semiárido y húmedo (desde el río Rapel hasta el río Biobío), y la zona de las rías de clima húmedo y muy húmedo en la Región de los Lagos (Araya-Vergara, 1981, 1982). Por otra parte, Stuardo & Valdovinos (1989) y Andrade & Grau (2005) distinguen entre estuarios y lagunas costeras, incorporando a la clasificación el carácter estacional del régimen hidrológico de los cursos de agua dulce que los forman.

Los estuarios son cuerpos de agua conectados con el mar, donde el agua salada es diluido y modificado por el agua dulce del río. El componente marino está dado por la intrusión de las mareas que produce una estratificación del agua (Cienfuegos *et al.* 2012). Normalmente, una capa superficial de agua dulce o salobre se mueve hacia el mar y bajo ésta fluye una capa de agua salada hacia el interior. Sin embargo, la zona central de Chile posee un régimen micromareal, con rangos en general inferiores a 2 m. Por otra parte, el clima de oleaje reinante es de dirección Sur-Oeste (Cienfuegos *et al.* 2012), con alturas de olas altamente energéticas (superiores a 2 m), por lo que los estuarios de esta zona de Chile son dominados por el oleaje (Davis & Hayes 1984).

Por otra parte, los esteros costeros tienden a formar lagunas o humedales en sus desembocaduras, puesto que su escorrentía superficial es baja y altamente variable. Este es el caso del estero Pachingo, en la cercanía de Tongoy. Estos humedales sólo se conectan al mar en condiciones excepcionales por efecto de crecidas generadas por lluvias intensas o por intensas marejadas (Cienfuegos *et al.* 2012). Estas desembocaduras pueden clasificarse como lagunas costeras de acuerdo con el modelo de Cooper (2001). Si bien los estuarios son cuerpos de agua semi-encerrados por bordes continentales o barras de arena y una conexión libre con el mar; cabe destacar que en esta zona el caudal medio anual de los ríos es el elemento preponderante. Los ríos con caudal medio anual bajo y coeficiente de variación relativamente alto tienden a presentar desembocaduras cerradas, con la formación de lagunas costeras (Cienfuegos *et al.* 2012), ya que el acarreo de sedimentos provocado por el oleaje dominante favorece la formación de barras que la escorrentía superficial de los ríos no alcanza a romper. Este es el caso de la desembocadura del Río Elqui que, a pesar de ser un río cordillerano, posee un bajo caudal medio anual, dificultando la salida al mar del río en condiciones normales (Stuardo & Valdovinos 1989).

Los estuarios tienen alta productividad biológica y una alta biodiversidad (Cea *et al.* 2019, Zuleta-Ramos *et al.* 2019), con varias especies de importancia económica (Cienfuegos *et al.* 2012). Sin embargo, presentan un elevado riesgo de contaminación por la cercanía a zonas pobladas del litoral y se ven enfrentados a una serie de amenazas a su integridad ecológica (Contreras-López & Zuleta-Ramos 2019). Es importante destacar que la configuración de estos sistemas en el norte y centro de Chile ha favorecido el poblamiento humano con múltiples usos y explotación, cuya importancia recientemente ha comenzado a reconocerse y valorarse (Palczek-Alcayaga *et al.* 2019).

Un análisis sobre sistemas estuarinos y manejo de barras de arena en la literatura nacional e internacional arrojó 46 documentos publicados (la mayoría internacionales), de los cuales 40 se refieren a estuarios y sólo 6 sobre barras. Estos documentos fueron seleccionados del listado de estudios que los buscadores Google Scholar y Web of Science entregaron como resultado de los términos de búsqueda empleados. Sobre la base de la información recopilada es posible establecer que una amplia zona litoral de Chile entre Arica y Puerto Saavedra está sometidas a un régimen micromareal de acuerdo con la clasificación propuesta por Davies (1964). En ambientes micromareales con rangos de marea inferiores a 2 m, es frecuente observar la formación de barras de arena en las desembocaduras de los ríos bajo el efecto del oleaje, dado que la disipación de energía y el aporte de sedimentos fluviales se concentran en este sector (Cienfuegos *et al.* 2012). Estos sistemas son conocidos como Intermittently Closed and Open Lakes o Lagoons (ICOLL), Intermittently Open Estuaries (IOE), Intermittently Open-Closed Estuaries (IOCE), Temporarily Open-Closed Estuaries (TOCE), Bar-Built Estuaries (BBE) y/o Seasonal Lagoons (Photosíntesis 2021).

Es interesante notar que este tipo de régimen mareal, unido a una alta variabilidad estacional en la hidrología de los ríos, ha permitido explicar la dinámica de cierre apertura de algunas lagunas costeras en Australia (Hoeksema *et al.* 2018), Sudáfrica (Largier *et al.* 1992) y Estados Unidos (Elwany *et al.* 1998, Clark & O'Connor 2019) entre otros. Cuando domina la fuerza del oleaje oceánico, existe una alta capacidad de transporte marino que tiende a generar depositación costera formando dunas y/o barras de arena que cierran la salida del estuario. Dependiendo de las condiciones hidrológicas, algunos estuarios presentan períodos secos de bajo caudal y períodos húmedos con precipitaciones intensas que provocan pulsos de crecidas fluviales capaces de aumentar la carga hidráulica y/o encontrar una salida al mar mediante la erosión y apertura de la barra. Como resultado de esta dinámica de fuerzas entre el oleaje, el sistema fluvial, y la marea en menor medida, tienden a generarse estuarios que presentan una conexión intermitente con el mar (Davis & Hayes 1984). Desde el punto de vista ecológico y ambiental, la influencia de las mareas en los ríos aguas arriba de sus desembocaduras puede ser muy relevante (Dias *et al.* 2019; Galliari *et al.* 2021). Esta situación incide en el desarrollo de una cuña salina modulada por la escorrentía fluvial y las fluctuaciones del nivel del mar. Las desembocaduras que tienen una pendiente menor presentan una mayor influencia en la penetración de las mareas (Araya-Vergara 1981).

Un modelo conceptual de este tipo de estuarios que tienen conexión intermitente con el mar es propuesto por Haines (2006), quien describe cinco grandes componentes del sistema: hidrodinámica, sedimentología, calidad de agua, calidad del sedimento, y biología. A partir de estos componentes, se identifican subprocesos cuya interrelación puede explicar las potenciales causas y efectos que tiene el manejo artificial. A partir del modelo, se observa el rol clave que cumple el mecanismo hidrodinámico en el estado de otras variables. En base a este concepto, Sonoma Water (2020), a partir de observaciones empíricas e interpretaciones geomorfológicas, identifica los siguientes parámetros y procesos claves: caudal fluvial, nivel de la laguna, caudal, nivel de mareas y procesos de erosión-deposición en función de la geometría del canal, la barra, tamaño de grano de arena y procesos oceánicos.

Slinger (2017) propone un modelo paramétrico de dinámica de apertura y cierre de las desembocaduras de pequeños estuarios dominados por el oleaje. En este modelo, el estuario se concibe como una cuenca, conectada al mar por un canal de ancho fijo, pero altura de umbral variable. La boca está modelada como un canal rectangular conectado a la cuenca del estuario. Aparte de la variación de mareas y el caudal afluente, se parametriza la geometría de acuerdo con una profundidad efectiva de flujo, el ancho de la boca y la longitud de la boca.

Algunos investigadores (Clark & O'Connor 2019, Largier *et al.* 1992, Hoeksema *et al.* 2018, Cooper 2021) señalan que las entradas de agua dulce al estuario son significativas para determinar el comportamiento de la desembocadura. La magnitud y dirección del flujo a través de la barra determina si se produce erosión o deposición de sedimentos en el canal de la desembocadura, lo que influye en la altura del umbral (Slinger 2007).

Adams & Van Niekerk (2020) indican que la apertura artificial como medida de mitigación del flujo debe practicarse con precaución porque, además de los efectos ecológicos adversos que puede producir, conduce a la sedimentación y, por lo tanto, a la reducción de la descarga en un estuario. Cuando la ruptura ocurre a niveles naturales, un gran volumen de agua fluye hacia el mar durante un período prolongado que, a su vez, arrastra los sedimentos de los tramos inferior y medio del estuario, como se ha verificado que ocurre en la desembocadura del río Elqui (sección 5.2.1). El potencial de descarga de sedimentos aumenta exponencialmente con el aumento de las velocidades de salida. Cuando la ruptura tiene lugar en niveles de agua más bajos, la intensidad del lavado se reduce y se acumula sedimento. Esta práctica también interrumpe los ciclos normales de deposición-erosión y reduce la eficacia de arrastre de sedimentos de rupturas posteriores. En consecuencia, la barra se ensancha y los canales del estuario se contraen (Photosíntesis 2021). Estos resultados son reafirmados en estuarios emplazados en climas semiáridos como donde se encuentra el río Elqui (Días *et al.* 2019, Elwany *et al.* 1998). Varios autores también señalan los efectos sobre los cambios de parámetros como la salinidad y oxígeno de la columna de agua, que tiene la apertura de la barra (Galliari *et al.* 2021, Hoeksema *et al.* 2018). A nivel nacional, Photosíntesis (2021) propone un protocolo de manejo mecanizado para la barra del humedal de la laguna de Cahuil, es cuál tiene una dinámica de conexión/desconexión estacional parecida al Elqui, pero con mayores caudales asociados (Andrade & Grau 2005).

### 5.3.2 Identificación de elementos y variables relevantes para el manejo de humedal

En base a los resultados de esta consultoría, se identifican los siguientes elementos y variables relevantes para el manejo del humedal:

- Época del año: En forma natural la apertura de la barra tiende a ocurrir a fines de invierno (agosto) y comienzos de primavera (septiembre). Por lo tanto, aperturas artificiales de la barra fuera de estos períodos podrían alterar procesos biológicos que ocurren en forma natural en el humedal.
- Tiempo de apertura: El modelo y el monitoreo de la apertura artificial que ocurrió durante el desarrollo de esta consultoría, mostraron que el vaciado del humedal se produce en pocas horas. Por lo tanto, la apertura no debería mantenerse más allá de un ciclo de marea.
- Diferencia de la cota del espejo de agua y la marea en la playa: Actualmente el espejo de agua se encuentra más elevado que la pleamar. Debido a esto, cada vez que la barra se abre, el humedal descarga al mar. Sin embargo, la baja pendiente de la playa puede propiciar que existan sobrepaso durante las marejadas; estas típicamente ocurren en Chile central durante el invierno y extraordinariamente en verano, siendo extraños en otros meses. Por esto se debe considerar también la evolución de las cotas de perfiles de playa (altura de la anteduna y la barra de arena, con respecto al nivel del mar y del humedal).
- Cobertura de la vegetación palustre: Esta vegetación afecta la hidrodinámica del humedal, generando zonas de sombra ante la circulación inducida por el viento. Por ello, variables como densidad y composición de esta vegetación se deben tener en consideración.
- Tamaño del espejo de agua del humedal, que es proporcional al volumen de agua que contiene y a la apertura-cierre de la barra.
- Tasa de erosión de playa La Serena, cuyo retroceso facilita eventuales conexiones del mar con el humedal.

### 5.3.3 Propuestas de estrategias de implementación

En base a los resultados de esta consultoría, se identificaron ocho propuestas de estrategias de implementación para el manejo de la desembocadura del río Elqui. Cada propuesta fue sistematizada en una ficha, las que se muestran a continuación.

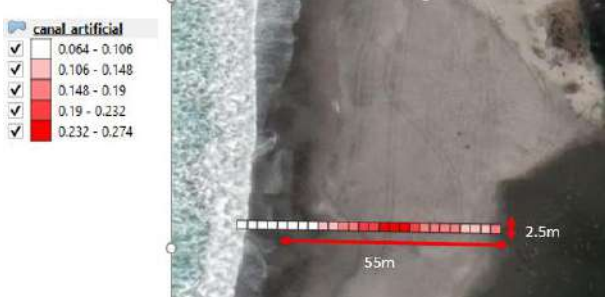

- 1) Apertura barra de arena
- 2) Cierre barra de arena
- 3) Evitar sobrepasos de mar
- 4) Gestión vegetación hidrófila del humedal.
- 5) Monitoreo desembocadura
- 6) Gestión de la playa
- 7) Monitoreo de la playa
- 8) Gestión de la cuenca y la bahía de Coquimbo

A juicio del equipo consultor, estas ocho medidas se pueden jerarquizar de acuerdo con sus potenciales impactos, beneficios, costos y factibilidad de implementación, de la siguiente forma:

- a) Medidas de bajo impacto y costo, junto con altos beneficios y factibilidad de implementación:
  - Cierre manual de la barra de arena cuando se encuentra artificialmente abierta.
  - Monitoreo desembocadura.
  - Monitoreo de la playa.
- b) Medidas de bajo impacto, junto con altos beneficios y factibilidad de implementación, pero costo mayor:
  - Evitar sobrepasos de mar mediante la restauración de dunas y barra de arena
  - Gestión de la playa.
  - Gestión vegetación hidrófila del humedal.
- c) Medidas de alto impacto y factibilidad de implementación, junto con bajos beneficios y costo:
  - Apertura artificial de la barra de arena.
- d) Medidas de alto impacto, beneficios y costos, pero de baja factibilidad de implementación:
  - Gestión de la cuenca y la bahía de Coquimbo.

Propuesta	1.- Apertura Manual Barra de Arena
Descripción	<p>Cuando la barra se encuentra cerrada y el nivel del humedal supera un umbral crítico anegando terrenos habitados del entorno, se puede abrir la barra de arena por unas horas para disminuir la anegación, siempre y cuando la apertura no ocurra en forma natural. También se debe considerar abrir la barra en eventos de eutrofización no natural, determinados a partir del monitoreo del humedal. La apertura de la barra solo debe ser realizada por algunas horas, por ejemplo, realizar la apertura durante una pleamar hasta la bajamar siguiente (6 horas) o la subsiguiente (18 horas). De preferencia la apertura debe realizarse en épocas con poca presencia de aves. En caso de no ser posible, preferir horas con baja actividad de la avifauna. La apertura no debe ser realizada durante una marejada o con el aviso de una marejada cercana, pues probablemente la conexión se desarrolle en forma natural. Una vez abierta la barra, esta debe ser cerrada siguiendo el procedimiento en la propuesta 2 (Cierre Barra Manual de Arena). Entre la apertura y cierre de la barra, no se recomienda que transcurra más allá de un día.</p>
Objetivos	<p>Evitar la anegación de zonas habitadas bajas en el entorno del humedal. En caso de eutrofización no natural, disminuir la carga de nutrientes excesiva de origen antrópico.</p>
Variables forzantes	<p>Caudal del río y nivel del agua, diferencia cota espejo de agua y el mar, tamaño del canal de apertura. Parámetros físico – químicos del monitoreo de la columna de agua del humedal.</p>
Potenciales impactos	<p>Alteración de los ciclos naturales del humedal. Si la apertura se realiza frecuentemente en forma innecesaria, se propiciará la disminución artificial del espejo de agua. Esta disminución provocaría que la vegetación palustre ribereña avance poblando zonas del álveo del humedal que normalmente se encuentra con el espejo de agua descubierto, alterando los procesos de sedimentación y transformando el humedal en una vega<sup>28</sup>. Si la apertura se realiza en forma mecanizada, se producirá compactación de la arena de la playa, afectando los macroinvertebrados bentónicos y se facilitaría la pérdida de pendiente natural de la playa, aumentando el riesgo de sobrepasos. Para minimizar potenciales impactos se recomienda (Speybroeck <i>et al.</i> 2006):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Depositar la arena removida en sectores de la playa con una composición similar, dando preferencia a la zona intermareal.</li> <li>• El depósito debe efectuarse más arriba de la línea de pleamar, para evitar pérdidas debido al oleaje.</li> <li>• Arar la arena inmediatamente después de la depositarla para evitar que se vuelva tan compacta que sea inhóspita para las criaturas de la playa.</li> <li>• Acumular la arena removida en varios montículos pequeños en lugar de uno solo grande para permitir que sobrevivan algunos animales de la playa.</li> <li>• Mantener la huella del proyecto lo más pequeña posible.</li> <li>• Permitir suficiente tiempo entre aperturas (idealmente meses) para que los organismos invertebrados bentónicos de reproducción más lenta, tengan la oportunidad de recolonizar y reproducirse en la barra.</li> </ul>
Potenciales involucrados	<p>IM La Serena, Directemar, MMA, DGA-MOP, SUBPESCA, SERNAPESCA (dada la existencia de AMERB) Comité Técnico Local.</p>
Requerimientos	<p>Siete a 27 trabajadores con palas, carretillas y herramientas para remover arena e implementos de protección personal (guantes, cascos, bloqueador) durante media jornada de trabajo. Considerar bolsas</p>

<sup>28</sup> Históricamente la desde la ribera norte hacia Punta Teatinos y desde la ribera sur de la desembocadura del río Elqui hacia Coquimbo, el sector era conocido como Vegas Norte y Vegas Sur, respectivamente. Estas vegas fueron desecadas y transformadas en terrenos para la agricultura (Videla 1958). El impacto al cual se hace referencia en este caso es que el humedal mismo (desembocadura) se transforme en una Vega.

<b>Propuesta</b>	<b>1.- Apertura Manual Barra de Arena</b>
	de basura para recolectar plásticos y otros desechos que puedan encontrarse durante la acción de apertura.
<b>Costos</b>	<p>Para la estimación de costos se deben considerar dos situaciones: a) canal artificial normal para el caso de vaciados de poco volumen y b) canal para vaciados de mayor volumen. En el caso de un canal artificial normal, la profundidad de excavación para lograr que el agua fluya desde el estuario al océano va desde los 10 cm en zonas de menor elevación, hasta los 27 cm en la cota de mayor elevación, como se muestra en la siguiente figura:</p>  <p>Se estima que el canal debe tener una longitud de 55 m y un ancho de 2,5 m, por lo que volumen total de excavación resulta ser de 22,6 m<sup>3</sup>. Se necesitan 7 trabajadores para la construcción de este canal en 2,7 horas (tiempo menor al ciclo mareal), utilizando un rendimiento de 0,83 horas/m<sup>3</sup> (un trabajador demora alrededor de 50 minutos en excavar 1 m<sup>3</sup> de material<sup>29</sup>).</p> <p>El canal para vaciados de mayor volumen requiere mayor ancho y profundidad con el fin de evacuar caudales de gran envergadura (por ejemplo, los 32 m<sup>3</sup>/s promedio anual registrados por la estación Río Elquí en La Serena en el año 2001).</p> <p>Para este canal se obtiene un volumen de excavación de 114,3 m<sup>3</sup>, un volumen 5 veces mayor al calculado para el canal anterior. Por lo tanto, para que este canal sea construido en un tiempo de 3,5 horas, se necesitaría una cuadrilla de 27 trabajadores.</p>  <p>Esta medida requiere mantener un monitoreo de los niveles del agua alcanzado por la desembocadura. Para ello se puede utilizar una regla limnimétrica como se ilustra en la siguiente figura.</p>

<sup>29</sup> <https://www.insucons.com/ec/analisis-precio-unitario/hh/excavaciones/17182/excavacion-a-cielo-abierto-a-mano-en-tierra>

Propuesta	1.- Apertura Manual Barra de Arena
	  <p data-bbox="418 562 1421 806">La medición del nivel de agua es importante para evaluar las crecidas fluviales y riesgo de inundación, por lo que es relevante contar con información regular, sobre todo en casos que se perciba incremento del agua. Para la medición del nivel requiere contar, idealmente, con un nivel de referencia vertical asociado al Nivel de Reducción de Sondas (NRS), el cual debe ser estimado para cada sitio específico. Las lecturas pueden ser anotadas manualmente en un registro (bitácora), mientras que para la regla existen opciones desde costo bajo (en caso de pintar las referencias) hasta aprox. \$500.000 pesos (en caso de comprar las regletas limnimétricas). Existen opciones para instrumentalizar estos registros con sensores de presión de la columna de agua, con valores que pueden superar los \$2.500.000.</p>
Aspectos críticos de implementación	<p data-bbox="418 842 1421 1024">Esta medida debe ser implementada solo en situaciones críticas, por lo que se recomienda que solo se realice después de un análisis y discusión de un órgano como el comité técnico local, ponderando los pro y contras de su implementación. Se debe evitar abrir la barra en épocas diferentes a las aperturas históricas naturales (fines de invierno – comienzo de primavera). La evidencia histórica muestra que esta acción se ha estado realizando frecuentemente sin regulación desde el año 2011 hasta octubre 2021 (última apertura artificial detectada).</p>

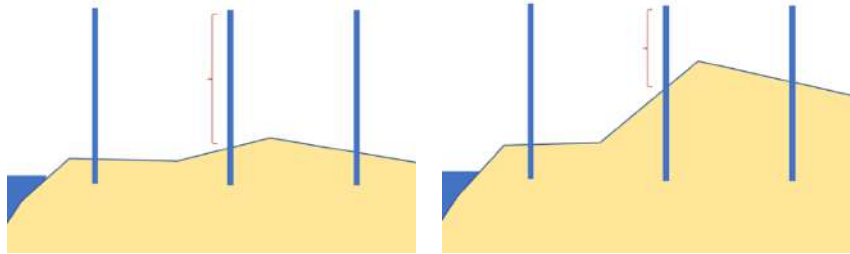
Propuesta	2.- Cierre Manual Barra de Arena
Descripción	Cuando la barra se encuentra artificialmente abierta o, debido a las intervenciones realizadas en la playa se abre sin intervención humana fuera de la época normal de apertura (fines de invierno – comienzos de primavera), el humedal tiende a vaciarse. Para evitar esto, se debe cerrar la barra. El cierre de la barra debe realizarse en la bajamar con luz día, más cercana al momento de detectar la barra abierta. Por razones de seguridad, el cierre no debe efectuarse durante la ocurrencia de marejadas.
Objetivos	Evitar el vaciado del humedal en el mar (excepto si con la apertura coincidiese un evento de alto caudal desde el río Elqui).
Variables forzantes	Caudal del río, nivel de aguas, diferencia cota espejo de agua y el mar, tamaño del canal de apertura.
Potenciales impactos	<p>Si el humedal tiene un nivel de agua elevado, al cerrar la barra se propicia la anegación de zonas bajas alrededor del humedal, por lo que el cierre debe ser realizado monitoreando el nivel de las aguas de la desembocadura con una regla limnimétrica. El cierre mecanizado puede alterar severamente la playa.</p> <p>Si el humedal no se cierra (considerando las condiciones actuales de bajo caudal desde el río), la apertura puede afectar los ciclos naturales del humedal y propiciar el movimiento de la vegetación palustre ribereña, poblando el álveo del humedal y alterando así procesos hidrodinámicos y de sedimentación. Por este motivo, la inacción podría resultar perjudicial.</p> <p>Para minimizar potenciales impactos se recomienda en el caso que no se cuente con arena acumulada previamente (Speybroeck <i>et al.</i> 2006):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remover arena en sectores de la playa con una composición similar a la de la barra, dando preferencia a la zona intermareal.</li> <li>• Arar la arena inmediatamente después de la depositarla para evitar que se vuelva tan compacta que sea inhóspita para las criaturas de la playa.</li> <li>• Remover la arena desde varios sectores de la playa en vez de uno solo lugar grande para minimizar los efectos sobre invertebrados bentónicos.</li> <li>• Mantener la huella del proyecto lo más pequeña posible.</li> </ul> <p>En el caso que se cuente con arena acumulada por una apertura previa, se debe utilizar dicha arena, procurando dejar la barra en las mismas condiciones previas a su apertura.</p>
Potenciales involucrados	IM La Serena, Directemar, MMA, DGA-MOP, SUBPESCA, SERNAPESCA (dada la existencia de AMERB) Comité Técnico Local.
Requerimientos	Siete a 27 trabajadores con palas, carretillas y herramientas para remover arena e implementos de protección personal (guantes, cascos, bloqueador) durante media jornada de trabajo. Considerar bolsas de basura para recolectar plásticos y otros desechos que puedan encontrarse durante la acción de cierre.
Costos	Son los mismos costos que la apertura artificial. Esto es: para el cierre de un canal artificial normal, se requiere el trabajo de una cuadrilla de 7 personas por 2,7 horas. Para el cierre de un canal de tormenta, se requiere el esfuerzo de una cuadrilla de 27 trabajadores por 3,5 horas. Se debe además implementar una regla limnimétrica, cuyo costo es inferior a los \$500.000.-
Factibilidad de implementación	<p>En octubre de 2021 se cerró un canal abierto artificialmente (Figura 40 pág. 63), por lo que la medida es factible de implementar. No debe ser realizada en forma mecanizada.</p> <p>Debido a las afectaciones que podrían ocurrir si no se cierra el humedal a tiempo, esta medida debe implementarse inmediatamente cuando se encuentre abierto el humedal por la acción de un tercero. Si la apertura se produce en forma natural en épocas diferentes a lo usual (fines de invierno – comienzo de</p>



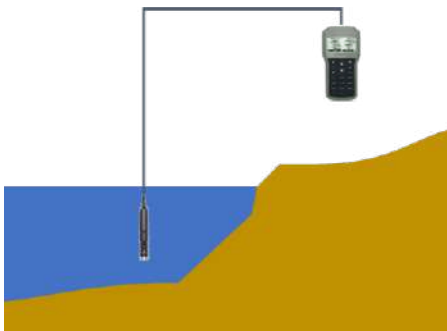

Propuesta	2.- Cierre Manual Barra de Arena
	<p>primavera), probablemente se deba a las alteraciones antrópicas que ha sufrido la playa (por ejemplo, por el tráfico de playa o por la existencia de un canal artificial previo al cerrado). Por esto se recomienda implementar un protocolo de cierre que se aplique en forma automática si el humedal se encuentra abierta sin justificación. El cierre debe efectuarse con prontitud, es decir, debe ocurrir en la siguiente bajamar con luz día que se encuentre (debido a que la marea es semidiurna en la bahía de Coquimbo, cada día ocurren dos pleamares y dos bajamares).</p>

Propuesta	3. Evitar sobrepasos de mar mediante la restauración de la barra y dunas en la desembocadura
Descripción	<p>Los humedales pueden recibir aporte de agua marina debido al ingreso de olas, especialmente durante marejadas que se desarrollan durante pleamares en sicigia. Sin embargo, la alteración de la playa por el tránsito de vehículos y la erosión costera puede propiciar que una marejada pequeña ingrese. Si esto ocurre con mucha frecuencia, se puede alterar anormalmente la salinidad, provocar un cambio de los ciclos naturales y un recambio de especies del humedal. Por ello se debe aumentar la altura de la anteduna y la barra de arena. Para implementar la acción se propone restauración activa de la anteduna y barra de arena, el monitoreo y control del perfil de playa mediante postes, que a su vez servirán como sistema de restricción del tránsito de vehículos motorizados por la playa.</p> <p>La degradación de las dunas y de la barra terminal de arena de la desembocadura del río Elqui, se explica principalmente por cuatro factores principales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de aportes sedimentarios por la retención de material que ejerce el embalse Puclaro. El río Elqui constituye una de las fuentes principales de aportes de material sedimentario para las playas de la bahía de Coquimbo. Sin embargo, en el diseño y construcción del Embalse Puclaro, no se tomó en cuenta este factor y actualmente el embalse retienen gran parte del material que debería llegar a la desembocadura y alimentar así a las playas de La Serena (Aguas Consultores 2021). Por este motivo, el retroceso y deterioro que han experimentado estas playas se explica en parte por la construcción del embalse. Para revertir esta situación, se debe implementar un sistema que permita devolver los sedimentos retenidos por el embalse, al curso del río Elqui y así llegar a la desembocadura.</li> <li>• Exceso de rigidización de las playas al sur de la desembocadura del río Elqui (Aguas Consultores 2021). La construcción de muros que limiten las playas, la urbanización en la costa de La Serena y el emplazamiento de calles como la Avenida del Mar, autopistas y la vía ferroviaria en la zona costera, han rigidizado la playa aledaña a la desembocadura del río Elqui. Los muros en las playas tienen consecuencias sobre la biota, especialmente los invertebrados bentónicos presentes en el intermareal y que son la base alimentaria de gran parte de la avifauna costera presente (Jaramillo <i>et al.</i> 2021). Además, esta rigidización de las playas ha propiciado la erosión de la bahía de Coquimbo (Martínez <i>et al.</i> 2022).</li> <li>• El incremento de eventos extremos de oleaje (Winckler <i>et al.</i> 2020), producto del cambio climático, explica también la pérdida de playas y dunas en el sector (Martínez <i>et al.</i> 2018, 2022).</li> <li>• El tránsito de vehículos por la playa es otro factor que destruye y erosiona las dunas y barras de arena como las que se encuentran en la desembocadura del río Elqui (Tassara &amp; García 2005), incrementando las pérdidas debido a otras causas.</li> </ul> <p>La restauración de dunas se consigue mediante la eliminación de las causas que han conducido a su alteración y utilizando técnicas de reconstrucción topográfica y repoblación con vegetación. Puesto que las dunas costeras son unos sistemas muy dinámicos, los objetivos de restauración se pueden cumplir en un plazo breve, del orden de pocos años. En el caso de la desembocadura del río Elqui, de las cuatro principales causas de degradación de la duna (retención de sedimentos, rigidización, cambio climático y tránsito de vehículos), algunas no es posible eliminar completamente en el corto plazo, como la perturbación provocada por el embalse Puclaro. Existen varias técnicas de fácil implementación para materializar la restauración de las dunas y la barra.<sup>30</sup></p>
Objetivos	Evitar sobrepasos de olas frecuentes al humedal.
Variables forzantes	Nivel de mareas, cota del humedal con respecto al mar, topografía de la playa y la anteduna respecto al nivel de reducción de sonda. El perfil de la playa se puede monitorear con la instalación de postes de

<sup>30</sup> Se recomienda consultar el manual de restauración de dunas mediterráneas [https://www.miteco.gob.es/es/costas/publicaciones/manual\\_restauracion\\_dunas.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/publicaciones/manual_restauracion_dunas.aspx)

Propuesta	3. Evitar sobrepasos de mar mediante la restauración de la barra y dunas en la desembocadura
	<p>madera en un transecto frente a la desembocadura, como se muestra en la figura. Estos postes pueden servir además de un sistema de exclusión del tránsito por la playa.</p> 
Potenciales impactos	<p>La inacción puede provocar recambios de especies en el humedal y alterar sus ciclos naturales.</p> <p>El sistema de monitoreo del perfil de playa mediante la instalación de postes, servirá también como un dispositivo de exclusión de tránsito de vehículos por la playa en la desembocadura del río Elqui.</p>
Potenciales involucrados	<p>IM La Serena, Directemar, MMA, DGA-MOP, Comité Técnico Local, Asociación Gremial de Pescadores (quienes tienen permiso para transitar por la playa hasta su AMERB), SUBPESCA y SERNAPESCA.</p>
Requerimientos	<p>Para la construcción se requiere madera para la instalación de postes para monitorear el perfil de playa y el cercado temporal de las porciones de duna a ser restauradas, geomembranas o mallas para la retención de arena y propágulos de vegetación de dunas. Se requieren al menos 4 jornales para la instalación durante una semana y dos durante un año para la mantención mientras la vegetación de duna y la duna misma se restaura. Se requiere la supervisión o asesoría de un profesional con experiencia en restauración de vegetación de dunas y/o dunas y playas.</p>
Costos	<p>La madera e instalación para el monitoreo tiene un costo inferior a \$100.000.</p> <p>Para la restauración de dunas existen diferentes alternativas que propician la acumulación de arena – por ejemplo, instalando mallas, estructuras de madera, geomembranas; pero su efectividad se logra con la vegetación de dunas (manteniéndola en caso de existir o restaurándola en caso contrario) y la restricción del tránsito de vehículos y personas, lo que implica cercar por algunos meses la playa en esa área. Con todo se estima un costo aproximado de 3 a 5\$mm para su implementación.</p>
Factibilidad de implementación	<p>Es probable que los postes sean vandalizados, por lo que se debe considerar recursos para reponerlos regularmente. Se recomienda realizar un monitoreo semanal para controlar la altura de la barra y la anteduna, y verificar la ocurrencia o no de sobrepasos después de marejadas.</p>

Propuesta	4.- Gestión Vegetación hidrófila del humedal.
Descripción	Los resultados de este estudio mostraron que la cubierta de vegetación palustre ribereña tiene efectos sobre la hidrodinámica y procesos de sedimentación del humedal. Por otra parte, se sabe que la densidad de la vegetación hidrófila en general, ya sea ribereña, fija o flotante, tiene consecuencia en la disponibilidad de oxígeno y nutrientes del humedal. Por este motivo se debe evitar que aumente o disminuya la cobertura de toda la vegetación hidrófila. Para esto se debe monitorear -por ejemplo, con una frecuencia semestral- la extensión y densidad de esta vegetación. En el caso que su cobertura aumente, se debe contemplar la posibilidad de realizar un desbroce en épocas que no alteren la anidación de aves. En el caso que la cobertura disminuya, se debe revegetar o restaurar. Con todo, la existencia de vegetación hidrófila exótica sugiere la necesidad de realizar una restauración con vegetación nativa en la ribera del humedal. Para evitar alteraciones en la hidrodinámica del humedal, esta restauración debe ser realizada en forma progresiva.
Objetivos	Mantener la hidrodinámica y procesos de sedimentación normales del humedal, preservar espacios de anidación de aves.
Variables forzantes	Extensión y densidad de la cubierta vegetal, nivel del agua, propiedades de la columna de agua.
Potenciales impactos	La inacción puede provocar recambios de especies en el humedal y alterar sus ciclos naturales.
Potenciales involucrados	IM La Serena, Directemar, MMA, CONAF, Comité Técnico Local, Universidades o centros de investigación locales como CEAZA y ONG's que están interesadas en participar de acciones de investigación y monitoreo del humedal.
Requerimientos	Se requiere un especialista en vegetación hidrófila y su equipo de ayudantes (usualmente dos), para realizar el monitoreo semestral de la cubierta de vegetación en la desembocadura del río Elqui. En el caso de establecerse la necesidad de desbrozar vegetación por su presencia en exceso, se requiere una cuadrilla de jornales para realizar el desbroce con herramientas, ropa e implementos de seguridad personal adecuados, transporte y disposición final de la vegetación removida. En el caso de establecer la necesidad de revegetar, se necesitan propágulos de plantas hidrófilas adecuadas (nativas) y al menos dos jornales para su distribución y mantención por al menos 3 meses. La labor de revegetación o restauración debe ser realizada bajo la supervisión de un especialista en restauración vegetal con experiencia en vegetación hidrófila de ambientes mediterráneos y/o semiáridos.
Costos	Se estima que el monitoreo y las acciones de restauración pueden oscilar entre 3 a 5 millones anuales debido a la falta de información del sistema. Una vez se conozca mejor las asociaciones vegetales del humedal y las mejores técnicas para realizar la restauración y mantención, estos costos pueden bajar.
Factibilidad de implementación	Se requiere llenar vacíos de información sobre la vegetación hidrófila (por ejemplo, densidades apropiadas) y sus ciclos naturales, por este motivo se sugiere que esta acción sea acompañada de un estudio dirigido por una universidad o centro de estudios locales.

