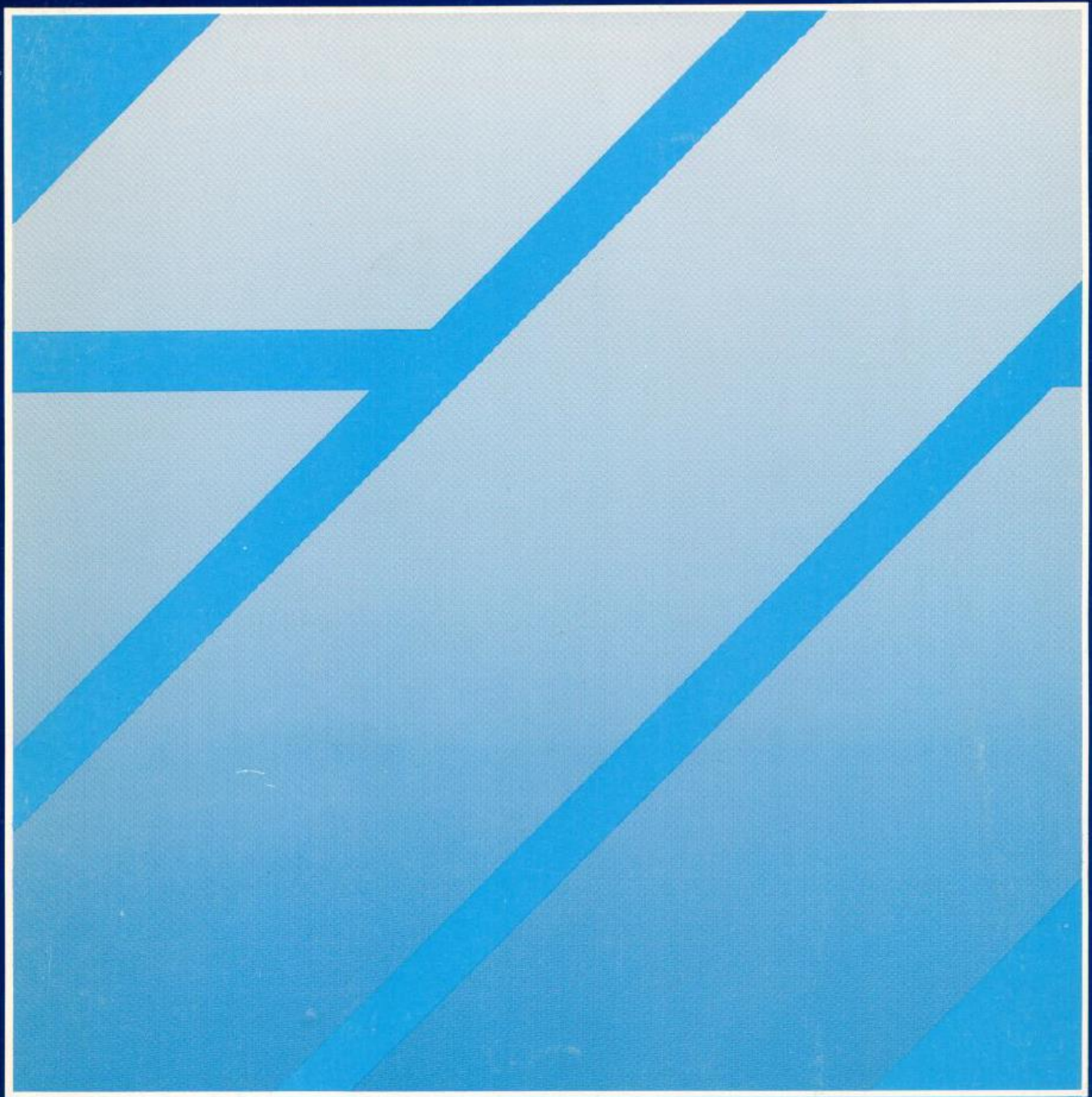




**Revista de la Sociedad Chilena  
de Ingeniería Hidráulica**



**ISSN 0716-3746 Volumen 38 Número 3, 2023**



REVISTA DE LA  
SOCIEDAD CHILENA DE  
INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCHID

Sede Instituto de Ingenieros de Chile – San Martín 352 – Fono 2 2698 4028 – Santiago CHILE

**DIRECTORIO SOCHID**

Presidente: *Hernán Alcayaga S.*  
Vicepresidenta: *Pamela Muñoz*  
Tesorero: *Damaris Orphanópoulos S.*  
Directores: *Cristián Núñez R.*  
*Aldo Tamburrino T.*  
Secretario General: *Francisco Romero B.*

**DIRECTORES HONORARIOS**

*Francisco J. Domínguez S. (Q.E.P.D.)*  
*Horacio Mery M.*  
*Eduardo Varas C.*  
*Sergio Radrigán V.*  
*Humberto Peña T.*  
*Ernesto Brown F. (Q.E.P.D.)*  
*Bonifacio Fernández L.*  
*Jorge Bravo S*  
*Luis Ayala R.*  
*Ludwig Stowhas B.*  
*Ricardo González V.*  
*José Vargas B.*  
*Luis Estellé A.*  
*Raúl Demangel C.*

