



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 FINAL

Diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del Humedal Costero del Río Elqui, Región de Coquimbo



Junio 2022



Equipos Consultor

Equipo Responsable

Elier Tabilo Valdivieso

Daniela Castillo Rodríguez

César Chávez Villavicencio

Jean François Casale

Solange Vargas López

Equipo Asistente

Víctor Pasten Marambio

Ayim Palma Comparini

Contexto

Este Informe Final cumple con los requerimientos técnicos 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”, quien solicitó realizar el estudio de “**Diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del Humedal Costero del Río Elqui, Región de Coquimbo**”. El presente Informe Final es de autoría de Gesnat Group SpA y su equipo de profesionales.

Agradecimientos

Gesnat Group SpA agradece a los integrantes del Comité Técnico Local del Proyecto GEF Humedales Costeros, quiénes participaron de los talleres aportando información para las metas de este estudio. A la contraparte del proyecto, representada por Carolina Vega, coordinadora del Proyecto GEF Humedales y Claudia Silva, Coordinadora Nacional del Proyecto GEF Humedales Costeros. También agradece a Sergio Troncoso de la Seremi de Medio Ambiente de la región de Coquimbo por el apoyo en la ejecución de este proyecto.

Sugerencia de cita:

MMA-ONU Medio Ambiente 2022. “Diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del Humedal Costero del Río Elqui, Región de Coquimbo”. Elaborado Tabilo E., Castillo D., Chávez-Villavicencio C., Casale J-F., Vargas S. (2022). Ministerio del Medio Ambiente, Coquimbo, Chile. 140 pp.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	4
1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	6
2. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO	7
2.1 Objetivos Específicos, actividades y resultados esperados del proyecto	7
3. METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES POR OBJETIVOS	8
3.1 Metodología y Actividades para Objetivo Específico OE 1.....	8
3.2 Metodología y Actividades para Objetivo Específico OE2.....	11
3.3 Metodología y Actividades para Objetivo Específico OE3:	13
4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL PROYECTO (EJECUCIÓN DE LAS ACTIVIDADES PARA CUMPLIR LOS OBJETIVOS)	15
4.1 OE 1. Caracterizar fuentes emisoras puntuales y difusas en el HCRE	15
4.2 OE2. Diagnóstico ambiental y caracterización actual del HCRE	54
4.3 OE3. Proponer estrategias y acciones para la restauración del HCRE	153
5. CONCLUSIONES	164
6. LITERATURA CITADA	169

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Fuentes de Contaminación HCRE

Anexo 2. Shape Fuentes de Contaminación

(<https://drive.google.com/drive/folders/1nXaETXM1nHcA4g7sOUGDTokxM34oJWN-?usp=sharing>)

Anexo 3. Taller piloto de monitoreo, marzo de 2022

Anexo 4. Indices de calidad biótica HCRE

RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe reporta los resultados finales del Contrato “Diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del Humedal Costero del Río Elqui, Región de Coquimbo” que Gesnat Group SpA ejecutó a solicitud del GEF Humedales Costeros. Este proyecto tuvo por objeto diagnosticar las fuentes emisoras puntuales y difusas del Humedal Costero Río Elqui (HCRE), y proponer un Programa de Monitoreo y medidas para su restauración. Para ello, se caracterizaron parámetros fisicoquímicos del agua de sectores seleccionados, identificando las fuentes de contaminación puntuales y difusas. Además, se elaboró un diagnóstico ambiental y se propuso estrategias y acciones para la restauración del HCRE en un transecto de 40 km aproximados de oriente a poniente.

La calidad ambiental del HCRE varía desde el sector del Almendral hacia la desembocadura. La diversidad de flora y de fauna se hace mayor hacia la desembocadura, pero la calidad del agua del humedal se deteriora en el mismo sentido. Tanto los índices de calidad ambiental a partir de macrofitas e invertebrados, como los análisis de calidad de agua indican un deterioro de las condiciones generales del humedal en su desembocadura. El origen de esta contaminación es variado, desde fuentes antrópica por actividad minera y agrícola, como de origen natural producto del arrastre de sustrato natural producto de las lluvias.

- Las fuentes potenciales de contaminación puntual y difusa fueron identificadas mediante la recopilación de información de diversos estudios, siendo georreferenciada e incluidos en una base de datos espaciales. Con esto se identificó 13 puntos importantes de contaminación, que luego se convirtieron en puntos de muestreo y monitoreo de los impactos potenciales procedentes de fuentes de contaminación puntual y difusa en el tramo terminal del río Elqui, entre el sector del Almendral y la desembocadura.
- Los 13 puntos identificados fueron posteriormente incluidos en la propuesta de Programa de Monitoreo del HCRE. 5 de los 13 puntos presentaron agua superficial y fueron muestreados en dos campañas realizadas en diciembre 2021 y marzo 2022. A pesar de ello, la propuesta del Programa de Monitoreo considera incluir los 13 sitios identificados y descritos en este estudio.
- A través de 3 talleres con el Comité Técnico Local y actores claves se revisaron los parámetros y métodos a incluir en la propuesta del Programa de Monitoreo del HCRE.
- Igualmente, se identificó y caracterizó a los actores claves con potencial de participar en el Programa de Monitoreo y restauración del HCRE. Estos actores claves pertenecen a organizaciones no gubernamentales, organismos públicos, académicos, gremiales, empresas, y de la gobernanza hídrica del río Elqui.
- Se propone un Programa de Monitoreo de parámetros bióticos como flora y fauna terrestre y acuática considerando el contexto paisajístico del entorno del punto de muestreo. Se incluyó, en el cuerpo de agua, fauna macroinvertebrada y vegetación macrófita. Además, de parámetros físicos y químicos del agua y sedimentos y de paisaje del HCRE.

- Las campañas de muestreo de diciembre de 2021 y marzo de 2022 en los componentes bióticos y abióticos permitieron proponer índices apropiados como indicadores de calidad ambiental del humedal.
- Se revisó y sistematizó información de biodiversidad, y de otros parámetros bióticos y abióticos del HCRE y permitió proponer índices de diversidad y determinar el estado trófico del humedal.
- Se identificó a 175 especies de flora vascular, 42 especies de aves, sólo dos especies de reptiles y no identificamos mamíferos nativos a lo largo de las 13 estaciones muestreadas y propuestas para el futuro Programa de Monitoreo.
- Los índices de macrofitas y macroinvertebrados nos indican que el HCRE se encuentra mayormente perturbado y altamente perturbado en la desembocadura por altos niveles de materia orgánica. Sin embargo, Se hacen necesarias más replicas temporales en todos los componentes bióticos y abióticos del Programa de Monitoreo propuesto para poder establecer con mayor certeza la calidad ambiental del HCRE.
- Recomendamos no utilizar el modelamiento trófico como indicador de calidad del humedal, dado que los análisis de laboratorio contratados no lograron entregar certeza de la información de clorofila (mas de 50% de los resultados bajo el umbral de detección), además de tener un costo significativo. Existe una limitación técnica de los laboratorios encargados de realizar estos análisis de clorofila. Intentar obtener registros de clorofila significa un costo elevado y que no se justifica para un programa de monitoreo como el que se propone en esta consultoría. Además, se puede obtener conclusiones igualmente validas utilizando índices de diversidad de macrofitas.
- Los macroinvertebrados son un aporte significativo en un programa de monitoreo, ya que es una técnica ampliamente validada para el río Elqui, y entrega información muy sensible a las variaciones de calidad del humedal.
- Dada la sequía en la región es que se recomienda revisar con un mayor número de replicas los parámetros para estimar calidad de agua y sedimento. Los datos recogidos señalan variabilidad espacial y temporal en los indicadores de agua y sedimento.
- Es posible que el agua esté sedimentando elementos de interés para establecer la calidad del HCRE. Así, por ejemplo, el arsénico (As), cadmio (Cd) y plata (Ag) presentan concentraciones considerables en sedimentos, pero se encuentran bajo o cercanos al limite de detección en el agua del humedal.
- Se propone una estrategia de restauración de cada uno de los 13 sectores identificados y caracterizados, basados en la estrategia de restauración propuesta por Tabilo *et al* (2021), que propone trabajar con proyectos piloto donde poner a prueba procedimientos de restauración temáticos. Cada una de las propuestas de restauración cuenta con una estimación de costos para ejecutar la actividad.
- Existen brechas sobre el conocimiento y la gestión de los temas de contaminación del HCRE que deben ser abordadas, y relacionadas a lo largo del tiempo, y en una escala apropiada, que permitan conocer de buena forma las calidades de agua, sedimentos, fuentes de emisión puntual y difusa, y sus efectos en el sistema natural.

1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El proyecto GEF “Conservación de humedales costeros de la zona centro-sur de Chile, a través del manejo adaptativo de los ecosistemas de borde costero”, busca la conservación y uso sostenible de los ambientes acuáticos costeros, abordando la problemática bajo un esquema de cuencas. Este proyecto se ha enfocado en cinco ecosistemas costeros de la región mediterránea: Humedal Costero Río Elqui (Región de Coquimbo), Humedal de Mantagua (R. Valparaíso), Humedales de Cahuil (R. O’Higgins), Humedal Rocuant-Andalién (R. Biobío) y Humedales del Río Queule (R. Araucanía).

Entre estos humedales costeros de Chile, la bahía de Coquimbo se caracteriza por presentar acuíferos que alimentan una red de humedales, que, con el paso del tiempo se han deteriorado, disminuyendo su superficie, con su consecuente impacto sobre los servicios ecosistémicos que presta. El Humedal Costero del Río Elqui se encuentra inserto en la urbe de la ciudad de La Serena, presenta una gran diversidad de flora y fauna, y constituye una alternativa como solución basada en la naturaleza. Un reciente estudio desarrollado a través del Proyecto GEF Humedales, delimitó ecológicamente el Humedal Costero del Río con una superficie alrededor de 568 ha emplazadas parcialmente en el área urbana de La Serena. Asimismo, identificó los usos de suelo, mapeó las amenazas, identificó la propiedad aledaña y estudió la presencia de cuña salina en su desembocadura (Figueroa *et al.* 2021).

El río Elqui soporta altos niveles de contaminación por arsénico, cobre y plomo (Pizarro *et al.* 2010). A esto se suma que la cuenca del río Elqui concentra una importante industria agrícola que depende de las aguas del río para riego, y un alto número de pasivos ambientales (CENMA 2017). Cabe señalar que, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) está implementando un Programa de Monitoreo y Evaluación de Ecosistemas Acuáticos de Chile desde el año 2011, donde el humedal del río Elqui en su desembocadura es uno de los sitios monitoreados. Asimismo, el Proyecto GEF Humedales Costeros está desarrollando un Programa de Monitoreo Ambiental y Ciudadano de Humedales Costeros, el que está pronto a implementarse en los ecosistemas piloto del proyecto y que levantará información periódica de la salud de estos ambientes. Por otra parte, el MMA a través de su SEREMI está realizando un levantamiento de

la información para establecer una Norma Secundaria de Calidad de Agua para la protección de las aguas superficiales del río Elqui.

Las actividades desarrolladas en la cuenca y en el sector urbano han presionado este ecosistema y las especies que lo habitan, por lo que se hace necesario realizar un diagnóstico ambiental y de fuentes emisoras puntuales y difusas del Humedal Costero del Río Elqui y proponer medidas de restauración. Para dar cuenta del estado ambiental del humedal, se considerará su estado trófico, ecológico, físico y químico, y las fuentes emisoras puntuales y difusas presentes en el humedal. Igualmente, se hace urgente proponer un plan de monitoreo participativo como forma de conocer rápidamente la “salud” del HCRE y tomar acciones prontamente en caso de ser requeridas.

El presente Informe Final reporta las actividades y resultados encontrados para el cumplimiento de los objetivos planteados en el estudio para el GEF HCRE.

2. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Realizar un diagnóstico ambiental y de fuentes emisoras puntuales y difusas del Humedal Costero del Río Elqui y proponer medidas de restauración, región de Coquimbo.

2.1 Objetivos Específicos, actividades y resultados esperados del proyecto

Los objetivos específicos por desarrollar en esta propuesta de consultoría son:

- OE 1) Caracterizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos presentes en la zona baja de la cuenca hidrográfica del Elqui, e identificar las fuentes emisoras puntuales y difusas.
- OE 2) Realizar un diagnóstico ambiental y caracterización del estado actual del Humedal Costero del Río Elqui.
- OE 3) Proponer estrategias y acciones para la restauración del humedal y sus subcuencas aportantes.

3. METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES POR OBJETIVOS

3.1 Metodología y Actividades para Objetivo Específico OE 1

a) Revisión y sistematización de la información disponible sobre calidad de agua y fuentes emisoras de la cuenca (según catastro minero, estudios, bases de datos, etc.), así como de metodologías e índices de calidad ambiental y de aguas debidamente validados. Se consideró además los resultados de las consultorías locales (Figueroa *et al.* 2021, Tabilo *et al.* 2021, Contreras *et al.* 2022). Para efectos del presente estudio, se consideró desde la desembocadura misma del río Elqui hasta el sector de El Almendral (Fig. 1), punto ubicado entre El Molle y la cortina del Embalse Puclaro en un transecto de unos 40 kilómetros lineales aproximados. La Fig. 2 describe la distribución de los actuales sitios donde se realizan distintos monitoreos en el río Elqui, como de las fuentes de amenazas y de emisiones puntuales y difusas del área de estudio. Se construyó una base de datos espacial que describe la posición de cada uno de los puntos de contaminación identificados y caracterizados para esta Consultoría (Fig.1, Tabla 1, Anexo 1 y 2).

b) Revisión y sistematización de información de fuentes emisoras puntuales y difusas de la cuenca baja del río Elqui. Esta revisión se efectuó en base al análisis de documentos e informes, propuestas existentes de monitoreo de calidad de agua y de sedimentos del HCRE. Mas particularmente los relacionados a los estudios relativos a la implementación de la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) de la cuenca del Rio Elqui (CENMA 2017, MMA 2017, 2020a, 2020b, NSCA 2004), a la red de monitoreo ambiental de ecosistemas acuáticos de Chile (CEA 2018, Bioma Consultores 2019), entre otros estudios emergentes durante la fase de revisión bibliográfica (Anexo 1, 2).

Para esta meta fue considerada la Guía NSCA CONAMA (2004), de común acuerdo con la Contraparte Técnica en reunión de inicio del 9 de agosto de 2021. Lo anterior, debido a que la metodología de la última versión de la NSCA (2017, MMA, 2017) requiere información histórica de los parámetros para estimar los valores referenciales en base al percentil 80, y así calcular las categorías (excepción, clase 1 a 4), información que existe para todos los parámetros y en especial para el humedal del Elqui. En consecuencia, se aplicó la Guía NSCA CONAMA (2004)

además de la revisión/complementación con otras normativas internacionales habitualmente utilizadas como referencia: Estados Unidos, Canadá y Francia, además de las NCh 1333 y 409, según corresponda, para ser utilizadas como valores referenciales y sus posteriores categorizaciones. De igual manera, a falta de normativa para sedimentos se utilizó normativa internacional para la aplicación de los indicadores.

c) Proponer y ejecutar un programa de monitoreo del humedal y sus subcuencas aportantes, que considere metodologías validadas a nivel internacional, que integre monitoreo de fondo y superficie y considerará, al menos: caudal, calidad de agua y sedimentos, identificación y caracterización de fuentes emisoras puntuales (según D.S. 90/2000), y caracterización de fuentes de emisión difusa. Para ello, se realizaron talleres con el Comité Técnico Local del Proyecto GEF y otros actores claves para validar la propuesta metodológica como los parámetros a considerar en las dos campañas de levantamiento de información de diciembre 2021 y marzo 2022. Adicionalmente, en el mes de marzo 2022 se realizó un taller de campo con actores claves donde se socializó la propuesta metodológica. Con todos los insumos descritos es que se diseñó un Programa de Monitoreo del HCRE que incluye los puntos de monitoreo, parámetros a considerar en el monitoreo, estacionalidad del monitoreo, metodología de monitoreo, actores propuestos para ejecutar el monitoreo y las necesidades para implementar el monitoreo.

d) Realizar dos campañas de monitoreo según programa definido en la actividad (c) en concordancia con la Contraparte Técnica. Estas campañas de muestreo se realizaron en diciembre de 2021 y marzo de 2022. Dada la sequía que afecta a la región de Coquimbo es que no fue posible realizar los muestreos en épocas representativas de los pulsos hídricos. En cada muestreo se tomaron muestras de agua y sedimento, flora, fauna, macrofitas y macroinvertebrados.

e) Levantamiento de información socio ecológica relevante, a través de entrevistas semiestructuradas y/o encuestas a actores clave. Este levantamiento buscó recopilar información histórica en términos hídricos de la cuenca y su calidad. La pauta guía de la entrevista se realizó en base a dos módulos, el primer módulo respondió al objetivo de conocer la visión pasada, presente y futura de los actores clave respecto al humedal costero del río Elqui,

mientras que el segundo modulo comprendió el objetivo de identificar las formas en que las que los actores clave se podrían vincular al monitoreo ambiental y ciudadano del humedal costero del río Elqui. Para lo anterior, se realizó un taller con el Comité Técnico Local del proyecto GEF y actores claves, que fueron entrevistados utilizando una encuesta electrónica. Con lo anterior es que se definió una lista de actores claves, que debió ser validada y con ello generar la lista definitiva de actores claves que puedan participar del proceso de monitoreo como de restauración del humedal.

f) Caracterización de las fuentes de contaminación puntual y difusa del humedal y sus subcuencas aportantes. Para esto se identificó las fuentes, características, y la calidad y cantidad de su aporte. Las metodologías de caracterización se describen con más detalle en el desarrollo de los resultados del punto (c).

g) Determinar vacíos de información en estos temas para el humedal y sus subcuencas aportantes. En base a antecedentes recopilados durante todas las actividades de ejecución de la Consultoría es que logró evaluar e identificar brechas de vacíos de información relativos a la calidad ambiental y del agua en las subcuencas de estudio.

h) Mapeo cartográfico de la calidad de agua y fuentes emisoras identificadas en las subcuencas. Mapas y cartografías fueron realizados con apoyo del Sistema de Información Geográfica (SIG) Open Source Quantum Gis versión 2.14 o posterior (QGIS Development Team 2017). Las bases cartográficas utilizadas para la confección de dichos mapas fueron ajustadas al Datum World Geodetic System 1984 (WGS 1984), proyección Universal Transversal Mercator (UTM), huso 19 sur. La información cartografía fue producida según las normas cartográficas del Ministerio del Medio Ambiente (SNIT 2017).

i) Desarrollar talleres participativos con el Comité Técnico Local del Proyecto y con otros actores clave, para relevar información e informar sobre los antecedentes relevados. La cantidad y frecuencia de los talleres se organizó con la Contraparte Técnica. Durante la ejecución de la consultoria se realizó tres talleres: Taller 1 el 26 de enero de 2022 para exponer los avances de los estudios en ejecución y recibir retroalimentación por parte del Comité Técnico Local; Taller 2 el día 18 de marzo de 2022 para exponer la propuesta del programa de monitoreo en fase de

diseño, y el Taller 3 y final el 19 de mayo de 2022 donde se hace la presentación de los productos de la presente consultoría y la propuesta de programa de monitoreo.

3.2 Metodología y Actividades para Objetivo Específico OE2:

j) Revisión y sistematización de la información disponible sobre biodiversidad, estado trófico, salud ambiental, contaminación y fuentes emisoras del humedal. Este análisis consideró la información obtenida de los resultados de las consultorías locales (N°01/2020 y N°2/2020 Coquimbo), entre otros insumos. Cabe destacar que, dada la diversidad de Índices de Calidad de Aguas (ICAs) existentes en la literatura (Girardi et al. 2018), se evaluó junto con la contraparte técnica, la factibilidad de calcular un índice de calidad (ICA) aplicable al contexto y set de variables medidas o calculadas durante este monitoreo (**Indicadores de calidad de Agua:** FCh 2018, MMA 2020a, 2020b, NSF 1970, CCME 1999, 2017, García 2012, Espejo *et al.* 2011, Debels *et al.* 2005, CCME 2017, SEQ 2012, ESRD 2014, NCh 409/2005, NCh 1333/1978/1987. **Selección de parámetros y referencias de calidad:** Tabilo *et al.* 2021, NSCA 2004, MMA 2020b, NSF 1970, CONAMA 2004, FCh 2018, CCME 1999, León 1998, SEQ 2012, ESRD 2014, NCh 409/2005, NCh 1333/1978/1987. **Indicadores de calidad de Sedimentos:** Magni *et al.* 2021, Zeng *et al.* 2020, Vivien *et al.* 2020, Cabrera y Ruiz 2017, Águila-Juárez *et al.* 2005, Singh *et al.* 2005. **Selección de parámetros y referencias de calidad:** Oyarzún *et al.* 2021, Oyarzún *et al.* 2016, Oyarzún *et al.* 2012, Castillo 2009, CSQG 1991, OSQG 2008, EPA 2002, CCME 1999b, CCME 2002, Bowen, 1979).

k) Levantamiento de información in situ en el Humedal Costero del Río Elqui sobre calidad de agua (parámetros fisicoquímicos, nutrientes, coliformes, macroinvertebrados, algas, etc.), biodiversidad acuática, entre otros, sobre la base del programa de monitoreo definido en el OE1. Para ello, se tomaron muestras de agua en los puntos del HCRE con presencia de agua superficial, las muestras fueron enviadas para análisis con la empresa Hidrolab utilizando materiales de muestreo proporcionados por la propia empresa. Cada vez que se colectaba la muestra de agua se tomaban datos físico químicos con un equipo multiparámetro. Los análisis de agua incluían parámetros físico químicos, nutrientes y coliformes fecales. En los puntos de

muestreo se realizó muestreo de macrofitas y de macroinvertebrados utilizando la metodología estandarizada para estos temas.

l) Determinar indicadores de calidad de agua del humedal, sobre la base de las actividades de muestreo desarrollados en las actividades 1 y 2 y los resultados obtenidos fueron presentados mediante la generación de figuras, tablas, mapas y otros materiales gráficos pertinentes de apoyo. Los análisis estadísticos de los datos se realizaron en entorno de programación R Stats (R Core Team 2018).

m) Proponer índices de diversidad biológica del humedal. Esta actividad consistió en proponer al Comité Técnico Local, actores claves y la contraparte técnica de la presente consultoría de índices de diversidad biológica, las que fueron revisadas críticamente para finalmente establecer los índices a incluir en el futuro Programa de Monitoreo del HCRE.

n) Determinar estado trófico del Humedal Costero del Río Elqui, sobre la base del programa de monitoreo desarrollado en la actividad 1 (Caracterizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos presentes en la zona baja de la cuenca hidrográfica del Elqui, e identificar las fuentes emisoras puntuales y difusas). Con esto se obtuvieron los valores necesarios para medir el estado trófico a través del Indicador OCDE (Organización de Cooperación Económica y Desarrollo 1982), ampliamente usado por su versatilidad y facilidad de cálculo. Este indicador del estado trófico basa sus valores en las concentraciones de clorofila "a" (ug/l), fósforo (Ug/l) y transparencia.

o) Desarrollar modelo trófico del Humedal Costero del Río Elqui. La metodología se describe en el punto n).

p) Determinar calidad de agua y estado ambiental actual del Humedal Costero del Río Elqui, sobre la base del programa de monitoreo desarrollado en el OE1 y cálculo de los índices desarrollados en las actividades 1 a 6 del presente OE. Para ello, se colectó muestras de agua y de sedimentos según la metodología estándar para estos estudios. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio Hidrolab de Santiago.

q) Mapeo cartográfico de calidad de agua del humedal según índices aplicados anteriormente. Se incorporaron los resultados de los índices y parámetros de calidad medidos en una base de datos georreferenciada para poder incorporarlos en un Sistema de Información Geográfica, y de

esta forma se generaron productos cartográficos que permitieron visualizar la distribución espacial de la calidad en las subcuencas consideradas. Mapas y cartografías fueron realizados con apoyo del Sistema de Información Geográfica (SIG) Open Source Quantum Gis versión 2.14 o posterior (QGIS Development Team 2017). La base cartográfica utilizada para la confección de dichos mapas fue ajustada al Datum World Geodetic System 1984 (WGS 1984), proyección Universal Transversal Mercator (UTM), huso 19 sur.

r) Desarrollar talleres participativos con el Comité Técnico Local del Proyecto y con otros actores clave, para relevar información y/o informar sobre los antecedentes relevados. Se desarrollaron dos talleres, acordados con la contraparte técnica. El primer taller fue desarrollado el 26 de enero de 2022 y el taller final el 19 de mayo de 2022. A petición de la contraparte técnica es que Gesnat desarrolló un tercer taller el 18 de marzo pasado para actores claves y con el objeto de hacer una demostración del programa de monitoreo propuesto para el HCRE.

3.3 Metodología y Actividades para Objetivo Específico OE3:

s) Identificación de actores clave para la restauración del humedal y sus subcuencas aportantes, en términos de calidad de agua y fuentes emisoras. Se utilizó un muestreo estructural y por saturación para la selección de actores clave (Canales, 2006; Martínez-Salgado, 2011) con el fin de abarcar la participación de los distintos actores, junto con lo cual se utilizaron 4 criterios: que participaran de alguna organización que hiciera uso del humedal, desarrollaran estudios o investigaciones asociados a su biodiversidad o uso, tuvieran incidencia en el ordenamiento del mismo o correspondieran a algunas de las actividades que hacen uso del humedal o impactan en el último tramo de la cuenca del río Elqui. Se categorizó a los actores a partir de los siguientes criterios: (i) organizaciones ambientalistas, (ii) organizaciones por rubro o actividad, (iii) organizaciones de gobernanza hídrica, (iv) organizaciones del sector público a nivel central, (v) organizaciones del sector público a nivel local, (vi) empresas, y (vii) organizaciones dedicadas a la investigación.

t) Elaborar propuestas de medidas de restauración para el humedal y sus subcuencas aportantes. Estas medidas se entienden como de: reducción de impactos, remediación,



rehabilitación y/o restauración. Para esto, se consideró aspectos de urgencia, temporalidad, metodología, potenciales alianzas y factibilidad de implementación, considerando costos, tenencia de la tierra, entre otros. Para esta meta se siguió las propuestas de restauración de Tabilo *et al.* 2021 sobre el plan de restauración del HCRE.

u) Estimación de costos de implementación de las medidas propuestas para implementar el plan de restauración.

v) Análisis e identificación de brechas de información (ajuste de información al territorio). En base a toda la información colectada para esta consultoría es que se generó un análisis de la información disponible, pudiendo identificar brechas de información. Se proponen una estrategia a seguir para cerrar la brecha y un estado esperado para la información revisada.

w) Presentación de la propuesta ante el Comité Técnico Local y otros actores claves por medio de talleres participativos. Esta actividad final se realizó el 19 de mayo de 2022 donde Gesnat pudo dar a conocer los resultados finales del estudio contratado.

Dada la dinámica en la ejecución de las actividades propuestas en la consultoría, es que se exponen los resultados agrupados temáticamente. Igualmente, y por las mismas razones, los resultados han incluido descripción mas detallada de la metodología utilizada para desarrollar cada punto de esta Consultoría.

4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL PROYECTO (EJECUCIÓN DE LAS ACTIVIDADES PARA CUMPLIR LOS OBJETIVOS)

4.1 OE 1. Caracterizar fuentes emisoras puntuales y difusas en el HCRE

Actividad a) y b). Revisión, sistematización agua y fuentes emisoras puntuales y difusas (Anexo 1 y 2).

Se revisó y sistematizó la información disponible sobre calidad de agua y fuentes emisoras en la cuenca baja del río Elqui (catastro minero, diversos estudios y bases de datos sectoriales), así como de metodologías e índices de calidad ambiental y de agua (**Actividad a**), fuentes emisoras puntuales y difusas de la cuenca baja y del río Elqui (**Actividad b**). La cuenca baja del río Elqui, para efectos del presente estudio, se consideró desde la desembocadura misma del río Elqui hasta el sector de El Almendral (Fig. 1), entre El Molle y la cortina del Embalse Puclaro (transectos de unos 40 kilómetros lineales aproximados). La Fig. 2 describe la distribución de actuales sitios donde se realizan distintos monitoreos en el río Elqui, como de fuentes de amenazas y emisoras puntuales (**Actividad f**) y difusas del área de estudio (40 kilómetros lineales aproximados). Esta figura corresponde a la **letra h** del proyecto. La base de datos espacial describe la posición de cada uno de los puntos de contaminación identificados y caracterizados para esta Consultoría (Fig.1 y Tabla 1).

Fuentes de contaminación difusas identificadas (Anexo 1 y 2).

Áridos

Tal como se detalla en el Informe Final N° 701 (2021) en el que la Contraloría General de la República informa respecto a las irregularidades respecto a la extracción de áridos en La Serena, algunos de los problemas que se generan respecto a esta actividad corresponden a la extracción ilegal de áridos en bienes fiscales, a la extracción superior a las autorizaciones otorgadas por el municipio, a la falta de fiscalización y cobro de multas por parte del municipio, asociadas a la infracción al cumplimiento de la Ordenanza de Extracción de Áridos, y a irregularidades asociadas a las patentes comerciales de las empresas que extraen y/o comercializan áridos y al incumplimiento del reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, SEIA, el cual

establece que las extracción igual o superior a 100.000 m³ o que abarcan una superficie igual o mayor a 5 ha debe ser sometida a evaluación de impacto ambiental. En este sentido, se detectó la extracción ilegal de bienes fiscales en el Fundo El Olivar, desde aproximadamente el año 2004, con un volumen extraído estimado de 478.167 m³, y asimismo se identificaron dos situaciones de extracción ilegal en el predio de la empresa IVOCAR, en un terreno particular en las cercanías al puente Altovalsol, con volúmenes de extracción de 103.252 m³ y 107.457 m³, respectivamente. Respecto a esto, los efectos ambientales de la explotación de áridos en la cuenca son la alteración del hábitat en la fase de explotación, asociado al impacto visual, así como a la pérdida de vegetación y fauna, lo cual se suma a la modificación de los cauces y el consecuente daño a la biodiversidad. Esta información se complementó con la inclusión de información georreferenciada a partir de fotointerpretación y datos brindados por el municipio de La Serena.

Basurales/ microbasurales

La disposición no autorizada de desechos en el humedal del río Elqui se genera mayoritariamente en la parte baja de la cuenca, donde son dejados objetos viejos, muebles y electrodomésticos en la orilla del humedal, así como también son depositados escombros y tierra sobre la vegetación azonal por parte de empresas constructoras. Dentro de un estudio realizado por la ONG Ecoterra (2016) en la que se realizó un monitoreo de la basura presente en las riberas del río Elqui entre el antiguo puente fiscal y la desembocadura se identificaron 45 basurales con un total de 10,6 hectáreas de terreno cubierto de basurales y microbasurales, la mayoría de ellos ubicados en los accesos del humedal. En el mismo estudio, se mencionan tres tipos de basurales identificados en torno al humedal del río Elqui: basurales compuestos por residuos domiciliarios, los cuales varían en su tamaño, basurales conformados por residuos orgánicos asociados a la poda de cultivos, y basurales constituidos por residuos de actividades de construcción, estos son los de mayor tamaño y presentan escombros y otros residuos de alto riesgo como solventes y objetos cortantes. Otro estudio a escala regional sobre residuos domiciliarios, generó para la comuna una base de datos georreferenciada de microbasurales, identificando mas de 130 focos (CRDP 2020). Con los datos georreferenciados de ambos estudios, se integró en la base de datos de fuentes difusas para el área de estudio.

Agricultura

De acuerdo al Censo agropecuario de 2007 la cuenca del río Elqui posee una superficie cultivada de 23.000 ha de las cuales 20.479 ha corresponden a cultivos anuales y permanentes, mientras que el resto son praderas sembradas. En el área de estudio se presentan terrenos agrícolas en planicies aluviales y terrazas aluviales. De las 23.000 ha de la superficie cultivada el 75% (17.250 ha) se encuentra aguas abajo del embalse Puclaro. Estos cultivos son principalmente de frutales y hortalizas, los métodos de riego más utilizados son riego por tendido, por surcos, aspersión, microaspersión y por goteo, siendo el agua transportada mediante canales de regadío. En su paso los canales son contaminados con residuos domésticos y fecas, además de fertilizantes, generándose una proliferación de algas debida a la eutrofización de las aguas en el canal Bellavista. Los fertilizantes han afectado la concentración de nitratos en las aguas subterráneas, mientras que debido a la ausencia de control en el uso de agroquímicos existen algunos compuestos asociados que podrían estar sobre las normas de calidad como el carbofurano, trifularina y clorotalonil (Dattwyler 2008).

Pasivos mineros (relaves)

Se identifican múltiples puntos de disposición de pasivos ambientales en el área de estudio, principalmente pasivos mineros, en base a catastros de faenas y depósitos y geoquímica de relaves (SERNAGEOMIN 2015, 2020) pudiendo asociarse a 3 áreas en general; al suroeste de la subcuenca Río Elqui Bajo en la localidad de Andacollo, al noroeste del Río Elqui en las subcuencas del Río Elqui Medio y Río Elqui Bajo, y en la ribera del río Elqui en las subcuencas del Río Elqui Medio y Río Elqui Bajo. Algunas de las empresas mineras que depositan sus relaves en el último tramo mencionado corresponden a SLM El Inca, CIA. Minería Reserva, Minera Linderos, Beltrán del tránsito Pizarro, Minera Condor S.A, CIA. Minera Delirio EIRL, Faisal Harcha y SLM Las Rojas. Así mismo se registran relaves mineros en la cuenca del Río Elqui, entre la Quebrada Marquesa y Quebrada Santa Gracia, así como entre la Quebrada Santa Gracia Entre Junta Quebradas Potrerillos, San Antonio y Río Elqui. Estos pasivos mineros corresponden a relaves de Mina Bianca, Planta San Cristóbal, Planta Pajonales y Planta Lambert (CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda, 2013). Lo anterior, es un dato relevante para la gestión de

riesgo de desastres, considerando que se ya se han registrado eventos de remoción en masa en la subcuenca de la Quebrada de Marquesa en las localidades de Viñita y El Sauce. Además, las crecidas que experimenta esporádicamente la quebrada de Marquesa, junto a los ríos Turbio y Elqui contribuyen con la deposición de material en zonas aledañas, generando el desborde del cauce. Durante el evento registrado en marzo de 2015 se generaron flujos de barro y detritos en la Quebrada de Marquesa, los cuales afectaron a las localidades de Viñita y El Sauce (Opazo, Escudero y Neira, 2017). Algunos canales de regadío han sido afectados por sedimentación proveniente de los tranques de relaves en la quebrada de Marquesa en los años 1997 y 2002, depositándose sedimentos en los campos regados por dichos canales, afectando su producción (Dattwyler 2008).

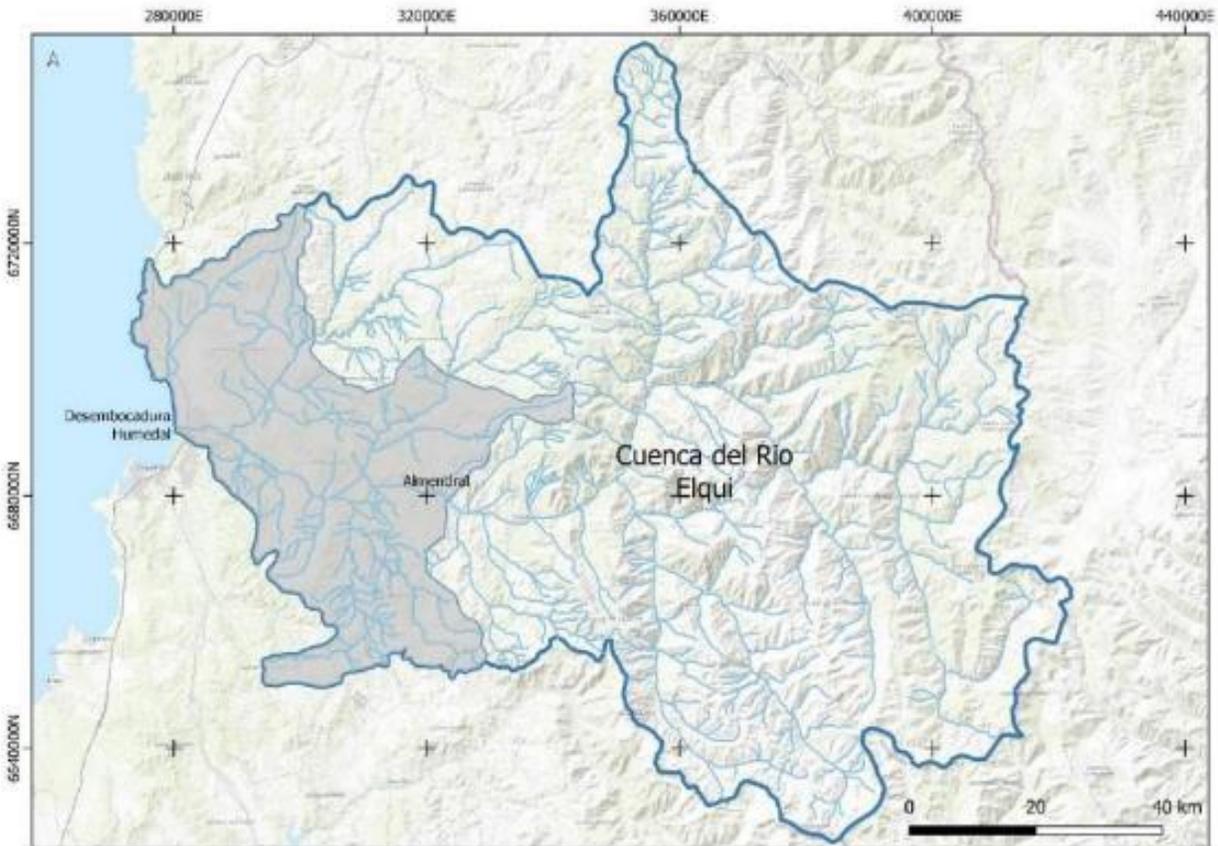


Figura 1. Área de trabajo del proyecto en la cuenca baja del río Elqui, entre la desembocadura y el sector El Almendral (entre El Molle y la cortina del embalse Puclaro). Fuente: elaboración propia

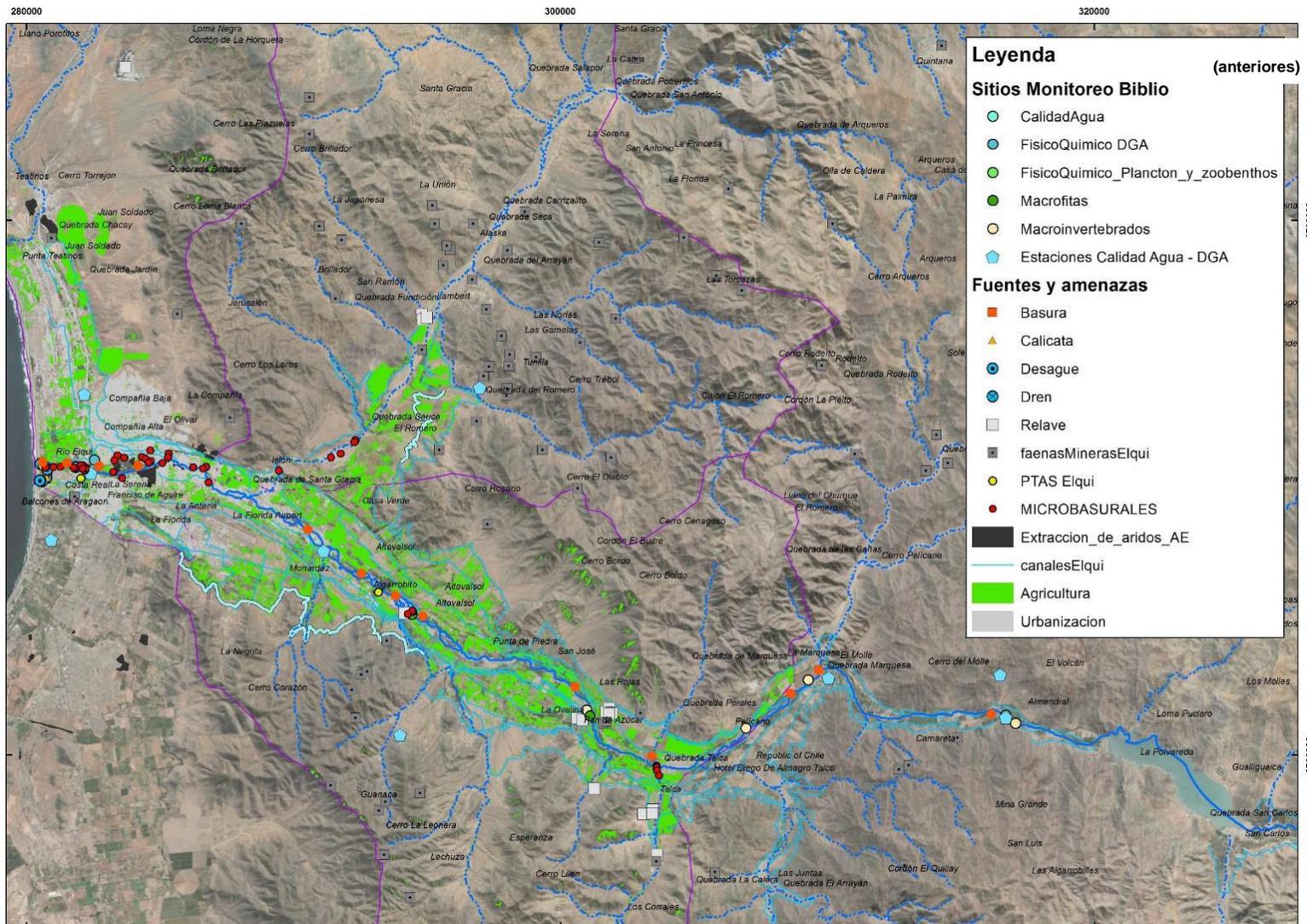


Figura 2. Distribución espacial de los criterios de monitoreo y fuentes de contaminación puntual y difusa del HCRE (**letra f**). Fuente: Elaboración propia.

Actividad c) Proponer un Programa de Monitoreo del HCRE y f) Caracterización de las fuentes de contaminación puntual y difusa del HCRE.

Fundamentos de un Programa de Monitoreo de Humedales

El proyecto GEF “Conservación de humedales costeros de la zona centro-sur de Chile, a través del manejo adaptativo de los ecosistemas de borde costero”, busca la conservación y uso sostenible de los ambientes acuáticos costeros, abordando la problemática bajo un esquema de cuencas. El fortalecimiento de los marcos políticos, regulatorios, capacitación y actividades pilotos en estos ecosistemas son parte de los componentes claves del proyecto. La implementación de una red de monitoreo público privada en las cuencas pilotos como el HCRE es parte de las actividades claves (www.gefhumedales.mma.gob.cl).

El monitoreo ha sido definido como “el proceso para medir el cambio en las condiciones ecológicas de cualquier humedal durante un cierto período de tiempo” (Ramsar 2021). La percepción de los cambios ecológicos en un humedal depende del conocimiento de las condiciones del sitio a lo largo del tiempo. Este monitoreo requiere de información de referencia o “base” para medir los cambios. Debe existir un punto en el pasado contra el cual establecer las comparaciones de la situación presente. Esta información es proporcionada por el inventario del humedal. Pero, además, el monitoreo nos permite evaluar el efecto de las acciones de manejo en un humedal. Por ejemplo, tenemos un área protegida, y hemos diseñado un plan de manejo con una serie de acciones para mejorar el hábitat para las aves acuáticas. Necesitamos saber si las acciones diseñadas han producido el efecto deseado sobre la población de aves acuáticas. En este caso, el monitoreo nos puede ayudar a establecer si hemos sido exitosos con nuestras acciones o hemos fracasado (Tomás Vives 1996).

Los objetivos del monitoreo son “detectar los cambios en las “condiciones ecológicas” en un monitoreo regular. Esto permite identificar a tiempo posibles efectos perjudiciales hacia los valores y las funciones de los humedales, a fin de tomar medidas preventivas y correctivas”. Las “condiciones ecológicas” de un humedal se definen como: “la suma de sus funciones, productos y atributos que se derivan de los componentes biológicos, químicos y físicos propios del ecosistema y sus interacciones”. “El cambio en las condiciones ecológicas ocurren como resultado del desarrollo tecnológico, la contaminación u otras interferencias humanas en los

componentes biológicos, químicos y/o físicos del ecosistema y/o en las interacciones entre ellos, en un grado tal en que se produce la reducción y/o el continuo desequilibrio en cualquiera de las funciones, productos y atributos que definen los beneficios del humedal (Tomás Vives 1996).

Principales cambios ecológicos en los Humedales (Tomás Vives 1996).

- Cambios en el área, tamaño del humedal
- Construcción de caminos en y alrededor del humedal
- Conversión del humedal para agricultura, industria, urbanización
- Cambios en el régimen hídrico de la cuenca
- Represas (irrigación, hidroeléctricas, atrapa sedimentos)
- Extracción de agua del humedal
- Extracción de aguas subterráneas en y alrededor del humedal
- Cambios en el régimen hidrológico del humedal
- Drenaje y canalización en y alrededor del humedal
- Cambios en la calidad de las aguas del humedal
- Descarga en el humedal de aguas industriales, urbanas, domésticas, residuos de acuicultura
- Exceso de nutrientes agrícolas que llegan al humedal
- Agroquímicos en el humedal por la actividad agrícola
- Salinización de agua superficial y subterránea en y alrededor del humedal
- Cambios de uso en la cuenca por deforestación y erosión
- Cambios de la conexión con el mar deteriora la barrera, apertura en la boca de las lagunas naturales y artificiales
- Explotación no sustentable de los productos del humedal
- Introducción de especies foráneas en el humedal.

Tipos de indicadores del monitoreo de un Humedal

Un indicador es una variable que puede ser medida para caracterizar un ecosistema, y que asumimos es importante para este ambiente. Seis tipos de indicadores pueden ser reconocidos en un ecosistema (Noss 1990):

- indicadores de composición, relativos a tipos de paisajes, comunidades, poblaciones, especies.
- indicadores estructurales, que describen el ensamble de los elementos físicos de un ecosistema: paisaje, hábitat, especies, población, variación genética, etc
- indicadores funcionales, que describen procesos en el ecosistema: régimen hídrico, ciclo de nutrientes, interacciones inter-específicas, flujo de genes, flujo de materia, etc.
- Indicadores físicos y biológicos
- Indicadores físicos: proporcionan información del manejo implementado en un humedal, o de las causas de estrés del ecosistema (área de la superficie de agua, flujos de agua, contaminación, sedimentación, etc.). Algunos buenos indicadores usados son el nivel de agua, salinidad, sólidos suspendidos. Importantes indicadores físicos están relacionados con el ciclo de nutrientes y la contaminación.
- Indicadores biológicos: el rango de indicadores es enorme, desde el nivel de paisaje hasta el nivel molecular. Pero pueden ser indicadores del valor del humedal como ecosistema (e.g. bioindicadores), o valores económicos (recursos) del humedal

A partir de lo anterior, es que para el Humedal Costero Río Elqui se propuso ejecutar un programa de monitoreo del humedal y sus subcuencas aportantes.

El enfoque principal de este programa de monitoreo es que fuera representativo del contexto y replicable en el tiempo para establecer un sistema de alerta y vigilancia que permita detectar o anticipar impactos que afectan la salud de un ecosistema con suficiente resolución espacial (territorial) y temporal (años, décadas) (Steven *et al.* 2005) (ver Fig. 3). Para ello varios elementos claves fueron considerados, tanto desde una perspectiva técnica como de gestión y logística:

- Ubicación de puntos representativos de las potenciales fuentes puntuales y difusas distribuidos a lo largo del área de estudio (puntos de control).
- En cada punto de control, medir un conjunto de parámetros optimizados, como insumos brutos o derivados en índices sintéticos que permiten establecer un diagnóstico en base a valores umbrales o gradientes de condiciones (idealmente respaldados por normas establecidas).
- Establecer una frecuencia adecuada para medir los parámetros establecidos con mínimos que permitan comparación territorial y temporal, acorde a la dinámica del ecosistema y la complejidad del contexto territorial y sus factores contribuyentes. La frecuencia debe considerar la variabilidad y patrones temporales reconocidos para el contexto propio de la cuenca a considerar (estacionalidad, frecuencia de los eventos extremos, etc.).
- Articulación y coordinación de los actores claves identificados e involucrados en las actividades de monitoreo, con las respectivas responsabilidades y roles.



Figura 3. Esquema del diseño del programa de monitoreo para el HCRE.

Diseño de los puntos de muestreo del programa de monitoreo.

Número de sitios y ubicación

La selección de los puntos de muestreo para el programa de monitoreo se basó en un proceso sistemático (Varekar *et al.* 2015). Se trabajó privilegiando el enfoque Sanders (Sanders *et al.* 1983) para considerar la configuración topológica de las subcuencas junto con las zonas pre-impacto y post-impacto (fuentes puntuales y difusas) en una lógica de diseño de tipo BACI (Underwood 1994), buscando optimizar también según criterios de resolución espacial y tamaño del muestreo adecuado para el tramo considerado.

La presente propuesta se estableció considerando los siguientes elementos y criterios:

- Fuentes puntuales abarcadas según esquema tipo BACI: sitios de control antes y después de la fuente detectada, es decir pre y post impacto.
- Fuentes difusas detectadas considerando los usos del suelo y agua junto con diversos pasivos ambientales¹ (agricultura intensiva, posibles puntos de drenaje ácido, zonas de extracción de agua y recargas como pozos y canales, sectores de uso recreativo intensivo, sectores de extracción de áridos, etc.).
- En coherencia (presencia de sitios o estaciones de monitoreo ya establecidas) con otras propuestas, estudios o redes de monitoreo a escala de la cuenca.
- Accesibilidad

De lo anterior, es que hemos propuesto un total de 13 puntos de monitoreo del HCRE, desde la desembocadura hasta el sector de El Almendral, en un transecto lineal de aproximadamente 40 kilómetros a lo ancho de la cuenca del río Elqui, provincia de Elqui, región de Coquimbo (ver Fig. 4).

Tabla 1 describe en detalle cada uno de los 13 puntos de monitoreo del HCRE propuestos por este estudio. Adicionalmente, esta Tabla caracteriza las fuentes de contaminación puntual y difusa asociadas a cada uno de los puntos del humedal y sus subcuencas aportantes (**Actividad f**).

¹ Todas las potenciales fuentes difusas detectadas están incluidas en la base de datos y georreferenciadas para su uso en SIG y análisis espaciales (**ver Anexo 2**).