Propuesta	5.- Monitoreo desembocadura
<p>Descripción</p>	<p>Esta acción se refiere a implementar un monitoreo y registro de variables mínimas en el humedal, las que podrían formar parte de su plan de gestión. Para implementar esta acción se requiere contratar un servicio de medición multiparamétrica o contar con un instrumento propio y personal capacitado para medir, calibrar y mantener el equipo. Se sugiere medir al menos los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Salinidad y conductividad: Permite identificar la existencia de descargas de aguas grises no reguladas y el desarrollo de una cuña salina y estratificación.</li> <li>• Potencial de Hidrógeno: Permite identificar fuentes orgánicas de contaminación si la alcalinidad aumenta o antrópicas si la acidificación aumenta.</li> <li>• Oxígeno disuelto: Permite identificar la eutroficación del humedal; un nivel de oxígeno mínimo puede significar mortalidad de especímenes asociados a la columna de agua.</li> <li>• Temperatura: Depende de la hora de lectura. Sin embargo, al asociarla con temperaturas registradas en el ambiente se puede estimar tasa de evaporación.</li> </ul> <p>Para estas mediciones existen equipos multiparamétricos que tienen diferentes grados de precisión y durabilidad, dependiendo del tipo de sensor de oxígeno (membrana u óptico). En la figura izquierda se esquematiza el procedimiento de medición.</p>   <p>Para el monitoreo de la vegetación se puede adoptar alguno de los muestreos típicos para flora y vegetación vascular, consistentes en delimitar una o varias áreas restringidas pero representativas y realizar en ellas identificación y conteo de especies, estimación de densidad, altura, etc., como se muestra en la figura derecha.</p>
<p>Objetivos</p>	<p>Establecer un protocolo de monitoreo de una frecuencia al menos mensual (idealmente semanal) de parámetros claves de la columna de agua del humedal y semestral (idealmente trimestral) para la vegetación.</p>
<p>Variables forzantes</p>	<p>Profundidad, Vegetación hidrófila (especies, extensión, densidad), columna de agua (salinidad y conductividad, potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto, temperatura).</p>
<p>Potenciales impactos</p>	<p>La inacción puede impedir tomar medidas correctivas en el caso que el humedal experimente cambios por forzantes antrópicos directos o indirectos. Se debe realizar el monitoreo con cuidado de no alterar los ciclos naturales del humedal; por ejemplo, alterando la anidación de especies.</p>
<p>Potenciales involucrados</p>	<p>Comité Técnico Local, MMA, Institución universitaria o centro de investigación local como CEAZA, ONGs y establecimientos educacionales (en el marco del Programa de Monitoreo Participativo).</p>
<p>Requerimientos</p>	<p>Equipo profesional con experiencia en monitoreo de humedales, tanto de variables abióticas como bióticas. Deben contar con equipamiento para navegar al interior del cuerpo de agua y poder realizar mediciones de profundidad, pH, Oxígeno, temperatura, salinidad o conductividad.</p>

Propuesta	5.- Monitoreo desembocadura
Costos	<p>Los costos pueden oscilar entre \$1.200.000 en el caso de un monitoreo mensual, a \$5.400.000 en el caso de un monitoreo semanal, si se contrata el servicio. La implementación con instrumentos propios requiere de personal capacitado para su uso y aplicación de metodologías de muestreo vegetal e identificación de especies. Un multiparámetro con membrana de sensor de oxígeno tiene precios que oscilan entre los 1.5 a 3.5 millones de pesos y una vida útil de 6 a 24 meses, con recambios de la membrana mensualmente. Su mantención con los líquidos de calibración, mantención, limpieza y membranas de repuestos puede bordear los \$100.000 mensuales. Si el multiparámetro tiene un sensor óptico de oxígeno su vida útil puede superar los 5 años, pero su costo aumento a 5 a 7 millones de pesos. Su mantención se reduce a unos 30.000 mensual. Para el monitoreo de la vegetación se debe contemplar los costos de la realización de una campaña y horas de postproceso para identificación de especies (\$1.000.000 por campaña).</p>
Factibilidad de implementación	<p>Es una medida de fácil implementación, pero se debe tener cuidado en acompañarla con un protocolo o mecanismo que permita almacenar y disponer en forma expedita los datos que se recaben.</p>

Propuesta	6. Gestión de la Playa
Descripción	<p>La playa inmediata a la desembocadura del río Elqui, entre el Faro Monumental y la caleta San Pedro, interactúa con el humedal alimentándose de sedimentos arrastrados por el río y modulando la dinámica de conexión/desconexión del humedal con el mar. Sin embargo, esta playa se encuentra altamente presionada por actividades antrópicas: desarrollos inmobiliarios en su entorno, estructuras de diferentes tipologías que rigidizan la parte sur de la playa, actividades agrícolas en la ribera norte del humedal, el tránsito de vehículos por la playa, entre otros. Por esta razón esta playa necesita que se implemente al menos tres medidas de gestión: a) regular y evitar el tránsito de vehículos por la playa, b) restaurar la duna costera y c) mitigar los efectos del tránsito de peatones por la anteduna y la duna al acceder a la playa. Esto se logra con el diseño y construcción de pasarelas elevadas, como se muestra en la figura.</p>  <p>La pasarela debe ser diseñada manteniendo una relación armónica con el paisaje de la desembocadura del río Elqui y su entorno. Se recomienda que para su trazado se aplique alguna metodología de diseño de paisaje participativo.<sup>31</sup> El diseño debe estar pensando para evitar afectaciones sobre la duna, la barra, la vegetación ribereña y disminuir las presiones sobre la avifauna presente en la desembocadura. El sendero puede ser equipado con diversos elementos para convertirlo en un sendero interpretativo del lugar.</p>
Objetivos	Mejorar el entorno ambiental y resiliencia del humedal.
Variables forzantes	Presencia / ausencia de la duna, pendiente del perfil de playa, frecuencia de tránsito de vehículos por la playa.
Potenciales impactos	La inacción de esta medida puede afectar en el mediano plazo la dinámica de los ciclos naturales del humedal al alterarse los ciclos de conexión del humedal con el mar.
Potenciales involucrados	IM La Serena, Directemar, MMA, MOP, Comité Técnico Local, Universidades o centros de investigación locales, propietarios privados, SEREMI de Bienes Nacionales, GORE y SUBDERE (por posible financiamiento).
Requerimientos	<p>Para la instalación y mantención de las medidas de regulación del tránsito de vehículos por la playa se necesita al menos dos jornales en día de trabajo, con herramientas, implementos de seguridad y protección personal. Materiales (postes de madera, señalética).</p> <p>Para la implementación de la restauración de la duna en un tramo de 2 km lineales se necesita madera para el cercado temporal de las porciones de duna a ser restauradas, geomembranas o mallas para la retención de arena y propágulos de vegetación de dunas. Se requieren al menos 4 jornales para la instalación durante un mes y dos durante un año para la mantención mientras la vegetación de duna y la</p>

<sup>31</sup> <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/revistarquis/article/view/40228>

Propuesta	6. Gestión de la Playa
	<p>duna misma se restaura. Se requiere la supervisión o asesoría de un profesional con experiencia en restauración de vegetación de dunas y/o dunas y playas.</p> <p>Para la construcción del sendero peatonal, se requiere un profesional que lo diseñe y un profesional que lo construya y jornales (se estiman unos 16) con herramientas, equipos de seguridad y de protección personal, por tres meses para su construcción. Además, se requieren autorizaciones en la autoridad marítima y eventualmente solicitar una concesión para su instalación. La pasarela elevada del sendero requerirá madera y diversos materiales.</p>
Costos	<p>Para detener el tránsito de vehículos por la playa, se necesitan instalar postes o estructuras similares que impidan el paso de vehículos y señalética de advertencia asociada. Es muy probable que estas estructuras sean vandalizadas con frecuencia, por lo que se estima un costo de 2 a 5 millones para su mantención anual.</p> <p>La restauración de la duna para un tramo de 2 km lineales de costa se estima en 15 millones de pesos. Ello considera el cercado, letreros informativos, instalación de un sistema de retención de arena, un monitoreo y acciones de vegetación con flora de dunas nativas.</p> <p>La acción de mitigar el tránsito de peatones mediante la construcción de pasarelas elevadas se estima entre 30 a 50 millones para un tramo total de 500 m. La elección de los materiales y mantención puede resultar crítica para garantizar su durabilidad en el tiempo. En todo caso la vida útil de la obra podría oscilar entre 5 a 10 años debido a las condiciones marino-costeras; por esto se debe contemplar su reposición.</p>
Factibilidad de implementación	Las tres soluciones propuestas son ampliamente utilizadas en Europa <sup>32</sup> , Australia <sup>33</sup> , Uruguay <sup>34</sup> , California <sup>35</sup> , mostrando su efectividad y factibilidad.

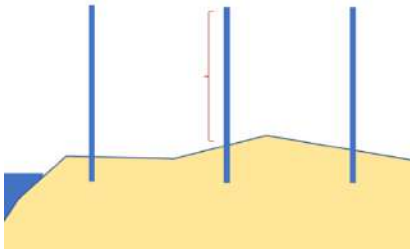
<sup>32</sup> <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/actuaciones-proteccion-costa/cadiz/110852-acceso-ancla.aspx>

<sup>33</sup> [https://es.123rf.com/photo\\_89141801\\_en-australia-la-pasarela-a-la-playa-de-hervey-bay-fraser-island-como-concepto-de-para%C3%ADso-y-relajarse.html](https://es.123rf.com/photo_89141801_en-australia-la-pasarela-a-la-playa-de-hervey-bay-fraser-island-como-concepto-de-para%C3%ADso-y-relajarse.html)

<sup>34</sup> <https://www.elpais.com.uy/informacion/sociedad/dedos-punta-pasarela-madera-mayor-comodidad.html>

<sup>35</sup> <https://es.dreamstime.com/pasarela-pismo-beach-vista-en-el-paseo-mar%C3%ADtimo-mirando-la-ciudad-de-paisaje-playa-puesta-sol-fondo-azul-california-centro-image155829309>



Propuesta	7.- Monitoreo de la Playa
<p>Descripción</p>	<p>Las marejadas ocurridas en pleamar de sicigia pueden anegar la zona supramareal. Normalmente estos eventos provocan erosión costera y, si la playa no cuenta con una pendiente alta o carece de dunas, el ingreso de agua por sobrepaso puede superar decenas de metros tierra adentro desde la línea de las más altas mareas. Las intervenciones antrópicas y el tránsito de vehículos en el sector sur de la desembocadura del río Elqui han propiciado una playa con baja pendiente y la desaparición de las dunas costeras. Por otra parte, el sector norte de la desembocadura presenta pendientes mayores y aún conserva la duna costera, permitiendo una mayor resiliencia a estos eventos. El aumento de la frecuencia de las marejadas producto del cambio climático puede convertir esta situación en un problema que altere la playa asociada a la desembocadura. Por este motivo es aconsejable monitorear tanto la pendiente de la playa como el perfil de playa. Para materializar este monitoreo se recomienda levantar con una frecuencia semanal una ficha de verificación como las usadas para evaluar el escenario costero (Figura 165) e instalar perfiles de postes de madera en transectos perpendiculares a la línea de costa.</p>  <p>Los postes permitirán monitorear la elevación del perfil de playa a través de la medición de la porción de los postes no enterrada. Se debe considerar que probablemente los postes sufran algún grado de vandalismo o por acción de las marejadas se pierdan, por lo que deben ser repuestos periódicamente (por ejemplo, una vez al año).</p>
<p>Objetivos</p>	<p>Contar con indicadores de alerta temprana para implementar acciones de prevención o gestión de la playa y el humedal.</p>
<p>Variables forzantes</p>	<p>Pendiente de la playa, erosión costera, perfil de playa.</p>
<p>Potenciales impactos</p>	<p>Esta acción no tiene impactos. La inacción puede favorecer la ocurrencia de eventos que afecten al humedal por la falta de información.</p>
<p>Potenciales involucrados</p>	<p>MMA; SERNAPESCA, Comité Técnico Local, Universidades o centros de investigación locales, ONGs, AG pescadores, DIRECTEMAR, SUBPESCA, IM La Serena.</p>
<p>Requerimientos</p>	<p>Instalación: Cuadrilla de 4 jornales durante un día para instalar un mínimo de 5, o idealmente 11 transectos de madera entre el Faro Monumental y la Caleta San Pedro. Madera y materiales para la construcción. Implementos de seguridad personal (guantes, cascos, bloqueador solar).</p> <p>Operación: Se requiere una persona entrenada para llenar la ficha de verificación y medir los postes en cada transecto. Se estima que puede realizar el recorrido en media jornada una vez a la semana y se requiere media jornada adicional para el postproceso en oficina de los datos recabados. Se debe considerar implementos adecuados para realizar el recorrido (bloqueador solar, planillas, entre otros).</p>
<p>Costos</p>	<p>Se trata de una acción de muy bajo costo de implementación. El monitoreo lo puede hacer una persona llenando una ficha de verificación una vez a la semana recorriendo a pie entre El Faro Monumental y</p>

Propuesta	7.- Monitoreo de la Playa
	<p>Caleta San Pedro. Se deben considerar honorarios por 8 horas a la semana x 4 semanas al mes = 32 horas mensuales.</p> <p>La madera e instalación para el monitoreo tiene un costo inferior a \$100.000 por cada transecto que se decida instalar a lo largo de la playa entre Faro Monumental y Caleta San Pedro (2 km lineales aproximadamente). Se recomiendan 5 transectos como mínimo (uno emplazado cada 500 m), como se representa en la Figura 164, pero lo ideal es instalar 11 transectos (uno cada 200 m). Se debe considerar que los postes de madera necesitarán ser repuestos con cierta periodicidad (se estima una vez al año), debido a pérdidas por vandalismo o por acción de las marejadas.</p>
Factibilidad de implementación	<p>Se trata de una medida de fácil implementación y que permitiría contar con indicadores para tomar decisiones informadas de acciones de restauración en la duna de la playa del entorno de la desembocadura del río Elqui. Un aspecto crítico es que la información recabada sea almacenada en repositorios y pueda estar disponible cuando se requiera.</p>

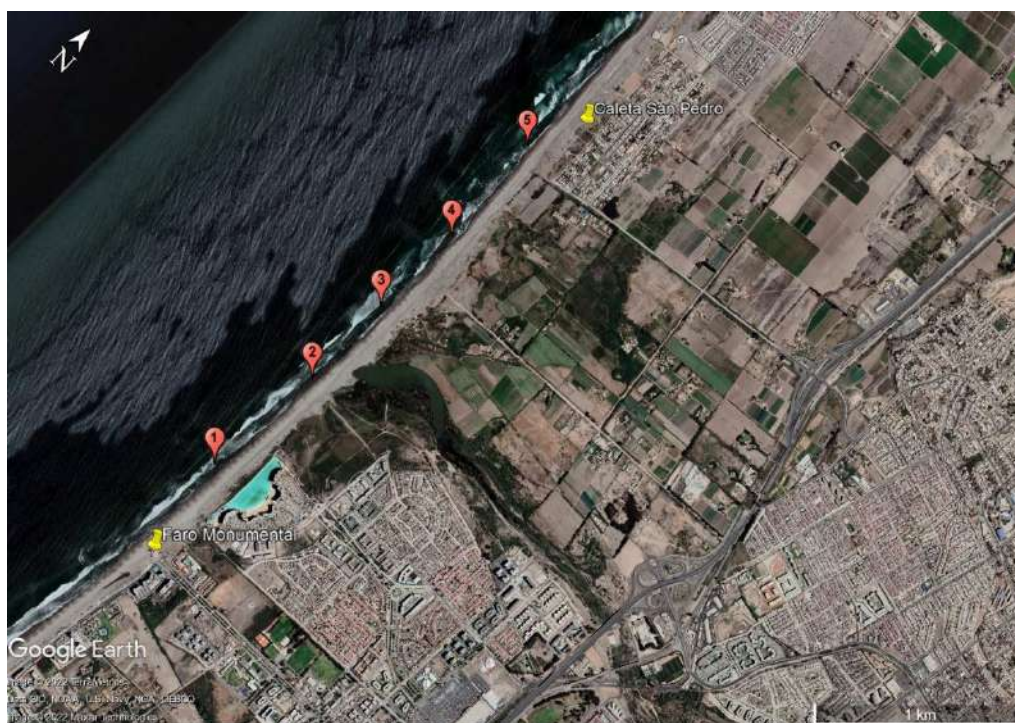


Figura 164: Representación espacial de la propuesta n°7 Monitoreo de la playa. En color rojo se indican, a modo de referencia, los puntos aproximados donde se recomiendan realizar los 5 transectos, emplazados cada 500m, entre el Faro Monumental (al sur del humedal) y Caleta San Pedro (al norte), ambos extremos destacados en color amarillo.  
Fuente: Elaboración propia.

Nombre del Sitio		Localización			Fecha		Observador
WayPoint		Calificación					
N	Parámetro	1	2	3	4	5	
1	Altura	Ausente (< 5m)	5 - 30 m	30 - 60 m	60 - 90 m	> 90 m	
2	Pendiente	Ausente (< 45°)	45°	Cerca de 60°	Cerca de 75°	Casi vertical	
3	Características	Ausente	1	2	3	>3	
4	Tipo	Ausente	Fango	Gujarros / piedras	Piedritas / grava	Arena	
5	Ancho	Ausente	< 5 m o > 100 m	5 - 25 m	26 - 50 m	> 50 m o < 100 m	
6	Color	Ausente	Oscuro	Bronceado oscuro	Bronceado claro / desleñido	Blancas / doradas	
7	Pendiente	Ausente	5°	5° - 10°	10° - 20°	20° - 45°	
8	Extensión	Ausente	5 m	5 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	
9	Rugosidad	Ausente	Claramente irregular	Muy picado y/o irregular	Picado somero	Suave	
10	Dunas	Ausente	Remanentes	Anteduna	Crestas secundarias	Varias	
11	Valle	Ausente	Seco	Arroyo < 1m	Arroyo 1 - 4 m	Río > 4m	
12	Relieve horizonte	No visible	Plano	Ondulado	Altamente ondulado	Montañoso	
13	Mareas	Macro (> 4m)		Meso (2 - 4 m)		Micro (< 2m)	
14	Características del litoral	Ninguno	1	2	3	>3	
15	Vistas	Abierto a un lado	Abierto a dos lados		Abierto a tres lados	Completamente abierto	
16	Claridad y color del agua	Turbio marrón / gris	Lechoso Azul / verde / opaco	Verde / gris / azul	Transparente Azul / azul oscuro	Muy transparente / turque	
17	Cubierta vegetal natural	Descubierta (< 10%)	Arbustos, zarzas, espinos, etc.	Humeda / vega	Bosquecillos, matorrales (árboles maduros)	Variedad de árboles naturales maduros	
18	Restos orgánicos	Continuos (50 cm alto)	Línea de filamentos	Acumulación simple	Pocos items dispersos	Ninguno	
19	Ruido	Intolerable	Tolerable		Poco	Ninguno	
20	Basura	Acumulación continua	Línea de filamentos	Acumulación simple	Pocos items dispersos	Virtualmente ausente	
21	Descarga agua residual	Descarga evidente		Alguna evidencia (1 - 3)		Sin evidencia de descarga	
22	Ambiente no construido	Ninguno		Selos, aterrazamientos, monocultivos		Campo de cultivo mixto con árboles / natural	
23	Ambiente construido	Industria pesada	Turismo duro y/o urbano	Turismo/urbano liviano	Turismo/urbano sensitivo	Patrimonial o ninguno	
24	Tipo de acceso	Sin amortiguación - tráfico pesado	Sin amortiguación - tráfico liviano		Estacionamiento visible desde la costa	Estacionamiento no visible	
25	Horizonte del paisaje	Muy poco atractivo		Diseño sensitivo	Diseño muy sensitivo	Natural / Patrimonial	
26	Utilidades	>3	3	2	1	Ninguno	

Figura 165: Ejemplo de ficha para evaluar el escenario costero.

Propuesta	8.- Gestión de la cuenca y la bahía de Coquimbo
Descripción	<p>Las playas de la bahía de Coquimbo actualmente sufren de un proceso erosivo, el cual puede ser explicado en parte por la retención de sedimentos que supone el embalse Puclaro que en su diseño no consideró un mecanismo para retornarlos al flujo de la cuenca del río Elqui. Al mismo tiempo, como efecto del cambio climático, el alza del nivel del mar y el incremento del número de eventos extremos de oleaje (marejadas) acrecientan esta erosión costera. Para controlar la erosión costera, pueden implementarse soluciones de ingeniería dura o infraestructura verde (Aguas Consultores SpA, 2021)<sup>36</sup>.</p> <p>La gestión a la escala de cuenca del río Elqui y la bahía de Coquimbo para abordar el problema de la erosión costera, incluye medidas de ingeniería rígida que van desde la construcción de defensas costeras hasta la recuperación o restauración de los campos de macroalgas pardas como <i>Lessonia nigrescens</i> (huiro), para mitigar el efecto del oleaje. También se deben considerar medidas de ingeniería blanda como es solucionar el problema de retención de sedimentos por parte del embalse Puclaro y/o la restauración de dunas.</p>
Objetivos	Mitigar la erosión de playas de bahía de Coquimbo y restaurar funcionalidades ecológicas de la cuenca del río Elqui.
Variables forzantes	Precipitaciones, caudal del río Elqui, volumen sedimentos, tasas erosión costera.
Potenciales impactos	La inacción puede propiciar la pérdida de las playas de La Serena. Las acciones de ingeniería dura pueden tener externalidades negativas y las de ingeniería verde deberían tener externalidades mitigadas.
Potenciales involucrados	MOP (DOP, DGA y DOH), INH, Gobierno Regional de Coquimbo, IM La Serena, IM Coquimbo, MMA, DIRECTEMAR, SERNATUR, CORFO, CRDP, Comité Técnico Local
Requerimientos	Se requieren capacidades humanas y técnicas especializadas en el diseño de obras civiles costeras. Para una correcta valorización de costos y factibilidad, se requiere un estudio de ingeniería básica que evalúe diferentes alternativas de solución.
Costos	Escapa a los alcances de esta consultoría la estimación de los costos de un proyecto de esta envergadura, pero se trata de varias centenas o incluso miles de millones de pesos. La experiencia internacional, principalmente de países europeos, Estados Unidos y Australia muestra que la restauración de cuencas como el río Elqui, son proyectos que demandan onerosos recursos, pero si se quieren preservar atributos como las playas de interés turísticos de La Serena, son inversiones que se deben realizar.
Factibilidad de implementación	Se trata de una medida ambiciosa y que requiere financiamientos del tipo FNDR y posiblemente CORFO - INNOVA por las innovaciones que deberían ser implementadas como solución al problema de retención de sedimentos.

<sup>36</sup> Según Silva *et al.* (2019), la “infraestructura verde” no tiene una definición universal, ya que depende de las condiciones ecológicas y socioeconómicas de cada lugar (Silva *et al.* 2017). A diferencia de la infraestructura tradicional, la cual toma en cuenta solo factores socioeconómicos y políticos; la infraestructura verde tiene como base los conceptos de conectividad, multifuncionalidad, integración y multiescala (Davies & Laforteza 2017). En la zona costera, la infraestructura verde se encuentra estrechamente ligada a actividades de conservación, restauración y protección de sus ecosistemas. La infraestructura verde abarca aspectos tan amplios y contrastantes como: la recuperación del funcionamiento de ecosistemas naturales; la creación de ecosistemas artificiales; las obras de ingeniería que dependen del funcionamiento de los ecosistemas circundantes; las obras de ingeniería tradicional con adaptaciones para disminuir el impacto ambiental y las obras de corrección de estructuras que han causado daño en el medioambiente.

#### 5.3.4 Brechas de información

El sistema de humedales costeros de Chile central no ha sido estudiado suficientemente debido a la falta de recursos para mantener programas de monitoreo de largo plazo y especialistas en tópicos que pueden ser relevantes de analizar. Así, aunque la revisión bibliográfica del humedal del río Elqui muestra la existencia de bastante información levantada sobre el humedal, ella no es suficiente para contar con una línea base completa y actualizada sobre el humedal y su entorno. Los siguientes aspectos relevantes sencillamente se desconocen:

- cadenas tróficas y el rol de invertebrados,
- relación con la biota marina bentónica y pelágica de la zona costera marina inmediata,
- la dinámica y alcance del acuífero y su eventual relación con el humedal de Punta Teatinos (Laguna Saladita),
- aspectos abióticos del humedal y su entorno como el caudal (recién se está implementando una estación fluviométrica representativa de la desembocadura por parte de la DGA) y el ciclo estacional del nivel de las aguas en la desembocadura,
- microorganismos presentes y su rol en los ciclos biogeoquímicos del humedal,
- tasas de secuestro de carbono.

Por otra parte, una fracción importante del conocimiento del río Elqui se encuentra en informes técnicos, los que tienen diferentes grados de rigor académico. Información similar levantada en diferentes estudios parece ser contradictoria en algunos casos, lo que se puede explicar por el uso de metodologías no comparables, pero también se puede deber a errores de interpretación o fallas en los diseños metodológicos. De los estudios publicados con indexación, una buena parte se encuentran desactualizados debido a la acelerada urbanización ocurrida en el entorno del humedal a partir de la década del 2010. Para superar estas brechas y elaborar un plan de gestión de este humedal, es necesario levantar una línea base de:

- Aspectos bióticos, como fauna de vertebrados e invertebrados, fauna marina inmediata, flora y vegetación, microorganismos, especies exóticas e invasoras,
- Aspectos abióticos, como el ciclo estacional y de largo plazo de las propiedades físico-químicas de la columna de agua, acuífero, cambios de los forzantes marinos y ambientales, fuentes de contaminación directas y difusas, cambios de uso de suelo y propiedades edáficas del entorno
- Aspectos socio-ecológicos, como la relación de los distintos usuarios y vecinos con el humedal, con especial consideración a los habitantes de los nuevos desarrollos inmobiliarios.

Sin embargo, además de la necesidad de levantar información de una línea base completa y actualizada, se necesita contar con registros de series de tiempo de parámetros relevantes tanto para comprender la dinámica y los cambios del humedal, como los disturbios que eventualmente pueden afectarlo. Como parte del plan de gestión del humedal, se debiera implementar un programa de monitoreo para generar indicadores simples que ayuden a la toma de decisiones. Las medidas de monitoreo de la desembocadura y de la playa contribuirían a superar esta brecha de información.

Se estima que existen capacidades humanas y técnicas suficientes entre académicos, investigadores y consultores radicados en la región de Coquimbo, que pueden dar respuesta al diseño y ejecución de las medidas propuestas para la gestión de playas, la restauración de dunas y la gestión de la vegetación hidrófila del humedal. Lo importante es que se tomen con los resguardos de monitoreo y control para efectuar acciones correctivas si se encuentran resultados no esperados en el diseño. Al tratarse de medidas para las cuales no existen experiencias relevantes en Chile, se asume que es necesario experimentar una curva de aprendizaje, para lo cual el monitoreo será esencial. Experiencias similares en otros países serán orientadoras, pero las especificidades de la costa de Chile central y de la bahía de Coquimbo en particular, implican que posiblemente se encontraran problemas y respuestas no esperadas en el momento de ejecutar estas acciones. Debido a esto, se recomienda realizar acciones piloto, de pequeña escala

que sirvan de laboratorio natural para encontrar las mejores técnicas de restauración y gestión. Una vez identificados los problemas y sus posibles soluciones, se puede escalar la acción a un tamaño mayor.

Para la gestión de la cuenca y de la bahía de Coquimbo se encuentran las mayores brechas de información. Con todo se estima que, en algún momento, se requerirá restaurar el río Elqui a nivel de cuenca. Las playas de la bahía de Coquimbo también requerirán la implementación de soluciones que ayuden a mitigar la erosión que las aqueja actualmente (Aguas Consultores SpA 2021), pues la actividad turística de arena, sol y playa depende de la existencia precisamente de estas playas. Se pueden explorar diversas alternativas para encontrar una solución de ingeniería verde que permita responder al problema de erosión. Sin embargo, debido a la falta de experiencia local y las particularidades del litoral de la bahía de Coquimbo, implica que siempre existirán incertidumbres y riesgos en su implementación. Aguas Consultores SpA (2021), recomendó la implementación de tres conjuntos de medidas para gestionar el problema de erosión de playa (Figura 166):

- Medidas blandas:
  - Relleno artificial de arena
    - Utilizando las arenas retenidas por el embalse Puclaro
    - Utilizando arena desde la bahía de Coquimbo
  - Restauración del campo dunar.
- Medidas rígidas
  - Construcción de un espigón
  - Construcción de un dique exento
  - Construcción de un dique exento sumergido
  - Instalación de Reef Balls
  - Instalación de geotubos
  - Plantación de algas
- Medidas de prevención
  - Incorporación en el Plan Regulador Comunal de La Serena, la gestión de la erosión de sus playas.
  - Normativas de protección y conservación del Campo Dunar.

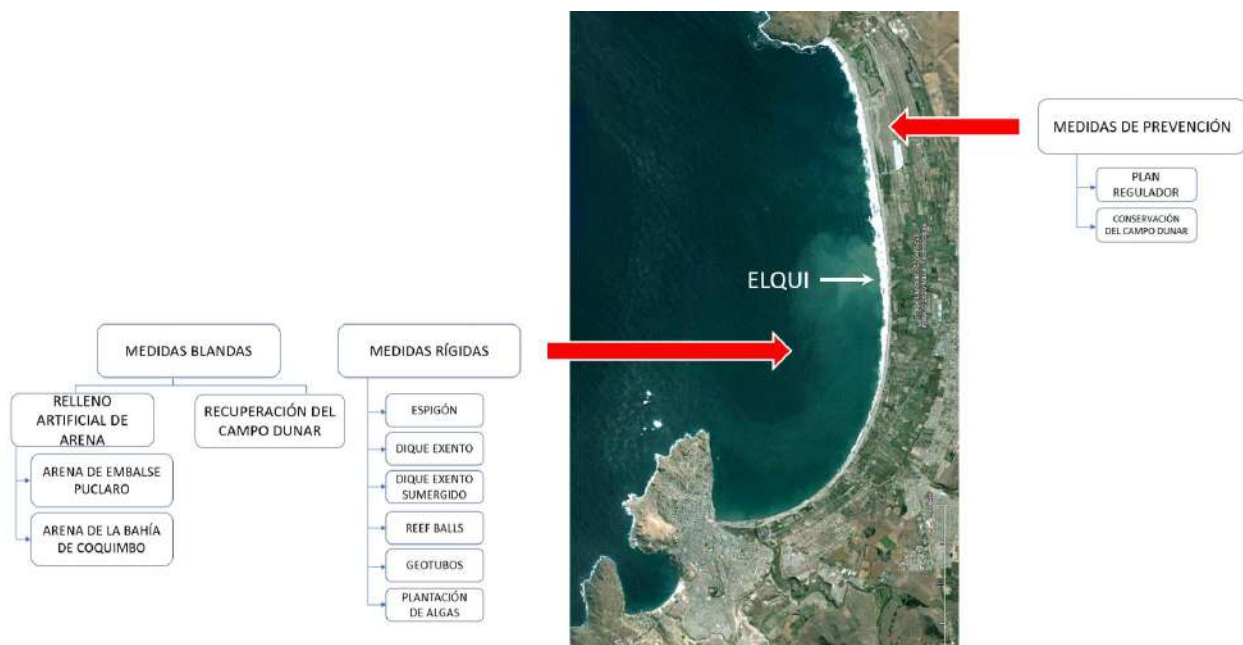


Figura 166: Medidas blandas, rígidas y de prevención propuestas para restaurar la pérdida de playas en la bahía de Coquimbo. Fuente: Aguas Consultores SpA (2021).

Por último, para las medidas de apertura y cierre de la barra, se estima que existe suficiente información como para tomar decisiones en su aplicación dependiendo de la situación:

- Cerrar la barra cuando se encuentre artificialmente abierta o se abra en una época diferente a lo históricamente normal (fines de invierno – comienzos de primavera).
- Abrir la barra en situaciones extraordinarias cuando exista riesgo de pérdidas materiales y humanas por anegación debido a una inusual crecida del río Elqui. Como la cuenca se encuentra regulada por el embalse Puclaro, esta situación sería bastante inusual. También se debe considerar abrir la barrar en caso de eutrofización por casusas no naturales (fuera de la estacionalidad normal para este tipo de cuerpos de agua), pero se requiere al menos un año de registros para poder definir adecuadamente los criterios.

Es necesario implementar un protocolo de monitoreo permanente de las propiedades de la columna de agua en la desembocadura del río Elqui, que permita recabar los datos para tomar decisiones informadas y respaldada por datos sobre la apertura de la barra en casos de eutrofización. Debido a que los humedales de Chile central tienen una estacionalidad natural (Andrade & Grau 2005, Contreras-López et al. 2022), es esperable que la época estival disminuya el oxígeno disuelto, generándose procesos naturales (eutrofización natural) que se pueden confundir con el exceso de nutrientes producto de la actividad antrópica.

Para estas soluciones de cierre o apertura se debería elaborar un protocolo. Este protocolo requiere conocer de datos que se obtendrán solo cuando se instale una estación fluviométrica por parte de la DGA en el entorno de la desembocadura y se implementen las medidas de monitoreo con reglas limnimétricas propuestas en este informe. La aplicación del protocolo debería ser supervisado por un órgano colegiado como es el comité técnico local del humedal.

## 5.4 Cartografía y SIG

Para una correcta fluidez entre la información recibida y la que se generó, se consideraron los siguientes aspectos de estandarización de referencia espacial de acuerdo con las Especificaciones Técnicas para Productos Cartográficos del Ministerio del Medio Ambiente:

- Sistema proyección: UTM, Huso 19 Sur.
- Sistema de Coordenadas: Geográficas.
- Datum: WGS84.
- Metadatos: Norma ISO 19.115 2003.
- Formato de coberturas: .SHP, .TIFF, Geodatabase (ArcGIS) y Geopackage (QGIS).

Ahora bien, con relación a la transferencia de información desde el equipo consultor a la contraparte se presentan a continuación tres ejes que permitieron sistematizar la información y clasificar los diferentes productos asociados a la consultoría: Capas de información utilizadas, Formatos de entrega y Organización de la información, las cuales se describen a continuación:

### 5.4.1 Capas de información utilizada

Durante la consultoría se utilizaron capas de información tanto vectoriales como ráster. A su vez se elaboraron otras a partir de datos recolectados en gabinete y en salidas a terreno. Para facilitar la transmisión de información se optó por agrupar las capas de información en temáticas genéricas, clasificadas mediante códigos que facilitarían la nomenclatura de los archivos vectoriales y ráster (Tabla 19). Se identificaron cinco temáticas principales correspondientes a Batimetría (B), Cuenca Elqui (CE), Información Base (IB), Multiparamétrico (M) y TopoBatimetría (TB). Para la construcción del código se optó por mantener la(s) primera(s) letra(s) de la temática, junto a una numeración que permitiera escoger el orden de las capas posteriormente introducidas en las bases de datos.

Tabla 19: Temáticas y Códigos generados para la organización de las capas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

Temática	Código	Descripción
Batimetría	BXX	Material tanto vectorial como ráster asociado a la elaboración de material cartográfico a partir de la generación de la batimetría del humedal desembocadura del Río Elqui. Ejemplo: B01_XYZ_PREL
Cuenca Elqui	CEXX	Material tanto vectorial como ráster asociado a la elaboración de material cartográfico vinculado a la Cuenca del Río Elqui, partiendo desde la cuenca principal, subcuencas, acuíferos y humedal desembocadura Río Elqui. Ejemplo: CE02_DRENES_CUENCA
Información base	IBXX	Material de tipo vectorial asociado a la elaboración de material cartográfico que sirva de apoyo y/o de contextualización para los aspectos representados en la presente consultoría. Ejemplo: IB04_LOCALIDADES
Multiparamétrico	MXX	Material tanto vectorial como ráster asociado a la elaboración de material cartográfico vinculado a la generación de las capas de salinidad, oxígeno disuelto y pH del Humedal Desembocadura del Río Elqui para el 2021-09-04. Ejemplo: M04_PH
Topobatimetría	TBXX	Material tanto vectorial como ráster vinculado a la elaboración del modelo topobatimétrico del Humedal Desembocadura Río Elqui. Ejemplo: TB04_CLASIFICACION_VEG



Para facilitar la lectura del contenido de cada capa, se generó una planilla resumen que presenta cada capa vinculada a la temática respectiva y el código asociado, junto a una descripción, un tipo (sí es vector o ráster), el autor y el año. La Tabla 20 presenta un ejemplo de este resumen el cual puede ser revisado en detalle en el Anexo 9.6.

Tabla 20: Cuadro resumen de las capas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

Código	N°	Nombre capa	Descripción	Tipo	Autor	Año
BATIMETRÍA	BXX	B01_XYZ_PREL	Puntos de la latitud y longitud de las sondas batimétricas de la batimetría preliminar	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		B02_CUERPOAGUA_PREL	Polígono del cuerpo de agua del humedal del Río Elqui del 21-08-2021	VECTOR	Dinámica Costera	2021

A lo largo de la consultoría se utilizaron un total de 42 capas, de las cuales:

- 34 capas corresponden a capas de carácter vectorial.
- 8 capas corresponden a capas del tipo ráster.
- 22 capas fueron elaboradas por Dinámica Costera.
- 20 capas corresponden a otra autoría, principalmente: DGA, MMA, SUBDERE y la Corporación Capital Biodiversidad a cargo del estudio de la Delimitación del Humedal Desembocadura del Río Elqui.

#### 5.4.2 Formatos de entrega

Los formatos de entrega de la información obtenida se describen para cada uno de los siguientes productos:

- Bases de datos
- Proyectos Editables
- Planimetría
- KMZ
- Metadatos
- Material Audiovisual

##### 5.4.2.1 Bases de datos

Las capas de información se entregan al interior de dos formatos de bases de datos para softwares de tratamientos de información espacial, dentro de los cuales están los archivos vectoriales y ráster. Estos archivos corresponden a uno visible en:

- QGIS a través de un GEOPACKAGE, y de uno visible en,
- ArcGIS a través de una GEODATABASE.