**EDITOR DE LA REVISTA**

*Aldo Tamburrino Tavantzis*  
[atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)  
*San Martín 352, Santiago*  
*Fono 2 2698 4028*  
[www.sochid.cl](http://www.sochid.cl)





## REVISTA DE LA SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### ÍNDICE

Editorial .....	1
Levantamiento de un plan estratégico para la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica .....	3
Recuerdos de un maestro Alejandro López .....	5
Caracterización y evaluación de la calidad natural del agua para usos específicos en la cuenca del Río Bueno, Chile Catalina Jerez Toledo y Ximena Vargas Mesa .....	7
Evaluación de precipitación y temperatura de datos CR2MET y simulación WRF con convección explícita en Chile continental Sofía Segovia Escafi, Pablo Mendoza, Miguel Lagos Zúñiga y Lucía Scaff .....	23
Hidro-Grafía Aldo Tamburrino Tavantzis .....	37





## EDITORIAL

Hemos alcanzado el final de 2023 sin apenas percatarnos, y al hacer un recuento de las actividades de la Sociedad, destaca con fuerza el XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Este evento fue organizado por la Universidad Austral y tuvo lugar en Valdivia del 18 al 20 de octubre. La convocatoria fue un rotundo éxito, y muchos de los participantes atribuyen este logro al hecho de que se llevó a cabo de manera presencial.

El 2 de agosto se efectuó la Asamblea Anual de Socios, en la que participaron cerca de 40 socias y socios concluyendo, como es tradición, con una Charla Magistral, en esa oportunidad fue presentada por los socios Francisco Suárez Poch y José Francisco Muñoz Pardo, denominada “Informes científicos y técnicos que respaldaron la postura de Chile en el caso de la disputa por el estado y uso de las aguas en la cuenca del Río Silala ante la Corte Internacional de La Haya”, en la que se mostró el trabajo que respaldó desde el punto de vista técnico, de manera impecable, la posición chilena en la Corte Internacional. Este trabajo fue realizado en su totalidad por profesionales chilenos y, como sabemos, el resultado del juicio fue favorable para el país.

Durante octubre del año 2023, se dictó el curso orientado a profesionales de los recursos hídricos “Introducción a GoldSim Aplicado al Balance de Aguas”, impartido por la SOCHID con el patrocinio de Montgomery & Associates. El curso fue todo un éxito, llenándose rápidamente el cupo disponible para 30 participantes.

En este tercer y último número de la Revista para el año 2023, se presenta un resumen del plan estratégico que está elaborando nuestra Sociedad, con el que busca proyectarse a futuro de una forma amplia, efectiva y de acuerdo con los tiempos que se viven en el país. Además de dos artículos técnicos y una semblanza del Prof. H. Nakagawa, recientemente fallecido, la Revista termina con la tradicional Hidro-Grafía e invitando a colaborar con artículos y opiniones a todos quienes están interesados en las distintas áreas de la ingeniería hidráulica.

Por último, agradecemos la difusión de la Revista, cuyos números anteriores pueden descargarse del sitio web de la SOCHID, [www.sochid.cl/publicaciones-sochid/revista-sochid/](http://www.sochid.cl/publicaciones-sochid/revista-sochid/)

Aldo Tamburrino Tavantzis  
Editor



## **LEVANTAMIENTO DE UN PLAN ESTRATÉGICO PARA LA SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

La Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica está comenzando a trabajar en un Plan Estratégico, para organizar y enriquecer su quehacer, y proyectarse a futuro de una forma amplia, efectiva y de acuerdo con los tiempos que se viven en el país.

Según los estatutos que nos rigen, la existencia de la Sociedad se sustenta en los siguientes objetivos:

- a) Propender a un mayor contacto entre los profesionales que trabajan en las distintas áreas de la ingeniería hidráulica en el país.
- b) Difundir los estudios y proyectos que se realizan en este campo.
- c) Promover el perfeccionamiento profesional de los asociados mediante reuniones de trabajo, charlas, coloquios, congresos, publicaciones o una revista técnica.
- d) Mantener relaciones con instituciones académicas, especialmente con el Instituto de Ingenieros de Chile y las universidades nacionales.
- e) Establecer intercambio con ingenieros o entidades extranjeras de análogos intereses científicos y técnicos.
- f) Abordar problemas de interés general o nacional, desde el punto de vista fundamentalmente científico y técnico.
- g) Ausencia de sindicalismo y de lucro, ausencia de discriminación política o religiosa.

Para cumplir con estos objetivos, en la actualidad, la Sociedad exhibe entre sus actividades:

- Mantención del sitio web <https://www.sochid.cl/> , en el que se presentan las actividades e información relevante en el ámbito de la hidráulica, hidrología y temas afines.
- La publicación de la presente Revista, cuyos números se encuentran disponibles en el sitio.
- La organización de algunos congresos y jornadas. En forma bianual se realizan el Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, las Jornadas Francisco Javier Domínguez, el Congreso Chileno de Ingeniería Ambiental en Sistemas Acuáticos y el Seminario de Ingeniería y Operación Portuaria, de los cuales se obtienen los fondos para la operación de la Sociedad.
- La realización de algunos cursos, en general ligados a los eventos de congresos y jornadas.
- La realización de entrevistas a profesionales o socios destacados, las cuales son publicadas en la sección Entrevistas del sitio web de la SOCHID.