Propuesta de sitios de monitoreo del HCRE

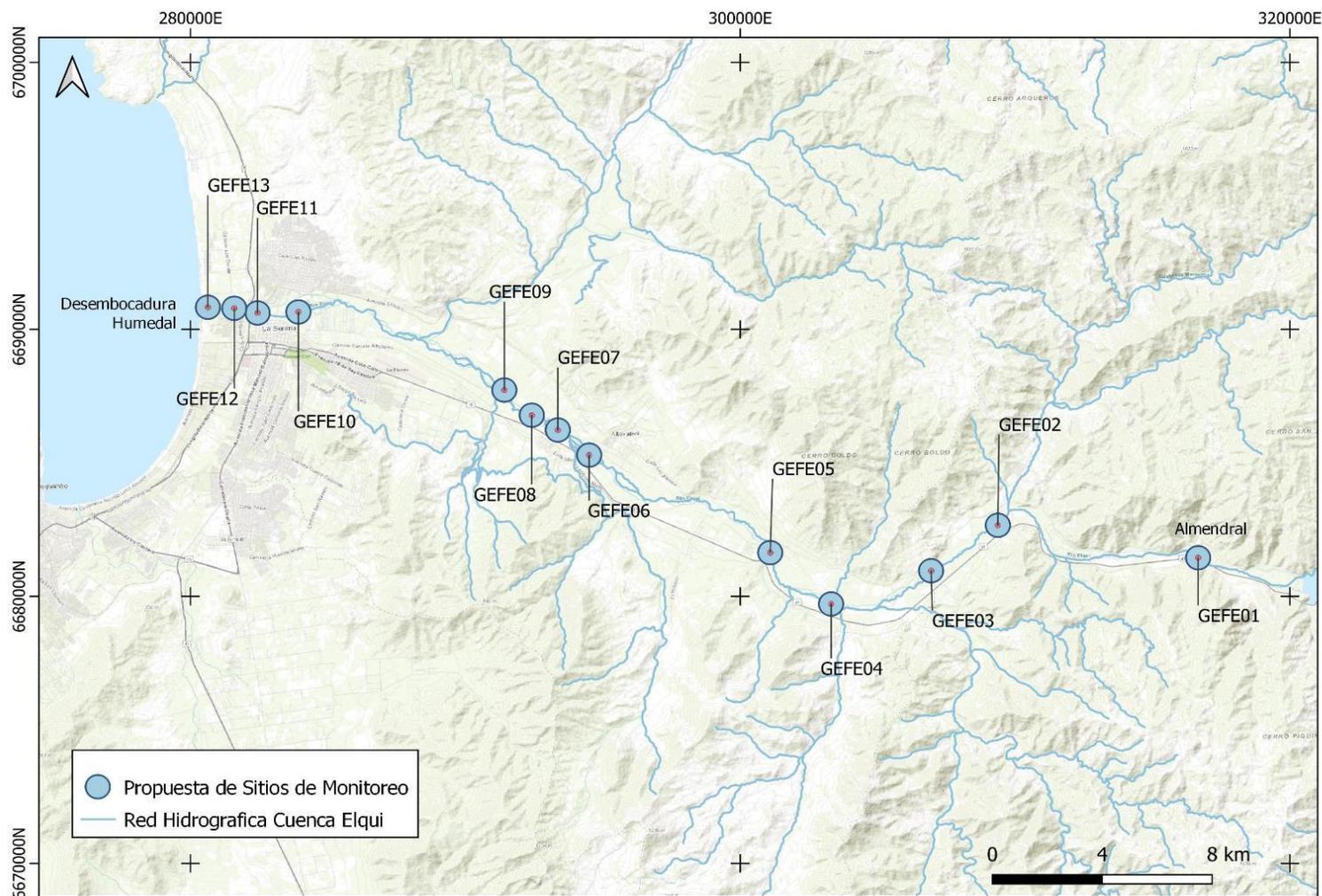


Figura 4. Ubicación de los sitios de monitoreo propuestos para el Programa de Monitoreo del HCRE. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Propuesta de puntos de muestreo o monitoreo para el HCRE. Incluye caracterización de las fuentes de contaminación puntual y difusa del humedal y sus subcuencas aportantes (**letra f**). Incluye los parámetros evaluados en los dos muestreos realizados y que permitieron seleccionar los parámetros definitivos a proponer en el Programa de Monitoreo de HCRE. Fuente: elaboración propia

ID_SITIO	Nombre	Parámetros	justificación	Comentario	coord. UTM N	coord. UTM E	Altitud (msnm)
GEFE01	Río Elqui en Almendral	FQ*1, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Sitio referencia sistema lótico	En estación DGA existente. Se complementará de esta forma los datos de monitoreos con las variables de esta estación. Quebrada Marquesa es efímera, pero de suma importancia durante	316664,7564	6681445,159	401,04
GEFE02	Río Elqui aguas abajo Quebrada de Marquesa	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Aportes Quebrada Marquesa, fuentes difusas pasivos mineros y agricultura	peaks de pulsos altos (aluviones). Se propone tomar muestras ante este escenario lo mas pronto que sea factible realizar (24 horas)	309376,6185	6682660,939	310,99
GEFE03	Río Elqui en puente Pelicana	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Fuentes difusas de pasivos mineros (relaves)	Sitio muestreo de Macroinvertebrados. estudio UCN 2017	306946,0399	6680957,473	283,77
GEFE04	Río Elqui aguas abajo Quebrada de Talca	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Fuentes difusas pasivos mineros de Quebrada de Talca (relaves) y agricultura (2 canales de regadío en riberas sur y norte vierten en el Río); morfología natural del cauce muy intervenida	Aportes de afluentes Qda. Talca y Qda. El Arrayan	303307,2044	6679712,91	237,8
GEFE05	Río Elqui en puente Las Rojas	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Fuentes difusas pasivos mineros (relaves) y agricultura	Aguas arriba de la planta de Aguas del Valle; Sitio muestreo Macroinv. UCN 2017 (EL-16) y Macrofitas de Urrutia et al. 2019 (RELR)	301092,1757	6681636,505	202,5



GEFE06	Rio Elqui aguas arriba puente Altovalsol	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Aguas arriba fuente difusa de pasivo minero (relave abandonado)	294504,0026	6685289,405	122,14
GEFE07	Rio Elqui aguas arriba PTAS*2 Algarrobito	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	fuentes difusas de pasivos mineros (relaves y faenas), aguas arriba impacto PTAS	293364,4338	6686228,797	109,53
GEFE08	Rio Elqui aguas abajo PTAS Algarrobito	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Aguas abajo impacto PTAS	292415,8834	6686783,535	97,14
GEFE09	Rio Elqui aguas arriba Pozo Alfalfares	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Antes corte de continuidad del cauce natural	291416,6346	6687727,179	84,48
GEFE10	Rio Elqui en Puente Zorrilla	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Donde se devuelve agua superficial al cauce natural, impactos de fuentes difusas urbanización, extracción de áridos, basurales	283923,0865	6690651,495	17,74
GEFE11	Rio Elqui en puente fiscal	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Estación DGA existente; sitio Macrofitas (RELS)	282437,4603	6690611,917	12,48
GEFE12	Rio Elqui aguas arriba laguna costera	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	último punto del sistema lotico, aguas abajo PTAS Serena	281588,9984	6690787,236	5,45
GEFE13	Humedal en desembocadura	FQ, Metales, Biológicos, Ecológicos, Hidromorfológicos	Fuente puntual, descarga emergencia Aguas del Valle	Sitio BIOMA 2019 280629,6541	6690826,813	4,52

Q: parámetros fisicoquímicos; *2PTAS: Planta de tratamiento de aguas servidas.

Se realizó la medición de parámetros físico-químicos, biológicos, ecológicos, hidromorfológicos y de metales en 5 de los 13 puntos asociados a la cuenca del río Elqui, desde el puente Almendral, ubicado aguas abajo del Embalse Puclaro, hasta el humedal del río Elqui cercano a la desembocadura (ver Fig.4). El muestreo se realizó en diciembre de 2021 y marzo de 2022. No fue posible tomar muestras en otra época del año dada la severa sequía que afecta la región de Coquimbo en la época de muestreo.

Descripción de sitios de muestreo

GEFE01: El sitio Rio Elqui en el sector Almendral corresponde al punto más alto que fue muestreado en la subcuenca, ubicado a 401,04 msnm. En este sitio se localiza una estación de la DGA (Elqui el Almendral), que comenzará a operar próximamente. Por su ubicación, se toma este sitio como referencia del sistema lotico del Humedal y desembocadura.

GEFE02: El segundo sitio de muestreo Rio Elqui aguas abajo Quebrada Marquesa se encuentra ubicado a 310,99 msnm. Este punto abarca las fuentes difusas detectadas en la quebrada Marquesa, principalmente pasivos mineros, y fuentes potenciales de agricultura entorno al Rio Elqui. La quebrada de Marquesa se registró sin agua superficial en las dos campañas realizadas (diciembre 2021 y marzo 2022), y corresponde a una quebrada de régimen temporal, pero se considera relevante su inclusión debido a que durante los pulsos de precipitaciones se activa la quebrada y el arrastre desde las fuentes de contaminación difusas se hacen presente.

GEFE03: El sitio se localiza en el río Elqui aledaño al puente Pelicana a 283,77 msnm. En este punto de muestreo existe contaminación por fuentes difusas de pasivos mineros correspondientes a relaves que se encuentran depositados en la ribera. Además, en este sitio se cuenta con una línea base de macroinvertebrados, realizada por la Universidad Católica del Norte en 2017.

GEFE04: El sitio se ubica en el río Elqui, aguas debajo de la quebrada de Talca a 237,8 msnm. En este sitio de monitoreo se registró contaminación por fuentes difusas de

pasivos mineros asociados a relaves y a la actividad agrícola, con 2 canales de regadío en ribera sur y norte del río Elqui, los cuales son vertidos en el río, encontrándose la morfología del cauce muy intervenida. Este punto recibe aportes de los afluentes quebrada de Talca y quebrada el Arrayan. No se registró la presencia de agua superficial en este punto durante las campañas de monitoreo realizadas.

GEFE05: El quinto sitio de muestreo se encuentra en el río Elqui, puente Las Rojas ubicado a 202,5 msnm, aguas arriba de la Planta de Tratamiento Aguas del Valle. En este punto se identificó la contaminación por fuentes difusas de pasivos mineros asociados a relaves y al desarrollo de la actividad agrícola. Existe información de línea base asociada a este punto, de macroinvertebrados, realizado por la Universidad Católica del Norte el 2017 y de macrófitas por Urrutia *et al.* 2019. Durante la campaña no se registró agua superficial en este punto.

GEFE06: El sexto sitio se localiza en el río Elqui, aguas arriba del puente Altovalsol a 122,14 msnm. En este punto se registró la presencia de contaminación por fuentes difusas de pasivos mineros correspondientes a relaves abandonados muy cercanos a la ribera del cauce.

GEFE07: El sitio de muestreo se ubica en el río Elqui aguas arriba de la planta de tratamiento de aguas servidas en Algarrobito y a 109,53 msnm. En este punto se identificó la contaminación por fuentes difusas de pasivos mineros asociados a relaves, faenas y al impacto de la planta de tratamiento de aguas servidas. No se registró la presencia de agua superficial en este punto.

GEFE08: El octavo sitio de muestreo se encuentra ubicado aguas debajo de la planta de tratamiento de aguas servidas y a 97,14 msnm. Se registró contaminación asociada a la presencia de la planta de tratamiento de aguas servidas. En este punto no se encontró agua superficial durante las dos campañas de muestreo (diciembre 2021 y marzo 2022).

GEFE09: El sitio se localiza en el río Elqui aguas a arriba del Pozo Alfalfares, y a 84,48 msnm. No se registró la presencia de agua superficial este punto en ambas campañas de muestreo (diciembre 2021 y marzo 2022).

GEFE10: El sitio se encuentra localizado en el río Elqui en el sector Puente Zorrilla (sector urbano de La Serena), lugar donde se vuelve a registrar la presencia de agua superficial al cauce natural, y a 17,74 msnm. Se identificó contaminación proveniente de fuentes difusas relacionadas con el proceso de urbanización, extracción de áridos y basurales. No se encontró agua superficial en este punto durante las campañas de muestreo realizadas en diciembre de 2021 y marzo 2022.

GEFE11: El sitio se localiza en el río Elqui en el sector Puente Fiscal y a 12,48 msnm. En este punto se encuentra una estación de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA) y estudios de monitoreo de macrófitas realizado por Urrutia (2019). No se registró la presencia de agua superficial en este punto durante ambas campañas de muestreo de diciembre 2021 y marzo 2022.

GEFE12: El sitio se localiza en el río Elqui aguas arriba de la laguna costera a 5,45 msnm. Este es el último punto asociado al sistema lótico aguas debajo de la planta de tratamiento de aguas servidas de La Serena.

GEFE13: El sitio se ubica en la zona más baja de la cuenca y se ubica en el humedal donde se encuentra la desembocadura del río Elqui y a sólo 4,52 msnm. En este punto se registró una fuente de contaminación puntual correspondiente a las descargas de emergencia en la estructura denominada by pass de Aguas del Valle.

El Programa de Monitoreo propuesto en esta consultoría (Tabla 3) se estructuró en base a 3 componentes generales:

1. Biótico terrestre y acuático
 - Fauna Vertebrada, Anfibios, Reptiles, Aves y
 - Macrófitas y macroinvertebrados
2. Abióticos agua y sedimentos:
 - Parámetros fisicoquímicos
 - Metal(oide)s
 - Cationes/aniones mayores
 - Biológicos
 - Nutrientes
 - Microbiológicos.

3. Paisaje: conexión a lo largo del río, fuentes de impacto y contaminación

En relación con la calidad de agua y sedimentos, y para identificar los parámetros a considerar en el Programa de Monitoreo es que se consideraron 2 etapas:

Etapas 1: Selección de parámetros para el muestreo.

Revisión bibliográfica/normativa y antecedentes NSCA río Elqui (MMA, 2020a, MMA 2020b, entre otras)

- ✓ Revisión geoquímica / geológica del área de estudio
- ✓ Revisión y verificación de fuentes puntuales y difusas potenciales, y puntos representativos (trabajos previos y verificación en terreno)
- ✓ Revisión y selección de indicadores de calidad de agua y sedimentos adecuados para el área de estudio.
- ✓ Complementar y ejecutar la propuesta preliminar del Programa de Monitoreo

Etapas 2: Selección de parámetros para indicadores de calidad de agua y sedimentos.

- ✓ Evaluación de resultados de las campañas de muestreo
- ✓ Verificación de sitios propuestos en terreno (acceso y disponibilidad)
- ✓ Reducción de parámetros (bajo el límite de detección del laboratorio)
- ✓ Aplicación y evaluación de indicadores (requiere ambas campañas)
- ✓ Complementar y ejecutar la propuesta final del Programa de Monitoreo

En cuanto a los antecedentes de la NSCA Cuenca Río Elqui Sector desembocadura (2 marzo 2020) MMA (2020a) y MMA (2020b), complementado con la revisión bibliográfica del resto de los indicadores estudiados, se definieron como parámetros fisicoquímicos básicos in situ: pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, además de otros análisis como nutrientes, clorofila a y otras variables de interés, los cuales se dividen en los 6 grupos mencionados anteriormente.

A continuación, en Tabla 2, se presenta la justificación de la inclusión de metal(oide)s en el Programa de monitoreo e indicadores. Es importante aclarar que, para el contexto del presente documento, el concepto metal(oide) incluye a ambos tipos: metales pesados y semimetales o metaloides.

Tabla 2. Listado de parámetros seleccionados para calidad de agua/sedimentos, fuentes e impactos.

Tipo	Parámetros	Tipo de Fuente	Impactos
Fisicoquímicos	T, OD, pH, CE	Potenciales fuentes puntuales y difusas: actividades mineras, agrícolas, aguas servidas	OD, T → hipoxia; pH → drenajes ácido, movilidad de metales; CE → Aumento, contaminación de fuentes difusas o puntuales; descenso, ingreso de compuestos orgánicos.
Cationes/Aniones mayores	Ca, Mg, Na, K, Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , (CN ^{-*})	Potenciales fuentes naturales (según geoquímica), como actividades antrópicas (minería, agricultura, urbanización).	Todos contribuyen a la conductividad / Salinidad del agua. SO ₄ → contaminación y cambios en pH
Metal(oide)s	Al, As, B, Cd, Co, Cu, CrVI, Fe, Li, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, Se, Zn	Actividades antrópicas (minería, agricultura, urbanización).	Concentraciones pueden superar los rangos esenciales o aceptables y volverse tóxicos, cancerígenos, biodisponibles/bioacumulables, etc.
Biológicos	DBO, DQO, Clorofila a	Fuentes posibles: descarga de aguas servidas, actividad agroindustrial.	Exceso de nutrientes - eutroficación (indirecto)
Nutrientes	PO ₄ , NO ₃ , NO ₂ , N, P, COT	Presencia natural en cuencas. Otras potenciales fuentes: difusas (drenaje de sectores agrícolas, ganaderos intensivos y agroindustriales por sobreuso de fertilizantes y pesticidas).	En exceso, efecto de eutroficación, sobrecarga de nutrientes, toxicidad de procesos bioquímicos en exceso (hipoxia, producción de toxinas).
Microbiológicos	Coliformes totales, Coliformes fecales	Fuentes posibles: descarga de aguas servidas, actividad agroindustrial.	En exceso, contamina el agua destinada para el consumo humano, recreación y riego, causando y transmitiendo diversas enfermedades de riesgo sanitario para la población local. Igualmente, exceso de coliformes afectan la salud del humedal al aumentar el riesgo de eutroficación del sistema natural.



(CN⁻)*: cianuro, no es anión mayor, sin embargo, se mantiene el listado de aniones. T: temperatura; pH: potencial de hidrógeno; OD: oxígeno disuelto; CE: conductividad eléctrica; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; K: potasio; Cl⁻: cloruro; HCO₃: bicarbonato; SO₄: sulfato; Al: aluminio; As: arsénico; B: boro; Cd: cadmio; Co: cobalto; Cu: cobre; CrVI: cromo VI; Fe: hierro; Li: litio; Mn: manganeso; Hg: mercurio; Mo: molibdeno; Ni: níquel; Ag: plata; Pb: plomo; Se: selenio; Zn: Zinc; DBO: demanda biológica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno; Clorofila a; PO₄: fosfato; NO₃: nitrato; NO₂: nitrito; N: nitrógeno; P: fósforo; COT: carbono orgánico total.

Cabe señalar que los cationes y aniones mayores cumplen una segunda función (no solo identificar alteraciones de la conductividad, salinidad), la cual es evaluar el balance iónico de los resultados. Bajo el Principio de Electroneutralidad de las aguas, es decir, la carga iónica total de los iones positivos debe ser igual a la carga iónica negativa.

Tabla 3. Propuesta de Programa de Monitoreo para la cuenca baja del Humedal Costero Río Elqui. Fuente: Elaboración Gesnat.

Escala	Variable	¿Que mide?	Indicador	Temporalidad de monitoreo	Complejidad del monitoreo (1-5)	Actor(es) propuestos	Necesidades
Paisaje	Fauna vertebrada (Anfibios, reptiles, aves, mamíferos)	Riqueza de especies	N° de spp	2 veces al año (invierno y verano)	2	Junta de vecinos el Islon Parque Batalla de Los Loros ONG Elqui Verde ONG Ecoterra	Capacitaciones y equipo básico como binoculares y guías de campo
	Vegetación	Cobertura	% cobertura y tipo de estratos	2 veces al año (invierno y verano)	2	Junta de vecinos el Islon Parque Batalla de Los Loros ONG Elqui Verde	Capacitaciones, guías de campo, cintas de medir

						ONG Ecoterra	
	Flora	Riqueza de especies	N° de spp	2 veces al año (invierno y verano)	3	Junta de vecinos el Islon	Capacitaciones, guías de campo, prensa para plantas
						Parque Batalla de Los Loros	
						ONG Elqui Verde	
						ONG Ecoterra	

Sitio / Punto de control	Indice en base a Macrofitas	Nivel de trofía	Indice de trofía	1-2 anual en función de la variabilidad estacional + después de eventos extraordinarios (climaticos o antropicos)	2	ONG Ecoterra	Capacitación, botas de agua, cintas de medir, guías de campo
	Indice Biologico en base a Macroinvertebrados bentonicos	Indicador de Contaminación del cuerpo de agua	Riqueza y composición de especies indicadoras	2 veces al año (invierno y verano), y despues de eventos de crecidas	toma de muestra: 2 / Analisis: 3	Mesa Hídrica Bajo Alfalfares	Capacitación, red de muestreo, frascos, preservantes, lupa, otros insumos de laboratorio, botas de agua
Calidad de agua y sedimentos a escala de sitio / punto de control	Físicoquímico	Contaminación puntual y difusa	pH, Conductividad, DQO	Estacional	2	ONG Elqui verde	Capacitación (manipulación de sonda y protocolos de muestreo), botas de agua, guantes de nitrilo, equipo multiparámetro y fondos económicos para los análisis de
	Cationes/aniones		Coliformes fecales, nutrientes (al menos: nitrato, nitrito, sulfatos) y metal(oides) (al		5	Barrio del Mar	

	Metal(oide)s Biológicos Nutrientes Microbiológicos		menos: cobre, arsénico, cadmio y plata)			Mesa Hídrica Bajo Alfalfares	laboratorio
Sitio / Punto de control	Hidrodinámico	Nivel de aguas y descargas (caudales)	Volumen de agua	Semanal en contexto ciudadano; diario si sistema es automatizado	2 a 3 en contexto ciudadano; 4 a 5 asumiendo mediciones de estaciones automáticas	Barrio del Mar ONG Ecoterra	Capacitaciones, caudalímetro y otros implementos, botas de agua
Sitio / Punto de control + escala de paisaje	Geomorfológicos (Composición y proporciones de sustratos en ribera y cauce)	Heterogeneidad de hábitats (disponibilidad de hábitats)	Variación del cauce	Anual y después de eventos de crecidas	1 ó 2	Parque Batalla de Los Loros	Capacitaciones, botas de agua, cintas de medir

Actividad d) Campañas de muestreo.

Para el diseño del Programa de Monitoreo del HCRE se realizaron dos campañas de muestreo:

- Campaña 1: diciembre de 2021
- Campaña 2: marzo de 2022

La Fig. 5 muestra los 13 sitios seleccionados para ambos muestreos realizados. Por efectos de la sequía que actualmente aqueja a la región, es que solo fue posible muestrear 5 de los 13 sitios dado que los sitios restantes estaban sin agua superficial (ver Fig. 6).

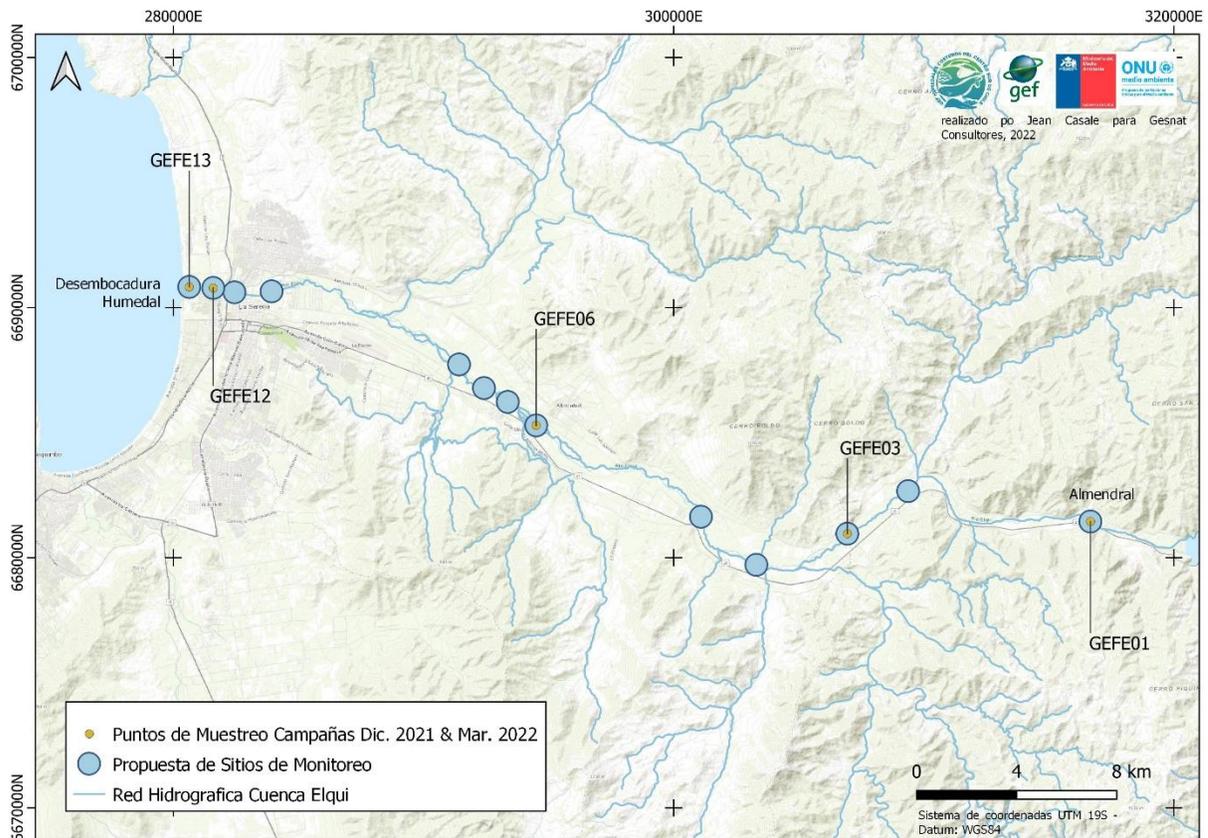


Figura 5. Sitios muestreados en las dos campañas (diciembre de 2021 y marzo 2022) en el marco de la presente consultoría. Por efectos de la sequía actual, estos 5 puntos fueron los únicos posibles de muestrear. En la propuesta del Programa de Monitoreo se mantienen la necesidad de monitorear en los 13 puntos. Fuente: Elaboración propia.



a) Sector Almendral GEF01



b) Sector Pelicana GEF03



c) Sector Altovalsol GEF06



d) Sector Puente Fiscal GEF11



e) Sector by pass desembocadura GEF13

Figura 6. Sectores donde fue posible realizar campañas de muestreo en el HCRE en las campañas de diciembre 2021 y marzo 2022. Autor de las fotografías: Elier Tabilo Valdivieso

Actividad e) Levantamiento de información sociocultural y s) Identificación de actores claves para la restauración de lhumedal.

La identificación de actores claves es un proceso relevante en los programas de monitoreo y restauración ecológica.

A partir de una lista consensuada de actores se pueden establecer futuras alianzas de trabajo y fortalecer cuando es necesario la participación de los mismos. Por lo tanto, el involucramiento y temprana identificación de los actores claves en este proceso es fundamental y con implicancias directas a las propuestas futuras de monitoreo.

Por ello, se han identificado en base a literatura, consulta a expertos y experiencia de la consultoría “Identificación de Áreas Prioritarias de Restauración del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región De Coquimbo. Licitación No.2/2020 Coquimbo Proyecto GEF Humedales Costeros” (Tabilo *et al.* 2021) una serie de actores claves. Los pasos para la identificación de actores claves fueron los siguientes (Fig. 7):

1. En base a literatura e información de consultorías anteriores se definió una lista preliminar de actores claves.
2. Esta lista fue sometida a validación a través de formulario virtual enviada a todas y todos los miembros del Comité Técnico Local del GEF Humedales Costeros. A partir de lo cual se aceptó la lista, o bien se sugirieron nuevos nombres con la debida justificación (Figura 8).
3. Con la nueva información del formulario se pasa a elaborar la lista final de actores claves para la restauración del humedal, quienes fueron integrados en la propuesta de monitoreo (Tabla 4).

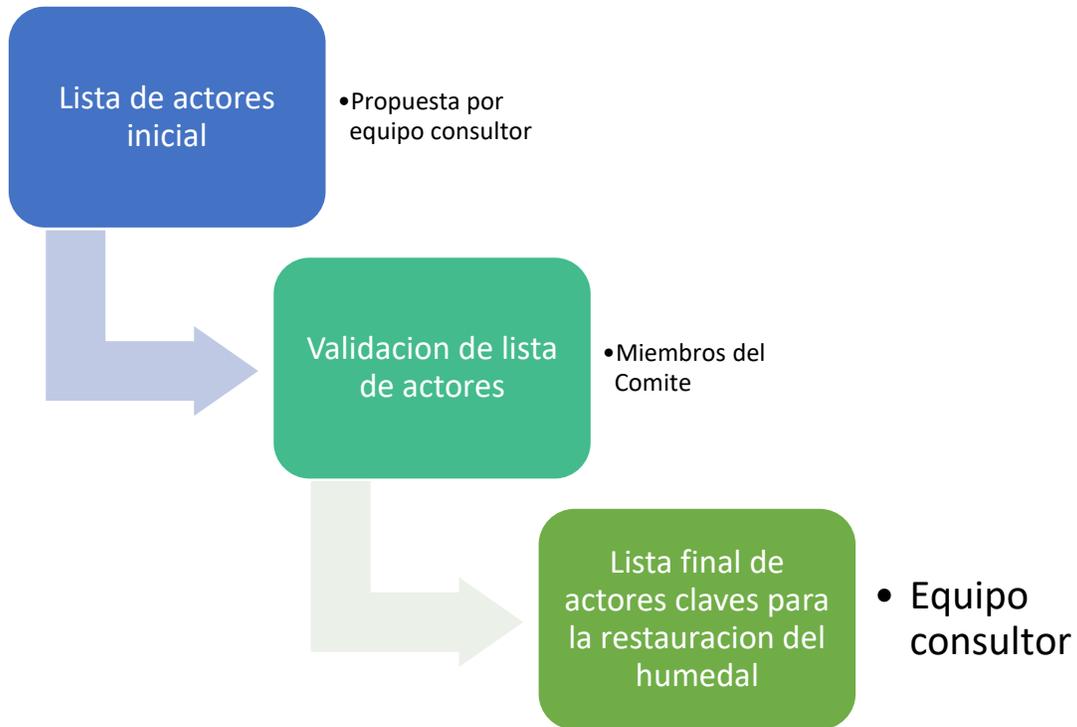


Figura 7: Paso a paso para validación final de lista de actores claves identificados.



"DIAGNÓSTICO AMBIENTAL ACTUAL Y FUENTES EMISORAS DEL HUMEDAL COSTERO DEL RÍO ELQUI, REGIÓN DE COQUIMBO"

Actores claves

La actual consultoría tiene como objetivo principal: "Realizar un diagnóstico ambiental y de fuentes emisoras puntuales y difusas del Humedal Costero del Río Elqui y proponer medidas de restauración, región de Coquimbo". Para ello se espera al final de la consultoría la "Identificación de actores clave para la reparación del humedal y sus subcuencas aportantes". La identificación de actores y su involucramiento es clave para el éxito de un futuro programa de monitoreo.

A continuación le presentamos una primera lista tentativa de actores claves, representados por los nombres de las instituciones e organizaciones relevantes para los objetivos anteriormente expuestos.

Solicitamos a usted revisar la lista y (1) validar o bien (2) sugerir nuevos actores que no estén en este listado.

Desde ya muchas gracias por su tiempo.



"DIAGNÓSTICO AMBIENTAL ACTUAL Y FUENTES EMISORAS DEL HUMEDAL COSTERO DEL RÍO ELQUI, REGIÓN DE COQUIMBO"

Participación de los actores clave

El presente cuestionario busca levantar información preliminar con el propósito de llevar a cabo un programa de Monitoreo Ambiental y Ciudadano del humedal Costero del Río Elqui. El proyecto tiene el objetivo de "realizar un diagnóstico ambiental y de las fuentes emisoras puntuales y difusas del Humedal costero del Río Elqui y proponer medidas de restauración".

Para esto, les solicitamos que respondan algunas preguntas referidas a la disponibilidad e intención de involucrarse en el futuro monitoreo ambiental ciudadano.

Agradecemos su atención y tiempo.

Nombre de la organización o institución a la cual representa.

Figura 8. Formulario para consulta a actores claves correspondiente al Paso 2.

Se realizaron entrevistas a las organizaciones ambientalistas y de gobernanza hídrica basados en las siguientes pautas de entrevistas:

Pauta de entrevistas a organizaciones ambientalistas

Pauta entrevistas	Conocimiento de la organización	Objetivo de la organización	¿Cómo se creó la Organización? O ¿cuál es el objetivo con el que se crea la organización?
		Perfil de la organización	¿Quiénes son parte de la ONG? Cuantos miembros activos tienen?
			¿Qué proyectos o actividades han desarrollado en relación al humedal? ¿Cómo se vinculan con el humedal?
	Visión pasado-presente- futuro HCRE	Usos del humedal	¿Qué actividades se desarrollan actualmente que afecten al humedal? ¿y en el pasado? ¿Cómo ha cambiado el humedal en los últimos 10 años? ¿Cómo impacta en sus vidas la transformación del paisaje?
		Visión	¿Cómo les gustaría que fuera el HCRE en 10 años? ¿De qué forma les gustaría vincularse con el humedal en el futuro?, ¿qué tipo de actividades les gustaría desarrollar? ¿Cómo les gustaría que fuera el paisaje? ¿Cómo imaginan el humedal en el futuro?
	Formas de vinculación en el monitoreo ambiental y ciudadano	Interés y habilidades	¿Están interesadas e interesados en participar del futuro monitoreo ambiental y ciudadano en el humedal del Río Elqui?
			¿En qué etapa del proyecto les gustaría participar, elaboración de la línea base, diseño del monitoreo, recolección de datos, análisis de los resultados o difusión?
			Si desea participar en la etapa de recolección de datos, ¿qué variables les interesaría monitorear? ¿Fauna vertebrada, vegetación, flora, macrófitas, macroinvertebrados bentónicos, calidad de agua y sedimentos, parámetros hidrodinámicos o geomorfológicos? ¿Requieren capacitación?
		Vinculación	¿Con qué otras organizaciones se relaciona su organización?
			¿Cómo se relacionan con estas organizaciones?
	¿Tienen relación con otras organizaciones del mismo tipo o dentro del territorio? ¿Qué tipos de proyectos han desarrollado en conjunto?		

Pauta de entrevistas a organizaciones de gobernanza hídrica

<p>Guion Reunión Organismos vinculados a la gestión del recurso hídrico</p>	Presentación del contexto		
	Visión pasado-presente futuro HCRE	Visión	<p>¿Cuál sería el futuro ideal del HCRE? ¿Cómo se lo imaginan, con qué actividades y organización en torno a su gestión?</p>
	<p>Formas de vinculación en el monitoreo ambiental y ciudadano</p>	<p>Intereses y habilidades</p>	<p>Con respecto al futuro monitoreo ambiental y participativo en el humedal, ¿en qué etapa del proyecto están interesados en participar? (facilitación de datos de monitoreos existentes, diseño de monitoreo, recolección de datos, análisis de datos, difusión de resultados)</p>
			<p>En relación a la etapa de recolección de datos, ¿sobre qué variables les gustaría monitorear? (fauna vertebrada - vegetación - flora - macrófitas - macroinvertebrados bentónicos - parámetros de la calidad de agua y sedimentos - parámetros sobre la hidrodinámica - parámetros geomorfológicos)</p>
			<p>¿Tienen los conocimientos para monitorear dichas variables o requieren de capacitación?</p>
		<p>Vinculación</p>	<p>¿Han participado anteriormente en coordinar o participar en monitoreos ambientales participativos? ¿Cómo ha sido su experiencia?</p>
			<p>¿Cómo se relacionan con otras organizaciones dentro de la cuenca? ¿En qué tipo de actividades o investigaciones colaboran actualmente ?</p>

Tabla 4. A continuación, se describen los **actores identificados** y las formas de comunicación y participación con los mismos:

	Institución	Talleres	Entrevista	Reunión
	Municipio de La Serena	X		
	Ceaza	X		
	Dirección General de Aguas	X		X
	SERNAPESCA	X		
	ASCC - Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático	X		
	Aguas del Valle	X		
	Bienes Nacionales	X		
	Corporación Nacional Forestal - CONAF	X		
	Sideza consultora ambiental	X		
	Red Aves	X		
	Ecoterra	X		X
	Consultora - Dinámica costera	X		
	Ministerio de Obras Publicas - MOP	X		X
	Servicio Agrícola y Ganadero - SAG	X		
	Gobierno Regional - GORE	X		
	Junta de Vigilancia Río Elqui y sus Afluentes	X		X
	Gobernación Marítima Coquimbo	X		
	Colegio de Arquitectos, Región de Coquimbo	X		
	DOP -Dirección de Obras Portuarias	X		
	Instituto Forestal - INFOR	X		
	CAZALAC	X		
	Asociación Gremial de Pescadores San Pedro	X		
	Olas Limpias ONG	X	X	
	Ministerio de Medio Ambiente - MMA	X		X
	CRDP, Innovación y Competitividad	X		
	Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)	X		
	Comité ambiental Comunal de La Serena	X		
	Mesa Hídrica Alfalfares	X		X
	ONG Elqui verde	X	X	
	Juntas de regantes (cuenca media)	X		
	Pequeños productores agrícolas/ganaderos	X		
	Privados – empresas agrícolas	X		
	Empresas de extracción de áridos	X		
	INIA	X		

UCN	x		
Presidente comisión de medio ambiente CORE	x		
MINVU	x		
Teck CDA	x		
Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)	x		
SERNAGEOMIN	x		
Agrupación empresarial Barrio del Mar	x		x
Junta de Vecinos El Islón			x
Parque Mirador Batalla de los Loros	x		x

En base a la información de actores levantada previamente se construyó una propuesta de participación en base a sus intereses. Se consultó a cada actor el interés de participar en el futuro Programa de Monitoreo, a través del formulario electrónico propuesto (Fig.8), e identificándose de este modo qué actores tienen interés/voluntad de participar y con qué rol/acción, siendo un insumo directo para el Programa de Monitoreo (Fig. 9).

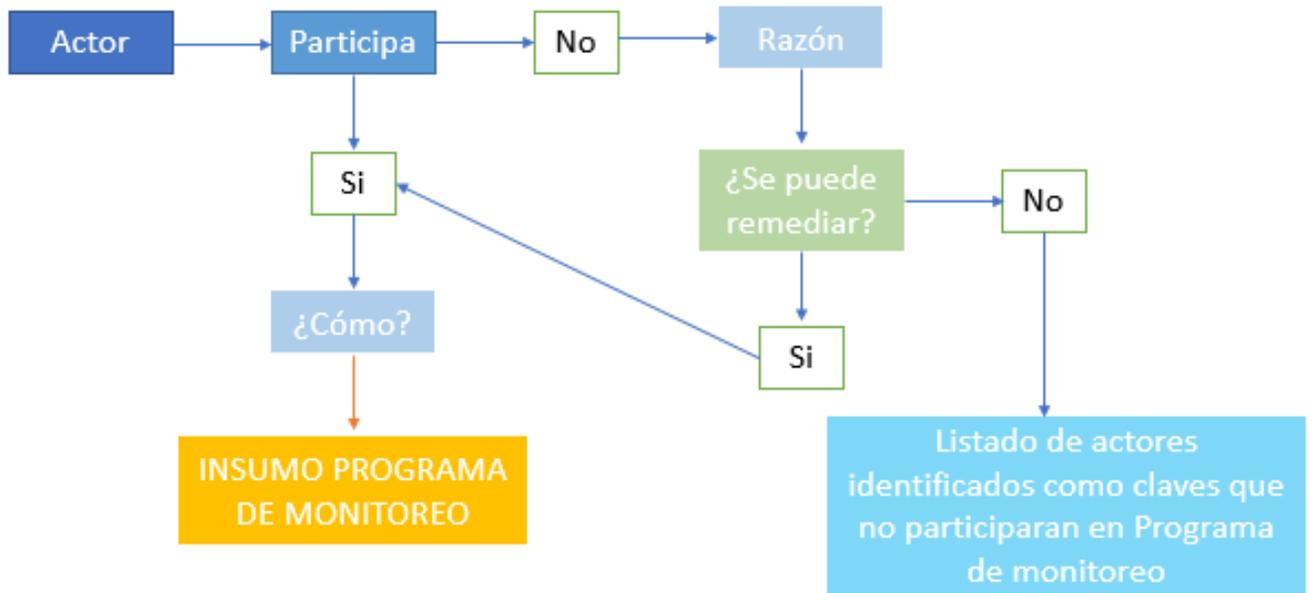


Figura 9. Esquema de consulta de participación en el diseño del programa de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

La lista final de actores validados posteriormente fue clasificada (Pozo 2007, FAO, 2007) y caracterizada como se describe a continuación:

- **Organizaciones ambientalistas:** Se encuentran compuestas por organizaciones no gubernamentales (ONGs) y de carácter comunal que velan por la protección del patrimonio ambiental, histórico y de los ecosistemas de humedal.
- **Organizaciones por rubro o actividad:** Corresponden a asociaciones gremiales y productores de los rubros que se desarrollan en el área de estudio, en torno al mar, la ganadería y la agricultura, así como organizaciones que se forman por zonas de residencia que buscan el desarrollo de un grupo humano en el ámbito social y cultural mediante la organización de actividades.
- **Organizaciones de gobernanza hídrica:** Organizaciones de usuarios de agua, organizaciones de abastecimiento de agua potable a localidades rurales e instancias de coordinación entre actores privados, locales, gubernamentales, de la sociedad civil y académicos en torno a la gestión hídrica de la cuenca de río Elqui.
- **Organizaciones del sector público a nivel central:** Corresponden a los ministerios y servicios públicos relacionados con la gestión de recursos hídricos, el cumplimiento en materia de gestión y sustentabilidad ambiental y la coordinación de permisos ambientales sectoriales para el desarrollo de actividades productivas y construcción de obras.
- **Organizaciones del sector público a nivel local:** Organizaciones del sector público elegidas mediante democracia directa que tienen implicancia en la toma de decisiones en la comuna de La Serena o la región de Coquimbo en materia de medio ambiente.
- **Empresas:** Asociadas a las actividades económicas que se desarrollan en la cuenca del río Elqui, correspondientes a la extracción minera, producción agrícola, extracción de áridos y provisión del recurso hídrico.
- **Organizaciones dedicadas a la investigación:** Organizaciones del sector privado, académico y estatal que desarrollan trabajos, investigaciones y estudios en torno al recurso hídrico en zonas áridas, así como estudios asociados a los recursos bióticos y abióticos que constituyen el ecosistema.

Posteriormente, los actores identificados fueron agrupados para su eventual participación de un programa de monitoreo, como también en un programa de restauración (Fig. 10).



Figura 10. Agrupación de actores para un eventual programa de monitoreo y restauración. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta el detalle de los actores claves agrupados por tipo (Tabla 4 y Fig. 11).

Tabla 5. Agrupación de actores por número y porcentaje en la eventual participación de un programa de monitoreo y restauración.

Número y porcentaje de tipo de actores		
Organizaciones ambientalistas	6	14%
Organizaciones por rubro o actividad	5	12%
Organizaciones de gobernanza hídrica	4	10%
Organizaciones del sector público a nivel central	14	33%
Organizaciones del sector público a nivel local	3	7%
Empresas	4	10%
Organizaciones dedicadas a la investigación	6	14%

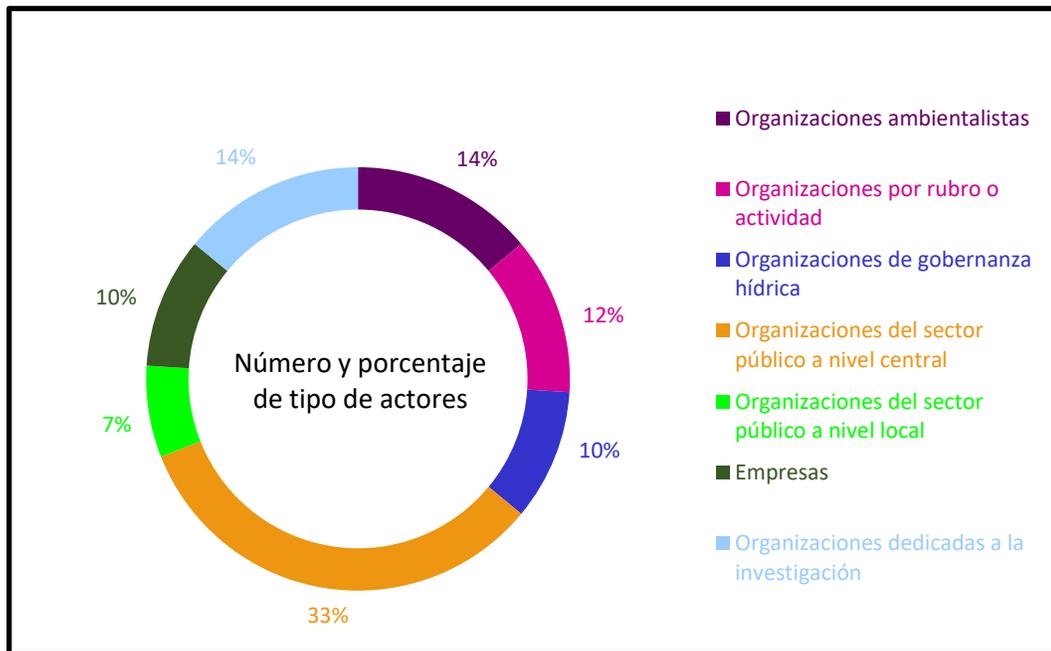


Figura 11. Agrupación de actores por sector y representación porcentual. Fuente: Elaboración propia.

Actividad i) y r) Talleres participativos con el Comité Técnico Local y actores claves

Durante la consultoría se desarrollaron 3 talleres participativos con el Comité Técnico Local del Proyecto y otros actores claves, para relevar información e informar sobre los antecedentes claves en el desarrollo del presente estudio.

El primero fue a través de la plataforma Zoom y tuvo lugar el día 26 de enero 2022. El segundo Taller piloto de monitoreo en terreno se realizó el día 18 de marzo del 2022, y el 19 de mayo de 2022 se realizó el Taller final de resultados ante el Comité Técnico del GEF Río Elqui.

Taller 1 (26 de enero 2022)

El día miércoles 26 de enero se realizó el Taller N°1 donde se expusieron los avances de la consultoría hasta la fecha, los cuales coinciden con los contenidos de este informe. Adicionalmente se envió por correo electrónico un resumen de lo expuesto.



Figura 12. Pantallazo de la presentación usada en taller del 26-01-2022

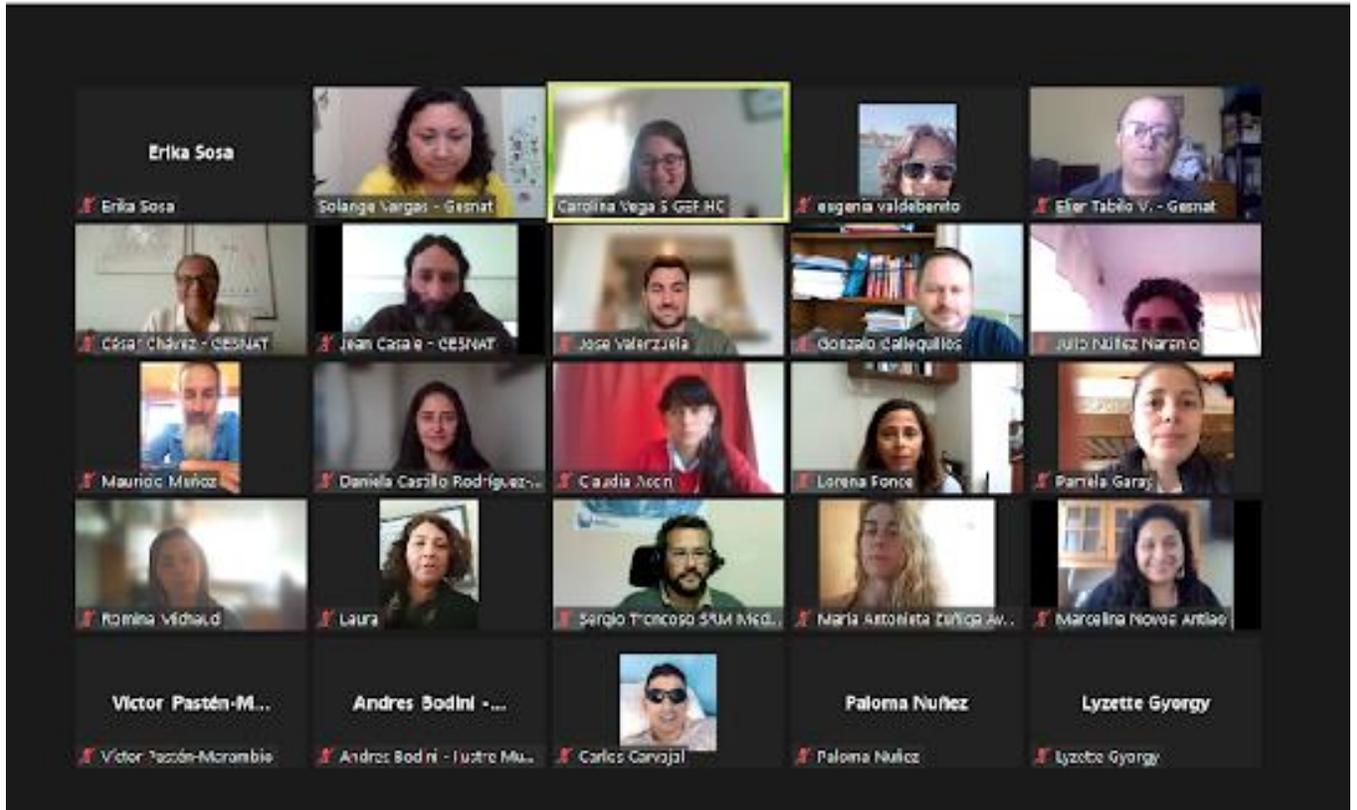


Figura 13. Asistentes al taller del 26-01-2022

Principales comentarios del taller

El taller fue básicamente una instancia informativa donde se presentaron los primeros resultados de la consultoría relativos al desarrollo de la metodología, caracterización de fuentes y propuesta preliminar de sitios. al final se respondieron consultas principalmente de tipo metodológico y se informó de instancias futuras y cuestionarios vía mail sobre actores claves.

Taller 2 piloto monitoreo en terreno (18 de marzo de 2022)

El día 18 de marzo se realizó el Taller N°2 donde se realizó un monitoreo participativo en terreno al cual asistieron alrededor de 13 personas más el equipo consultor (Tabla 6). El objetivo de esta salida fue hacer una demostración de monitoreo de algunas variables relevantes, lo que se enmarca en la propuesta del futuro monitoreo participativo del humedal.

Tabla 6. Lista de asistentes al Taller 2 del 18 de marzo de 2022

Nombre	Correo	Institución a la que representa
José Miguel Valenzuela	abogado@rioelqui.cl	JVRE
Pamela Garay de la Fuente	pamela.garay@mop.gov.cl	DGA La Serena
Hilda Bastias	contacto@elquiverde.org	ONG Elqui Verde
Rudy Vergara	contacto@elquiverde.org	ONG Elqui verde
Javiera Pizarro	j.pizarro.standen@gmail.com	Parque Mirador Batalla de los Loros
Pilar Pérez	iperez@mma.gob.cl	Seremi de Medio Ambiente
Paloma Nuñez	paloma.nunez@ceaza.cl	CEAZA
Renzo Vargas Rodríguez	renzovr@gmail.com	EcoTerra ONG
Pedro Hernández	phernandezperez@gmail.com	Mesa Hídrica Elqui Bajo Alfalfares
Francisco Guzman	Fguzmanbaquedano@gmail.com	ONG REDAVES
Carolina Vega		GEF Humedales
Claudia Accini		MMA
Roberto Villablanca		MMA

Equipo interno Gesnat

- Daniela Castillo Rodríguez
- Cesar Chávez Villavicencio
- Elier Tabilo Valdivieso
- Víctor Pastén Marambio
- Jean Francois Casale

Programa Taller: Demostración de monitoreo de algunas variables relevantes en el Humedal Costero del Río Elqui

Durante la jornada de demostración de monitoreo se dieron a conocer los objetivos de la consultoría y la importancia de la participación de los actores clave en el monitoreo de la salud del humedal. Se expuso sobre algunas de las variables a monitorear: parámetros físico-químicos y de sedimentos del curso de de agua, macrofitas, macroinvertebrados bentónicos, y componentes terrestres a escala de paisaje: fauna de vertebrados terrestres (anfibios, reptiles, aves y mamíferos), y, vegetación.

Hora de inicio: 10:00 - Hora de termino: 13:00 horas

Taller se inicia a las 10:00 horas en la zona del by pass de Aguas del Valle en la desembocadura del río Elqui. Se reciben a los asistentes, y desde el proyecto GEF HC y Gesnat les entregan material del proyecto GEF y de esta consultoría.

La actividad consistió en visitar sectores de la ribera del río y mostrar técnicas de muestreo para un adecuado monitoreo de la “salud del humedal”. La actividad buscó involucrar a diferentes actores en torno a la conservación del humedal (Tabla 6). El punto seleccionado para el monitoreo demostrativo fue el Sitio GEFE12, aguas abajo del puente Fiscal. En la actividad se demostró la forma de muestrear fauna (anfibios, reptiles, aves y mamíferos), macrofitas y vegetación y macromamíferos en los 13 puntos de monitoreo propuestos, y monitoreo de macroinvertebrados. Al final de las exposiciones, los asistentes exponen inquietudes del programa de monitoreo que se propone.



Figura 14. Dr. César Chávez Villavicencio de Gesnat expone en la parte introductoria del taller del 18 de marzo de 2022. Mas fotografías en **Anexo 3**.

4.2 OE2. Diagnóstico ambiental y caracterización actual del HCRE

Actividades j) y k) Revisar y sistematizar información de biodiversidad *in situ*, estado trófico, salud ambiental, contaminación y fuentes emisoras del HCRE.

Se realizó una revisión y sistematización de la información disponible sobre biodiversidad, estado trófico, salud ambiental, contaminación y fuentes emisoras del HCRE. Igualmente, se realizó un levantamiento de información *in situ* en el HCRE sobre calidad de agua del humedal (físicoquímicos, nutrientes, coliformes, macroinvertebrados, algas, etc.), biodiversidad acuática, entre otros, sobre la base del programa de monitoreo definido en el OE1.

Componente Biótico Flora y Vegetación

La flora vascular del HCRE se compone de 175 especies (Ecoterra, 2016), que representan un 10 % de las reportadas en la Región de Coquimbo (Marticorena *et al.*, 2001). Se reparten en 4 divisiones, 4 clases, 61 familias y 143 géneros. Las principales familias son *Asteraceae*, *Fabaceae*, *Solanaceae* y *Poaceae*, que, en conjunto, constituyen un 37 % de la flora del sitio. Las formas biológicas más representadas son la herbácea perenne (40 %), la herbácea anual (24 %) y la arbustiva (15 %), seguidas por los componentes arbóreos (10 %), subarbustivos (6 %) y herbáceos bianuales (5 %). En lo que respecta a su origen geográfico, el 16 % son endémicas, el 38 % nativas no endémicas y el 46 % exóticas. Pese a la gran proporción de estas últimas, su cobertura es notablemente baja y corresponden principalmente a especies ruderales (Ecoterra 2016).

La vegetación del área de estudio comprende varias formaciones azonales, tales como vegas (humedal), comunidades acuáticas, matorrales higrófitos y praderas halófitas (Ecoterra, 2016; Figueroa *et al.*, 2021; Tabilo *et al.*, 2021). Según Luebert y Pliscoff (2016), se inserta en el matorral desértico mediterráneo costero de *Oxalis gigantea* y *Heliotropium stenophyllum*, piso que, a su vez, se incluye en la región del desierto (Gajardo 1994). Este componente biótico presenta un nivel muy alto de degradación, asociado principalmente a la expansión urbana, la alteración de la dinámica hidrológica, la

extracción de áridos, el sobrepastoreo, la construcción de defensas fluviales y la introducción de especies exóticas (Tabilo *et al.* 2021).