En la Figura 167 se observa una vista de las primeras 17 capas desplegadas en su software correspondiente. Es posible visualizar que dada la nomenclatura utilizada en ambas bases de datos el orden de los archivos coincide y se mantiene. En el Anexo 9.6 es posible observar el despliegue total de ambas bases de datos.

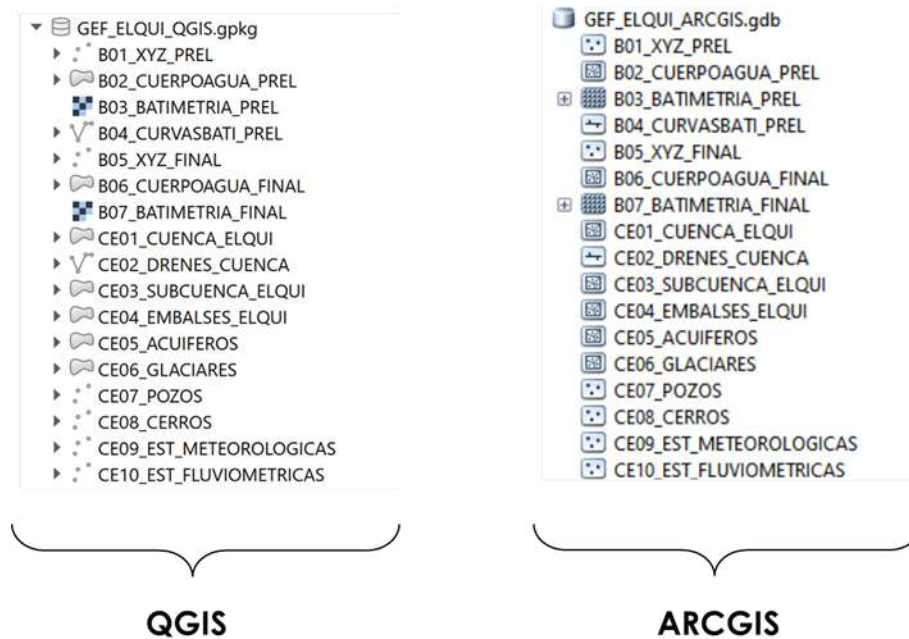


Figura 167: Visualización de las bases de datos en los softwares de QGIS y ArcGIS. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2.2 *Proyectos editables*

Con las bases de datos se generaron las capas de información con las cuales se construyeron los proyectos editables para la elaboración de las cartografías. Estos proyectos se disponen en formato .QGZ de QGIS, .MXD y .MPK de ARCGIS, este último corresponde a la versión empaquetada de los archivos .MXD.

En la Tabla 21 se presenta un listado de los proyectos clasificados en temáticas para facilitar su comprensión, los cuales corresponden a un total de 75, de estos 25 se entregan en formato .QGZ, 25 en formato .MXD y 25 en formato empaquetado de ArcGIS .MPK. Se optó por mantener el nombre del archivo para ambos softwares con el objetivo de indicar que ambos contienen la misma información, existiendo sólo variaciones con relación a la representación de elementos en cuanto a la leyenda (tonalidad de los colores, figuras, etc.) o el mapa base utilizado, debido a las particularidades propias de cada programa.

Los proyectos están catalogados para identificar elementos mínimos para una lectura rápida de su contenido, como son: la escala, capas utilizadas, descripción del proyecto, entre otros, catálogo en formato Excel que se encuentra junto a la carpeta en que se ubican estos archivos, siendo realizado sólo para los archivos .MXD de ARCGIS.

Tabla 21: Listado de proyectos editables. Fuente: Elaboración propia.

Temática	N°	Nombre proyecto
<b>Terrenos desembocadura</b>	1	0101_CAMPAÑAS_TODAS
	2	0102_CAMPAÑA_07_OCT_2021
	3	0103_CAMPAÑA_29_OCT_2021
	4	0104_CAMPAÑA_11_NOV_2021
	5	0105_CAMPAÑA_21_NOV_2021
	6	0106_CAMPAÑA_25_NOV_2021

	7	0107_CAMPAÑA_08_DIC_2021
	8	0108_CAMPAÑA_14_DIC_2021
	9	0109_CAMPAÑA_30_DIC_2021
	10	0110_CAMPAÑA_07_01_2022
<b>Batimetría</b>	11	0201_BATIMETRIA_2021_09_05
	12	0202_BATIMETRIA_FINAL_SONDAS
	13	0203_BATIMETRIA_FINAL
<b>Multiparamétrico</b>	14	0301_MULTIPARAMETRICO
<b>Cuenca</b>	15	0400_CUENCA_ELQUI
	16	0401_ESTACIONES_FLUVIOMETRICAS
	17	0402_ESTACIONES_METEOROLOGICAS
	18	0403_CUENCA_ELQUI
	19	0404_POZOS
	20	0405_POZOS_ACUIFEROS
	21	0406_SUBCUENCAS_ACUIFEROS
	22	0407_MALLA_MODELACION_VEGETACION
	23	0408_DELIMITACION_HUMEDAL
	24	0409_COMPARACION_VEGETACION
	25	0410_AREA_ESTUDIO
<b>Total</b>	<b>25.QGZ</b> <b>25.MXD</b> <b>25.MPK</b>	<b>75 archivos editables</b>

### 5.4.2.3 Planimetría

La planimetría del proyecto se entrega en formato JPG y PDF, los cuales mantienen exactamente los mismos nombres que los proyectos editables de forma de poder identificar fácilmente el proyecto de origen que genera tal planimetría (Figura 168). Como se entregan los proyectos en formato editable .QGZ y .MXD, al final de la nomenclatura del archivo exportado, se añade el nombre del software con el que se construyó el documento. Adicionalmente, los planos en PDF se exportan con la información georreferenciada.



Figura 168: Ejemplo de planimetría en formato JPG y PDF. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.2.4 Metadatos

Tomando en consideración las normas cartográficas del Ministerio del Medio Ambiente y los parámetros necesarios para generar los metadatos de las capas de información, se optó por elaborar estos con el apoyo del Software ArcGIS. Este permite introducir manualmente la información para completar los campos según la norma ISO 19.115 2003 (por ejemplo, datos del propietario, autor y resumen, entre otros), y también generar automáticamente aspectos como los del sistema de referencia o el tamaño de la celda de archivos ráster. Esta información queda inscrita en cada capa de la Geodatabase, siendo también posible exportarla a un formato .XML, lo que permite vincular el metadato a cada capa de manera separada. Finalmente, cada archivo .XML exportado mantiene los mismos nombres de las capas que están al interior de la Geodatabase y del Geopackage.

#### 5.4.2.5 KMZ

Las 22 capas generadas se convirtieron en formato .KMZ para poder ser abiertas en Google Earth, de manera que puedan ser utilizadas sin contar con el software de ArcGIS o QGIS. El listado de las capas llevadas a este formato se presenta a continuación en la Tabla 22.

Tabla 22: Capas convertidas a formato KMZ. Fuente: Elaboración propia.

N°	Nombre Capa	Tipo
1	B01_XYZ_PREL	vector
2	B02_CUERPOAGUA_PREL	vector
3	B03_BATIMETRIA_PREL	ráster
4	B04_CURVASBATI_PREL	vector
5	B05_XYZ_FINAL	vector
6	B06_CUERPOAGUA_FINAL	vector
7	B07_BATIMETRIA_FINAL	ráster
8	CE07_POZOS	vector
9	CE08_CERROS	vector
10	CE09_EST_METEOROLOGICAS	vector
11	CE10_EST_FLUVIOMETRICAS	vector
12	C13_LINEA_RIBERA	vector
13	C14_ESPEJOS_ELQUI	vector
14	IB04_LOCALIDADES	vector
15	M01_XYZ	vector
16	M02_CUERPOAGUA	vector
17	M03_O2DISUELTO	ráster
18	M04_PH	ráster
19	M05_SALINIDAD	ráster
20	TB03_MALLA	vector
21	TB04_CLASIFICACION_VEG	vector
22	TB05_MODELO_TOPOBATIME	ráster

#### 5.4.2.6 **Material Audiovisual**

Para acompañar la visualización de la información obtenida durante la consultoría se hace entrega adicionalmente de material audiovisual en formato .MP4 de los siguientes aspectos relevantes, como anexo a la base de datos espacial que se hace entrega:

- Evolución del espejo de agua durante los años 1977-2021.
- Cambios en el cuerpo y volumen de agua.
- Cambios en la desembocadura.
- Modelaciones.

#### 5.4.3 **Organización de información**

Finalmente, la base de datos se organiza de forma de poder clasificar la información de acuerdo con el tipo de archivo (Figura 169). En este sentido el SIG del proyecto se subdivide en tres carpetas:

- **00\_PROYECTOS:** Contiene todos productos editables asociados (.QGZ, .MXD y .MPK), según los informes entregados (Informe 1, 2 y 3). En la carpeta principal se encuentra un catálogo de los proyectos que se incluyen para identificar las capas que se utilizaron, una descripción del proyecto y la escala de elaboración. Cabe mencionar que, al interior de las subcarpetas por informe, existe una división interna de acuerdo con las temáticas que a nivel de planimetría se obtuvieron en la consultoría: terrenos, batimetría, multiparamétrico y cuenca, división que es posible ver en la Figura 170
- **01\_PLANOS:** Contiene toda la planimetría generada en formato JPG y PDF según su elaboración durante los informes (subcarpetas).
- **02\_GEOINFORMACIÓN:** Contiene todas las capas de información, tanto en formato vectorial como ráster, utilizadas para la generación de los proyectos editables y para la elaboración de la correspondiente planimetría. Las subcarpetas contienen la *GEOTABASE*, el *GEOPACKAGE*, los *METADATOS*, los archivos *KMZ*, las capas en formato *SHAPE* y *TIFF* y el *MATERIAL AUDIOVISUAL* en formato MP4. Finalmente, en la subcarpeta 0205\_SHAPE\_TIFF es posible encontrar dos archivos en formato Excel correspondientes al diccionario de datos y el resumen de las capas utilizadas.

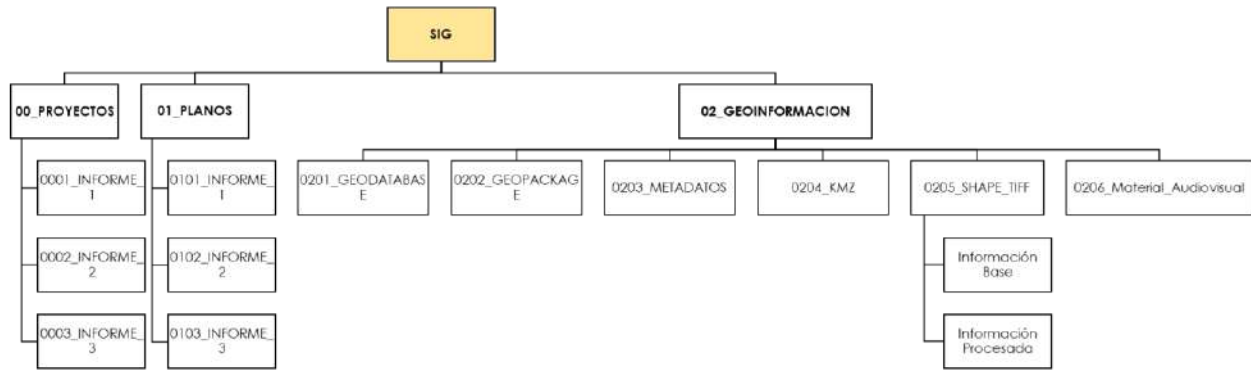


Figura 169: Organización del SIG del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

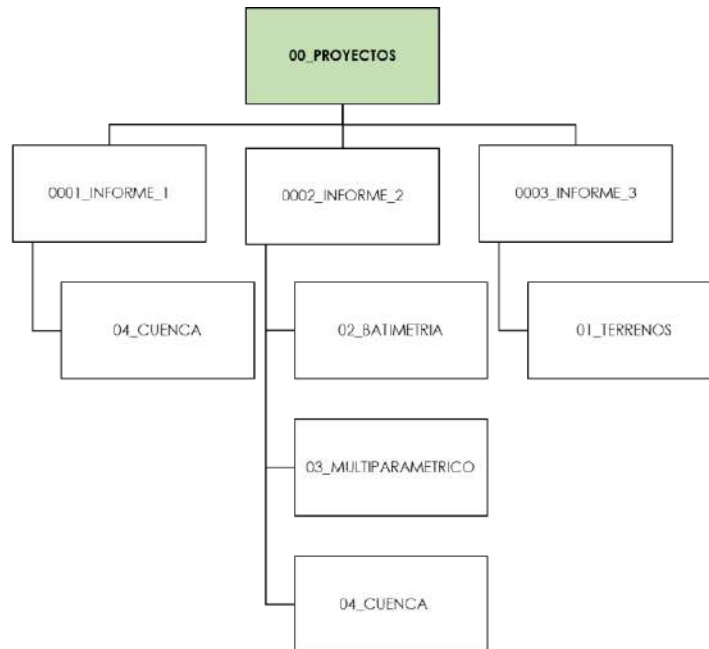


Figura 170: Organización interna de la carpeta 00\_PROYECTOS Fuente: Elaboración propia.

## 6 DISCUSIÓN

Los resultados muestran que vegetación palustre<sup>37</sup> (Figura 171) modula la hidrodinámica y la morfodinámica del humedal, al controlar los procesos de sedimentación: lugares con corrientes débiles tienden a sedimentar, mientras que zonas con corrientes altas tienden a erosionar. Esto plantea una posible cadena de impacto si se abre innecesariamente la barra como ha estado ocurriendo desde el año 2011, según la evidencia de imágenes satelitales analizadas (Figura 159). Es curioso que esto sea concurrente con el desarrollo inmobiliario que se ha efectuado en el entorno del humedal (Figura 62). Como se constató en terreno y mediante el modelo hidrodinámico durante la consultoría (Figura 41), la apertura de la barra tiene como consecuencia una disminución del espejo de agua. La disminución del espejo de agua a su vez propicia el cambio de la distribución de la vegetación palustre, la que avanza para alcanzar las nuevas riberas formadas al disminuir el tamaño del espejo de agua. El modelo numérico muestra que esto cambia la hidrodinámica del humedal y acrecienta la sedimentación en esas zonas pobladas por vegetación palustre. Así, abrir la barra artificialmente en forma sostenida en el tiempo puede significar la transformación de la desembocadura en una vega: disminuyendo el espejo de agua con respecto a la porción del álveo que actualmente se encuentra siempre cubierto por agua, aumento de colonización vegetal (sucesiones) en suelos descubiertos. De esta forma, si el proceso de apertura artificiales continua, es esperable que el humedal disminuya su tamaño aparente en años normales y secos, propiciando la antropización de su álveo. En el caso de un año húmedo, que producto del cambio climático parecen ser cada vez más escasos, se generarían anegaciones de estos sectores.

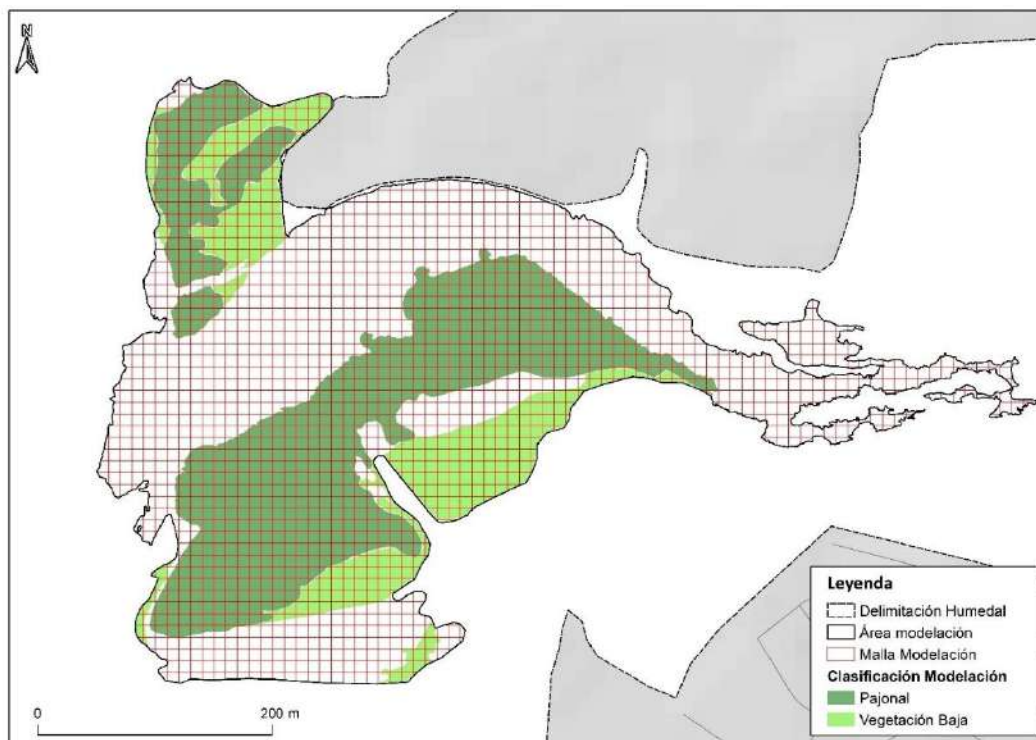


Figura 171: Modelo numérico de la hidrodinámica del humedal. Se muestra la distribución de la vegetación palustre (pajonal) y vegetación hidrófila baja. Fuente: Elaboración propia.

<sup>37</sup> Vegetación hidrófila en la ribera del humedal, actualmente compuesta entre otras especies por *Schoenoplectus californicus*.

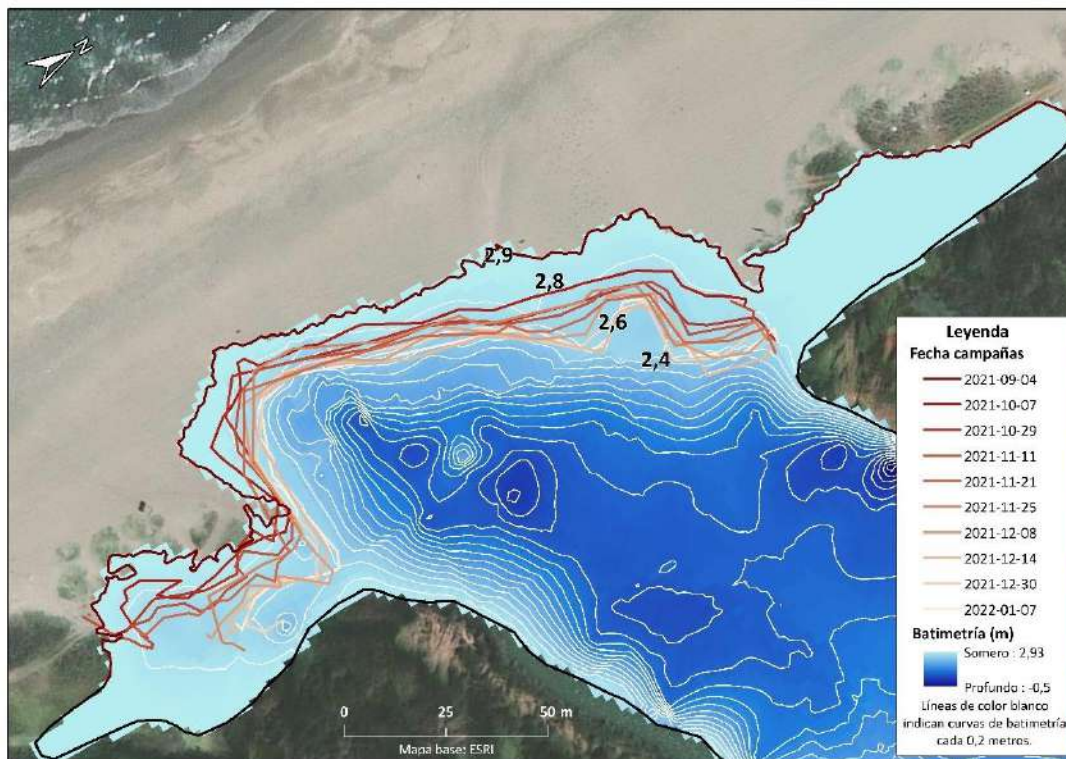


Figura 172: Comparación de los cambios de la posición de la ribera de la desembocadura del río Elqui entre septiembre 2021 y enero 2022. Fuente: Elaboración propia.

Se evidenció que la barra se abre artificialmente en forma recurrente, lo que reduce el volumen del agua y probablemente ha inducido un retroceso de la vegetación asociada al humedal en los últimos años. Debido a la importancia de la vegetación palustre, se decidió chequear su incorporación en los polígonos propuestos como delimitación del humedal y la propuesta de humedal urbano. Se constató que la porción de vegetación relevante en la hidrodinámica del humedal se encuentra actualmente incluida en ambos polígonos (Figura 173). Sin embargo, se aprecian diferencias entre la composición de la distribución de la vegetación palustre identificada en el terreno de septiembre 2021, con la propuesta en la delimitación del humedal realizada el año anterior (Figura 174). Aunque la clasificación de la vegetación hidrófila realizada por Figueroa *et al.* (2021) considera un mayor número de clases, existen diferencias en la extensión de la vegetación palustre. Esto es un indicio de que ésta experimenta cambios rápidos cuando el espejo de agua varía y por este motivo esta variable (porcentaje del álveo de la desembocadura cubierta por vegetación hidrófila) debe ser controlada y monitoreada recurrentemente. Adicionalmente, el seguimiento realizado a la ribera de la desembocadura del río Elqui durante los terrenos de septiembre 2021 y enero 2022, revela que el mayor retroceso del espejo de agua se explica por la apertura artificial de la barra (ocurrido en los primeros días de octubre 2021). Posteriormente el espejo de agua continuó disminuyendo, en concordancia con los procesos de evaporación y carencia de lluvias durante la época estival (Figura 172). Debido a esto es que se recomienda priorizar la implementación de las siguientes medidas:

- Cierre manual de la barra de arena cuando se encuentra artificialmente abierta, controlando los cambios de nivel de las aguas con ayuda de una regla limnimétrica y realizando la apertura en forma manual, solo en caso debidamente justificados, para evitar los impactos que supone un manejo mecanizado.
- Monitoreo al menos mensual e idealmente semanal de la desembocadura, centrado principalmente en controlar los cambios de las propiedades de la columna de agua. Si no es posible implementar un monitoreo semanal, lo mínimo aconsejable es que sea mensual. En el caso que se detecten disturbios como apertura



artificial de la barra, o ingreso de agua de mar por marejadas, el monitoreo debe ser semanal hasta que los parámetros regresen a valores normales históricos.

- Gestión de la vegetación hidrófila del humedal, que debe responder a una evaluación al menos semestral de cubierta y densidad. Esta gestión debe estar orientada a controlar la extensión del álveo del humedal cubierta por vegetación: una cubierta excesiva afecta la hidrodinámica de la desembocadura, generando cambios en los procesos sedimentarios y así alterando la morfodinámica del lugar. La falta de vegetación disminuye el hábitat de la avifauna. Esta gestión debe estar acompañado con un proceso gradual de restauración vegetal activa, reemplazando vegetación exótica por vegetación nativa.

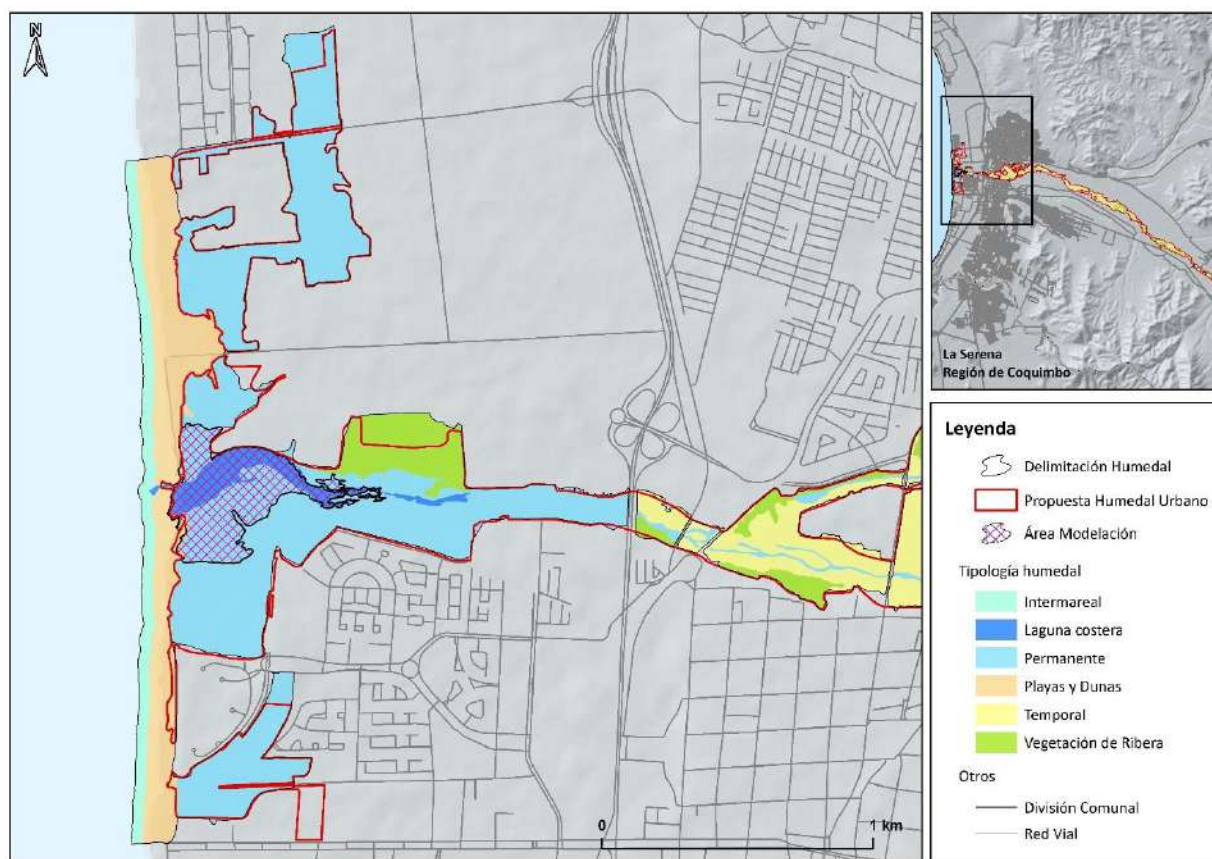


Figura 173: Comparación de los polígonos de delimitación del humedal del río Elqui con el área de modelación relevante para la hidrodinámica, considerando el espejo de agua presente en septiembre 2021. Fuente: Elaboración propia en base a la información levantada en terreno, Figueroa *et al.* (2021) y Ministerio del Medio Ambiente, (2021)

Al revisar la delimitación del humedal urbano, resalta que su límite poniente excluye la playa y la duna (Figura 173). Esto es coherente con los criterios de delimitación de humedales urbanos establecidos en la ley N° 21.202, a saber:

- presencia de vegetación hidrófita,
- presencia de suelos hídricos con mal o sin drenaje, y
- un régimen hidrológico de saturación ya sea permanente o temporal que genera condiciones de inundación periódica.

Sin embargo, estos criterios no contemplan que los humedales costeros tienen vinculaciones fuertes con la playa (en sectores supramareal, intermareal y submareal) y con las dunas costeras cercanas. En momentos que en forma

natural el río Elqui ha abierto su barra comunicándose con el mar, el límite real del humedal es más amplio que el delimitado (Figura 162). Es por este motivo que se recomiendan las medidas:

- Monitoreo de la playa, controlando la pendiente y la altura máxima de la duna y la barra en relación con el nivel de reducción de sonda, como referencia de un plano de marea en el lugar.
- Evitar sobrepasos de mar al humedal mediante la restauración de dunas y la barra de arena.
- Gestión de la playa, impidiendo el tránsito de vehículos y estableciendo pasarelas elevadas para mitigar el tránsito continuo de personas especialmente sobre las dunas para acceder a la playa.

Estas medidas deberían ser acompañadas de una figura de protección que sea complementaria a la declaración de humedal urbano, por ejemplo, declarando un área marino costera protegida de múltiples usos (AMCP-MU) entre el Faro Monumental y caleta San Pedro, desde la playa (incluyéndola) hasta una milla mar adentro. Un AMCP es compatible con las actividades de los pescadores artesanales y el turismo, y dota de herramientas para implementar un plan de gestión que no sólo actúe en el humedal sino también en su entorno inmediato, realizando acciones sobre la playa y la duna, que influyen directamente sobre el estado ambiental del humedal.

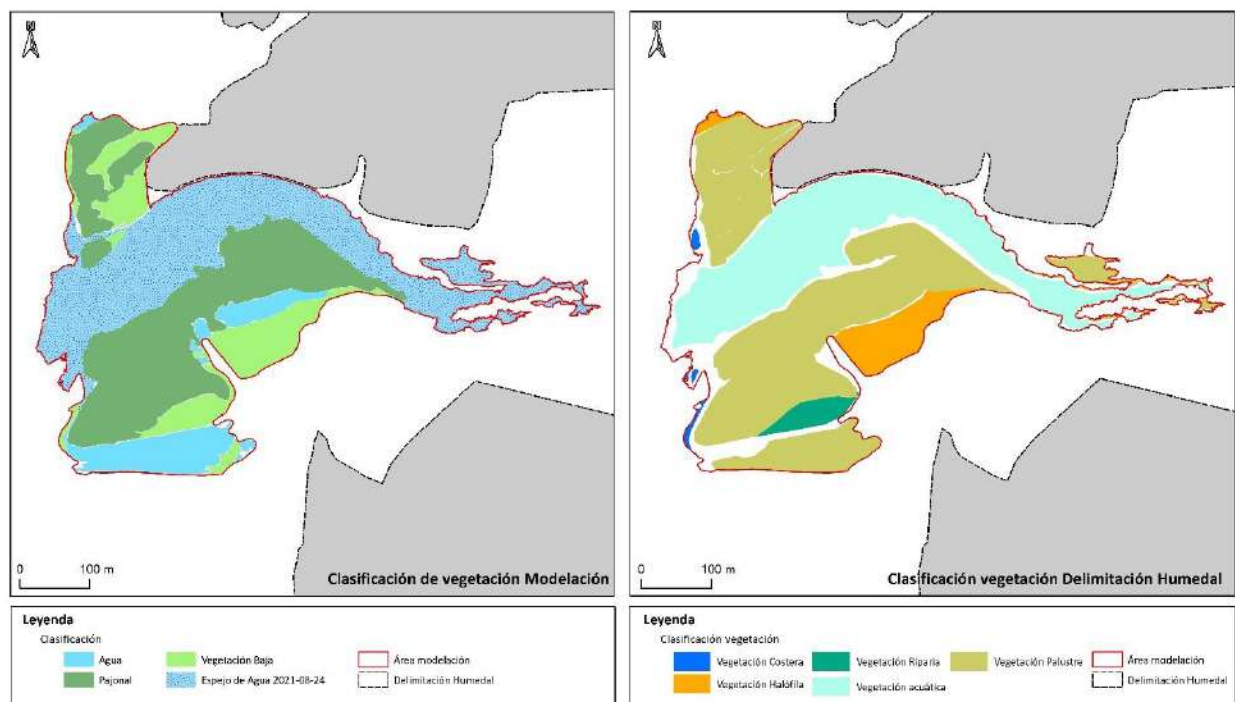


Figura 174: Comparación de la distribución de vegetación hidrófila relevante para la hidrodinámica del humedal (izquierda) con la distribución identificada por la consultoría de delimitación del humedal (derecha). Fuente: Elaboración propia en base a la información levantada en terreno y Figueroa *et al.* (2021).

Los caudales de años seco, normal y lluvioso generan diferentes comportamientos del sistema. Así, la velocidad y erosión/sedimentación son mayores, aunque no proporcionales, para mayor caudal líquido (para igual caudal sólido en la cabecera del humedal). El año normal con caudal líquido de 7,4 m<sup>3</sup>/s (4,3 veces menos que para año húmedo) generó erosiones máximas del orden de 2 a 3m y sedimentaciones máximas de 1 m, mientras que para año húmedo

se encontraron erosiones máximas de 2,5 a 3m y sedimentaciones máximas de 2 m. Con esto se infiere que, en referencia a embancamientos y erosiones, un año normal tendría implicancias similares a año húmedo, más cuando las zonas principales de embancamiento se concentran en la cabecera del humedal, con profundidades promedio de 1,5 m.

Definir lo que se entiende por “año normal”, no es trivial en la zona de estudio. Características oceanográficas y costeras especiales de la bahía de Coquimbo –notoriamente más somera que otras bahías de Chile– parecen conjugarse para que el clima marino tenga sutiles diferencias con el entorno del litoral de Chile central. Estas diferencias a su vez modulan el clima y la temperie de la cuenca del río Elqui. Así, mientras que en forma general en Chile central, un fenómeno El Niño (fase cálida de ENOS) implica un inmediato incremento de las precipitaciones y un fenómeno La Niña (fase frío de ENOS) se asocia a un déficit de las mismas; los registros de precipitaciones en la cuenca del río Elqui (Figura 84, Figura 88, Figura 92 y Figura 96) muestran años extremadamente lluviosos que no se corresponden con años El Niño, años El Niño que resultan más bien secos, años extremadamente secos que no se corresponden con La Niña y años La Niña que resultan lluviosos. Años normales en precipitaciones<sup>38</sup>, que coincidan con años normales desde el punto de vista de la ocurrencia del fenómeno El Niño, resultan ser escasos. Por lo tanto, el “año normal” debería ser definido exclusivamente en función del agua caída por lluvias. También se debe tener en cuenta que el régimen de precipitación no solo está cambiando su tendencia, sino que también su estacionalidad: a lo largo de los años, el mes de mayores precipitaciones parece estar modificándose, atrasándose el inicio de las lluvias (Figura 85, Figura 89, Figura 93, Figura 97). Estos cambios en las precipitaciones; sin embargo, no tienen relación directa con el régimen de caudal del río Elqui. La regulación del caudal en el embalse Puclaro parece explicar que los caudales no se coordinen con las precipitaciones aguas abajo del embalse Puclaro, lo que puede ser respuesta a la demanda de caudal para la agricultura en años secos. El embalse Puclaro ha demostrado su eficacia para gestionar el agua en la cuenca del Elqui; sin embargo, su diseño no incorporó restitución de los sedimentos de manera que fueran transportados por el río hasta la bahía de Coquimbo y constituyeran una fuente de sedimentos a las playas. Gran parte de la erosión costera identificada en las playas de La Serena se pueden explicar por la retención de sedimentos del Puclaro (Aguas Consultores 2020), lo que motivó a plantear la necesidad de abordar la restauración a nivel de cuenca y mitigar los efectos de la erosión costera a nivel de la bahía.

Con respecto a las simulaciones de escenarios futuros considerando el aumento del nivel del mar a finales de siglo, no se aprecian diferencias significativas, siendo la velocidad y erosión/sedimentación del orden de las obtenidas en las simulaciones históricas. Para la proyección de aumento del nivel de mar, los niveles del océano siguen sin sobrepasar la cota de coronación de la barra de arena actual, por lo que no se registran sobrepasos del océano hacia el humedal por diferencia de niveles. Estas simulaciones son una gran simplificación de lo que podría ser un contexto a finales de siglo afectado por el cambio climático. Si bien la proyección del aumento del nivel del mar es un dato calculado en base a modelos climáticos, en este estudio no se están considerando otros posibles cambios a finales de siglo, como son la erosión de la costa progresiva con el aumento del nivel del mar, o los posibles movimientos verticales del terreno por eventos sísmicos. Tampoco se toman en cuenta las capacidades de adaptación natural del sistema completo a estos fenómenos. En definitiva, las simulaciones para escenarios futuros dan una primera aproximación al comportamiento del sistema afectado por cambios de los niveles. Dado que para los escenarios históricos no se consideró el ascenso del nivel medio del mar por efecto del fenómeno de El Niño (Sección 5.1.6; aumento de hasta 30 cm), los escenarios futuros con aumento del nivel del mar de 58 cm describen una situación aproximada donde se destaca la modulación del nivel del humedal con la marea y la erosión/sedimentación propia para los escenarios hidrológicos de años húmedos y alto caudal de entrada desde el río Elqui.