No obstante, el Directorio actual está en busca de nuevas formas de entusiasmar a los socios, especialmente a los más jóvenes, a participar activamente de la vida de la Sociedad.

Para ello, en primer lugar, se buscó nombrar una Comisión para el Plan Estratégico, la cual, después de algunos ajustes, quedó conformada en octubre 2023, por los siguientes integrantes:

- Basilio Espíldora
- Carlos Salazar
- Ximena Vargas
- Matías Pinto
- Alfonso Pizarro

Esta comisión operará en forma autónoma e independiente del Directorio, pero se coordinará con éste a través de la Directora Pamela Muñoz.

En una reunión preparatoria, llevada a efecto en julio 2023, en la que participaron los ingenieros Basilio Espíldora y Alonso Pizarro, se levantaron los temas que como mínimo debieran ser debatidos en esta Comisión, que serían los siguientes:

- Lograr mayor presencia y contribución de la SOCHID a la esfera pública.
- Organizar conversatorios bimensuales sobre temas relevantes, técnicos y científicos.
- Buscar financiamiento con empresas consultoras y empresas.
- Promover la incorporación de la juventud y de los “senior” a la Sociedad y a sus actividades, logrando que ellos perciban que hay un valor agregado en pertenecer a la Sociedad. En el caso de los jóvenes, existe como precedente en la experiencia internacional la Young Hydrologic Society (<https://younghs.com>).

En relación con la metodología a aplicar para levantar este Plan, se contará con la asesoría y la experiencia del Instituto de Ingenieros, que recientemente ha levantado su propio Plan Estratégico para los próximos 5 años. No obstante, como Directorio quedamos atentos a las propuestas, tanto metodológicas como de contenido, que pudieran aportar nuestros socios y profesionales amigos para el levantamiento de este Plan, con el fin de fortalecer el logro de nuestros objetivos.

Directorio SOCHID

## RECUERDOS DE UN MAESTRO

En octubre pasado recibí la triste noticia del fallecimiento, a pocos días de cumplir 92 años, del Profesor Dr. Hiroji Nakagawa, en Kyoto, su ciudad natal.

El profesor Nakagawa realizó toda su actividad docente en la Universidad de Kyoto hasta su retiro en 1995, ocasión en que la Universidad le otorgó la distinción de Profesor Emérito recibiendo además el homenaje de la comunidad hidráulica internacional a través de una publicación conmemorativa en la cual se incluyen aportes y saludos de destacados académicos e ingenieros que tuvieron en algún momento una relación académica, profesional y de amistad con el profesor Nakagawa.

Mi relación con el profesor Nakagawa comenzó a fines de 1976 cuando, en calidad de estudiante de investigación, me incorporé a su equipo en el área de transporte de sedimentos, iniciando así una relación que con el tiempo se convirtió en una amistad cercana entre nosotros y nuestras familias.

Largo sería enumerar los aportes que el profesor Nakagawa y su equipo de investigación en las áreas de turbulencia y en transporte de sedimentos, encabezadas por los profesores Iehisa Nezu y Tetsuro Tsujimoto respectivamente, aportaron al conocimiento y avance de estas disciplinas lo que se plasmó, además de publicaciones en revistas y congresos, en sendos libros en cada tema.

Pero quisiera referirme a la relación del profesor Nakagawa con el entonces Centro de Recursos Hidráulicos (CRH) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, donde en 1981 participó como Profesor Visitante.

Durante su estadía en el CRH dictó dos seminarios a los cuales asistieron numerosos ingenieros interesados en estas temáticas. Uno de los seminarios abordó el tema “Socavación Local y Sedimentación en Embalses” y el otro “Fluctuaciones Turbulentas del Flujo en el Transporte de Sólidos”. Del primero se editó una publicación con el mismo nombre (CRH 81-3-E Marzo 1981).

Colaboró también activamente en estudios que en ese momento se estaban desarrollando en el CRH, entre otros el estudio en modelo reducido de la bocatoma Maule, el cual formaba parte del proyecto del Embalse Colbún de Endesa.

En varias ocasiones visitamos ríos de montaña, tema de interés en el CRH, manifestando el profesor Nakagawa su gran impresión de poder contemplar cauces en su condición natural sin intervenciones humanas como era la situación de la mayoría de los ríos en Japón.

Pero además de su aporte científico y profesional, no se puede dejar de destacar muy fuertemente el lazo humano que caracterizó al profesor Nakagawa, quien junto con su esposa Aiko compartió agradables encuentros con los profesores del CRH y sus familias. Su estadía

en Chile fue siempre recordada con mucho sentimiento por el profesor Nakagawa, lo que se manifestó incorporando en la publicación conmemorativa de su retiro una fotografía en la que aparece con las estudiantes de ingeniería que estaban haciendo su memoria en el CRH, puesto que también fue muy sorprendido de la presencia de tantas estudiantes en un Centro de Ingeniería, situación que en esos tiempos no se daba en Japón.