Metodología (Incluye letra m) Índices de diversidad biológica del humedal).

Determinación de coberturas espaciales y análisis vegetal de los 13 sitios de control propuestos para el Programa de Monitoreo.

Con una inspección pedestre y una fotointerpretación de imágenes satelitales, se determinaron las coberturas de vegetación, cuerpos de agua y usos del suelo de cada sitio. Para esto se utilizó la versión 3.22 de QGIS y un mapa base de Google (Google Earth Pro versión 7.3.4.8642) ajustado a una escala de 1:800. Según la metodología de Etienne y Prado (1982), se evaluó la composición, estructura vertical, cobertura y artificialidad de las formaciones vegetales, cuya clasificación se basó en las tipologías de Gajardo (1994), Luebert y Pliscoff (2006) y el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2015).

Inventario de flora

A partir de los datos de terreno, se elaboró una lista sistemática de flora vascular, que incluye la clasificación taxonómica, origen geográfico y aspectos biológicos de las especies. Para analizar el material botánico, se empleó un microscopio digital y se consultaron monografías, revisiones y guías de campo especializadas (ver detalles en la bibliografía). La nomenclatura taxonómica corresponde al catálogo de Rodríguez *et al.* (2019).

Análisis de heterogeneidad espacial y perturbación antrópica

Mediante la versión 3.22 de QGIS, se cartografiaron las coberturas espaciales en cada uno de los 13 sitios de muestreo, y se determinaron sus valores de superficie (coordenadas UTM, *datum* WGS 84, zona 19 J). Además, se les asignaron valores relativos de perturbación antrópica (PA) de acuerdo con sus niveles de artificialidad (Tabla 7).

A continuación, se calculó el índice de diversidad espacial de Shannon (H') y un índice de perturbación antrópica media, cuyas fórmulas se indican a continuación:

Índice de diversidad espacial de Shannon (H')

$$H' = \sum_{i,j=1}^s P_{ij} \cdot \ln(P_{ij}) \quad (\text{Ec.1})$$

i = cada cobertura espacial en el sitio j

s = número de coberturas del sitio j

p_i = área relativa de cada cobertura expresada en decimales

Índice de perturbación antrópica media (IPA). Media ponderada de los PA de cada cobertura en función de su superficie.

$$IPA = \frac{\sum PA_{ij} A_{ij}}{\sum A_{ij}} \quad (\text{Ec.2})$$

PA_i = Valor relativo de perturbación antrópica de cada cobertura en el sitio j

A_i = Superficie de cada cobertura en el sitio j

Tabla 7. Valor relativo de perturbación antrópica (PA) asociado a cada tipo de cobertura.
Fuente: Elaboración propia.

Tipo de cobertura	Valor relativo de perturbación antrópica (PA)
Ambiente artificial	1,00
Tierras agrícolas	0,75
Plantación forestal exótica	0,50
Matorral degradado	0,25
Vega degradada	0,25
Cuerpo de agua	0,00
Llanura aluvial sin vegetación	0,00
Matorral higrófito arborescente	0,00
Matorral higrófito arbustivo	0,00
Matorral higrófito ralo	0,00
Pradera higrófito o vega	0,00
Vegetación helófito/higrófito	0,00

Resultados

Vegetación

En el HCRE se reconocieron 5 formaciones vegetales, todas de tipo intrazonal: comunidad higrófito, herbazales helófitos, pradera higrófito o vega, matorral arborescente de *Baccharis salicifolia* y *Salix humboldtiana* y matorral arbustivo de *Tessaria absinthioides* y

Baccharis linearis (Fig. 15). Estas unidades son objeto de una intensa presión antrópica, derivada de la urbanización, la alteración de cauces, la deforestación, el pastoreo y, en menor medida, el tránsito pedestre. Dichas actividades redundan en la fragmentación, alteración fisonómica y empobrecimiento florístico de la vegetación, que resultan muy evidentes entre los sitios del Almendral y la desembocadura. Un aspecto de particular interés es la presencia de especies invasoras, sobre todo de *Myoporum laetum* (mióporo), *Tamarix* sp. (taray) y *Typha angustifolia* (totora), la que además de tener propiedades alelopáticas (Jarchow y Cook 2009), promueve la ralentización y colmatación de los cuerpos de agua (Díaz-Espinosa *et al.* 2012).



Figura 15. Formaciones vegetales presentes en el área de estudio: (a) asociación hidrófita de *Hydrocotyle ranunculoides* (tangué), *Ludwigia peploides* (duraznillo de agua) y *Chara* sp.; (b) herbazal helófito de *Schoenoplectus californicus* (batro); (c) herbazal helófito de *Typha angustifolia* (totora), (d) herbazal helófito de *Schoenoplectus pungens* (juncia); (e) herbazal helófito de *Eleocharis pseudoalbibracteata* (junquillo); (f) pradera higrófito o vega de *E. pseudoalbibracteata* y *Paspalum vaginatum* (chépica mansa); (g) matorral arborescente de *Baccharis salicifolia* (chilca) y *Salix humboldtiana* (sauce criollo); (h) matorral arbustivo de *Tessaria absinthioides* (brea) y *Baccharis linearis* (romerillo). Autor de las fotografías: Víctor Pastén.

Flora vascular

En el HCRE se registraron 96 especies de plantas vasculares, agrupadas en 2 divisiones, 3 clases, 41 familias y 83 géneros. La familia con mayor riqueza es Asteraceae, que comprende el 14,6 % de la flora analizada (Tabla 10). El 12,5 % de las especies son endémicas de Chile, el 50,0 % nativas no endémicas y el 37,5 % adventicias. El 85,4 % presenta un ciclo de vida perenne, el 11,5 % anual y el 3,1 % bienal. Las formas de crecimiento más representativas son las herbáceas (64,6 %) y los arbustos (21,9 %), seguidos por los árboles (8,3 %) y los subarbustos (5,2 %). Respecto a las formas biológicas (Raunkiær 1934), se observó un 39,6 % de hemicriptófitas, 29,2 % de fanerófitas, 12,5 % de terófitas, 9,4 % de hidrófitas, 4,2 % de geófitas y caméfitas y un 1,0 % de epífitas (Fig. 16).

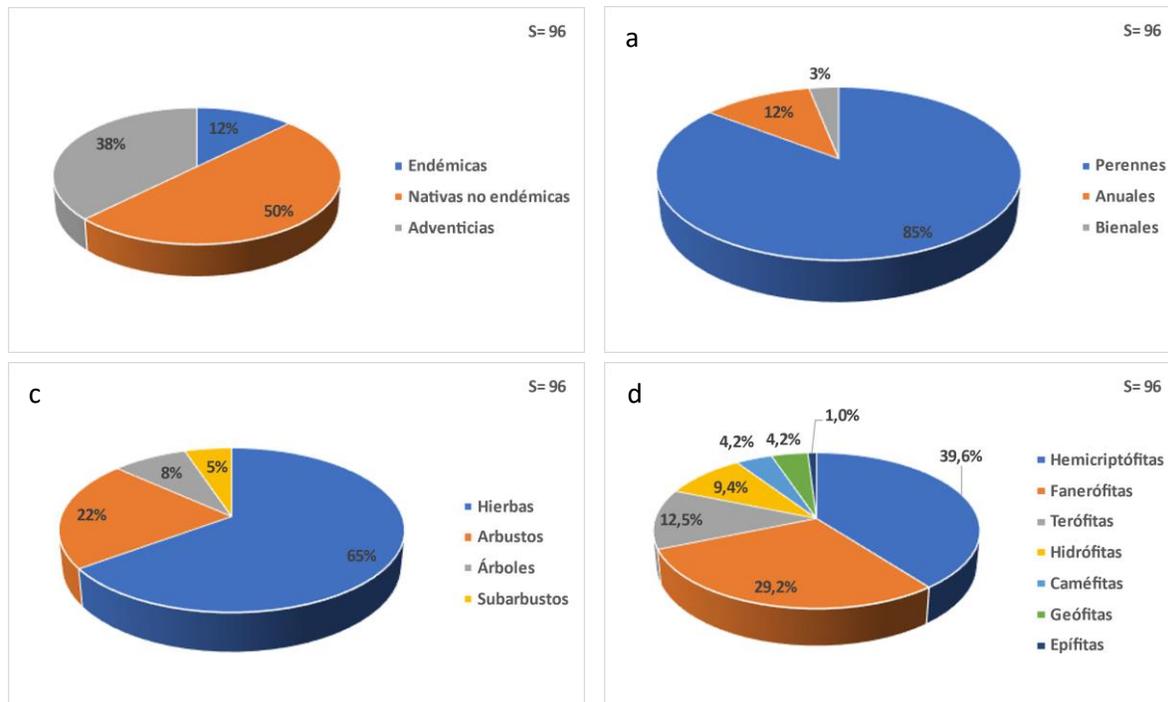


Figura 16. Composición florística del área de estudio según (a) origen geográfico, (b) ciclo de vida, (c) forma de crecimiento y (d) forma biológica (según Raunkiær, 1934). Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Representantes de la flora vascular del sitio de estudio: (a) brea (*Tessaria absinthioides*), (b) roseta de los pantanos (*Selliera radicans*) y (c) contrayerba (*Stemodia durantifolia*). Autor de las fotografías: Víctor Pastén.



Figura 18. Representantes de la flora vascular del sitio de estudio: (a) sauce criollo (*Salix humboldtiana*), (b) cartucho (*Agalinis linarioides*), (c) cola de zorro (*Cortaderia selloana*) y (d) quintral del molle (*Tristerix verticillatus*). Autor de las fotografías: Víctor Pastén.

Coberturas espaciales

En el HCRE se identificaron 12 tipos de coberturas: 7 naturales, 2 seminaturales y 3 artificiales (Fig. 15). Las naturales corresponden a cuerpos de agua, formaciones vegetales y llanuras aluviales sin vegetación; las seminaturales, a matorrales y vegas degradados; y las artificiales, a edificaciones, caminos, obras hidráulicas, zonas de extracción o acopio de áridos y basurales. Las tierras agrícolas y plantaciones forestales se consideran por separado. A continuación, se describen seis de las coberturas analizadas:

- **Vegetación acuática.** Esta cobertura incluye dos tipos de formaciones: hidrófitas y helófitas (macrófitas emergentes).
- **Comunidad hidrófita.** Unidad vegetal compuesta por hidrófitas arraigadas y libres, asociadas a lagunas o aguas de curso lento. Comprende tres clases de

asociaciones: radicantes de tipo natante, con especies como *Hydrocotyle bonariensis* (tembladera), *Hydrocotyle ranunculoides* (tangué) y *Ludwigia peploides* (duraznillo de agua); radicantes sumergidas, compuestas por *Chara* sp., *Stuckenia filiformis* (huiró de río) y *Myriophyllum aquaticum* (loroma); y errantes, dominadas por *Azolla filiculoides* (flor del pato), *Utricularia gibba* (chupabichos) y *Limnobium laevigatum* (hierba guatona).

- **Herbazales helófitos.** Conjunto de comunidades palustres compuestas por hierbas emergentes, en especial ciperáceas, tifáceas y juncáceas. Se desarrolla en ambientes someros, como lagunas, aguas de curso lento y afloramientos freáticos. En el área de estudio se observaron 4 asociaciones de este tipo, dominadas, respectivamente, por *Schoenoplectus californicus* (bato), *Typha angustifolia* (totora), *Schoenoplectus pungens* (juncia) y *Eleocharis pseudoalbibracteata* (junquillo). La asociación más extensa y continua de este tipo es el herbazal de *T. angustifolia* o totoral, que se concentra en los sitios de muestreo de la desembocadura del HCRE (tramo final del río Elqui).
- **Pradera higrófito de *Eleocharis pseudoalbibracteata* y *Paspalum vaginatum* (vega).** Formación cespitosa propia de ambientes anegadizos, dominada por *E. pseudoalbibracteata* (junquillo) y *P. vaginatum* (chépica dulce) (Fig. 15). Entre sus especies acompañantes destacan *Anagallis alternifolia* (pimpinela), *Bacopa monnieri* (bacopa) y *Selliera radicans* (roseta de los pantanos).
- **Matorral arborescente de *Baccharis salicifolia* y *Salix chilensis*.** Formación higrófito densa circunscrita a planicies de inundación. Alcanza una altura de 10 m y está dominada por *Baccharis salicifolia* (chilca) y *Salix humboldtiana* (sauce criollo) (Fig. 15). Su estrato arbóreo presenta una cobertura de entre 10 y 25 % y también se compone de *Maytenus boaria* (maitén) y *Otholobium glandulosum* (culén). Entre los arbustos o subarbustos acompañantes destacan *Tessaria absinthioides* (brea), *Baccharis linearis* (romerillo), *Solanum pinnatum* (hierba del chavalongo) y, en las áreas menos inundables, *Acacia caven* (espino) y *Schinus polygamus*

(huingán). En el estrato herbáceo predominan *Baccharis glutinosa* (chilquilla), *Phyla nodiflora* (tiquitiqui) y *Paspalum vaginatum* (chépica dulce).

- **Matorral arbustivo de *Tessaria absinthioides* y *Baccharis linearis*.** Formación higrófito, por lo general densa, asociada a quebradas húmedas y planicies de inundación. Alcanza una altura de 4 m y se compone principalmente de *T. absinthioides* (brea) y *B. linearis* (romerillo) (Fig. 15). Se establece tanto en ambientes naturales como antropizados y corresponde en algunos sectores a un primer nivel de degradación del matorral arborescente.

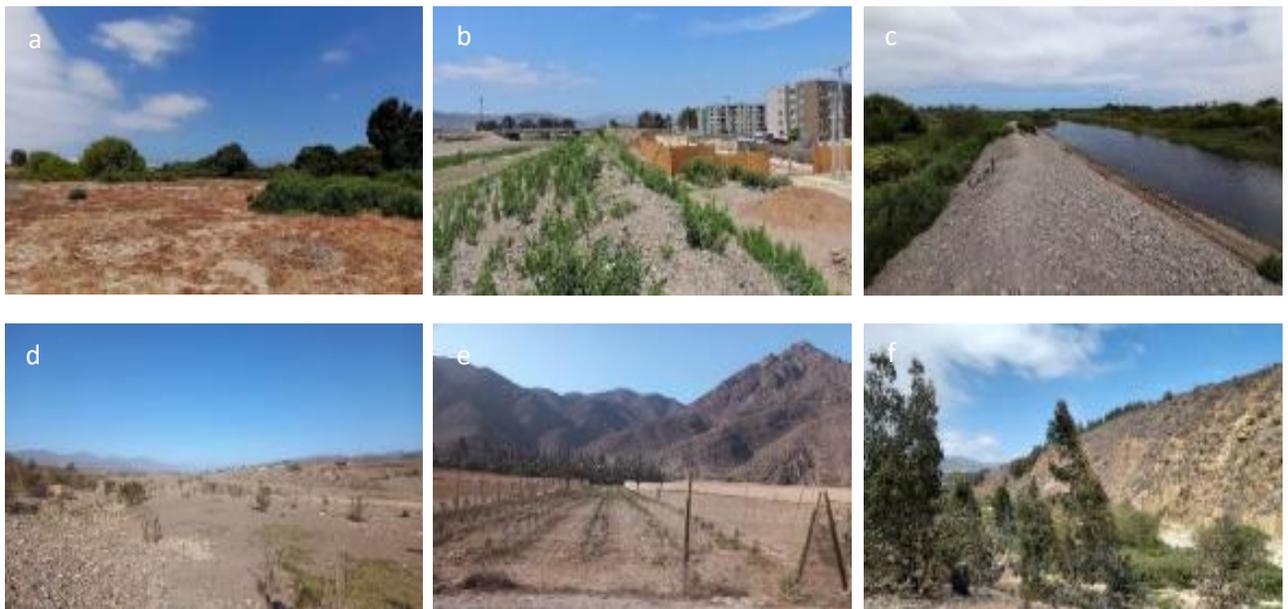


Figura 19. Coberturas seminaturales y artificiales presentes en el sitio de estudio: (a) matorral degradado con presencia de vegetación ruderal, (b) ampliación urbana en la ribera sur del río Elqui, (c) pretiles para el control de crecidas, (d) zona deforestada a consecuencia de la extracción de áridos, (e) nueva plantación de paltos en las cercanías del sitio 1 (El Almendral), (f) plantación de eucalipto azul (*Eucalyptus globulus*) en sector Almendral. Autor de las fotografías: Víctor Pastén.

Heterogeneidad espacial y nivel de perturbación antrópica de los sitios

La mayor cobertura vegetal ($n = 7-8$) de se registró en los sitios 1, 2, 4, 7, 11 y 12; la menor ($n = 2-3$), en los sitios 10 y 13. En las demás estaciones se observaron entre 5 y 6 tipos de coberturas (Tabla 10 y Fig. 17). De acuerdo con el índice de Shannon, los sitios más heterogéneos ($H' = 0,77-0,81$) fueron el 1, 12 y 11, mientras que los sitios 2, 3 y 6 fueron los más homogéneos ($H' = 0,21-0,40$). El resto del área presentó una diversidad espacial intermedia ($H' = 0,51-0,67$) (Tabla 8).

La artificialidad de los sitios se asoció principalmente con la infraestructura urbana, la degradación vegetal por usos no urbanísticos (p. ej., tala, pastoreo, tránsito pedestre) y la habilitación de tierras agrícolas. Los niveles más altos de perturbación antrópica (IPA = 0,46-0,55) correspondieron a los sitios 2, 3, 4 y 9; los niveles mas bajos (IPA = 0,00-0,09), a los sitios 6, 7, 8 y 13m. En el resto las estaciones el IPA varió entre 0,15 y 0,43 (Tabla 8).

Tabla 8. Número y proporción de coberturas espaciales de los sitios analizados. Se muestran, además, los índices de perturbación antrópica media (IPA) y de diversidad espacial de Shannon (H') calculados para cada estación. La superficie individual de las parcelas de muestreo es de 0,8 ha. VN = vegetación natural, CA = cuerpos de agua, LA = llanuras aluviales sin vegetación, PF = plantaciones forestales, AG = tierras agrícolas, AR = ambientes artificiales. Fuente: Elaboración propia.

a

Sitio	Coberturas	IPA	H'	VN	CA	LA	VD	PF	AG	AR
1	8	0,15	0,77	0,62	0,18	0,03	0,03	0,01	0,00	0,14
2	7	0,55	0,51	0,14	0,12	0,20	0,00	0,00	0,00	0,54
3	6	0,50	0,61	0,21	0,22	0,00	0,09	0,00	0,00	0,47
4	7	0,49	0,67	0,37	0,13	0,00	0,00	0,00	0,08	0,43
5	5	0,43	0,63	0,39	0,08	0,00	0,13	0,00	0,00	0,40
6	6	0,00	0,40	0,53	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00
7	7	0,05	0,64	0,37	0,00	0,50	0,10	0,00	0,00	0,03
8	6	0,09	0,67	0,39	0,00	0,41	0,16	0,00	0,00	0,05
9	6	0,46	0,60	0,30	0,00	0,23	0,01	0,00	0,00	0,46
10	3	0,22	0,37	0,12	0,00	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00
11	8	0,35	0,81	0,37	0,01	0,00	0,36	0,00	0,00	0,25
12	8	0,18	0,79	0,57	0,10	0,00	0,19	0,00	0,04	0,11
13	2	0,00	0,21	0,19	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Índice de Calidad Florística (ICF). Incluye letra m) Índices de diversidad biológica del humedal.

El índice de calidad florística (Mortellaro *et al.*, 2009) es una medida cuantitativa de integridad ambiental que incorpora dos variables de las especies vegetales: su afinidad por los ambientes naturales y su tolerancia a la perturbación antrópica. El ICF es una herramienta confiable que requiere pocos datos y permite la comparación objetiva entre diferentes sitios. En principio, a cada especie vegetal se le asigna un valor discreto de conservatismo (C), el que varía entre 0 y 10 (Tablas 9 y 10). Los valores de C solo se aplican a especies nativas según el conocimiento empírico de la zona en estudio (criterio de

experto). Por ejemplo, *Phyla nodiflora* es una especie facultativa (crece tanto en ambientes naturales como perturbados) y se le atribuye un valor de C igual a 2. *Schoenoplectus californicus*, en cambio, se desarrolla en ambientes naturales de baja calidad y le corresponde un valor de C igual a 5.

Tabla 9. Valores y criterios de clasificación del índice de calidad florística (ICF). Fuente: Elaboración propia.

Valor de C	Criterio de clasificación de especies
0	De presencia obligada en ambientes perturbados
1	Más frecuente en ambientes perturbados que en naturales
2	Especie facultativa
3	Menos frecuente en ambientes perturbados que en naturales
4	Mucho más frecuente en ambientes naturales que en perturbados
5	Solo presente en ambientes naturales, con preferencia de baja calidad
6	Afinidad menor por ambientes naturales de alta calidad
7	Afinidad moderada por ambientes naturales de alta calidad
8	Afinidad elevada por ambientes naturales de alta calidad
9	Afinidad muy elevada por ambientes naturales de alta calidad
10	De presencia obligada en ambientes naturales de alta calidad

Tabla 10. Gremios de especies vegetales según su afinidad por los ambientes naturales o tolerancia a la perturbación antrópica. Fuente: Elaboración propia.

C	Criterio de clasificación de especies
0	Afinidad total por ambientes perturbados
1-3	Afinidad variable por ambientes perturbados
4-6	Afinidad variable por ambientes naturales (C es igual a 5 cuando la calidad ambiental es baja)
7-9	Afinidad variable por ambientes naturales de alta calidad
10	Afinidad total por ambientes naturales de alta calidad

Cálculo del ICF

En primer lugar, se calcula el valor medio de conservatismo:

$$\bar{C} = \frac{\sum C}{S} \tag{Ec.3}$$

C = valor de conservatismo de cada especie nativa
 S = Riqueza de especies nativas en el sitio evaluado

Luego se calcula el IFC con la siguiente fórmula:

$$ICF^1 = \frac{\bar{c}}{\sqrt{s}} \quad (\text{Ec.4})$$

Consideraciones y aplicación potencial del ICF en ciencia ciudadana

Exceptuando algunas especies presentes en Norteamérica, este Índice de Calidad Florística (ICF) no ha sido usado en Chile, por lo que esta propuesta metodológica se expone ante la posibilidad de ser incluida en un futuro Programa de Monitoreo por ser de aplicación relativamente sencillo. Para esto último se tendrán que considerar los siguientes pasos:

1. Definir áreas de referencia.
2. Confeccionar listas de flora de dichas áreas.
3. Desarrollar un criterio de clasificación (ver tabla 2).
4. Formar un núcleo de expertos para definir el valor de C de cada especie nativa.
5. Clasificar las especies según los valores de C asignados (C= 0-10).
6. Convocar a revisores para validar la clasificación propuesta y adoptar un consenso para su uso.

La sencillez matemática y metodológica del ICF lo convierten en un recurso muy aplicable en actividades de ciencia ciudadana. Una vez que los valores de C se encuentran disponibles, el principal desafío para los participantes es identificar correctamente cada una de las especies observadas, para lo cual se puede contar con guías de campo y asesoría profesional.

Conclusiones de flora y vegetación.

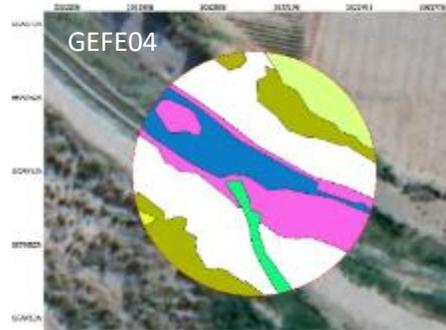
La mayoría de los 13 sitios de muestreos presentó una alta riqueza de coberturas (n = 5-8), pero solo una pequeña proporción de estas correspondió a vegetación natural y cuerpos de agua. Esto último concuerda con los resultados de Tabilo *et al.* (2021) y se relaciona principalmente con la expansión urbana, la degradación vegetal por usos no urbanísticos

(p. ej., tala, pastoreo, tránsito pedestre) y, en menor medida, con la habilitación de tierras agrícolas.

Desde un punto de vista ecosanitario, la pérdida vegetal del humedal del Elqui adquiere una especial relevancia, sobre todo en lo que respecta a formaciones hidrófitas y helófitas. Varias de las especies de estas comunidades pueden acumular, asimilar o incluso descomponer sustancias como nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos, con lo que desempeñan una función depuradora clave (Celis-Hidalgo *et al.*, 2005). Este servicio ecosistémico, sumado a una alta capacidad de regeneración y fácil propagación (Rodríguez y Fica, 2020), supone una importante razón para recuperar y conservar las poblaciones de macrófitas nativas.

Exige una mención particular la presencia de especies invasoras como la Totora (*Typha angustifolia*), el Taray (*Tamarix* sp.) y el Mióporo (*Myoporum laetum*) (Díaz-Espinosa *et al.*, 2012, Sullivan, 2014; Marlin *et al.*, 2017), que en sectores próximos a la desembocadura dan indicios de una rápida expansión. Por ello, su control es una tarea urgente, a la que pueden contribuir científicos, tomadores de decisión y otros miembros de la comunidad.

La Figura 20 a continuación, describe las coberturas vegetacionales en los 13 sitios muestreados y propuestos como estaciones de monitoreo en un futuro Programa de Monitoreo del Río Elqui.



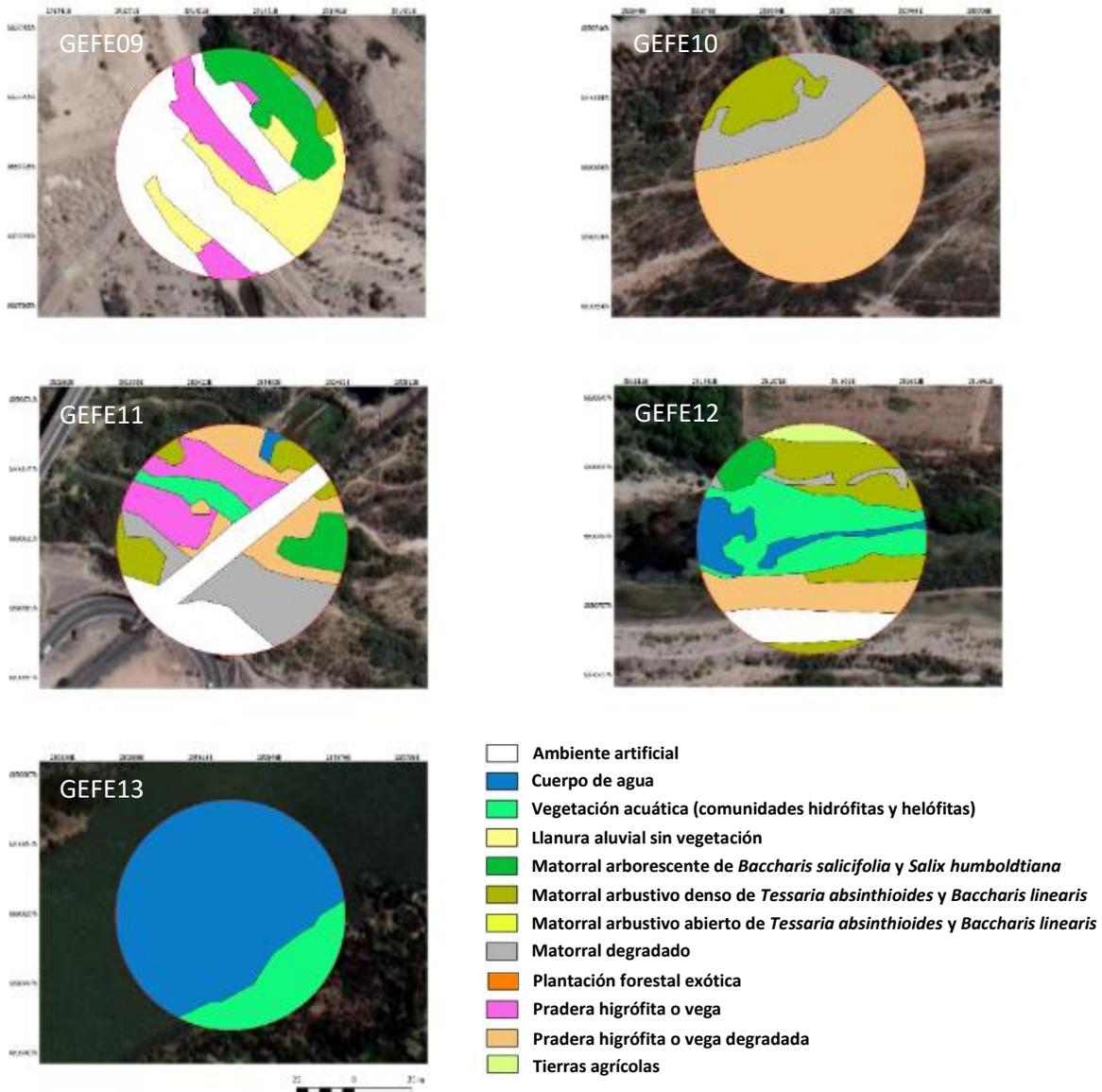


Figura 20. Mapas de coberturas del suelo identificadas en cada uno de los 13 sitios propuestos para monitoreo (radio de las parcelas = 50 m; escala del mapa base = 1:800). A los efectos del análisis espacial, los matorrales arbustivos densos y abiertos se agruparon en una misma categoría. Imágenes satelitales: Google Maps (2022). GEF01: Almendral, GEF02: Qda. Marquesa, GEF03: Pelicana, GEF04: Qda de Talca, GEF05: Las rojas, GEF06: Altovalsol, GEF07: Algarrobito, GEF08: Pte Algarrobito; GEF09: Alfalfares, GEF10: Pte. Zorrilla, GEF11: Pte. Fiscal, GEF12: Arriba Laguna costera, GEF13: Desembocadura. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Lista sistemática de la flora vascular registrada en el presente estudio. Origen geográfico (OG): E= endémica, N= nativa no endémica, A= adventicia; ciclo de vida (CV): A= anual, B= bienal, P= perenne; forma de crecimiento (FC): H= hierba, S= subarbusto, F= arbusto, T= árbol; forma biológica según Raunkiaer (Smith, 1913): T= terófito, Ge= geófito, Hi= hidrófito, Hc= hemicriptófito, C= caméfito, Nf= nanofanerófito, mf= microfanerófito, Mf= mesofanerófito, MF= macrofanerófito, Ep= epífita. Fuente: Elaboración propia.

División	Clase	Familia	Especie	Autor	Nombre común	OG	CV	FC	FB
Pteridophyta	Polypodiopsida	Equisetaceae	<i>Equisetum pyramidale</i>	Goldm.	Canutillo	E	P	H	Hc
Pteridophyta	Polypodiopsida	Pteridaceae	<i>Adiantum chilense</i>	Kaulf	Palito negro	E	P	H	Hc
Pteridophyta	Polypodiopsida	Salviniaceae	<i>Azolla filiculoides</i>	Lam.	Flor del pato	N	A	H	Hi
Pteridophyta	Polypodiopsida	Thelypteridaceae	<i>Thelypteris argentina</i>	(Hieron.) Abbiatti	Regaliz	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Alismataceae	<i>Alisma plantago-aquatica</i>	L.	Llantén de agua	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Cyperaceae	<i>Cyperus eragrostis</i>	Lam.	Cortadera	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Cyperaceae	<i>Eleocharis pseudoalbibracteata</i>	S. González & Guagl.	Junquillo	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Cyperaceae	<i>Schoenoplectus californicus</i>	(C.A. Mey.) Soják	Batro	N	P	H	Ge
Magnoliophyta	Liliopsida	Cyperaceae	<i>Schoenoplectus pungens</i>	(Vahl) Palla	Juncia	N	P	H	Ge
Magnoliophyta	Liliopsida	Hydrocharitaceae	<i>Limnobium laevigatum</i>	(Humb. & Bonpl. Ex Willd.) Heine	Hierba guatona	A	P	H	Hi
Magnoliophyta	Liliopsida	Juncaceae	<i>Juncus pallescens</i>	Lam.	Junco	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Juncaginaceae	<i>Triglochin striata</i>	Ruiz & Pav.	Hierba de la paloma	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Poaceae	<i>Arundo donax</i>	L.	Caña común	A	P	H	Ge
Magnoliophyta	Liliopsida	Poaceae	<i>Cortaderia selloana</i>	(Schult. & Schult.f.) Asch. & Graebn. Emend. Testoni & Villamil	Cola de zorro	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Poaceae	<i>Cynodon dactylon</i>	(L.) Pers.	Chépica brava	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Poaceae	<i>Distichlis spicata</i>	(L.) Greene	Gramma salada	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Poaceae	<i>Paspalum vaginatum</i>	Sw.	Chépica mansa	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Liliopsida	Poaceae	<i>Polypogon monspeliensis</i>	(L.) Desf.	Rabo de zorra	A	A	H	Te
Magnoliophyta	Liliopsida	Potamogetonaceae	<i>Stuckenia filiformis</i>	(Pers.) Boehm.	Huero de río	N	P	H	Hi
Magnoliophyta	Liliopsida	Typhaceae	<i>Typha angustifolia</i>	L.	Tatora	A	P	H	Ge
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Aizoaceae	<i>Galenia pubescens</i>	(Eckl. & Zeyh.) Druce	Galenia	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Aizoaceae	<i>Mesembryanthemum crystallinum</i>	L.	Hierba del rocío	A	A	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Anacardiaceae	<i>Schinus areira</i>	L.	Pimiento	N	P	T	Mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Anacardiaceae	<i>Schinus polygamus</i>	(Cav.) Cabrera	Huingán	N	P	F	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Apiaceae	<i>Apium nodiflorum</i>	(L.) Lag.	Berraza	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Apiaceae	<i>Hydrocotyle bonariensis</i>	Lam.	Tembladera	N	P	H	Hi
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Apiaceae	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	L.f.	Tangué	N	P	H	Hi
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Ambrosia arborescens</i>	Mill.	Marco	A	P	F	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Baccharis glutinosa</i>	Pers.	Chilquilla	N	P	H	Hc

Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Baccharis linearis</i>	(Ruiz & Pav.) Pers.	Romerillo	N	P	F	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Baccharis salicifolia</i>	(Ruiz & Pav.) Pers.	Chilca	N	P	F	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Cirsium vulgare</i>	(Savi) Ten.	Cardo negro	A	A/B	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Cotula coronopifolia</i>	L.	Botón de oro	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Encelia canescens</i>	Lam. (Hook. & Arn.) S.F. Blake	Coronilla de fraile	N	P	S/F	C
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Gutierriza resinosa</i>	(DC.) Gay	Pichanilla	E	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Haplopappus parvifolius</i>	L.	Desconocido	Inde t.	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Hypochaeris</i> sp.	D. Don	Cola de ratón	E	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Pleocarphus revolutus</i>	(Molina) Anderb.	Viravira	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Senecio bridgesii</i>	Hook. & Arn.	Senecio	E	P	S	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Tessaria absinthioides</i>	(Hook. & Arn.) DC.	Brea	N	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Brassicaceae	<i>Hirschfeldia incana</i>	(L.) Lagr.-Fossat	Rabaniza amarilla	A	A/B	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Brassicaceae	<i>Nasturtium officinale</i>	R. Br.	Berro	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Celastraceae	<i>Maytenus boaria</i>	Molina	Maitén	N	P	T	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Chenopodiaceae	<i>Atriplex repanda</i>	Phil.	Sereno	E	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Chenopodiaceae	<i>Atriplex semibaccata</i>	R. Br. (L.) S.	Pasto salado	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Chenopodiaceae	<i>Chenopodium murale</i>	Fuentes, Uotila & Borsch	Quinuilla	A	A	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Chenopodiaceae	<i>Dysphania ambrosioides</i>	(L.) Mosyakin & Clemants (Lag.) M.A.	Paico	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Chenopodiaceae	<i>Sarcocornia neei</i>	Alonso & M.B. Crespo	Hierba sosa	N	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i>	L.	Higuerilla	A	P	H/S	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Fabaceae	<i>Acacia caven</i>	(Molina) Molina	Espino	N	P	T	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Fabaceae	<i>Acacia karroo</i>	Hayne	Espina dulce	A	P	F/T	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Fabaceae	<i>Albizia lophanta</i>	(Willd.) Benth.	Acacia plumosa	A	P	T	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Fabaceae	<i>Lotus corniculatus</i>	L.	Cuernecillo	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Fabaceae	<i>Medicago polymorpha</i>	L.	Hualputra	A	A	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Fabaceae	<i>Melilotus indicus</i>	(L.) All.	Meliloto	A	A	H/S	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Fabaceae	<i>Trifolium repens</i>	L.	Trébol blanco	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Frankeniaceae	<i>Frankenia chilensis</i>	K. Presl	Hierba del salitre	N	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Geraniaceae	<i>Erodium cicutarium</i>	(L.) L'Hér. ex Aiton	Alfilerillo	A	A/B	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Goodeniaceae	<i>Selliera radicans</i>	Cav.	Roseta de los pantanos	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Haloragaceae	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	(Vell.) Verdc.	Loroma	E	P	H	Hi
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Heliotropiaceae	<i>Heliotropium curassavicum</i>	L.	Cama de sapo	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Heliotropiaceae	<i>Heliotropium stenophyllum</i>	Hook. & Arn	Palo negro	E	P	F	C
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Lentibulariaceae	<i>Utricularia gibba</i>	L.	Chupabichos	N	P	H	Hi

Magnoliophyta	Magnoliopsida	Loranthaceae	<i>Tristerix verticillatus</i>	(Ruiz & Pav.) Barlow & Wiens	Quintral del molle	N	P	F	Ep
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Malvaceae	<i>Malvella leprosa</i>	(Ortega) Krapov	Malva de salitral	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Myrtaceae	<i>Eucalyptus globulus</i>	Labil	Eucalipto azul	A	P	T	M F
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Onagraceae	<i>Ludwigia peploides</i>	(Kunth) P.H. Raven	Duraznillo de agua	N	P	H	Hi
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Orobanchaceae	<i>Agalinis linarioides</i>	(Cham. & Schltld.) D'Arcy	Cartucho	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Orobanchaceae	<i>Bellardia viscosa</i>	(L.) Fisch. & C.A. Mey	Algarabía pegajosa	A	A	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Phrymaceae	<i>Erythranthe glabrata</i>	(Kunth) G.L. Nesom	Berro amarillo	N	A	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Plantaginaceae	<i>Bacopa monnieri</i>	(L.) Pennell	Bacopa	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Plantaginaceae	<i>Plantago lanceolata</i>	L.	Llanten menor	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Plantaginaceae	<i>Plantago major</i>	L.	Llantén mayor	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Plantaginaceae	<i>Plantago pachyneura</i>	Steud.	Llantén	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Plantaginaceae	<i>Stemodia durantifolia</i>	(L.) Sw.	Contrayerba	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Plantaginaceae	<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	L.	Verónica acuática	A	A	H	Hi
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Polygonaceae	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>	(Walp.) Standl.	Mollaca	N	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Polygonaceae	<i>Persicaria maculosa</i>	Gray	Duraznillo	A	A	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Polygonaceae	<i>Rumex</i> sp.	L.	Romaza	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Primulaceae	<i>Anagallis alternifolia</i>	Cav.	Pimpinela	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Primulaceae	<i>Samolus valerandi</i>	L.	Pamplina de agua	A	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Salicaceae	<i>Salix humboldtiana</i>	Willd.	Sauce criollo	N	P	T	Mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Scrophulariaceae	<i>Buddleja</i> sp.	Houst. ex L.	Matico	A	P	F	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Scrophulariaceae	<i>Myoporum laetum</i>	G. Forst.	Mióporo	A	P	F	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Cestrum parqui</i>		Palqui	N	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Lycium chilense</i>	Miers ex Bertero	Coralillo	N	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Nicotiana glauca</i>	Graham	Tabaco moro	N	P	F	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Nicotiana knightiana</i>	Goodsp.	Tabaco cimarrón	A	A	H	Te
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Nolana crassulifolia</i>	Poepp.	Sosa brava	E	P	S/F	C
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Nolana</i> cf. <i>N. werdermannii</i>	I.M. Johnst.	Suspiro	E	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Solanum furcatum</i>	Dunal	Hierba mora	N	P	H/S	C
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Solanaceae	<i>Solanum pinnatum</i>	Cav.	Hierba del chavalongo	E	P	S	Nf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Tamaricaceae	<i>Tamarix</i> sp.	L.	Taray	A	P	F/T	mf
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Verbenaceae	<i>Phyla nodiflora</i>	(L.) Greene	Tiquitiqui	N	P	H	Hc
Magnoliophyta	Magnoliopsida	Verbenaceae	<i>Verbena litoralis</i>	Kunth	Verbena	N	P	H	Hc

Componente Biótico Fauna Vertebrados

Introducción

En la región de Coquimbo (Chile), existen al menos 16 humedales costeros que forman parte de un gran corredor ecológico en Sudamérica, los mismos que son de gran importancia para numerosas especies de aves migratorias, fauna nativa, endémica y flora característica (García *et al.* 2021). La ubicación geográfica les confiere a estos humedales un gran valor ecológico, debido a que forman parte del desierto de Atacama y se asocian con matorrales y vegetación característica de humedales principalmente (García *et al.* 2021).

Muchos de estos humedales se encuentran sometidos a la presión de diferentes actividades industriales, urbanas, agrícolas, entre otras, lo que trae como consecuencia un incremento del uso de agua, convirtiendo a los ecosistemas costeros asociados en receptores de alteraciones e impactos, colocándolos en un estado de alta vulnerabilidad (Tabilo *et al.* 2017). Un humedal emblemático y altamente amenazado es el río Elqui que desemboca en la bahía de Coquimbo. Este río es el más septentrional de la zona semiárida de Chile y representa el límite sur del desierto de Atacama.

En el marco de la ejecución del Proyecto GEFSEC ID: 9766 “Promoviendo la conservación y el manejo sostenible de los humedales costeros y sus cuencas aportante, 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 mismo que pretende la conservación y uso sostenibles de los ambientes acuáticos costeros; se propuso desarrollar, de manera técnica, un diagnóstico ambiental actual y fuentes emisoras del Humedal Costero del Río Elqui (HCRE). Este diagnóstico pretende dar cuenta del estado ambiental del humedal, considerando su estado trófico, ecológico, físico y químico, en función de las fuentes emisoras puntuales y difusas presentes en el humedal. Es en este contexto que este reporte contribuye con dar a conocer la fauna asociada a las fuentes emisoras identificadas dentro de lo que se considera como humedal costero río Elqui, definido en

consultorías anteriores (Figueroa *et al.* 2021, Tabilo *et al.* 2021); así como, presentar una propuesta de monitoreo de la fauna en estas fuentes emisoras.

Objetivo General

Determinar la diversidad de especies de fauna vertebrada (anfibios, reptiles, aves y mamíferos), en 13 sitios identificados como fuentes emisoras puntuales y difusas del HCRE, como base para su posterior monitoreo.

Objetivos Específicos

- Estimar la riqueza y abundancia de anfibios, reptiles, aves y mamíferos
- Determinar el origen geográfico y estado de conservación
- Elaborar una planilla de monitoreo con enfoque de ciencia ciudadana de acuerdo con el protocolo de muestreo propuesto.

Metodología

En primera instancia, en noviembre de 2021 se diseñó un protocolo de muestreo (registro de datos) como base para el monitoreo de fauna en fuentes emisoras puntuales y difusas del HCRE. El protocolo siguió experiencias descritas en Buckland *et al.* (2001), de la Maza y Bonacic (2013); además de la experiencia de los autores de este trabajo. Este primer protocolo diseñado, se puso a prueba entre noviembre de 2021 y enero de 2022 (esfuerzo de muestreo de ocho semanas), iniciando a las 8.00 horas, finalizando a las 18.00 horas y consistió en registrar las especies de fauna presentes en cada uno de los 13 sitios identificados como fuentes emisoras puntuales y difusas (Fig. 4. Tabla 1). Los 13 sitios corresponden a los sitios propuestos para el futuro Plan de Monitoreo del HCRE. Los datos de fauna se registraron en un área circular de 100 m de radio, durante una hora de recorrido del área.

Posteriormente, en el marco del **Taller 2 “Piloto Monitoreo en Terreno”**, realizado el martes 18 de marzo de 2022, entre las 9.00 y 13.00 horas, con la participación de 13 personas (Tabla 5), se visitaron los puntos de muestreo GEFE 13 (Humedal en Desembocadura. Tabla 1) y GEFE 12 (Laguna Costera. Tabla 1), ambas identificadas como

fuentes emisoras del HCRE. En el punto de muestreo GEFE 12, el protocolo de muestreo diseñado inicialmente, se puso a consideración de especialistas y potenciales participantes voluntarios en la toma de datos para el monitoreo. Durante el desarrollo de este taller, los participantes realizaron propuestas para mejorar el protocolo de muestreo, las cuales fueron analizadas y puestas a prueba en una segunda evaluación *in situ*. Esta segunda evaluación permitió valorar la incorporación de las nuevas ideas y obtener un protocolo estándar final y participativo. Una de las iniciativas a resaltar fue, reducir el radió del área de evaluación de 100 m a 50 m, debido a que, con un radio menor, se evitaba transgredir en propiedad privada. También se convino en que con un tiempo de 30 minutos en cada sitio de muestreo era suficiente ara el registro de la fauna.

Con estos aportes, se puso a prueba el nuevo protocolo de muestreo, en esta ocasión, sobre un radio de 50 m y un lapso de 30 minutos, recorriendo transectos paralelos, separados por 20 m. Esta segunda evaluación, se realizó entre el 19 de marzo y el 30 de abril de 2022 (esfuerzo de muestreo de seis semanas) entre las 8.00 y las 18.00 horas, con una pausa de una hora para alimentación. Una vez más, consideró la visita a los 13 sitios identificados como fuentes emisoras puntuales y difusas. Cuando el área de muestreo involucró una propiedad privada (con cerco que evitó el desplazamiento) que presentó vegetación de cualquier tipo, se evaluó visualmente de un lado a otro con la ayuda de binoculares Nikon 20x50 y un telescopio Bushnell 20x60 (sin transgredirla físicamente). Durante el recorrido, se identificó el mayor número de especies y abundancia posible, evitando el doble conteo. Como abundancia de cada especie, se consideró el máximo conteo de individuos realizado dentro de los 30 minutos de evaluación (Ralph et al. 1996, De la Maza y Bonacic 2013, SAG 2016).

Para evaluar la similitud entre el muestreo 1 (parcelas circulares de 100 m de radio) y el muestreo 2 (parcelas circulares de 50 m de radio), de acuerdo a los planteado por los participantes del taller del 18 de marzo de 2022, se compararon los resultados de los muestreos totales y de cada sitio, con el índice de similitud de Chao-Jaccard basado en abundancia (Chao *et al.* 2004) empleando el programa EstimateS (Colwell 2009).

El origen geográfico y estado de conservación de las especies de fauna se determinó con la lista de Clasificación de Especies, que resultó como producto de la aprobación del 17° proceso llevado a cabo por el Ministerio del Ambiente de Chile. Esta lista de Clasificación es accesible desde la siguiente dirección electrónica:

<https://clasificacionespecies.mma.gob.cl/>

Según lo señalado en el D.S. N°29/2012 (APRUEBA REGLAMENTO PARA LA CLASIFICACIÓN DE ESPECIES SILVESTRES SEGÚN ESTADO DE CONSERVACIÓN), del Ministerio del medio Ambiente, se emplearon las siguientes categorías de conservación.

- **Extinta (EX):** cuando no queda ninguna duda razonable de que el último individuo existente de dicha especie ha muerto. Se presume que una especie está Extinta cuando prospecciones exhaustivas de sus hábitats, conocidos y/o esperados, en los momentos apropiados (diarios, estacionales, anuales), y a lo largo de su área de distribución histórica, no han podido detectar un solo individuo. Las prospecciones deberán ser realizadas en períodos de tiempo apropiados al ciclo de vida y formas de vida de la especie.
- **Extinta en Estado Silvestre (EW):** cuando sólo sobrevive en cultivo, en cautividad o como población (o poblaciones) naturalizadas completamente fuera de su distribución original. Se presume que una especie está Extinta en Estado Silvestre cuando prospecciones exhaustivas de sus hábitats, conocidos y/o esperados, en los momentos apropiados (diarios, estacionales, anuales), y a lo largo de su área de distribución histórica, no han podido detectar un solo individuo.
- **En Peligro Crítico (CR):** cuando la mejor evidencia disponible indica que cumple con alguno de los criterios establecidos por la UICN para tal categoría y, por consiguiente, se considera que está enfrentando un riesgo extremadamente alto de extinción en estado silvestre.
- **En Peligro (EN):** cuando la mejor evidencia disponible indica que cumple con alguno de los criterios establecidos por la UICN para tal categoría y, por consiguiente, se considera que está enfrentando un riesgo muy alto de extinción en estado silvestre.
- **Vulnerable (VU):** cuando la mejor evidencia disponible indica que cumple con alguno de los criterios establecidos por la UICN para tal categoría y, por consiguiente, se considera que está enfrentando un riesgo alto de extinción en estado silvestre.

- **Casi Amenazada (NT):** cuando ha sido evaluada y no satisface, actualmente, los criterios para las categorías En Peligro Crítico, En Peligro o Vulnerable; pero está próximo a satisfacer los criterios de estos últimos, o posiblemente los satisfaga, en el futuro cercano.
- **Preocupación Menor (LC):** cuando, habiendo sido evaluada, no cumple ninguno de los criterios que definen las categorías de En Peligro Crítico, En Peligro, Vulnerable o Casi Amenazada. Se incluyen en esta categoría especies abundantes y de amplia distribución, y que por lo tanto pueden ser identificadas como de preocupación menor.
- **Datos Insuficientes (DD):** cuando no hay información adecuada para hacer una evaluación, directa o indirecta, de su riesgo de extinción basándose en la distribución y/o condición de la población.

- Muestreo de Anfibios

La búsqueda se realizó en aquellas fuentes emisoras puntuales y difusas que presentaron agua. Se recorrió el tramo del río por la orilla y cuando el caudal lo permitió, se ingresó al cuerpo de agua, donde se realizó observación directa y se removió manualmente rocas y parte del fondo con delicadeza.

- Muestreo de Reptiles

La recolección de datos de especies e individuos se realizó poniendo especial atención en sectores de formación arbustiva baja, entre rocas, bajo piedras, laderas, quebradas y/o pircas, levantando troncos y piedras, bajo los cuales algunas especies suelen permanecer ocultas (Halliday 1996). Para la identificación de las especies se empleó bibliografía especializada como Donoso-Barros (1966), Veloso y Navarro (1988), Núñez y Torres-Mura (1992), Núñez y Jaksic (1992), Pincheira-Donoso y Núñez (2005), Mella (2005) y Vidal y Labra (2008), Mella (2017).

- Muestreo de Aves

La identificación se realizó comparando las características del ave con las figuras expuestas en la bibliografía especializada como Araya y Millie (1992), Jaramillo (2003), Couve y Vidal (1999, 2003, 2004), Muñoz et al (2004), Martínez y González (2004) y Couve *et al.* (2016). Algunas vocalizaciones se compararon con la base de datos de Xeno-Canto (<http://www.xeno-canto.org/>). Finalmente, para evaluar aves nocturnas y de difícil

observación, en cada punto de muestreo se utilizó reproducciones de vocalizaciones, buscando respuesta o "play back" de estas especies. Cada vocalización se reprodujo no más de 3 veces para evitar perturbación de fauna en el sitio. Se emplearon las vocalizaciones de todas las especies nocturnas que podrían existir en el área de trabajo. Las vocalizaciones se obtuvieron de una base de datos propios y de una fuente aceptada por la comunidad científica proveniente de Xeno-Canto.

- Muestreo de Mamíferos

Tanto para los mamíferos medianos (zorros y otros) como para micromamíferos (roedores) se procuró identificar indicios de presencia como heces, revolcaderos, guaridas, aromas y huellas principalmente. Se prestó especial atención a aquellos sitios de mayor probabilidad de presencia como rocas, vegetación densa y pircas, que favorecen la presencia de refugios para los micromamíferos. La identificación de las especies se realizó empleando bibliografía especializada como Iriarte (2008) y Muñoz y Yañez (2000).

- Análisis de Datos

Todos los datos que involucraron el uso de sistemas de información geográfica, elaboración de mapas, ubicación de ejemplares amenazados, georreferenciación, etc., fueron procesados y analizados haciendo uso de los siguientes programas:

- Arc Gis, disponible desde <http://www.esri.com/>
- OziExplorer, disponible desde <http://www.ozieplorer.com/>

Se usó la proyección UTM, Datum WGS84 por ser de uso generalizado y fácilmente rastreable en el programa Google Earth.

Por el tamaño de las parcelas, la naturaleza del monitoreo (que apunta a un trabajo con enfoque de ciencia ciudadana) y el bajo número de individuos por especie (excepto las aves), no se realizaron cálculos de índices de diversidad, debido a que estos no representan un indicador de calidad de los puntos de muestreo para este tipo de monitoreo. La riqueza de especies es considerada como mejor indicador para este caso y enfoque relacionado a este monitoreo (Magurran 1988, Moreno 2001).