---

<sup>38</sup> Entendiendo por normalidad que las precipitaciones se encuentran en un intervalo del 68 o 95% de confianza con respecto al promedio histórico (Variaciones de una o dos desviaciones estándar con respecto al promedio).

Otro aspecto relevante que se observa en los modelos es la diferencia entre las posiciones de los canales de apertura para casos de barra cerrada y barra abierta. Cuando el canal está desde un principio, no cambia de posición y se erosiona dependiendo del flujo, mientras que si es el flujo es el que genera el canal, éste tiene una tendencia a salir hacia el norte con cierta inclinación, al igual que se evidencia de las imágenes satelitales (Figura 175). A pesar de esta tendencia, las salidas naturales son aún más inclinadas al norte y con formas variadas. Esto también puede deberse a factores no considerados en las simulaciones como son, la granulometría de la barra y la existencia o no de compactación de la arena por el tránsito de vehículos motorizados, así como un estudio más detallado de los fenómenos de rotura del oleaje frente a la desembocadura.

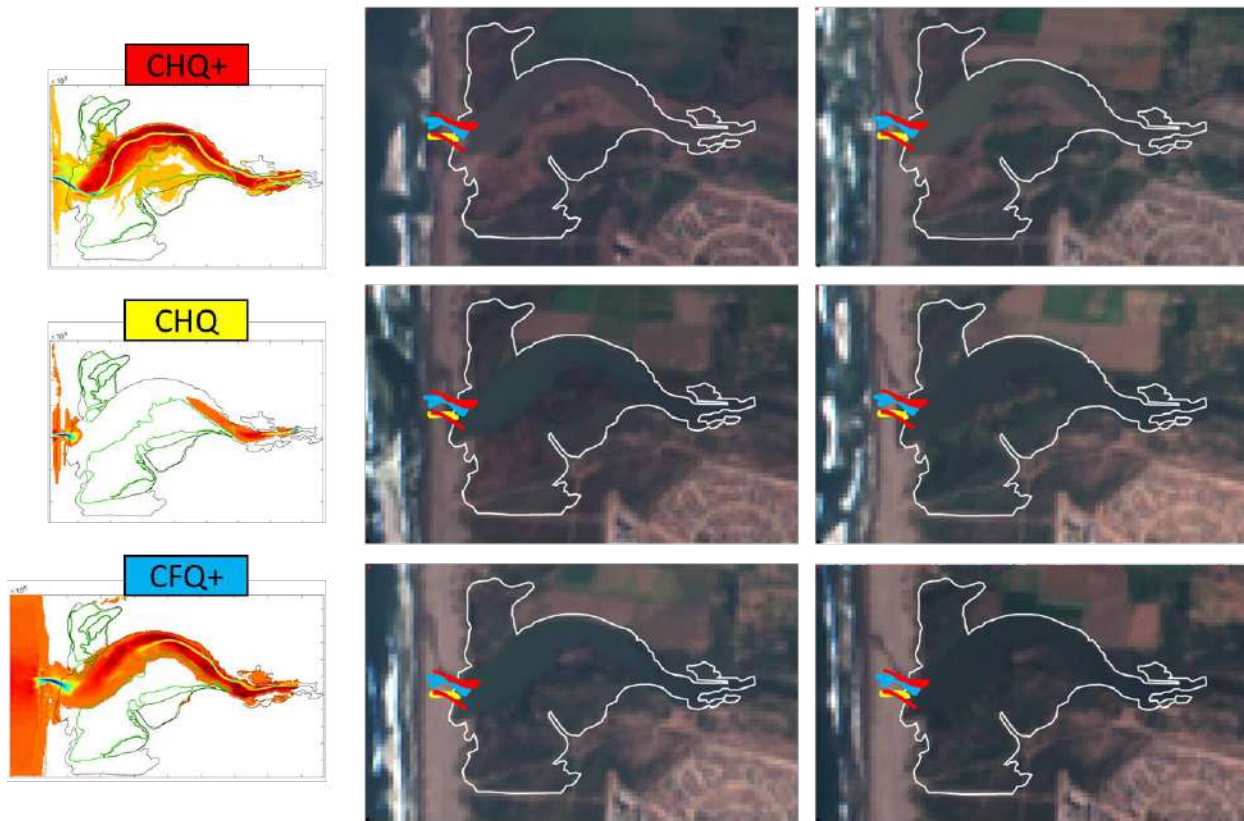


Figura 175: Posiciones de las aperturas de la barra terminal de arena en simulaciones de barra cerrada (columna izquierda) sobre imágenes satelitales (Sentinel 2) con aperturas naturales de la barra.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados del modelo hidro-morfodinámico obtenidos y los antecedentes históricos recabados, se puede concluir que:

- La desembocadura del río Elqui ha estado siendo manejada artificialmente desde el año 2011, sin una regulación apropiada. Las aperturas de la barra tienen como consecuencia una disminución en el tamaño del espejo de agua del humedal.
- La distribución y densidad de la vegetación palustre resulta importante para definir la hidrodinámica y morfodinámica del humedal, actuando como zonas de atenuación tanto de las velocidades como del avance de la erosión, sedimentación y salinidad en las áreas ocupadas por ella. Por este motivo la vegetación palustre debe ser monitoreada y gestionada.
- Hay simulaciones que muestran una modulación del nivel de agua del humedal con la marea. Cuando se produce desagüe del humedal al océano (ya sea por apertura de canal artificial como por generación del canal durante crecidas) el nivel del humedal tiende a equipararse a la marea, ralentizándose la descarga en pleamar e incrementándose durante bajamar.
- La erosión se concentra en a) la entrada desde el río Elqui a la desembocadura del humedal producto de la descarga a altas velocidades, y b) en la barra de arena, donde el sobrepaso en condiciones de año normal y húmedo produce la erosión y rotura de la barra de arena, generando un canal de desagüe cuyo tamaño depende del caudal del río Elqui.
- La apertura previa de la barra a una crecida para año normal o año húmedo reduce el tiempo en que el humedal está al nivel máximo, ya que facilita la descarga del humedal. Si no existe la apertura previa, esta se forma igualmente con el avance del caudal del río Elqui, pero más tardíamente.
- En las simulaciones no se produce entrada del agua salada al humedal ya que el nivel del mar no alcanza la cota actual de la barra de arena. El sobrepaso sólo se produce por efecto del *run-up* del oleaje sobre el frente de playa durante marejadas, creando un gradiente horizontal de salinidad sin estratificación vertical.
- Debido al aumento del nivel del mar esperable para la zona por el cambio climático antropogénico y el incremento de la frecuencia en que ocurren eventos extremos de oleaje (marejadas), se espera que en el futuro la desembocadura del río Elqui experimente ingresos de agua marina con mayor frecuencia. Esto sumado a la disminución de precipitaciones (debido al cambio climático) y caudal (debido tanto al cambio climático como al aumento de extracciones antrópicas de agua de la cuenca), implica que las propiedades físico – químicas de la columna de agua del humedal experimente cambios, lo que puede tener efectos sobre la biota.

Se identificaron además ocho medidas que pueden ayudar a gestionar la desembocadura del río Elqui. Las seis más factibles de implementar en el corto y mediano plazo, y por lo tanto se recomienda su implementación son las siguientes:

- Cierre manual de la barra de arena cuando se encuentra artificialmente abierta y apertura manual de la barra, sólo en casos justificados. Para tomar la decisión de apertura, se deben controlar los cambios de nivel de las aguas con ayuda de una regla limnimétrica, para tomar la decisión en forma informada y respaldada por datos. La tarea de abrir o cerrar la barra puede realizarse en forma manual, para evitar los impactos

que supone una apertura mecanizada, con una cuadrilla reducida de trabajadores (entre 7 y 27, dependiendo del tamaño del canal de conexión), en un lapso entorno a las 3 horas de trabajo, lo que es adecuado para el régimen de mareas del río Elqui.

- Monitoreo semanal o al menos mensual de la desembocadura, centrado en controlar los cambios de las propiedades de la columna de agua. En la medida que este monitoreo se desarrolló y se cuente con una cantidad apropiada de datos que permita dilucidar adecuadamente la estacionalidad del humedal, se podrán definir criterios para evitar la eutroficación del humedal.
- Gestión de la vegetación hidrófila del humedal, que debe responder a una evaluación al menos semestral de cubierta y densidad. Esto debe estar acompañado con un proceso gradual de restauración.
- Monitoreo de la playa, controlando la pendiente y la altura máxima de la duna y la barra en relación con el nivel de reducción de sonda, como referencia de un plano de marea en el lugar. Los registros de este monitoreo deben ser conservados y reanalizados periódicamente para constatar si se evidencian efectos atribuibles al cambio climático, y si se presentan, poder estimar tasas de cambio.
- Restauración de dunas y la barra de arena para controlar el sobrepaso de mar al humedal.
- Gestión de la playa, impidiendo el tránsito de vehículos y estableciendo pasarelas elevadas para mitigar el tránsito continuo de personas especialmente sobre las dunas para acceder a la playa.

Se recomienda realizar estas acciones para la gestión y restauración de la playa, las dunas y la barra de arena en el entorno de la desembocadura del río Elqui, en forma de piloto, de pequeña escala que sirvan de laboratorio natural para encontrar las mejores técnicas de restauración y gestión. Una vez identificados los problemas y sus posibles soluciones, se puede escalar la acción a un tamaño mayor.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Aceituno P, Fuenzalida H & Rosenblüth B (1993) Climate along extratropical west coast of South America. En: Mooney HA, ER Fuentes & BI Krongberg (eds) *Earth System Response to Global Change*: 61-69. Academic Press, San Diego. 365 pp.
- Adams VM, Pressey RL & Naidoo R (2010). Opportunity costs: Who really pays for conservation? *Biological Conservation* 143: 439–448.
- AGRIMED (2014) *Atlas del Cambio Climático en las Zonas de Régimen Árido y Semiárido: Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana (Chile)*. Centro de Agricultura y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 138 pp.
- Aguas Consultores SpA (2019). *Diagnóstico Mejoramiento Playa La Serena, Comuna La Serena, Región de Coquimbo. Informe Etapa 1. Estudio de Prefactibilidad Construcción Obra de Protección Costera Faro Monumental*. Instituto Nacional de Hidráulica, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
- Aguas Consultores SpA (2020). *Diagnóstico Mejoramiento Playa La Serena, Comuna La Serena, Región de Coquimbo. Informe Etapa 2, Revisión B. Estudio de Hidrología*. Instituto Nacional de Hidráulica, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
- Aguas Consultores SpA (2021). *Diagnóstico Mejoramiento Playa La Serena, Comuna La Serena, Región de Coquimbo. Informe Etapa 4, Revisión A*. Instituto Nacional de Hidráulica, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
- Albrecht F, Shaffer G (2016) Regional sea-level change along the Chilean Coast in the 21st century. *Journal of Coastal Research*, 32(6), 1322-1332.
- Alcayaga OE, Pizarro-Araya J, Alfaro FM & Cepeda-Pizarro J (2013) Arañas (Arachnida, Araneae) asociadas a agroecosistemas en el Valle de Elqui (Región de Coquimbo, Chile). *Revista Colombiana de Entomología* 39 (1): 150-154.
- Alfaro FM, Pizarro-Araya J, Cepeda-Pizarro J & Bodini A (2011) Composición y distribución del ensamble de Orthoptera (Insecta) en una cuenca árida del norte-centro de Chile. *Rev. FCA UNCUYO* 43 (1): 97-110.
- Alonso D (2021) Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel. *MappingGIS*. <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel>.
- Andermann C, Longuevergne L, Bonnet S, Crave A, Davy P & Gloaguen R (2012) Impact of transient groundwater storage on the discharge of Himalayan rivers. *Nature Geosci.* Vol. 5(2): 127-132. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1356>
- Andrade B & Peña H (1993) Chilean geomorphology and hydrology: response to global change. En: Mooney HA, ER Fuentes & BI Krongberg (eds) *Earth System Response to Global Change*: 101-113. Academic Press, San Diego. 365 pp.
- Andrade B & Grau S (2005) La laguna de Cahuil, un ejemplo de estuario estacional en Chile central. *Revista Geografía Norte Grande*, 33: 59-72.
- Aracena GA (2020) Implementación de un modelo hidrodinámico de 2d en el estuario del Maule, Chile, para el análisis del efecto de inundación sobre las zonas aledañas, producto de la variación en la tasa de sedimentos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Araya-Vergara JF (1971) Bases geomorfológicas para una división de las costas de Chile. *Revista de Geografía de Chile* 21-22: 5-3.
- Araya-Vergara JF (1981) El concepto de delta en ría y su significado en la evolución litoral (ejemplo de Chile Central). *Información Geográfica de Chile* 28: 19-42.
- Araya-Vergara JF (1982) Análisis de la localización y de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile. *Información Geográfica de Chile* 29: 35-55.
- Araya-Vergara JF (1996) Sistema de interacción oleaje-playa frente a los ergs de Chanco y Arauco, Chile. *Gayana Oceanología* 4: 159-167.
- Arrau del Canto L (2001) Modelo de simulación mensual para la operación del sistema de recursos hidráulicos del Río Elqui, Provincia del Elqui, IV Región. Ingenieros Consultores & Dirección de Obras Hidráulicas, MOP IV Región, La Serena, Chile.

- Arumí JL (1992) Un Modelo Hidrogeológico Simple para la Explotación de un Acuífero Costero. Cuarto Encuentro Científico sobre el Medio Ambiente. CIPMA, Valdivia.
- Baart F, van Gelder PHAJM, De Ronde J, Van Koningsveld M & Wouters B (2012) The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates. *Journal of Coastal Research*, 28(2), 511–516.
- Balmford A & Whitten T (2003) Who should pay for tropical conservation, and how could the costs be met? *Oryx* 37: 238–250.
- Balocchi F, Pizarro R, Meixner T & Urbina F (2017) Annual and monthly runoff analysis in the Elqui River, Chile, a semi-arid snow-glacier. *Tecnología y Ciencias del Agua VIII* (6): 23-35.
- Beyá J & Winckler P (2013) Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 125(2): 63 - 81.
- Beyá J, Álvarez M, Gallardo A, Hidalgo H, Aguirre C, Valdivia J, Parra C, Méndez L, Contreras F, Winckler P & Molina M (2016) Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- BCN (2018) Red Hidrográfica: polilíneas de los drenes de todo Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Bravo-Naranjo V & Zuleta-Ramos C (2019) Amenazas y presiones a los humedales costeros de Coquimbo. En: Zuleta-Ramos C & Contreras-López M (eds). *Humedales de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación*. Pág. 228-253. Editorial Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Bravo-Naranjo V, Zuleta-Ramos C, Contreras-López M, Cea Villablanca A, Larraguibel González, Pastén Marambio V & Salcedo Castro J (2020) Cap.4: Estuario Río Elqui. En: Zuleta-Ramos C & Bravo-Naranjo V (eds). *Atlas Humedales Costeros de Coquimbo: Biodiversidad & Territorio*. Pág. 52-63. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Brito AC (2012) Ecosystem & Ecography A Changing Definition of Estuary? Adjusting Concepts to Intermittently Closed and Open Coastal Systems. *Ecosystem & Ecography* 2 (1), 1–2.
- Brooks N, Nicholls RJ & Hall J (2006) Sea-level rise: coastal impacts and responses. En: Schubert R, Schellnhuber HJ, Buchmann N, Epiny A, Greisshammer R, Kulesa M, Messner D, Rahmstorf S & Schmid J (eds.) *The Future Oceans: Warming Up, Rising High, Turning Sour* (Special Report). Berlin, Germany, WBGU (German Advisory Council on Global Change) pp. 33-64.
- Bryant E (2008) *Tsunamis: The Underrated Hazard* (Second Edition), Springer, Berlin. 307 pp.
- Cabezas CR, Cepeda J & Bodini A (2007) Descripción cartográfica de la hoya hidrográfica del Río Elqui. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Cai W, Borlace S, Lengaigne M, Van Rensch P, Collins M, Vecchi G, Timmermann A, Santoso A, McPhaden MJ, Wu L, England MH, Wang G, Guilyardi E & Jin FF (2014) Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature climate change*, 4(2), 111-116.
- Caldwell PC, Merrfield MA & Thompson PR (2015) Sea level measured by tide gauges from global oceans — the Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset, doi:10.7289/V5V40S7W.
- Cane MA (1984) Modeling Sea Level During El Niño. *Journal of Physical Oceanography*, 14: 1864 - 1874, doi: 10.1175/1520-0485(1984)014<1864:MSLDEN>2.0.CO;2
- Carrasco J, Casassa G & Quintana J (2005) Changes of the 0°C isotherm in central Chile during the last Quarter of the XXth century. *Hydrological Science Journal*, 50(6): 933-948.
- Carvajal M, Contreras-López M, Winckler P & Sepúlveda I (2017) Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America During an Intense Storm, *Pure and Applied Geophysics*, 174(8): 3313–3323, doi:10.1007/s00024-017-1584-0.
- Castilla JC (1988) Earthquake-caused coastal uplift and its effects on rocky intertidal kelp communities. *Science*, 242(4877): 440-443.
- Cazenave A & Nerem RS (2004) Present-Day Sea Level Change: Observations and Causes. *Reviews of Geophysics*, 42 (3): 1–20, doi:10.1029/2003rg000139.
- Cea A, Martínez-Tillería KP, Pastén V & Osorio R (2019) Flora y vegetación de los humedales costeros de Coquimbo. En: Zuleta-Ramos C & Contreras-López M (eds). *Humedales de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación*. Pág. 80-109. Editorial Universidad de La Serena, La Serena, Chile.



- CEPAL (2011) Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática. Estudio elaborado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. 263 pp.
- Cepeda-Pizarro J, Vega S, Elgueta M & Pizarro-Araya J (2006) Algunos antecedentes meteorológicos que explican las irrupciones poblacionales de *Elasmoderus wagenknechti* (Liebermann) (Orthoptera: Tristiridae) en la región del semiárido de Chile. *IDESIA* (Chile) 24: 49-64.
- Cepeda-Pizarro J, Vega S, Vásquez H, Elgueta M & Pizarro-Araya J (2007). Demographic study of two population outbreaks of *Elasmoderus wagenknechti* (Liebermann) Cuenca (Orthoptera: Tristiridae) in the Transitional desert of Chile. *Neotropical Entomology* 36(4): 495-502.
- Cepeda JP, Cabezas RC, Robles MI & Zavala HZ (2009a). Antecedentes generales de la cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile). En: *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima*. Cepeda PJ (ed): 5-29. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Cepeda J, Zuleta C & López-Cortés F (2009b) Síntesis: Los sistemas naturales de la cuenca del río Elqui en el contexto del cambio climático. En: Cepeda J. (ed). *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima*, pp. 327-369. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Cepeda J, Zuleta C & Osorio R (2000) Región de Coquimbo: Biodiversidad y Ecosistemas Terrestres. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile, 107pp.
- Chander G, Markham BL, Helder DL (2009) Resumen de los coeficientes de calibración radiométrica actuales para los sensores Landsat MSS, TM, ETM + y EO-1 ALI. *Ambientes Sensores Remotos.*, 113, págs.893 – 903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Church JA, Aarup T, Woodworth LP, Wilson SW, Nicholls JR, Rayner R, Lambeck K, *et al.* (2010) Sea-Level Rise and Variability: Synthesis and Outlook for the Future. En: *Understanding Sea-Level Rise and Variability*, edited by Church JA, Woodworth PL, Aarup T & Wilson WS, pp. 402 – 419. Wiley-Blackwell, doi:10.1002/9781444323276.ch13.
- Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, Merrifield MA, Milne GA, Nerem RS, Nunn PD, Payne AJ, Pfeffer WT, Stammer D & Unnikrishnan AS (2013) Sea Level Change. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Church JA, Gregory JM, White NJ, Platten SM & Mitrovica JX (2011) Understanding and projecting sea level change. *Oceanography*, 24 (2): 130 - 143.
- Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, Merrifield MA, Milne GA, Nerem RS, Nunn PD, Payne AJ, Pfeffer WT, Stammer D & Unnikrishnan AS (2013) Sea Level Change. p. 1137 – 1216. En: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V & Midgley PM(eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 p.
- Cienfuegos R, Campino J, Gironás J, Almar R & Villagrán M (2012) Desembocaduras y Lagunas Costeras en la Zona Central de Chile. En: Fariña J.M & A. Camaño (eds). *Humedales Costeros de Chile*, pp. 22-65. Ediciones Universidad Católica, Santiago. Chile.
- Cipolletti MP, Delrieux CA, Perillo GME, Piccolo MC (2012) Segmentación y medición de bordes de superresolución en imágenes de teledetección. *Computación. Geosci.*, 40, págs.87 – 96. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.07.015>
- Clark R & O'Connor K (2019) A systematic survey of bar-built estuaries along the California coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 226: 1-14 (106285).
- CNR-CIREN (1997) Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile. Informe Final. Comisión Nacional de Riego (CNR) – Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 54 pp.
- CONAF (1999) Mapa preliminar de la desertificación en Chile. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile.
- CONAF (2010) Programa Nacional para la Conservación de Humedales insertos en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado. Corporación Nacional Forestal, Gerencia de Áreas Silvestres Protegidas. Santiago, Chile.

- Contreras M, Winckler P & Molina M (2012) Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 124(2): 53 – 66.
- Contreras-López M & Zuleta-Ramos C (2019) Vulnerabilidades de los humedales costeros de Coquimbo. En: Zuleta-Ramos C & Contreras-López M (eds). *Humedales de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación*. Pág. 190-226. Editorial Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Contreras-López M, Robles M, Salcedo-Castro J, Arumí JL & Zuleta-Ramos C (2019) Clima e hidrología de los humedales costeros de Coquimbo. En: Zuleta-Ramos C & Contreras-López M (eds). *Humedales de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación*. Pág. 30-59. Editorial Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Contreras-López M, Salcedo-Castro J, Cortés-Molina F, Figueroa-Nagel P, Vergara-Cortés H, Figueroa-Sterquel R & Mizobe CE (2017) El Yali National Reserve: A system of coastal wetlands in the Southern Hem-isphere affected by contemporary climate change and tsunamis. In: Finkl CW & Makowski C (eds) *Coastal Research Library (CRL) Coastal Wetlands: Alteration and Remediation*, 243-271. DOI: 10.1007/978-3-319-56179-0\_8.
- Contreras-López M, Torres R & Cevallos J (2017a) Tendencias del Nivel Medio del Mar en el litoral del Pacífico Sur Oriental En: Botello A, Villanueva S, Gutiérrez J y Rojas JL (eds.) *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático*, Editorial Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) - Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) - Universidad Autónoma de Campeche (UAC), 165-176.
- Contreras-López M, Winckler P, Sepúlveda I, Andaur-Álvarez A, Cortés-Molina F, Guerrero CJ, Mizobe CE, Iguait F, Breuer W, Beyá JF, Vergara H & Figueroa-Sterquel R (2016) Field Survey of the 2015 Chile Tsunami with emphasis on Coastal Wetland and Conservation Areas. *Pure and Applied Geophysics*, 173(2): 349-367.
- Contreras-López M., Figueroa-Sterquel R., Salcedo-Castro J., Vergara-Cortés H., Zuleta C., Bravo V., Piñones C. & Cortés-Molina F. 2017. Vulnerabilidad de humedales y dunas litorales en Chile central. En: Botello A.V., Villanueva S., Gutiérrez J. & Rojas Galaviz J.L. (eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático*, pp. 227 - 246. UJAT, UNAM, UAC, México D.F.
- Cooper JAG (2001) Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South Africa coast. *Geomorphology* 40: 99-122.
- CWP (2016) A Resource Management Strategy of the California Water Plan. California Department of Water Resources & California Natural Resource Agency. California, USA.
- Daneri G, Dellarossa V, Quiñones R, Jacob B, Montero P & Ulloa O (2000) Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Marine Ecology Progress Series*, 197, 41-49.
- Davies JL (1964) A Zeitschrift morphogenic approach to world shorelines. *Fur Geomorphologie* 8: 127-142.
- Davies, C., & Laforteza, R. (2017). Urban green infrastructure in Europe: Is greenspace planning and policy compliant?. *Land use policy*, 69, 93-101. Davis RA & Hayes MO (1984) What is a wave-dominated coast? *Marine Geology* 60:313-329.
- Delft Hydraulics (2007) User manual delft3d-flow: WI. Delft Hydraulics.
- Dias FJS, Marins RV & Maia LP (2019) Hydrology of a well-mixed estuary at the semi-arid Northeastern Brazilian coast. *Acta Limnologica Brasilensis* 21 (4): 377-385.
- DGA (2004) Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del Río Elqui. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- DGA (2012) Actualización Catastro de Usuarios de Agua, Entre el Sector Ubicado Aguas Abajo del Embalse Puclaro y la Desembocadura del Río Elqui. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- DGA (2013) Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/>
- DGA (2015) Atlas del Agua Chile 2016. Serie de Estudios Básicos N° 6. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- DGA (2007) Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I. Regiones I a IV. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. 571 p.

- di Castri F & Hajek ER (1976) Bioclimatología de Chile. Vicerrectoría Académica, Universidad Católica de Chile, Santiago, 128pp.
- DIFROL (2021) Límites Internacionales de Chile. Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado.
- Donoso K (2007) Macroinvertebrados bentónicos y la evaluación de la calidad del agua en los ríos Elqui y Cachapoal. Memoria de Título entregada a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, para optar al Título Profesional de Biología mención en Medio Ambiente.
- Doodson AT & Warburg HD (1941) Admiralty Manual of tides. Hydrographic Department, U.K. Admiralty, 270 pp.
- Dronkers J (1986) Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2-3): 117-131.
- Elwany MHS, Flick RE & Aljaz S (1998) Opening and Closure of a Marginal Southern California Lagoon Inlet. *Estuaries* 21:246-254.
- Enfield DB & Allen JS (1980) On the structure and dynamics of monthly mean sea level anomalies along the Pacific coast of north and south America. *Journal of Physical Oceanography*, 10: 557 - 578.
- Ergas M & Thiel M (2022) III Muestreo Nacional de Basura en los ríos de Chile. Científicos de la Basura, 28pp.
- Falvey M & Garreaud R (2009) Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the SE Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *J. Geophys. Res.*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.
- Farías M, Vargas G, Tassara A, Carretier S, Baize S, Melnick D & Bataille K (2010) Land-level changes produced by the Mw 8.8 2010 Chilean earthquake. *Science*, 329(5994): 916-916.
- FAO (2000) Sistema de Información sobre el uso del agua en la agricultura y el medio rural de la FAO. Chile. Disponible en [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/chile/indexesp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/chile/indexesp.stm).
- FIA (2020) Gestión Hídrica del Río Elqui Para Mejorar Eficiencia del Agua. Proyecto de Innovación en Región de Coquimbo. Serie Experiencias de Innovación Rara el Emprendimiento Agrario. Fundación Para la Innovación Agraria, Santiago, Chile.
- Fiebig-Wittmaack M, César-Pérez V & Lazo EB (2009) Aspectos climáticos del valle de Elqui. En: *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima*. Cepeda PJ (ed): 33-55. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Fierro JJ (2004) Hidrodinámica mareal en el estuario del Río Aconcagua. Tesis para obtener el grado de Magister en Oceanografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Figueroa R, Suarez ML, Andreu A, Ruiz VH & Vidal-Abarca MR (2009) Caracterización ecológica de humedales de la zona semiárida en Chile Central. *Gayana (Concepción)*, 73(1): 76-94.
- Figueroa A, Lictevolt E, Rojas C, Tapia D, Daroch S, Cáceres R (2021) Delimitación y caracterización de usos del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región de Coquimbo. Informe Final. Ministerio del Medio Ambiente, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Foreman MGG & Henry RF (1989) The harmonic analysis of tidal model time series. *Advances in water resources*, 12(3): 109-120.
- Foreman MGG (1977) Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, BC, 97pp. B.B (Ed.), Tidal Hydrodynamics. Wiley, New York.
- Fuenzalida H (1965) Clima. En: *Geografía Económica de Chile*, pp. 98 – 132. Corporación de Fomento de la Producción. CORFO, Santiago.
- Galliari J, Santucci L, Misseri L, Carol E & Alvarez MP (2021) Processes controlling groundwater salinity in coastal wetlands of the southern edge of South America. *Science of the Total Environment* 754: 1-13 (141951).
- García-Walther J, Senner N, Norambuena HV & Schmitt F (2017) Atlas de las aves playeras de Chile: Sitios importantes para su conservación. Universidad Santo Tomás. Santiago, Chile. 274 pp.
- Garreaud RD et. al. (2015) The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, (2017) 6307–6327.
- Garreaud RD et. al. (2018) The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, (2019) 1–19

- Gibbs JP (1993) Importance of small wetlands for the persistence of local populations of wetland-associated animals. *Wetlands* 13: 25–31.
- Ginot P, Kull C, Schotterer U, Schwikowski M & Gäggeler HW (2006) Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes). *Climate of the Past* 2: 21-30.
- Gmati S, Tase N, Tsujimura M & Tosaki Y (2011) Aquifers Interaction in the outhwestern Foot of Mt. Fuji, Japan, Examined through Hydrochemistry and Statistical Analyses. *Hydrological Research Letters*, Vol. 5(1): 58-63.
- Godin G (1972) *The Analysis of tides*. Liverpool University Press, 264 pp.
- Godin G (1984) The tide in rivers. *The International Hydrographic Review LXI* (2): 159 – 170.
- Godin G (1991) Frictional effects in river tides. *Tidal hydrodynamics*, 379, 402.
- Godin G (1999) The propagation of tides up rivers with special considerations on the Upper Saint Lawrence River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(3): 307-324.
- Gregory JM, Griffies SM, Hughes CW, Lowe JA, Church JA, Fukimori I ... & van de Wal RS (2019) Concepts and terminology for sea level: Mean, variability and change, both local and global. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1251-1289.
- Haines PE (2006) Physical and chemical behaviour and management of Intermittently Closed and Open Lakes and Lagoons (ICOLLs) in NSW. Griffith University, Australia.
- Herrera C & Custudio E (2014) Origin of waters from coast of Chile, small springs located at the northern in the vicinity of Antofagasta. *Andean Geology*, 41(2), 314-341
- Hervé J, Blanc M, Rochette R, Ruelland D, Hicks E & Oyarzun R (2012) Caractérisation des interactions entre flux souterrains et superficiels dans un bassin andin en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat. *La Houille Blanche* 2: 18-25.
- Hoeksema SD, Chuwena BM, Tweedley JR & Potter IC (2018) Factors influencing marked variations in the frequency and timing of bar breaching and salinity and oxygen regimes among normally-closed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 208: 205-218.
- Holling CS (1973) Resilience and stability ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.
- Hormazabal S, Shaffer G, Letelier J & Ulloa O (2001) Local and remote forcing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C8), 16657-16671.
- INDAP (2008) Programa agropecuario para el desarrollo integral de los pequeños productores campesinos del secano de la Región de Coquimbo (PADIS). Instituto de Desarrollo Agropecuario, Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile.
- IPCC (2003) *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Preparado por el Programa de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y Publicado por Instituto de Estrategias Ambientales Mundiales. Tokio, Japón.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jaksic FM (2001) Ecological effects of El Niño in terrestrial ecosystems of western South America. *Ecogeography* 24: 241-250.
- Jara C (2002) Evaluación de la existencia de insectos bioindicadores de la calidad del agua en zonas rítrónicas y potámicas de tres ríos de la zona semiárida de Chile. Memoria de Título entregada a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, para optar al Título Profesional de Biología mención en Medio Ambiente.
- Jaramillo E, Dugan J, Hubbard D, Manzano M & Duarte C (2021) Ranking the ecological effects of coastal armoring on mobile macroinvertebrates across intertidal zones on sandy beaches. *Science of the Total Environment*, 755, 142573.
- Jevrejeva SA, Grinsted JC Moore & Holgate S (2006) Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Geophys. Res.*, 111, C09012, doi:10.1029/2005JC003229.
- Kantrud HA, Krapu GL & Swanson GA (1989) *Prairie basin wetlands of the Dakotas: a community profile*. U.S. Fish and Wildlife Service, Biological Report 85. Washington, DC, USA.
- Kappelle M, Margret MI, Vuuren V & Baas P (1999) Effects of climate change on biodiversity: A review and identification of key research issues. *Biodiversity and Conservation* 8: 1383-1397.