En otro plano, el profesor Nakagawa antes y después de su retiro fue comisionado por el gobierno de Japón a asesorar a los ingenieros y académicos de Kenia en el estudio de problemas asociados a inundaciones y obras hidráulicas, participando y apoyando en la formación de una Universidad y en la creación de grupos de trabajo e investigación en las áreas de su competencia.

En Japón, a sus actividades académicas añadió su participación activa en el Comité Nacional de Normas de Prevención de Inundaciones, organismo que presidió por varios años.

Por su trabajo profesional y académico recibió numerosas distinciones y homenajes, pero no cabe duda de que la más significativa fue la que en mayo de 2010 le otorgó el Emperador de Japón “Condecoración en Alto Grado como Reconocimiento a su Labor y Servicios Prestados a Japón”

Estoy seguro de que quienes compartimos en Chile con el profesor Hiroji Nakagawa tuvimos la ocasión de conocer y valorar su obra y la de su equipo lamentamos su partida y agradecemos su trabajo

Alejandro López Alvarado  
[ala@vtr.net](mailto:ala@vtr.net)

# CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD NATURAL DEL AGUA PARA USOS ESPECÍFICOS EN LA CUENCA DEL RÍO BUENO, CHILE

CATALINA JEREZ TOLEDO<sup>1</sup>, XIMENA VARGAS MESA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile  
[catalina.jerez@amtc.uchile.cl](mailto:catalina.jerez@amtc.uchile.cl)

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile  
[xvargas@uchile.cl](mailto:xvargas@uchile.cl)

## RESUMEN

El presente estudio se desarrolla en la cuenca del Río Bueno, situada en la región sur de Chile, una zona que ha experimentado un impacto significativo en sus recursos hídricos. Estos recursos son de vital importancia tanto para la agricultura como para el abastecimiento de agua potable (DGA, 2021). Nuestros objetivos radican en caracterizar la calidad del agua en la cuenca del río Bueno y desarrollar dos índices de calidad del agua específicamente diseñados para evaluar la idoneidad del agua para el tratamiento de agua potable y fines de riego en Chile, denominados como ITUC y QII, respectivamente. Los resultados indican que los análisis químicos de los ríos revelan bajas conductividades específicas, lo que se traduce en bajas concentraciones de sólidos suspendidos, y valores de pH dentro del rango óptimo según las normativas NCh409 y NCh1333. Sin embargo, se observan concentraciones superiores a los límites máximos permitidos de boro, mercurio, aluminio, cobre y molibdeno. Además, se identifican cambios en el estado de oligotrofia a mesotrofia en los ríos, según los niveles de nutrientes. En lo que respecta a los resultados de los Índices de Calidad del Agua (WQI), estos indican que la calidad del agua en los ríos Negro, Rahue, Pilmaiquén y Bueno es regular en términos de su idoneidad para procesos de purificación de agua potable y su posterior uso en actividades agrícolas y consumo como agua potable. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas interpretaciones están condicionadas por la elección de los parámetros químicos analizados y la limitada disponibilidad de información.

**Palabras claves:** calidad del agua, índice de calidad del agua, potabilización, riego.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Existe un amplio consenso sobre las posibles consecuencias ambientales, sociales y económicas del cambio climático futuro, especialmente aquellas relacionadas con la disminución de los recursos hídricos (IPCC, 2021, 2022). La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) considera el agua como un factor clave en el desarrollo económico, social y cultural que mantiene la integridad de los sistemas terrestres. La GIRH incluye, entre muchos otros factores, la calidad del agua (Biswas, 2004), que puede

clasificarse en tres categorías —física, química y biológica—, según los parámetros utilizados. La deterioración de la calidad del agua puede afectar el consumo de agua potable, la recreación, el uso (no-) consuntivo, la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos. Además, el crecimiento de la población, la expansión demográfica, el desarrollo industrial y económico requieren cada vez más agua, la que suele obtenerse mediante la extracción simultánea (en muchas ocasiones) de fuentes de agua superficiales y subterráneas.

Debido a que las políticas de protección y asignación óptima de diferentes usos/consumos del agua deben determinarse según las características de cada sistema, se han desarrollado muchos índices de calidad del agua (WQI por sus siglas en inglés) (Banda & Kumarasamy, 2020; Kachroud et al., 2019; Sneha Shankar Phadatare & Prof. Sagar Gawande, 2016; Sutadian et al., 2016; Tyagi et al., 2020). Para obtener más detalles, consulte Chidiac et al., (2023), donde se presenta una revisión completa de los índices disponibles en la literatura. Pero sus interpretaciones dependen del uso del agua considerado por cada autor. El WQI es una herramienta valiosa para evaluar y cuantificar la calidad general del agua basada en múltiples parámetros e indicadores. Considera características físicas, químicas y biológicas del agua, como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la turbidez, los nutrientes, los metales pesados y los contaminantes microbianos. Al combinar y ponderar estos parámetros, el WQI proporciona un valor numérico único que representa la calidad general del agua.