El índice de similitud se calculó con el programa EstimateS (Colwell 2009): <https://www.robertkcolwell.org/pages/estimates> .

Resultados

De manera general se encontraron cuatro tipos de sustrato no vegetal y cuatro formaciones vegetales, asociados a los 50 m de radio de los 13 sitios de muestreo propuestos para el Programa de Monitoreo del HCRE (Fig. 17):

- Sustrato No Vegetal
 1. Playa de la Laguna (PL): Sustrato normalmente fangoso que se encuentra en contacto con la formación lagunar de la desembocadura del río Elqui.
 2. Laguna: Cuerpo de agua de la formación lagunar de la desembocadura del río Elqui.
 3. Río: Corresponde al curso del río Elqui entre la Laguna y el Almendral.
 4. Suelo Pedregoso (SP): Sustrato que corresponde al cauce del río Elqui. Se encuentra en gran parte sin agua con piedras de diferente tamaño, característico del lecho de los ríos.

- Sustrato Vegetal
 1. Vegetación Helófitas (vegetación de vegas) (VHe). Formación semiacuática que comprende totorales de *Typha angustifolia*, pajonales de *Schoenoplectus* spp. y asociaciones cespitosas. Se desarrolla en las franjas ribereñas y en zonas de afloramiento de agua ubicadas en los márgenes fluviales.
 2. Matorrales y Bosques Ribereños (MBR). Comunidades leñosas distribuidas en las riberas y márgenes fluviales de casi toda el área de estudio, a saber: (1) matorral de *Baccharis* spp., (2) matorral de *Tessaria absinthioides* y (3) bosque de *Salix humboldtiana*.
 3. Vegetación Hidrófitas (VHi). Comunidad de ambientes límnicos constituida por macrófitos sumergidos, natantes y flotantes. Algunos de sus componentes más comunes son *Azolla filiculoides*, *Hydrocotyle bonariensis*, *Ludwigia peploides* —

todas asociadas a cuerpos lénticos o aguas de curso lento—, *Myriophyllum quítense*, *Stuckenia* sp. y *Veronica anagallis-aquatica*.

4. Matorral Freatófito de *Pleocarpus revolutus* (MF). Asociación leñosa circunscrita a ambientes de quebrada, compuesta principalmente por *P. revolutus*, *B. salicifolia* y *Tessaria absinthioides*. Se observó en las localidades de Islón y Quebrada de Talca.

- Anfibios

No se registró la presencia de este grupo taxonómico en ninguno de los dos muestreos realizados.

- Reptiles

Tanto el primer como el segundo muestreo registraron las mismas especies con diferentes abundancias y en nuevo sitio en el segundo muestreo, respecto del primero (Tablas 8 y 9). Sobre el origen geográfico, una especie fue Nativa y la otra fue Endémica de Chile (Tablas 8 y 9), lo cual representa el 1.3% de las 77 especies endémicas de reptiles de Chile, consideradas por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA 2021: 17° RCE). En el área de trabajo no se registró especies de reptiles introducidos. En cuanto al estado de conservación, ambas se encuentran clasificadas como Preocupación Menor.

- Aves

El primer muestreo registró una riqueza total de 42 especies para las 13 fuentes emisoras puntuales y difusas. El sitio GEFE13 (Desembocadura) presentó la mayor riqueza con 28 especies, mientras que los sitios GEFE 5 y GEFE 2 (Puente Las Rojas y Quebrada Marquesa respectivamente) presentaron menor riqueza con seis especies (Tabla 12). El segundo muestreo presentó 41 especies. El sitio GEFE 12 (Laguna Costera) presentó mayor riqueza con 26 especies, mientras que el sitio GEFE 8 (PTAS Algarrobito 1) presentó la menor riqueza con cinco especies (Tabla 9). En el primer muestreo no se registró *Phytotoma rara*, mientras que en el segundo muestreo no se registraron *Anas sibilatrix* y *Anas georgica*.

Respecto de su origen geográfico, dos especies son introducidas, las demás son nativas. No se registró especies endémicas (Tablas 12 y 13|**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Las dos especies de aves consideradas Introducidas representaron el 0.4% de

las 565 especies de aves registradas en Chile, de acuerdo con el portal Aves de Chile (<https://www.avesdechile.cl/aves07.htm>). En cuanto al estado de conservación, todas las especies nativas están clasificadas como Preocupación Menor (MMA 2021: 17° RCE).

- Mamíferos

El segundo muestreo, a diferencia del primero, solo registró la presencia de *Lepus europaeus*, especie introducida. Otras especies domésticas no fueron registradas (Tabla 13).

En líneas generales, las abundancias en todos los grupos taxonómicos fueron variables entre especies y entre sitios, situación esperada en este tipo de trabajos con solo dos muestreos (Tabla 14).

La similitud de la fauna total, entre el muestreo 1 y el muestreo 2 fue del 100%. Sin embargo, las similitudes entre muestreos fueron bastante variables en las 13 fuentes emisoras puntuales y difusas. La mayor similitud entre el muestreo 1 y 2 (91%) se dio en el sitio GEFE11, mientras que la similitud más baja entre el muestreo 1 y 2 (17%) se dio en el sitio GEFE02 (Tabla 14).

Discusión

La biodiversidad, al ser un recurso valioso y vulnerable, debe ser tomado en cuenta como indicador de cambio en escenarios de degradación de paisajes, cambio climático, restauración ecológica, entre otros (Cuesta *et al.* 2012, Aguilar-Garabito y Ramírez 2015). Si se quiere analizar la calidad del paisaje bajo la perspectiva del monitoreo, la biodiversidad se convierte en una variable respuesta e indicador clave, a las presiones ambientales (factores bióticos y abióticos) a las que está sometida en el área donde se lleva a cabo su estudio. Esto significa que la medida de la biodiversidad *per se*, no cumplirá su rol como indicador, si no se monitorea en función de aquellas variables explicativas, consideradas como una influencia para su mantención, pérdida o incremento, en el tiempo. Entendiéndose por monitoreo, la actividad que tiene como meta el detectar cambios en el estatus del parámetro medido, atributo o característica (tendencias en el tiempo) (Spellerberg 2005).

En este trabajo, se presenta el registro puntual de la riqueza de tres grupos taxonómicos (reptiles, aves y mamíferos) correspondientes a noviembre 2021 - enero 2022 y marzo – abril 2022, en 13 fuentes emisoras puntuales y difusas del HCRE, establecidas para fines de monitoreo. Estos grupos, por su endemismo, riqueza y abundancia, son buenos indicadores de las presiones ambientales a las que están sometidos los sitios a evaluar (Noss 1990, Pearson y Cassola 1992, Halffter *et al.* 2001, Fernández López y David Murcio 2006, Aguilar-Garabito y Ramírez 2015), sobre todo, por la relación con la calidad del agua asociada a cada fuente emisora muestreada (cuando hay presencia de agua), la que se traduce en calidad del entorno inmediato como el paisaje y la vegetación. Los resultados obtenidos en estos dos muestreos, proporcionan una idea del punto de partida para iniciar el trabajo de monitoreo de fauna a largo plazo, con miras a verificar los cambios en la calidad del paisaje. Si bien es cierto, se recomienda trabajar por estaciones (fría y estival), en el caso de las aves, la variación estacional está influenciada por las aves migratorias principalmente (García-Olaechea *et al.* 2018), en este contexto, las estaciones tendrían mínima influencia en los sitios muestreados, dado que no registran especies migratorias; sin embargo, no se descarta registros de presencia ocasionales de este grupo de aves. Por su parte, los reptiles si son susceptibles a las estaciones puesto que muchas especies entran en estados de brumación hacia el otoño e invierno. Como consecuencia, la mejor propuesta para este trabajo de monitoreo de fauna es la de realizarla de manera mensual en su forma ideal o bimestral, en caso de no darse el primer escenario.

La propuesta de cambio de tomar los datos en una parcela de 50 m de radio por 30 minutos, se sustenta en los aportes de los potenciales participantes de un eventual programa de monitoreo y en el hecho que la similitud de la riqueza total (acumulada de las 13 fuentes emisoras puntuales y difusas) del muestreo 1 y 2 fue prácticamente del 100% (Tabla 14). Sin embargo, las similitudes entre las fuentes emisoras puntuales y difusas, fueron bastante variadas por tratarse de dos muestras en cada fuente emisora, el fácil desplazamiento de las aves, la probabilidad de detección del observador y la diferencia entre las horas de muestreo. Este comportamiento en los datos debe tender a estabilizarse en el tiempo, conforme transcurra el tiempo de evaluación.

Los resultados de este trabajo deben analizarse al menos después de cinco años de muestreos, en relación con aquellas variables asociadas a la fuente emisora, principalmente, la calidad del agua en la fuente emisora evaluada, de esta manera se podrá explicar los cambios en el tiempo. Debe considerarse en los análisis, variables respuestas como el estado trófico en función de los valores de Clorofila “a” (ug/L) y Fósforo (ug/L), caudal del curso de agua, presencia o ausencia de agua, campos de cultivo, construcciones, extracción de áridos, cobertura vegetal, altura de la vegetación, abundancia de fauna doméstica o introducida, número de vehículos presentes, número de personas ajenas al monitoreo presentes, cantidad de basura, otras que en terreno se consideren importantes; todo medido dentro de la parcela de evaluación (50 m de radio).

Los escenarios esperados (hipótesis), con las medidas de mejoramiento de paisaje que se tomen a futuro, deberían conducir a un incremento de la riqueza de especies en aquellos sitios donde el paisaje se ve más afectado. Es decir, al incrementarse la calidad del paisaje (hábitat), se espera un incremento de la riqueza de especies en los puntos de muestreos que constituyen las fuentes emisoras puntuales y difusas (Fig. 21).

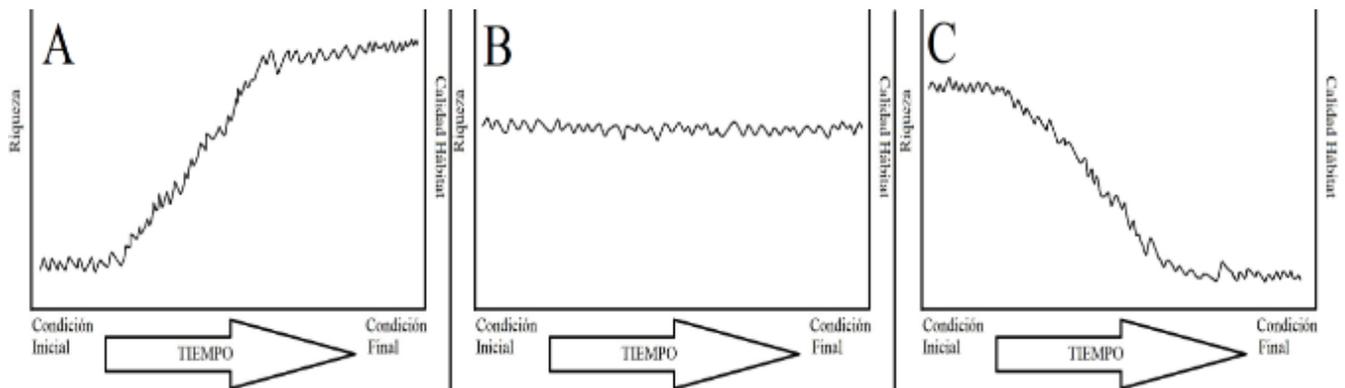


Figura 21. Escenarios esperados (hipótesis) en función de los cambios en la calidad del paisaje (hábitat). A) Escenario de incremento de riqueza de fauna en el supuesto que la calidad del paisaje (hábitat) mejore en el tiempo. B) Escenario de no cambio en la riqueza de fauna en el supuesto que la calidad del paisaje (hábitat) permanezca invariable, C) Escenario de pérdida de riqueza de fauna en el supuesto de que la calidad del paisaje (hábitat) empeore. Fuente: Elaboración propia.



Para efectos del monitoreo a realizarse en el contexto de ciencia ciudadana, considerando los aportes de los participantes del taller del 18 de marzo de 2022, se propone una planilla de registro de datos (Tabla 16). Esta planilla debe considerarse bajo un enfoque de manejo adaptativo, es decir, probarse en terreno e ir ajustando la utilidad de la planilla, según se va desarrollando la experiencia de la toma de datos. De trabajarse mensual o bimestralmente, la evaluación del protocolo y planilla de monitoreo debe realizarse al término del primer año de iniciado las actividades.

Tabla 12. Riqueza de especies de fauna registrada en el primer muestreo en los 13 sitios correspondientes a las fuentes emisoras puntuales y difusas presentes en el Humedal Costero Río Elqui como base del monitoreo en el tiempo posterior a los procesos de restauración. Las especies reportadas se presentan en relación a la base de datos de Figueroa et al. 2021. Origen Geográfico: Especie Endémica de Chile (E), Nativa (N), Introducida (I), Ocasional (O). Estado de Conservación: Preocupación Menor (LC), Casi Amenazado (LT), Vulnerable (VU), EN (En Peligro), Rara (R). Cobertura/Sustrato: Playa de la laguna (PL), Laguna (L), Suelo pedregoso (SP), Vegetación Helófito (VHe), Matorrales y bosque ribereño (MBR), Vegetación Hidrófito (VHi), Matorral Freatófito de *Pleocarpus revolutus* (MF), en Vuelo (V). Fuente: Elaboración propia.

Reptiles																	
Nombre Científico	Nombre Común	Origen Geográfico	Estado de Conservación	Cobertura/Sustrato	GEFE 13	GEFE 12	GEFE 11	GEFE 10	GEFE 9	GEFE 8	GEFE 7	GEFE 6	GEFE 5	GEFE 4	GEFE 3	GEFE 2	GEFE 1
<i>Liolaemus chiliensis</i>	Lagarto llorón	N	LC	VHe	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Liolaemus zapallarensis</i>	Lagarto de zapallar	E	LC	VHe	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Riqueza observada				2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aves																	
Nombre Científico	Nombre Común	Origen Geográfico	Estado de Conservación	Cobertura/Sustrato	GEFE 13	GEFE 12	GEFE 11	GEFE 10	GEFE 9	GEFE 8	GEFE 7	GEFE 6	GEFE 5	GEFE 4	GEFE 3	GEFE 2	GEFE 1
<i>Anas sibilatrix</i>	Pato real	N	LC	L	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Anas georgica</i>	Pato jergón grande	N	LC	L	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Callipepla californica</i>	Codorniz	I	LC	SP/MBR/MF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
<i>Columba livia</i>	Paloma doméstica	I	LC	PM/SP	0	0	4	2	2	3	2	0	0	0	1	0	0
<i>Zenaida meloda</i>	Paloma de alas blancas	N	LC	VHa/MBR/MF	2	1	3	2	4	2	1	4	0	2	3	0	2
<i>Zenaida auriculata</i>	Tórtola chilena	N	LC	MBR/MF	1	1	0	0	2	2	1	2	0	0	2	1	1
<i>Columbina picui</i>	Tortolita cuyana	N	LC	SP/MBR/MF	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Rhodopsis vesper</i>	Picaflor del norte	N	LC	MBR/MF	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
<i>Fulica rufifrons</i>	Tagua de frente roja	N	LC	L	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Fulica armillata</i>	Tagua común	N	LC	L	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oreopholus ruficollis</i>	Chorlo de campo	N	NT	SP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
<i>Vanellus chilensis</i>	Queltehue	N	LC	VHe	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Ixobrychus involucris</i>	Huairavillo	N	LC	VHa	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nycticorax nycticorax</i>	Huairavo	N	LC	VHe/MF	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
<i>Bubulcus ibis</i>	Garza boyera	N	LC	VHe/VHi	3	2				0					0		4
<i>Ardea cocoi</i>	Garza cuca	N	LC	L	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Ardea alba</i>	Garza grande	N	LC	L	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Egretta thula</i>	Garza chica	N	LC	L/R	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Coragyps atratus</i>	Jote de cabeza negra	N	LC	MF/V	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
<i>Cathartes aura</i>	Jote de cabeza colorada	N	LC	V	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
<i>Milvago chimango</i>	Tiuque	N	LC	V	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Falco sparverius</i>	Cernícalo	N	LC	V	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
<i>Geositta cunicularia</i>	Minero	N	LC	SP	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0
<i>Phleocryptes melanops</i>	Trabajador	N	LC	VHe	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Leptasthenura aegithaloides</i>	Tijeral	N	LC	MBR/MF	3	2	6	5	3	5	6	2	3	4	4	3	6
<i>Pseudasthenes humicola</i>	Canastero común	N	LC	MBR/MF	2	3	2	0	0	0	0	1	0	3	0	2	3
<i>Anairetes parulus</i>	Cachudito	N	LC	MBR	7	5	8	4	2	3	3	3	5	4	5	5	8

<i>Tachuris rubrigastra</i>	Siete colores	N	LC	VHe	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hymenops perspicillatus</i>	Run-Run	N	LC	VHe	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	Golondrina de dorso negro	N	LC	V	2	3	2	2	0	0	1	3	2	3	3	1	5
<i>Tachycineta leucopyga</i>	Golondrina chilena	N	LC	V	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Troglodytes aedon</i>	Chercán	N	LC	VHe/MBR/	4	3	3	4	0	0	0	4	0	5	2	0	3
<i>Mimus thenca</i>	Tenca chilena	N	LC	VHe/MBR	2	2	2	0	0	4	6	0	0	0	6	0	6
<i>Sicalis luteola</i>	Chirihue	N	LC	MBR	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Phrygilus gayi</i>	Cometocino de Gay	N	LC	MBR	0	3	4	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0
<i>Phrygilus fruticeti</i>	Yal	N	LC	MBR	0	0	2	0	2	0	0	2	0	3	7	0	6
<i>Phrygilus alaudinus</i>	Platero	N	LC	SP/MBR/MF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5
<i>Diuca diuca</i>	Diuca	N	LC	SP/MBR	3	4	5	4	6	3	4	2	2	4	3	3	5
<i>Zonotrichia capensis</i>	Chincol	N	LC	SP/MBR	2	2	9	6	0	3	2	3	3	4	3	0	6
<i>Agelasticus thilius</i>	Trile	N	LC	VHe	2	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
<i>Sturnella loyca</i>	Loica	N	LC	MBR	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	1
<i>Passer domesticus</i>	Gorrión	I	LC	SP/MBR	0	0	5	0	0	2	2	0	0	0	2	0	0
Riqueza observada				42	28	18	17	10	8	9	13	10	6	14	18	6	20

Tabla 13. Riqueza de especies de fauna registrada en el segundo muestreo en los 13 sitios correspondientes a las fuentes emisoras puntuales y difusas presentes en el Humedal Costero Río Elqui como base del monitoreo en el tiempo posterior a los procesos de restauración. Las especies reportadas se presentan en relación a la base de datos de Figueroa et al. 2021. Origen Geográfico: Especie Endémica de Chile (E), Nativa (N), Introducida (I), Ocasional (O). Estado de Conservación: Preocupación Menor (LC), Casi Amenazado (LT), Vulnerable (VU), EN (En Peligro), Rara (R). Cobertura/Sustrato: Playa de la laguna (PL), Laguna (L), Suelo pedregoso (SP), Vegetación Helófito (VHe), Matorrales y bosque ribereño (MBR), Vegetación Hidrófito (VHi), Matorral Freatófito de *Pleocarpus revolutus* (MF), en Vuelo (V). Fuente: Elaboración propia.

REPTILES																	
Nombre Científico	Nombre Común	Origen Geográfico	Estado de Conservación	Cobertura/Sustrato	GEFE												
					13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<i>Liolaemus chiliensis</i>	Lagarto llorón	N	LC	MBR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Liolaemus zapallarensis</i>	Lagarto de zapallar	E	LC	MBR	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Riqueza observada				2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AVES																	
Nombre Científico	Nombre Común	Origen Geográfico	Estado de Conservación	Cobertura/Sustrato	GEFE												
					13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<i>Callipepla californica</i>	Codorniz	I		SP/MBR/MF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
<i>Columba livia</i>	Paloma doméstica	I		PM/SP	0	2	5	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Zenaida meloda</i>	Paloma de alas blancas	N	LC	VHa/MBR/MF	3	2	4	0	1	0	1	1	3	1	0	0	2
<i>Zenaida auriculata</i>	Tórtola chilena	N	LC	MBR/MF	0	3	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	3
<i>Columbina picui</i>	Tortolita cuyana	N	LC	SP/MBR/MF	2	4	3	2	2	3	0	0	4	2	4	2	2
<i>Rhodopsis vesper</i>	Picaflor del norte	N	LC	MBR/MF	2	2	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3	3
<i>Fulica rufifrons</i>	Tagua de frente roja	N	LC	L	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Fulica armillata</i>	Tagua común	N	LC	L	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oreopholus ruficollis</i>	Chorlo de campo	N	NT	SP	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Vanellus chilensis</i>	Queltehue	N	LC	VHe	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0
<i>Ixobrychus involucris</i>	Huairavillo	N	LC	VHa	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<i>Nycticorax nycticorax</i>	Huairavo	N	LC	VHe/MF	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Bubulcus ibis</i>	Garza boyera	N	LC	VHe/VHi	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
<i>Ardea cocoi</i>	Garza cuca	N	LC	L	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Ardea alba</i>	Garza grande	N	LC	L	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
<i>Egretta thula</i>	Garza chica	N	LC	L/R	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1
<i>Coragyps atratus</i>	Jote de cabeza negra	N	LC	V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
<i>Cathartes aura</i>	Jote de cabeza colorada	N	LC	V	1	1	1	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0
<i>Milvago chimango</i>	Tiuque	N	LC	V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
<i>Falco sparverius</i>	Cernícalo	N	LC	V	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
<i>Geositta cunicularia</i>	Minero	N	LC	SP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Phleocryptes melanops</i>	Trabajador	N	LC	VHe	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Leptasthenura aegithaloides</i>	Tijeral	N	LC	MBR/MF	1	1	3	1	0	0	2	0	2	3	5	3	0
<i>Pseudasthenes humicola</i>	Canastero común	N	LC	MBR/MF	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0
<i>Anairetes parulus</i>	Cachudito	N	LC	MBR	2	6	5	5	0	0	1	0	2	3	0	2	1
<i>Tachuris rubrigastra</i>	Siete colores	N	LC	VHe	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hymenops perspicillatus</i>	Run-Run	N	LC	VHe	3	4	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
<i>Phytotoma rara</i>	Rara	N	LC	MBR	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	Golondrina de dorso negro	N	LC	V	0	4	0	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0
<i>Tachycineta leucopyga</i>	Golondrina chilena	N	LC	V	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
<i>Troglodytes aedon</i>	Chercán	N	LC	VHe/MBR/	3	3	6	2	0	0	0	3	4	3	5	3	2
<i>Mimus thenca</i>	Tenca chilena	N	LC	VHe/MBR	0	1	3	0	2	2	4	2	0	3	2	4	3
<i>Sicalis luteola</i>	Chirihue	N	LC	MBR	0	8	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
<i>Phrygilus gayi</i>	Cometocino de Gay	N	LC	MBR	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	1
<i>Phrygilus fruticeti</i>	Yal	N	LC	MBR	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Phrygilus alaudinus</i>	Platero	N	LC	SP/MBR/MF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Diuca diuca</i>	Diuca	N	LC	SP/MBR	4	7	3	2	5	2	0	0	1	1	0	0	2
<i>Zonotrichia capensis</i>	Chincol	N	LC	SP/MBR	3	6	7	7	2	0	0	1	1	3	0	2	6
<i>Agelasticus thilius</i>	Trile	N	LC	VHe	2	2	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0
<i>Sturnella loyca</i>	Loica	N	LC	MBR	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	2	0	2
<i>Passer domesticus</i>	Gorrión	I	LC	SP/MBR	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Riqueza observada

MAMIFEROS

Nombre Científico	Nombre Común	Origen Geográfico	Estado de Conservación	Cobertura/Sustrato	GEFE 13	GEFE 12	GEFE 11	GEFE 10	GEFE 9	GEFE 8	GEFE 7	GEFE 6	GEFE 5	GEFE 4	GEFE 3	GEFE 2	GEFE 1
<i>Lepus europaeus</i>	Liebre	I		SP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	Riqueza observada				1										1		

Tabla 14. Resumen comparativo de las riquezas de especies abundancias registradas en los muestreos 1 y 2 de las fuentes emisoras puntuales y difusas presentes en el Humedal Costero Río Elqui como base del monitoreo en el tiempo posterior a los procesos de restauración. A corresponde al muestreo 1 (parcela circular de 100 m de radio). B corresponde al muestreo 2 (parcela circular de 50 m de radio). Fuente: Elaboración propia.

Especie	GEFE13	GEFE13	GEFE12	GEFE12	GEFE11	GEFE11	GEFE10	GEFE10	GEFE9	GEFE9	GEFE8	GEFE8	GEFE7	GEFE7	GEFE6	GEFE6	GEFE5	GEFE5	GEFE4	GEFE4	GEFE3	GEFE3	GEFE2	GEFE2	GEFE1	GEFE1
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
<i>Liolaemus chiliensis</i>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Liolaemus zapallarensis</i>	1	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Anas sibilatrix</i>	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Anas georgica</i>	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Callipepla californica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0
<i>Columba livia</i>	0	0	0	2	4	5	2	3	2	0	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Zenaida meloda</i>	2	3	1	2	3	4	2	0	4	1	2	0	1	1	4	1	0	3	2	1	3	0	0	0	2	2
<i>Zenaida auriculata</i>	1	0	1	3	0	0	0	0	2	0	2	0	1	0	2	0	0	2	0	0	2	2	1	0	1	3
<i>Columbina picui</i>	0	2	0	4	2	3	0	2	2	2	0	3	0	0	0	0	0	4	0	2	0	4	0	2	0	2
<i>Rhodopsis vesper</i>	0	2	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	3
<i>Fulica rufifrons</i>	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Fulica armillata</i>	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oreopholus ruficollis</i>	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
<i>Vanellus chilensis</i>	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Ixobrychus involucris</i>	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nycticorax nycticorax</i>	8	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
<i>Bubulcus ibis</i>	3	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2
<i>Ardea cocoi</i>	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Ardea alba</i>	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Egretta thula</i>	2	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	1
<i>Coragyps atratus</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
<i>Cathartes aura</i>	1	1	1	1	1	1	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	1	0
<i>Milvago chimango</i>	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Falco sparverius</i>	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
<i>Geositta cucularia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0
<i>Phleocryptes melanops</i>	6	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Leptasthenura aegithaloides</i>	3	1	2	1	6	3	5	1	3	0	5	0	6	2	2	0	3	2	4	3	4	5	3	3	6	0
<i>Pseudasthenes humicola</i>	2	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	3	1	0	0	2	0	3	0
<i>Anairetes parulus</i>	7	2	5	6	8	5	4	5	2	0	3	0	3	1	3	0	5	2	4	3	5	0	5	2	8	1
<i>Tachuris rubrigastra</i>	3	8	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hymenops perspicillatus</i>	2	3	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0
<i>Phytotoma rara</i>	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	2	0	3	4	2	0	2	0	0	0	0	0	1	4	3	0	2	0	3	0	3	2	1	0	5	0
<i>Tachycineta leucopyga</i>	3	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
<i>Troglodytes aedon</i>	4	3	3	3	3	6	4	2	0	0	0	0	0	4	3	0	4	5	3	2	5	0	3	3	2	2
<i>Mimus thenca</i>	2	0	2	1	2	3	0	0	0	2	4	2	6	4	0	2	0	0	0	3	6	2	0	4	6	3
<i>Sicalis luteola</i>	2	0	0	8	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
<i>Phrygilus gayi</i>	0	0	3	0	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	2	2	0	0	0	0	1
<i>Phrygilus fruticeti</i>	0	0	0	0	2	0	0	0	2	3	0	0	0	1	2	0	0	0	3	0	7	0	0	0	6	0
<i>Phrygilus alaudinus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	5	0	0
<i>Diuca diuca</i>	3	4	4	7	5	3	4	2	6	5	3	2	4	0	2	0	2	1	4	1	3	0	3	0	5	2
<i>Zonotrichia capensis</i>	2	3	2	6	9	7	6	7	0	2	3	0	2	0	3	1	3	1	4	3	3	0	0	2	6	6
<i>Agelasticus thilius</i>	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	2	0	0	0	0
<i>Sturnella loyca</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	1	1	2	0	0	1	2
<i>Passer domesticus</i>	0	0	0	1	5	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
<i>Lepus europaeus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Viento: Fuerte (Mucho movimiento de vegetación). Medio (Poco movimiento de vegetación). Débil (Movimiento poco perceptible de vegetación) / Basura: Desperdicios metálicos, plásticos, orgánicos, domiciliarios, etc. Mucho (>50% del sitio)/Poco (<50% de sitio)							

Componente Biótico macroinvertebrados y macrófitas

Objetivos

Caracterizar a las comunidades de macroinvertebrados y macrófitas acuáticas presentes en los sitios de muestreo del HDRE.

Describir su diversidad y las posibles perturbaciones de la calidad del agua debido a la presencia de contaminantes.

Estos grupos bióticos e índices relativos se seleccionaron considerando los criterios enunciados a continuación:

- Estudios previos y realizados para la cuenca del río Elqui y que sirven para comparar con los resultados de este informe.
- Colecta de información simple y rápida
- Replicabilidad y potencial de implementación bajo enfoque de un futuro programa de monitoreo ciudadano

Metodologías

En lo que se refiere a macroinvertebrados, se usó un protocolo de muestreo general adaptado al contexto biogeográfico e hidrológico de las cuencas semiáridas de Chile según las recomendaciones de Gouin *et al.* (2016). Este protocolo incluye los estándares desarrollados por el *Canadian Aquatic Biomonitoring Network – CABIN* (Environment Canada. Science and Technology Branch 2012 & 2014). Para las macrófitas, se siguió por completo la metodología desarrollada en la cuenca de Elqui por Urrutia *et al.* 2020. Se describe a continuación los detalles metodológicos:

Selección del área de muestreo.

Para una mayor representatividad en términos de hábitat acuático y vegetación de la ribera, el área de muestreo fue definida como aproximadamente 6 veces el ancho

lleno del cauce (Nivel de inundación anual, definido por el ancho del río). Esta longitud de área de muestreo representa, en condiciones naturales, una secuencia que abarca tanto zonas de depósito (piscinas) como zonas de erosión (rápidos) (Newberry & Gaboury, 1993), y por lo tanto abarcar la diversidad de hábitats acuáticos presentes en el sitio considerado. Además, para la selección del área de muestreo se consideraron además criterios de representatividad de los sustratos, vegetación de la ribera, tipo de flujo y facilidad de acceso para poder repetir las mediciones en el tiempo.

Muestreo de macroinvertebrados

El muestreo fue realizado siguiendo el método “*traveling kick net*” estandarizado por el esfuerzo de muestreo (tiempo). Este método consistió en recorrer el área de muestreo definida de un lado a otro, avanzando hacia aguas arriba en zigzag, durante 5 minutos. La colecta de los macroinvertebrados se realizó por este recorrido, arrastrando sobre el sustrato una red de estructura triangular de 30 cm, con un mango extensible a 1,20 cm, malla de 400 μm de espesor y largo de 60 cm finalizando en un copo de captación de 125 cc. La estandarización a nivel de esfuerzo resulta importante para comparar sitios que varían en el tamaño de los ríos. Mientras que el patrón en Zigzag permite incorporar macroinvertebrados bentónicos de diversos microhábitat ubicados dentro de la zona de erosión (por ejemplo, áreas alrededor de grandes rocas, rápidos, escorrentías, acantilados) en proporción a su ocurrencia a lo largo del área de muestreo, como también hábitat de las orillas asociados a macrófitas acuáticas.

Una vez colectada, cada muestra fue cuidadosamente extraída de la red mediante lavado encima de un tamiz de 400 μm . Posteriormente, se envasó en frascos de 700cc y se conservaron en alcohol a 95%, sin separación ni descarte de elementos de la matriz de sustratos, salvo en el caso de la presencia de materiales demasiado voluminosos o en exceso como gravas, piedras o ramas. En el caso de descartar algún material o elemento, se procuró, antes de desecharlo, limpiarlo encima del tamiz. Cada frasco fue rotulado por dentro y por fuera, anotando su código, la fecha de colecta, y el nombre del sitio. Posteriormente, en el laboratorio se revisó la integridad de las muestras y se realizó un cambio del alcohol con el fin de evitar algún proceso de descomposición de la muestra por posibles diluciones del conservante.



Figura 22. Imágenes referenciales del muestreo de macroinvertebrados bentónicos: Izq: red de muestreo (kicknet), Centro: patrón de muestreo en zigzag y persona realizando el muestreo, Der: envasado de la muestra. Fotografías: Jean Casale.

Mediciones variables fisicoquímicas y de flujo (velocidad, caudales y profundidad del cauce)

Las mediciones de velocidad de la corriente y profundidad del nivel de agua se miden en una sección transversal del cauce. En relación con el ancho del cauce (ancho mojado), medido con una cinta métrica de 50 m, se establecieron subsecciones transversales homogéneas donde se realizan las mediciones. En cauces de ancho menor a 5m, se registran 3 puntos de medición equidistantes entre sí a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$, mientras que en anchos mayores a 5m, son 5 puntos equidistantes a $\frac{1}{6}$, $\frac{2}{6}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{4}{6}$ y $\frac{5}{6}$. Las mediciones de velocidad en cada punto o subsección se repiten 3 veces y se calcula el promedio.

Análisis de muestras y determinación taxonómica de macroinvertebrados

Considerando el objetivo de un futuro programa de monitoreo y rápida evaluación de las condiciones del río usando los macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores, se sugiere procesar en base a una sub-muestra representativa para cada sitio. La selección/separación de la sub-muestra requiere sin embargo de un proceso previo de limpieza y clasificación de los organismos (ver detalles en CEAZA 2017 y CABIN 2014).

Preparación de la muestra en laboratorio:

Contempló las etapas de lavado, tamizaje y elutriación (separación de la fracción orgánica de la muestra por centrifugación manual) previas al sub-muestreo y sorteo/clasificación, con objeto de limpiar la muestra de su agente preservante, separarla de los sedimentos finos y materiales inorgánicos de la matriz que pudieran dificultar la etapa de clasificación (Moulton et al., 2000).

Sub-muestreo: se refiere al fraccionamiento de una muestra para alcanzar un recuento fijo deseado que sea representativo de toda la muestra. Se recomienda evaluar previamente la necesidad de sub-muestreo y el método más adecuado de submuestreo colocando la muestra en un recipiente poco profundo (bandeja) con 1-2 cm de agua.

Para el caso de muestras con abundancia de algas o musgos, se llevó a cabo el protocolo de sub-muestreo y clasificación por peso. Una vez drenada y pesada, se dividió la muestra principal en porciones de peso iguales, se procesa cada fracción de peso de manera aleatoria hasta llegar a un umbral de 300 individuos contados.

Para muestras donde el sustrato predominante es arena y restos gruesos de materia orgánica, se procedió al submuestreo mediante el método de la *Marchant Box*, donde las muestras se procesaron de manera aleatoria en fracciones de volumen (celdas), también hasta el umbral de 300 individuos y un mínimo de 5 sub-muestras (celdas). Si es necesario procesar más del 50% de la muestra para obtener los 300 individuos, toda la muestra debe ser procesada. En ambos métodos, una vez alcanzado el umbral, se extrapolan las abundancias totales por taxón en función del porcentaje de muestra tratado. Es importante señalar que, debido a las muy altas abundancias de ciertos grupos taxonómicos cuando están presentes en las comunidades bentónicas, para evitar bias en los conteos, se excluyen del conteo individual los siguientes grupos de organismos: Ostracoda, Porifera, Copepoda, Nematoda, Nematophora, Nemertea, Platyhelminthes y taxa no acuáticos, todos aquellos no considerados en las metodologías de bioindicadores en base a macroinvertebrados.

Clasificación: Se refiere a la extracción de los macroinvertebrados bentónicos de la matriz de la muestra y su posterior ordenación/agrupación según grupos taxonómicos. Para efecto del monitoreo y evaluación rápida en base a índices bióticos, la resolución

taxonómica de determinación es a nivel de Familia. Dicha clasificación taxonómica sigue principalmente las nomenclaturas y claves de Tachet *et al.* (2003) y Dominguez & Fernández (2009). Las Matrices de abundancia de taxa para cada campaña se encuentran en Anexo xx (adjuntar tablas Excel).

Metodología de muestreo de macrófitos

El muestreo de macrófitos, en los mismos 5 puntos propuestos en el futuro programa de monitoreo con presencia de agua considerados para los macroinvertebrados, se basó en la propuesta de Urrutia *et al* (2020). Consistió en realizar 20 parcelas de inventario de macrofitas, de 1m², siguiendo transectos paralelos a la orilla del cauce, de 40 m de largo.

Con los datos obtenidos de las comunidades de macrófitos se procedió a calcular los niveles de trofia de cada sitio, mediante la aplicación del Índice trófico fluvial de macrófitos (ITFM) cuya fórmula se presenta a continuación:

$$ITFM = -25 * \left(\text{Log}_2 \left(\frac{\sum N \text{ ETA}}{\sum N \text{ ETB} + \sum N \text{ ETM}} \right) \right) + 50 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$\sum N$ = Sumatoria de la abundancia relativa (cobertura)

ETB= Especies indicadoras de tolerancia baja a la contaminación orgánica

ETM= Especies indicadoras de tolerancia media a la contaminación orgánica

ETA= Especies indicadoras de tolerancia alta a la contaminación orgánica

Índices bióticos

Para mantener consistencia y comparabilidad con monitoreos anteriores en la Cuenca del Rio Elqui, se calcularon los índices y métricas descritos en Alvial *et al.* (2012) así como los preconizados por CENMA (2017). A saber, los principales índices de diversidad se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Métricas de diversidad de macroinvertebrados bentónicos calculados para los sitios de monitoreo priorizados de restauración de las subcuencas del río Elqui (Tabilo *et al.* 2021)

Índice/métrica	ID
Riqueza	S
Abundancia total extrapolada	N
Shannon-Wiener	H'
Simpson	simp
Índice de Equidad de Pielou	J
Índice de Margalef	M

ChBMWP

Este indicador opera en base a valores de tolerancia determinados a nivel taxonómico de Familia por expertos y adaptado para Chile en varios estudios de casos (Armitage 1983, Figueroa *et al.* 2007, Alvial *et al.* 2012 – ver Tabla 18). Estos valores reflejan la tolerancia a contaminación de un taxón dado. De esta forma, Familias intolerantes tienen valores altos mientras que las familias tolerantes tienen valores bajos.

El puntaje por un sitio (ChBMWP), es decir el valor del índice, se obtiene sumando los puntajes individuales de los taxa presente en dicho sitio.

El puntaje promedio por taxón (ChASPT) se calcula dividiendo el puntaje por el número total de taxa con puntaje individual en el sitio (N-Taxa). Valores altos de este puntaje caracterizan sitios poco contaminados mientras que valores bajos reflejan sitios potencialmente contaminados.

ChIBF

Este índice se basa en la propuesta del índice Biológico de Familia de Hilsenoff (1988), considerando valores de tolerancia en función de la respuesta a contaminación orgánica de los taxa (ver Tabla 18). Fue adaptado para Chile por Figueroa *et al.* (2003) y modificado para la cuenca del Río Elqui por Alvial *et al.* (2013).

Este índice requiere cuantificar la abundancia total de individuos en una muestra / sitio (N), la abundancia de individuos a nivel de familia (n_i), y asignar un valor de tolerancia para cada familia (t_i). Se calcula de la siguiente manera:

$$ChIBF = \frac{\sum n_i t_i}{N} \quad (\text{Ec.6})$$

Valores de tolerancia a nivel de familia para calcular los Indices ChIBF y ChBMWP

Tabla 18 Valores de tolerancia de familias de macroinvertebrados bentónicos adaptados a la cuencia del río Elqui para cálculos de los índices ChIBF y ChBMWP (Armitage 1983, Figueroa *et al.* 2007, Alvial *et al.* 2012) Fuente: Elaboración propia.

Familia	ChIBF	ChBMWP	Familia	ChIBF	ChBMWP
<i>Haplotaenidae</i>	8	NA	<i>Caenidae</i>	7	4
<i>Naididae</i>	8	NA	<i>Leptophlebiidae</i>	2	9
<i>Enchytraeidae</i>	8	NA	<i>Collembola</i>	5	SI
<i>Lumbriculiidae</i>	8	NA	<i>Belostomatidae</i>	6	4
<i>Glossiphoniidae</i>	10	3	<i>Corixidae</i>	7	3
<i>Hygrobatidae</i>	4	4	<i>Pyralidae</i>	5	SI
<i>Limnesidae</i>	4	4	<i>Tortricidae</i>	6	SI
<i>Sperchontidae</i>	4	4	<i>Corydalidae</i>	0	5
<i>Crotoniidae</i>	4	4	<i>Aeshnidae</i>	3	6
<i>Curculionidae</i>	5	4	<i>Coenagrionidae</i>	9	7
<i>Dytiscidae</i>	7	3	<i>Gomphidae</i>	1	7
<i>Elmidae</i>	4	6	<i>Libellulidae</i>	9	8
<i>Gyrinidae</i>	7	5	<i>Gripopterygidae</i>	1	7
<i>Hydrophilidae</i>	7	3	<i>Notonemouridae</i>	0	10
<i>Scirtidae</i>	7	5	<i>Glossosomatidae</i>	0	9
<i>Staphylinidae</i>	3		<i>Helicophidae</i>	6	10
<i>Athericidae</i>	2	9	<i>Hydroptilidae</i>	4	6
<i>Blephariceridae</i>	0	10	<i>Hydrobiosidae</i>	0	7
<i>Ceratopogonidae</i>	6	6	<i>Hydropsychidae</i>	4	5
<i>Chironomidae</i>	7	2	<i>Leptoceridae</i>	4	7
<i>Dixidae</i>	6	9	<i>Polycentropodidae</i>	3	2
<i>Dolichopodidae</i>	4	SI	<i>Sericostomatidae</i>	3	10
<i>Empididae</i>	6	4	<i>Hyaellidae</i>	4	6
<i>Ephydriidae</i>	6	2	<i>Aeglididae</i>	6	6
<i>Limoniidae</i>	6	4	<i>Palaemonidae</i>	7	SI
<i>Muscidae</i>	8	SI	<i>Sphaeriidae</i>	8	3
<i>Psychodidae</i>	10	4	<i>Ancylidae</i>	4	6
<i>Simuliidae</i>	6	5	<i>Hydrobiidae</i>	7	3
<i>Stratiomyidae</i>	6	4	<i>Physidae</i>	8	3
<i>Tabanidae</i>	4	4	<i>Acari</i>	4	4
<i>Tanyderidae</i>	6	SI	<i>Oligochaeta</i>	8	1
<i>Tipulidae</i>	3	5	<i>Hirudinea</i>	10	3
<i>Baetidae</i>	4	5			

NA: No Aplica; SI: Sin Información

Interpretación de los Índices bióticos en base a macroinvertebrados bentónicos

Tabla 19. Pauta de interpretación cualitativa de los valores de los índices bióticos ChBMWP y ChIBF. Elaboración propia en base a Figueroa et al. 2021 y Alvial et al. 2013.

Clase	ChBMWP	ChIBF	Interpretación cualitativa
I	>100	0.0–3.8	No perturbado
II	61–100	3.8–4.6	Moderadamente perturbado
III	36–60	4.6–6.1	Perturbado
IV	16–35	6.1–7.3	Muy perturbado
V	<15	7.3–10.0	Fuertemente perturbado

Interpretación del Índice de Trofía en base a macrofitas (ITFM)

Tabla 20. Pauta de interpretación cualitativa de los valores de índice de trofía ITFM. En base a Urrutia et al 2020.

Nivel de Trofia	Rango ITFM	Sigla
Alto	0-39	A
Medio	40-69	M
Bajo	70-100	B

Resultados

Primera campaña de muestreo – diciembre 2021

Se presentan los resultados sintéticos obtenidos de los cálculos de las métricas de diversidad e índices bióticos para los 5 sitios considerados en la campaña de muestreo de diciembre 2021 (Tabla 21). Los valores de abundancias son derivados de abundancias extrapoladas en función de la proporción de submuestras procesadas para cada sitio.

Tabla 21. Resumen de los valores de métricas de diversidad e índices bióticos para los sitios muestreados durante la campaña de diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia.

	N	S	H	J	simp	M	ChIBF	ChBMWP	ITFM
GEFE01	1113	12	1,41	0,57	0,64	1,57	5,00	61	42,76
GEFE03	2118	14	1,84	0,70	0,77	1,70	6,15	58	32,43
GEFE06	568	12	1,97	0,79	0,83	1,73	5,39	42	69,57
GEFE12	1296	12	1,57	0,63	0,72	1,53	4,93	48	33,19
GEFE13	-	-	-	-	-	-	-	-	12,02

De esta primera campaña (diciembre 2021), destaca lo siguiente:

La abundancia relativa de macroinvertebrados (N) varía entre los sitios, sin presentar un gradiente ni un patrón claro. La riqueza taxonómica es bastante similar entre los sitios (12 taxa), destacando el sitio GEFE03 (puente Pelicana) por ser el de mayor riqueza con 14 taxa.

Los Índices de diversidad muestran valores coherentes entre sí, y sirven de línea de base para futuras mediciones y los monitoreos futuros, donde adquirir mayor resolución temporal permitiría en el futuro (3-5 años) analizar las tendencias y calibrar dichas métricas a escala de las subcuencas del río Elqui.

El índice Biótico de Familia ChIBF muestra valores bastantes homogéneos en todos los sitios, casi todos ubicados en el mismo rango de clase III, por lo que califican como perturbados. Destaca sin embargo el sitio GEFE03, cuyo valor del índice está en la franja entre perturbado a muy perturbado (puntaje de 6,15) – ver la distribución espacial del índice para esta campaña en la Fig. 23.

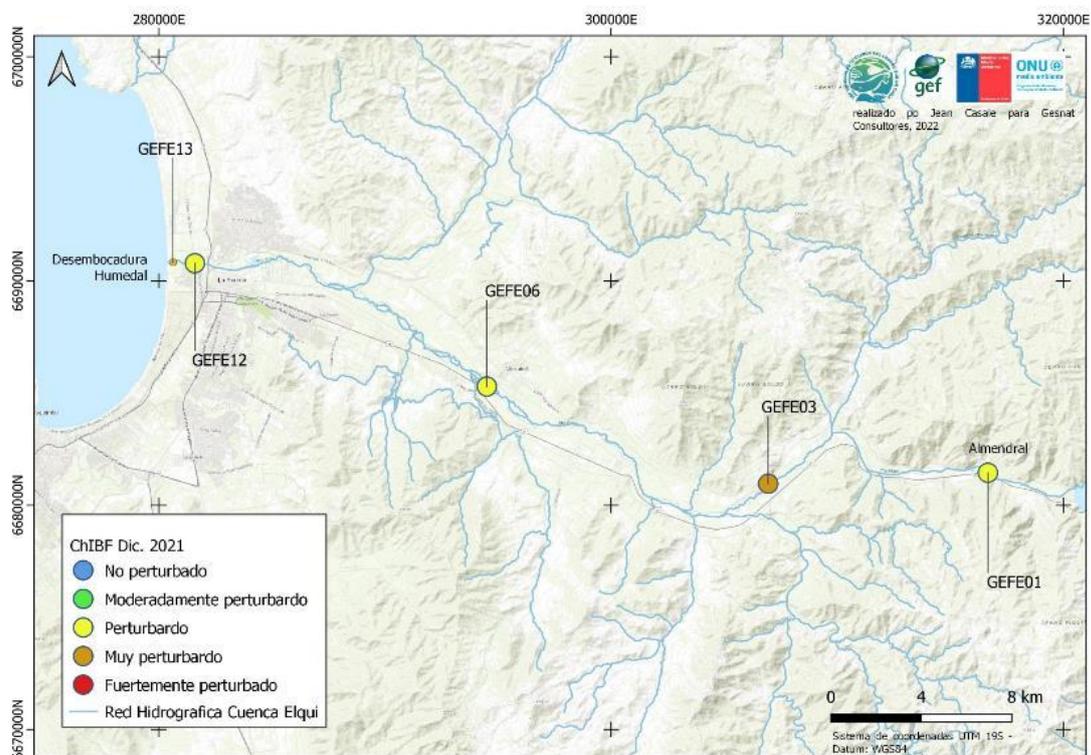


Figura 23. Índice Biótico ChIBF. Campaña diciembre 2021. Fuente: elaboración propia.

Para el Índice ChBMWP, aparte del sitio GEFE01 que muestra un valor de clase II de condición moderadamente perturbado (puntaje 61), los demás sitios se ubican en el rango de clase III, es decir de condición perturbada (ver Fig. 24).

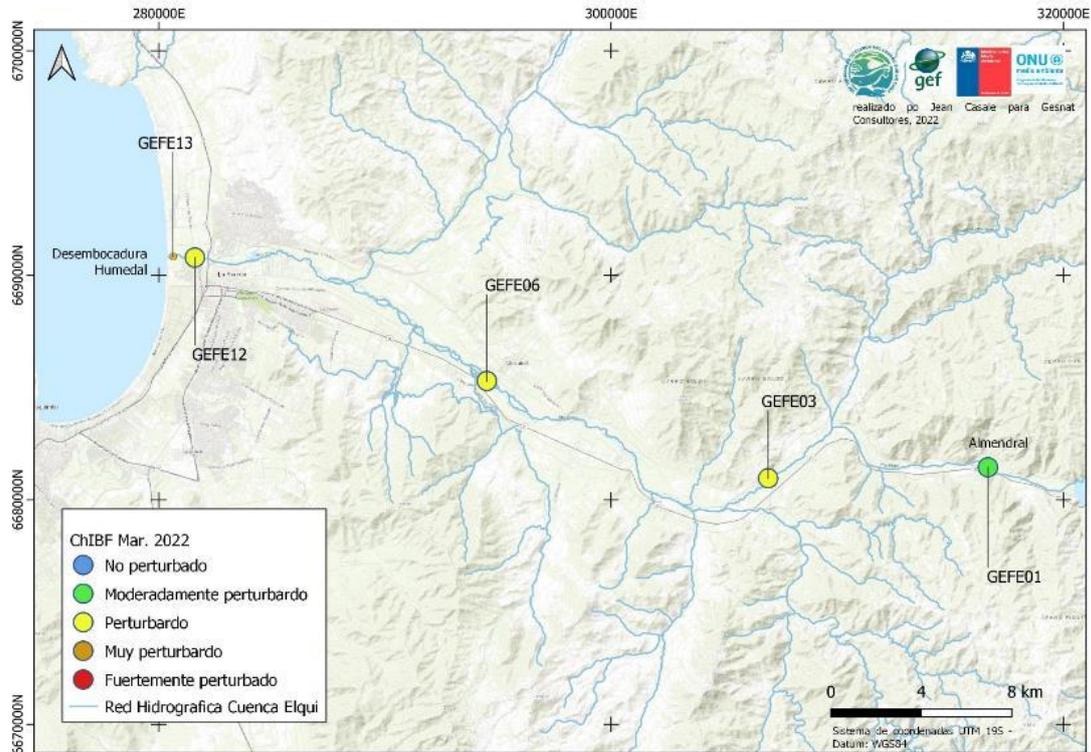


Figura 24. Índice Biótico ChBMWP. Campaña diciembre 2021. Fuente: elaboración propia. Punto 13 no fue muestreado dada las malas condiciones del sitio (eutroficado). Fuente: Elaboración propia.

Ambos índices de calidad en base a macroinvertebrados muestran en promedio un patrón similar en los sitios evaluados, con una tendencia central de clase III, de condición perturbada. Las diferencias en ciertos sitios hacia condiciones más o menos perturbadas no permiten discriminar del todo, dado que dichos valores se ubican levemente fuera de los extremos altos o bajos del rango de clase III. Datos complementarios de futuras campañas podrían dar luces para confirmar o descartar dichos patrones.

En lo que concierne el índice de trofía en base a macrofitas acuáticas (ITFM), los resultados muestran más contrastes. En efecto, de los 5 sitios evaluados, 3 de ellos presentan un nivel de trofía alto (GEFE03, GEFE12 y GEFE13 con puntajes de 32.43,

33.19 y 12.02 respectivamente). Los demás sitios (GEFE06 y GEFE019) califican como de nivel de trofía medio (ver Fig. 25).