- Kattan G (1992) Rarity and Vulnerability: The Birds of the Cordillera Central of Colombia. *Conservation Biology* 6: 64-70.
- Kingsford RT (1997) Wetlands of the world's arid zones. In: Briefing Paper at the First Conference of Parties of the UN Convention to Combat Desertification, Vol. 29, Rome.
- Largier JL, Springer JH & Taljaard S (1992) Stratified hydrodynamics of the Palmiet- A prototype bar-built estuary. *Dynamics and Exchanges in Estuaries and the Coastal Zone*, D. Prandle (ed), pp: 135-154. American Geophysical Union, Washington DC, USA.
- Lima M, Marquet PA & Jaksic FM (1999) El Niño events, precipitation patterns, and rodent outbreaks are statistically associated in semiarid Chile. *Ecography* 22: 213-218.
- Lima M, Stenseth NC & Jaksic FM (2002) Food web structure and climate effects on the dynamics of small mammals and owls in semi-arid Chile. *Ecological Letters* 5: 273-284.
- León A (2007) Household Vulnerability to Drought and Ecosystem Degradation in Northern Chile. PhD. Dissertation, University of Arizona. Tucson, USA.
- Lesser GR, Roelvink JV, van Kester JTM, & Stelling GS (2004) Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal engineering*, 51(8-9), 883-915.
- Liu Q, Trinder J & Turner IL (2017) Monitoreo automático de cambios en la línea costera de súper resolución utilizando datos de archivo Landsat: un estudio de caso en Narrabeen – Collaroy Beach, Australia. *J. Appl. Remote Sens.*, 11, pág. 016036. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016036>
- Lorensen N & Cline HE (1987) Marchando cubos: un algoritmo de construcción de superficies 3D de alta resolución. *Actas de la 14a Conferencia Anual sobre Gráficos por Computadora y Técnicas Interactivas - SIGGRAPH '87*, págs.163 – 169. <https://doi.org/10.1145/37401.37422>
- Lu C & Luo X (2018) The Numerical Simulation of Characteristics of Tidal Wave Propagation in Yangtze Estuary. In *Proceedings 2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018)* (pp. 1096-1101). Atlantis Press.
- Luna D (ed) (2005) *Los humedales No Pueden Esperar: Manual Para el Uso Racional del Sistema de Humedales Costeros de Coquimbo*. Corporación Ambientes Acuáticos de Chile. Santiago, Chile.
- Maceda-Veiga A, López R & Green AJ (2017) Dramatic impact of alien carp *Cyprinus carpio* on globally threatened diving ducks and other waterbirds in Mediterranean shallow lakes. *Biological Conservation* 212: 74–85.
- Magrin GO, Marengo JA, Boulanger J-P, Buckeridge MS, Castellanos E, Poveda G, Scarano FR & Vicuña S (2014) Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.
- Martínez C, Contreras-López M, Winckler P, Hidalgo H, Godoy E & Agredano R (2018) Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141 – 155, 2018. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011
- Martínez C, Winckler P, Agredano R, Acuña CE, Torres I & Contreras-López M (2022) Coastal erosion in sandy beaches along a tectonically active coast: The Chile study case. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(2), 250-271.
- Mayol E, Ruiz-Halpern S, Duarte CM, Castilla JC & Pelegrí JL (2012) Coupled CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>-driven compromises to marine life in summer along the Chilean sector of the Humboldt Current System, *Biogeosciences*, 9, pp. 1183- 1194, DOI: 10.5194/bg-9-1183-2012
- MeteoChile (2007) Índice UVB observado y pronosticado. Oficina Meteorológica de Chile. Dirección General de Aeronáutica Civil Ministerio de la Defensa Nacional. Santiago. En línea (fecha última visita noviembre 2021): [http://meteo Chile.cl/radiacion\\_obspron\\_muestra.html?LA%SERENA](http://meteo Chile.cl/radiacion_obspron_muestra.html?LA%SERENA)
- MMA (2019a) Volumen 6: Vulnerabilidad en humedales, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Ministerio del Medio Ambiente, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelfich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile

- MMA (2019b) Volumen 1: Amenazas en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Ministerio del Medio Ambiente, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.
- MMA (2019c) Volumen 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Ministerio del Medio Ambiente, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.
- MMA. (2017) Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2016. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, 504 pp.
- MMA (2020) Lista de especies nativas según estado de conservación. Sitio web clasificación de especies silvestres (<http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/>).
- MMA (s.f.) Especificaciones técnicas para productos cartográficos. Ministerio del Medio Ambiente.
- MN Ingenieros Limitada (1999) Construcción Embalse Piuquenes: diseño, IV Región. Proyecto Definitivo. Volúmenes 1-4. Dirección Regional de Obras Hidráulicas, IV Región. Ministerio de Obras Públicas. La Serena, Chile.
- Molina M, Contreras M, Winckler P, Salinas S & Reyes M (2011) Consideraciones sobre las Variaciones de Mediano y Largo Plazo del Oleaje en el Diseño de Obras Marítimas en Chile Central. Anales del Instituto de Ingenieros de Chile. Volumen 123, Número 3, pp. 77-88. (Incluido en Revista Chilena de Ingeniería N°464).
- Montecino HDC, Ferreira VG, Cuevas A, Castro-Cabrera L, Soto-Báez JC & De Freitas SRC (2017) Vertical deformation and sea level changes in the coast of Chile by satellite altimetry and tide gauges. International Journal of Remote Sensing, doi: 10.1080/01431161.2017.1288306.
- Moroni J (1972) Irrupción de *Elasmoderus rabiosus* (Liebermann) en el Norte Chico. Noticiero Mensual del Museo Nacional de Historia Natural (Chile) 192: 3-6.
- Newton I (1687) *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Reimpresión 1972.
- Nicholson SE (2011) *Dryland Climatology*. Cambridge University Press. New York, USA.
- Niemeyer H & Cereceda P (1984) *Geografía de Chile: Hidrografía*. Tomo VIII. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- Niemeyer FH (1980) *Hoyas Hidrográficas de Chile: Cuarta Region*. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Norero A & Bonilla C (eds.) (1999) *Las Sequías en Chile: Causas, Consecuencias y Mitigación*. Colección en Agricultura. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 128 pp.
- Novoa JE, Castillo R & Debonis J (1995) Tendencia de Cambio Climático mediante Análisis de Caudales Naturales: Cuenca del río La Laguna (Chile Semiárido). Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 279-288.
- Novoa JE, Castillo R & Viada JM (1996) Tendencia de Cambio Climático mediante Análisis de Caudales Naturales: Cuenca del río Claro (Chile Semiárido). Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, Universidad de La Serena, La Serena, 47-56.
- Novoa J & López D (2001) IV Región: El Escenario Geográfico Físico. Pp. 13-28, in Squeo, F.; Arancio G. y J. Gutiérrez (eds). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Núñez J, Vergara A, Leyton C, Metzkes C, Mancilla G & Bettancourt D (2017) Reconciling drought vulnerability assessment using a convergent approach: Application to water security in the Elqui River Basin, North-Central Chile. *Water* 9 (589): 1-25.
- Otsu N (1979) Un método de selección de umbral a partir de histogramas de nivel de gris. *IEEE Trans. Syst. Hombre Cybern.*, 20, págs.62 – 66. <https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310076>
- Palczyk-Alcayaga H, Pizarro-Pardo J, Bravo-Naranjo V, Trujillo-Acosta A & Zuleta-Ramos C (2019) Usos y degradación de los humedales costeros de Coquimbo. En: Zuleta-Ramos C & Contreras-López M (eds). *Humedales de la Región de*

- Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación. Pág. 256-281. Editorial Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Paskoff R (1993) Geomorfología de Chile Semiárido. Universidad de La Serena. Facultad de Humanidades, La Serena, Chile.
- Paskoff R (2010) Capítulo 9.1: Geomorfología de la costa de Chile. En. Geología marina de Chile. Díaz-Naveas, J., Frutos, J. (2010).
- Pastén V & López-Morgado N (2016) Lista y Fototeca de la Fauna de Vertebrados e Invertebrados del Humedal Costero del Río Elqui. Informe proyecto FPA "A través del trueque científico fortalezcamos los vínculos y promovemos el cuidado del medioambiente. Fundación Ecoterra, La Serena, Chile.
- Pastén V, López-Morgado N, Flores C & Salgado-Luarte C (2016) Línea Base de la Vegetación del Humedal de la Desembocadura del Río Elqui. Informe proyecto FPA "A través del trueque científico fortalezcamos los vínculos y promovemos el cuidado del medioambiente. Fundación Ecoterra, La Serena, Chile.
- Pauly D, Christensen (2005) Primary production required to sustain global fisheries. *Nature* 374:255-257.
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S (2002) Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Computers & Geosciences* (28) 929–937
- Pechmann JHK, Scott DE, Gibbons JW & Semlitsch RD (1989) Influence of wetland hydroperiod on
- Péfaur JE, Yañez JL & Jaksic FM (1979) Biological and environmental aspects of a mouse outbreak in semi-arid region of Chile. *Mammalia* 43 (3): 313-322.
- Peng D, Hill EM, Meltzner AJ & Switzer AD (2019) Tide gauge records show that the 18.61-year nodal tidal cycle can change high water levels by up to 30 cm. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(1): 736-749.
- Pérez A (2017) Evaluación de modelos para estimar evaporación en cuerpos de agua: Caso de estudio Laguna del Laja. Proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción. 51 pp.
- Pérez C, Fiebig-Wittmaack M, Cepeda J & Pizarro-Araya J (2009) Desastres Naturales y Plagas en el Valle del Río Elqui. En: Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima. Cepeda PJ (ed). Pág. 285-324. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- PHOTOSINTESIS (2021). Propuesta integral de protocolo de apertura mecanizada de la barra terminal para el humedal Cáhuil, proyecto GEF-Humedales, 144pp.
- Pizarro O & Montecinos A (2004) El Niño y la Oscilación Sur. En *Biología Marina y Oceanografía: Conceptos y Procesos*, Tomo I, Werlinger C. (editor). Universidad de Concepción, Chile, pp. 197 – 224.
- Pizarro-Araya J, Cepeda-Pizarro J, Barriga JE & Bodini A (2009) Biological vulnerability in the Elqui Valley (Coquimbo Region, Chile) to economically important arthropods. *Ciencia e Investigación Agraria* 36 (2):215-228.
- Potter IC, Chuwen BM, Hoeksema SD & Elliott M (2010) The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 87 (3), 497–500.
- Quintana JM & Aceituno P (2012) Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera* 25(1): 1-22.
- Rangel-Buitrago N, Contreras-López M, Martínez C & Williams A (2018) Can coastal scenery be managed? The Valparaíso region, Chile as a case study, *Ocean & Coastal Management*, Elsevier, Vol. 163: 383 – 400. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.07.016
- Reguero BG, Losada IJ, Díaz-Simal P, Méndez FJ & Beck MW (2015) Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean. *PLoS ONE* 10(7): e0133409.
- Rossi C, Oyarzún J, Pastén P, Runkel RL, Núñez J, Duhalde D, Maturana H, Rojas E, Arumí JL, Castillo D & Oyarzún R (2021) Assessment of a conservative mixing model for the evaluation of constituent behavior below river confluences, Elqui River Basin, Chile. *River Research and Applications* 37: 967-978.
- Sacha F, Ana María y otros (2005) Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. Informe Final, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- Salas S, Jiménez E & Bugueño L (2011) Esperando los Años Buenos: Experiencias Rurales en Contextos de Escasez Hídrica. Proyecto Conservación del Agua en Comunidades Rurales de la Región de Coquimbo. Universidad de La Serena – University of Regina. Editorial del Norte. La Serena, Chile. 202 pp
- Salas S, Jimenez E, Montana E, Garay-Flühmann R, Gauthier D & Polo-Diaz H (2012) Vulnerabilidad al cambio climático: Desafíos para la adaptación en las cuencas de Elqui y Mendoza. Editorial del Norte/IAI, La Serena, Chile.
- Sánchez A & Morales R (1998) Las regiones de Chile, Espacio físico y Humano-Económico. Editorial Universitaria, Santiago de Chile.
- Santibáñez F, Santibáñez P, Caroca C, González P, Gajardo N, Perry P, Simonetti J & Pliscoff P (2013) Plan de acción para la protección y conservación de la biodiversidad, en un contexto de adaptación al cambio climático. MMA-Fundación Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile; Santiago, 224 p.
- Santibáñez F, Santibáñez P, Caroca C, Morales P, González P, Gajardo N, Perry P & Melillán C (2014) Atlas del Cambio Climático en las Zonas de Régimen Árido y Semirárido: Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana (Chile). Centro de Agricultura y Medioambiente, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Imprenta Gráfica Marmor, Santiago, Chile.
- SHOA (1999) Pub. 3202. Método oficial para el cálculo de los valores no armónicos de la marea. Valparaíso.
- SHOA (2021) Tablas de Marea de la Costa de Chile. Publicación N°3009. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 239pp.
- Silva R, Lithgow D, Esteves LS, Martínez ML, Moreno-Casasola P, Martell R, Pereira P, Mendoza E, Campos-Casaredo A, Winckler, P & Osorio A (2017) Coastal risk mitigation by green infrastructure in Latin America. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering (Vol. 170, No. 2, pp. 39-54). Bournemouth University, Fern Barrow, Poole, Dorset, BH12 5BB, UK.
- Silva R, Lithgow L, Chávez V (2019) Evaluación de la efectividad de la infraestructura verde para la mitigación del riesgo costero en ALC. Elaborado por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería UNAM para el Banco Interamericano de Desarrollo.
- Slinger JH (2017) Hydro-morphological modelling of small, wave-dominated estuaries. Estuarine, Coastal and Shelf Science 198: 583-596.
- Sobarzo M, Bravo L, Donoso D, Garcés-Vargas J, Schneider W (2007) Coastal upwelling and seasonal cycles that influence the water column over the continental shelf off central Chile. Progress in Oceanography, The Structure and Functioning of the Coastal Upwelling in Central/Southern Chile 75, 363–382. doi:10.1016/j.pocean.2007.08.022
- SONOMA WATER (2020) Russian River Estuary Adaptive Beach Management Plan 2020.
- Speybroeck J, Bonte D, Courtens W, Gheschiere T, Grootaert P, Maelfait JP, ... & Degraer S (2006) Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. Aquatic conservation: Marine and Freshwater ecosystems, 16(4): 419-435.
- Squeo FA, Tracol Y, López D, León M & Gutiérrez JR (2009) Vegetación nativa y variación temporal de su productividad en la Provincia de Elqui. En: Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima. Cepeda PJ (ed): 159-183. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Stuardo J, Valdovinos C, Figueroa R & Ochipinti A (1993) Los ambientes costeros del Golfo de Arauco y área adyacente. Serie Monografías Científicas, Centro EULA (Chile) 9: 157.
- SUBDERE (2019) Líneas Interiores de la División Política Administrativa. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.
- Talke SA & Jay DA (2020) Changing tides: The role of natural and anthropogenic factors. Annual review of marine science, 12: 121-151.
- Tassara D & García M (2005) Erosión marina, vulnerabilidad e impactos antrópicos en el sudeste bonaerense (Municipio de Mar Chiquita, Provincia de Buenos Aires, Argentina). Tiempo y Espacio, (15).
- Távora-Espinoza L & Sanz E (2010) Hidrogeología e hidrodinámica del acuífero de los manantiales de Gormaz y su importancia en el caudal base del río Duero, España. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. 1(3): 5-15.



- Temmerman S, Govers G, Wartel S & Meire P (2004) Modelling estuarine variations in tidal marsh sedimentation: response to changing sea level and suspended sediment concentrations. *Marine Geology*, 212(1-4), 1-19.
- Thompson RO (1983) Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *Journal of Physical Oceanography*, 13(6): 1077-1083.
- Torrence C, Compo GP (1998) A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(1): 61-78.
- Tu TM, Shu C, Su H, Shyu PS Huang (2001) Una nueva mirada a los métodos de fusión de imágenes similares a IHS. *Inf. Fusión*, 2, págs. 177 – 186. [https://doi.org/10.1016/S1566-2535\(01\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S1566-2535(01)00036-7)
- ULS-PROMMRA (2017) Generación e Implementación de un Programa de Seguimiento y Monitoreo de Suelo agrícolas para el Ordenamiento del Territorio. Informe Final Proyecto FIC-R 2015 Gobierno Regional de Coquimbo. Universidad de La Serena, Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación de Recursos Agrícolas y Ambientales (PROMMRA). La Serena, Chile.
- Vargas-Baecheler J (2017) Escenarios Hídricos 2030. Revisión Experta Oferta Hídrica Referencial en Chile. Universidad de Concepción, Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Concepción, Chile.
- Vargas G, Pantoja S, Rutllant JA, Lange CB & Ortlieb L (2007) Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru-Chile Current since late 19th century. *Geophysical Research Letters*, 34(13).
- Vilizzi L, Thwaites LA, Smith BB, Nicol JM & Madden CP (2014) Ecological effects of common carp (*Cyprinus carpio*) in a semi-arid floodplain wetland. *Marine and Freshwater Research* 65: 802–817.
- Vos K, Splinter KD, Harley MD, Simmons JA, Turner IL (2019) CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery, *Environmental Modelling & Software*, Volume 122, 2019, 104528, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>.
- Wenzel M & Schroter J (2014) Global and regional sea level change during the 20th century, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119(11), 7493–7508, doi:10.1002/2014JC009900
- Wildi O (2013). *Data Analysis in Vegetation Ecology*, Second Edition. Wiley-Blackwell Publishers. New York, USA and London, UK.
- Winckler P, Aguirre C, Fariás L, Contreras-López M, Masotti Í (2020) Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological and oceanographic variables along the Chilean coastal zone, *Climatic Change*, 163: 633–652. DOI: 10.1007/s10584-020-02805-3.
- Winckler P, Contreras-López M, Vicuña S, Larraguibel C, Mora J, Esparza C, Salcedo J, Gelcich S, Fariña JM, Martínez C, Agredano R, Melo O, Bambach N, Morales D, Marinkovic C & Pica A (2019) Volumen 6: Vulnerabilidad y riesgo en humedales costeros, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”. Informe final Preparado para el Ministerio del Medio Ambiente.
- Winckler P, Contreras-López M, Campos-Caba R, Beyá JF & Molina M (2017) El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research (LAJAR)*, 45(4): 622-648.
- Wyss M (1976) Local changes of sea level before large earthquakes in south America. *Bulletin of the seismological society of America*, 66(3): 903 – 914.
- Xu H (2006) Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. doi:10.1080/01431160600589179.
- Ye L, Lay T, Kanamori H & Koper KD (2016) Rapidly Estimated Seismic Source Parameters for the 16 September 2015 Illapel, Chile M w 8.3 Earthquake, *Pure and Applied Geophysics*, 1-12. DOI 10.1007/s00024-015-1202-y
- Zavala-Hidalgo J, de Buen Kalman R, Romero-Centeno R & Hernández Maguey F (2011) Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. p. 315 – 334. En: A.V. Borello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez y J.L. Rojas-Galaviz (eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición)*. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, 754 p.9
- Zavala HZ & Trigos HA (2009) Hidrología de la cuenca del Río Elqui. En: *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima*. Cepeda PJ (ed): 59-156. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.

- Zuleta C & Bravo V (2018) Informe Sociocultural de los Humedales Costeros de la Región de Coquimbo. Informe Técnico, Universidad de La Serena & Centro de Estudios Ambientales del Norte de Chile, La Serena, Chile.
- Zuleta C. & Piñones C (eds) (2015) Secano Costero de Huentelauquén: Paisajes & Presencia Humana. Ediciones Universidad de La Serena – Ministerio del Medio Ambiente, La Serena, Chile, 175 pp.
- Zuleta-Ramos C & Bravo-Naranjo V (eds) (2020) Atlas Humedales Costeros de Coquimbo: Biodiversidad & Territorio. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Zuleta-Ramos C, Contreras-López M, Bravo-Naranjo V, Cea A, Larragibel C, Pastén V & Salcedo-Castro J (2020) Capítulo 4: Estuario Río Elqui. En: Zuleta-Ramos C & Bravo-Naranjo V (eds) (2020). Atlas Humedales Costeros de Coquimbo: Biodiversidad & Territorio. Pág. 52-63. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Zuleta C, Pizarro-Araya J, Hiriart D, Cepeda J & Barriga JE (2009) Artrópodos y vertebrados terrestres del valle de Elqui: riqueza, distribución y cambio climático. En: Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima. Cepeda PJ (ed): 187-212. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
- Zuleta-Ramos C, Hiriart D & Bravo-Naranjo V (2019) Vertebrados terrestres y acuáticos de los humedales de Coquimbo. En: Zuleta-Ramos C & Contreras-López M (eds). Humedales de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación. Pág. 62-78. Editorial Universidad de La Serena, La Serena, Chile.

## 9 ANEXOS

### 9.1 CURRICULUM EQUIPO DE TRABAJO

**Jefe de Proyecto:**

**Manuel Contreras-López**

Profesor externo de la Universidad de Valparaíso y de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Se especializa en efectos del cambio climático, restauración ecológica y medidas de adaptación frente al cambio climático antropogénico. Cuenta con amplia experiencia sobre monitoreo y estudios de parámetros abióticos de humedales y áreas protegidas tanto en Chile, México y Ecuador. En el marco de GEF-Humedales, lideró este estudio y la delimitación del humedal de Mantagua.

**Especialista en hidroecología de humedales costeros:**

**Carlos Zuleta Ramos**

Académico de la Universidad de La Serena, especialista en biodiversidad y conservación. Ha elaborado propuestas de conservación y de valoración socioecológica de diferentes ecosistemas, tales como Bahía de Tongoy (Sitio Ramsar N°2361), Las Salinas de Huentelauquén (Sitio Ramsar N°2237) y Declaratoria de Santuario de la Naturaleza Desierto Costero de Los Choros. Ha liderado varios proyectos de investigación en el área ambiental y publicado varios artículos, libros y capítulos en temáticas ambientales. También ha trabajado en toda la cuenca del Río Elqui desarrollando varios capítulos de libro, entre los que se cuentan: Estuario del Río Elqui (Zuleta-Ramos *et al.* 2020), Artrópodos y vertebrados terrestres del valle de Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Riqueza, distribución y cambio climático (Zuleta *et al.* 2009), Síntesis: Los sistemas naturales de la cuenca del Río Elqui en el contexto del cambio climático (Cepeda Pizarro *et al.* 2009) y Relaciones de abundancia y diversidad de la entomofauna del humedal Tambo-Puquíos (Cepeda Pizarro *et al.* 2006).

**Experto senior en Ingeniería de costas (sedimentos):**

**Patricio Winckler Grez**

Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso. A la fecha ha estado involucrado en más de 80 proyectos de ingeniería marítima entre los que se incluyen estudios de caracterización del medio, evaluaciones de riesgo de tsunamis, diseño de instalaciones experimentales para la modelación de tsunamis, diseños de ingeniería portuaria, proyectos de ingeniería costera, diseño de bocatomas, emisarios y descargas submarinas, evaluación del potencial energético de oleaje y mareas, proyectos hidráulicos y estudios de transporte de sedimentos. Es investigador asociado del Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) de la UC, y del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR) de la Universidad de Valparaíso. Fue investigador principal del proyecto CCCostas y experto en zonas costeras en el proyecto “Los costos de la inacción. Impactos del cambio climático hacia mediados y fines de siglo en puertos y playas” elaborado para CEPAL. Es coautor del libro Costas de Chile (Morales *et al.*, 2020).

**Especialista en modelos hidrodinámicos:**

**Roberto Agredano Martín**

Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Católica del Maule. Ha participado en varios proyectos de ingeniería marítima tales como el estudio de implantación de un arrecife artificial para la Comunidad Valenciana (España) y varios estudios de caracterización del oleaje. Ha sido colaborador científico en 2 Proyectos FONDECYT,

formó parte del equipo consultor del proyecto CCCostas y del proyecto “Los costos de la inacción. Impactos del cambio climático hacia mediados y fines de siglo en puertos y playas” elaborado para CEPAL. Sus áreas de investigación se centran en temas de erosión costera frente a oleajes extremos y modelación hidro-morfodinámica de costas arenosas.

**Especialista en Cartografía y SIG:**

**Francisco Cabrera Cona**

Geógrafo de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Cuenta con tres años de experiencia como asistente de investigación académica y como personal técnico de proyectos relacionados a la planificación y gestión territorial. Ha participado en 2 actualizaciones de Instrumentos de Planificación Territorial (Planes de Desarrollo Comunal) siendo el responsable de la Planimetría y el Sistema de Información Geográfica (SIG) respectivo. En estas instancias, además validó sus habilidades geomáticas y de capacidad de diálogo, al tener que generar consensos entre contraparte técnica municipal y la comunidad local.

**Especialista Adicional en Conservación y Biodiversidad**

**Christian Jofré Pérez**

Con 22 años de experiencia profesional, se ha desempeñado como docente dictando cursos de especialidad en el área ecológica, entomológica, zoológica y conservación de la biodiversidad. Ha participado como investigador especialista en fauna de vertebrados e insectos en la Formulación de Planes de Restauración Ecológica como Mecanismo de Adaptación al Cambio Climático en la Reserva Nacional El Yali. Participa actualmente como especialista en la identificación taxonómica de insectos en un proyecto FONDECYT y con el mismo cargo en un proyecto Newton Fund Latin America Biodiversity Programme, integrado por Inglaterra, Brasil, Argentina y Chile. Desde hace 12 años se desempeña como Consultor Ambiental, participando en más de 45 estudios de Líneas de Base Ambiental del SEIA.

**Especialista Adicional en Monitoreo de Humedales:**

**Nathalie Duarte Gutiérrez**

Tiene 7 años de experiencia en gestión de operaciones y proyectos relacionados con el área ambiental y de ingeniería. Ha sido responsable de la evaluación, ejecución, control y cierre de proyectos, aplicando la normativa ambiental y sustentabilidad. También ha sido responsable de la elaboración de planes y programas en virtud del medio ambiente (residuos, agua, energía, conservación). En la actualidad se desempeña como investigadora y consultora en el estudio de humedales costeros, junto con estudios de vulnerabilidad de la zona costera frente al Cambio Climático.

**Asistente Modelos Hidrodinámicos:**

**Alfredo Navarro Aravena**

Ingeniero Civil de la Universidad Católica del Maule con mención en sistemas hídricos y medio ambiente. Realizó su práctica profesional en la consultora FGMI enfocándose en temas de modelación hidrodinámica costera. Su experiencia laboral se inicia en Dinámica Costera, sirviendo como asistente de proyecto en estudios de Cambio Climático y Humedales Costeros, colaborando en el modelado de las condiciones hidrodinámicas, y la preparación y análisis de series de tiempo para las zonas de estudio.

## 9.2 ACTAS REUNIONES

### 9.2.1 Reunión Inicial: Lunes 2 agosto 2021

#### Acta Reunión Inicial

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

#### Fecha/Lugar

02 de agosto 2021, 10h00 -11h20, vía ZOOM.

#### Participantes:

Nombre	Institución
Carolina Vega Schweizer	Coordinadora Local GEF Humedales Coquimbo
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Dr. Patricio Winckler Grez	Miembro equipo consultor, Académico UV
Dr(c) Roberto Agredano Martín	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
MSc. Carlos Zuleta Ramos	Miembro equipo consultor, Académico ULS
Francisco Cabrera Cona	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

#### Objetivo:

Presentar el detalle de la metodología y plan de trabajo y realizar ajustes de ser necesario.

#### Tabla de la Reunión:

1. Presentación de la contraparte técnica de la ejecución de la presente licitación y del equipo profesional consultor.
2. Acordar Calendario propuesto
3. Presentación del de la metodología de trabajo en detalle
4. Revisión y ajustes eventuales del plan de trabajo.
5. Varios.

**Reseña de lo tratado:**

- 1.- Se presentan brevemente tanto la contraparte técnica, como los miembros del equipo consultor.
- 2.- Se revisa la siguiente propuesta de calendario para la realización de la consultoría:

Fecha	Hito
27-07-2021	Firma Contrato (OK)
02-08-2021 10h00	Reunión Inicial (Agendada)
10-08-2021	Entrega Informe 1
Miércoles 25-08-2021	Taller Inicial en modalidad virtual.
Lunes 06-09-2021	Reunión Coordinación.
02 al 04-09-2021	Terreno Intensivo
Lunes 04-10-2021	Reunión Coordinación
Lunes 08-11-2021	Reunión Coordinación
Miércoles 17-11-2021	Taller Avances. En modalidad virtual, dirigida al comité técnico local.
Lunes 26-11-2021	Entrega Informe 2
Lunes 06-12-2021	Reunión Coordinación
Lunes 10-01-2022	Reunión Coordinación
Lunes 07-02-2022	Reunión Coordinación
Lunes 07-03-2022	Reunión Coordinación
Miércoles 09-03-2022	Taller Validación en modalidad virtual.
Miércoles 23-03-2022	Taller Divulgación Resultados (modalidad por definir)
21-03-2022	Entrega Informe 3.
23-03-2022	Cierre consultoría.

3.- Se expone el detalle de la metodología propuesta y se responden las consultas de la contraparte. Se adjunta a esta acta la presentación Power Point con la metodología propuesta.

4.- Se puntualizan los productos adicionales ofertados:

- Realización de un cuarto taller en formato virtual.

- Incorporación de un análisis del nivel del mar a largo plazo, para establecer las potenciales presiones del cambio climático sobre el comportamiento de la hidrodinámica y morfodinámica del humedal desembocadura del río Elqui y su barra terminal.
- Análisis del oleaje incidente. Este equipo consultor estima que al incluir el oleaje en el análisis, se mejorarán los resultados que incorporen sólo las mareas y caudales.
- Para mejorar el análisis del comportamiento de la barra terminal, se agrega la confección de un modelo de elevación digital y un análisis de la topografía del humedal en este sector.

5.- La contraparte presenta el contexto de la consultoría, los resultados principales de las consultorías anteriores y explica en detalle la conformación y dinámica de trabajo del comité técnico local. Puntualizando que las reuniones se llevan a cabo mensualmente el segundo miércoles de cada mes, entre las 9h00 y 11h00.

6.- En el punto varios, Dinámica Costera solicita a la contraparte:

- Imagen satelital de alta resolución del humedal
- Informes de las consultorías locales (n°1/2020 y n°2/2020 Coquimbo)
- Gestiones para acceder al informe del estudio DOP (2021) “Diagnostico mejoramiento Playa La Serena, Comuna de La Serena”, realizado por Aguas Consultores SpA.
- Estudio de vulnerabilidad y definición de un plan de manejo de cauces para la cuenca del río Elqui, región de Coquimbo (Arrau Ingeniería spa 2018)

7.- También se solicita una carta presentación de la consultoría para Dinámica Costera, que individualice a los miembros del equipo consultor (nombre y rut) y exponga el nombre y objetivos del estudio.

8.- Se puntualiza el mecanismo de comunicación Contraparte - Dinámica Costera:

- Jefe Proyecto: Manuel Contreras López (manuel.contreras.lopez@gmail.com), celular: +56979468553
- Contacto Local: Carlos Zuleta Ramos (czuleta@userena.cl), celular +56988381038
- Emergencias: Francisco Cabrera Cona (fjcabrera@uc.cl), celular +56966067889

9.- Se establece que la contraparte coordinará una reunión con el equipo consultor que desarrolla el estudio paralelo a esta consultoría.

10.- Se confirma la fecha del miércoles 25 de agosto para la realización del primer taller virtual, el que será anunciado al comité técnico local durante su próxima reunión, a realizarse el miércoles 11 de agosto. Dinámica Costera elaborará una propuesta de programa.

11.- La contraparte expone la realización del seminario “Experiencias de manejo de humedales costeros: manejo de barras de arena”, que organiza el Centro Neotropical de Entrenamiento en Humedales y se concuerda que el Dr. Patricio Winckler Grez, realizará una exposición corta sobre los resultados de la consultoría “Diagnóstico y mejoramiento playa La Serena”

## Acuerdos/compromisos:

1.- Dinámica Costera, hará llegar a la contraparte:

- Presentación PowerPoint de la reunión.
- Detalles de contactos para mantener una comunicación fluida.
- Propuesta carta de presentación de la consultoría.
- Borrador acta de la reunión.
- Propuesta Programa Primer Taller de la consultoría.

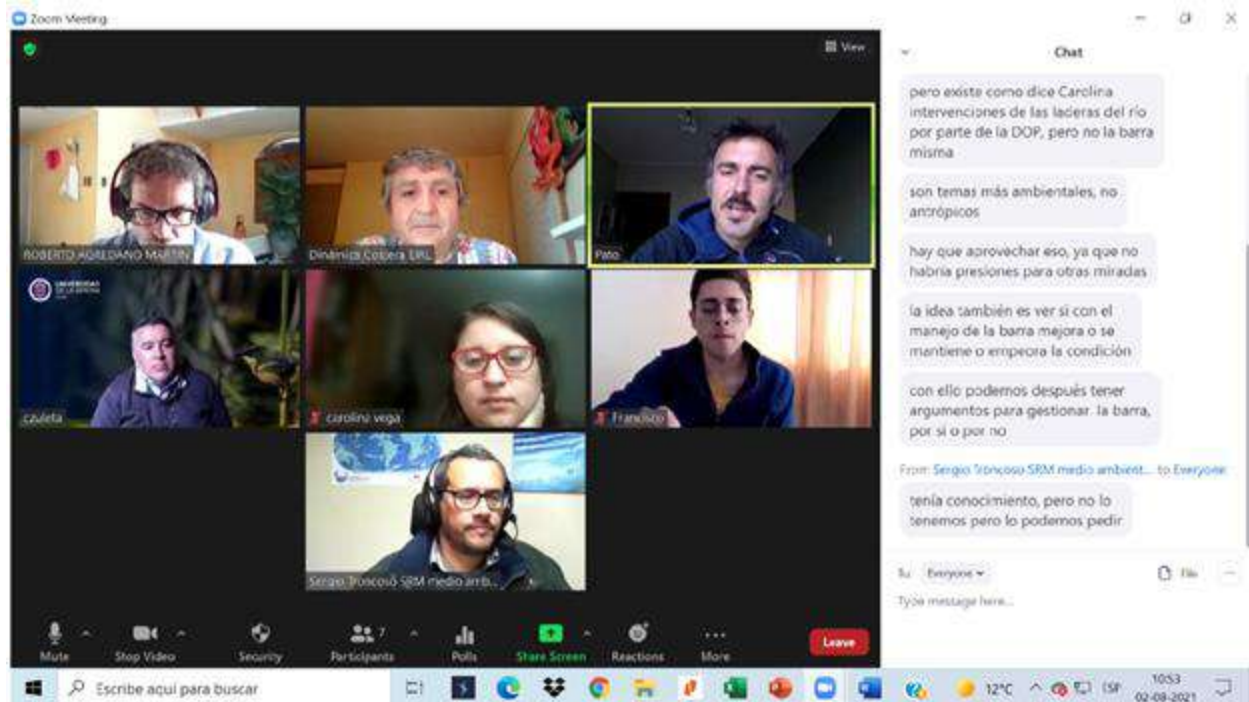
2.- Contraparte técnica, hará llegar a Dinámica Costera:

- Presentación PowerPoint de la reunión.
- Antecedentes solicitados para el desarrollo de la consultoría.

3.- Parte del equipo consultor participará en la próxima reunión del comité técnico local a realizarse el próximo miércoles 18 de agosto a las 10 A.M.

4.- El Dr. Patricio Winckler, perteneciente al equipo consultor, impartirá una charla en el seminario “Experiencias de manejo de humedales costeros: manejo de barras de arena”, el día viernes 20 de agosto.

## Anexo: Respaldo de la reunión





## 9.2.2 Reunión N°2: Lunes 13 septiembre 2021

### Acta Reunión 02

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

#### Fecha/Lugar

13 de septiembre 2021, 10h00 -11h00, vía ZOOM.

#### Participantes:

Nombre	Institución
Carolina Vega Schweizer	Coordinadora Local GEF Humedales Coquimbo
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Francisco Cabrera Cona	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

#### Objetivo:

Revisar avances del plan de trabajo de la consultoría.

#### Tabla de la Reunión:

1. Informar actividades primer terreno.
2. Observaciones informe avance 1
3. Varios.

#### Reseña de lo tratado:

- 1.- Contraparte indica que informe de avance 1 se encuentra aprobado, y se enviará a la brevedad carta oficializando la aprobación. Se observa que enlace wetransfer conteniendo la versión Word del informe corregido, se encuentra Caducado. Dinámica costera se compromete a enviar uno nuevo.
- 2.- Contraparte puntualiza la necesidad de realizar terrenos frecuentes debido a los cambios que se constatan en el lugar. Dinámica Costera detalla el protocolo de los 10 terrenos adicionales comprometidos.
- 3.- Se exponen resultados preliminares del terreno intensivo realizado entre el 2 y 5 de septiembre:

- Recorrido de la cuenca hasta el embalse Puclaro.
- Constatación de múltiples intervenciones a lo largo de cuenca: vertido de áridos, extracción de áridos, ocupación del álveo, cambios de curso del río, agricultura, edificaciones en la ribera, segmentación.
- Reflexión sobre el efecto de retención de sedimentos por parte del Puclaro y sus consecuencias en la erosión de playa en la desembocadura del Elqui.
- Constatación de la existencia de un canal de conexión artificial entre la desembocadura y el mar. En el momento del terreno el canal no transportaba agua.
- Topografía realizada en la barra. Comparación de resultados con la consultoría de delimitación Anterior.
- Constatación de excesivo tránsito de playa.
- Constatación de efectos de erosión costera
- Se comentan los efectos de rigidización de la playa

4.- En varios Contraparte comenta la importancia que dinámica costera participe en la reunión donde el MOP mostrará los proyectos en el entorno de la desembocadura.

**Acuerdos/compromisos:**

1.- Dinámica Costera, hará llegar a la contraparte: Enlace contraparte versión Word del informe 1 corregido aprobado.

2.- Parte del equipo consultor (Dr. Patricio Winckler, Dr. Roberto Agredano, MSc Carlos Zuleta, MSc Manuel Contreras-López y geógrafo Francisco Cabrera) participarán en la reunión con el MOP para comentar sobre los proyectos pensados en el entorno del humedal. La reunión con el MOP se realizará a continuación de esta reunión de coordinación.

Anexo: Respaldo de la reunión



### 9.2.3 Reunión N°3: Lunes 4 octubre 2021

## Acta Reunión 03

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

#### Fecha/Lugar

04 de octubre 2021, 10h00 -11h20, vía ZOOM.

#### Participantes:

Nombre	Institución
Carolina Vega Schweizer	Coordinadora Local GEF Humedales Coquimbo
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Elier Tabilo Valdivieso	GESNAT
César Chávez Villavicencio	GESNAT
Daniela Castillo Rodríguez	GESNAT
Carlos Zuleta Ramos	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Roberto Agredano Martín	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Francisco Cabrera Cona	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

#### Objetivo:

Trasmitir resultados preliminares de Dinámica Costera sobre la desembocadura del río Elqui a los consultores de GESNAT, responsables de la consultoría que se desarrolla en paralelo “Diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del humedal costero del río Elqui”.

#### Tabla de la Reunión:

1. Informar resultados primer terreno.
2. Informar avances implementación modelo numérico
3. Varios.

### **Reseña de lo tratado:**

1.- El geógrafo Francisco Cabrera expone por parte de Dinámica Costera los principales resultados de la campaña de terreno realizada a comienzos de septiembre:

- Levantamiento topográfico y descripción de la barra que separa el humedal del mar en la playa.
- Modelo batimétrico levantado al interior del humedal.
- Distribución espacial de pH, oxígeno disuelto, salinidad estimada al interior del humedal interpolando transectos del registro de estos parámetros. Se identifican anomalías atribuibles a descargar y/o aportes de acuíferos.

2.- El Dr. Roberto Agredano, profesional a cargo de la implementación del modelo numérico, expone los avances al respecto:

- Principales hipótesis y casos de modelación que serán abordados
- Mallado preliminar ajustado a los resultados obtenidos en la campaña de terreno.

3.- Dinámica Costera responde consultas tanto de la contraparte como de profesionales de GESNAT:

- Se aclaran detalles del modelo, potencialidades, alcances y capacidades contempladas.
- Se describen posibles lugares donde GESNAT podría encontrar aportes del acuífero para el diseño de sus muestreos.
- Se aclaran consultas sobre el modelo batimétrico y dónde se encuentran las mayores profundidades detectadas.
- Se reflexionan sobre diferentes presiones que está sufriendo el humedal.

4.- Contraparte informa que en el marco de una comunicación escrita por parte del MOP expresando que momentáneamente detendrán el proyecto de intervención de la playa en el entorno del humedal, iniciará la redacción de una minuta y solicita a ambas consultoras, proporcionar antecedentes técnicos para fundamentar las acciones que se pueden y no se pueden realizar en la desembocadura.