El desarrollo y la aplicación del WQI han sido impulsados por la necesidad de monitorear y gestionar eficazmente los recursos hídricos, especialmente en el contexto del cambio climático y sus posibles impactos en la calidad del agua. Como se mencionó en los párrafos anteriores, el cambio climático puede influir en la calidad del agua a través de cambios en la temperatura, los patrones de precipitación y los ciclos hidrológicos, lo que puede afectar la disponibilidad y contaminación de las fuentes de agua (IPCC, 2021). El WQI se ha utilizado en diversos estudios para evaluar la calidad del agua en diferentes regiones y contextos, incluyendo ríos, lagos y otros cuerpos de agua. Ayuda a evaluar la idoneidad del agua para diferentes fines, como el consumo humano, el riego y el soporte de la vida acuática

En este estudio, presentamos el desarrollo de dos índices de calidad del agua específicamente diseñados para evaluar la idoneidad del agua para el tratamiento de agua potable y fines de riego en Chile. Lo que distingue nuestra aproximación de los métodos encontrados en la literatura existente es el enfoque específico de cada índice. Mientras que trabajos previos de (Banda & Kumarasamy, 2020; Kachroud et al., 2019; Tyagi et al., 2020) exploran de manera exhaustiva una amplia gama de factores que abarcan los índices de calidad del agua, como los niveles de oxígeno, aspectos sanitarios, riesgos para la salud, riesgo de eutrofización, características físicas y sustancias disueltas que afectan la calidad del agua, nuestra propuesta se centra en la evaluación de parámetros específicos esenciales para i) el tratamiento del uso y consumo del agua potable y ii) fines de riego.

Al centrarse en parámetros cruciales de la NCh409 (INN, 2005) y NCh1333 (INN, 1987), nuestros índices tienen como objetivo proporcionar una evaluación más especializada y contextualmente relevante de la calidad del agua, atendiendo directamente a los requisitos únicos de las aplicaciones de agua potable e irrigación en el contexto chileno. Por otro lado,



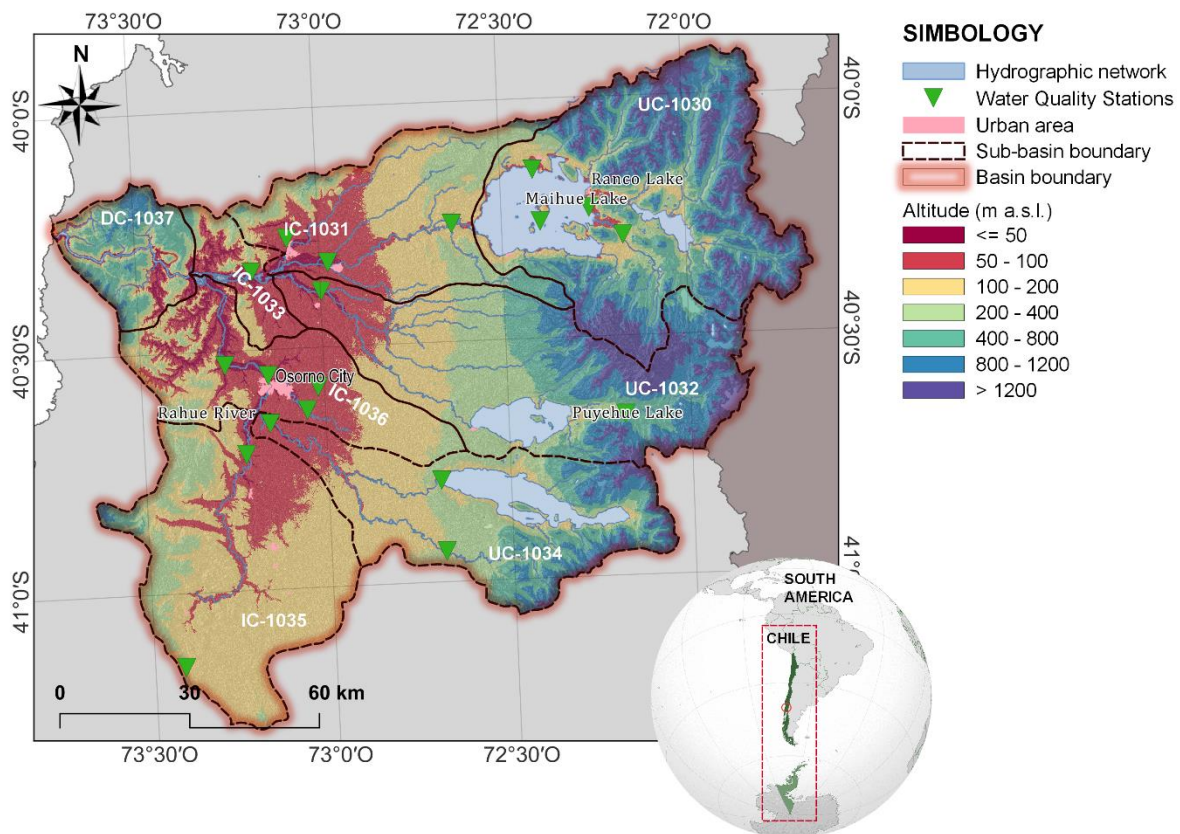
buscamos comprender y caracterizar la calidad del agua en la cuenca del río Bueno, con objeto de determinar cuáles son las principales fuentes de contaminación y cómo estas afectan la calidad del agua.