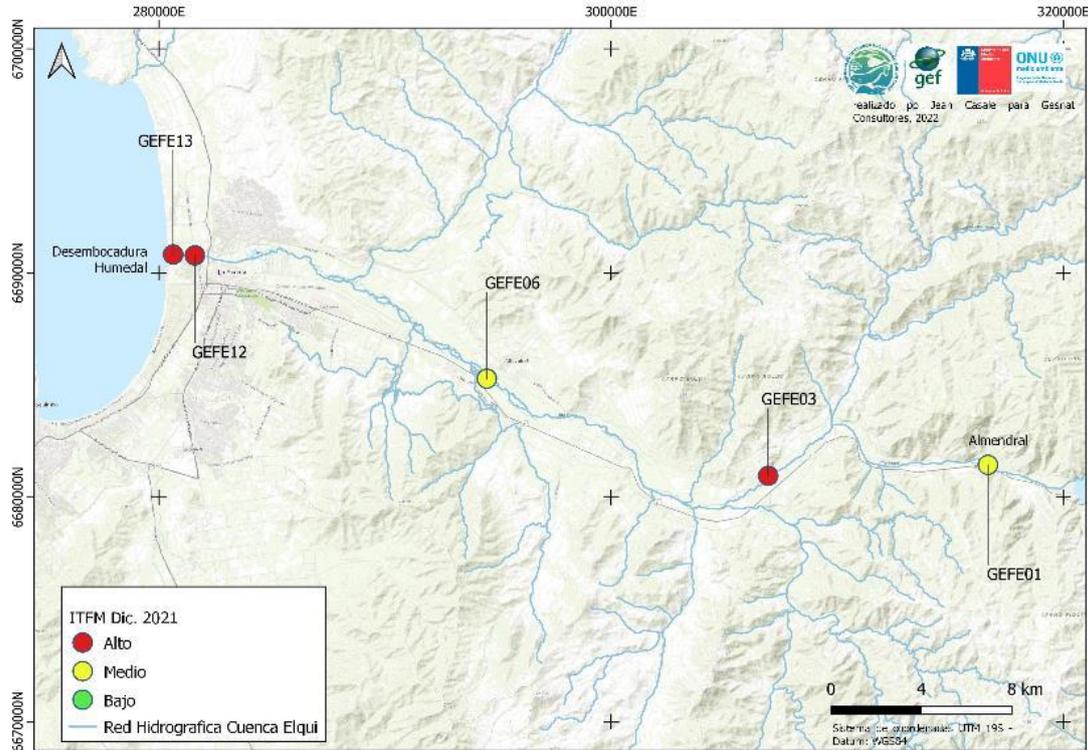


Figura 25. Niveles de Trofía en base a Macrofitas. Campaña diciembre 2021. Fuente: elaboración propia.

Segunda campaña de muestreo – marzo 2022

Se presenta los resultados sintéticos obtenidos de los cálculos de las métricas de diversidad e índices bióticos para los mismos 5 sitios considerados en la campaña de muestreo de diciembre 2021 (Tabla 22). Los valores de abundancias son derivados de abundancias extrapoladas en función de la proporción de submuestras procesadas para cada sitio.

Tabla 22. Resumen de los valores de métricas de diversidad e índices bióticos para los sitios muestreados durante la campaña de marzo de 2022. Fuente: Elaboración propia.

Campaña	Sitio	N	S	H	J	simp	M	ChIBF	ChBMWP	ITFM
MARZO2022	GEFE01	2658	9	0.84	0.38	0.34	1.014	4	37	48.97
MARZO2022	GEFE03	1320	18	1.77	0.61	0.75	2.36	5.22	68	37.76
MARZO2022	GEFE06	1788	12	1.63	0.65	0.71	1.47	4.89	43	63.99
MARZO2022	GEFE12	2172	7	1.13	0.58	0.61	0.78	6.00	21	10.66
MARZO2022	GEFE13									23.47

Los valores de abundancia relativa (N) de macroinvertebrados son similares a la campaña anterior de diciembre, sin patrón de variación marcado. En lo que concierne a la riqueza (S), el sitio GEFE03 muestra el mayor valor, con 18 taxa, luego GEFE06 con 12 taxa. GEFE01 9 taxa, y finalmente GEFE12 con solo 7 taxa destaca como el sitio de menor riqueza.

El índice Biótico de Familia ChIBF muestra un leve gradiente desde moderadamente perturbado en GEFE01 aguas arriba hacia niveles más perturbados aguas abajo hacia la desembocadura, pero casi todos ubicados en el mismo rango de clase III, calificando como perturbados. Destaca sin embargo el sitio GEFE01, cuyo valor del índice muestra que califica como moderadamente perturbado (puntaje de 4) – ver la distribución espacial del índice para esta campaña en la Fig. 26

En lo que concierne el ChBMWP, la respuesta en cada sitio parece más heterogénea, variando sin mostrar un gradiente o una tendencia desde aguas arriba hacia la desembocadura. Los sitios GEFE01 y GEFE06 presentan condiciones similares, calificando como perturbados. El punto GEFE03 califica como moderadamente perturbado; y finalmente, el sitio GEFE12, califica como muy perturbado (ver Fig. 27).

El índice de Trofía ITFM por su parte, también muestra algo de heterogeneidad en la respuesta de los sitios, sin patrón definido en el sentido del escurrimiento, pero si destacan los sitios cercanos a la desembocadura con niveles de trofía altos (GEFE12 y GEFE13) así como el sitio GEFE03. Los sitios GEFE01 y GEFE06 presentan niveles medios. En definitiva, los niveles de trofía en el conjunto muestreado son predominantemente altos, y medios (Fig. 28 y Tabla 23 – **letra q del proyecto**).

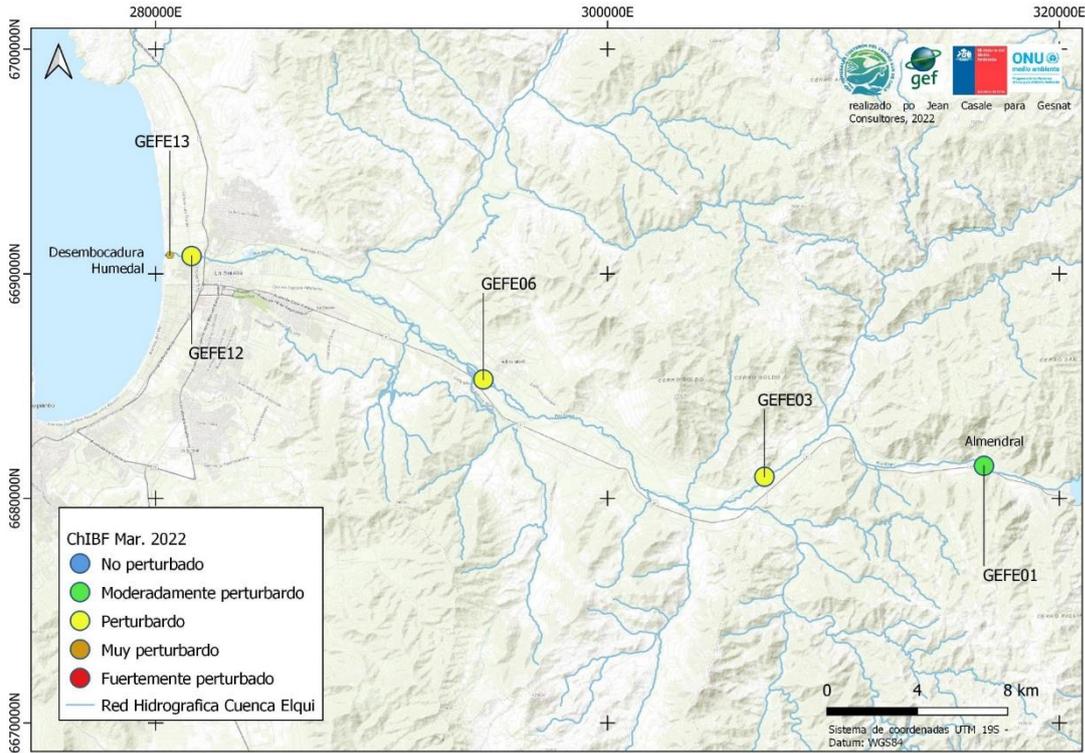


Figura 26. Índice Biótico ChIBF. Campaña marzo 2022. Fuente: elaboración propia

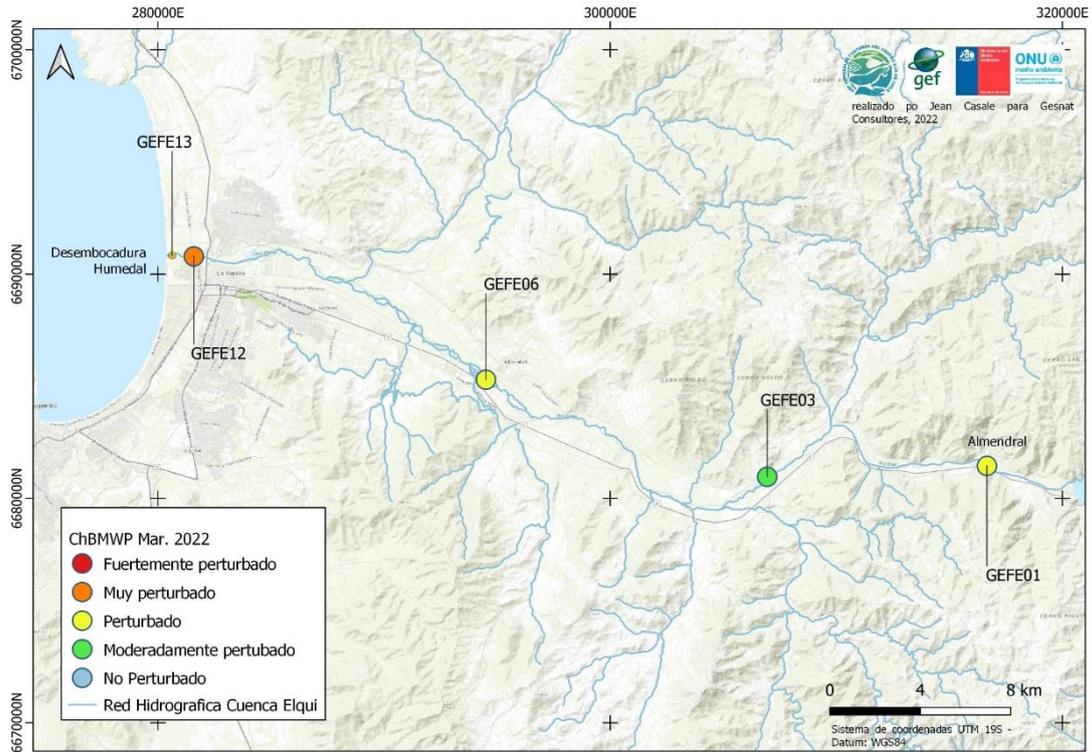


Figura 27. Índice Biótico ChBMWP. Campaña marzo 2022. Fuente: elaboración propia.

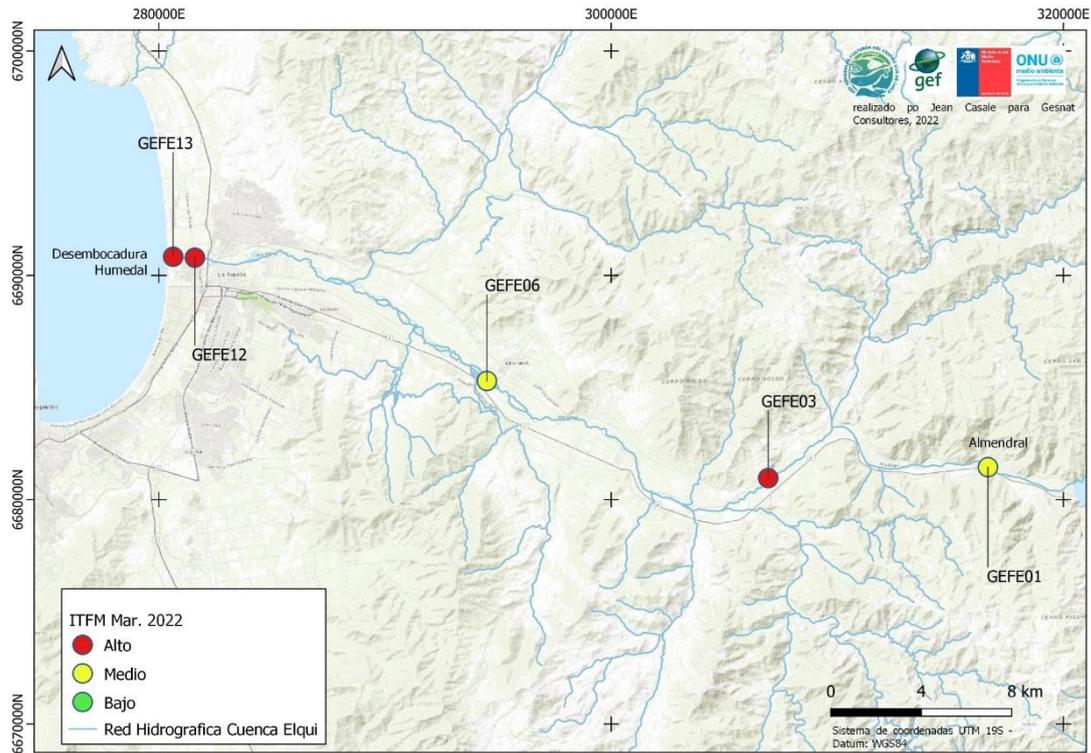


Figura 28. Niveles de Trofía en base a Macrofitas. Campaña marzo 2022. Fuente: elaboración propia.

Comparación entre las 2 campañas

Tabla 23. Resumen de los valores de métricas de diversidad e índices bióticos para los sitios muestreados durante la campaña de diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia.

Campaña	Sitio	N	S	H	J	simp	M	ChIBF	ChBMWP	ITFM
DICIEMBRE2021	GEFE01	1113	12	1.41	0.57	0.64	1.57	5.00	61	42.76
DICIEMBRE2021	GEFE03	2118	14	1.84	0.70	0.77	1.70	6.15	58	32.43
DICIEMBRE2021	GEFE06	568	12	1.97	0.79	0.83	1.73	5.39	42	69.57
DICIEMBRE2021	GEFE12	1296	12	1.57	0.63	0.72	1.53	4.93	48	33.19
DICIEMBRE2021	GEFE13									12.02
MARZO2022	GEFE01	2658	9	0.84	0.38	0.34	1.014	4	37	48.97
MARZO2022	GEFE03	1320	18	1.77	0.61	0.75	2.36	5.22	68	37.76
MARZO2022	GEFE06	1788	12	1.63	0.65	0.71	1.47	4.89	43	63.99
MARZO2022	GEFE12	2172	7	1.13	0.58	0.61	0.78	6.00	21	10.66
MARZO2022	GEFE13									23.47

Comparando los resultados del ITFM, si bien se aprecia una leve variación entre las 2 campañas, los niveles de trofía no muestran variación significativa, dado que permanecen en los mismos rangos. Esto sugiere que, en el periodo de las 2 campañas

consideradas, los niveles de trofía permanecieron estables. Esta aparente estabilidad podría corresponder a la temporalidad de respuesta de la vegetación de macrofitas a cambios, por lo que sumando más campañas en el tiempo se podrá esclarecer esta temporalidad de respuestas de la vegetación.

A pesar de la baja resolución estadística (muy pocos sitios) para explorar relaciones entre las variables medidas y los índices en una misma campaña, es que se fusionaron los datos de las 2 campañas de muestreo para aumentar el número de observaciones (datos) y de esta forma hacer un primer intento de comparación. De esta forma, se esboza una primera aproximación al análisis de correlaciones entre las métricas de diversidad, los índices bióticos (ChBMWP, ChIBF y ITFM), y variables físico-químicas colectadas *in-situ*, a saber: pH, Conductividad (Cond), Oxígeno disuelto (DO) y Temperatura (Temp) – ver Fig. 29.

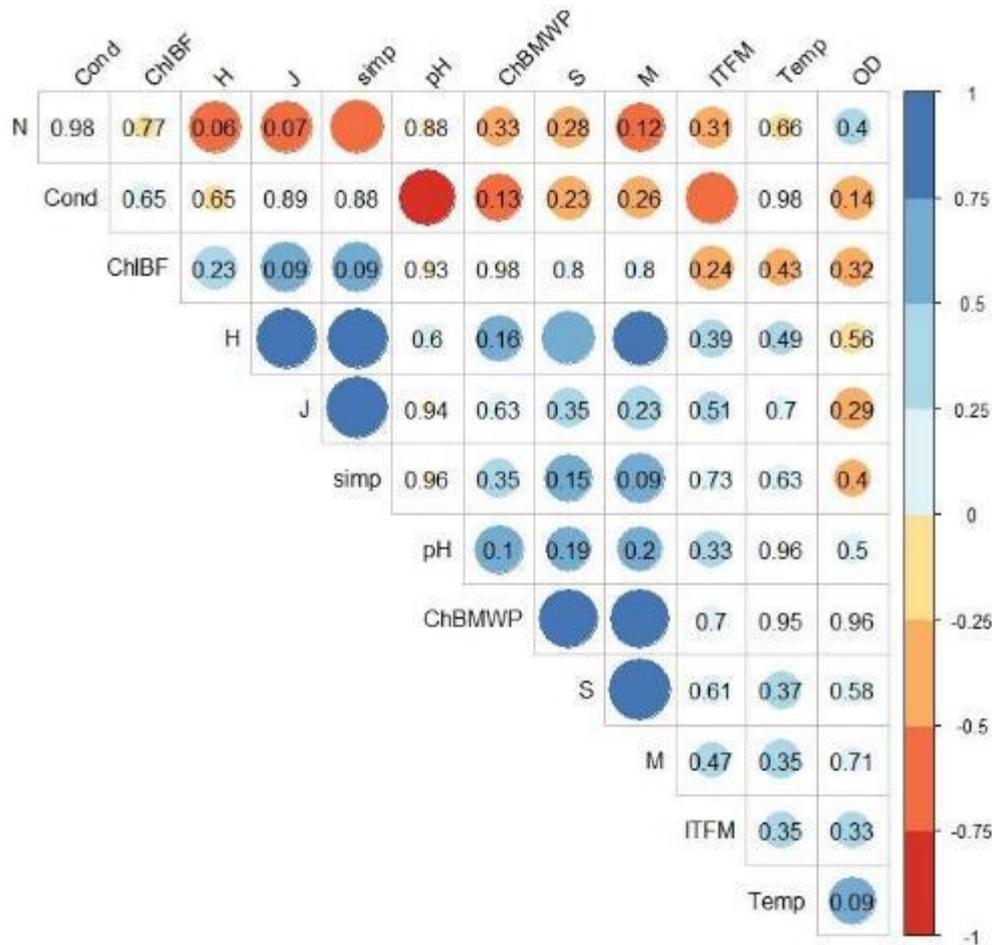


Figura 29. Matriz de correlaciones entre los diferentes índices de calidad biológica, métricas de diversidad y parámetros fisicoquímicos de los sitios de muestreos. Integra la serie de datos de las dos campañas realizadas. Los colores traducen los valores de probabilidad (p values y su sentido: azules correlaciones positivas; rojos, correlaciones negativas), junto con el tamaño. Fuente: elaboración propia

En esta primera aproximación se puede apreciar una correlación positiva significativa entre ChBMWP y la riqueza (S) y el Índice de Margalef (M) con valores de correlación de 0,90 y 0,87 respectivamente. Esto traduce la sensibilidad de este índice biótico con los cambios en riqueza. El ChBMWP se muestra en cambio sin relación significativa con las variables fisicoquímicas ni los otros índices de calidad biótica ChIBF y ITFM. En cambio, el ChIBF parece ser un índice independiente de las variables fisicoquímicas medidas como también de las métricas de diversidad consideradas y de los otros índices de calidad biótica.

Discusión sobre los índices de calidad biótica (Anexo 4).

Los 3 índices de calidad biótica (**letra m del proyecto**) usados para evaluar el estado de perturbación en los sitios considerados logran su objetivo en cuanto permiten dar una lectura de la “salud del humedal” en un momento (diciembre 2021 y marzo 2022), con cierta coherencia en sus resultados, pero con algunas variaciones que pueden atribuirse a diferencias en la sensibilidad del método. Por una parte, el método de colecta en base a macroinvertebrados, por las características del diseño muestral en base a transectos transversales, abarca una mayor diversidad de hábitats y condiciones del cauce. Por otra parte, la metodología en base a macrofitas considera solo hábitats de orilla, donde las condiciones de flujo son menores y posiblemente las temperaturas más altas que en el bentos. Esto podría esbozar una primera interpretación de las diferencias detectadas entre ambos métodos y el hecho que el índice en base a macrofitas arroja niveles de perturbación mas altos comparativamente con el índice en base a macrofitas. La segunda campaña muestra diferencias con una leve mejora en los puntajes de ciertos sitios en lo que refiere a los Indices ChIBF y ChBMWP, pero que globalmente mantienen valores de clase III, perturbado. Es delicado interpretar estos resultados como tendencia hacia la perturbación por el momento; primeramente, por la poca disponibilidad de datos espaciales y temporales y, en segundo lugar, las condiciones climáticas de sequía en la Región podrían influir en esta condición actual. En futuras campañas y con la acumulación de datos, y con ellos una mejor resolución estadística, se podrá determinar con más certeza las posibles tendencias y patrones. Así, de manera iterativa y adaptativa, el sistema de evaluación y vigilancia se robustecerá.

A pesar de estas diferencias y precauciones subrayados para su interpretación, esta primera evaluación nos sugiere que el HCRE estaría en condiciones bióticas perturbadas, con niveles de trofia altos a medios.

Actividad n) Determinar el estado trófico del HCRE, y o) Desarrollar un modelo trófico para el HCRE.

Introducción

El estado trófico de un ecosistema acuático es un aspecto básico que permite conocer el funcionamiento de los cuerpos de agua con base en su productividad biológica (*). El estado trófico se relaciona con las características fisicoquímicas del agua, básicamente con la concentración de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, y con la abundancia y composición de las comunidades planctónicas. De éstas, el fitoplancton permite conocer las condiciones del momento debido a que responde rápidamente a los cambios en las características abióticas de la columna de agua. Esto se debe al tamaño de las microalgas y a sus ciclos de vida, que las hacen altamente susceptibles a las variaciones físicas y químicas del agua (Ramírez 2000, Vásquez *et al.* 2006).

(*)http://www.lake.wateratlas.usf.edu/library/learn-more/learnmore.aspx?toolsection=lm_tsi

La eutrofización es un proceso que consiste en forzar un sistema acuático desde el exterior con la incorporación de materia orgánica rica en nutrientes (nitratos y fosfatos), que van a alterar temporalmente sus condiciones de equilibrio, trayendo como consecuencia cambios notables en su composición biótica (Girão *et al.* 2007). En el caso del humedal río Elqui, a pesar de ser un sistema lótico, presenta sectores con aguas de color verde, el cual es un indicador que está en proceso de eutrofización. Esta razón conduce a establecer una línea base del estado trófico en los puntos donde se ubican las fuentes emisoras puntuales y difusas identificadas dentro de lo que se considera como Humedal Costero Río Elqui (HCRE), definido en sus límites en consultorías anteriores (Figuroa *et al.* 2021, Tabilo *et al.* 2021). En este contexto, se presentan la metodología y resultados del primer y segundo muestreo de agua,

asociados al estado trófico del humedal, con fines de un futuro programa de monitoreo a largo plazo y enfoque de ciencia ciudadana, lo que conduce a emplear métodos de rápida y fácil aplicación.

Objetivo

Determinar el estado trófico del HCRE en sitios con presencia de agua propuestos para actividades de un futuro programa de monitoreo de fuentes emisoras puntuales y difusas.

Metodología

Dentro de las 13 fuentes emisoras puntuales y difusas identificadas para este trabajo (Fig. 4. Tabla 1), cinco presentaron agua. En cada una de estas fuentes emisoras, se tomaron muestras de agua, siguiendo protocolos estandarizados del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd Edition 2017. Las muestras fueron llevadas al laboratorio Hidrolab (Acreditaciones INN LE 214 - LE 215 - LE 1273 - LE 1431 - LE 1432; de acuerdo con la NCh-ISO 17025:2017), donde se analizaron según corresponde. Entre los parámetros de interés, se obtuvieron los valores necesarios para medir el estado trófico a través del Indicador OCDE (Organización de Cooperación Económica y Desarrollo 1982), ampliamente usado por su versatilidad y facilidad de cálculo. Este indicador del estado trófico basa sus valores en las concentraciones de clorofila “a” (ug/l), fósforo (Ug/l) y transparencia o profundidad con el disco Secchi (metros) (Tabla 24).

Tabla 24. Categorías del estado trófico del agua según la OCDE (1982) en función de los valores de clorofila “a”, profundidad y fósforo. Fuente: Elaboración propia.

Categorías tróficas	Clorofila “a” (ug/L)	Profundidad Secchi (metros)	Fósforo (ug/L)
Ultraoligotrófico	<1	>12	<4
Oligotrófico	1 a 2,5	12 a 6	4 a 10
Mesotrófico	2,5 a 7,9	6 a 3	10 a 35
Eutrófico	8 a 25	3 a 1,5	35 a 100
Hipertrófico	>25	<1,5	>100

Dónde:

***Ultraoligotrófico.** Productividad de nutrientes prácticamente nulo. Cuerpos de agua muy profundos

***Oligotrófico.** Baja productividad de nutrientes. Lagos profundos, claros, fríos y de color azul.

***Mesotrófico.** Productividad media de nutrientes. Cuerpos de agua de profundidad media, transparentes, y con crecimiento de plantas acuáticas.

***Eutrófico.** Alta productividad de nutrientes. Generalmente cuerpos de agua poco profundos y turbios.

***Hipertrófico.** Muy elevada productividad de nutrientes. Cuerpos de agua muy poco profundos y turbios, con exceso de algas y estado de anoxia (ausencia de oxígeno), generalmente con olor putrefacto.

La profundidad o transparencia del agua, considerada como un buen indicador para conocer el estado trófico de un cuerpo de agua, se relaciona con la penetración de la luz. Esta penetración de luz se ve afectada por microalgas flotantes o la carga total de partículas suspendidas en la columna de agua (Hernández *et al.*, 2013). La transparencia normalmente se determina por aplicación del Disco Secchi, debido a su facilidad de uso y a que es ampliamente utilizado en este tipo de estudios relacionados al estado trófico (Utete y Tsamba 2017). Sin embargo, el HCRE presenta sectores con poca profundidad y total transparencia de agua, lo que hace imposible utilizar esta herramienta como indicador del estado trófico. Por esta razón, esta herramienta no es recomendable utilizar para este tipo de monitoreo.

Resultados

El primer y segundo muestreo, permitieron evidenciar que el sitio que corresponde al "by pass" de Aguas del Valle (GEFE 13) cercano a la desembocadura del río Elqui se encuentra, desde las métricas de las concentraciones de la Clorofila "a" y el fósforo, en un estado indudablemente Hipertrófico. En cuanto a las otras cuatro fuentes emisoras evaluadas, desde la métrica de la clorofila "a", el cuerpo de agua se mostró en un estado Eutrófico, mientras que el cambio en la concentración de fósforo indicó que en el GEFE 12 se pasó de un estado Mesotrófico a un estado Ultraoligotrófico; mientras que en el GEFE 7, se pasó de un estado Mesotrófico a un estado Eutrófico. GEFE 1 y GEFE 3, no presentaron variación en cuanto a sus estados tróficos desde ninguna de las métricas empleadas. Como no se puede hablar de un promedio del estado trófico del

agua en el Humedal Costero Río Elqui, por la naturaleza de los datos obtenidos, se puede decir que el Humedal presentó una tendencia al estado Mesotrófico - Eutrófico, considerando los parámetros de Clorofila “a” y fósforo (Tabla 25).

Tabla 25. Estado trófico de los cinco sitios con presencia de agua propuestos para actividades de monitoreo de fuentes emisoras puntuales y difusas en el Humedal Costero Río Elqui. Fuente: Elaboración propia.

Fuente Emisora	Muestra	Clorofila “a” (ug/L)	Estado trófico según Clorofila “a”	Fósforo (ug/L)	Estado trófico según Fósforo
GEFE 13 (Desembocadura)	1	55.5	Hipertrófico	1560	Hipertrófico
	2	187	Hipertrófico	5200	Hipertrófico
GEFE 12 (Laguna costera)	1	<10.0	Eutrófico	21	Mesotrófico
	2	<10.0	Eutrófico	<3.0	Ultraoligotrófico
GEFE 07 (Algarrobito 2)	1	<10.0	Eutrófico	16	Mesotrófico
	2	<10.0	Eutrófico	81	Eutrófico
GEFE 03 (Pelícano)	1	<10.0	Eutrófico	27	Mesotrófico
	2	<10.0	Eutrófico	29	Mesotrófico
GEFE 01 (Almendral)	1	<10.0	Eutrófico	33	Mesotrófico
	2	<10.0	Eutrófico	18	Mesotrófico
Tendencia con 2 muestreos			Eutrófico		Mesotrófico

Discusión

La descarga de aguas residuales es una de las causas más antiguas y conocidas, que contribuyen al cambio del estado trófico de un cuerpo de agua, debido a la elevada riqueza en nutrientes que contienen. A esta situación se le suma el uso excesivo de fertilizantes, los cuales aportan nitrógeno (en forma de sales de nitrato y amonio) y fósforo (como fosfato). Otro aspecto que contribuye al cambio en el estado trófico del agua es la deforestación y la erosión en suelos agrícolas porque influyen en la carga de nutrientes, debido a que, al escurrir el agua lava la capa fértil, arrastrando los nutrientes de la misma (Moreno *et al.* 2010). Estas situaciones están claramente representadas en el humedal río Elqui en todo su recorrido. El aporte de aguas residuales, filtración de fertilizantes, erosión del mismo cauce del río y laderas, contribuyen considerablemente a la eutrofización del agua.

Los resultados mostraron una tendencia a la Eutrofización del Humedal Costero Río Elqui, lo cual es peligroso para el sistema acuático en estudio porque este estado contribuye a alterar la diversidad biológica, provocando la proliferación de algas, cianobacterias y micrófitos, sobre todo hacia la desembocadura del humedal, donde los niveles alcanzan la hipertrofización. Estos organismos generan opacidad en la columna de agua, evitando la penetración de la luz, lo que a su vez imposibilita el proceso de fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos, trayendo como consecuencia una marcada disminución en la producción de oxígeno libre y aumentando la actividad metabólica (consumo de oxígeno) de los organismos descomponedores, que empiezan a recibir excedentes de materia orgánica generados en la superficie (OCDE 1982, Moreno *et al.* 2010). Como consecuencia, la diversidad biológica del cuerpo de agua se irá perdiendo paulatinamente dada la condición anaeróbica que se presenta, se incrementará la sedimentación y proliferará la aparición de organismos patógenos y vectores de enfermedades.

Aunque estos resultados son preliminares, existe evidencia de una tendencia de Eutrofización del agua en el humedal río Elqui. Sin embargo, hay que tomar estos resultados preliminares con cuidado. Los resultados del análisis de agua, respecto de la clorofila "a" no fueron exactos en cuatro de los cinco sitios, por lo tanto, la tendencia general reportada es solo una aproximación. En el caso del fósforo, el sitio de la desembocadura presentó altos niveles, lo que llevó a un incremento en el promedio. Si bien el humedal es un continuo, el estado trófico también puede analizarse dentro de este continuo, es decir, que más allá de un promedio para el humedal, tenemos un gradiente que va desde un estado Hipertrófico en la desembocadura, a un estado Eutrófico o Mesotrófico río arriba. El indicador de profundidad o transparencia también debe observarse con cuidado, considerando que el cauce del río presenta profundidades bajas, mientras que, en la desembocadura, donde no se midió la profundidad o transparencia, esta es mayor. Por lo tanto, se considera que realizar evaluaciones con el Disco Secchi, es infructuoso y no aporta como indicador para este sistema lótico.

Con esta apreciación, en virtud preliminar de estos resultados, es necesario realizar el monitoreo correspondiente con una periodicidad de al menos seis meses para poder

tener una visión holística del estado trófico en el humedal, respetando el concepto de gradiente. Para este efecto, el indicador de OCDE (1982) surge del estudio más completo sobre eutrofización que se haya realizado hasta la actualidad. Sin embargo, dada la compleja interacción de las numerosas variables que intervienen en los procesos de eutrofización, es imposible establecer una limitación estricta entre las distintas categorías tróficas (Janus y Vollenweider 1981). En consecuencia, realizar el monitoreo de acuerdo con los protocolos de la OCDE (1982) es lo más recomendable en esta situación, si se quiere obtener alertas tempranas en cuanto al proceso de eutrofización del humedal.

Actividades l) Determinar indicadores de calidad de agua del humedal y p) Determinar calidad del agua y estado ambiental del HCRE.

Determinar calidad de agua y estado ambiental actual del Humedal Costero del Río Elqui, sobre la base del programa de monitoreo desarrollado en el OE1 y OE2 y cálculo de los índices desarrollados en las actividades 1 a 6 del presente OE.

Componente Abiótico: Agua y Sedimentos

Campañas de muestreo (Parámetros y puntos de muestreo)

A continuación, en la Fig. 30 se presenta la variación espacial de algunos parámetros fisicoquímicos muestreados en ambas campañas (diciembre 2021 y marzo 2022). Luego, en la Tabla 26 se presentan los parámetros muestreados en comparación con la clase excepcional de la NSCA (2004) considerados en las campañas de muestreo realizadas en diciembre 2021 y marzo 2022.

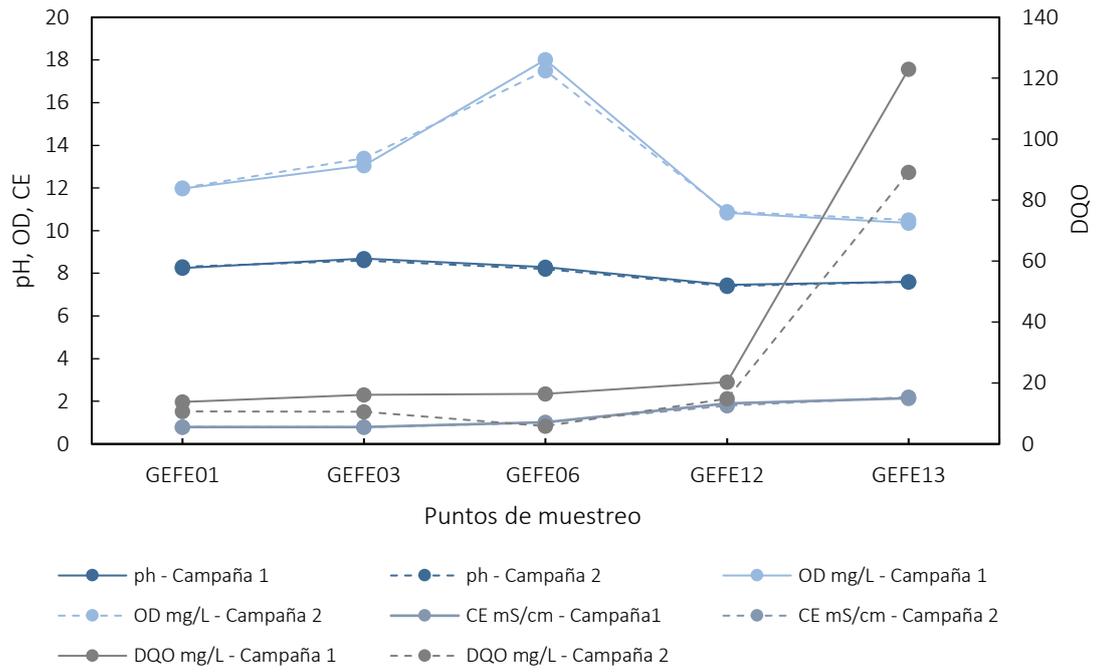


Figura 30. Variación espacial de parámetros fisicoquímicos en ambas campañas (diciembre 2021 y marzo 2022). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Parametros medidos en las campañas de diciembre 2021 y marzo 2022. En rojo se presentan los valores sobre la clase excepcional y en verde aquellas concentraciones informadas bajo el limite de detección (LD). Fuente: Elaboración propia.

ID	Cobre	Cromo	Cromo VI	Hierro	Manganeso	Mercurio	Molibdeno	Níquel	Nitrato NO3	Nitrito NO2	Plata	Plomo	Selenio	Sulfatos	
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg N/L	mg N/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg SO4/L	
Campaña 1	GEFE01	0,017	<0,005	<0,010	0,146	0,072	<0,001	0,006	<0,005	0,6	<0,03	0,002	<0,02	<0,005	249
	GEFE03	0,116	<0,005	<0,010	0,149	0,016	<0,001	<0,005	<0,005	10,9	<0,03	0,002	<0,02	<0,005	243
	GEFE06	0,134	<0,005	<0,010	0,138	0,01	<0,001	<0,005	<0,005	28,6	<0,03	0,002	<0,02	<0,005	265
	GEFE12	<0,005	<0,005	<0,010	5,23	0,091	<0,001	<0,005	<0,005	1,1	<0,03	<0,002	<0,02	<0,005	364
	GEFE13	0,138	<0,005	<0,010	1,55	0,191	<0,001	<0,005	<0,005	0,6	<0,03	0,003	<0,02	<0,005	362
Campaña 2	GEFE01	0,084	<0,005	<0,01	0,257	0,071	<0,001	<0,005	<0,005	1,2	<0,03	<0,002	<0,01	<0,005	258
	GEFE03	0,098	<0,005	<0,01	0,181	0,018	<0,001	0,006	<0,005	1,2	<0,03	<0,002	<0,01	<0,005	273
	GEFE06	0,058	<0,005	<0,01	0,419	0,006	<0,001	<0,005	<0,005	1,2	<0,03	<0,002	<0,01	<0,005	309
	GEFE12	0,12	<0,005	<0,01	0,077	0,048	<0,001	<0,005	<0,005	0,4	<0,03	0,003	<0,01	<0,005	364
	GEFE13	0,111	<0,005	<0,01	2,46	0,206	<0,001	<0,005	<0,005	<0,2	<0,03	0,003	<0,01	<0,005	379

ID	pH	OD mg/L	CE	DQO		CF	CT	Aluminio	Arsénico	Boro	Cadmio	Cianuro	Cinc	Cobalto	
	-	mg/L	mS/cm	mg/L		NMP/100 ml	NMP/100 ml	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg CN/L	mg/L	mg/L	
Campaña 1	GEFE01	8,3	12,0	0,80	13,8		4,5	6,8	0,283	0,016	0,512	<0,001	<0,02	0,006	<0,005
	GEFE03	8,7	13,1	0,80	16,1		<1,8	<1,8	0,22	0,012	0,627	<0,001	<0,02	0,063	<0,005
	GEFE06	8,3	18,0	1,02	16,5		4,5	6,8	0,173	0,003	0,599	<0,001	<0,02	0,081	<0,005
	GEFE12	7,5	10,8	1,90	20,3		17	22	0,024	0,003	<0,02	0,002	<0,02	0,014	<0,005
	GEFE13	7,6	10,4	2,15	123		330	790	0,783	0,004	0,75	0,001	<0,02	0,112	<0,005
Campaña 2	GEFE01	8,3	12,0	0,80	10,7		<1,8	45	0,368	0,015	0,509	<0,001	<0,02	0,042	<0,005
	GEFE03	8,6	13,4	0,79	10,6		<1,8	<1,8	0,247	0,003	0,51	<0,001	<0,02	0,124	<0,005
	GEFE06	8,2	17,5	1,0	5,86		<1,8	78	0,035	0,004	0,496	<0,001	<0,02	0,035	<0,005
	GEFE12	7,4	10,9	1,80	14,9		<1,8	17,9	0,14	0,003	0,65	<0,001	<0,02	0,077	<0,005
	GEFE13	7,6	10,5	2,20	89,1		<1,8	<1,8	1,55	0,006	0,653	<0,001	<0,02	0,114	<0,005

Comparación del error balance iónico en ambas campañas de muestreo

Una de las funciones del muestreo de cationes y aniones mayores es evaluar el balance iónico de los resultados. De tal forma que, bajo el Principio de Electroneutralidad de las aguas, la carga iónica total de los iones positivos debe ser igual a la carga iónica negativa. En la Tabla 27 a continuación, se presenta el balance iónico para ambas campañas. Se observa que el error para la primera campaña se encuentra mayormente dentro del rango esperado, inferior a 10 % (APHA-AWWA-WPCF, 1992). En cuanto a la segunda campaña, los errores se mantuvieron bajo el 10%. A su vez, en la Tabla se presenta la evaluación con respecto a la conductividad eléctrica medida en terreno que debe variar en el rango 0,9-1,1.

En conclusión, las campañas cumplen la validación del balance iónico para cada punto y por lo tanto no se descartan los puntos muestreados para los análisis posteriores. Cabe señalar que el punto GEFE12 (Campaña 1 diciembre 2021) supera levemente el error (12,3 %, en color rojo), sin embargo, por la escasez de puntos muestreados debido a la ausencia de flujo superficial, este punto no fue eliminado. En la segunda campaña (marzo 2022) todos los puntos cumplieron con el límite para el error, no fue necesario realizar una segunda muestra para este punto.

Tabla 27. Comparación de los errores en ambas campañas (diciembre 2021 y marzo 2022). Fuente: Elaboración propia.

ID	Balance iónico			Relación con la conductividad	
	Σ cationes meq/L	Σ aniones meq/L	Error %	Cationes	Aniones
GEFE01 Almendral	7,4	7,5	1,0	0,9	0,9
	8,9	7,9	6,3	1,1	0,9
GEFE02 Pelicana	7,9	7,3	4,2	1,0	0,9
	9,5	8,3	6,8	1,2	1,0
GEFE06 Puente Altovalsol	9,8	9,1	3,8	1,0	0,9
	9,5	10,0	2,6	1,0	1,0
GEFE12 Laguna-Puente Fiscal	23,7	18,5	12,3	1,2	1,0
	19,8	18,9	2,6	1,1	1,0
GEFE13 Laguna- by-pass	20,5	20,6	0,1	1,0	1,0
	22,6	21,9	1,6	1,0	1,0

Metodología de cálculo del Balance iónico de muestras

El balance iónico corresponde al balance entre cationes y aniones mayores en base al Principio de Electroneutralidad de las aguas, por lo tanto, lo esperado es que la suma de los aniones sea igual a los cationes. Los cationes mayores son: sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}); y los aniones mayores corresponden a: cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}) y bicarbonato (HCO^{-3}). El error del balance se mide en % y debe ser inferior a 10 % (APHA-AWWA-WPCF, 1992), de tal forma que aquellos puntos que no cumplan con dicho límite deben ser eliminados del set de datos para cualquier análisis posterior y se recomienda su repetición o una toma de muestra en duplicado para el próximo muestreo.

La expresión usada para evaluar el error del balance iónico es la siguiente:

$$\text{Error (\%)} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \times 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

A su vez, para el cálculo se requiere que los cationes/aniones se ingresen en meq/L, los que se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Ión} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) = \text{Ión} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \frac{\text{Valencia}}{\text{Peso atómico}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Por otra parte, se recomienda evaluar la relación entre la conductividad eléctrica y la suma de cationes y aniones, respectivos del mismo punto, la cual se evalúa según la ecuación (3). Si al menos una de las relaciones (cationes o aniones) se encuentra fuera del rango el punto debe ser descartado. Por otra parte, si el error ya se encuentra sobre el límite del 10%, se debe esperar que la relación con la conductividad también se encuentre alterada.

$$0.9 < \frac{100 \times (\sum \text{Cationes o Aniones})}{CE} < 1.1 \quad (\text{Ec. 9})$$

Selección de parámetros preliminares

El listado preliminar de parámetros seleccionados responde a las potenciales fuentes de contaminación puntual y difusa (Tabilo *et al.* 2021). A su vez, las concentraciones de estos parámetros son contrastadas, según la metodología de cada indicador, con las normativas de referencias para agua de la NSCA (2004) y otras referencias internacionales. Similarmente, las concentraciones de estos elementos en los sedimentos fueron contrastados según normativas internacionales considerando efectos adversos en el ecosistema acuático.

Cabe destacar que cuando entre en vigencia la NSCA para el río Elqui, el criterio para evaluar los parámetros en los indicadores deberá ser ajustado a ésta. Es decir, se recomienda usar el concepto excedencia, que según los Antecedentes Anteproyecto NSCA Cuenca Río Elqui (MMA 2020b) lo describe como: " Se entenderá situación de excedencia, cuando el percentil 85 para tres años calendarios consecutivos de las concentraciones de las muestras analizadas para uno o más parámetros, supere los valores establecidos en las presentes normas. Se considerarán también sobrepasadas las normas secundarias de calidad ambiental establecidas en el presente decreto, si en un año de monitoreo, uno o más parámetros superan al menos en tres oportunidades consecutivas los límites establecidos". Así como también, se deberán incluir otros parámetros de ser necesario y según lo dispuesto por el Programa de Medición y Control de Calidad Ambiental del Agua descrito en la misma normativa (MMA 2020b), según lo estime conveniente la autoridad ambiental.

Metodología indicadores de calidad de agua

La selección de los indicadores a utilizar se basó en la revisión bibliográfica (FCh, 2018; MMA, 2020a; MMA, 2020b; NSF, 1970; CCME, 1999, 2017; García, 2012; Espejo *et al.*; 2011; Debels *et al.*, 2005) verificando principalmente la representatividad de los parámetros utilizados, aplicaciones internacionales y en Chile, posibilidades de modificaciones para lograr un mejor ajuste al área de estudio e información disponible. A continuación, se presentan las metodologías bases para los indicadores ICA-NSF e ICA-CCME, seguidas de sus respectivas versiones modificadas. Finalmente, en la

cuenca baja del Elqui, se aplicaron las siguientes versiones: ICA-NSF (FCh, 2018), ICA-NSF_{1,2}, ICA-CCME (CCME, 2017) e ICA-CCMME_{1,2}.

Generalidades del ICA-NSF

El indicador NSF fue desarrollado por la National Sanitation Foundation de Estados Unidos en 1970. Los parámetros que considera en su metodología son: Oxígeno disuelto (OD), Coliformes fecales (CF), pH, Demanda biológica de oxígeno (DBO), Temperatura (T), Fosfatos totales (P), Nitratos (NH₃), Turbidez (Tu), Sólidos totales (ST). A modo de estandarizar los parámetros, se requiere la información histórica de cada uno para calcular curvas de función para estimar 4 rangos de clases de calidad, es decir, 4 factores de escala (Q_i), según la magnitud de cada parámetro. Posteriormente, se asigna un peso o factor de ponderación (W_i) a cada parámetro, según su importancia relativa con respecto a los demás parámetros. Los pesos y ecuación se presentan a continuación.

$$NSF = \sum_{i=1}^n W_i \times Q_i \quad (\text{Ec.10})$$

Donde el subíndice *i* corresponde respectivamente a cada parámetro y *n* el total de parámetros. El Factor de peso (W_i) para cada parámetro se describe en la Tabla 28 y la interpretación del NSF se clasifica según la siguiente escala de calidad de agua en la Tabla 29.

Tabla 28. Factor de peso (W_i) para cada parámetro. Fuente: NSF 1970, FCh 2018.

Parámetro	Factor W _i
Oxígeno disuelto	0,17
Coliformes fecales	0,16
pH	0,11
DBO	0,11
Nitratos	0,10
Temperatura	0,10
Fosfatos	0,10
Turbidez	0,08
Sólidos totales	0,07

Tabla 29. Escala de interpretación de calidad de agua.

Rango NSF	Clasificación
91-100	Excelente
71-90	Buena
51-70	Media
26-50	Mala
0-25	Muy mala

Fuente: NSF 1970, FCh 2018.



Este índice ha sido ampliamente usado internacionalmente (Tyagi *et al.* 2013, Kumar y Alappat 2009, FCh 2018) y aplicado a nivel nacional con versiones modificadas entre los años 2004 y 2018. Las principales modificaciones se centran en los parámetros seleccionados (P_i), pesos asignados (W_i) y en la estimación de las curvas de función y su respectiva escala de calidad (Q_i). En aquellos casos que no se encuentre disponible la información histórica para calcular las curvas de función de cada parámetro, se hace uso de las clasificaciones (Q_i) que ya están definidas en la Norma Secundaria de Calidad Ambiental del año 2004 (CONAMA 2004) además de ser complementada con normativa internacional. A continuación, se listan las aplicaciones en Chile con las principales modificaciones, siendo la última versión la correspondiente al año 2018 y aquella aplicada en este estudio.

Tabla 30. Aplicaciones del indicador SNF con las principales modificaciones.

ICA NSF modificado	Observaciones
DGA (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • Planteado por la DGA. Modifica el listado de parámetros y agrega grupo de parámetros relevantes (aquellos que no cumplan con la clase de excepción). • Cambios en las ponderaciones (Factor W_i): 70 % y 30 %, grupo obligatorio y relevante, respectivamente. • Modifica ligeramente los 5 rangos de interpretación del indicador. • Aplicado en todo Chile, en base a concentraciones totales disponibles en la red de monitoreo DGA.
Fundación Chile (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollado por Fundación Chile en el marco del proyecto Mining FootPrint. • Mantiene la misma ecuación (ecuación 10), con la NSCA CONAMA (2004) • Separa los parámetros en dos grupos: obligatorios y relevantes (aquellos que no cumplan con la clase de excepción). • Cambios en las ponderaciones (Factor W_i): subtotales de 61 % y 31 %, grupo obligatorio y relevante, respectivamente.
Fundación Chile (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollado por Fundación Chile en el marco del proyecto Escenario Hídricos 2030. • Modifica la ecuación 1 según la ecuación 11 al ocupar un término según el grupo de parámetro y añade el criterio de “máximo valor”. • Separa los parámetros en dos grupos: obligatorios o generales y complementarios, con cambios en las ponderaciones. • Aplicado en todo Chile, en base a concentraciones totales disponibles en la red de monitoreo DGA.

Fuente: elaboración propia a partir de DGA (2004), Fundación Chile (2013), Fundación Chile (2018).

Aplicación de modificaciones: ICA-NSF_{1,2}

Descripción del indicador

A continuación, se detalla la metodología del indicador de calidad de agua superficial propuesto por Fundación Chile (FCh, 2018), el cual fue aplicado a los datos del presente estudio.

$$ICA - NSF_1 = W_{pg} \times \text{máx}(Q_{i_{pg}}) + W_{pc} \times \text{máx}(Q_{i_{pc}}) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde, el subíndice i corresponde respectivamente a cada parámetro considerado.

El indicador presenta dos grupos de parámetros, generales (pg) y complementarios (pc), ver ecuación 8. El primer grupo incluye los parámetros fisicoquímicos generales como OD, CE, DQO y pH, y se les asigna una ponderación o peso total de 49 %. En cuanto a los complementarios (pc), estos tienen una ponderación total del 51 %, para un total de 14 parámetros (cianuro, cobre, mercurio, molibdeno, nitrato, nitrito, plata y selenio), donde además se consideran 6 parámetros clasificados como críticos, debido a su alta toxicidad y riesgo de generar cáncer en animales y humanos. Estos parámetros críticos son: arsénico, cadmio, cromo hexavalente, cobalto, níquel y plomo (FCh, 2018).

Como se ve en la ecuación 11, se incluyen los términos $máx(Qi_{pg})$ y $máx(Qi_{pc})$, los cuales representan el máximo valor normalizado entre los parámetros generales (pg) y/o complementarios (pc , incluyendo los críticos). Es decir, se considera el Q_i máximo (entre los factores 1 a 4) alcanzado entre todos los parámetros considerados en el indicador, pero se descartan del cálculo el resto de los parámetros con Q_i inferior. Para mayor claridad ver el diagrama de lógica difusa propuesto por FCh (2018) en la Fig. 30.

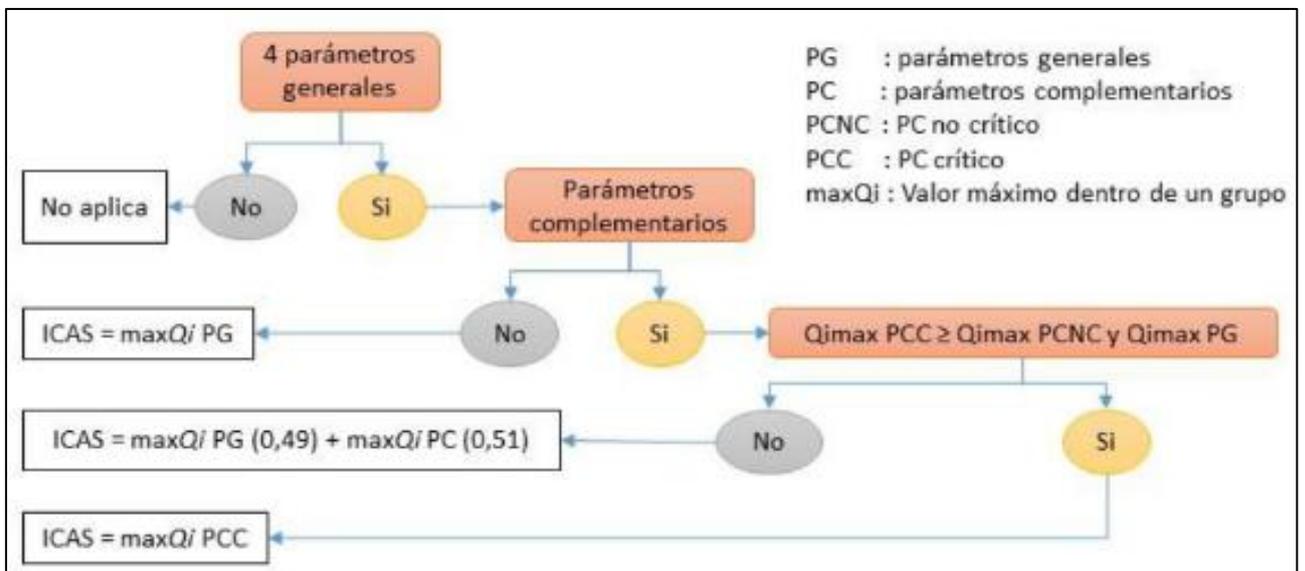


Figura 30. Esquema de lógica difusa en cálculo del indicador. Fuente: FCh (2018).