- Se discute la oportunidad de solicitar que el MOP realice obras para impedir el tránsito de playa, en el marco de la delimitación de zonas de anidación de pilpilén.
- Se menciona la necesidad de propiciar accionar de restauración para revertir los efectos de la rigidización de la playa por las obras ya realizadas en el entorno.
- Se puntualiza la necesidad de contar con antecedentes técnicos ordenados y fundamentados, para no dar la sensación de entregar respuestas que solo reaccionen a situaciones puntuales, sino más bien que obedezcan a un plan de conservación del humedal.

### **Acuerdos/compromisos:**

1.- Dinámica Costera se compromete hacer llegar a GESNAT los resultados de la campaña 1 (presentación realizada) para facilitar las actividades que deben realizar en la desembocadura.

2.- Dinámica Costera se compromete contribuir con antecedentes técnicos a la minuta que elaborará la contraparte.

Anexo: Respaldo de la reunión



#### 9.2.4 Reunión N°4: Lunes 8 noviembre 2021

### Acta Reunión 04

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

#### Fecha/Lugar

08 de noviembre 2021, 10h00 -11h00, vía ZOOM.

#### Participantes:

Nombre	Institución
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Claudia Accini Muñoz	Profesional SEREMI Coquimbo
Carlos Zuleta Ramos	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Roberto Agredano Martín	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Patricio Winckler Grez	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

#### Objetivo:

Coordinar la realización del segundo taller y revisar avances del plan de trabajo de la consultoría previo a la entrega del segundo informe de avance.

#### Tabla de la Reunión:

1. Coordinar realización segundo taller técnico.
2. Revisar aspectos sobre la entrega del segundo informe de avance.
3. Varios.

#### Reseña de lo tratado:

1.- Dinámica Costera presenta los principales puntos sobre el segundo taller técnico:

- Objetivo: presentar y validar resultados de la revisión bibliográfica.

- Fecha: miércoles 17 noviembre
- Horario: 11h00 a 13h00
- Programa similar al taller anterior:
  - 11h00 - 11h10 Palabras de bienvenida
  - 11h10 - 11h30 Presentación Avances
  - 11h40 - 11h50 Consultas / Aclaraciones
  - 11h50 - 12h20 Actividad participativa
  - 12h20 - 12h40 Plenario
  - 12h40 - 12h45 Palabras de cierre
- Se enviará a Carolina Vega el enlace para el taller.

2.- Contenidos del informe de avance dos: incluyen todas las actividades asociadas para el cumplimiento del objetivo específico uno (principalmente revisión bibliográfica) y avances de las actividades asociadas al objetivo dos (implementación modelo numérico). Carlos Zuleta muestra la planilla Excel que sistematiza la revisión bibliográfica desarrollada sobre la cuenca del Elqui.

3.- Carlos Zuleta, relata la situación con respecto a los informes del laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación de Recursos Agrícolas y Ambientales (PROMMRA), de la Universidad de La Serena. En el ajuste metodológico (observaciones del informe de avance uno), contraparte indicó que los informes generados por este laboratorio para la cuenca del Elqui. Dinámica Costera identificó que PROMMRA desarrolló al menos lo siguientes proyectos cuyos informes sería conveniente revisar:

- "Buenas Prácticas para la gestión hídrica organizacional (BPGH)": Catastro geoespacializado y actualización de datos de las comunidades de agua que componen la Junta de Vigilancia del Río Elqui
- "Diseño de un sistema de gestión hídrica para la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes, para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático"
- "Análisis Modelación de Embalses de Pre Cordillera (E-cabeceras)"
- "Generación e implementación de una plataforma de modelo predictivo de caudales para las principales cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa (PROQ)".
- "Generación e implementación de un programa de seguimiento y monitoreo de suelos agrícolas para el ordenamiento del territorio (PROMUS)".
- "Diseño y puesta en marcha de un sistema de monitoreo de caudales y de un protocolo de determinación de pérdidas de agua, para la priorización de las inversiones público-privadas (SIMCA – ELQUI)"
- Visualizadores uso de suelo Cuenca del Elqui



Desafortunadamente los informes localizados solo corresponden a la gestión administrativa de dichos proyectos y no a los resultados. Carlos Zuleta logra contactar a PROMMRA y realiza la solicitud, pero sin respuesta. Se acuerda reenviar a Sergio Troncoso todos los antecedentes para que la SEREMla pueda insistir. Dinámica Costera puntualiza que, si estos antecedentes no llegan, obviamente no podrán ser integrados en el informe de avance dos.

4- Contraparte recuerda a Dinámica Costera que debe incluir en el segundo informe de avance una síntesis de la revisión bibliográfica.

5.- Roberto Agredano, procede a exponer los avances de la implementación del modelo hidrodinámico y morfodinámico para la barra de arena.

- Se muestra la topobatemetría de la desembocadura y su entorno relevante para el modelo.
- Se discute el efecto de la vegetación hidrófila presente sobre la hidrodinámica del humedal. Se observa como resultado que la vegetación hidrófila palustre genera zonas de sombra de viento que modifican la hidrodinámica de la desembocadura del estuario. En el caso que esta vegetación sea desbrozada o no se encuentre presente, la hidrodinámica del humedal sería diferente a la actual. Se observa un vacío de información con respecto a esta vegetación (no hay antecedentes sobre su densidad).
- Se muestra la distribución de vegetación palustre presente en el momento del terreno, la cual eventualmente modifica la composición de zonas de vegetación en el estudio de la delimitación, pero que no afecta sus conclusiones ni la delimitación propuesta.

6.- Dinámica costera detalla los resultados preliminares de los 10 terrenos adicionales comprometidos (ejecutados 2 a la fecha). En el primero se constató la apertura de la desembocadura del humedal al mar en forma artificial por un desconocido. Nunca se pudo determinar quién lo abrió. Sin embargo, al comparar la ribera levantada en el terreno de septiembre con la ribera encontrada durante este terreno, se determina el descenso de nivel de las aguas del humedal; por lo tanto, se puede estimar el volumen que se vertió al mar como resultado de esta apertura. Dinámica Costera se compromete a entregar esta estimación como un adicional en el segundo informe de avance.

7.- Contraparte expresa que sería importante que Dinámica Costera realice un análisis de comparación entre el polígono asociado al modelo de la hidrodinámica del humedal, el polígono de delimitación propuesto y la delimitación del expediente de humedal urbano. Dinámica Costera se compromete a incluir un análisis de esto en el segundo informe.

8.- Se discute sobre los criterios utilizados para la delimitación de humedales urbanos (presencia de vegetación, suelos saturados e hidrología). En el caso de los humedales costeros, la delimitación no funciona debido a la falta de incorporación de la marea como criterio.

9.- Se realiza una discusión sobre las figuras de protección que debería tener el humedal del río Elqui. Dinámica Costera expresa que sería importante agregar en algún momento una figura de Áreas Marinas Costeras Protegidas de Múltiples Usos (AMCP-MU), de forma de proteger la playa y el intermareal. Por otro lado, muchas de las aves presentes se alimentan de recursos en la costa inmediata.

10.- Dinámica Costera comenta que se adjudicó un proyecto FIPA para estudiar los efectos del cambio climático en áreas marino costeras protegidas. En el marco de este proyecto se estudiará Punta Choros e Isla Damas. Se realizará un taller donde la contraparte debería ser invitada a participar.

11.- Contraparte recuerda la invitación para participar en la reunión del miércoles 10 de noviembre con la DGA, convocada por GEF Humedales, para tratar aspectos sobre el tramo final del río Elqui (desde la ruta 5 norte a la desembocadura).

**Acuerdos/compromisos:**

1.- Dinámica Costera se compromete hacer llegar a la contraparte los antecedentes de solicitud de informes a PROMMRA; de modo que la contraparte pueda insistir en la solicitud.

2.- Dinámica Costera se compromete a incluir en el segundo informe de avance:

- Análisis de síntesis de la revisión bibliográfica
- Análisis de comparación de los polígonos de delimitación del humedal
- Estimación de la cantidad de agua vertida al mar producto de la apertura artificial de la barra.

**Anexo: Respaldo de la reunión**



**9.2.5 Reunión N°5: Lunes 6 diciembre 2021**

**Acta Reunión 05**

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

**Fecha/Lugar**

06 de diciembre 2021, 10h00 -10h55, vía ZOOM.

**Participantes:**

Nombre	Institución
Carolina Vega	Coordinadora Técnica Local GEF-Humedales
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Roberto Villablanca	Profesional SEREMI Coquimbo
Francisco Cabrera Cona	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Carlos Zuleta Ramos	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Roberto Agredano Martín	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Patricio Winckler Grez	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

**Objetivo:**

Presentar los resultados alcanzados en el segundo informe de avance.

**Tabla de la Reunión:**

1. Presentación avance.

2. Varios.

**Reseña de lo tratado:**

1.- Dinámica Costera presenta los principales resultados:

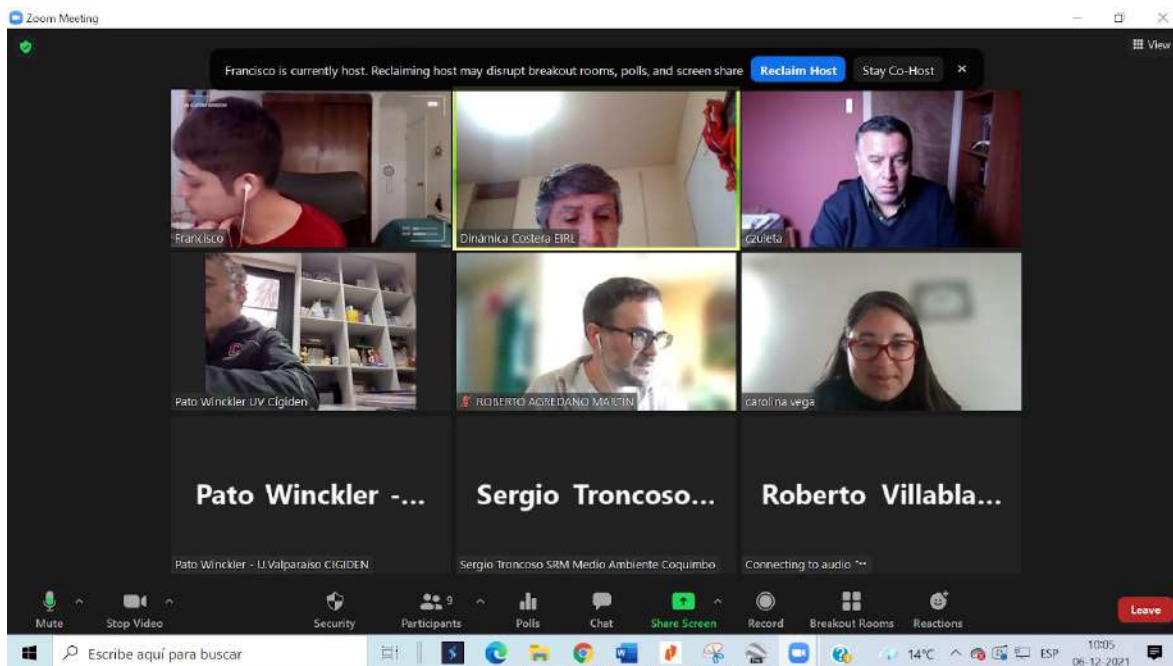
- Revisión bibliográfica.
- Realización de terrenos
- Análisis de series de tiempo
- Análisis imágenes satelitales y apertura de la barra
- Primeros resultados de la modelación numérica
- Importancia de la vegetación ribereña en la hidrodinámica de la desembocadura.

2.- Se discuten resultados y se responden preguntas de la contraparte.

### Acuerdos/compromisos:

- 1.- Contraparte invitará en la próxima reunión al equipo profesional que desarrolla la consultoría en paralelo para discutir con ellos los resultados alcanzados.
- 2.- Dinámica Costera debe incorporar una discusión de la posible comunicación acuífera de la desembocadura del río Elqui con el humedal Saladita (Punta Teatinos, subcuenca costera de El Romeral).

### Anexo: Respaldo de la reunión



### 9.2.6 Reunión N°6: Lunes 10 enero 2022

## Acta Reunión 06

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

### Fecha/Lugar

10 de enero 2022, 10h00 -10h46, vía ZOOM.

**Participantes:**

Nombre	Institución
Carolina Vega	Coordinadora Técnica Local GEF-Humedales
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Francisco Cabrera Cona	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Carlos Zuleta Ramos	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Roberto Agredano Martín	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Alfredo Navarro	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

**Objetivo:**

Presentar los resultados alcanzados en el segundo informe de avance y coordinar realización seminario día jueves 20 de enero.

**Tabla de la Reunión:**

1. Presentación resultados modelación numérica.
2. Seminario
3. Varios.

**Reseña de lo tratado:**

1.- Roberto Agredano presenta avances de la modelación numérica:

- Casos de modelación que se están considerando (barra cerrada / abierta y diferentes escenarios).
- Se indica que años El Niño / La Niña, no necesariamente coincide con años Lluviosos / años Secos.
- Modelación preliminar barra cerrada
- Modelación preliminar barra abierta
- Datos de entrada

2.- Se revisa el programa del seminario y realizan pequeños ajustes a la programación.

3.- Se responden consultas varias.

### Acuerdos/compromisos:

- 1.- Contraparte realizará invitación al seminario.
- 2.- Dinámica Costera se compromete a enviar el link del seminario.
- 3.- Dinámica Costera se compromete a participar en un seminario en el mes de abril o mayo 2022 para mostrar los resultados de la consultoría

### Anexo: Respaldo de la reunión



### 9.2.7 Reunión N°7: Lunes 31 enero 2022

## Acta Reunión 07

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

### Fecha/Lugar

31 de enero 2022, 10h00 -12h15, vía ZOOM.

**Participantes:**

Nombre	Institución
Carolina Vega	Coordinadora Técnica Local GEF-Humedales
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Claudia Accini	Profesional SEREMI Coquimbo
Daniela Castillo	GESNAT
Elier Tabilo	GESNAT
César Chávez	GESNAT
Marcelina Novoa	GESNAT
Francisco Cabrera Cona	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Patricio Winckler Grez	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Carlos Zuleta Ramos	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Roberto Agredano Martín	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Alfredo Navarro	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

**Objetivo:**

Presentar y discutir los resultados alcanzados en esta consultoría con el equipo consultor del estudio realizado en paralelo (GESNAT).

**Tabla de la Reunión:**

1. Presentación resultados.
2. Varios.

**Reseña de lo tratado:**

- 1.- Presentación de los equipos consultores de Dinámica Costera y GESNAT.
- 2.- Francisco Cabrera realiza una presentación general de la consultoría:
  - Objetivos
  - Metodología

- Resultados terrenos
- Resultados revisión bibliográfica y análisis series de tiempo
- Resultados análisis imágenes satelitales

3.- Roberto Agredano realiza una presentación sobre los resultados preliminares de la modelación de la desembocadura:

- Casos de modelación que se están considerando (barra cerrada / abierta y diferentes escenarios).
- Se indica que años El Niño / La Niña, no necesariamente coincide con años Lluviosos / años Secos.
- Modelación preliminar barra cerrada
- Modelación preliminar barra abierta
- Datos de entrada

4.- César Chávez (GESNAT) realiza una presentación de los avances de su consultoría.

5.- Elier Tabilo (GESNAT) presenta un plan de monitoreo para la cuenca del Elqui.

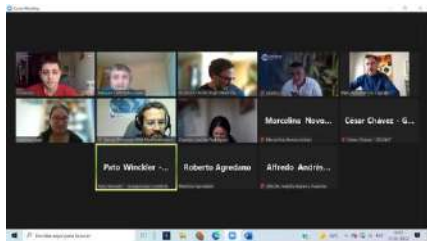
6.- Se responden consultas varias.

**Acuerdos/compromisos:**

1.- Dinámica Costera confirmará fechas de los próximos talleres.

3.- Dinámica Costera se compromete a participar en una reunión para definir el cause de la desembocadura, que se realizará en el mes de marzo.

**Anexo: Respaldo de la reunión**





## 9.2.8 Reunión N°8: Lunes 7 marzo 2022

### Acta Reunión 08

Consultoría 01/2021 Coquimbo “Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo”.

#### Fecha/Lugar

31 de enero 2022, 10h00 -10h58, vía ZOOM.

#### Participantes:

Nombre	Institución
Carolina Vega	Coordinadora Técnica Local GEF-Humedales
Sergio Troncoso Layi	Profesional SEREMI Coquimbo
Claudia Accini	Profesional SEREMI Coquimbo
Francisco Cabrera Cona	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Patricio Winckler Grez	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Carlos Zuleta Ramos	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Roberto Agredano Martín	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Alfredo Navarro	Miembro equipo consultor, Dinámica Costera
Manuel Contreras López	Jefe Proyecto, Dinámica Costera

#### Objetivo:

Presentar los resultados finales del modelo numérico y coordinar la realización del tercer taller técnico y el taller de difusión final.

#### Tabla de la Reunión:

1. Presentación resultados.
2. Realización talleres
3. Varios.

**Reseña de lo tratado:**

- 1.- Roberto Agredano presenta los resultados de los modelos.
- 2.- El jefe proyecto presenta una propuesta para modificar la estructura del informe final con el fin de mejorar su entendimiento.
- 3.- Se revisan los programas y fechas de los talleres finales.
- 4.- Se responden consultas varias.

**Acuerdos/compromisos:**

- 1.- Se acuerda modificar la estructura del informe final
- 2.- Dinámica Costera se compromete a incluir un detalle de lo que se entiende por “año normal” en el informe final.
- 3.- Dinámica Costera enviará links y programas de los talleres.
- 4.- Contraparte cursará las invitaciones a los talleres.

**Anexo: Respaldo de la reunión**



## 9.3 RESPALDO REALIZACIÓN TALLER

### 9.3.1 Taller Técnico 01: Miércoles 25 agosto 2021

#### Programa

- 11h00 - 11h10 Palabras de Bienvenida
- 11h10 - 11h25 Presentación equipo consultor y metodología general (MSc. Manuel Contreras-López, Jefe del Proyecto)
- 11h25 - 11h40 Presentación detalle modelos (Dr. Roberto Agredano Martín, Ingeniero a cargo de la modelación numérica)
- 11h40 - 11h50 Consultas / Aclaraciones
- 11h50 - 12h20 Actividad participativa
- 12h20 - 12h40 Plenario
- 12h40 - 12h45 Palabras de cierre

#### Invitación Realizada al Comité Técnico Local



#### Invitación

Giannina González Michea, Seremi del Medio Ambiente (S), le saluda cordialmente y tiene el agrado de invitar a usted al:

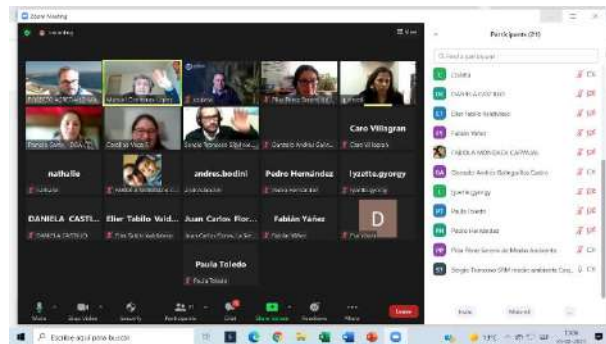
**Taller inicial de la consultoría "Estudio diagnóstico sobre el comportamiento morfodinámico e hidrodinámico del humedal costero del río Elqui y su barra terminal de arena, Región de Coquimbo".**  
Propuesta metodológica y alcances.

Esta actividad busca dar a conocer al equipo consultor, junto a la metodología de trabajo para levantar información, generando antecedentes relevantes. El taller será desarrollado por la consultora "Dinámica Costera", en el marco del Proyecto GEF Humedales Costeros y se realizará el día **miércoles 25 de agosto de 2021 a las 11:00 horas** vía zoom.

Agradecemos de contar con su valiosa presencia, solicitamos confirmar su participación al e-mail [cvogaz@mma.gob.cl](mailto:cvogaz@mma.gob.cl)



#### Respaldo realización del Taller



### 9.3.2 Taller Técnico 02: Miércoles 17 noviembre 2021

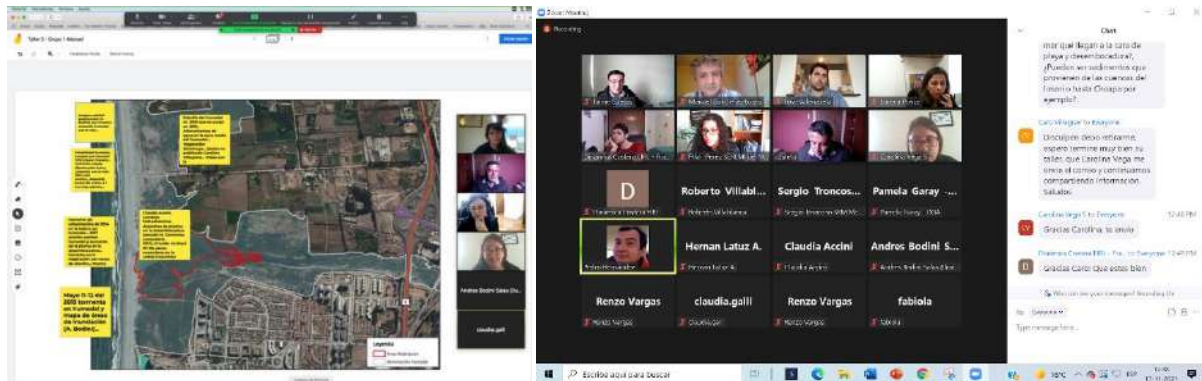
#### Programa

- 11h00 - 11h10 Palabras de bienvenida
- 11h10 - 11h30 Presentación Avances (Manuel Contreras López y Carlos Zuleta)
- 11h40 - 11h50 Consultas / Aclaraciones
- 11h50 - 12h20 Actividad participativa
- 12h20 - 12h40 Plenario
- 12h40 - 12h45 Palabras de cierre

#### Listado Asistentes

1. Carlos Zuleta, Universidad de La Serena.
2. José Miguel Valenzuela- Junta Vigilancia Río Elqui
3. Paula Toledo Cortés Servicio Agrícola y Ganadero
4. Pamela Garay, Dirección General de Aguas La Serena
5. Claudia Accini. Profesional de la Seremi del Medio Ambiente
6. Jaime Cuevas, investigador del Ceaza
7. Fabiola Mondaca - Depto. Protección del Patrimonio Municipalidad de La Serena
8. Gonzalo Galleguillos - Unidad de gestión ambiental y territorial - SRM MOP
9. Julio Nuñez, Municipalidad de La Serena.
10. Daniela Castillo-GesNat
11. Juan Carlos Flores E, Municipalidad de La Serena.
12. Carolina Villagran, DIPLADE, Gobierno Regional de Coquimbo
13. Sergio Troncoso, profesional SRM Medio Ambiente
14. Renzo Vargas Rodríguez, EcoTerra ONG
15. César L. Chávez Villavicencio (CNEH)
16. Roberto Villablanca, profesional SEREMI MA Coquimbo
17. Lorena Ponce, Seremi Minvu
18. Hernán Latuz. Ministerio del Medio Ambiente
19. Pilar Pérez Seremi de Medio Ambiente
20. Francisco Cabrera (Dinámica Costera)
21. Manuel Contreras (Dinámica Costera)
22. Nathalie Duarte (Dinámica Costera)
23. Carolina Vega (GEF)
24. Jean Casale - profesional Gesnat Consultores
25. Ma. Inés Godoy, municipalidad de La Serena.
26. Lyzette Gyorgy, Municipalidad de La Serena
27. Andres Bodini, Municipalidad de La Serena
28. Pedro Hernandez (sin registro en asistencia)

## Respaldo realización del Taller



### 9.3.3 Taller Técnico 03: Miércoles 16 marzo 2022

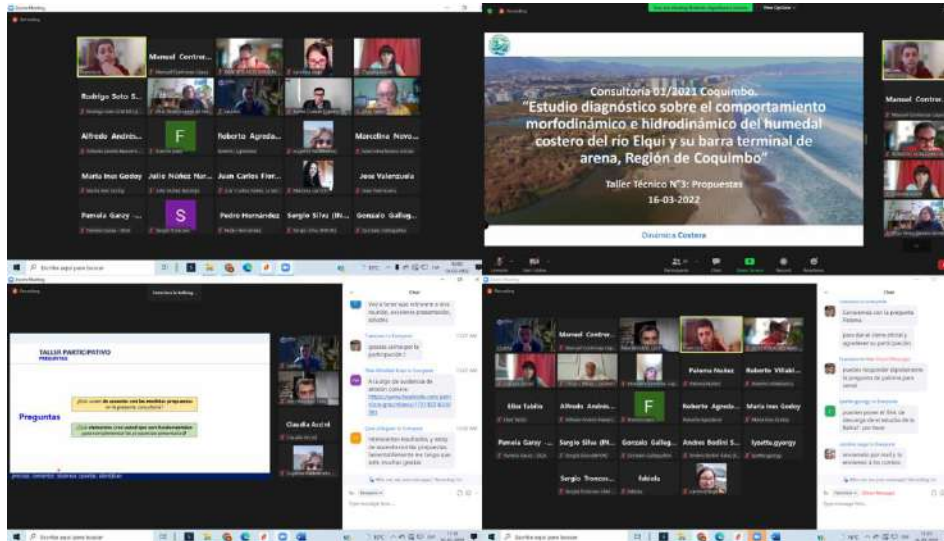
#### Programa

- 10h00 - 10h10 Palabras de Bienvenida
- 10h10 - 10h30 Resultados Modelo Desembocadura del Río Elqui y su barra de arena
- 10h30 - 10h50 Análisis Histórico y propuesta de medidas
- 10h50 - 11h30 Actividad Grupal Discusión y Validación propuestas
- 11h30 - 11h50 Actividad Plenaria
- 11h50 - 12h00 Cierre

#### Listado Asistentes

1. Carlos Zuleta
2. Patricio Winckler Grez
3. Francisco Cabrera
4. Roberto Agredano Martín
5. Manuel Contreras- López
6. Paloma Nuñez
7. Claudia Accini
8. Frances Páez
9. Pamela Garay
10. Alfredo Navarro Aravena
11. Andres Bodini Salas
12. Carolina Vega
13. César Chávez
14. Elier Tabilo
15. Fabiola
16. Gonzalo Galleguillos
17. Lyzette Gyorgy
18. Marcelina Novoa Antiao
19. Maria Inés Godoy
20. Roberto Villablanca
21. Sergio Silva
22. Sergio Troncoso

## Respaldo realización del Taller



### 9.3.4 Taller Difusión Final: Miércoles 23 marzo 2022

#### Programa

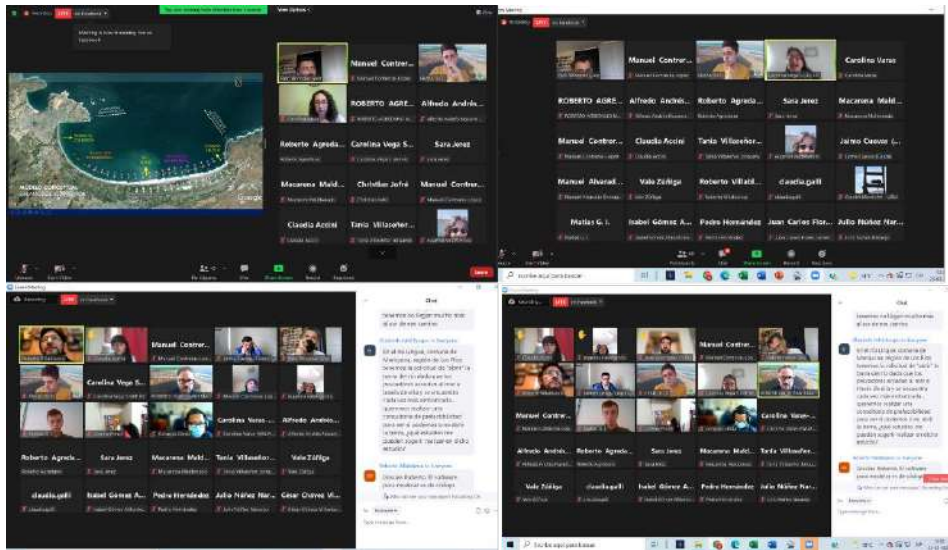
- 10h00 – 10h15 Palabras de Bienvenida
- 10h15 – 10h30 Desembocadura del Elqui: el vínculo entre la cuenca y la bahía. PhD. Patricio Winckler Grez, Académico Universidad de Valparaíso
- 10h30 – 10h45 Caracterización de la Desembocadura del Río Elqui y su barra de arena. Geógrafo Francisco Cabrera Cona, Especialista en Planimetría, SIG y levantamiento en terreno.
- 10h45 – 11h10 Resultados Modelo Hidrodinámico y Morfoodinámico para la Desembocadura del Río Elqui. Dr(c) Roberto Agredano Martín, Especialista en modelos hidrodinámicos
- 11h10 – 11h30 Consideraciones evolución histórica y resultados del modelo para la propuesta de manejo de la desembocadura. MSc Manuel Contreras-López, Jefe de Proyecto
- 11h30 – 11h55 Mesa Redonda, Ronda de Preguntas
- 11h55 – 12h00 Palabras de Cierre

#### Listado Asistentes (parcial debido a que no todos los asistentes se identificaron)

1. Patricio Bahamondes
2. Milenka Sanchez
3. Sandra Suazo
4. Isabel Gómez Córdova
5. Felix Velasco
6. Lorna Berrios Ibacache
7. Cristian Ray Bobadilla
8. Osvaldo Miranda Eldan
9. Marcela Jeria Román
10. Valentina Zuñiga Parrao
11. Matias Guerrero Irrázaval
12. Rudy Vergara

13. Gabriel Montofré Vergara
14. Jaime Cuevas, investigador del Ceaza
15. Julio Núñez Naranjo
16. Tania Villaseñor, académica Universidad de O'Higgins
17. Eugenia Valdebenito Gobernación Marítima de Coquimbo
18. Gabriel Montofré - USM
19. Gonzalo Galleguillos - Prof. SRM MOP
20. César Chávez Villavicencio - CNEH
21. Julio Núñez. municipalidad de la serena
22. Juan Carlos Flores, Municipalidad de La Serena, Dpto. de Protección del Patrimonio
23. Carolina Vega, GEF Humedales Costeros
24. Christian Jofré Pérez, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso
25. Álvaro Rodrigo, formación geólogo, profesión muralista. No pertenezco a ninguna institución.
26. Paula Martínez V. Diplade, GORE
27. Sebastian Alcayaga (SUBDERE)
28. Matías Guerrero - ingeniero civil hidráulico
29. Nathalie Duarte, parte del equipo de Dinamica Costera
30. Jose Miguel Valenzuela, Junta de Vigilancia del Río Elqui
31. Sergio Troncoso, profesional SRM medio ambiente
32. Romina Michaud, servicio de vivienda y urbanizacion
33. Manuel Alvarado, Sernapesca Coquimbo
34. Pilar Pérez SRM de Medio Ambiente
35. Roberto Villablanca
36. Gabriel Mancilla
37. MaAntonieta Zuniga Avalos
38. Macarena Maldonado
39. Cristina Vargas - SERNAPESCA
40. Jose Valenzuela (JVRE)

#### **Respaldo realización del Taller**





## 9.4 RESPALDO REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se presenta una parte de la información sistematizada para la revisión bibliográfica en la planilla excel que acompaña a este informe.

Autores	Título	Año	Palabras clave	Fuente
Alvial	Analysis of benthic macroinvertebrates and biotic indices to evaluate water quality in rivers impacted by mining activities in northern Chile.	2012	Bentos	Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems 407: 01 (1-16).
Abad M, T Izquierdo, S Lock, D Rojas & E Fritis	Geomorphic impact of the 16S 2015 tsunami event in the Coquimbo Bay (northern Chile).	2017	Tsunamis, Bahía de Coquimbo, Coquimbo	Geophysical Research Abstracts 19: 10241
AGUAS CONSULTORES SpA	DIAGNÓSTICO MEJORAMIENTO PLAYA LA SERENA, COMUNA LA SERENA, REGIÓN DE COQUIMBO ESTUDIO DE HIDROLOGÍA	2020	transporte y acumulación de sedimentos	DIAGNÓSTICO MEJORAMIENTO PLAYA LA SERENA, COMUNA LA SERENA, REGIÓN DE COQUIMBO INFORME ETAPA 2
ALBANEZ-RAMOS SE	Jornada actualización predios agrícolas 2015 Aplicación terrestre de plaguicidas agrícolas. Decreto Supremo N°158	2015	Plaguicidas, agricultura, salud humana, jurisdicción, Región de Coquimbo, Chile	SEREMI de salud, Región de Coquimbo, Gobierno de Chile
Alcayaga OE, Pizarro-Araya J, Alfaro FM & Cepeda-Pizarro J.	Arañas (Arachnida, Araneae) asociadas a agroecosistemas en el Valle de Elqui (Región de Coquimbo, Chile)	2013	Artrópodos epigeos, agricultura de zonas semiáridas, cuencas semiáridas, valles andinos	Revista Colombiana de Entomología 39 (1): 150-154.
ALEXI RODRIGO NUÑEZ VALDES	HIDROGEMORFOLOGÍA APLICADA A RIESGO Y/ PELIGRO DE INUNDACIÓN EN EL RÍO ELQUI (IV REGIÓN, CHILE SEMIÁRID)	1993	inundación, riesgo, políticas de manejo	UNIVERSIDAD DE LA SERENA FACULTAD DE HUMANIDADES DEPARTAMENTO DE ARTES, LETRAS Y CIENCIAS SOCIALES
Álvarez Bratti	Geoquímica de aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Elqui en el sector ubicado entre La Marquesa y puente La Pelicana, IV Región de Coquimbo.	2017	Río Elqui, acuífero, aguas subterráneas, calidad de aguas, Coquimbo	Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, Santiago (Chile), 97 pp.
Alvarez-Bratti RV	GEOQUÍMICA DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI EN EL SECTOR UBICADO ENTRE LA MARQUESA Y PUENTE LA PELICANA, IV REGIÓN DE COQUIMBO.	2017	Aguas superficiales, río Elqui, IV Región, Chile, composición química del agua	Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, Carrera de Geología, Santiago (Chile) :84 pp.
ANA AURORA GUTIÉRREZ URIBE	EVALUACIÓN DEL GASTO SÓLIDO DE FONDO EN EL RÍO ELQUI, EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE EL EMBALSE PUCLARO Y LA CIUDAD DE LA SERENA	2013	Gasto sólido, sedimento	UNIVERSIDAD DE LA SERENA FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES
Antinao JL, McDonald E, Maldonado A & Negri R.	Nuevos antecedentes geocronológicos y estratigráficos en el Cuaternario del valle del Elqui, Chile	2015	Geomorfología, Elqui, Chile, Luminiscencia, Isotopos Cosmogénicos, evolución del paisaje	XIV Congreso Geológico Chileno
Arrau del Canto L	Estudio de Vulnerabilidad y Definición de un Plan de Manejo de Cauces para Cuenca Río Elqui-Región de Coquimbo.	1997	Río Elqui, Quebradas afluentes, Plan de manejo de cauces	MMA, Licitación ID: 608897-71-LE18.
Báez P, S Letelier, G Rojas, A Rebolledo, A	Patrimonio natural acuático y bioseguridad en los humedales costeros del semiárido de Chile: reflexiones para un estudio de caso, el caracol exótico Pomacea canaliculata.	2013	Humedales costeros, invasiones biológicas, biodiversidad, Pomacea canaliculata, Coquimbo	Gestión Ambiental 26: 51-63


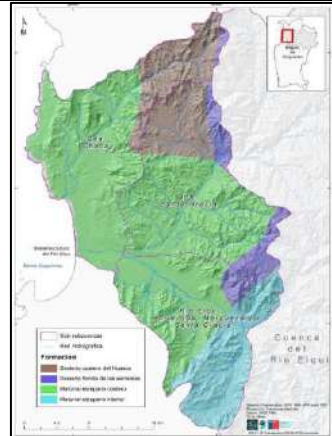
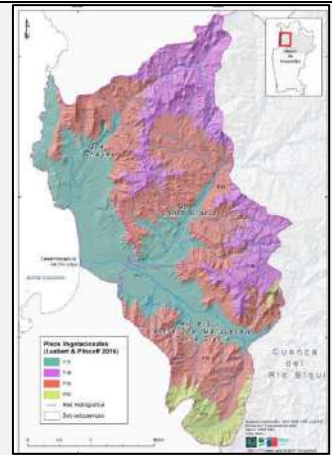
Autores	Título	Año	Palabras clave	Fuente
Martínez & P Paredes				
Báez-Araya P	Plan de ordenamiento territorial: Amenaza de tsunami	2011	Amenaza de tsunami, planificación urbana, La Serena, Chile, mapa	Departamento de Planificación Territorial División de Planificación y Desarrollo Regional
Balocchi F, Pizarro R, Meixner T & Urbina F .	Annual and monthly runoff analysis in the Elqui River, Chile, a semi-arid snow-glacier.	2017	Derretimiento glacial, coeficiente precipitación-caudal, cuenca glaciaria, distribución de Gumbel, tendencias de precipitación y caudal.	Tecnología y Ciencias del Agua VIII (6): 23-35.
Bascuñán Walker, F.	Crecimiento urbano y balance de CO2 en la cuenca del río Elqui (Chile)	2010	crecimiento urbano, CO2, sostenibilidad, capacidad fijadora	BOSQUE 31(2): 109-116.
BIOMA	Red de monitoreo ambiental de ecosistemas acuáticos de Chile 2018-19: insumo para plataforma de humedales de Chile. Informe Final.	2019	Plataforma humedales de Chile, Limnología, Calidad de aguas, Estado trófico, Salud ecosistemas.	MMA, Licitación ID: 608897-71-LE18.
Bravo-Naranjo V, Zuleta-Ramos C, Contreras-López M, Cea Villablanca A, Larraguibel González, Pastén Marambio V & Salcedo Castro J.	Cap.4: Estuario Río Elqui.	2020	Desembocadura Río Elqui, Estuario, Geomorfología, Fauna, Flora y Vegetación, Escenario Costero, Amenazas y Conservación.	En: Zuleta-Ramos C & Bravo-Naranjo V (eds). Atlas Humedales Costeros de Coquimbo: Biodiversidad & Territorio. Pág. 52-63. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
Cabezas R, J Cepeda & A Bodini	Descripción cartográfica de la hoya hidrográfica del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile).	2007	Cartografía, hoya hidrográfica, cuenca, Río Elqui, Coquimbo	MCRI Project Institutional adaptations to climate change: Comparative study of dryland river basins in Canada and Chile. Universidad de La Serena, La Serena (Chile), 105 pp.
CADE-IDEPE	Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Elqui.	2004	Río Elqui, calidad de agua, cuenca, Coquimbo	Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, Santiago (Chile), 144 pp.
Campos H, Dazarola G, Dyer B, Fuentes L, Gavilán JF, Huaquin L, Martínez G, Meléndez R, Pequeño G, Ponce F, Ruiz VH, Sielfeld W, Soto D, Vega R & Vila I.	Categorías de conservación de peces nativos de aguas continentales de Chile.	1998	Categoría de conservación, peces de aguas continentales, Chile, aguas continentales.	Boletín del Museo Nacional de Historia Natural 47: 101-122.
Cárcamo CB, Díaz NF & Winkler FM	Variabilidad genética en poblaciones chilenas de trucha arcoiris, <i>Oncorhynchus mykiss</i>	2015	Oncorhynchus mykiss, trucha arcoiris, Salmonidae, variabilidad genética, acuicultura, conservación	Latin American Journal of Aquatic Research 43(1): 59-70
CEA	Red de monitoreo ambiental de ecosistemas acuáticos de Chile: Insumo para plataforma de humedales de Chile. Informe Final, V2.	2018	Plataforma humedales de Chile, Limnología, Calidad	MMA, Licitación ID: 608897-114-LE17.