## 2. ZONA DE ESTUDIO

La sección proporciona una descripción de la cuenca en términos de su ubicación geográfica, las estaciones de monitoreo de calidad del agua, los usos del agua y la calidad del agua.

### 2.1. Descripción de la cuenca

La cuenca del río Bueno (15,367 km<sup>2</sup>) abarca partes de las regiones de Los Ríos y Los Lagos, en el sur de Chile (40°20'S 72°57'O), con ocho subcuencas distribuidas en su interior (**Figura 1**), definidas por la Dirección General de Aguas (DGA) e identificadas con la notación Banco Nacional de Aguas (BNA). Las subcuencas se clasifican en cordilleranas (UC), intermedias (IC) y costeras (DC), asociadas a regímenes nivo-pluviales, pluvio-nivales y pluviales, respectivamente.



**Figura 1.** Ubicación geográfica y red hidrométrica de la cuenca del río Bueno. Subcuencas: Afluentes del Lago Ranco (UC-1030), Río Bueno entre el Lago Ranco y el Río Pilmaiquén (IC-1031), Río Pilmaiquén (UC-1032), Río Bueno entre el Río Pilmaiquén y el Río Rahue (IC-1033), Río Rahue antes de unirse al Río Negro (UC-1034), Río Negro (IC-1035), tramo inferior del Río Rahue (IC-1036) y tramo inferior del Río Bueno (DC-1037).

## 2.2. Estaciones de calidad del agua

Las estaciones de calidad del agua en Chile desempeñan un papel fundamental en la evaluación y gestión de la salud de los ecosistemas acuáticos, así como en la seguridad de los recursos hídricos para el consumo humano y uso industrial. Estas estaciones recopilan datos sobre diversos parámetros, que incluyen la temperatura del agua, el pH, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica y otros parámetros analizados en laboratorio. Las estaciones de calidad del agua están estratégicamente ubicadas en todo Chile para garantizar un monitoreo integral. Por lo general, se encuentran a lo largo de los ríos principales, lagos, áreas costeras y cerca de zonas industriales donde los riesgos de contaminación son más altos. Debido a la disponibilidad de estaciones y los recursos para el monitoreo, la red de mediciones en las cuencas opera de manera esporádica, informando en promedio unas cuatro veces al año (es decir, una medición para cada estación del año).

Las estaciones de calidad del agua chilenas miden una amplia gama de parámetros para evaluar la salud de los sistemas acuáticos. Estos incluyen:

- Parámetros físicos: temperatura, profundidad del agua, turbidez y tasas de flujo.
- Parámetros químicos: pH, demanda química y bioquímica de oxígeno, niveles de nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados, aniones y cationes, y contaminantes orgánicos.
- Parámetros biológicos<sup>†</sup>: presencia y abundancia de especies indicadoras como macroinvertebrados y fitoplancton, que indican la salud del ecosistema. (Los parámetros marcados con † se miden de manera esporádica y en ríos y lagos seleccionados).

## 2.3. Usos del agua

Los usos del agua en la cuenca del río Bueno son diferenciados según los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DDA), siendo in-situ, extractivo, para la biodiversidad y DDA otorgados a comunidades indígenas (DGA, 2004). Los DDA se constituyen por acto de autoridad o por reconocimiento, tienen carácter de derecho real y permiten al titular su uso, goce y disposición a perpetuidad. Los DDA pueden ser de carácter consuntivo y no consuntivo, al igual que poseen características de ejercicio y volumen por unidad de tiempo (**Tabla 1**).

**Tabla 1.** Derechos de Aprovechamiento de Aguas asignados en la cuenca del río Bueno. Los DDA-consuntivos consideran la extracción superficial y subterránea y son destinados a actividades para bebida, uso doméstico, saneamiento, riego, silvoagropecuarias, piscicultoras, entre otros usos. Los DDA-no consuntivos se destinan a generación de energía hidroeléctrica y piscicultura.

Uso	Derecho asignado (m <sup>3</sup> /s)
Consuntivo	81,7
Superficial	74,1
Subterráneo	7,6
No consuntivo	1.879,1

Adaptado de: Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2018)

### 2.3.1. Usos *in situ*

Los usos *in-situ* del agua se refieren a aquellas actividades en las que el recurso hídrico se utiliza directamente o en las cercanías de su fuente principal sin un consumo significativo (es decir, uso no-consuntivo). En la cuenca del río Bueno, las principales actividades de este tipo incluyen la acuicultura, la pesca deportiva y recreativa, así como la generación hidroeléctrica, todas las cuales tienen un impacto en la calidad del agua de la cuenca.