Para la aplicación del indicador ICA-NSF₁, en cuanto al grupo de parámetros complementarios, se mantienen los parámetros propuestos por Fundación Chile (2018). Con respecto a los parámetros complementarios, se evaluó añadir otros parámetros a partir de ambas campañas de muestreo. Estos envuelven nutrientes,

metal(oide)s, microbiológicos, entre otros, los cuales permiten detectar globalmente una anomalía en la calidad del agua.

Un segundo enfoque (ICA-NSF₂) fue aplicado donde el $Q_{i_{pg}}$ y $Q_{i_{pc}}$ hacen referencia al valor factor de escala máximo alcanzando para un parámetro i pero comparando entre ambas campañas. Por lo tanto, cada parámetro según su peso (W_i) y su respectivo factor de escala (Q_i) es considerado en el cálculo mediante el sumatorio total (ecuación 12). Este segundo enfoque puede ser de utilidad para contrastar muestreos futuros que sean representativos de distintas estaciones, por lo tanto, se presenta en este estudio con fines comparativos con la versión FCh (2018), pero requiere ser reevaluado posteriormente con campañas futuras.

$$ICA - NSF_2 = \sum_i^n W_{pg} \times \max(Q_{i_{pg}}) + \sum_i^n W_{pc} \times \max(Q_{i_{pc}}) \quad \text{(Ec.12)}$$

Donde el subíndice i corresponde respectivamente a cada parámetro y n el total de parámetros.

Independiente del enfoque a ocupar (ICA-NSF₁, ecuación 11; ICA-NSF₂, ecuación 12), se mantienen tanto las consideraciones generales para seleccionar los parámetros, referencias e interpretación del indicador son las mismas.

En cuanto a la interpretación del resultado de los indicadores, se presenta la Tabla 31 siguiente:

Tabla 31. Clasificación de los rangos del indicador NSF.

Rango ICA-NSF _{1,2}	Clasificación
$0 \leq ICA \leq 1$	Excelente
$1 < ICA \leq 2$	Buena
$2 < ICA \leq 3$	Media
$3 < ICA \leq 4$	Mala

En la tabla a continuación se presenta una comparación con los parámetros propuestos por el ICA-SNF₁ (FCh, 2018) y los parámetros incluidos para este estudio para el ICA-NSF₂, acompañado de las referencias, factor de escala (Q_i) y de peso (W_i).

Tabla 32. Parámetros seleccionados para el ICA-SNF (FCh, 2018) e indicadores en este estudio.

Parámetros		ICA-SNF' (FCh, 2018)	Parámetros muestreados Campaña 1-2	Parámetros a evaluar en indicadores	Factor de peso (W_i)	
Parámetros fisicoquímicos generales (<i>pg</i>)	pH	X	X	X	49 %	
	OD mg/L	X	X	X		
	CE mS/cm	X	X	X		
	DQO	X	X	X		
Metal(oide)s	Aluminio (Al)		X	X	51 %	
	Boro (B)		X	X		
	Cianuro (CN)	X	X	X		
	Cobre (Cu)	X	X	X		
	Cromo (Cr)		X	X		
	Hierro (Fe)		X	X		
	Manganeso (Mn)		X	X		
	Mercurio (Hg)	X	X	X		
	Molibdeno (Mo)	X	X	X		
	Plata (Ag)	X	X	X		
	Selenio (Se)	X	X	X		
	Zinc (Zn)		X	X		
	Metal(oide)s críticos (<i>pc</i>)	Arsénico (As)	X	X		X
		Cadmio (Cd)	X	X		X
Cromo (CrIV)		X	X	X		
Cobalto (Co)		X	X	X		
Níquel (Ni)		X	X	X		
Plomo (Pb)		X	X	X		
Nitrato (NO ₃)		X	X	X		
Nitrito (NO ₂)		X	X	X		
Sulfato (SO ₄)		X	X	X		
Mb.		Coliformes totales		X	X	
	Coliformes fecales		X	X		

Mb.: Parámetros Microbiológicos. Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones generales y específicas para los ICA-NSF_{1,2}

A continuación, se presentan las consideraciones generales y específicas para la generación y aplicación de los indicadores de esta Consultoría:

- **Generales**
 1. Los datos deben tener representatividad espacial y temporal del área de estudio. Todos los puntos deben tener los mismos parámetros a considerar en el indicador para ambas campañas de muestreo (diciembre 2021 y marzo 2022), ya sea para parámetros generales o parámetros complementarios.
 2. La selección de los parámetros generales es siempre fija en los 4 parámetros antes señalados (OD, CE, DQO y pH).
 3. Todos aquellos resultados del monitoreo que se encuentren bajo el límite de detección (LD) fueron reemplazados por el promedio entre 0 y el LD, a modo de mantener una trazabilidad del parámetro y debidamente identificados como “bajo el LD”, según corresponda.
 4. Para la selección de los parámetros denominados complementarios estos son considerados en el cálculo del indicador de acuerdo con la revisión bibliográfica y según sean representativos del área de estudio. Además, se requiere disponer de las referencias de calidad clasificada en clases, tal como se describe en la metodología.
- **Específicas**

El análisis involucra la evaluación de ambas campañas de muestreo (diciembre 2021 y marzo 2022) para la selección final de la escala de clases de calidad (Q_i , entre 1-4), seleccionando el Q_i máximo entre estas, asumiendo que ambas son representativas del mismo periodo estival.

Definición de la normalización de las clases de calidad - factor de escala (Q_i), normativa asociada

A continuación, se presenta el detalle de la normalización para la clasificación de las clases de cada parámetro (factor de escala, Q_i) según la NSCA (2004) y las modificaciones realizadas para el indicador ICA-SNF (FCh, 2018) que aplican a los ICA-SNF_{1,2} (ver Tabla 33). Posteriormente, en la Tabla 34 se presentan los valores correspondientes a cada factor de escala (Q_i) y la referencia respectiva.

Tabla 33. Clasificación del factor de escala (Qi) según la NSCA CONAMA (2004) y modificaciones según Fundación Chile para el indicador ICA-NSF_{1,2}

Clasificación según NSCA CONAMA (2004)		Clasificación según FCh (2018)		
Clasificación de clase	Descripción	Clasificación de clase	Descripción	Normalización Escala (Qi)
Clase Excepcional	Indica un agua de mejor calidad que la Clase 1, que, por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte única del patrimonio ambiental de la República. Esta calidad es adecuada también para la conservación de las comunidades acuáticas y demás usos definidos cuyos requerimientos de calidad sean inferiores a esta Clase.	Clase Excepcional	Clase de excepción según normas secundarias generales de calidad ambiental de la Guía CONAMA 2004, se compara y complementa con normas de protección de vida acuática internacionales. Estas aguas no afectan salud humana y cumplen con criterios de aceptabilidad del agua potable.	1
Clase 1 Muy buena calidad	Indica un agua adecuada para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para el riego irrestricto y para los usos comprendidos en las Clases 2 y 3.	Calidad Buena	Agua adecuada para riego y el desarrollo de acuicultura. Se basa principalmente en la Clase 2 de Guía CONAMA 2004, se compara y complementa con normativa nacional e internacional (francesa y canadiense) para riego y sistemas agrícolas, y cumple con ambas o al menos una de ellas.	2
Clase 2 Buena Calidad	Indica un agua adecuada para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa, y para los usos comprendidos en la Clase 3.	Calidad Media	Agua para uso recreativo, bebida de animales y riego restringido. Se basa en la Clase 3 de Guía CONAMA 2004 y se compara y complementa con normativa canadiense y francesa para bebida de animales y con la FAO.	3
Clase 3 Calidad Regular	Indica un agua adecuada para bebida de animales y para riego restringido.	Calidad insuficiente	Comprende las aguas que exceden los límites establecidos para la clasificación de regular en la Guía CONAMA 2004, e indican agua de mala calidad, en general, no adecuada para conservación de comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin el tratamiento adecuado.	4
Clase 4 Mala calidad	Las aguas que excedan los límites establecidos para la Clase 3, indicarán un agua de mala calidad (Clase 4), en general no adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin el tratamiento adecuado.			

Fuente: NSCA CONAMA (2004) y FCh (2018).

Tabla 34. Parámetros y factores de escala (Qi) para los ICA-NSF_{1,2}.

Parámetros		Unidad	Factor de escala (Qi)				Referencia		
			1	2	3	4			
Parámetros fisicoquímicos generales (pg)	pH	-	6,5 ≤ pH ≤ 8,2	6,0 ≤ pH < 6,5 * 8,2 < pH ≤ 9,0	5,5 ≤ pH < 6,0 * 9,0 < pH ≤ 9,5	< 5,5 * > 9,5 *	SEQ/NSCA 2004		
	OD	mg/L	5,5 < OD ≤ 7,5 *	5,0 < OD ≤ 5,5 *	< 5,0 *	5,5 < OD ≤ 7,5 *	NSCA 2004/EQGA		
	CE	mS/cm	CE < 0,6 mg/L	0,6 ≤ CE ≤ 0,75	0,75 < CE ≤ 1,5	1,5 < CE ≤ 2,25; 1,5 < CE	NSCA 2004		
	DQO	mg/L	≤ 10	10 ≤ DQO ≤ 20	20 < DQO < 40	≥ 40	SEQ/NMCA		
Parámetros complementarios (pc)	Metal (oide)s	Aluminio (Al)	mg/L	< 0,07	0,07 ≤ Al ≤ 0,09	0,09 < Al ≤ 0,1	0,1 < Al ≤ 5; Al > 0,1	NSCA 2004	
		Boro (B)	mg/L	< 0,4 mg/L	0,4 ≤ B ≤ 0,5	0,5 < B ≤ 0,75	B > 0,75	NSCA 2004	
		Cianuro	mg/L	< 0,004	0,004 ≤ CN ≤ 0,005	0,005 < CN ≤ 0,01	0,01 < CN ≤ 0,05; CN > 0,01	NSCA 2004	
		Cobre (Cu)	mg/L	Cu < 0,0072 mg/L	0,0072 ≤ Cu ≤ 0,009	0,009 < Cu ≤ 0,2	0,2 < Cu ≤ 1,0; Cu > 0,2	NSCA 2004	
		Cromo (Cr)	mg/L	< 0,008 mg/L	0,008 ≤ Cr ≤ 0,01	0,01 < Cr ≤ 0,1	> 0,1	NSCA 2004	
		Hierro (Fe)	mg/L	< 0,8 mg/L	0,8 ≤ Fe ≤ 1	1 < Fe ≤ 5	Fe > 5	NSCA 2004	
		Manganeso (Mn)	mg/L	< 0,04 mg/L	0,04 ≤ Mn ≤ 0,05	0,05 ≤ Mn ≤ 0,2	> 0,2	NSCA 2004	
		Mercurio (Hg)	mg/L	< 0,00004 mg/L	0,00004 ≤ Hg ≤ 0,00005	0,00005 < Hg ≤ 0,001	> 0,001	NSCA 2004	
		Molibdeno (Mo)	mg/L	< 0,008 mg/L	0,008 ≤ Mo ≤ 0,01	0,01 < Mo ≤ 0,15	0,15 < Mo ≤ 0,5; Mo > 0,15	NSCA 2004	
		Plata (Ag)	mg/L	≤ 0,00025 mg/L *	0,00025 < Ag ≤ 0,01	0,01 < Ag ≤ 0,2	Ag > 0,2	CCME/NCh 1333	
		Selenio (Se)	mg/L	< 0,004 mg/L	0,004 ≤ Se ≤ 0,005	0,005 < Se ≤ 0,02	0,02 < Se ≤ 0,05; Se > 0,02	NSCA 2004	
		Zinc (Zn)	mg/L	< 0,096 mg/L	0,096 ≤ Zn ≤ 0,120	0,120 < Zn ≤ 1,00	1,00 < Zn ≤ 5,00; Zn > 1,00	NSCA 2004	
	Metal(oide)s críticos (pc)	Arsénico (As)	mg/L	< 0,04	0,04 ≤ As ≤ 0,05	0,05 < As ≤ 0,1	As > 0,1	NSCA 2004	
		Cadmio (Cd)	mg/L	< 0,0018 mg/L	0,0018 ≤ Cd ≤ 0,002	0,002 < Cd ≤ 0,01	Cd > 0,01	NSCA 2004	
		Cromo (CrIV)	mg/L	Cr IV < 0,008	0,008 ≤ Cr ≤ 0,1	Cr IV > 0,1	Cr IV > 0,1	NSCA 2004	
		Cobalto (Co)	mg/L	Co ≤ 0,0025 *	0,0025 < Co ≤ 0,05	0,05 < Co ≤ 1	Co > 1	EQGA/CCME	
		Níquel (Ni)	mg/L	< 0,042 mg/L	0,042 ≤ Ni ≤ 0,052	0,052 < Ni ≤ 0,2	Ni > 0,2	NSCA 2004	
		Plomo (Pb)	mg/L	< 0,002 mg/L	0,002 ≤ Pb ≤ 0,0025	0,0025 < Pb ≤ 0,2	0,2 < Pb ≤ 5; Pb > 0,2	NSCA 2004	
		Nitrato (NO3)	mg N/L	NO ₃ ≤ 13*	13 < NO ₃	13 < NO ₃ < 50	> 50	CCME/SEQ	
		Nitrito (NO2)	mg N/L	< 0,05 mg/L	0,05 ≤ NO ₂ ≤ 0,06	> 0,06	> 0,06	NSCA 2004	
		Sulfato	mg/L	< 120 mg/L	120 ≤ SO ₄ ≤ 150	150 < SO ₄ ≤ 500	500 < SO ₄ ≤ 1000; SO ₄ > 500	NSCA 2004	
		Mb	Coliformes totales	NMP/100 ml	< 200	200 ≤ CT ≤ 2000	2000 < CT ≤ 5000	5000 < CT ≤ 10000; CT > 5000	NSCA 2004/NCh 409
			Coliformes fecales	NMP/100 ml	CF < 10	10 ≤ CF ≤ 1000	1000 < CF ≤ 2000	2000 ≤ CF ≤ 5000; CF ≥ 2000	NSCA 2004/NCh 409

Mb.: Parámetros Microbiológicos ; SEQ: Système d'évaluatio de la qualié de l'eau des cours d' eau Francia ; EQGA: Environmental Quality Guideline for Alberta surface water - for protection of Aquatic life; CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment; NMCA: Normativa Mexicana para calidad de Agua

Referencias y normativas ambientales

Como se describe en la Tabla anterior, el listado de parámetros, así como la clasificación de las clases de calidad se guió por la NSCA CONAMA (2004), la cual se enfoca en la protección de vida acuática y ecosistemas. Esta fue complementada con las siguientes normativas:

- ✓ Canadian Environmental Quality Guidelines CCME, 1999. Para complementar el límite de la clase excepcional para plata, nitrato; clase buena para aluminio, cobalto y nitrato; clase regular para cobalto.
- ✓ Normativa Mexicana para calidad de Aguas (León 1998), en particular para definir las clases de calidad para el parámetro DQO.
- ✓ Normativa Francesa para calidad de Agua (Systèmes d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau) (Senado Francia, 2012) (SEQ, 2012). Se utilizó para complementar el pH, DQO y corte para la Clase Regular respecto al nitrato.
- ✓ Norma de Calidad de Aguas Superficiales de la Provincia de Alberta, Canadá (ESRD, 2014). se utilizó para complementar el límite para el cobalto.
- ✓ NCh 409/2005 para agua potable. Se utilizó para complementar clases en general y NCh 1333/1978/1987 sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Se utilizó para definir el límite de la clase buena para la plata, definida por un uso de agua riego.

Para efectos de este estudio, estas normativas fueron revisadas en búsqueda de actualizaciones.

Generalidades del ICA-CCME

El indicador CCME (por su sigla en inglés, *Canadian Council of Ministers for the Environment*) fue desarrollado a partir del año 1995 por el Ministerio de Medio Ambiente, Suelos y Parques de la provincia Columbia Británica, Canadá. Posteriormente, incorporó modificaciones en su metodología de cálculo desarrolladas por la provincia de Alberta, Canadá en relación con el índice de calidad agrícola (CCME, 2017).

El ICA-CCME presenta la flexibilidad que puede ser utilizado en cualquier cuerpo de agua donde exista una legislación de los parámetros a considerar. Por lo tanto, solo requiere establecer la referencia de calidad como objetivo a alcanzar. Combina tres factores de cálculos, los cuales se describen a continuación:

- F_1 (Alcance). Corresponde al número de parámetros cuyos valores no cumplen con la referencia en al menos una muestra durante el periodo de estudio, en relación con el número total de parámetros medidos. Se expresa en porcentaje y se obtiene mediante la siguiente relación:

$$F_1 = \left(\frac{\text{número de parámetros fallidos}}{\text{número total de parámetros medidos}} \right) \times 100 \quad (\text{Ec.13})$$

- F_2 (Frecuencia). Corresponde al número de veces en que cada medición no cumple con las referencias, en relación con el número total de mediciones realizadas durante el periodo de estudio (M). Se expresa en porcentaje y se obtiene mediante la siguiente relación:

$$F_2 = \left(\frac{\text{número de mediciones fallidas}}{\text{número total de mediciones}} \right) \times 100 \quad (\text{Ec.14})$$

- F_3 (Amplitud). Corresponde a la cantidad por la cual el valor de la medición falla al no cumplir con las directrices. Este se calcula en tres etapas:

- i) Cálculo de la Excursión: es el número de veces por el que la medición individual difiere de la referencia. Se calcula como sigue:

→ Para una medición mayor a la referencia:

$$\text{Excursión} = \left(\frac{\text{Valor de la medición fallida}}{\text{referencia objetivo}} \right) - 1 \quad (\text{Ec.15})$$

→ Para una medición menor a la referencia, cuando esta es un mínimo:

$$\text{Excursión} = \left(\frac{\text{referencia objetivo}}{\text{Valor de la medición fallida}} \right) - 1 \quad (\text{Ec.16})$$

- ii) Cálculo de la suma normalizada de excursiones (*nse*). Sumatoria de las excursiones de las pruebas individuales con respecto al número total de mediciones (*n*). Se calcula como sigue:

$$nse = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Excursión}_i}{n^{\circ} \text{ de mediciones}} \right) \quad (\text{Ec.17})$$

- iii) Cálculo del F_3 . Este valor varía entre 0 y 100 y se calcula mediante la siguiente expresión

$$F_3 = \left(\frac{nse}{0,01 nse + 0,01} \right) \times 100 \quad (\text{Ec.18})$$

Finalmente, el indicador ICA-CCME se calcula según la siguiente ecuación:

$$ICA - CCME = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1 + F_2 + F_3}}{1,732} \right) \quad (\text{Ec.19})$$

A continuación, se presentan las categorías de clasificación del ICA-CCME en la Tabla 35.

Tabla 35. Escala de interpretación de calidad de agua para el ICA-CCME.

Rango CCME	Clasificación	
95-100	Excelente	Las condiciones están muy cerca de los niveles naturales o prístinos, en ausencia de una amenaza o deterioro. Puede obtenerse solo cuando las mediciones no superan las directrices de calidad del agua.
80-94	Buena	La calidad del agua está protegida con sólo un grado menor de amenaza o deterioro. Las condiciones rara vez se apartan de los niveles naturales o de referencia deseable.
65-79	Aceptable	La calidad del agua está generalmente protegida, pero a veces es amenazada o deteriorada. Las condiciones a veces se apartan de los niveles naturales o directrices deseables.
45-64	Marginal	La calidad del agua está frecuentemente amenazada o deteriorada. Las condiciones se apartan a menudo de las directrices de calidad o condiciones naturales.
0-44	Pobre	La calidad del agua está casi siempre amenazada o deteriorada. Las condiciones suelen alejarse de las condiciones naturales o de referencia deseables.

Fuente: CCME (2017).

Aplicación de modificaciones: ICA- CCME₁ y ICA- CCME₂

Descripción del indicador

En cuanto a las modificaciones con respecto a la versión original (CCME 2017), estas recaen primeramente en la cantidad de parámetros considerados en el indicador, lo cual depende de la disponibilidad de parámetros en la normativa correspondiente en la zona de estudio.

En particular para el ICA- CCME₁, este mantiene su formulación original (ecuaciones 13 a 19) solo haciendo los cambios mencionados en el párrafo anterior.

En relación con la segunda versión modificada, ICA- CCME₂, solo modifica la formulación del F₂ (Frecuencia). Esto en consideración a lo planteado por Espejo et al. (2011) donde se aplica este indicador en la cuenca del Elqui y establece una diferenciación en el peso según el tipo de parámetro, dado a los efectos que puede causar en el ecosistema y la salud de las personas. Así, por ejemplo, un incumplimiento en la concentración del aluminio puede resultar menos perjudicial que una excedencia en arsénico. En este contexto, Espejo *et al.* (2011), modifica el cálculo de F₂, multiplicando por el factor 1, 2 ó 3 según el grupo al que pertenezca el parámetro. Sin embargo, dado que nuestra base de datos cuenta con otros parámetros y para mantener la concordancia con el ICA- CCME₁ e ICA- CCME₂, el Grupo 1 contempla los parámetros fisicoquímicos; Grupo 2, complementarios no críticos; y Grupo 3, parámetros complementarios críticos. Ver Tabla 36.

Tabla 36. Comparación de la clasificación de parámetros según el efecto en el ecosistema y salud de las personas. Cálculos del F2 para ICA-CCM2.

Grupos	Parámetros Espejo <i>et al.</i> (2011)	Parámetros a evaluar en este estudio	Caracterización
Grupo 1	pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura.	pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno.	Efectos “leves” sobre el ecosistema y la salud de las personas.
Grupo 2	Aluminio, manganeso, cobre, molibdeno, hierro, zinc	Aluminio, boro, cianuro*, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio*, molibdeno, plata, selenio, zinc, nitrato, nitrito, coliformes totales, coliformes fecales, sulfatos,	Efectos “medios” sobre el ecosistema y la salud de las personas.
Grupo 3	Arsénico, cromo, níquel, mercurio.	Arsénico, cadmio, cobalto, cromo IV, níquel, plomo*.	Efectos “importantes” sobre el ecosistema y la salud de las personas.

Fuente: Modificado a partir de Espejo et al. (2011). Nota: este listado corresponde a la totalidad de los parámetros muestreados, no se presenta la selección posterior según si presentan una calidad inferior a la calidad excepcional (NSCA, 2004). (*): no son considerados en el cálculo ya que los LD entregados por el laboratorio químico son mayores a la referencia considerada, además todos los resultados para ambas campañas y en todos los puntos las concentraciones se encuentran bajo el LD.

Consideraciones generales y específicas para los ICA- CCME₁ y ICA- CCME₂

- Generales

Se mantienen las consideraciones generales descritas. A modo de mantener una uniformidad en relación a la selección de los parámetros entre los ICA-SNF e ICA-CCME, ambos consideran el mismo criterio de selección, según la revisión bibliográfica. En cuanto a las referencias de calidad, se mantiene el mismo listado (Tabla 29).

- Específicas

Este indicador no depende de las clases de calidad (como se clasifica en la NSCA, 2004) o del factor de escala (Q_i , en ICA-NSF, ver Tabla 28), sino que evalúa si el parámetro cumple o no con la referencia definida como objetivo. De esta manera, cabe recordar que la “Clase Excepcional” descrita en la NSCA (2004) complementada con la normativa internacional fue establecida como referencia objetivo, a modo de mantener la referencia más restrictiva.

Metodología indicadores calidad de sedimentos (ICS)

Al igual que para los ICA, la selección de los indicadores a utilizar se basó en la revisión bibliográfica (Magni *et al.* 2021; Zeng *et al.*, 2020; Vivien *et al.*, 2020; Cabrera y Ruiz, 2017; Águila-Juárez *et al.*, 2005), donde las metodologías bases seleccionadas para los indicadores a emplear son: Índice de Enriquecimiento (IE) e índice de Geoacumulación (I_{geo}), los cuales, posteriormente fueron modificados para ser aplicados a los datos de la cuenca baja del Elqui. La selección de las metodologías se justifica en que ambos indicadores son fáciles de aplicar, pero principalmente se eligen ya que abarcan dos enfoques. Para el IE el enfoque es de tipo toxicológico, ya que utiliza tres referencias diferenciadas por el nivel de efectos adversos que puedan causar en el ecosistema. Mientras que, por otra parte, el I_{geo} , está relacionado a la composición del suelo, al compararse con valores promedios de la corteza terrestre y a su vez con concentraciones promedios de los relaves presentes o cercanos a la zona de estudio. Por otra parte, la selección de parámetros se basa en la revisión de estudios previos en la zona de estudio (Oyarzún *et al.* 2021; Oyarzún *et al.*, 2016; Oyarzún *et al.*, 2012; Castillo, 2009), el cual puede verse disminuido dependiendo de la disponibilidad de referencias a aplicar según el tipo de indicador.

Generalidades del ICS-IE

El indicador permite evaluar el grado de contaminación por enriquecimiento de un metal(oide) calculando individualmente la proporción entre el valor de la muestra de sedimento fluvial y el valor de referencia o de fondo, según su disponibilidad. Se expresa mediante la siguiente relación:

$$IE = \frac{\text{Concentración metal(oide) muestra}}{\text{Concentración de referencia}} \quad (\text{Ec.20})$$

Las categorías de contaminación se describen en la Tabla a continuación:

Tabla 37. Clasificación del nivel de contaminación según ICS-IE

Valor de IE	Grado de contaminación
$IE \leq 1$	Contaminación baja
$1 < IE < 3$	Contaminación moderada
$3 < IE < 6$	Contaminación severa
$IE \geq 6$	Contaminación extrema

Aplicación de modificaciones: ICS-IE_{1,2,3}

Descripción del indicador ICS-IE_{1,2,3}

La aplicación de este indicador o índice no considera modificaciones en su formulación sino solo en la referencia a considerar. En este caso como se describe en las referencias de calidad de sedimentos se consideran tres niveles de contaminación y respectivamente tres IE: IE₁, IE₂ e IE₃, ver Tabla 29.

Consideraciones generales

Al igual que los indicadores para calidad de agua, se tienen las siguientes consideraciones:

- Generales
 - Los datos deben tener representatividad espacial y temporal del área de estudio. Todos los puntos deben tener los mismos parámetros a considerar en el indicador para ambas campañas.
 - La selección de los parámetros se basa solo en la existencia de valores de referencia internacional para ser comparado, no se limita a considerar si sobrepasa o no cierto nivel de clase de calidad.
 - Todos aquellos resultados del muestreo que se encuentren bajo el límite de detección (LD) fueron reemplazados por el promedio entre 0 y el LD, a modo de mantener una trazabilidad del parámetro. Estos valores son debidamente identificados como “bajo el LD”, según corresponda.

Referencias de calidad de sedimentos

Las directrices de calidad de sedimentos consultadas corresponden a la guía CSQG (1991) (*Canadian Sediment Quality Guidelines*, por su sigla en inglés), guía OSQG (2008) (*Ontario Sediment Quality Guidelines*, por su sigla en inglés) y guía de estimación de contaminantes fluviales de la US EPA (por su sigla en inglés, *United States Environmental Protection Agency*; EPA, 2002). Estas han sido desarrolladas mediante bioensayos en organismos bentónicos y se han utilizado ampliamente en estudios a nivel internacional y en numerosas aplicaciones, tales como, diseño de programas de monitoreo, interpretación de datos históricos, evaluaciones de calidad y riesgo ambiental, programas de remediación, etc. (Vivien *et al.*, 2020; Cabrera y Ruiz, 2017; Deckere *et al.*, 2011; Quintero *et al.*, 2010; Castillo, 2009; MacDonald *et al.*, 2000). En Chile, no existen normativas de calidad aplicables a sedimentos fluviales, sin embargo, las referencias mencionadas han sido utilizadas para evaluar la calidad ambiental de los cuerpos marinos y continentales (DIRECTEMAR 2007, CAPP 2006).

Las concentraciones propuestas por las diferentes normativas, generalmente se encuentran diferenciadas por el nivel de efectos adversos que puedan causar en el ecosistema. Así, por ejemplo, el nivel umbral TEL (por su sigla en inglés, *threshold effect level*), el cual define la concentración del contaminante a la que se comienzan a observar respuestas tóxicas en los organismos bentónicos; efecto LEL (por su sigla en inglés, *Lowest effect level*), indica un nivel de contaminación que puede ser tolerado por la mayoría de los organismos bentónicos. Es necesario señalar que estos niveles de concentración en sedimentos resultan ser muy bajos en comparación con los contenidos medios mundiales en sedimentos, así como también con respecto a las concentraciones de fondo del área de estudio. En cuanto al nivel de efecto severo SEL (por su sigla en inglés, *Severe Effect Level*), este indica un nivel de contaminación que se espera sea perjudicial para la mayoría de los organismos que habitan en los sedimentos. Los sedimentos que superan el SEL se consideran altamente contaminados.

Los valores de referencia se presentan en la Tabla 38 a continuación.

Tabla 38 Directrices de calidad de los sedimentos para los metal(oid)es (mg/kg=ppm).

Metal(oide)	CSQG	OSQG/EPA	
	TEL	LEL	SEL
Arsénico (mg/kg)	5,9	6,0	33,0
Cadmio (mg/kg)	0,6	0,6	10,0
Cobre (mg/kg)	35,7	16,0	110,0
Cromo (mg/kg)	37,3	26,0	110,0
Hierro (%)	-	2,0	4,0
Manganeso (mg/kg)	-	460	1100,0
Mercurio (mg/kg)	0,17	0,2	2,0
Níquel	-	16	75
Plomo (mg/kg)	35,0	31,0	250,0
Zinc (mg/kg)	123,0	120,0	820,0
IE asociado	IE ₂	IE ₁	IE ₃

CSQG: Canadian Freshwater Sediment Quality Guidelines (CCME, 1999b); TEL: Threshold Effect Level (CCME, 2002); OSQG: Ontario Sediment Quality Guidelines, LEL: Lowest Effect Level, SEL: Severe Effect Level (OSQG, 2008); EPA: Environmental Protection Agency IE: índice de enriquecimiento (EPA, 2002); (-): Información no disponible.

Generalidades del ICS- I_{geo}

El Índice de Geoacumulación (I_{geo}) busca estimar la influencia de la posible contaminación en los sedimentos por metal(oide)s al comparar las concentraciones obtenidas en las campañas de monitoreo con el valor de fondo geoquímico medio de la corteza terrestre o sedimentos fluviales, según corresponda. El índice se calculó por el método Muller (1979) planteado en Singh *et al.* (2005) mediante la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \frac{C_n}{1,5 \times B_n} \quad (\text{Ec.21})$$

Donde, C_n es la concentración del elemento muestreado, B_n es la media referencial de la concentración de base o fondo. El valor 1,5 corresponde al factor de corrección propuesto por Taylor (1964) (en Singh *et al.*, 2005). Varios autores han estimado valores promedios en sedimentos y corteza terrestre (Sparks 1995; 2002; Bowen, 1979; Alloway, 1995; Kabata-Pendias and Pendias, 1992, 1984; Rudnick y Gao, 2004; Kabata-Pendias, 2001; Vinogradov, 1954; Koljonen, 1992; Rauch, 2011). Estos datos dependen de promedios de diversas áreas de estudio combinado con estimaciones de la composición geoquímica de la corteza terrestre,

factores que afectan las concentraciones naturales, además de las distintas técnicas de muestreo y distintos análisis de laboratorio, que es su conjunto dificulta asignar un valor de fondo representativo (Caritat *et al.*, 2012). Por otra parte, definir la concentración de base de una zona en particular requiere identificar una zona prístina, sin la influencia de la contaminación antrópica, y en consideración de la historia minera de la cuenca del Elqui, esto resulta en una dificultad extra. A pesar de lo anterior, el uso de referencias promedios mundiales puede resultar razonable a modo de simplificación, por lo cual se utilizaron los valores promedios mundiales para sedimentos propuestos por Bowen (1979), el cual ha sido ampliamente citado (Deverel *et al.*, 2011; Devoc *et al.*, 1998; Caritat *et al.*, 2012; Cardoso *et al.*, 2001), así como Sparks (2002), en la cuenca del Elqui y Centro-Norte de Chile (Oyarzún *et al.*, 2012; Oyarzún *et al.*, 2021; Oyarzún *et al.*, 2016).

El índice se interpreta bajo 7 clasificaciones, donde la clase 6 refleja un enriquecimiento de 100 veces de un elemento dado y 0 refleja la concentración natural o de fondo.

Tabla 39. Clasificación de contaminación según ICS- I_{geo}

Clase	Valor de I_{geo}	Grado de contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 \leq I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 \leq I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 \leq I_{geo} < 3$	De moderado a severamente contaminado
4	$3 \leq I_{geo} < 4$	Severamente contaminado
5	$4 \leq I_{geo} < 5$	Severa a extremadamente contaminado
6	$5 \leq I_{geo}$	Extremadamente contaminado

Aplicación de modificaciones: ICS- $I_{geo 1,2}$

Descripción del indicador

Al igual que el indicador anterior, la aplicación de este no considera modificaciones en su formulación sino solo en las referencias a considerar. En este caso como se describe en las Referencias de calidad de sedimentos se consideran 2 evaluaciones para este indicador:

ICS- I_{geo1} - ICS- I_{geo2} . Ver Tabla 31.

Referencias utilizadas

Primeramente, se compara con los valores promedio (Bowen 1979; Sparks, 2002) para el I_{geo1} . Luego, a modo de estimar la contaminación antrópica en el área de estudio dado los depósitos mineros, se utiliza como una segunda referencia comparativa los valores medios presentes en los relaves en la zona de estudio (Oyarzún *et al.*, 2021; Oyarzún *et al.* 2012; Castillo, 2009), recuperando solo aquellos datos pertenecientes a los relaves dentro del área de estudio (Figura 31) presentes en las quebradas que drenan hacia el río Elqui, para definir así el I_{geo2} . Por lo tanto, se consideraron dos cálculos para este índice: ICS- I_{geo1} e ICS- I_{geo2} . La asociación de los ICS- $I_{geo1,2}$ a las referencias se presenta en la Tabla 40.

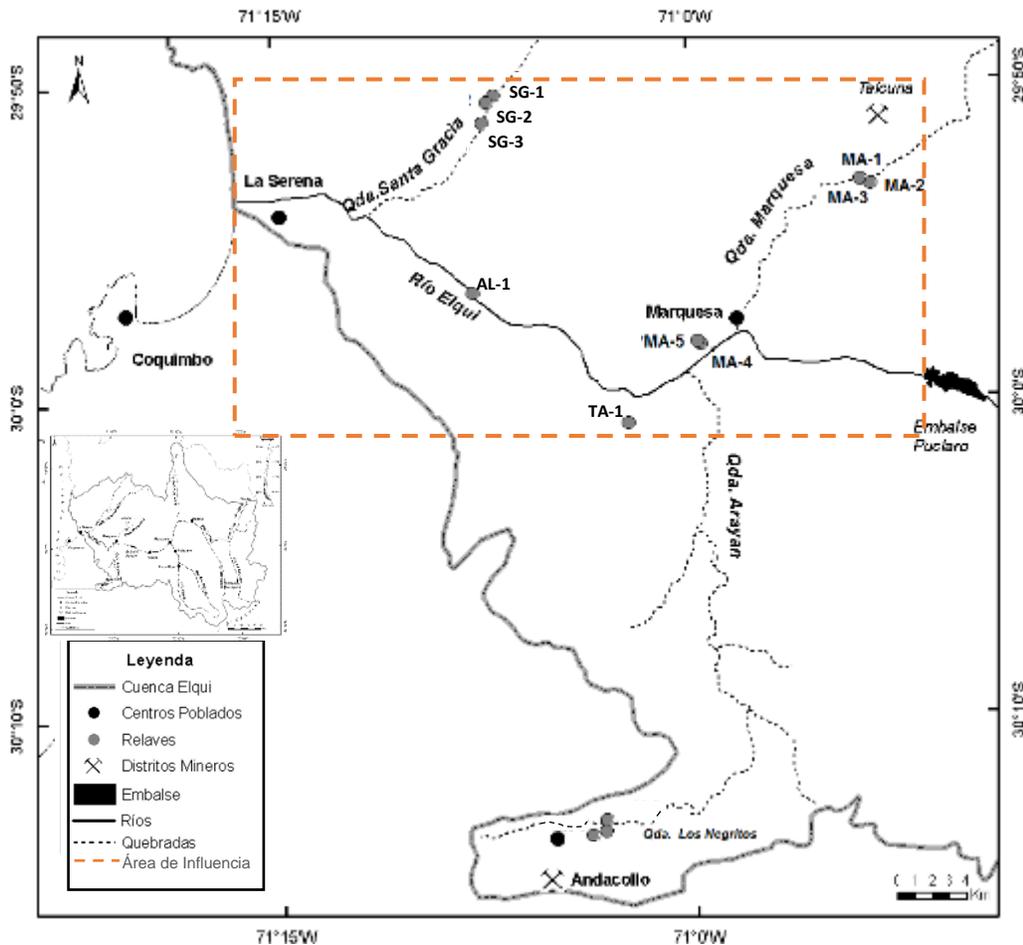


Figura 31. Ubicación de relaves en el área de estudio. Fuente: Modificado a partir de Castillo, 2009. MA: relaves en Quebrada Marquesa; TA: relaves en Quebrada de Talca; SG: Relaves en Quebrada Santa Gracia; AL: relave en sector Algarrobito.

Tabla 40. Referencias para ICS- $I_{geo1,2}$

Metal(oide)	Media (1979) – (2002) mg/kg	Bowen Sparks ppm	Media relaves ppm
Al	72000	-	-
As	7,7	-	79,2
B	100	-	-
Cd	0,17	-	-
Co	14	-	-
Cu	33	-	1924,5
Cr	72	-	-
Fe	41000	-	-
P	670	-	-
Mn	770	-	-
Mo	2	-	-
Hg	0,19	-	-
Ni	52	-	-
Ag	0,10	-	-
Pb	19	-	123,7
Se	0,42	-	-
Zn	95	-	380,3
I_{geo} asociado	I_{geo1}		I_{geo2}

Media relaves fuente: Promedio entre 10 relaves dentro del área de influencia del estudio, según Figura 31. Fuente promedios de relaves: Modificado a partir de Castillo (2009).

Resultados y Discusión

Listado de parámetros según las campañas de muestreo

En cuanto al listado de parámetros para estimar la calidad de agua y sedimentos del humedal del río Elqui, cabe señalar que se recomienda evaluar estacionalmente el listado de parámetros para ser finalmente optimizado y representativo. Esto debido a que, dentro de este estudio, por razones de plazo y el extenso periodo de sequía en la zona, no se presentan campañas en periodos de lluvias suficientes que generen una mayor erosión y lavado de los suelos. Esta condición es de mayor importancia sobre todo en zonas de influencias de relaves y otras de tipo agrícola, por lo tanto, su influencia puede estar subestimada. Por lo tanto, una correcta medición estacional podría permitir eliminar aquellos parámetros que presenten valores bajo el

LD (límite de detección) en todas las campañas y en todos sus puntos, a modo de reducir el número de parámetros, reducir costos y tiempos de análisis. Así también, se podría definir una mayor representatividad de ciertos elementos por estación, es decir, identificar si hay parámetros que puedan estar sobre el LD en las estaciones de mayor caudal, ya que, por ejemplo, a mayor caudal no solo podría haber mayor dilución de ciertos elementos sino también otros elementos podrían aumentar en su concentración en la columna de agua dado a la resuspensión de estos desde los sedimentos del río o laguna del humedal.

En este mismo sentido, a pesar de la cercanía temporal entre las dos campañas de muestreo, a inicios y finales del periodo estival, se identificó una variación temporal en los resultados de las concentraciones en especial para coliformes fecales, totales y nitratos, los cuales tendieron a estar bajo el LD (límite de detección) en la segunda campaña, lo cual podría ser un indicio de contaminación puntual o difusa no permanente, pero nuevamente se requiere mayor cantidad de datos para evaluar esta condición, bajo condiciones de caudales relativamente similares.

Por otra parte, dentro del set de parámetros preliminares, se define el grupo de cationes y aniones mayores en la columna de agua, los cuales son necesarios para el balance iónico por lo cual no son considerados en los cálculos de los indicadores de calidad de agua. En este mismo sentido, la materia orgánica en agua o sedimentos se evalúa principalmente por su afinidad de adsorber los metal(oide)s presentes en el medio y no considerados directamente en los indicadores.

La selección de los parámetros que finalmente forman parte de los indicadores de calidad de agua y sedimentos, responden a la disponibilidad de referencias de calidad y/o toxicología asociada al ecosistema acuático. En particular, para los indicadores de calidad de agua, estos se evaluaron con las normativas más restrictivas, denominada clase excepcional (presentes en la NSCA (2004) y normativa internacional actualizada, por lo tanto, la clasificación de calidad de agua está supeditada a dichas referencias. Es decir, ante cualquier cambio en la referencia a considerar, la clasificación puede cambiar. En cuanto a sedimentos fluviales, ya que no existe normativa que clasifique la calidad en Chile, se utilizaron normativas o referencias

internacionales (ver Tabla 39 y 40), y de igual forma, la clasificación está supeditada a dichas referencias.

Es necesario reiterar que cuando entre en vigencia la NSCA para el río Elqui, el criterio para evaluar los parámetros de calidad de agua en los indicadores deberá ser ajustado a ésta, utilizando el concepto excedencia (MMA, 2020b).

Indicador de calidad de agua

ICA-SNF_{1,2}

Como se observa en la Fig. 32, existe una notoria diferencia entre la aplicación de los indicadores, donde el ICA-SNF₁ presenta una calidad mala en todos los puntos mayormente en GEFE 12-13, mientras que el ICA-SNF₂ se ubica en la clasificación de calidad buena (GEFE01-06) a media en el punto GEFE12-13.

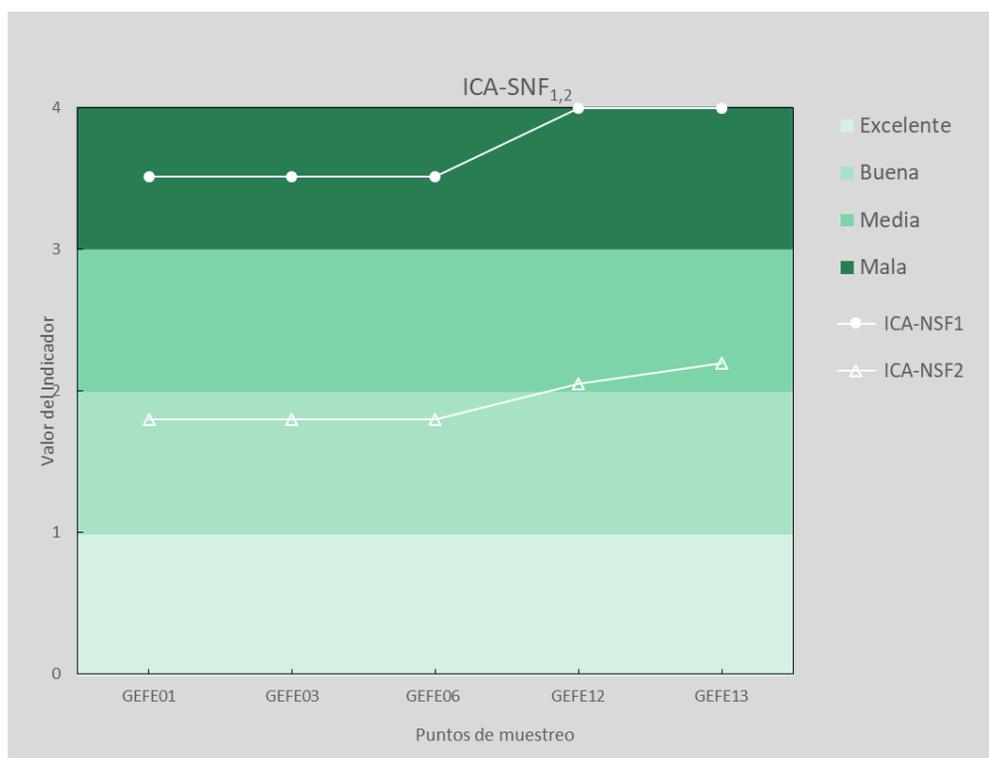


Figura 32. Resultados para ICA-SNF_{1,2}.

La diferencia entre indicadores se debe a la diferencia en la formulación, donde el primero (ICA-SNF₁, ver ecuación 11) da prioridad al indicador con peor calidad manteniendo su clasificación por grupo, mientras que en el segundo (ICA-SNF₂, ver ecuación 12) cada parámetro mantiene la clasificación de calidad y se elige la peor según campaña, por lo tanto, entrega un valor final “más diluido”. Este indicador puede presentar mayor utilidad al comparar variación estacional.

Para esta área de estudio, los parámetros críticos no suelen estar fuera de la norma de excepción (NSCA, 2004 y otras normativas) para el periodo evaluado. Los puntos con calidad inferior corresponden a GEFE12 y GEFE13. En cuanto a los parámetros con peor calidad se tiene:

Tabla 41. Revisión de parámetros y clasificación de calidad.

ICA-NSF _{1,2}	(4) > a < (3) Calidad
GEFE01	Al > CE, B, Cu, Mn, SO ₄ > pH, DQO, Ag
GEFE03	Al > CE, B, Cu, Zn, SO ₄ > pH, DQO, Ag
GEFE06	Al > CE, B, Cu, NO ₃ , SO ₄ > pH, DQO, Ag
GEFE12	CE, Al, Fe > DQO, B, Cu, Mg, SO₄ > Ag, Cd, CF
GEFE13	CE, DQO, Al, Mn > B, Cu, SO₄ > Ag, Zn, CF, CT

Fuente: elaboración propia, según resultados obtenidos en las campañas de muestreo. En negrita, los puntos con calidad inferior corresponden a GEFE12 y GEFE13).

De acuerdo con la tabla anterior, las peores calidades recaen en los parámetros generales fisicoquímicos y complementarios no críticos. Sin embargo, se requiere más información (campañas estacionales) para evaluar el aluminio (Al), que como se observó en los resultados, es el elemento que se encuentra con la peor calidad (con respecto a la clase excepcional) y en todos los puntos para los ICA-CCME_{1,2}

El indicador ICA-CCME_{1,2}) es bueno pero sensible ya que presenta resultados extremos, por lo que requiere mayor cantidad de datos para calibrar por estación y por periodos “normales” y de sequía. Por lo tanto, bajo esta condición sería apto utilizar la segunda versión (ICA-SNF₂) propuesta en el presente trabajo.

La Fig. 20 muestra los resultados para el indicador (ICA-CCME_{1,2}). Como se puede observar en la Fig. 32, no hay mayor diferencia entre estas dos versiones (ICA-CCME_{1,2}) ya que los parámetros críticos (arsénico, cadmio, cromo IV, cobalto, níquel y plomo) están mayormente bajo las referencias respectivas con la excepción del cadmio en el punto GEFE13. Esta diferencia sería más notoria al tener concentraciones fuera de la normativa para dichos parámetros críticos, los cuales afectarían el cálculo del Factor 2 (Fig.33, ver ecuación 14) parte de la modificación CCME₂.

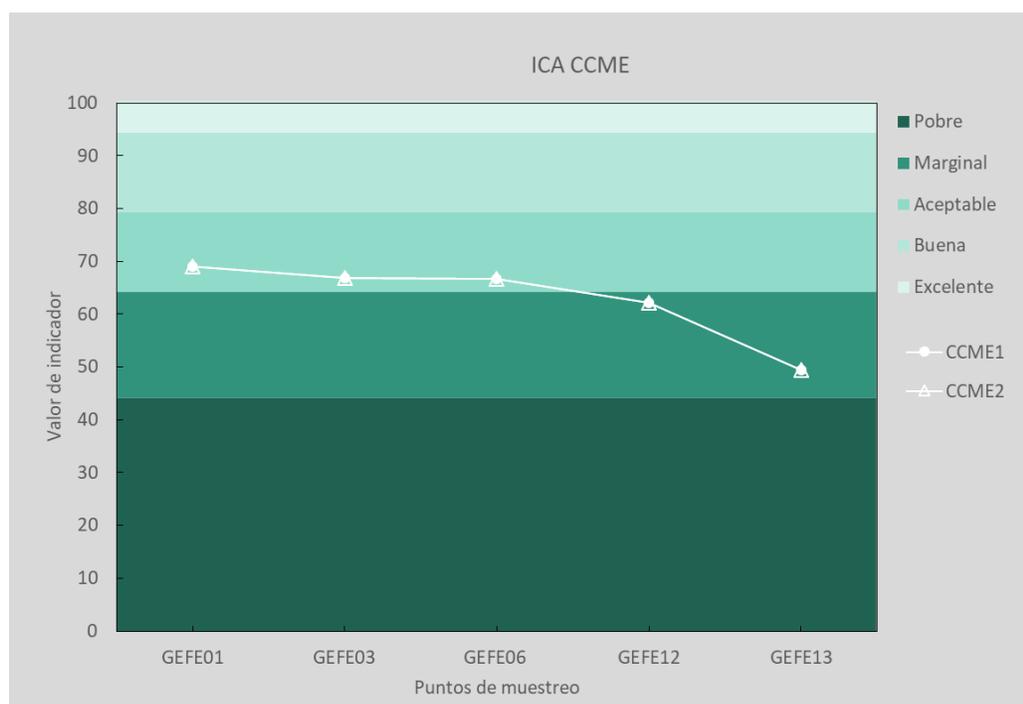


Figura 33. Resultados para ICA-CCME_{1,2}.

La calidad de agua se encuentra en el rango aceptable en los puntos el Almendral (GEFE01), Película (GEFE03) y Altovalsol (GEFE06). Mientras que se observa un deterioro en dirección hacia el humedal reportando una calidad marginal para GEFE12, y finalmente, el punto en el aliviadero de tormenta (GEFE13) presenta la peor calidad, aún dentro del rango marginal pero cercano a la calidad pobre.

Con respecto al indicador anterior (ICA-SNF_{1,2} que presenta resultados más extremos), el CCME_{1,2} parece ser más representativo, con valores entre lo aceptable y marginal, sin embargo,

como se mencionó anteriormente, se requiere mayor cantidad de campañas estacionales para verificar la calibración.

Indicadores de Calidad de sedimentos

IE_{1,2,3}

En la figura a continuación se presenta el IE₂ que se evaluó con respecto a la referencia *LEL* (*Lowest effect Level*), el cual define el nivel de contaminación que puede ser tolerado por la mayoría de los organismos bentónicos. Este indicador presenta una tendencia decreciente en dirección del flujo de agua (desde GEFE01 a GEFE12) hasta llegar al punto GEFE13 (desembocadura) donde la calidad vuelve a empeorar, con la excepción del arsénico (As) y manganeso (Mn) que mantienen la tendencia decreciente.

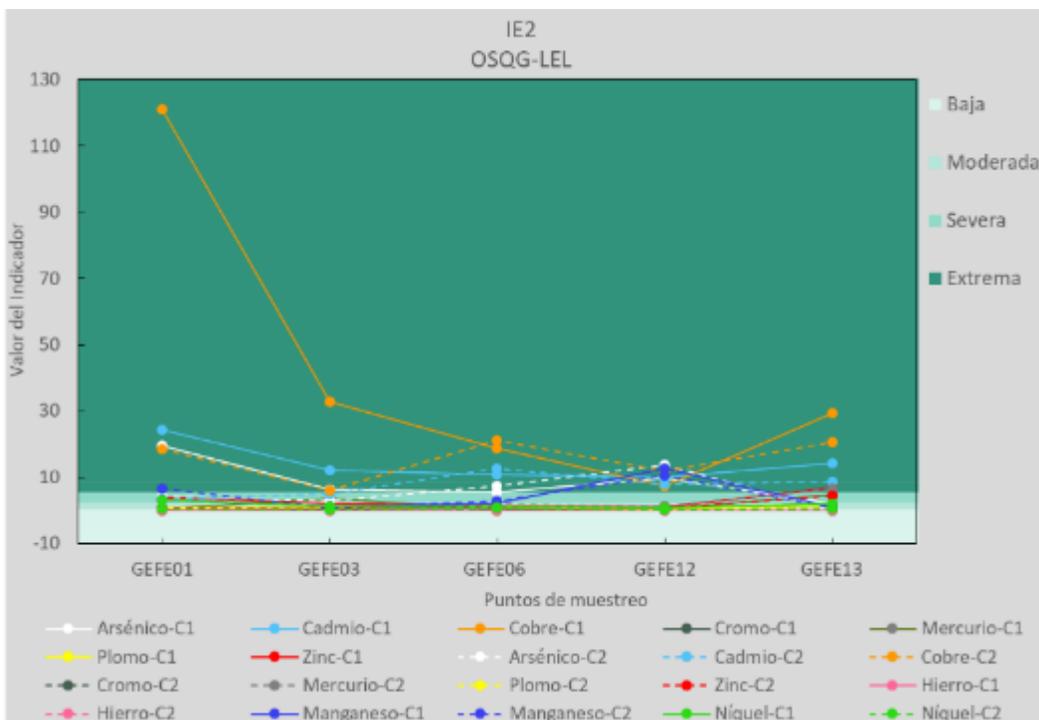


Figura 34. Resultados para IE₂.