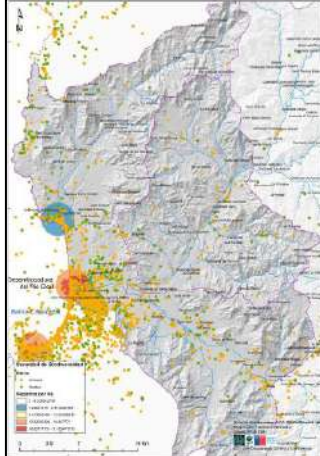


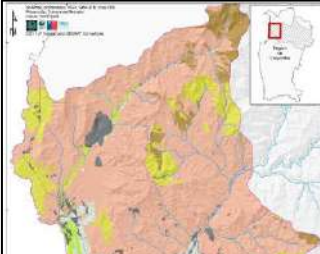

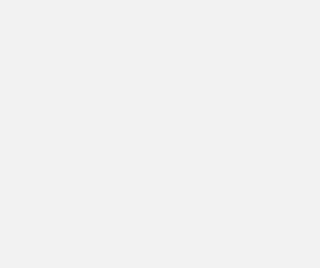
Autores	Título	Año	Palabras clave	Fuente
			de aguas, Estado trófico, Salud ecosistemas.	
CECPAN	Censos Nacionales de Aves Acuáticas	2012	Censo, aves acuáticas, Chile, biodiversidad, conservación	Servicio Agrícola y Ganadero, Gobierno de Chile
Cepeda J & López-Cortés F.	Sistemas naturales de la hoya hidrográfica del Río Elqui: Variabilidad Climática y Vulnerabilidad	2004	Cambio climático, variabilidad climática, vulnerabilidad del ecosistema, cuencas hidrográficas áridas.	MCRI Project: Institutional Adaptations to Climate Change: Comparative study of dryland river basins in Canada and Chile.
Cepeda JP, Cabezas RC, Robles MI & Havala HZ	Antecedentes generales de la cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile).	2009	Tierras áridas, desiertos costeros, cuencas desérticas, valles andinos.	En: Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima. Cepeda PJ (ed): 5-29. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
Cepeda-Pizarro J (ed.)	Los sistemas naturales de la cuenca del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y cambio del clima.	2008	Cuenca, río Elqui, Coquimbo, cambio climático	Ediciones Universidad de La Serena, La Serena (Chile), 369 pp.
Cepeda-Pizarro J, Solange Vega S, Elgueta M & Pizarro-Araya J	ALGUNOS ANTECEDENTES METEOROLÓGICOS QUE EXPLICAN LAS IRRUPCIONES DE ELASMODERUS WAGENKNECHTI (ORTHOPTERA: TRISTIRIDAE) EN LA REGIÓN DEL SEMIÁRIDO DE CHILE	2006	Orthoptera, insectos de secano, irrupciones poblacionales, zonas áridas, biometeorología, Chile	IDESIA (Chile) 24(3): 49-63
Cepeda-Pizarro J, Vega S, Vásquez H, Elgueta M & Pizarro-Araya J	Demographic Study of Two Population Outbreaks of <i>Elasmoderus wagenknechti</i> (Liebermann) (Orthoptera: Tristiridae) in the Transitional Desert of Chile	2007	Insectos de pastizales, biología poblacional, zona semiárida, insecto endémico, ecología de pastizales	Neotropical Entomology 36(4): 495-502
Cepeda-Pizarro J, Zuleta C & López-Cortés F.	Síntesis: Los sistemas naturales de la cuenca del Río Elqui en el contexto del cambio climático	2009	Hoyas y cuencas hidrográficas áridas, cambio climático, vulnerabilidades, adaptaciones institucionales.	En: Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima. Cepeda PJ (ed): 327-369. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
Cepeda-Pizarro J.	Variabilidad temporal de algunos parámetros físicos e hidroquímicos de un prado húmedo alto-andino del norte-centro de Chile	2013	Hidroquímica de desiertos, agua subterránea, ecosistemas de montaña, Andes desérticos, vegas andinas	IDESIA 31 (2): 89-97.
Chávez-Villavicencio C, Molina-Pérez P & Tabilo-Valdivieso E.	Respuesta de la riqueza de aves en presencia de visitantes, vehículos y perros en el humedal "El Culebrón", Chile.	2015	Animales Ferales, aves acuáticas, disturbio, impacto en humedales, perturbación.	The Biologist (Lima) 13 (2): 313-327.
Chávez-Villavicencio C, Tabilo-Valdivieso E & Jofré-Pérez C.	Tsunami effects on Coquimbo Bay wetland water-bird species composition, associated with the 2015 Mw8.4 Illapel earthquake (northern Chile)	2019	Humedales costeros, perturbación, ecosistema, aves, maremoto, humedal, resiliencia	Latin American Journal of Aquatic Research, 47(5): 845-852.
Cienfuegos R, JR Campino, J Gironás, R Almar & M Villagrán	River mouths and coastal lagoons in central Chile.	2017	Desembocaduras, humedales costeros, Chile central	In: Fariña JM & A Camaño (eds.) The ecology and natural history of Chilean saltmarshes.

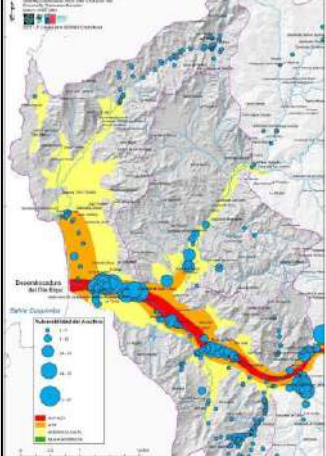
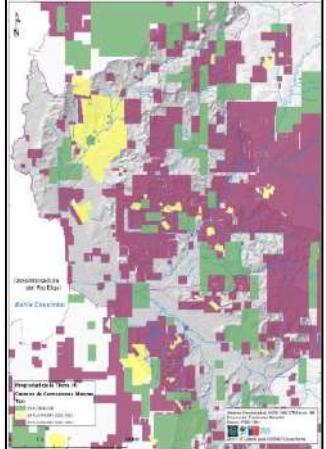



Autores	Título	Año	Palabras clave	Fuente
CIREN	Actualización Catastro de Usuarios de Agua, Entre el Sector Ubicado Aguas Abajo del Embalse Puclaro y la Desembocadura del Río Elqui.	2012	Usuarios de Agua, red hídrica, derechos de aprovechamiento pozos, Código de Aguas, Río Elqui, Embalse Puclaro.	Centro de Información de Recursos Naturales & Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.
Cobo-Montalva L, Trigo-Valle S, Consejo MOP Regional, coordinación MOP Nivel Central	Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso hídrico al 2021	2012	Desarrollo sustentable, desarrollo socioeconómico, gestión del agua, región de Coquimbo, crecimiento demográfico	Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile
CONIC-BF	Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo” Informe Final.	2013	Región de Coquimbo, Cuencas hidrográficas. Recursos hídricos, Calidad aguas, Eventos extremos.	Gobierno Regional de Coquimbo. CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda.
Consultora Territorio y Ciudad	ACTUALIZACIÓN PLAN REGULADOR COMUNAL DE LA SERENA	2014	Riesgo ambiental, planificación territorial, Región de Coquimbo, Chile, Gobierno regional, sustentabilidad	Ilustre Municipalidad de La Serena, SEREMI MINVU y Gobierno Regional de Coquimbo, Chile
Contreras Barrientos JF	Geological synthesis of the coastal marine basins, Southern Peru – Northern Chile: Implications for the Cenozoic coastal uplift.	2016	Cuencas marinas, Norte de Chile, zona costera	Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 47 pp.
Contreras-López M, Robles M, Salcedo-Castro J, Arumí JL & Zuleta-Ramos C.	Clima e hidrología de los humedales costeros de Coquimbo	2020	Región de Coquimbo, semi-árido, El Niño, humedales costeros	En: Zuleta-Ramos C & Contreras-López M (eds). Humedales de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación. Pág. 30-59. Editorial Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
Contreras-López M, Winckler P, Sepulveda I, Andaur-Álvarez A, Cortés-Molina F, Guerrero CJ, Mizobe CE, Iguait F, Breuer W, Beya JF, Vergara H & Figueroa-Sterquel R	Field Survey of the 2015 Chile Tsunami with Emphasis on Coastal Wetland and Conservation Areas	2016	Tsunami, estudio de campo, preparación, terremoto de 2015, Illapel	Pure and Applied Geophysics 173: 349–367


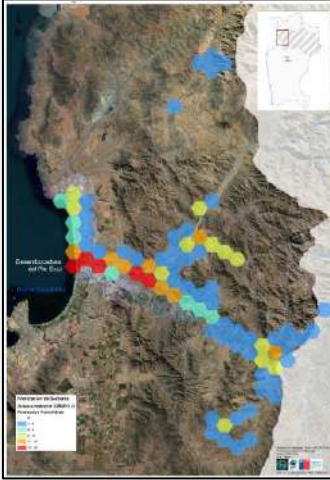


## 9.5 RESPALDO REVISIÓN CARTOGRÁFICA

**Tabla 1: Revisión Cartográfica de documentos**






Información documento #1	
<p><b>Título:</b> Identificación y Priorización de Áreas de Restauración Ecológica para el Humedal Desembocadura del río Elqui y sus Subcuencas aportantes, Región de Coquimbo.</p> <p><b>Autores:</b> GesNat</p> <p><b>Año:</b> 2021</p> <p><b>SIG:</b> disponible.</p> <p><b>Objetivo:</b> El objetivo principal del estudio fue identificar y prioriza áreas de restauración ecológica para el Humedal Costero del río Elqui y sus subcuencas aportantes.</p>	
Antecedentes-Evidencias	
<p>Área de estudio, entre el Humedal Costero del río Elqui y la quebrada de Talca y quebrada Santa Gracia.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui</p>	
<p>Mapa de formaciones vegetacionales presentes en el humedal del río Elqui y sus subcuencas aportantes.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Formaciones Vegetacionales.</p>	
<p>Mapa de los pisos vegetacionales presentes en el área del Humedal del río Elqui y sus subcuencas aportantes.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Pisos Vegetacionales.</p>	

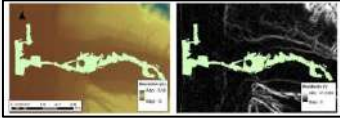
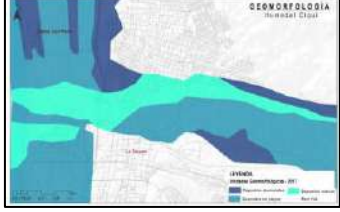


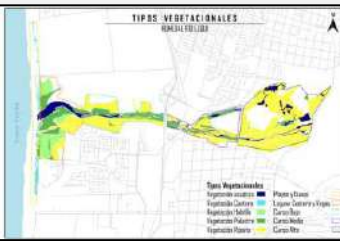

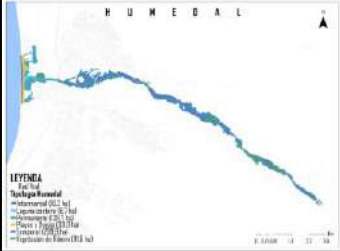
<p>Mapa del criterio de biodiversidad, mostrando la densidad de biodiversidad en base a método de Kernel density derivado de la base de datos de registros de flora y fauna (reinos Animalia y Plantae).</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Biodiversidad</p>	
<p>Mapa de factores de degradación. Densidad de pasivos y factores en base a kernel density.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Factores de Degradación.</p>	
<p>Mapa de uso de suelo y vegetación.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Usos del Suelo; Vegetación.</p>	
<p>Mapa de vulnerabilidad del acuífero en las subcuencas del área de estudio.</p>	






<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Usos del Suelo; Vegetación.</p>	
<p>Mapa de catastro de concesiones mineras.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Subcuencas Río Elqui; Concesiones Mineras.</p>	
<p>Mapa de priorización de sectores a restaurar en base a criterios. Resultado del trabajo grupal del Grupo 1.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Priorización de sectores a restaurar.</p>	

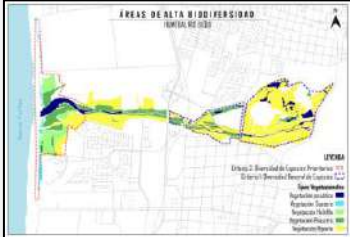

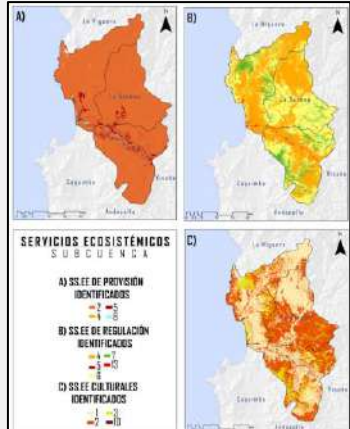
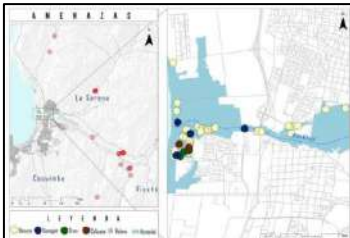
<p>Mapa de priorización de sectores a restaurar en base a criterios. Resultado del trabajo grupal del Grupo 2.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Priorización de sectores a restaurar.</p>	
<p>Mapa de priorización de sectores a restaurar en base a criterios. Resultado del trabajo grupal del Grupo 3.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Priorización de sectores a restaurar.</p>	
<p>Mapa de sectores priorizados para ser restaurados y los transectos de registro de fauna en cada sector priorizado.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sectores priorizados a restaurar.</p>	
<p>Mapa con la ubicación de los sitios de muestreo en los sectores de restauración priorizados</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sectores priorizados a restaurar.</p>	

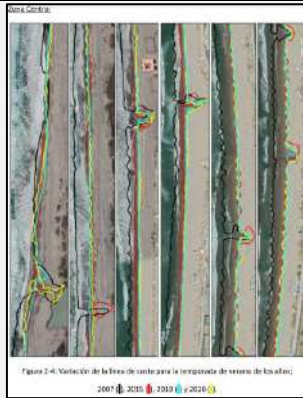


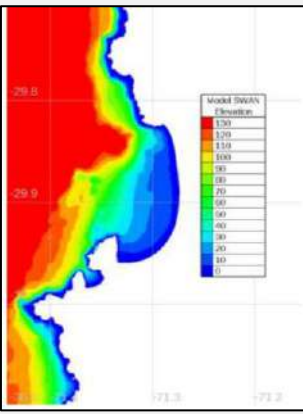


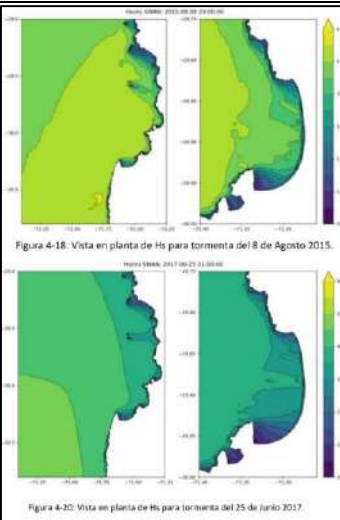
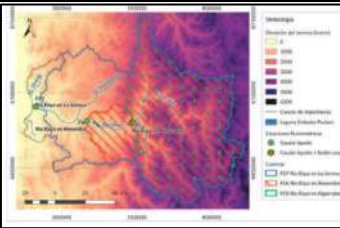
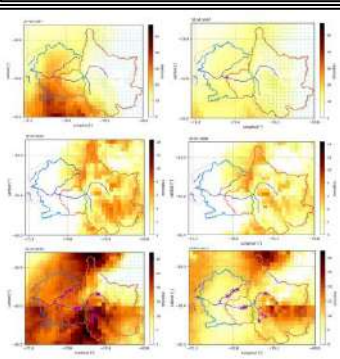
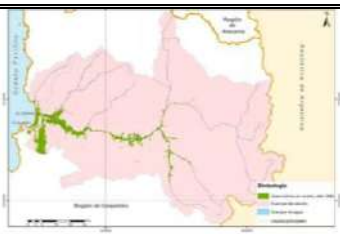
<p>Mapa del área de Intervención Sector 1 Desembocadura del río Elqui</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sectores priorizados a restaurar.</p>	
<p>Mapa área de intervención Sector 2 Alfalfares, y corresponde al cauce del río Elqui desde el puente Vicente Zorrilla hasta Alfalfares.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sectores priorizados a restaurar.</p>	
<p>Mapa área de intervención Sector 3 Islón, y el cruce con el sector El Romero.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sectores priorizados a restaurar.</p>	
<p>Mapa área de intervención Sector 4 Altovalsol.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sectores priorizados a restaurar.</p>	
<p>Mapa área de intervención Sector 5 Quebrada de Talca.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sectores priorizados a restaurar.</p>	
<p><b>Información documento #2</b></p>	
<p><b>Título:</b> Delimitación y caracterización de usos del humedal desembocadura del río Elqui y sus subcuencas aportantes, Región de Coquimbo.  <b>Autores:</b> Corporación Capital Biodiversidad  <b>Año:</b> 2021  <b>SIG:</b> disponible.  <b>Objetivo:</b> El estudio permitió definir los límites ecológicos del humedal de la desembocadura del río Elqui, con 568,1 hectáreas, considerando criterios como: la hidrología, vegetación, geomorfología y edafología, más un proceso participativo del Comité Técnico Local del proyecto.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	

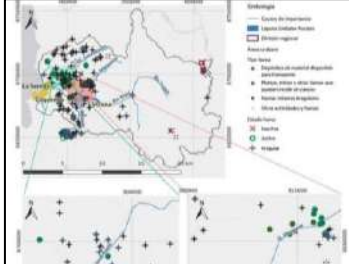



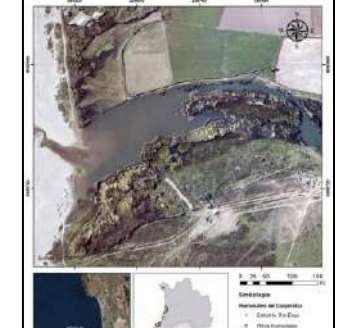

<p>Mapa de elevación y pendiente en grados de la desembocadura del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Topografía</p>	
<p>Unidades geomorfológicas de la desembocadura del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Unidades geomorfológicas.</p>	
<p>Carta de Inundación por tsunami área de estudio. Año 2015.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Inundación por tsunami.</p>	
<p>Áreas de inundación y quebradas aluvionales. Año 2017.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Inundación por precipitaciones.</p>	
<p>Tipos vegetacionales.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Tipos vegetacionales.</p>	
<p>Tipología de humedal según inventario nacional.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Tipología humedal.</p>	
<p>Delimitación final del humedal río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Delimitación humedal.</p>	


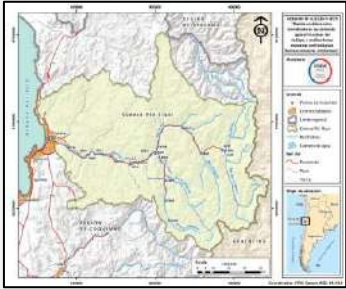

<p>Usos del suelo del humedal.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Uso del suelo humedal.</p>	
<p>Usos del suelo subcuencas aportantes.</p>	
<p>Distribución espacial conductividad eléctrica.</p>	
<p>División predial área de estudio.</p>	
<p>Mapa de superposición de la delimitación final del humedal y predios.</p>	

<p>Áreas de alta biodiversidad.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Tipos de Vegetación</p>	
<p>Especies endémicas.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Endemismo</p>	
<p>Servicios ecosistémicos en las subcuencas aportantes.</p>	
<p><b>Tópicos:</b> Servicios ecosistémicos.</p>	
<p>Principales amenazas en la desembocadura del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópicos:</b> Tipos de amenaza</p>	
<p><b>Información documento #3</b></p>	
<p><b>Título:</b> Diagnóstico Mejoramiento Playa La Serena, Comuna La Serena, Región De Coquimbo. Informe de Estudio Morfología de la playa.  <b>Autores:</b> Aguas Consultores SpA.  <b>Año:</b> 2020  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> Estudio morfológico de la bahía de Coquimbo y en particular de la playa de La Serena.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	








<p>Variaciones de la línea de costa para la temporada de verano Zona Centro de la bahía (incluyendo desembocadura río Elqui) para los años 2007, 2015, 2019 y 2020.</p>	 <p>Figura 2-4: Variación de la línea de costa para la temporada de verano de los años: 2007, 2015, 2019 y 2020.</p>
<p><b>Tópico:</b> Variación línea de costa.</p>	
<p>Variaciones de la línea de costa para el año 2015: febrero, posterior marejada de agosto y posterior tsunami de septiembre.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Variación línea de costa.</p>	
<p>Perfil de playa C1 frente a la desembocadura río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Perfil de playa.</p>	
<p><b>Información documento #4</b></p>	
<p><b>Título:</b> Diagnóstico Mejoramiento Playa La Serena, Comuna La Serena, Región De Coquimbo. Informe de Estudio de Oleaje  <b>Autores:</b> Aguas Consultores SpA.  <b>Año:</b> 2020  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> Estudio para estimar las condiciones del oleaje en la bahía de Coquimbo y en particular en las playas de La Serena.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Batimetría bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Batimetría oceánica bahía de Coquimbo.</p>	


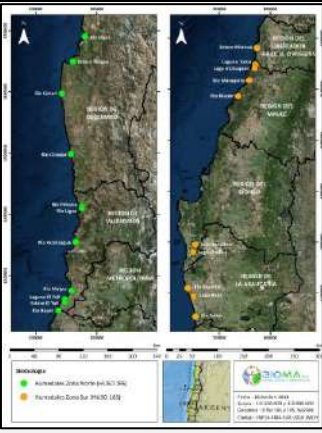
<p>Vista en planta del oleaje para las tormentas de agosto 2015 y junio 2017.</p>	 <p>Figura 4-18: Vista en planta de Hs para tormenta del 8 de Agosto 2015.</p> <p>Figura 4-20: Vista en planta de Hs para tormenta del 25 de junio 2017.</p>
<p><b>Información documento #5</b></p>	
<p><b>Título:</b> Diagnóstico Mejoramiento Playa La Serena, Comuna La Serena, Región De Coquimbo. Informe de Estudio de Hidrología.  <b>Autores:</b> Aguas Consultores SpA.  <b>Año:</b> 2020  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> Estudio para estimar los volúmenes de transporte fluvial de sedimentos en la desembocadura de la cuenca río Elqui ubicada en la ciudad de La Serena.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Estaciones fluviométricas y modelo de elevación digital de la región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones fluviométricas; Modelo de elevación digital.</p>	
<p>Eventos detríticos identificados en el área de estudio los años 1997, 2006 y 2015.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Eventos de remoción en masa.</p>	
<p>Área de cultivo identificada en época estival al año 2007.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Áreas de Cultivo.</p>	

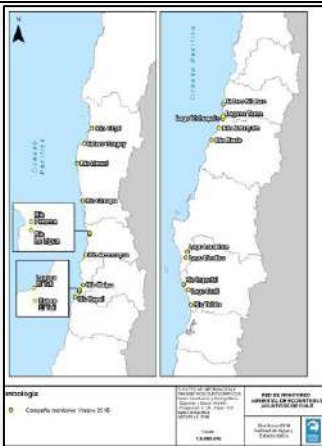
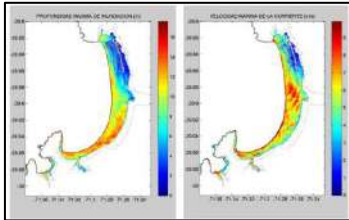
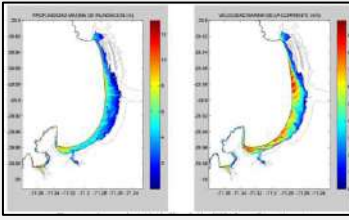
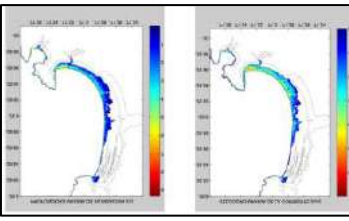
<p>Ubicación actividad minera en la cuenca del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Actividad minera.</p>	
<p><b>Información documento #6</b></p>	
<p><b>Título:</b> Atlas Humedales Costeros de Coquimbo.  <b>Autores:</b> Carlos Zuleta Ramos &amp; Víctor Bravo Naranjo.  <b>Año:</b> 2020  <b>SIG:</b> sólo se encuentra disponible el ortofotomosaico.  <b>Objetivo:</b> Se hace una caracterización del estuario del río Elqui en cuanto a aspectos físicos, flora, fauna, presiones y amenazas.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Cartografía de la cuenca del río Elqui, la cual no contempla quebrada El Romeral.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Cuenca Río Elqui; Modelo de elevación digital.</p>	
<p>Cartografía localización estuario río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Localización humedal.</p>	
<p>Además, desde este documento se rescató el ortofotomosaico como insumo para la generación del modelo de elevación digital.</p>	

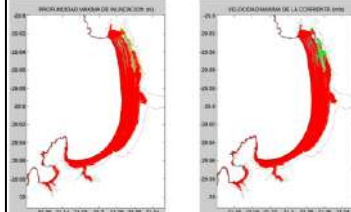
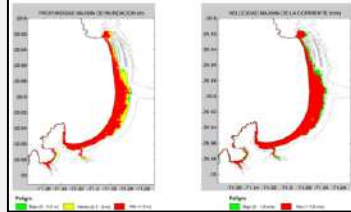
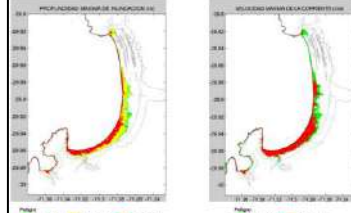

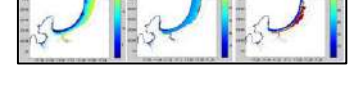
<p><b>Tópico:</b> Modelo de Elevación Digital.</p>	
<p><b>Información documento #7</b></p>	
<p><b>Título:</b> Plantas acuáticas como bioindicadores de calidad de agua en la cuenca del río Elqui, y análisis de sus respuestas ecofisiológicas frente a estresores ambientales.  <b>Autores:</b> Jonathan Urrutia Estrada, Enrique Hauenstein Barra, Mirtha Latsague Vidal, Paz Cárcamo &amp; Fincheira Marcelo Silva Vizcarra.  <b>Año:</b> 2020  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> Este estudio tiene como objetivo general identificar especies de plantas acuáticas que pueden ser utilizadas como bioindicadores de la calidad de agua en la cuenca del río Elqui, y analizar su respuesta ante estresores ambientales.</p>	
<p><b>Antecedentes - Evidencias</b></p>	
<p>Mapa del área de estudio: cuenca del río Elqui, red hídrica, centros poblados y red vial.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Cuenca hidrográfica</p>	
<p><b>Información documento #8</b></p>	
<p><b>Título:</b> Diagnóstico Mejoramiento Playa La Serena, Comuna La Serena, Región De Coquimbo. Informe etapa 1.  <b>Autores:</b> Aguas Consultores SpA.  <b>Año:</b> 2019  <b>SIG:</b> sólo disponible los planos de los perfiles de playa y coordenadas geográficas de puntos de muestreo.  <b>Objetivo:</b> El objetivo general del estudio es analizar el comportamiento morfológico de las playas de la bahía de Coquimbo examinando de manera más detallada las playas de La Serena y el resto de las playas con un análisis más simple pero que dé respuesta a los cambios esperados y así poder establecer una propuesta de plan de control de erosión y manejo de sedimentos. Etapa 1.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Geología del sector del proyecto.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Geología bahía de Coquimbo</p>	

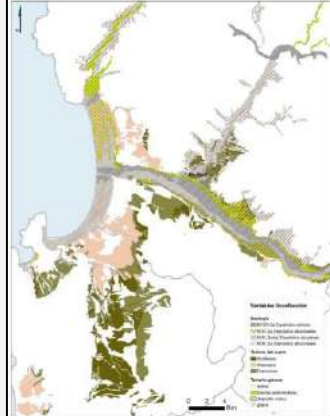


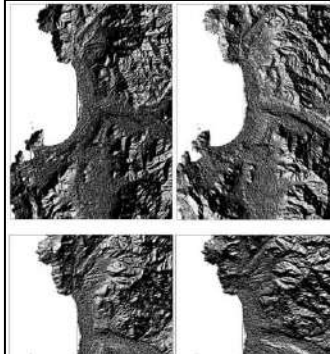








<p>Perfiles de playa. Perfil C1 se encuentra frente a la desembocadura del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Perfil de playa sector Humedal Elqui</p>	
<p>Puntos de muestreo para análisis sedimentológicos. Se recogieron 6 muestras al interior de la desembocadura.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Análisis sedimentológicos.</p>	
<p>Área de estudio, incorporando cuenca del río Elqui y subcuencas.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Cuenca Río Elqui</p>	
<p>Usos del suelo área estudio, año 2014.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Usos del suelo Río Elqui</p>	
<p>Eventos de aluvión y remoción en masa, año 2017.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Eventos aluvión; Remoción en masa</p>	
<p>Ubicación general extracción de áridos.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Extracción de áridos.</p>	
<p>Estaciones fluviométricas y cuencas.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones fluviométricas; Cuencas Hidrográficas.</p>	

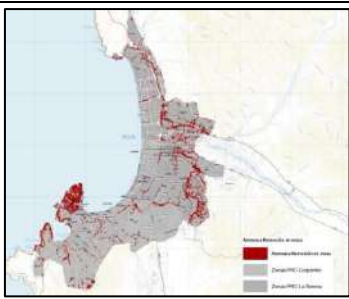
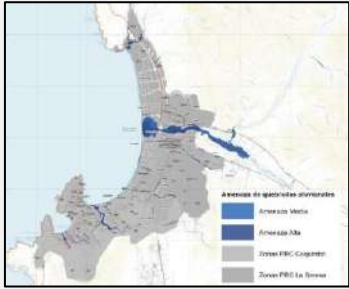
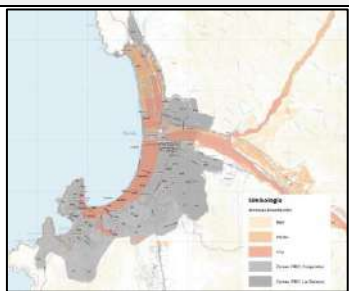

Estaciones meteorológicas y cuencas.	
<b>Tópico:</b> Estaciones meteorológicas; Cuencas Hidrográficas.	
<b>Información documento #9</b>	
<p><b>Título:</b> Red de monitoreo ambiental de ecosistemas acuáticos de Chile 2018-2019: insumo para plataforma de humedales de Chile.</p> <p><b>Autores:</b> BIOMA S.A.</p> <p><b>Año:</b> 2019</p> <p><b>SIG:</b> no disponible.</p> <p><b>Objetivo:</b> El objetivo de este estudio fue dar continuidad y fortalecer un monitoreo limnológico de datos de calidad de aguas y condición ecológica, principalmente relaciona con la salud trófica de los ecosistemas acuáticos de Chile, como una herramienta que apoye la planificación y gestión de la biodiversidad acuática de nuestro territorio y que sirva de insumo para alimentar la Plataforma de Humedales de Chile. Etapa 2019.</p>	
<b>Antecedentes – Evidencias</b>	
Ubicación de los 21 ecosistemas acuáticos priorizados, contemplado el humedal desembocadura río Elqui.	
<b>Tópico:</b> Ecosistemas acuáticos priorizados	
<b>Información documento #10</b>	
<p><b>Título:</b> Red de monitoreo ambiental de ecosistemas acuáticos de Chile: insumo para plataforma de humedales de Chile.</p> <p><b>Autores:</b> Centro de Ecología Aplicada.</p> <p><b>Año:</b> 2018</p> <p><b>SIG:</b> no disponible.</p> <p><b>Objetivo:</b> El objetivo principal de este estudio es dar continuidad y consolidar el monitoreo limnológico de datos de calidad de agua y condición ecológica, principalmente relacionado con la salud trófica de los ecosistemas acuáticos de Chile, como una herramienta que apoye la planificación y gestión de la biodiversidad acuática de nuestro territorio y que sirva de insumo para alimentar con datos la Plataforma de Humedales de Chile. Etapa 2018.</p>	
<b>Antecedentes - Evidencias</b>	

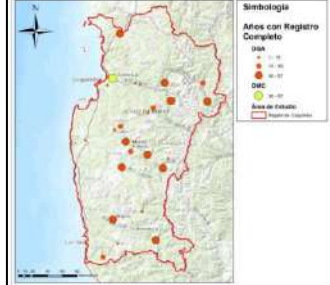
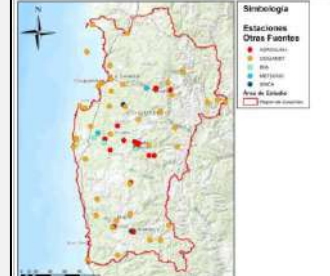
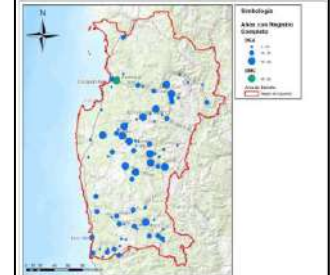