La acuicultura es una actividad relevante en la cuenca, especialmente en lo que respecta a la piscicultura. Se identificaron 18 centros operativos en la cuenca y 17 centros que no estaban operativos en el momento del censo (Proyecto-FIPA-2016-19, 2017). Esta actividad tiene un impacto significativo en la calidad del agua debido a la cría y cultivo de especies acuáticas.

En cuanto a la generación hidroeléctrica, la cuenca del río Bueno cuenta con un potencial hidroeléctrico de 807,3 MW, según la información proporcionada por el Ministerio de Energía. Hasta el año 2015, se encontraban operativas 20 centrales hidroeléctricas en la cuenca, de las cuales el 75% eran del tipo hidroeléctricas de pasada y el 25% restante eran mini hidroeléctricas de pasada (CNE, 2020).

### 2.3.2. Usos *extractivos*

Cuando se extrae o consume un recurso fuera de su lugar de origen, se le denomina uso extractivo, también conocido como uso consuntivo. En la cuenca del río Bueno, los usos extractivos principales incluyen el riego, el suministro de agua potable y las actividades industriales.

El agua destinada al riego se divide en dos categorías: irrestricto y restringido. El riego irrestricto implica que el agua es adecuada para su uso regular en cultivos agrícolas, praderas naturales y plantaciones forestales. Por otro lado, el riego restringido implica que se debe controlar el uso del recurso en las diversas etapas de desarrollo de los cultivos. Un estudio realizado por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (UCHile, 2016) reveló que la superficie cultivada en la cuenca del río Bueno abarca 270,84 km<sup>2</sup>.

En cuanto al uso extractivo relacionado con la captación de agua potable, este considera la extracción de agua para las plantas de tratamiento destinadas al abastecimiento residencial e industrial. Es importante destacar que un alto porcentaje de la población en la cuenca se abastece a través de sistemas de Agua Potable Rural (APR), y se han identificado 122 sistemas en funcionamiento hasta el año 2019 (DOH, 2019). Un análisis SIG obtenido del Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico indica que las subcuencas IC-1031, UC-1032 e IC-1035 son las que cuentan con la mayor cantidad de sistemas APR.

En lo que respecta a los servicios sanitarios, la Empresa de Servicios Sanitarios de Los Lagos (ESSAL) es la entidad responsable de la concesión del agua potable y los servicios de alcantarillado en la cuenca del río Bueno. Por lo tanto, ESSAL supervisa los puntos operativos que se detallan posteriormente en la Figura 3.2, abarcando áreas en Futrono, La Unión, Lago Ranco, Osorno y Río Bueno.

## **2.4. Calidad del agua**

En el informe "Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Bueno" emitido por la DGA en 2004, se concluye que la calidad del agua superficial en la cuenca es, en general, buena, basándose en las clases de calidad que varían de excepcional a 4. Se destaca que los cursos de agua en la cuenca muestran una abundancia de ciertos elementos como cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe) y aluminio (Al). La presencia de estos parámetros se debe principalmente a las características geológicas y edafológicas propias de la cuenca. Además, se señala que las altas precipitaciones y la extensa cobertura vegetal en la región tienen un efecto positivo en la calidad del agua de los ríos.

A pesar de la calificación general de buena calidad del agua superficial, existen factores naturales y antropogénicos que pueden afectar negativamente esta calidad. Entre los primeros, se menciona la lixiviación subterránea de formaciones geológicas y la contribución de aguas subterráneas como los principales incidentes en la calidad del agua superficial. En cuanto a los factores antropogénicos, se destaca la contaminación difusa, que proviene de actividades agrícolas (uso de plaguicidas y fertilizantes), ganaderas y la descarga de aguas residuales. Además, la contaminación por la liberación de RILES (Residuos Líquidos Industriales) se registra en a lo menos cuatro puntos de control de la cuenca (río Bueno en Trumao, Damas en Tacamo, Negro en Chahuilco y Rahue en Forrahue.).

Posteriormente, en un informe realizado por Oporto y Ecodesa en 2013, se evaluó la calidad de las aguas de la cuenca del río Bueno, centrándose en el riesgo de eutrofización de los cuerpos de agua. Se destacó que el Lago Ranco se encontraba en un estado oligotrófico (con bajos niveles de fósforo y alta transparencia), a pesar de la carga externa (proveniente de fuentes puntuales y difusas) de fósforo y nitrógeno de 160 toneladas y 718 toneladas al año, respectivamente. Además, se mencionó que, en general, la cuenca mantenía una buena calidad del agua, con ríos que presentaban un pH en el rango de 7,0 a 7,4 y conductividades específicas bajas.

No obstante, en un informe de Zelada en 2017 se indicó un avance hacia la mesotrofia en los cuerpos lacustres de la cuenca, atribuible principalmente a las descargas de pisciculturas y otras fuentes, como las descargas de plantas de tratamiento. Esto resalta la necesidad de una gestión continua y cuidadosa de los recursos hídricos en la cuenca del río Bueno para preservar su calidad en el futuro.