En la figura anterior se puede apreciar que el cobre (Cu), cadmio (Cd) y arsénico (As) son los elementos que presentan mayor fluctuación entre la contaminación severa a extrema. El resto de los metal(oide)s se comportan de manera más estable en todos los puntos de monitoreo,

entre contaminación baja a moderada, con tendencias al aumento en el punto GEFE 13 (zinc (Zn) bordea la categoría severa en GEFE13).

Con respecto al IE_1 (Fig. 35), este se evalúa con respecto al nivel umbral o *TEL: Threshold Effect Level*, el cual señala el umbral en el cual se comienzan a observar respuestas tóxicas en los organismos bentónicos. Este indicador presenta un comportamiento similar al anterior, ya que los valores entre ambas referencias para elementos tóxicos, LEL y TEL, no varían demasiado (ver Tabla 33). Globalmente, se observa una tendencia decreciente (GEFE01 a GEFE12) hasta llegar al punto GEFE13 donde la calidad vuelve a empeorar, con la excepción del As y Mn que mantienen la tendencia decreciente.

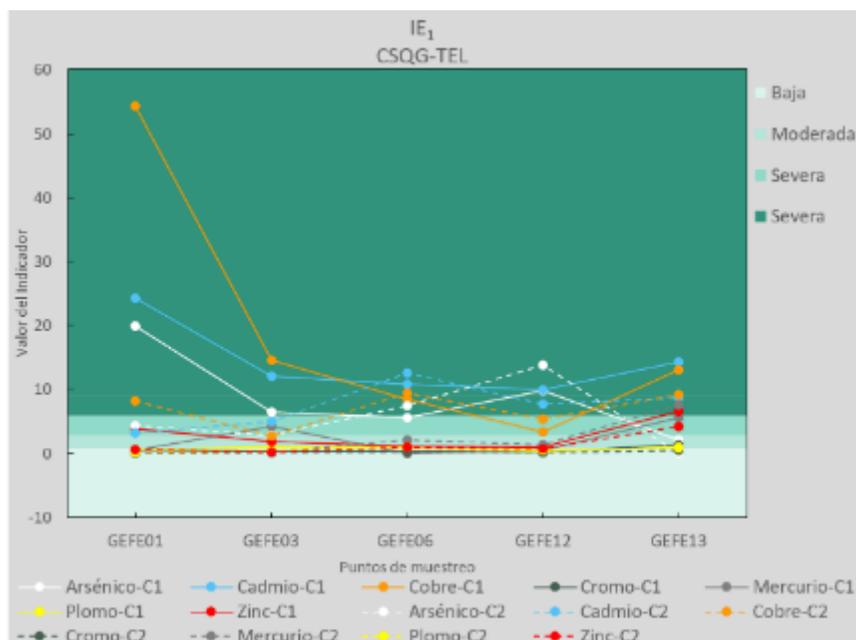


Figura 35. Resultados para IE_1 .

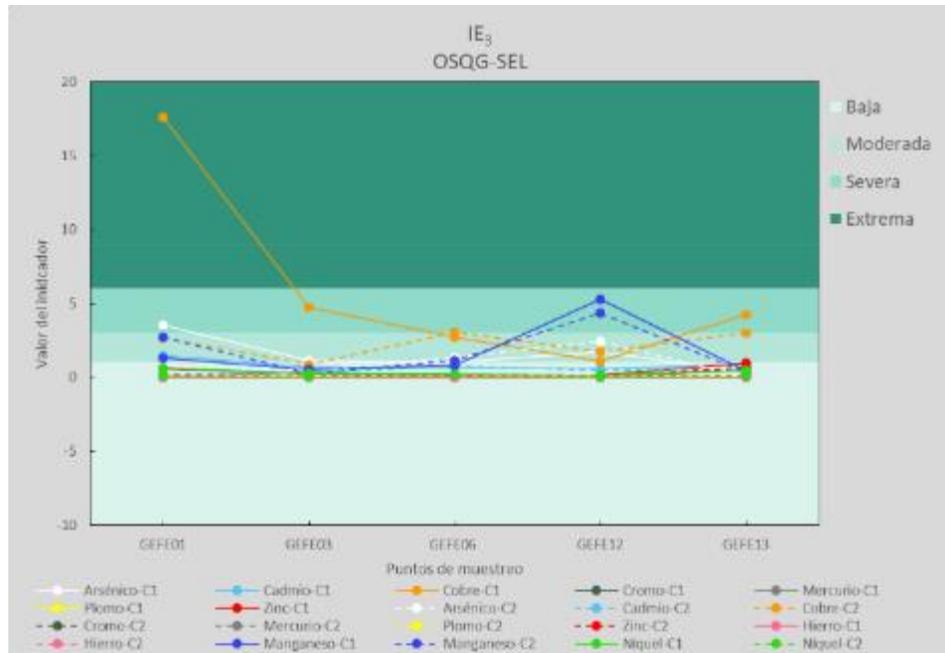


Figura 36. Resultados para IE3.

En relación con el IE₃ (ver Figura 36), se presenta la evaluación del nivel de efecto severo (SEL, *Severe Effect Level*), donde el nivel de contaminación que se espera es perjudicial para la mayoría de los organismos que habitan en los sedimentos.

Como se observa en la Figura 36, se presentan tendencias similares a los IE_{1,2}, con la esperada reducción en las categorías. El cobre (Cu) se mantiene en contaminación extrema en el punto GEFE01, severa y moderada en las zonas central (GEFE03-GEFE06-GEFE12) y final del área estudiada (GEFE13). Mientras que el arsénico, cadmio y manganeso varían en la calidad severa a moderada. Finalmente, los elementos plomo (Pb), cromo (Cr), hierro (Fe), zinc (Zn) y mercurio (Hg) se mantienen en la categoría de contaminación baja.

I_{geo1}

El índice de geoacumulación, I_{geo1}, compara con la media mundial en sedimentos fluviales (Bowen 1979, Sparks 2002). Se observa que, generalmente, las concentraciones son mayores en la primera campaña, identificándose que, a pesar del breve periodo entre ambas, existe una variabilidad temporal. Sin embargo, no es posible establecer si la diferencia entre campañas es significativamente dado que no hay suficientes datos para ser evaluados estadísticamente.

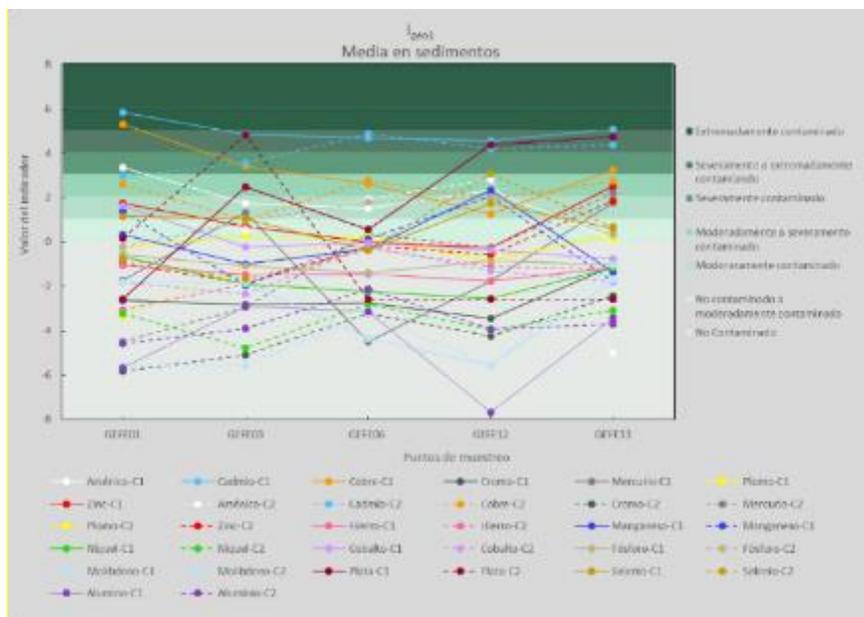


Figura 37. Resultados para Igeo1.

Como se observa en la Figura 37, las tendencias son principalmente decrecientes aguas abajo (GEFE01 a GEFE12), con *peaks* en el punto GEFE13 con excepción del arsénico (As), manganeso (Mn) y selenio (Se). Las principales tendencias según elemento son las siguientes:

- No contaminado a moderadamente: aluminio (Al), hierro (Fe), plomo (Pb), níquel (Ni), molibdeno (Mo), plata (Ag), zinc (Zn)²
- Moderado a severo: selenio (Se), cadmio (Cd)², arsénico (As), cobre (Cu)², plata (Ag)²
- Severo a extremadamente: cobre (Cu), cadmio (Cd), plomo (Ag)²

Igeo2

En la figura a continuación se presentan los resultados para índice de geoacumulación Igeo2 el cual evalúa el grado de contaminación con respecto a las concentraciones disponibles de metal(oides) en relaves dentro de la zona de influencia. La disponibilidad de los datos de relaves incluyó arsénico (As), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn), mientras que para el molibdeno (Mo), antimonio (Sb), cadmio (Cd), mercurio (Hg) se encontraron mayormente bajo el LD).

² Aquellos elementos que presentan fluctuaciones y se encuentran en más de una categoría, mostrando un comportamiento más reactivo.

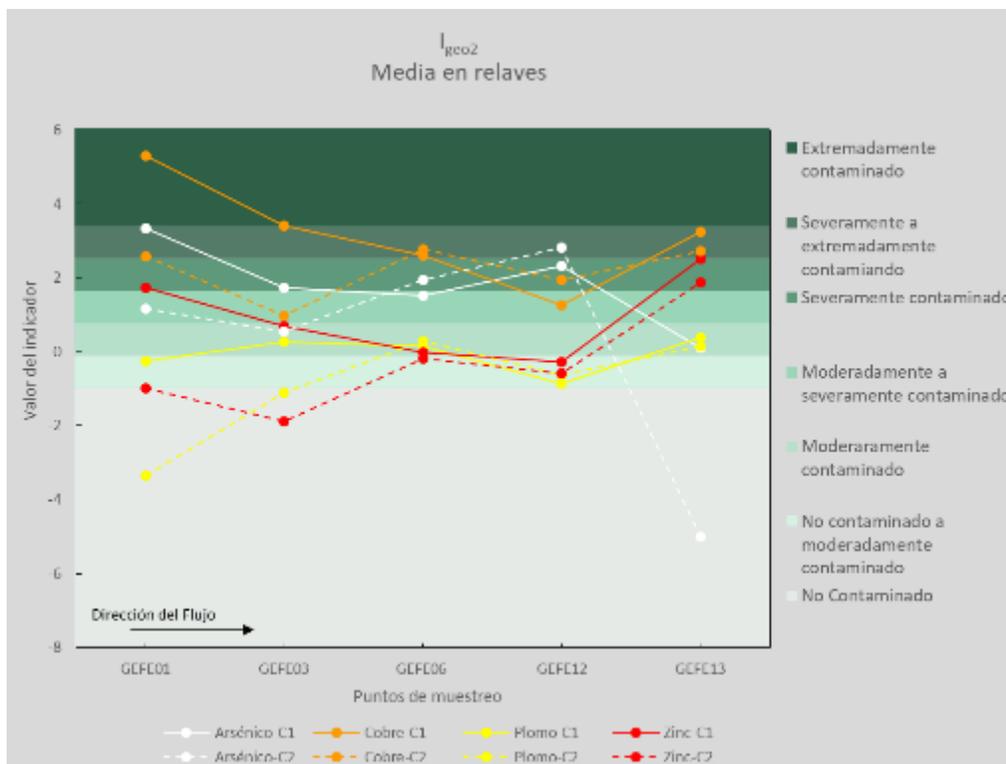


Figura 38. Resultados para I_{geo2}

Como se observa en la figura 38, el cobre (Cu) se encuentra dentro de las mayores clasificaciones de contaminación. En general el cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) se comportan con una tendencia decreciente similar hacia aguas abajo (GEFE01 a GEFE12), con *peaks en* GEFE13 a excepción del arsénico (As).

El punto en el Almendral GEFE01 presenta resultados de mayor contaminación, sin embargo, este punto se encuentra fuera del alcance directo de las quebradas secas donde se ubican los relaves, por lo cual, las altas concentraciones de estos metales(oide)s responden a una combinación de otras fuentes naturales como antrópicas, para el periodo evaluado. Una combinación de fuentes por actividades antrópicas como la minería, y naturales como el arrastre en épocas de crecidas. Esto es importante destacar ya que normalmente se atribuye este tipo de registros únicamente a causas antrópicas por actividades productivas.

Cabe señalar que los valores de indicadores más bajos en I_{geo2} con respecto al I_{geo1} e IE, no necesariamente significan que la contaminación por la influencia de los relaves es baja, ya que es otra escala, y las referencias para I_{geo2} son valores mucho más altos para los elementos

evaluados en común (As, Zn, Pb, Cu). En necesario notar que los relaves se ubican en las quebradas secas (Santa Gracia, Talca, Marquesa, Marquesa), las cuales en este periodo de sequía no presentan erosión fluvial, por lo tanto, la influencia durante el periodo evaluado es despreciable, sin embargo, la acumulación de este tipo de contaminantes puede ser histórica.

Conclusiones y recomendaciones

Calidad de Agua

- Existe una variabilidad temporal y espacial (sin evaluación estadística por falta de puntos suficientes) para los indicadores de agua y sedimentos entre una campaña y otra, a pesar de la poca diferencia de tiempo entre cada una. En cuanto a agua, la diferencia es más notoria en coliformes fecales (CF), y coliformes totales (CT) nitratos, mayormente en los puntos GEFE 12-13.
- Es necesario reiterar, que cuando entre en vigencia la NSCA para el río Elqui, el criterio para evaluar los parámetros en los indicadores deberá ser ajustado a ésta. Es decir, se recomienda usar el concepto excedencia, según los Antecedentes Anteproyecto NSCA Cuenca Río Elqui.
- De manera individual, las peores calidades en los parámetros monitoreados recaen en parámetros fisicoquímicos (CE, pH y DQO), entre otros, de tipo complementarios no críticos donde predominan el aluminio (Al), cobre (Cu), boro (B) y sulfato (SO₄). En particular, el aluminio (Al) presenta las peores clasificaciones de calidad según la NSCA (2004). Esto se debe a que en general el aluminio (Al) en los puntos monitoreados varía entre 0,02 a 1,6 mg/L, y la clase excepcional en la NSCA (2004) tiene un límite de 0,07 mg/L. Sin embargo, este elemento no es tóxico, y en vista de que la norma de riego (NCh1333) tiene un límite de 5 mg/L y la NCh 409/2005 no presenta el aluminio (Al) como parámetro de control, este parámetro no debiese generar mayor problema. El aluminio (Al) puede estar de manera natural en las cuencas (Oyarzun *et al.* 2021), favorecido por fuentes puntuales asociadas al tratamiento de agua potable y/o residual.

- Se recomienda seguir evaluando los indicadores propuestos, los cuales deben ser puestos a prueba con datos estacionales y en periodos de sequía como en periodos normales.

Sedimentos

- Existe una tendencia espacial inversa entre concentraciones de metal(oide)s en agua y sedimento, es decir, es posible que del agua estén sedimentando los elementos enriqueciendo los sedimentos. Así, por ejemplo, el arsénico (As), cadmio (Cd) y plata (Ag) presentan concentraciones considerables en sedimentos, pero se encuentran bajo o cercanos al límite de detección en el agua. Sin embargo, con la información disponible no se puede evidenciar si la presencia en sedimentos es reciente o histórica.
- Los valores altos de concentraciones de metal(oide)s corresponden a concentraciones totales, por lo tanto, no implica directamente una alta biodisponibilidad. Esta depende de la especiación química, pH, condición redox, afinidad, presencia y granulometría de otros constituyentes en suspensión en la columna de agua o bien en los sedimentos, los cuales sirven de superficie adsorbente, entre otros factores. Entre las superficies adsorbentes encontramos las arcillas, materia orgánica y minerales secundarios (óxidos hidratados de aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn)).
- Bajo las condiciones ambientales y geoquímicas de la cuenca del río Elqui, los elementos estudiados debiesen presentar una mayor afinidad con la materia orgánica (presentes en el área de estudio, según los resultados de ambas campañas de monitoreo) y/o con minerales secundarios (como óxidos hidratados de aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn)), los cuales tienden a retener los metal(oide)s bajo pH neutros-básicos y en condiciones oxidantes, por lo tanto, la biodisponibilidad es baja. Contrariamente, ante un medio de condiciones reductoras en sedimentos, sí se podrían dar las condiciones para que los metal(oide)s puedan presentar un estado de biodisponibilidad mayor.
- En consecuencia, se recomienda profundizar el estudio de sedimentos para el punto GEFE 13 frente el by-pass en la desembocadura misma del Humedal Costerio Río Elqui. En este punto se localiza el by-pass de la Empresa Aguas del Valle. A pesar de ser una

estructura de uso de emergencia, se aprecia salida de agua con materia orgánica, en pequeño volumen, pero suficientes para una alta acumulación de materia orgánica en el agua y sedimento en este punto del humedal, con el consiguiente deterioro del humedal. Asegurar y sellar el by-pass para evitar toda salida de agua sin duda significará una mejora en la calidad de las agua y sedimentos de la desembocadura del río Elqui.

Actividad q) Mapeo cartográfico de calidad de agua del humedal según índices aplicados anteriormente en los puntos l) y p).

Se incorporaron los resultados de los índices y parámetros de calidad medidos en una base de datos georreferenciada y manejados en SIG, y de esta forma se generaron productos cartográficos que permitieron visualizar la distribución espacial de la calidad en las subcuencas consideradas. La base cartográfica utilizada para la confección de estos mapas fue ajustada al Datum World Geodetic System 1984 (WGS 1984), proyección Universal Transversal Mercator (UTM), huso 19 sur.

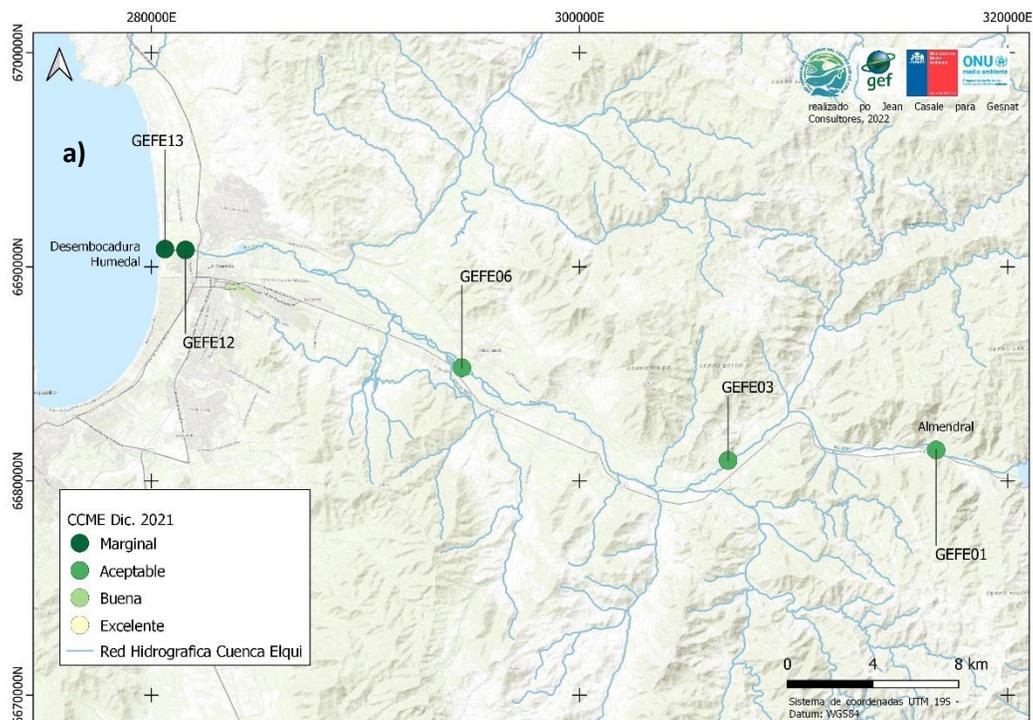


Figura 39. Índice de calidad de agua correspondientes a los indicadores CCME_{1,2}. a) CCME_{1,2} campaña diciembre 2021, b) CCME_{1,2} campaña marzo 2022. Fuente: Elaboración propia.

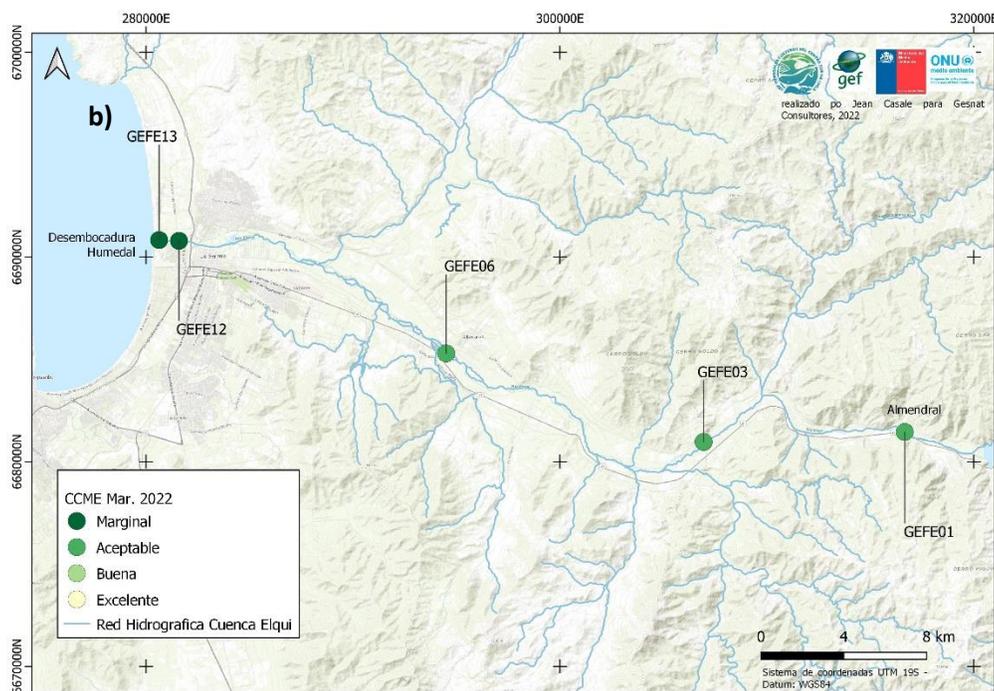


Figura 40. Índice de calidad de agua correspondientes a los indicadores SNF_{1,2}. a) SNF₁ campaña diciembre 2021, b) SNF₂ icampaña marzo 2022. Fuente: Elaboración propia.

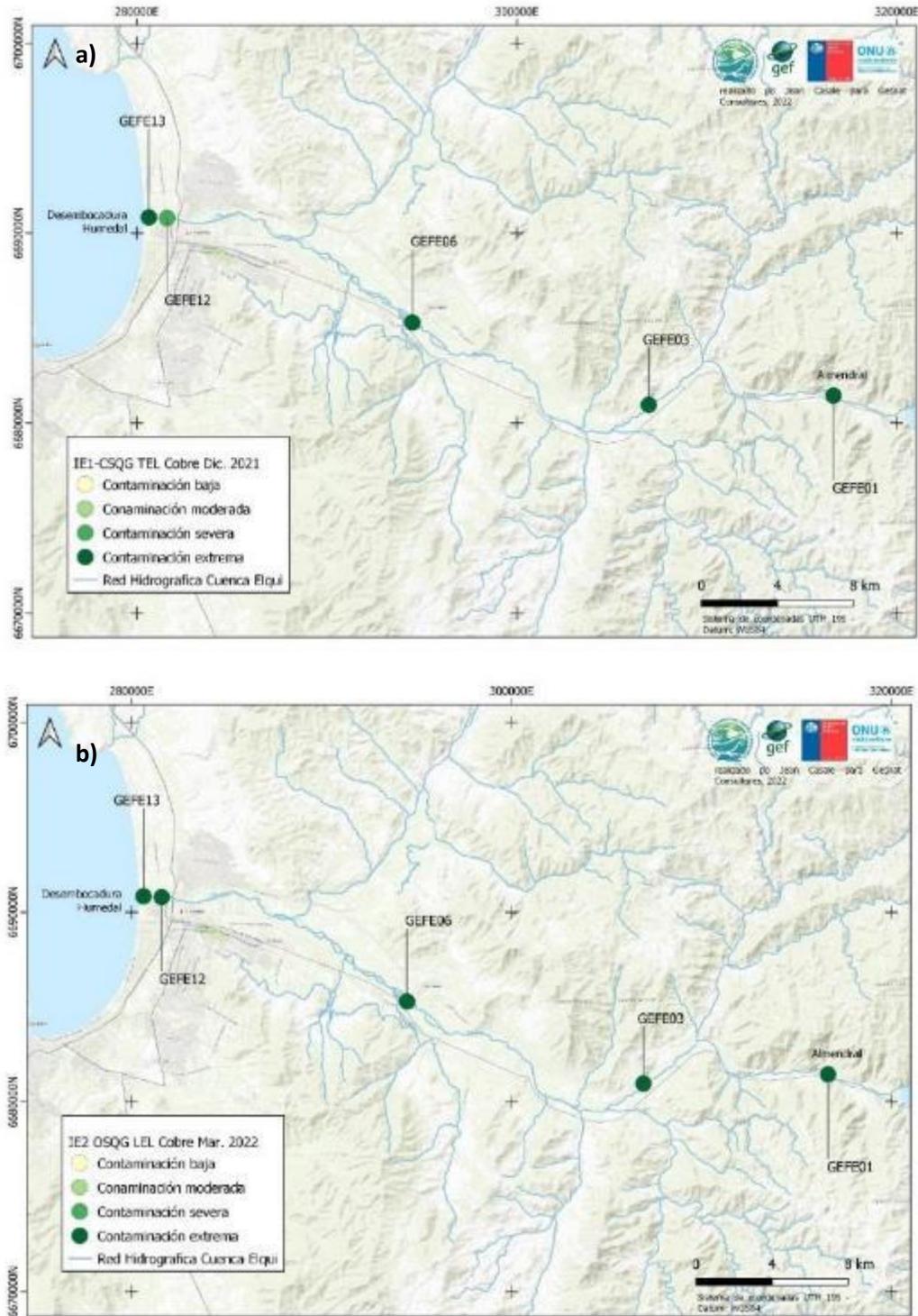


Figura 41. Índice de calidad de sedimentos. a) IE₂-SEL para Cu, campaña diciembre 2021; b) IE₂-SEL para Cu, campaña marzo 2022. Fuente: Elaboración propia.

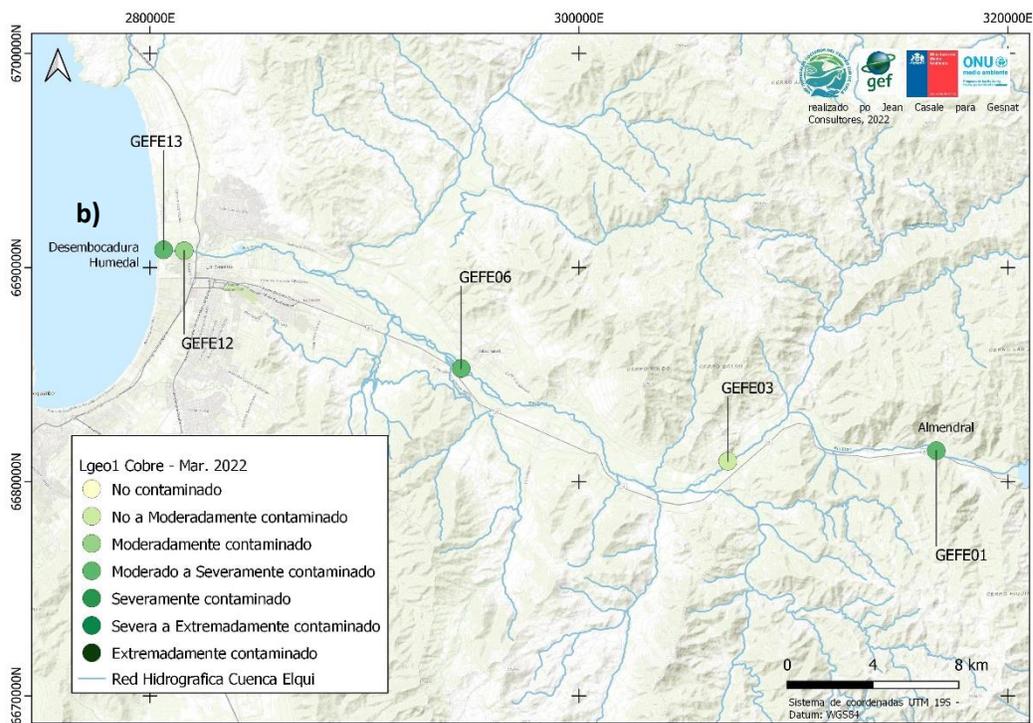
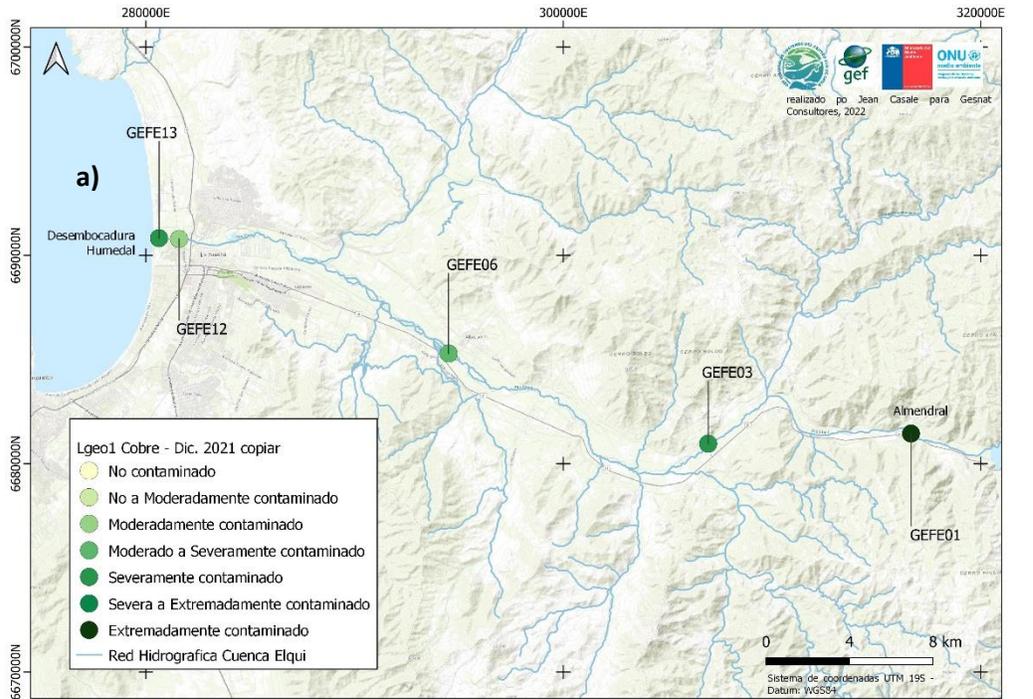


Figura 42. Índice de calidad de sedimentos. a) I_{geo1} para Cu, campaña diciembre 2021; b) I_{geo1} para Cu, campaña marzo 2022. Fuente: Elaboración propia.

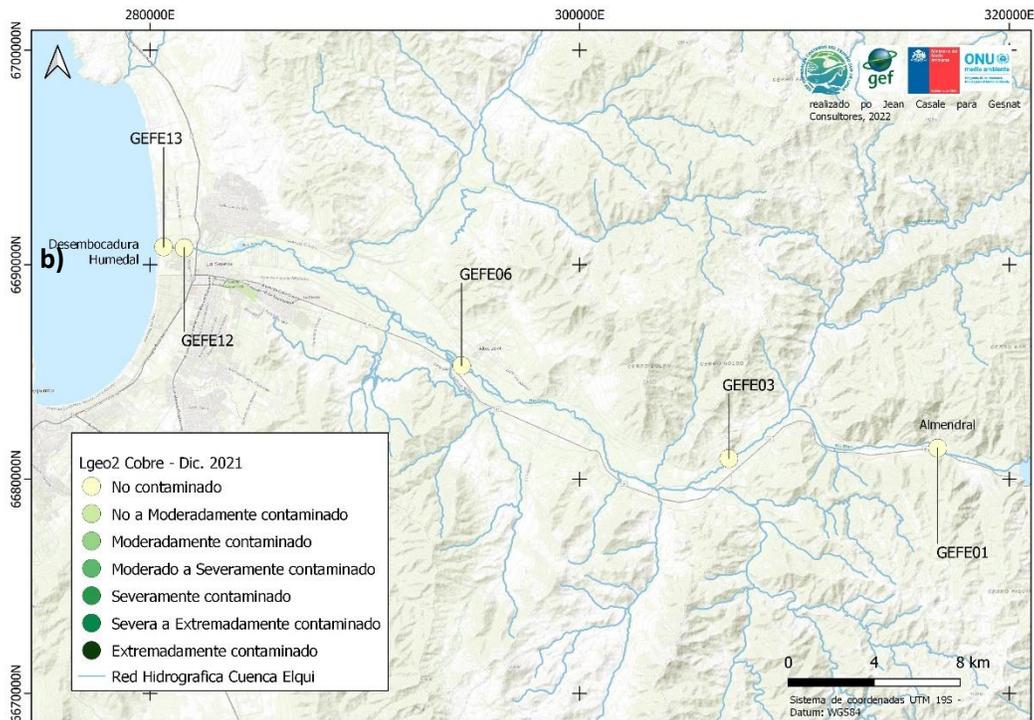
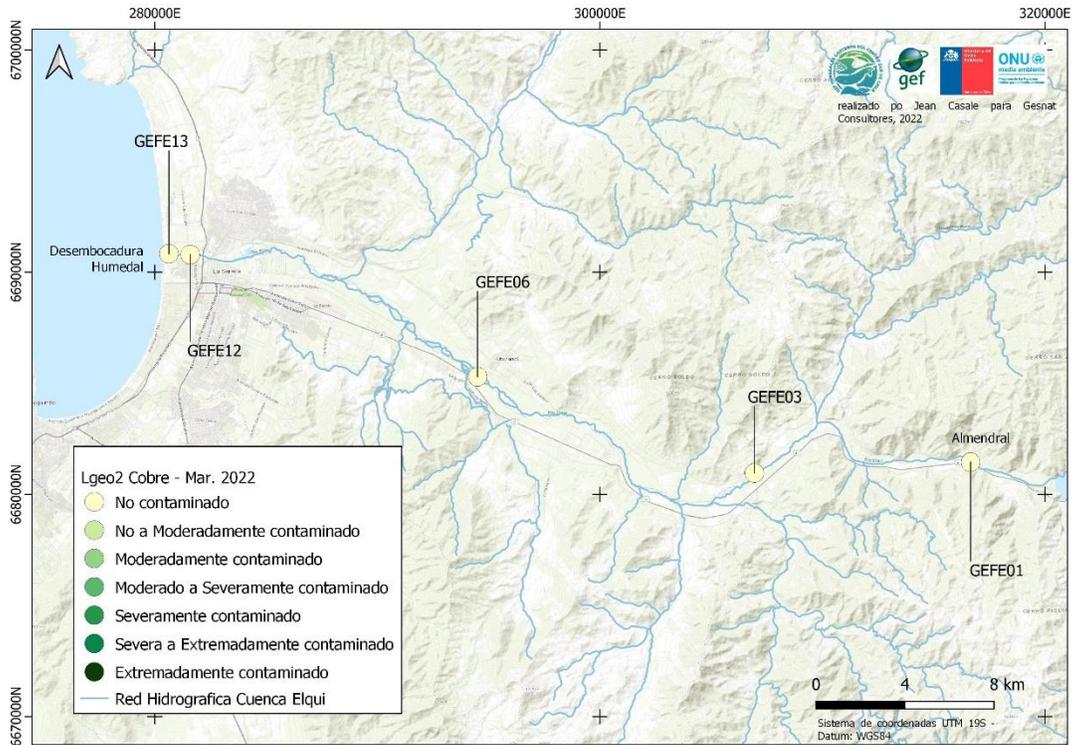


Figura 43. Índice de calidad de sedimentos. a) I_{geo2} para Cu, campaña diciembre 2021; b) I_{geo2} para Cu, campaña marzo 2022. Fuente: Elaboración propia.

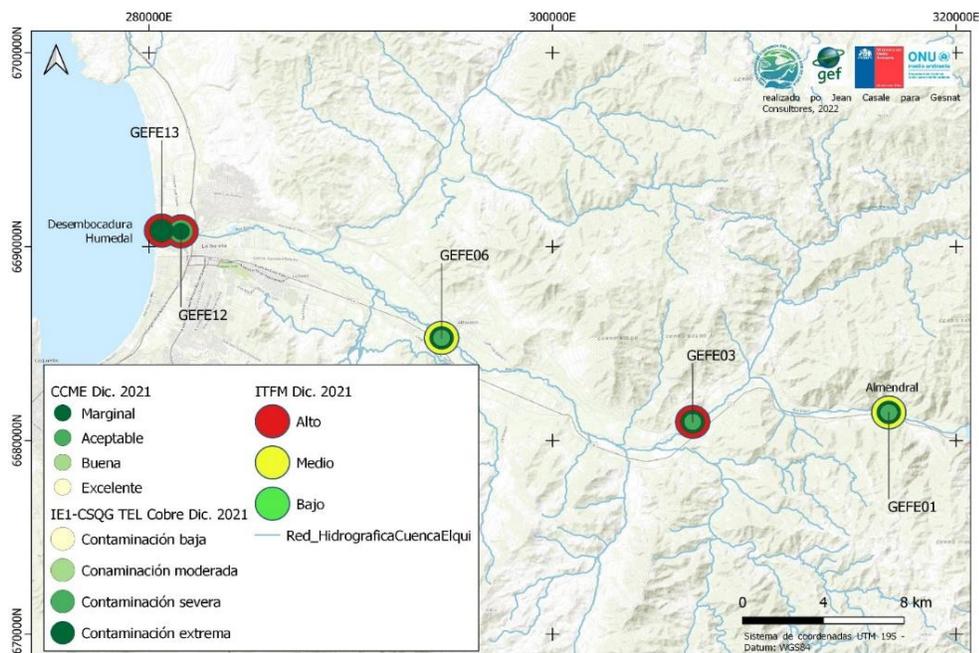


Figura 44. Índices combinados para campaña diciembre 2021. Desde el interior hacia el exterior: índice de enriquecimiento para sedimentos IE₁ CSQG TEL cobre, indicador de calidad para agua CCME₂, índice de macrófitos ITFM. Fuente. Elaboración propia.

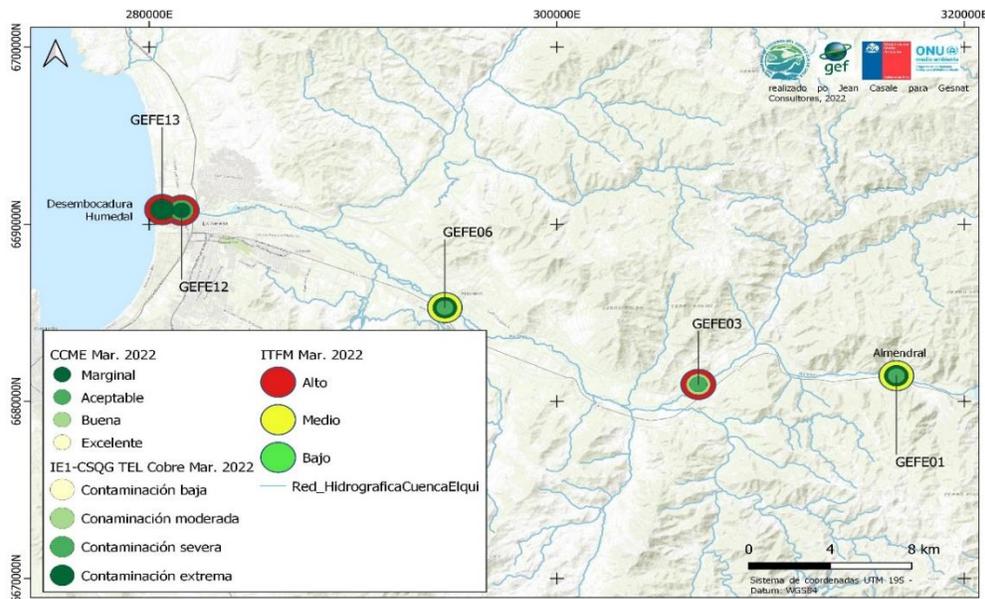


Figura 45. Índices combinados para campaña marzo 2022. Desde el interior hacia el exterior: índice de enriquecimiento para sedimentos IE₁ CSQG TEL cobre, indicador de calidad para agua CCME₂, índice de macrófitos ITFM. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras anteriores se observa que la peor calidad de agua (marginal, indicador CCME2) coincide con la peor calidad en sedimentos con el índice de enriquecimiento categorizado como contaminación extrema para el nivel TEL en cobre (IE2). De igual manera se observa la concordancia con el indicador trófico, el cual varía entre medio a alto en sus niveles a lo largo de la cuenca, donde también coincide el nivel alto con las peores calidades de agua y sedimentos para el último punto GEFE13.

4.3 OE3. Proponer estrategias y acciones para la restauración del HCRE

Actividad t) Elaborar propuesta de medidas de restauración para el HCRE y u) Estimación de costos de implementación de las medidas propuestas.

Tabla describe la propuesta del Plan de Restauración del HCRE, en cada uno de los 13 puntos afectados por contaminación puntual y difusa. Las medidas de restauración son de tipo general, y algunas son dedicadas específicamente a la restauración de las condiciones naturales del HCRE afectado por estas fuentes de emisión.

Se considera el costeo de las actividades propuestas. Un plan de restauración del HCRE en aquellos aspectos relativos a la contaminación puntual y difusa. El plan tiene un valor de UF 24.810.-, desglosado en los 13 puntos de muestreo. Los costos de restauración aumentan hacia la desembocadura del HCRE por la mayor intensidad de las presiones antrópicas, y fuentes de contaminación que deben ser revertidas. El Plan que se presenta solo considera las actividades puntuales de restauración. No contempla el monitoreo de cada punto para efectos de determinar los resultados de las actividades de restauración ejecutadas. Lo anterior, debido a no replicar el programa de monitoreo diseñado para el HCRE.

Tabla 42. Plan de restauración propuesto para los 13 sitios del Plan de Monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

ID_SITIO	Sitio	Justificación	Objeto de restauración	Actividades propuestas	Naturaleza de la Actividad	Plazo	Costo UF (aprox.)
GEFE01	Río Elqui en Almendral	Sitio referencia sistema lótico. Vegetación ribereña bien desarrollada que actúa como buffer	Regularizar ribera	Retirar basura	Activa/Pasiva	Mediano Plazo	100
			Recuperar vegetación natural	Extraer/remover especies invasoras			150
GEFE02	Río Elqui aguas abajo Quebrada de Marquesa	Aportes de la quebrada de Marquesa, fuentes difusas, pasivos mineros y agricultura	Regularizar ribera	Retirar basura y fuentes contaminantes	Activa/Pasiva	Mediano Plazo	150
				Regularizar manualmente ribera			200
			Recuperar vegetación natural	Extraer/remover especies invasoras			150
			Mejorar conectividad natural	Reforestar con especies ribereñas nativas			200
GEFE03	Río Elqui en puente Pelicana	Fuentes difusas de pasivos mineros, relaves	Regularizar ribera	Retirar basura y fuentes contaminantes	Activa/Pasiva	Mediano Plazo	180
				Regularizar manualmente ribera			250
			Recuperar vegetación natural	Extraer/remover especies invasoras			150
			Mejorar conectividad natural	Reforestar con especies ribereñas nativas			220
GEFE04	Río Elqui aguas abajo Quebrada de Talca	Fuente difusa pasivos mineros de Qda de Talca (relaves) y agricultura (2 canales de regadío vierten el río; morfología natural modificada)	Regularizar ribera	Retirar basura y fuentes contaminantes. Ribera esta canalizada, se debe volver a condición lo mas cercana a la condición natural	Activa	Mediano Plazo	1000
				Regularizar manualmente ribera			300

			Recuperar vegetación natural	Extraer/remover especies invasoras			200
			Mejorar conectividad natural	Reforestar con especies ribereñas nativas			250
GEFE05	Río Elqui en puentes Las Rojas	Fuentes difusas pasivos mineros (relaves) y agricultura	Regularizar ribera	Retirar basura y fuentes contaminantes	Activa	Mediano Plazo	180
				Regularizar manualmente ribera			200
			Recuperar vegetación natural	Extraer/remover especies invasoras			150
			Recuperar flujo de agua superficial	Reforestar con especies ribereñas nativas			220
GEF06	Río Elqui Puente Altovalsol	Fuente difusa por pasivos mineros (relaves), y extracción de áridos.	Regularizar ribera	Retirar basura y controlar puntos de extracción de áridos	Activa	Corto Plazo	1000
				Regularizar manualmente ribera			300
			Recuperar vegetación natural	Recuperar/extraer especies invasoras			220
			Recuperar flujo de agua superficial	Reforestar con especies ribereñas nativas			250
GEF07	Río Elqui en Puente Algarrobito	Fuente difusa por pasivos mineros (relaves), extracción de áridos y PTAS.	Regularizar ribera	Retirar basura y controlar puntos de extracción de áridos	Activa	Corto Plazo	600
				Regularizar manualmente ribera			300
			Recuperar vegetación natural	Recuperar/extraer especies invasoras			200
			Recuperar flujo de agua superficial	Reforestar con especies ribereñas nativas			250
GEF08	Río Elqui aguas abajo Punto de tratamiento de aguas servidas Algarrobito	Aguas abajo impacto por PTAS	Regularizar ribera	Retirar basura y controlar puntos de extracción de áridos	Activa	Corto Plazo	1000
				Regularizar manualmente ribera			300
			Recuperar vegetación natural	Recuperar/extraer especies invasoras			220
			Construir humedales artificiales	Probar la idea de humedales artificiales de decantación, filtración ante la PTAS			3000

			Recuperar flujo de agua superficial	Reforestar con especies ribereñas nativas			250
GEFE09	Río Elqui ante Pozo Alfalfares	Fuente difusa por extracción de áridos y modificación de cauce	Regularizar ribera	Retirar basuras y controlar puntos de extracción de áridos	Activa/Pasiva	Corto Plazo	1000
				Regularizar manualmente ribera			300
			Recuperar vegetación natural	Colocar geotextiles para atrapar sedimentos			400
				Extraer/remover especies invasoras			220
			Recuperar flujo de agua superficial	Forestar manualmente con especies nativas buscando recuperar conexiones			350
GEFE10	Río Elqui en Puente Zorrilla	Fuente difusa por extracción de áridos, modificación de cauce, basurales, urbanización de riberas	Regularizar ribera	Retirar basuras y controlar puntos de extracción de áridos	Activa/Pasiva	Corto Plazo	1000
				Regularizar manualmente ribera			400
			Recuperar vegetación natural	Colocar geotextiles para atrapar sedimentos			400
				Extraer/remover especies invasoras			250
			Recuperar flujo de agua superficial	Forestar manualmente con especies nativas buscando recuperar conexiones			350
GEFE11	Río Elqui en puente fiscal	Estación monitoreo DGA, urbanización, basurales	Regularizar ribera	Retirar basuras y controlar puntos de extracción de áridos	Activa	Corto Plazo	1000
				Regularizar manualmente ribera			400
			Recuperar vegetación natural	Forestar manualmente con especies nativas buscando recuperar conexiones			350
			Mejorar conectividad natural	Reforestar con especies ribereñas nativas			200
GEFE12	Río Elqui aguas arriba laguna costera	Último punto de sistema lótico, contaminación difusa por basurales, agricultura, amenaza de urbanización	Regularizar ribera	Retirar basuras y fuentes contaminantes	Activa	Corto Plazo	300
				Regularizar manualmente ribera			300
			Recuperar vegetación natural	Forestar manualmente con especies nativas buscando recuperar conexiones			350
			Mejorar conectividad natural	Reforestar con especies ribereñas nativas			200



GEFE13	Humedal en desembocadura	Fuente puntual por descarga de emergencia de aguas servidas	Regularizar ribera	Retirar basuras y fuentes contaminantes como el by pass de Aguas del Valle	Activa	Corto Plazo	3000
				Regularizar manualmente ribera			300
			Recuperar vegetación natural	Extraer/remover especies invasoras como la totora de forma manual			1000
			Mejorar conectividad natural	Reforestar con especies ribereñas nativas			350
			Mejorar calidad del sedimento	Aireación por movimiento de sedimento			250
VALOR							
UF							24.810

Actividad g) y v) Análisis e identificación de brechas de información.

El análisis de brecha para este proyecto refleja la carencia de información estandarizada y de largo plazo, lo que es fundamental para el diseño e implementación de las mejores medidas de restauración, monitoreo, y conservación en general del HCRE.

En resumen, las brechas de información identificadas para este proceso de restauración ecológicas fueron sistematizadas y se pueden agrupar en los siguientes aspectos clave: a) Ingeniería, que permitirá determinar el balance y dinámica de flujos en el río Elqui; b) Paisaje, que permitirá conocer la dinámica ecológica de los sectores a restaurar (espacio/tiempo) poniendo a los tomadores de decisiones en la capacidad de establecer el punto al que se quiere restaurar con indicadores de filtro grueso; c) Biodiversidad, que permitirá tener los indicadores de filtro fino para realizar el monitoreo del éxito de las medidas adoptadas; d) Gestión/Gobernanza, que permitirá conocer el marco jurídico y los instrumentos de política pública (catastro, propiedad de la tierra), útiles para fomentar y contextualizar acciones de restauración, así como las herramientas de gestión (caudal ecológico) para una implementación efectiva.

Análisis de vacíos de información siguiendo la metodología del Modelo de congruencia de Nadler y Tushman (1997), adaptado a la realidad de esta consultoría.

Tabla 43. Análisis de brechas en la temática de la Consultoría. Fuente: Elaboración propia.

TIPO / CATEGORIA	ESTADO ACTUAL	BRECHA	ESTRATEGIA	ESTADO ESPERADO
INGENIERÍA	Escasa información del flujo de sedimentos en subcuencas aportantes	Se desconoce el balance y dinámica de los flujos de sedimentos en las subcuencas aportantes de la desembocadura, comprometiendo la toma de decisiones en cuanto a posibles medidas de restauración de la conectividad en el ecotono entorno a la desembocadura de Río Elqui	Generar estudios de balance y dinámica sedimentario en las subcuencas aportantes a través de consultorías o convenios con universidades	Para el 2025 la información generada sobre el balance y dinámica de flujos de sedimentos permite tomar decisiones para restaurar la conectividad en el humedal
PAISAJE	Desconocimiento de ecosistemas de referencia (Espacio – Tiempo)	Para avanzar en el continuo de restauración ecológica hacia metas de recuperación de ecosistemas nativos, existe dificultad para determinar ecosistemas de referencia pertinentes en las subcuencas aportantes en espacio y tiempo. Esto debido a los niveles de perturbación encontrados y a la ausencia de diagnósticos a la escala pertinente.	Elaborar una base de datos con sitios que presenten un paisaje similar o ecosistemas de referencia (ecosistemas nativos) al que se pretende restaurar (contexto espacial: McDonald et al 2016) y sistematizar la información del cambio del paisaje en una línea de tiempo. Esta estrategia bajo el enfoque de la hipótesis de perturbación intermedia (Connell 1978) y sucesión comunitaria (Cowles 1889).	Para el 2025 se cuenta con una matriz de datos que incluye los ecosistemas de referencia para la restauración del humedal, así como, la reconstrucción del paisaje en una línea de tiempo.
	Escasos estudios de ecología del paisaje en las subcuencas	Se desconoce las dinámicas de cambios de usos de suelo, fragmentación/conectividad de hábitats clave y métricas de paisaje en la subcuenca a restaurar. Se debe disponer de indicadores relevantes de filtros gruesos	Financiar la investigación de la ecología del paisaje en la subcuenca involucrando las brechas identificadas, ojalá al corto plazo.	Para el 2025 existen al menos cinco estudios que redujeron la brecha de conocimiento que proponen los indicadores de filtro grueso (métricas de paisaje) necesarios para el monitoreo de la restauración.
	Poca integración de la dimensión geológica y geomorfológica en los procesos de conservación y restauración	Existe poca integración o consideración de las dimensiones y procesos geológicos y geomorfológicos como variables a integrar en procesos de conservación, evaluación de servicios ecosistémicos, herramienta como insumo para el manejo adaptativo entorno al efecto del cambio climático. Según varios autores, la comprensión y la integración de la geodiversidad en procesos de conservación ayudaría a construir mejores estrategias para el manejo de las respuestas de los ecosistemas ante futuros impactos, guiar manejo adaptativo, y contribuir a la restauración de ecosistemas; esto a través de la comprensión de dinamismos y conectividad temporal y espacial de los procesos geomorfológicos y de los suelos. (Gordon & Barron 2010, Brazier et al. 2012)	Buscar incentivar e involucrar / integrar profesionales del área de las ciencias de la Tierra en procesos de conservación y restauración (conversa con la brecha específica del vacío de conocimiento sobre la dinámica sedimentaria).	
BIODIVERSIDAD	Desconocimiento de especies clave y especies ingenieras en la subcuenca	Existen vacíos en la identificación de especies claves e ingenieras para los principales ecosistemas y/o hábitats (paisaje) dentro de las subcuencas aportantes (concepto de metacomunidad: Leibold et al 2004/Degradación trófica: Estes et al. 2011)	Promover estudios que determinen cuáles son estas especies, sus dinámicas poblacionales en la subcuenca/humedal y subcuencas aledañas.	Para el 2025 se tienen identificadas las especies clave e ingenieras que aporten a la restauración ecológica del humedal y faciliten el monitoreo del éxito de las medidas adoptadas.