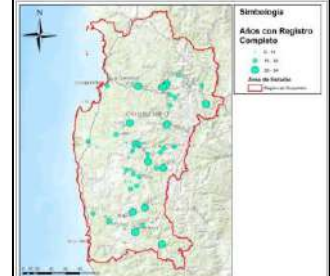
<p>Ubicación de los estuarios y lagos costeros a monitorear durante campaña 2017-2018. Izquierda: sector norte-centro (contemplado el humedal desembocadura río Elqui) y derecha: sector centro-sur</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estuarios y lagos costeros.</p>	
<p><b>Información documento #11</b></p>	
<p><b>Título:</b> Actualización Estudio de Riesgos Bahía de Coquimbo.  <b>Autores:</b> Pontificia Universidad Católica de Chile.  <b>Año:</b> 2017  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> Este estudio aborda la definición de zonas de riesgo de tsunamis, los efectos de licuefacción por actividad sísmica, el deslizamiento en masa, las zonas inundables y quebradas aluvionales, determinando aquellas áreas sujetas a riesgo inminente y potencial, en aquellos territorios donde se concentra la mayor actividad económica y más densificada de la región.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Mapa de profundidad máxima de inundación y velocidad máxima por tsunami para evento 1730-A en la bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Profundidad máxima inundación, Velocidad máxima inundación; Tsunami 1730.</p>	
<p>Mapa de profundidad máxima de inundación y velocidad máxima por tsunami para evento 1730-B en la bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Profundidad máxima inundación, Velocidad máxima inundación; Tsunami 1730.</p>	
<p>Mapa de profundidad máxima de inundación y velocidad máxima por tsunami para evento 1922 en la bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Profundidad máxima inundación, Velocidad máxima inundación; Tsunami 1922.</p>	

<p>Mapa de profundidad de inundación y velocidad en rangos de peligro, 1730-A en la bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Profundidad inundación, Velocidad rangos de peligro; Tsunami 1730.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Profundidad inundación, Velocidad rangos de peligro; Tsunami 1730.</p>	
<p>Mapa de profundidad de inundación y velocidad en rangos de peligro, 1922 en la bahía de Coquimbo.</p>	
<p>Ubicación mareogramas en la bahía de Coquimbo.</p>	<p><b>Tópico:</b> Ubicación mareogramas.</p>
<p>Mapa de tiempos de arribo de tsunamis escenarios 1730-A, 1730-B y 1922.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Tiempo arribo tsunami</p>	

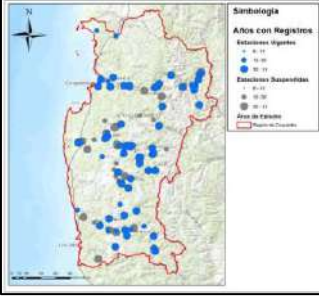
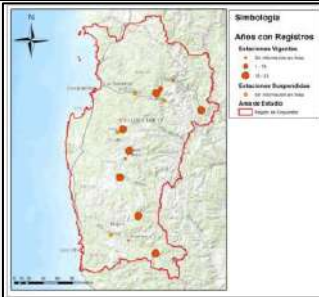
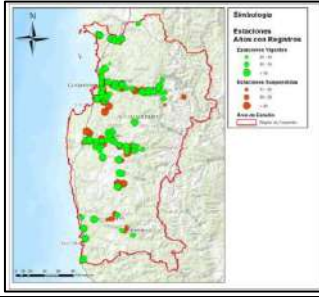

<p>Mapa de variables para modelar licuefacción.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Licuefacción</p>	
<p>Mapa de zonas propensas a amenaza de Licuefacción.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Licuefacción</p>	
<p>Mapa de amenaza de licuefacción para la bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Licuefacción</p>	
<p>Modelo de sombras de la bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Mapa de sombras Bahía Coquimbo</p>	



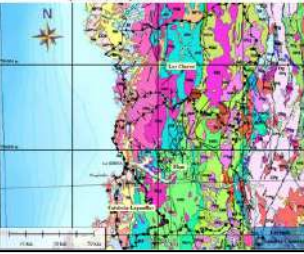

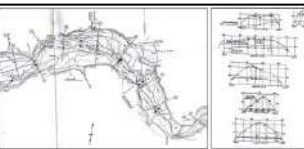

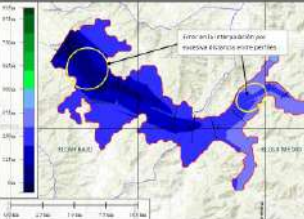
<p>Mapa de resultados de la amenaza de fallas geológicas.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Amenaza fallas geológicas</p>	
<p>Mapa de susceptibilidad de deslizamientos, basado en un modelo GAM.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Susceptibilidad a deslizamientos</p>	
<p>Distribución crecida mayo 2017 del río Elqui en la desembocadura.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Crecida del Río Elqui.</p>	
<p>Mapa de amenaza de Inundación por zonas inundables y quebradas aluvionales.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Amenaza de inundación Río Elqui</p>	
<p>Principales sectores que se inundarían con crecidas entre 10 y 100 años de período de retorno en la desembocadura del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Áreas de inundación Río Elqui</p>	
<p>Mapa de amenaza de Tsunami y Zonas PRC de La Serena y Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Amenaza de tsunami Coquimbo – La Serena ; Plan Regulador Comunal</p>	

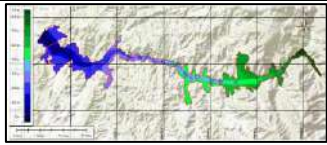
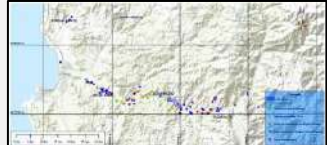
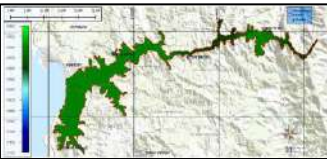
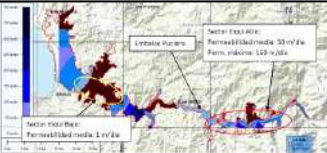
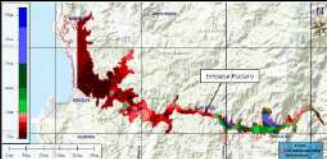
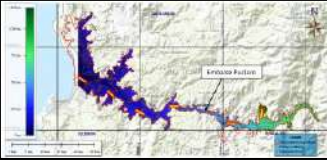



<p>Mapa de amenaza de Remoción en Masa y Zonas PRC de La Serena y Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Amenaza remoción en masa; Plan Regulador Comunal</p>	
<p>Mapa de amenaza de Quebradas Aluvionales y Zonas PRC de La Serena y Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Amenaza activación de quebradas ; Plan Regulador Comunal</p>	
<p>Mapa de amenaza de Licuefacción y Zonas PRC de La Serena y Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Amenaza licuefacción ; Plan Regulador Comunal</p>	
<p>Mapa de vías de evacuación Bahía de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Vías de evacuación</p>	
<p><b>Información documento #11</b></p>	
<p><b>Título:</b> Análisis Instituto Regional Para Gestión De Recursos Hídricos.  <b>Autores:</b> Centro Cambio Global UC.  <b>Año:</b> 2016  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> El objetivo de estudio fue estudiar la factibilidad y diseñar el modelo de gestión de un instituto, que tenga como misión resolver preguntas relacionadas con la gestión y las operaciones hídricas en las cuencas de la Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Antecedentes - Evidencias</b></p>	

<p>Estaciones meteorológicas Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones meteorológicas</p>	
<p>Estaciones con medición de temperatura Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> : Estaciones medición de temperaturas</p>	
<p>Número de años con registro completo para estaciones DGA-DMC a partir de datos de precipitación acumulada diaria. Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones meteorológicas</p>	
<p>Estaciones con medición de precipitación, datos desde otras fuentes. Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones meteorológicas</p>	
<p>Número de años con registro completo para estaciones DGA a partir de datos de caudal diario. Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones medición de caudales</p>	







<p>Estaciones Monitoreo de Calidad de Aguas DGA. Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones monitoreo calidad de aguas</p>	
<p>Estaciones muestreo rutinario de sedimentos DGA. Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones muestreo sedimentológico.</p>	
<p>Estaciones medición niveles estáticos de pozos DGA. Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones mediciones freáticas</p>	
<p>Estaciones monitoreo de nieve y glaciares. Región de Coquimbo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones monitoreo nieves y glaciares</p>	
<p><b>Información documento #12</b></p>	
<p><b>Título:</b> Estudio de la recarga artificial de acuíferos de la provincia del Elqui - Región de Coquimbo.  <b>Autores:</b> Hidrogestión.  <b>Año:</b> 2015  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> El objetivo principal de este estudio es establecer propuestas y soluciones técnicas tipo, para la Recarga artificial de Acuíferos de la Provincia de Elqui, IV Región de Coquimbo, de acuerdo a sus características hidrogeológicas.</p>	
<p><b>Antecedentes - Evidencias</b></p>	





<p>Mapa del área de estudio, acuífero provincia del Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Acuíferos Provincia Elqui</p>	
<p>Red hidrográfica provincia del Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Red hidrográfica</p>	
<p>Mapa geológico del área de estudio.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Geología Región de Coquimbo</p>	
<p>Mapa Hidrogeológico de Chile del sector de estudio.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Hidrogeología</p>	
<p>Perfiles gravimétricos del estudio DAHR-DGA.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Gravimetría Río Elqui</p>	
<p>Trazado de perfiles gravimétricos sobre topografía satelital.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Gravimetría Río Elqui</p>	
<p>DEM preliminar Cota Basamento Impermeable Valle río Elqui - Gravimetría.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Gravimetría Río Elqui</p>	





DEM Cota Basamento Impermeable Valle río Elqui.	
Mapa de pozos analizados acuífero del valle del río Elqui.	
<b>Tópico:</b> Pozos valle río Elqui	
Coeficiente de almacenamiento acuífero río Elqui.	
<b>Tópico:</b> Acuíferos Río Elqui	
Distribución espacial de la permeabilidad del acuífero río Elqui.	
<b>Tópico:</b> Acuíferos Río Elqui	
DEM de profundidad de Niveles Estáticos - Acuífero Elqui.	
<b>Tópico:</b> Acuíferos Río Elqui	
DEM de elevación de niveles estáticos – Acuífero río Elqui.	
<b>Tópico:</b> Acuíferos Río Elqui	
Bocatomas y Canales existentes en el río Elqui.	
<b>Tópico:</b> Acuíferos Río Elqui	
Zonas potenciales de recarga artificial Valle río Elqui.	
Identificación sitios dentro de zonas potenciales en el valle del Elqui.	
<b>Información documento #13</b>	

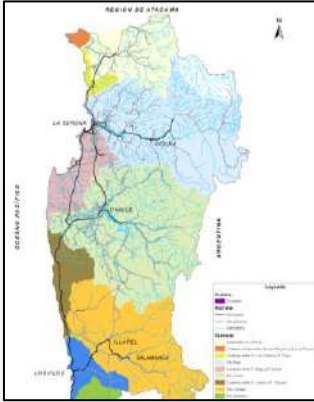
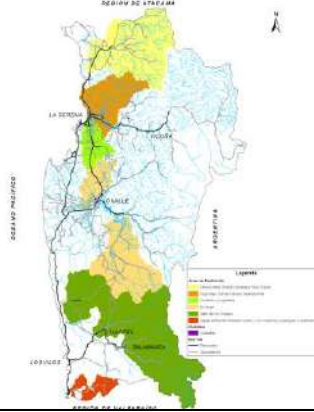

**Título:** Análisis Modelación de Embalses de Precordillera.  
**Autores** Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelamiento de recursos agrícolas y ambientales (PROMMRA).  
**Año:** 2016  
**SIG:** no disponible.  
**Objetivo:** Este estudio se basó en el uso del modelo WEAP-Elqui, WEAP-Limarí y WEAP-Choapa para dimensionar las externalidades provocadas por las múltiples propuestas de embalses de pre-cordillera y otras obras en cada cuenca, para así, establecer los efectos en la seguridad de riego, tal que permitan que los esfuerzos públicos generen una mejor condición global en los territorios, minimizando las externalidades negativas y maximizando la seguridad de riego en su conjunto.

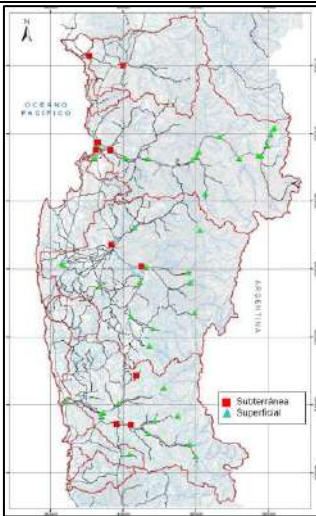
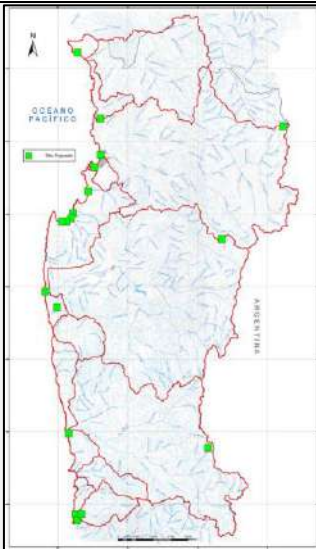

**Antecedentes – Evidencias**

<p>Ubicación de la cuenca del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Cuenca Río Elqui</p>	
<p>Distribución de las estaciones fluviométricas en la cuenca del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones fluviométricas</p>	


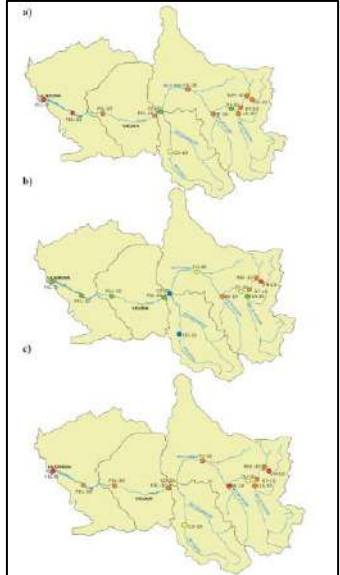
<p>Usos del suelo provincia del Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Usos del suelo provincia del Elqui</p>	
<p>Ubicación de obras alternativas de acumulación en la cuenca del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Cuenca Río Elqui</p>	
<p>Acuíferos analizados en el estudio a lo largo del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Acuíferos río Elqui</p>	
<p>Zona de riego analizadas en el estudio a lo largo del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Zonas de riego</p>	
<p><b>Información documento #14</b></p>	
<p><b>Título:</b> A través del trueque científico fortalezcó los vínculos y promuevo el cuidado del medio ambiente - Capítulo: Línea base de la vegetación del humedal de la desembocadura del río Elqui.  <b>Autores:</b> Ecoterra.  <b>Año:</b> 2016  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> El objetivo del estudio fue describir el estado actual de la vegetación del humedal costero del río Elqui.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	




<p>Mapa de unidades vegetacionales del humedal costero del río Elqui, a partir del monitoreo en campo y de fotointerpretación.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Unidades vegetacionales</p>	
<p align="center"><b>Información documento #15</b></p>	
<p><b>Título:</b> Biodiversidad de aves en humedales costeros urbanos y rurales de la Región de Coquimbo.  <b>Autores:</b> Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).  <b>Año:</b> 2016  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> El estudio consistió en un monitoreo que permitió la comparación de la biodiversidad de aves en los humedales costeros urbanos del río Elqui y Culebrón, y el humedal rural Limarí.</p>	
<p align="center"><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Ubicación geográfica de los sitios de estudio, incluyendo el humedal de la desembocadura del río Elqui.</p>	
<p>Delimitación del humedal del río Elqui, en base a criterios del estudio.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Delimitación humedal.</p>	
<p>Ejemplo de una distribución aleatoria de estaciones de conteo para el humedal del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Ubicación aleatoria estaciones de monitoreo</p>	
<p align="center"><b>Información documento #16</b></p>	
<p><b>Título:</b> Diagnóstico Plan Maestro Para La Gestión de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo.  <b>Autores:</b> CONIC-BF  <b>Año:</b> 2013  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> El objetivo de este estudio es elaborar un Plan Hídrico para la Región de Coquimbo, que constituya un instrumento de planificación que, considerando los efectos agregados de las diversas intervenciones locales, contribuya a orientar las decisiones públicas y privadas, con el fin último de maximizar la función económica, social y ambiental del agua, en armonía con el medioambiente y con condiciones de equilibrio que permitan la sustentabilidad dentro de una visión de corto, mediano y largo plazo.</p>	

<b>Antecedentes – Evidencias</b>	
<p>Área de Estudio. Cuencas Región de Coquimbo</p>	
<p><b>Tópico:</b> Cuencas hidrográficas región de Coquimbo</p>	
<p>Áreas de restricción de nuevas extracciones del recurso hídrico.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Áreas de restricción a extracción de Agua</p>	
<p>Áreas declaradas agotadas para efectos de constitución de nuevos derechos consuntivos y permanentes.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Áreas agotadas para derechos de agua</p>	

<p>Distribución de estaciones de calidad del agua.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Estaciones de Calidad de aguas</p>	
<p>Sitios propuestos de protección ambiental</p>	
<p><b>Tópico:</b> Sitios propuestos de protección ambiental</p>	
<p><b>Información documento #17</b></p>	
<p><b>Título:</b> Censos Nacionales de Aves Acuáticas.  <b>Autores:</b> Servicio Agrícola y Ganadero.  <b>Año:</b> 2012  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> El objetivo central de este estudio consiste en proporcionar información constante y estandarizada que permita obtener datos elementales acerca de las poblaciones de aves acuáticas en las principales zonas de concentración del país.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Área de muestreo del censo.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Áreas de muestreo censo de aves</p>	




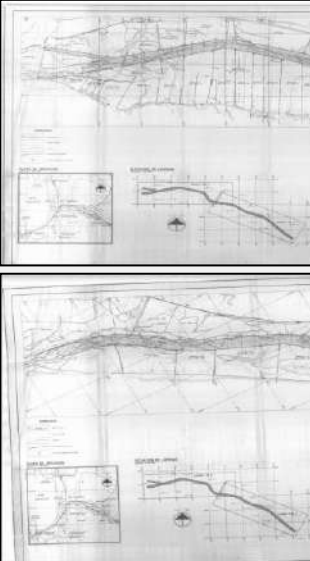



Información documento #18	
<p><b>Título:</b> Línea de base macrofauna bentónica y propuesta de seguimiento ambiental con bioindicadores de calidad de agua en la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo.</p> <p><b>Autores:</b> Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).</p> <p><b>Año:</b> 2011</p> <p><b>SIG:</b> no disponible.</p> <p><b>Objetivo:</b> El objetivo de este documento es establecer la línea de base de comunidades de macroinvertebrados bentónicos en el río Elqui.</p>	
Antecedentes – Evidencias	
Ubicación del área de estudio (cuenca río Elqui) con los puntos de monitoreo del macrobentos.	
<b>Tópico:</b> Cuenca río Elqui	
Mapas de calidad biológica elaborados por cada índice biótico aplicado.	
<b>Tópico:</b> Calidad biológica	
Información documento #19	
<p><b>Título:</b> Los humedales no pueden esperar.</p> <p><b>Autores:</b> Corporación Ambientes Acuáticos de Chile.</p> <p><b>Año:</b> 2005</p> <p><b>SIG:</b> no disponible.</p> <p><b>Objetivo:</b> El objetivo del documento es servir de guía a los principales actores e interesados directos que giran en torno al Sistema de Humedales Costeros de Coquimbo, y en particular, a aquellos de reconocida capacidad para influir en forma significativa e inmediata en el estado y la sostenibilidad a largo plazo de dichos ecosistemas.</p>	
Antecedentes – Evidencias	
Humedal río Elqui, considerando miradores, área sensible y estacionamiento.	

<p><b>Tópico:</b> Humedal río Elqui.</p>	
<p><b>Información documento #20</b></p>	
<p><b>Título:</b> Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Elqui.  <b>Autores:</b> CADE-IDEPE.  <b>Año:</b> 2004  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> Estudio de la cuenca del río Elqui en diversos aspectos tales como: geomorfológicos, caudales, parámetros químicos, entre otros.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Mapa Hidrogeológico de Chile de la DGA que representa las características hidrogeológicas generales de la cuenca del río Elqui.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Hidrogeología</p>	
<p><b>Información documento #21</b></p>	
<p><b>Título:</b> Propuesta de Prototipo de Miradores para Humedal Desembocadura río Elqui.  <b>Autores:</b> Ministerio del Medio Ambiente.  <b>Año:</b> sin fecha.  <b>SIG:</b> no disponible.  <b>Objetivo:</b> Propuesta de miradores para el sendero del Humedal Desembocadura río Elqui, la cual contempla una serie de senderos y plataformas que se emplazan en diferentes tramos y puntos a lo largo del cuerpo de agua.</p>	
<p><b>Antecedentes – Evidencias</b></p>	
<p>Imagen Google Earth la cual destaca el sendero propuesto para las caminatas guiadas y de los posibles sectores a intervenir.</p>	
<p><b>Tópico:</b> Propuesta senderos humedal Río Elqui</p>	

**Tabla °2: Revisión de capas de información.**

Información capa	Descripción	Representación
<p><b>Título:</b> Cartografía propuesta para el reconocimiento del río Elqui como humedal urbano.  <b>Fuente:</b> Ministerio del Medio Ambiente  <b>Año:</b> 2021</p>	<p>Capa shape de la propuesta de delimitación de humedal urbano del río Elqui.</p>	
<p><b>Título:</b> Ortoimagen Satelital Spotmaps con Propiedades Rurales y Suelos Agrológicos, marcos 1750-B y 1751-A, Región de Coquimbo.  <b>Fuente:</b> CIREN  <b>Año:</b> 2021</p>	<p>Capa shape de propiedades Rurales Servicio de Impuestos Internos, Bases de Datos CIREN año 2014.</p>	
	<p>Capa shape de suelos Agrológicos CIREN, año 2021.</p>	
<p><b>Título:</b> Imágenes OneTasking de SkySat  <b>Fuente:</b> Ministerio del Medio Ambiente.  <b>Año:</b> 2020</p>	<p>Imagen satelital de alta resolución del río Elqui.</p>	
<p><b>Título:</b> Plan Regulador Intercomunal, provincia de Elqui, Región de Coquimbo  <b>Fuente:</b> Ministerio de Vivienda y Urbanismo  <b>Año:</b> 2018</p>	<p>Cartografía en PDF del Plan Regulador Intercomunal, provincia de Elqui, Región de Coquimbo</p>	

<p><b>Título:</b> Red Hidrográfica Cuenca río Elqui  <b>Fuente:</b> Biblioteca del Congreso Nacional.  <b>Año:</b> Sin fecha</p>	<p>Capa shape de la red drenes cuenca río Elqui.</p>	
<p><b>Título:</b> Cuenca Hidrográfica del río Elqui  <b>Fuente:</b> Biblioteca del Congreso Nacional.  <b>Año:</b> Sin fecha</p>	<p>Capa shape de la cuenca hidrográfica del río Elqui.</p>	
<p><b>Título:</b> Subcuencas Hidrográfica del río Elqui  <b>Fuente:</b> Biblioteca del Congreso Nacional.  <b>Año:</b> Sin fecha</p>	<p>Capa shape de las subcuencas de la cuenca hidrográfica del río Elqui.</p>	
<p><b>Título:</b> Deslinde de las riberas Norte y Sur del cauce del río Elqui.  <b>Fuente:</b> Ministerio de Bienes Nacionales.  <b>Año:</b> 2009</p>	<p>Imágenes escaneadas de un plano, en donde con fecha 31 de diciembre de 2009 mediante la dictación del Decreto Exento N°1135 del Ministerio de Bienes Nacionales y en virtud de lo dispuesto en el Decreto Supremo 609 de 1978 del Ministerio de Tierras y Colonización, se fija deslinde de las riberas Norte y Sur del cauce del río Elqui, tramo comprendido entre el Km. 0,00 Puente El Libertador hasta 10 Km. aguas arriba, ello individualizado en el plano 04101-1636 C.U.</p> <p>Imagen de Google Earth, no se cuenta con archivo .kmz o .kml.  En trazo de color rojo la propiedad fiscal afectada al uso público (plano N° 04-1-587 C.R.) y en trazo de color amarillo (plano N° 04101-1636 C.U.) el bien nacional de uso público por concepto de fijación de del cauce del río Elqui.</p>	 

## 9.6 CARTOGRAFÍA Y SIG

Cuadro resumen de las capas utilizadas en el SIG del proyecto (Planilla Excel). Fuente: Elaboración propia.

CODIGO GRUPO	N°	NOMBRE CAPA	DESCRIPCIÓN	TIPO	AUTOR	AÑO	
BATIMETRÍA	BXX	1	B01_XYZ_PREL	Puntos de la latitud y longitud de las sondas batimétricas de la batimetría preliminar	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		2	B02_CUERPOAGUA_PREL	Polígono del cuerpo de agua del humedal del Río Elqui del 21-08-2021	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		3	B03_BATIMETRIA_PREL	Capa ráster de la batimetría preliminar del humedal a partir de la interpolación de la capa B01_XYZ_PREL	RÁSTER	Dinámica Costera	2021
		4	B04_CURVASBATI_PREL	Capa lineal de las curvas de batimetría de la capa ráster B03_BATIMETRIA_PREL	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		5	B05_XYZ_FINAL	Puntos de la latitud y longitud de las sondas batimétricas de la batimetría final para la modelación	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		6	B06_CUERPOAGUA_FINAL	Polígono final del cuerpo de agua del humedal del Río Elqui para la modelación	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		7	B07_BATIMETRIA_FINAL	Capa ráster de la batimetría final del humedal a partir de la interpolación de la capa B05_XYZ_FINAL	RÁSTER	Dinámica Costera	2021
CUENCA ELQUI	CEXX	8	CE01_CUENCA_ELQUI	Capa de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Dirección General de Aguas	2021
		9	CE02_DRENES_CUENCA	Capa lineal de los drenes de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Secretaría Ejecutiva SNIT	2022
		10	CE03_SUBCUENCA_ELQUI	Capa de las subcuencas de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Ministerio de obras Publicas	2019

		<b>11</b>	CE04_EMBALSES_ELQUI	Polígono de los embalses ubicados al interior de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Ministerio de Obras Públicas	2017
		<b>12</b>	CE05_ACUIFEROS	Polígonos de los acuíferos de la Cuenca del Río Elqui	VECTOR	Dirección General de Aguas	2022
		<b>13</b>	CE06_GLACIARES	Polígono de los glaciares ubicados al interior de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Dirección General de Aguas	2022
		<b>14</b>	CE07_POZOS	Capa de puntos sobre la ubicación de los pozos catastrados al interior de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		<b>15</b>	CE08_CERROS	Capa de puntos de la ubicación aproximada de los cerros Mamalluca y El Molle	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		<b>16</b>	CE09_EST_METEOROLOGICAS	Capa de puntos de la ubicación de las estaciones meteorológicas localizadas al interior de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		<b>17</b>	CE10_EST_FLUVIOMETRICAS	Capa de puntos de la ubicación de las estaciones fluviométricas localizadas al interior de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		<b>18</b>	CE11_MAPA_SOMBRAS	Capa ráster del sombreado de laderas de la Región de Coquimbo	RÁSTER	Centro de información de Recursos Naturales	2016
		<b>19</b>	CE12_DEM_COQUIMBO	Modelo de Elevación Digital de la Región de Coquimbo	RÁSTER	Centro de información de Recursos Naturales	2016
		<b>20</b>	C13_LINEA_RIBERA	Capa lineal de las líneas de ribera de la desembocadura del Río Elqui a partir de transectos realizados con GPS.	VECTOR	Dinámica Costera	2022
		<b>21</b>	CE14_ESPEJOS_ELQUI	Capa de polígonos de los espejos de agua desde 1977 hasta 2021 digitalizados a partir de Imágenes Google Earth, SAF y SkySat	VECTOR	Dinámica Costera	2021

INFORMACIÓN BASE	IBXX	22	IB01_REGIONES	Capa de los polígonos de las regiones de Chile	VECTOR	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo	2019
		23	IB02_REGION_COQUIMBO	Capa del polígono de la región de Coquimbo	VECTOR	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo	2019
		24	IB03_REGIONES_SINCUENCA	Capa de los polígonos de las regiones de Chile, a excepción de la sección que intercepta con la capa CE01_CUENCA_ELQUI	VECTOR	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo	2019
		25	IB04_LOCALIDADES	Capa de la ubicación aproximada de localidades ubicadas al interior de la cuenca del Río Elqui	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		26	IB05_LIMITES_INTERNACIONALES	Capa lineal del límite internacional de Chile	VECTOR	Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado de Chile	2018
		27	IB06_LIMITES_INTERIORES	Capa lineal de los Límites Interiores de la División Política Administrativa	VECTOR	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo	2021
		28	IB07_RED_VIAL	Red vial de la Región de Coquimbo	VECTOR	Ministerio de Obras Públicas	2021
		29	IB08_ARGENTINA	Polígono de Argentina extraído de una capa de los países del mundo	VECTOR	Oficina Europea de Estadística	2020
		30	IB09_MASK_OCEANO	Polígono con fin estético para cubrir una etiqueta del Mapa Base.	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		MULTIPARAMÉTRICO	MXX	31	M01_XYZ	Puntos de la latitud y longitud de los puntos de muestreo del multipamétrico. Contiene los valores para pH, salinidad y oxígeno disuelto.	VECTOR

TOPOBATIMETRÍA		32	M02_CUERPOAGUA	Polígono del cuerpo de agua del humedal del Río Elqui del 21-08-2021	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		33	M03_O2DISUELTO	Capa ráster de la interpolación de la capa M01_XYZ para la variable de Oxígeno Disuelto	RÁSTER	Dinámica Costera	2021
		34	M04_PH	Capa ráster de la interpolación de la capa M01_XYZ para la variable de pH	RÁSTER	Dinámica Costera	2021
		35	M05_SALINIDAD	Capa ráster de la interpolación de la capa M01_XYZ para la variable de Salinidad	RÁSTER	Dinámica Costera	2021
	TBXX	36	TB00_DELIMITACION_HUMEDAL_CLASF	Capa de polígonos de la delimitación y clasificación del humedal a partir consultoría de la "Delimitación y Caracterización de Usos del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región de Coquimbo"	VECTOR	Corporación Capital Biodiversidad	2021
		37	TB01_DELIMITACION_HUMEDAL	Capa del polígono de la delimitación del humedal de la consultoría de la "Delimitación y Caracterización de Usos del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región de Coquimbo"	VECTOR	Corporación Capital Biodiversidad	2021



		<b>38</b>	TB02_DELIMITACION_HUMEDAL_VEG	Capa de polígonos de la delimitación y clasificación de la vegetación del humedal de la consultoría de la "Delimitación y Caracterización de Usos del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región de Coquimbo"	VECTOR	Corporación Capital Biodiversidad	2021
		<b>39</b>	TB03_MALLA	Malla del modelo numérico de la modelación del humedal	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		<b>40</b>	TB04_CLASIFICACION_VEG	Capa de polígonos de la clasificación del tipo de vegetación del área de modelación del humedal	VECTOR	Dinámica Costera	2021
		<b>41</b>	TB05_MODELO_TOPOBATIME	Capa ráster de la topografía y batimetría del humedal del río Elqui	RÁSTER	Dinámica Costera	2021
		<b>42</b>	TB06_HUMEDAL_URBANO	Capa del polígono de la delimitación preliminar de humedal urbano del Humedal Desembocadura del Río Elqui	VECTOR	Ministerio del Medio Ambiente	2021

Despliegue GEOPACKAGE en QGIS. Fuente: Elaboración propia.

- ▼ GEF\_ELQUI\_QGIS.gpkg
  - ▶ B01\_XYZ\_PREL
  - ▶ B02\_CUERPOAGUA\_PREL
  - ▶ B03\_BATIMETRIA\_PREL
  - ▶ B04\_CURVASBATI\_PREL
  - ▶ B05\_XYZ\_FINAL
  - ▶ B06\_CUERPOAGUA\_FINAL
  - ▶ B07\_BATIMETRIA\_FINAL
  - ▶ CE01\_CUENCA\_ELQUI
  - ▶ CE02\_DRENES\_CUENCA
  - ▶ CE03\_SUBCUENCA\_ELQUI
  - ▶ CE04\_EMBALSES\_ELQUI
  - ▶ CE05\_ACUIFEROS
  - ▶ CE06\_GLACIARES
  - ▶ CE07\_POZOS
  - ▶ CE08\_CERROS
  - ▶ CE09\_EST\_METEOROLOGICAS
  - ▶ CE10\_EST\_FLUVIOMETRICAS
  - ▶ CE11\_MAPA\_SOMBRAS
  - ▶ CE12\_DEM\_COQUIMBO
  - ▶ CE13\_LINEA\_RIBERA
  - ▶ CE14\_ESPEJOS\_ELQUI
  - ▶ IB01\_REGIONES
  - ▶ IB02\_REGION\_COQUIMBO
  - ▶ IB03\_REGIONES\_SINCUENCA
  - ▶ IB04\_LOCALIDADES
  - ▶ IB05\_LIMITES\_INTERNACIONALES
  - ▶ IB06\_LIMITES\_INTERIORES
  - ▶ IB07\_RED\_VIAL
  - ▶ IB08\_ARGENTINA
  - ▶ IB09\_MASK\_OCEANO
  - ▶ M01\_XYZ
  - ▶ M02\_CUERPOAGUA
  - ▶ M03\_O2DISUELTO
  - ▶ M04\_PH
  - ▶ M05\_SALINIDAD
  - ▶ TB00\_DELIMITACION\_HUMEDAL\_CLASF
  - ▶ TB01\_DELIMITACION\_HUMEDAL
  - ▶ TB02\_DELIMITACION\_HUMEDAL\_VEG
  - ▶ TB03\_MALLA
  - ▶ TB04\_CLASIFICACION\_VEG
  - ▶ TB05\_MODELO\_TOPOBATIME
  - ▶ TB06\_HUMEDAL\_URBANO

Despliegue GEODATABASE en ARCGIS. Fuente: Elaboración propia.

- [-] GEF\_ELQUI\_ARCGIS.gdb
  - [\*] B01\_XYZ\_PREL
  - [\*] B02\_CUERPOAGUA\_PREL
  - [+] [grid] B03\_BATIMETRIA\_PREL
  - [+] [line] B04\_CURVASBATI\_PREL
  - [\*] B05\_XYZ\_FINAL
  - [\*] B06\_CUERPOAGUA\_FINAL
  - [+] [grid] B07\_BATIMETRIA\_FINAL
  - [\*] CE01\_CUENCA\_ELQUI
  - [+] [line] CE02\_DRENES\_CUENCA
  - [\*] CE03\_SUBCUENCA\_ELQUI
  - [\*] CE04\_EMBALSES\_ELQUI
  - [\*] CE05\_ACUIFEROS
  - [\*] CE06\_GLACIARES
  - [\*] CE07\_POZOS
  - [\*] CE08\_CERROS
  - [\*] CE09\_EST\_METEOROLOGICAS
  - [\*] CE10\_EST\_FLUVIOMETRICAS
  - [+] [grid] CE11\_MAPA\_SOMBRAS
  - [+] [grid] CE12\_DEM\_COQUIMBO
  - [+] [line] CE13\_LINEA\_RIBERA
  - [\*] CE14\_ESPEJOS\_ELQUI
  - [\*] IB01\_REGIONES
  - [\*] IB02\_REGION\_COQUIMBO
  - [\*] IB03\_REGIONES\_SINCUENCA
  - [\*] IB04\_LOCALIDADES
  - [+] [line] IB05\_LIMITES\_INTERNACIONALES
  - [+] [line] IB06\_LIMITES\_INTERIORES
  - [+] [line] IB07\_RED\_VIAL
  - [\*] IB08\_ARGENTINA
  - [\*] IB09\_MASK\_OCEANO
  - [\*] M01\_XYZ
  - [\*] M02\_CUERPOAGUA
  - [+] [grid] M03\_O2DISUELTO
  - [+] [grid] M04\_PH
  - [+] [grid] M05\_SALINIDAD
  - [\*] TB00\_DELIMITACION\_HUMEDAL\_CLASF
  - [\*] TB01\_DELIMITACION\_HUMEDAL
  - [\*] TB02\_DELIMITACION\_HUMEDAL\_VEG
  - [\*] TB03\_MALLA
  - [\*] TB04\_CLASIFICACION\_VEG
  - [+] [grid] TB05\_MODELO\_TOPOBATIME
  - [\*] TB06\_HUMEDAL\_URBANO