	<p>Carencia de un plan local de control/erradicación de especies invasoras/exóticas/introducidas</p>	<p>A excepción de los permisos de caza del Servicio Agrícola Ganadero, no existe un plan dirigido a controlar/erradicar la presencia de especies invasoras/exóticas/introducidas (flora y fauna) en la subcuenca y sus aportantes.</p>	<p>Convocar a los sectores especializados, en coordinación y asesoría con el COCEI para la elaboración de un plan local que permita controlar/erradicar las especies invasoras/exóticas/introducidas tanto de flora como de fauna.</p>	<p>Para el 2025 se cuenta con un plan de control/erradicación de especies invasoras/exóticas/introducidas (flora y fauna).</p>
	<p>Escasa viverización de especies nativas</p>	<p>Existe escasa oferta de especies nativas de procedencia local viverizadas en la comuna/provincia (existe un solo proveedor de especies nativas locales en la provincia según catastro de CONAF)</p>	<p>Generar la sinergia entre actores institucionales relacionados con la conservación exsitu de recursos vegetales nativos (INIA, Intihuasi, CONAF), las empresas de viveros ubicados en la comuna o en comunas aledañas y/o otros actores territoriales pertinentes (municipio, comunidades agrícolas, etc.), a través de capacitaciones, convenios, colectas de semillas, etc.</p>	<p>Para el 2024 se cuenta con un catastro de proveedores (viveros) de especies vegetales nativas en la comuna/provincia)</p>
	<p>Red de monitoreo de cantidad y calidad de agua aun insuficiente</p>	<p>La red de estaciones de monitoreo <i>in situ</i> de parámetros de cantidad y calidad de aguas superficiales y subterráneas es insuficiente a escala de las subcuencas del humedal y desembocadura del Río Elqui, lo que imposibilita detectar cambios en los parámetros en relación a sus amenazas sobre los cuerpos de agua, con eficiencia. Además, no existe en la cuenca sitios o estaciones de monitoreo con uso de indicadores biológicos, aun existiendo estudios puntuales que proponen sitios de monitoreo en la cuenca (macroinvertebrados bentónicos, macrófitas, etc.)</p>	<p>Replantear el diseño y red de monitoreo con base en hipótesis de cambio en los parámetros evaluados. Ubicar las estaciones de monitoreo de cantidad y calidad de agua a largo plazo en sitios estratégicos (diseño metodológico que responda a la hipótesis de monitoreo: Hatch 2003; Spellerberg 2005) dentro de las subcuencas aportantes. Incluir herramientas de monitoreo en base a Índices Bióticos (Carrera y Fierro 2001; Figueroa et al. 2003; 2007). Coordinar las iniciativas GEF, DGA, Futura norma secundaria de calidad de aguas, entre otras.</p>	<p>Para el 2024 se cuenta con un diseño de monitoreo y una red de estaciones de muestreo, adicionales a los existentes, que responden a una hipótesis y diseño de monitoreo para determinar cambios en la calidad y cantidad de agua en relación a las amenazas identificadas, sobre la cuenca o al menos, el humedal.</p>
<p>GESTION / GOBERNANZA</p>	<p>Inexistencia del valor del caudal ecológico/ambiental para la subcuenca y el humedal</p>	<p>Se desconoce el caudal ecológico/ambiental en sectores claves dentro de las subcuencas aportantes e incluso a escala de cuenca. Este dato es un insumo esencial para poder tomar decisiones entorno a la restauración de regímenes de flujos naturales, conectividad hidrológica y gestión sustentable del agua. A pesar de existir una legislación entorno a caudales mínimos y estudios pilotos en las cuencas del semiárido chileno, que podrían adaptarse al contexto de la cuenca del Río Elqui, esta brecha persiste.</p>	<p>Establecer alianzas estratégicas y convenios con actores de la gestión del agua (juntas de vigilancia, DGA, DOH, universidades, centros de investigación, ONG's), para gestionar e impulsar estudios relacionados a la determinación de caudal ecológico/ambiental a escala de subcuencas aportantes y de toda la cuenca del Río Elqui</p>	<p>Para el 2025 se conoce el valor estimado del caudal ecológico/ambiental al menos para los sectores propuestos a ser restaurados (Quebrada de Talca Bocana río Elqui)</p>

	<p>Escaso involucramiento de propietarios/usuarios en la subcuenca para la restauración</p>	<p>Se identifica un poco o nulo nivel de involucramiento por parte de los propietarios (usuarios, privados) en aportar a la restauración del humedal considerando que usan e impactan directamente o indirectamente sobre ecosistemas claves: rubros relacionados con actividades extractivas, actividades agroindustriales, urbanización y parcelación, etc., lo cual representa una amenaza para el éxito y eficiencia de la restauración a escala de paisaje</p>	<p>Desarrollar un programa de involucramiento entorno a estos actores clave, basado en el entendimiento de sus intereses propios y su visión de los servicios ecosistémicos (recursos): Gestión de riesgos, costo-beneficios, disponibilidad a pagar. Acompañar con sensibilización, estrategias de involucramiento de actores privados, para ampliar el territorio disponible para efectos de implementaciones de restauración</p>	<p>Para el 2026, 60% de los propietarios/usuarios se involucran directamente con el proceso de restauración, al menos de los sectores seleccionados entre quebrada de Talca y la bocana del río Elqui</p>
	<p>Deficiente delimitación de la propiedad estatal y privada (Catastro)</p>	<p>Se desconoce los límites exactos de los terrenos/parcelas (plano catastral). Límites de la propiedad privada, incoherencia en los datos catastrales, espaciales y legales, disponibles en sectores de propiedad pública, lo cual genera conflictos y/o desvinculación de responsabilidades entre los actores institucionales involucrados (Municipio, Bienes Nacionales, Servicio de Impuestos Interno, etc.), lo que reduce la oportunidad de actuar a corto plazo.</p>	<p>Subsanar las incoherencias catastrales entorno a la propiedad pública/privada. Evaluar la factibilidad a mediano-largo plazo de adquirir fideicomisos de tierras ("land trusting") por parte de algún actor clave (¿el estado?), es decir, parcelas estratégicas para lograr metas de restauración a escala de paisaje.</p>	<p>Para el 2030 existe un plano catastral con los límites de la propiedad inmobiliaria, que ubica, describe y registra las características físicas de cada bien inmueble.</p>
<p>CAPACIDADES</p>	<p>Desconocimiento de la oferta de capacidades técnicas específicas (oficios) en contexto de restauración ecológica</p>	<p>Se desconoce la oferta y capacidades técnicas disponibles o intereses de profesionales / emprendedores locales en capacitarse para realizar obras, implementaciones, monitoreos requeridos en los procesos de restauración.</p>	<p>Realizar un Catastro de capacidades técnicas requeridas entorno a la implementación de acciones / intervenciones de restauración (Arquitectos paisajistas, constructoras, ingeniería forestal, oficios tradicionales entorno a la construcción, etc.) en la provincia / región. Interés de actores potenciales en capacitarse (generación de empleo) y actores que podrían capacitarlos. Incluir actores cuyos oficios pueden estar relacionados con conocimiento y prácticas tradicionales de relevancia o vinculados a conocimientos ecológicos locales que se podrían transmitir (gestión tradicional agropecuaria, agroecología, técnicas de construcciones tradicionales en base a recursos vernáculos: pircas y muros de piedra en seco, construcciones en adobe, mimbres, etc.)</p>	<p>Para el 2023, existe un catastro de profesionales capacitados para efectuar implementaciones y acciones de restauración</p>



COMENTARIO	Trabajar y llenar estas brechas contribuirá no solamente a consolidar el proceso de restauración sino también en aumentar los niveles y metas entorno los beneficios sociales: involucramiento de actores, capital natural, enriquecimiento de los conocimientos, redistribución y equitatividad de los beneficios, sustentabilidad de las economías locales, bienestar de las comunidades (ver SER Standards 2019)			
------------	---	--	--	--

Actividad w) Presentación de la propuesta ante el Comité Técnico Local y otros actores claves.

Taller N° 3 del 19 de mayo de 2022.

Presentación final de la Consultoría al Comité Regional del GEF Humedales Costeros. En este taller final se expusieron los resultados de los dos monitoreos realizados, resultados de la calidad de las aguas y sedimentos de la cuenca baja del HCRE y de la propuesta de programa de monitoreo.

Posterior a la exposición por parte del equipo de Gesnat, se realizó una discusión sobre los parámetros de muestreo, modalidad de monitoreo, oportunidades y amenazas a la implementación de un programa de monitoreo con enfoque ciudadano.

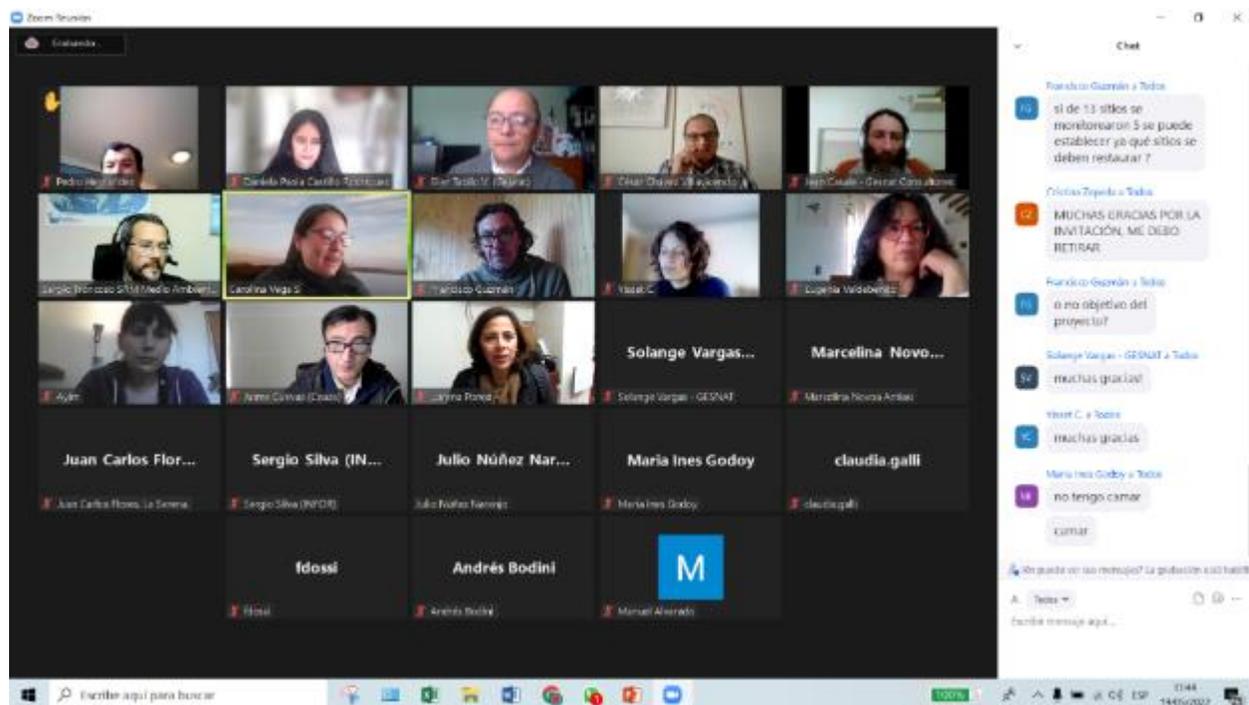


Figura 44. Taller final de Exposición de resultados finales del proyecto el jueves 19 de mayo.

5. CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio realizado, nos permite concluir que la calidad ambiental del HCRE varía desde el sector del Almendral hacia la desembocadura. La diversidad de flora y de fauna se hace mayor hacia la desembocadura, pero la calidad del agua del humedal se deteriora en el mismo sentido. Tanto los índices de calidad ambiental a partir de macrofitas e invertebrados, como los análisis de calidad de agua indican un deterioro de las condiciones generales del humedal en su desembocadura. El origen de esta contaminación es variado, desde fuentes antrópica por actividad minera y agrícola, como de origen natural producto del arrastre de sustrato natural producto de las lluvias.

Por objetivo, las conclusiones son:

OE 1) Caracterizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos presentes en la zona baja de la cuenca hidrográfica del Elqui, e identificar las fuentes emisoras puntuales y difusas.

- El presente estudio permitió caracterizar la calidad del agua e identificar 13 fuentes puntuales y difusas de contaminación del HCRE, entre el Almendral y la desembocadura del HCRE. Para este tramo del río Elqui, se han identificado como las principales fuentes de contaminación difusa la extracción de áridos, disposición de microbasurales, actividad agrícola, y relaves mineros. Estos mismos 13 sitios identificados son propuestos para un Programa de Monitoreo en el tramo terminal del río Elqui, específicamente entre el sector del Almendral y la desembocadura (40 km de longitud). Lo anterior, descritos en la Tabla 1 y Fig. 2 y 4.
- Producto de la severa sequía en la región y valle de Elqui es que durante esta Consultoría solo se pudo realizar muestreos en 5 de los 13 en cuanto a parámetros del cuerpo y curso de agua y sedimentos en las dos campañas de monitoreo realizadas (diciembre 2021 y marzo 2022). La ausencia de flujo de agua superficial en la mayoría de estos sitios explica la situación. Aún así, la propuesta para un Programa de Monitoreo del HCRE integra los 13 puntos seleccionados.
- A través de 3 talleres participativos hemos podido revisar los parámetros y métodos de monitoreo a incluir en un Programa de Monitoreo del HCRE, como también hemos identificado y caracterizado a actores claves con potencial de participar en un Programa

de Monitoreo y Restauración del HCRE. Estos actores claves pertenecen a organizaciones no gubernamentales, organismos públicos, académicos, gremiales, empresas, y de gobernanza hídrica del río Elqui.

- Las campañas de monitoreo de diciembre de 2021 y marzo de 2022 en los componentes bióticos y abióticos nos han permitido proponer índices apropiados para un Programa de Monitoreo. De lo anterior, es que se propone un Programa de Monitoreo de parámetros bióticos como flora y fauna terrestre y acuática, incluidas las macrofitas y macroinvertebrados; y parámetros abióticos como calidad de agua y sedimento y de paisaje.

OE 2) Realizar un diagnóstico ambiental y caracterización del estado actual del Humedal Costero del Río Elqui.

- Se revisó y sistematizó información de biodiversidad, y de otros parámetros bióticos y abióticos del HCRE. Este análisis, además del trabajo realizado en las dos campañas ejecutadas (diciembre 2021 y marzo 2022), permitió proponer a la riqueza de especies como el principal y más sólido indicador en un programa de monitoreo. Índices de biodiversidad solo será factible de implementar en la medida que aumenten la densidad de datos sobre los componentes de flora y fauna, algo solo alcanzable con a lo menos dos años de muestreos. Adicionalmente a la riqueza de especies, la cobertura vegetal es otro indicador valioso para usar en un programa de monitoreo.
- Se identificó a 175 especies de flora vascular, 42 especies de aves, sólo dos especies de reptiles y no identificamos mamíferos nativos a lo largo de las 13 estaciones de monitoreo propuestas.
- Los resultados de las campañas de muestreo relativos a los índices de macrofitas y macroinvertebrados nos indican que el HCRE se encontraría en condición perturbada y altamente perturbada en el sector de la desembocadura, y con niveles de trofía medios a altos. Se hace necesario más replicas temporales en los muestreos para establecer con mayor certeza la calidad ambiental del HCRE y sus posibles variaciones estacionales.
- Se recomienda no utilizar el modelamiento trófico como indicador de calidad del humedal, dado que los análisis de laboratorio no lograron entregar certeza de la

información de clorofila, además de tener un costo significativo. Resultados consistentes y conclusiones igualmente válidas pueden ser obtenidas con el índice de trofia en base a macrofitas (ITFM). Sus ventajas residen en que es de mucho menor costo de implementación y recientemente calibrado para la cuenca, por lo cual se recomienda usar como indicador del estado trofico en el HCRE.

- Los índices bióticos basados en macroinvertebrados también, y por las mismas razones enunciadas para el ITFM, se consideran un aporte significativo en el Programa de Monitoreo, dado que entregan información relevante a escala temporal reducida, mostrando ser muy sensibles a las variaciones de calidad del humedal.
- En relación con la calidad de agua, de manera global, los puntos con calidad inferior corresponden a GEFE12 y GEFE13 en la desembocadura del HCRE. Los parámetros con peores calidades recaen en los fisicoquímicos (conductividad eléctrica (CE), pH y demanda química de oxígeno (DQO), entre otros de tipo complementarios no críticos donde predomina el aluminio (Al), cobre (Cu), boro (B) y sulfatos (SO₄). En cuanto a los sedimentos, el cobre (Cu) presenta las mayores clasificaciones de contaminación, generalmente entre extrema a severa. En general, los metal(oide)s se comportan con una tendencia decreciente aguas abajo del río en sus concentraciones totales a lo largo de la cuenca baja (GEFE01 a GEFE12), con *peaks* en GEFE13 a excepción del arsénico (As). El origen de estos componentes químicos es variado, desde fuente antrópica por actividad minera y agrícola, como de origen natural producto del arrastre de sustrato natural producto de las lluvias.
- Los diferentes índices seleccionados y calculados para las 2 campañas de monitoreo, y los 5 sitios muestreados, muestran, a pesar de las variaciones, patrones similares en las condiciones de cada sitio (Fig. 43, 44). Sin embargo, es difícil aun corroborar estadísticamente con tan pocos datos temporales.
- Dada la condición de sequía prolongada en la región, se recomienda evaluar con un mayor número de campañas estacionales, tanto en periodos de sequía como en periodos normales. De esta forma, verificar que los parámetros sean representativos y así estimar la calidad de agua y sedimento.

- Los indicadores fisicoquímicos son de causa netamente antrópica dado el deterioro por actividades productivas y recreativas en o cerca del HCRE. Un ejemplo a destacar es que la estructura denominada by-pass que la empresa Aguas del Valle mantiene en la desembocadura del río Elqui, y de uso en caso de emergencias. Lamentablemente, existe salida de aguas servidas, en bajo volumen, pero suficiente para generar un deterioro del agua y sedimento del material por acumulación de materia orgánica. Es evidente la mala calidad ambiental del punto GEFE13 por eutroficación.
- Tanto los elementos químicos como la mala calidad de los parámetros fisicoquímicos en la desembocadura del HCRE provoca deterioro del ecosistema por eutroficación y bioacumulación de estos elementos en sedimentos y vegetación del humedal. Se deben realizar estudios para establecer si la fauna esta bioacumulando esta contaminación, aunque es posible afirmar, dada la experiencia descrita nacional e internacionalmente, que esto ocurre. Especialmente con la fauna asociada al sedimento, y/o que se alimenta de especies que dependen del sedimento para alimentarse o refugiarse.
- Se recomienda profundizar el estudio de sedimentos para el punto GEFE 13 frente al by-pass que la Empresa Aguas del Valle mantiene en la desembocadura del río Elqui, el cual podría presentar condiciones fisicoquímicas que podrían favorecer la biodisponibilidad de estos.
- Es posible que desde la columna de agua los elementos de interés estén sedimentando, enriqueciendo los sedimentos, sobre todo en condiciones de sequía donde además los caudales probablemente no logran resuspender sedimentos desde el lecho. En relación con los relaves, bajo este mismo escenario no se pueden evaluar los aportes de las quebradas secas donde estos se ubican para establecer si afectan la calidad del HCRE.

OE 3) Proponer estrategias y acciones para la restauración del humedal y sus subcuencas aportantes.

Se propone una estrategia de restauración de cada uno de los 13 sectores identificados y caracterizados, basados en la estrategia de restauración propuesta por Tabilo *et al* (2021). Se propone usar la misma estrategia de restauración en base a proyectos piloto de superficie no



mayor a 1 hectárea donde eliminar las amenazas y realizar acciones para recuperar suelos, calidad de agua, mejora de hábitat para favorecer el reclutamiento de especies de flora y fauna nativa. Cada una de las propuestas de restauración cuenta con una estimación de costos para ejecutar la actividad.

6. LITERATURA CITADA

Aguilar-Garavito M. y W. Ramírez (eds.) 2015. Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá D.C., Colombia. 250 pp.

Águila-Juárez, P., De la Fuente, J., Vaca, R. (2005), Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. Universidad Autónoma del Estado de México Toluca, México.

Alloway, B. J. (1995). Alloway, B. J. (1995). Heavy metals in soils, Chapman and Hall, London.

Alvial, I. E., Tapia, D. H., Castro, M. J., Duran, B. C., & Verdugo, C. a. (2013). Analysis of benthic macroinvertebrates and biotic indices to evaluate water quality in rivers impacted by mining activities in northern Chile. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, (407), 01. <https://doi.org/10.1051/kmae/2012027>

Araya, B. y G. Millie. 1998 Guía de campo de las aves de Chile. Editorial Universitaria

Armitage, P. D., Moss, D., Wright, J. F., & Furse, M. T. (1983). The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. Water Research, 17(3), 333–347. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90188-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90188-4)

APHA, AWWA & WEF Eds. (1992, 2018). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, DC, USA. <https://www.standardmethods.org/>

Ávila, P., Ferreira da Silva, E., Salgueiro, A. y Farinha, J. (2008). Geochemistry and mineralogy of mill tailings impoundments from the Panasqueira Mine (Portugal): Implications for the Surrounding Environment. Mine Water Environ. 27:210-224.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 2011. Sistema Integrado de Información Territorial. Mapas Vectoriales. Disponible desde: http://siit2.bcn.cl/mapas_vectoriales/index.html/

Bioma Consultores (2019). Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Acuáticos de Chile: Insumo para Plataforma de Humedales de Chile Licitación ID: 608897-71-LE18. Ministerio del Medio Ambiente.

Bowen, H. J. M. (1979). Environmental chemistry of the elements, Academic Press, London, 32–46.

Buckland, S.T., Anderson, D.R., Burnham, K.P., Laake, J.L., Borchers, D.L. and Thomas, L. 2001. [Introduction to Distance Sampling: Estimating Abundance of Biological Populations](#). Oxford University Press, Oxford, UK.

CABIN (2012). Canadian Aquatic Biomonitoring Network field manual - wadeable streams. Monograph from the Science and Technology Department of the Canada Environment Agency. Ottawa, Ontario. 57 pp.

Cabrera, A. L. (1949). El género *Senecio* en Chile. *Lilloa*, 15: 27-501.

Cabrera, M. y Ruiz, K., (2017). Determinación de plaguicidas y metales pesados en sedimentos superficiales del embalse el Guájaro como consecuencia de la actividad agrícola en el distrito de riego repelón, atlántico. Corporación universidad de la costa, CUC. Facultad de ingeniería Programa de ingeniería ambiental Barranquilla, Colombia.

Canales, M. (2006). “Metodologías de investigación social. Introducción a los oficios”. Ediciones LOM. Santiago. Chile.

CAPP (2006). Informe país, estado del medio ambiente en Chile. Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile, 371 p.

Castillo, D. (2009). Geoquímica de Sedimentos y Relaves en la Cuenca del Río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. Tesis de Ingeniería Civil Ambiental. Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería, Departamento de Minas, Ingeniería Civil Ambiental.

Cardoso, A., Boaventura, G., Silva, E., Brod, J. (2001). Metal Distribution in Sediments from the Ribeira Bay, Rio de Janeiro – Brazil. *J. Braz. Chem. Soc.* 12: 6, 767-774.

Caritat, P., Reimann, C., NGS Project Team, GEMAS Project Team. (2012). Comparing results from two continental geochemical surveys to world soil composition and deriving Predicted Empirical Global Soil (PEGS2) reference values. *Earth and Planetary Science Letters* 319-320: 269–276

CCME (1999b). Canadian Freshwater Sediment Quality Guidelines.

CCME (2017). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. CCME Water Quality Index User’s Manual 2017 Update.

CEA (Centro de Ecología Aplicada). (2018). Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Acuáticos de Chile: Insumo para Plataforma de Humedales de Chile Licitación ID: 608897-114-LE17. Ministerio del Medio Ambiente.

CEAZA. (2017). Implementación de un nuevo método holístico de evaluación del caudal ecológico basado en macroinvertebrados en la cuenca del Choapa. Proyecto FIC-BIP 30404078-0

Celis-Hidalgo, J., Junod-Montano, J., y Sandoval-Estrada, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(1): 17-25.

CENMA (Centro Nacional del Medio Ambiente) (2017). Consultoría Técnica Recopilación y Levantamiento antecedentes para apoyo en la elaboración de anteproyecto de normas

secundarias de calidad ambiental (NSCA) para las aguas continentales superficiales de la cuenca del Río Elqui. SEREMI Región de Coquimbo, Ministerio del Medio Ambiente

CEPEDA-PIZARRO, J. (2008). Los sistemas naturales de la cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y cambio del Clima. (J. CEPEDA-PIZARRO, Ed.). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.

Chambers, R., Corbett, J., McCall, M., Olson, R., Muchemi, J., Kyem (2006). Mapping for change: Practice, Technologies and Communication. London.

Chao, A., Chazdon, R.L., Colwell, R.K., Shen, T-J. (2004). A new statistical approach for assessing similarity of species composition with incidence and abundance data. Ecology Letters, 8: 148-159. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00707.x>

Colwell, R.K. (2009). EstimateS v. 8.2.0: Statistical estimation of species richness and shared species from samples < <https://www.robertkcolwell.org/pages/estimates>>

CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda. 2013. “Diagnostico Plan Maestro para la gestión de los recursos hídricos de la región de Coquimbo” Informe final

Contraloría General de la República. 5 de enero de 2022. Informe Final Municipalidad de La Serena. Informe N° 701/ 2021. Contraloría Regional de Coquimbo. Unidad de Control Externo. 130p.

Couve, E. y C. Vidal. 2004. Aves Rapaces de Chile. CEA ediciones, Valdivia, Chile.

Couve, E., Vidal, C. y Ruiz, J. 2016. Aves de Chile sus islas oceánicas y península Antártica. Far South Expeditions, Punta Arenas.

CRDP 2020. Estudio de Alternativas de Solución a la Gestión de Residuos Sólidos para las 15 comunas de la Región de Coquimbo. ANEXO – LA SERENA. 153 pp.

Cuesta, F., Becerra, M.T., Bustamante, M., Maldonado, G., Devenish, C., Quiñonez, LL. 2012. Indicadores para evaluar y monitorear el estado de la biodiversidad en los Andes Tropicales en el contexto de cambio climático - Propuesta metodológica para los países de la Comunidad Andina. SGCAN, CONDESAN, INTERCOOPERATION, UICN-Sur, Lima-Quito.

Dattwyler, E. 2008. Minería, agricultura y recursos hídricos en la cuenca del río Elqui: aspectos económicos, sociales y ambientales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería, Departamento ingeniería de Minas. 163p.

Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R. (2005). RICARDO BARRA¹ and XAVIER NIELL³ Evaluation of water quality in the Chilla' n river (central Chile) using physicochemical parameters And a modified water quality index. Environmental Monitoring and Assessment (2005) 110: 301–322.

De la Maza M. y Bonacic C. (Eds.). 2013. Manual para el Monitoreo de Fauna Silvestre en Chile. Serie Fauna Australis, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile.

DGA (2016), Impacto Aplicación Caudal Ecológico Mínimo Retroactivo en Cuencas de la IV, V y VI Región, SIT N° 392, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: GeoHidrología Consultores Ltda.

Deckere, E., De Cooman, W., Leloup, V., Meire, P., Schmitt, C., von der Ohe, P. (2011). Development of sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *J Soils Sediments* (11):504–517.

Deverel, S., Goldberg, S., Fujii, R. (2011). Chapter 4 Chemistry of Trace Elements In Soils and Groundwater Chemistry of Trace Elements in Soils and Groundwater.

Devoc, V., Araújo, F., Van Grieken, R., Subramanian, V. (1998). Chemical composition of sediments and suspended matter from the Cauvery and Brahmaputra rivers (India). *The Science of the Total Environment* 212: 89-105.

Díaz-Espinosa, A. M., Díaz-Triana, J. E., Vargas, O. (Eds.). *Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá*. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente.

DIRECTEMAR (2007). Calidad ambiental de los cuerpos marinos y continentales controlados en el marco del Programa de Observación del Ambiente Litoral (P.O.A.L.). Capítulo 1. Armada de Chile. 15 p.

Donoso-Barros, R. 1966. Reptiles de Chile. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago de Chile

Domínguez E. & Fernández H., (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. Fundación Miguel Lillo, Tucumán.

Environment Canada. Science and Technology Branch. (2012). Canadian Aquatic Biomonitoring Network – CABIN field manual - wadeable streams. (57).

Environment Canada. Science and Technology Branch. (2014). CABIN - Laboratory Methods, Processing, Taxonomy, and Quality Control of Benthic Macroinvertebrate Samples. 36 pág.

EPA (2002). Guidance Manual to Support the Assessment of Contaminated Sediments in Freshwater Ecosystems. Volume III – Interpretation of the Results of Sediment Quality Investigations.

Espejo, L., Kretschmer, N., Oyarzún, J., Meza, F., Núñez, J., Maturana, H., Soto, G., Oyarzo, P., Garrido, M., Suckel, F., Amezaga, J., Oyarzún, R. (2011). Application of water quality indices and

analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid North-Central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(9):5571-88.

ESRD (2014). *Environmental Quality Guidelines for Alberta Surface Waters*. Alberta Environment & Sustainable Resource Development Water Policy Branch, Policy Division. Edmonton. 48 pp.

Evangelou, V. 1998. *Environmental Soil and Water Chemistry: Principles and Applications*, Iowa State University John Wiley & Sons, INC.

Everard, M. (Institution of E. S., Waters, R., & Institution of Environmental Sciences. (2013). *Ecosystem services assessment: How to do one in practice*, (October), 34 pp.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2006. "Stakeholders Analysis", Annex I to lesson "understanding the Users' Information Needs", Food Security Information for Action Programme, Estados Unidos. 3p.

Fernández López A. y Lavín Murcio, P.A. 2016. Riqueza y diversidad de anfibios y reptiles en un gradiente altitudinal en la Sierra de Juárez, Chihuahua, México. *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.), 32(3), 230-239.

Feijóo, M. S., & Arriaga, M. O. (2012). Sinopsis del género *Eleocharis* (Cyperaceae) de la Patagonia Argentina. *Kurtziana*, 37(2), 5-21

Figuroa, R., Suarez, M.L., Andreu, A., Ruiz, V.H., Vidal-Abarca, M.R. (2009). Caracterización ecológica de humedales de la zona semiarida de Chile Central. *Gayana*, 73(1), 1–9. <https://doi.org/0717-652X>

Figuroa, A., Lictevout, 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.

FCH (2018). *Metodología de Construcción de Índice de Calidad para aguas superficiales. Escenarios hídricos 2030 Chile*.

Freire, S. E., Bayón, N. D., Baeza, C. M., Giuliano, D. A., y Monti, C. (2014). Revisión del género *Pseudognaphalium* (Asteraceae, Gnaphalieae) en Chile. *Gayana. Botánica*, 71(1), 68-107.

Gajardo, R. (1994). *La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica*. Editorial Universitaria.

Galleguillos, G., Oyarzún, J., Maturana, H., Oyarzún, R. 2008. Retención de arsénico en embalses: el caso del río Elqui, Chile. *Ingeniería hidráulica en México* 3 (XXIII): 29-36.

García, T. (2012). *Propuesta de índices de calidad de agua para ecosistemas hídricos de Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil*, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil.

García-Olaechea, A., Chávez-Villavicencio, C. y Tabilo-Valdivieso, E. 2018. ¿Influyen las aves migratorias neárticas en el patrón estacional de aves de los humedales costeros? *Revista Peruana de Biología*, 25(2): 117 – 122.

García, J., Burmeister, J., Angulo Pratolongo, F., Agreda, A., Aponte Ubillus, H., Tejada, I., Montecino, S., Jarpa, C., Chávez Villavicencio, C., Tabilo, E. y Hernández, I. 2021. Atlas de Humedales Costeros de la Costa Árida-Semiárida del Pacífico Sudamericano. Disponible desde: <https://humedalescosteros.org/atlas/>

Girardi C., González F., Jara S., Charte R., Elorrieta M., Sanchis E., Arancibia A. & Castillo I. (2018) Metodología de Construcción de Índice de Calidad para aguas superficiales. Escenarios Hídricos 2030, Chile. 84 pp.

GRASS Development Team, 2017. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2. Open Source Geospatial Foundation. Electronic document: <http://grass.osgeo.org>

González Elizondo, M. S., González Elizondo, M., Tena Flores, J. A., López Enriquez, I. L., Reznicek, A. A., y Diego-Pérez, N. (2008). Sinopsis de *Scirpus* s.l. (Cyperaceae) para México. *Acta botánica mexicana*, (82), 15-41

Halffter, G., C.E. Moreno y E.O. Pineda. 2001. Manual para evaluación de la biodiversidad en Reservas de la Biosfera. M&T–Manuales y Tesis SEA, vol. 2. Zaragoza, 80 pp.

Hauer, F. R., & Lamberti, G. A. (2007). *Methods in Stream Ecology*. Second Edition. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-332908-0.X5001-3>

Hilsenhoff, W. L. (1988). Rapid Field Assessment of Organic Pollution with a Family-Level Biotic Index. *Journal of the North American Benthological Society*, 7(1), 65–68. <https://doi.org/10.2307/1467832>

Instituto Nacional de Estadística. 2007. VII Censo nacional agropecuario y forestal, 8p.

Iriarte, A. 2008. Mamíferos de Chile. Lynx Edicions. Barcelona, España, 420 pp.

Jarchow, M. E., y Cook, B. J. (2009). Allelopathy as a mechanism for the invasion of *Typha angustifolia*. *Plant Ecology*, 204(1), 113-124.

Kabata-Pendias, A., 1992, 1984, 2001. Trace Elements in Soil and Plant. CRC. Press, Boca Raton.

Kaplan, Z. (2008). A taxonomic revision of *Stuckenia* (Potamogetonaceae) in Asia, with notes on the diversity and variation of the genus on a worldwide scale. *Folia Geobotanica*, 43(2), 159-234.

Koljonen, T. (1992). Geochemical Atlas of Finland, Part 2: Till. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland. 218 pp.

Kummar, D. y Alappat, B. (2009). NSF-Water Quality Index: Does It Represent the Experts' Opinion? *Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage*, 13:75-79.

León L. (1998), Índice de Calidad de Agua, Forma de estimarlos y aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

Luebert, F., y Pliscoff, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial universitaria.

MacDonald, D., Ingersoll, G., Berger, T. (2000). Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 39:20–31.

Magni, L., Castro, L., Rendina, A. (2021). Evaluation of heavy metal contamination levels in river sediments and their risk to human health in urban areas: A case study in the Matanza-Riachuelo Basin, Argentina. Environmental Research 197: 110979.

Marlin, D., Newete, S. W., Mayonde, S. G., Smit, E. R., & Byrne, M. J. (2017). Invasive Tamarix (Tamaricaceae) in South Africa: current research and the potential for biological control. Biological invasions, 19(10), 2971-2992.

Marticorena, C., Squeo, F. A., Arancio, G., y Muñoz, M. (2001). Catálogo de la flora vascular de la IV Región de Coquimbo. En Squeo, F. A., Arancio, G., y Gutiérrez, J. R. (Eds.), Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo (7: 105-142). Ediciones Universidad de La Serena.

Magurran, A.E. 1988. Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press, New Jersey, 179 p.

Martínez D. y G. González. 2005. Las aves de Chile. Nueva Guía de campo. Ediciones del Naturalista, Santiago.

Mella, J. 2005. Guía de Campo Reptiles de Chile: Zona Central. Peñaloza APG, Novoa F & M Contreras (Eds). Ediciones del Centro de Ecología Aplicada Ltda. 147 páginas + xii.

Mella, J. 2017. Guía de campo de reptiles de Chile. Tomo 2: Zona Norte. Peñaloza, A.P.G (ed.). Alvimpress, Santiago.

MMA Ministerio de Medio Ambiente - Ecoterra (2016). A través del trueque científico fortalezcamos los vínculos y promovemos el cuidado del medio ambiente. Fondo de Protección Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente

MMA (2017). Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en aguas continentales y marinas. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.

MMA (2018). Plan Nacional de Protección de Humedales 2018-2022. 33 pp.

MMA (2020a). Presentación NSCA Cuenca Río Elqui Sector desembocadura (2 marzo 2020).

MMA (2020b). Presentación Antecedentes Anteproyecto NSCA Cuenca Río Elqui (15 julio 2020).

- Moreno, C. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T –Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza, España.
- Morris A., Jankowski P. (2005) Spatial Decision Making Using Fuzzy GIS. In: Petry F.E., Robinson V.B., Cobb M.A. (eds) Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems. Springer, Berlin, Heidelberg
- Mortellaro, S., Barry, M., Gann, G., Zahina, J., Channon, S., Hilsenbeck, C., Scofield, D., Wilder, G., y Wilhelm, G. (2012). Coefficients of conservatism values and the floristic quality index for the vascular plants of South Florida. *Southeastern Naturalist*, 11(mo3), 1-62.
- Murillo, V. E. (2012). Revisión taxonómica del género *Plantago* L. (Plantaginaceae) en Chile. *Scientia*, 22(2), 7-76.
- Muñoz, A. y J. Yáñez. 2000. Mamíferos de Chile. Cea Ediciones, Valdivia, Chile.
- NCh 409 (2005). Norma Chilena Agua Potable.
- NCh 1333 (1978/1987). Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
- Newberry, R., & Gaboury, M. (1993). Stream Analysis and Fish Habitat Design: A field manual. Winnipeg: Newbury Hydraulics Ltd.
- Noss, R.F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology* 4:355-364.
- Novara, L. J. (2021). Juncaceae. *Aportes Botánicos de Salta-Serie Flora del Valle de Lerma*, 1.
- NSF (1970, 2014). National Sanitation Foundation International. Disponible en: <<http://www.nsf.org>>.
- NSCA (2004). Guía Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas.
- Núñez, H. y F. Jakcsic. 1992. Lista comentada de los reptiles terrestres de Chile continental. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural de Chile (Chile)*, 43: 63-91.
- Núñez, H. y J. Torres-Mura. 1992 Adiciones a la herpetofauna de Chile. *Noticiario Mensual del Museo Nacional de Historia Natural* Nº 322:3-7.
- Oksanen J.F., Blanchet G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlenn D., Minchin P.R., O'Hara R. B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M. H.R., Szoecs E. and Wagner E. (2019). vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-6. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Opazo C., E.; Escudero V., I.; Neira S., H. 2017. Remociones en masa tipo fl ujo de marzo de 2015 y sus efectos sobre los centros poblados en la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Registrado IR-17-66: 48 p., 1 mapa a diferentes escalas. Santiago.

OSQG (2008). Guidelines for Identifying, Assessing and Managing Contaminated Sediments in Ontario.

Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J., & Maturana, H. 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio–Tambo district) vs. geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 84: 53–64.

Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzún, J., Higuera P., Maturana H., 2006. Strong metal anomalies in stream sediments from semiarid watersheds in northern Chile: When geological and structural analyses contribute to understanding environmental disturbances. *International Geology Review*, 48: 1133-1144.

Oyarzún, J., Castillo, D., Maturana, H., Kretschmer, N., Soto, G., Amezaga, J., Rotting, T., Ypunguer, P., Oyarzún R., (2012). Abandoned tailings deposits, acid drainage and alluvial sediments geochemistry, in the arid Elqui River Basin, North-Central Chile. *Journal of Geochemical Exploration* 115: 47-58.

Oyarzún, J., Oyarzun R. Lillo, j., Higuera, P., Maturana, H. Oyarzún, R. (2016). Distribution of chemical elements in calc-alkaline igneous rocks, soils, sediments and tailings deposits in northern central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*. Volume 69, August 2016, Pages 25-42.

Oyarzún, J., Maturana, H., Paulo, A., Lillo, J., Pastén, P., Núñez, J., Duhalde, D., González, C., Portilla, A., Oyarzún, R. (2021). Environmental Aspects of a Major ARD Source at El Indio Au-Cu-As District, North-Central Chile. *Mine Water Environ* <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00804-z>

Paine D. & Kiser J. Eds. (2012) *Aerial Photography and Image Interpretation*. Third Edition. John Wiley and Sons. 637 pp.

Pastén, V., López, N., Flores, C., y Salgado, C. (2016). *Línea base de vegetación, humedal de la desembocadura del río Elqui, Región de Coquimbo (informe final)*. Proyecto FPA 4-G-038-201: A través del trueque científico fortalezcó los vínculos y promuevo el cuidado del medio ambiente. Ministerio del Medio Ambiente.

Pearson, D.L. y F. Cassola. 1992. World-wide species richness patterns of Tiger Beetles (Coleoptera: Cicindelidae): Indicator taxon for biodiversity and conservation studies. *Conservation Biology*, 6: 376-391.

Peh, K. S.-H., Balmford, A., Bradbury, R. B., Brown, C., Butchart, S. H. M., Hughes, F. M. R., ... Birch, J. C. (2013). TESSA: A toolkit for rapid assessment of ecosystem services at sites of biodiversity conservation importance. *Ecosystem Services*, 5, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.06.003>

Pincheira-Donoso, D. y Núñez, H. 2005. Las especies chilenas del género *Liolaemus Wiegmann*, 1834 (Iguania Tropicuridae: Liolaeminae). Taxonomía, sistemática y evolución. Publicación ocasional del Museo Nacional de Historia Natural, Chile 59:7-486.

Pizarro J., Vergara P.M., Rodríguez J.A., Valenzuela A.M. (2010). Heavy metals in northern Chilean rivers: Spatial variation and temporal trends. *Journal of Hazardous Materials*, 181: 747–754.

Pouilly, M, G. Aguilera (2012). Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco – Chile, mediante la simulación del hábitat físico del pejerrey *Basilichthys microlepidotus* y el camarón de río *Cryphiops caementarius*. UICN, Quito, Ecuador. 57 pp.

Pozo, A. 2007. Mapeo de actores sociales. PREVAL: Lima, Perú. 6p.

QGIS Development Team (2017) QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Quintero, L., Agudelo, E., Quintana, Y., Cardona, S., Osorio, A. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia

Ralph, C.J, G.R. Geupel, P. Pyle, T.E. Martin, D.F. DeSante y B. Milá. 1996. Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-159. Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 46 p.

Rauch, J.N., 2011. Global distributions of Fe, Al, Cu, and Zn contained in Earth's derma layers. *J. Geochem. Explor.* 110, 193–201.

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Riedemann, P., Aldunate, G., y Teillier, S. (2003). *Flora nativa de valor ornamental: identificación y propagación, Chile, zona norte*. Ediciones Jardín Botánico Chagual

Rocchini, D., Petras, V., Petrasova, A., Chemin, Y., Ricotta, C., Frigeri, A., Neteler, M. (2017). Spatio-ecological complexity measures in GRASS GIS. *Computers & Geosciences*, 104, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.006>

Rodríguez, R., Marticorena, C., Alarcón, D., Baeza, C., Cavieres, L., Finot, V. L., Fuentes, N., Kiessling, A., Mihoc, M., Pauchard, A., Ruiz, E., Sánchez, P. y Marticorena, A. (2019). *Catálogo de las plantas vasculares de Chile*. URL: [http://catalogoplantas.udec.cl/base_catalogo plantas.pdf](http://catalogoplantas.udec.cl/base_catalogo_plantas.pdf) (consultada el 1 de marzo de 2022).

Rodríguez, R., y B. Fica. (2020). *Guía de Campo Plantas Vasculares Acuáticas en Chile*. Editorial Corporación Chilena de la Madera.

Rodríguez, R., Espejo, J., Penneckamp, D., y Macaya, J. 2021. *Guía de Campo: Helechos de Chile Continental e Insular*. Editorial Corporación Chilena de la Madera.

Rudnick, R.L., Gao, S., 2004. Composition of the continental crust. In: Rudnick, R.L. (Ed.), *The Crust. Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 1e64.

Sanders, T. G., Ward, R. C., Loftis, J. C., Steele, T. D., Adrian, D. D., & Yevjevich, V. M. (1983). *Design of networks for monitoring water quality*. Water Resources Publication.

Santilli, L., Pérez, F., de Schrevel, C., Dandois, P., Mondaca, H., y Lavandero, N. (2022). *Nicotiana rupicola* sp. nov. and *Nicotiana knightiana* (sect. *Paniculatae*, Solanaceae), a new endemic and a new record for the flora of Chile. *PhytoKeys*, 188, 83-103.

SEQ (2012). *Systèmes d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau. La qualité de l'eau et assainissement en France Rapport de l'OPECST n° 2152 (2002-2003) de M. Gérard Miquel, Mars 2013.*

Salafsky N, Salzer D, Stattersfield AJ., Hilton-Taylor C, Neugarten R, Butchart SHM, Collen B, Cox N, Master LL, O'Connor S & Wilkie D (2008). *A Standard Lexicon for Biodiversity Conservation: Unified Classifications of Threats and Actions. Classifications of Threats & Actions*, DOI: 10.1111/j.1523-1739.2008.00937.

Secretaría de la Convención de Ramsar (2006). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 4a. edición*. Gland (Suiza)

SERNAGEOMIN, 2015. *Guía Metodológicas para la Estabilidad química de Faenas e Instalaciones Mineras - Fundación Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Gobierno de Chile. Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/GuiaMetodologicaQuimica.pdf>. Consultado en: abril, 2019.

SERNAGEOMIN, 2020. *Datos públicos de depósitos de relaves en Chile (actualización 10-08-2020)*. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

Servicio de Evaluación Ambiental. (2015). *Guía para la descripción del área de influencia: descripción de los componentes suelos, flora y fauna de ecosistemas terrestres en el SEIA*. Ministerio del Medio Ambiente, Chile.

Singh, K., Malik, A., Sinha, S., Singh, V. y Murthy, R. (2005). Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti river (India) using principal component analysis. *Water, Air and Soil Pollution*.166:321-341.

Smith, W. G. (1913). Raunkiaer's life-forms and statistical methods. *Journal of Ecology*, 1(1), 16-26.

SNIT. (2017). *Aplicación de Normas Chilenas de Información Geográfica. Documento técnico. Segunda Versión*. 394 pp.

Sparks, D. (1995) *Environmental soil chemistry*. Academic Press San Diego, CA. 267 p.

Sparks, D.L. (2002). *Environmental Soil Chemistry*, 2e. San Diego, CA, USA: Academic Press. doi:10.1016/B978-012656446-4/50001-3.

Spellerberg, I.F. 2005. *Monitoring Ecological Change*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 391pp

Sullivan, J. J. (2014). Inadvertent biological control: an Australian thrips killing an invasive New Zealand tree in California. *Biological Invasions*, 16(2), 445-453.

Tabilo, E. (1996). Patrones del paisaje en los humedales de Costa Rica: Implicancias para su conservación y manejo. Tesis de Magister Scientieae del Instituto Internacional de Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS) de la Universidad Nacional de Costa Rica.

Tabilo, E. (2004). El Beneficio de los Humedales en la región Neotropical. Centro Neotropical de Entrenamiento en Humedales, La Serena, Chile, 73 pp.

Tabilo, E. R. Jorge, R. Riquelme, A. Mondaca, C. Labra, J. Campusano, M. Tabilo, M. Varela, A. Tapia & M. Sallaberry. Management and conservation of the habitats used by migratory shorebirds at Coquimbo, Chile. *International Waders Studies* 8: 79-84.

Tabilo, E., Burmeister, J., Chávez, C. & C. Zuckler (2016). Humedales y aves migratorias en la costa árida del Pacífico sudamericano. Etapa 1. Centro Neotropical de Entrenamiento en Humedales y Manfred Hermsen Stiftung. 93 pp.

Tabilo E., Vargas S., Casale J., Chávez C. (2021) Identificación de Áreas Prioritarias de Restauración del Humedal Desembocadura del Río Elqui y sus Subcuencas Aportantes, Región De Coquimbo. Licitación No.2/2020 Coquimbo Proyecto GEF Humedales Costeros, ONU Medio Ambiente. Ministerio del Medio Ambiente.

Tachet H., Richouxm P., Bournard M. and Usseglio P, (2003). *Invertébrés d'eau douce : Systématique, biologie, écologie*. CNRS editions, Paris.

Talley, J. L., Schneider, J., & Lindquist, E. (2016). A simplified approach to stakeholder engagement in natural resource management: The Five-Feature Framework. *Ecology and Society*, 21(4). <https://doi.org/10.5751/ES-08830-210438>

Testoni, D., & Villamil, C. B. (2014). Estudios en el género *Cortaderia* (Poaceae) I: Sistemática y nomenclatura de la sect. *Cortaderia*. *Darwiniana, nueva serie*, 2(2): 260-276.

Torres-Olvera, M. J., Durán-Rodríguez, O. Y., Torres-García, U., Pineda-López, R., & Ramírez-Herrejón, J. P. (2018). Validation of an index of biological integrity based on aquatic macroinvertebrates assemblages in two subtropical basins of central Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 46(5), 945–960. <https://doi.org/10.3856/vol46-issue5-fulltext-8>

Tomás Vives, P. (ed). 1996. *Monitoring Mediterranean Wetlands: A Methodological Guide*. MedWet Publication; Wetlands International, Slimbridge, UK and ICN Lisbon, 150 pp.

Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P. y Dobhal, R. (2013). Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 2013, Vol. 1, No. 3, 34-38.

UICN & WRI (2014). Guía sobre la Metodología de evaluación de oportunidades de restauración (ROAM): Evaluación de las oportunidades de restauración del paisaje forestal a nivel nacional o subnacional. Documento de trabajo (edición de prueba). Gland, Suiza: UICN. 125 pp

Underwood, A. J. (1994). On Beyond BACI: Sampling Designs that Might Reliably Detect Environmental Disturbances. *Ecological Applications*, 4(1), 3–15.
<https://doi.org/10.2307/1942110>

Universidad de California, Berkeley (2022). The Jepson Herbarium: *Triglochin*.
https://ucjeps.berkeley.edu/eflora/eflora_display.php?tid=9151 (consultada el 15 de febrero de 2022).

Urrutia J., Hauenstein E., Latsague M., Cárcamo P. & Silva M. (2020). Plantas acuáticas como bioindicadores de calidad de agua en la cuenca del Río Elqui, y análisis de sus respuestas ecofisiológicas frente a estresores ambientales. Id: 612228-9-LE19

Varekar, V., Yadav, V., & Karmakar, S. (2021). Rationalization of water quality monitoring locations under spatiotemporal heterogeneity of diffuse pollution using seasonal export coefficient. *Journal of Environmental Management*, 277.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111342>

Veloso A. y J. Navarro. 1988. Lista sistemática y distribución geográfica de anfibios y reptiles de Chile. *Bolletino del Museo Regionale di Scienze Naturali - Torino* 6(2):481-539.

Vidal, M. y A. Labra. 2008. *Herpetología de Chile*. Editorial Science Verlag, Santiago de Chile.

Vinogradov, A.P. (1954). *Geochemie Seltener und nur in Spuren Vorhandener Chemischer Elemente im Boden*. Akademie Verlag, Berlin. 249 pp.

Vivien, R., Casado-Martínez, C., Lafont, M., Ferrari, B. (2020). Efect Thresholds of Metals in Stream Sediments Based on In Situ Oligochaete Communities. *Environments*, 7, 31.
doi:10.3390/environments7040031.

Zeng, Jie, Han, G., Yang, K. (2020). Assessment and sources of heavy metals in suspended particulate matter in a tropical catchment, northeast Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 265: 121898.

Anexo 3: Secuencia Fotográfica Taller 2 piloto monitoreo en terreno (18 de marzo de 2022)

La actividad consistió en visitar sectores de la ribera del río y mostrar técnicas de muestreo para un adecuado monitoreo de la “salud del humedal”. La actividad buscó involucrar a diferentes actores en torno a la conservación del humedal. El punto seleccionado para el monitoreo demostrativo fue el Sitio GEFE12, aguas abajo del puente Fiscal. En la actividad se demostró la forma de muestrear fauna (anfibios, reptiles, aves y mamíferos), macrofitas y vegetación y macromamíferos en los 13 puntos de monitoreo propuestos, y monitoreo de macroinvertebrados.



Dr. César Chávez Villavicencio explicando la forma de monitorear fauna, y la forma como los índices de diversidad de fauna es un buen indicador de la salud del humedal. Marzo de 2022.



Biólogo Víctor Pastén explica a los asistentes la forma de muestrear macrofitas y su rol en establecer la salud de un humedal, y para monitorear en el tiempo el estado del humedal. Marzo de 2022.



Biólogo Jean Casale explica a los asistentes la forma de muestrear macroinvertebrados en el HCRE, y como los macroinvertebrados son buenos indicadores de la salud del humedal, y su utilidad para un programa de monitoreo de larzo plazo. Marzo de 2022.



Transecto a lo largo de un tramo del HCRE usado para muestreo de macrofitas, marzo de 2022.