## **3. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA**

Un enfoque general para desarrollar Índices de Calidad del Agua (WQIs) considera i) la selección de una serie de parámetros, a través del juicio de expertos y agencias gubernamentales, ii) la obtención de valores de subíndices, es decir, la transformación a una escala estándar en la que cada parámetro químico se convierte en un valor adimensional de su unidad (mg/L, porcentaje, saturación, cuentas/volumen) y iii) la agregación de los subíndices con la expresión matemática (frecuentemente se utilizan promedios aritméticos o geométricos). Este enfoque ha permitido estudiar la calidad del agua desde diferentes perspectivas (Boyacioglu, 2007; Cude, 2001).

Desarrollamos dos índices de calidad del agua: (1) Índice para el Tratamiento de Uso y Consumo del Agua Potable (ITUC) y (2) Índice de Calidad para Riego (QII). Estos se basan en la ecuación propuesta por Horton (1965), que consiste en el promedio ponderado de otros subíndices.

$$WQI = \sum_{i=1}^n S_i \cdot w_i \quad (1)$$

donde WQI es el índice agregado; n es el número total de índices de subíndices  $S_i$ , y  $w_i$  es el peso del i-ésimo subíndice  $S_i$ , con la suma de  $w_i$  igual a 1. Por ejemplo, si los parámetros seleccionados son Cu, Cr y Fe, cada parámetro se transforma a una escala estándar ( $S_i$  en el rango de 0 a 100), por lo que se convierte en un valor adimensional. La escala estándar depende de los registros de los parámetros de las estaciones de calidad del agua y de la función polinómica aplicada por el autor. Ahora, supongamos que Cu, Cr y Fe son  $S_i(x > 2)$  definidos por la Ecuación (2) y tienen pesos asignados de 3, 2 y 3, respectivamente. Esto significa que el peso de cada subíndice  $S_i$  es 0.375 (3/8), 0.25 (2/8) y 0.375 (3/8), lo que resulta en una suma de  $w_i$  igual a 1.

$$S_i(x) = \begin{cases} 2x^2 - 5x + 1x & , \text{if } x \leq 2 \\ 3x^2 + 2x + 3x & , \sim \end{cases} \quad (2)$$

Utilizamos parámetros físicos y químicos, parámetros inorgánicos y metales (no-) esenciales que producen efectos adversos para la salud. Descartamos parámetros debido a: (i) ausencia de registros en la cuenca (color, CN-, DBO, F-,  $NH_4^+$  y Sólidos en Suspensión Totales) y (ii) problemas con el límite de detección en las mediciones (Ag, As, Cd, Pb, Se y Zn).

### 3.1. Índice para el tratamiento de uso y consumo del agua potable (ITUC)

El ITUC describe la calidad de los recursos de agua potable destinados al tratamiento para su uso y consumo. Los parámetros críticos se seleccionan en función de las normas existentes para el agua potable, que están definidas en la Norma Oficial Chilena: Agua Potable: Parte 1 - requisitos (NCh409; (INN, 2005)). Los parámetros adicionales incluyen ortofosfato, nitrato y temperatura como indicadores de requisitos ecológicos (MMA, 2017).

En el paso (i) del enfoque general del Índice de Calidad del Agua (WQI), realizamos una clasificación de los contaminantes químicos en función de su importancia, considerando los más relevantes en las normas y programas de monitoreo nacionales. En el paso (ii), generamos los subíndices asignando curvas de regresión no lineales a los parámetros seleccionados, siguiendo el enfoque de Cude (2001). Como resultado, cada subíndice tiene una escala de calidad relativa, donde los valores bajos representan mala calidad del agua y los valores altos indican excelente calidad del agua. Finalmente, el paso (iii) implica la agregación de los subíndices del ITUC utilizando la Ecuación (1).

Este enfoque permite obtener un índice entre 0 y 100, lo que permite su clasificación en una escala cualitativa. En este caso, la calidad del agua natural destinada al tratamiento para su

uso y consumo, según el ITUC, puede ser excelente (95 a 100), buena (75 a 94), aceptable (60 a 74), marginal (40 a 59) y deficiente (0 a 39). Aplicamos una clasificación conservadora al índice considerando la falta de información sobre parámetros químicos perjudiciales para la salud humana (por ejemplo, As, CN-, F-, E. coli) y las opiniones de expertos en calidad del agua.

### **3.2. Índice de calidad del agua para riego (QII)**

La Norma Chilena (NCh) 1333 (INN, 1987) establece los requisitos para el agua destinada a diferentes usos, incluido el riego. La norma establece concentraciones máximas para elementos químicos, orgánicos y microbiológicos que el recurso puede contener. Sin embargo, la norma no es obligatoria, por lo que no existe (ni debería existir) un organismo de supervisión para regular el agua de riego.

El Índice de Calidad para Riego (QII) se formula para estudiar la calidad del agua para uso agrícola y considera principalmente los requisitos de NCh1333, CONAMA (2003) y MMA,(2017). Para la generación de los subíndices, se utilizan las curvas basadas en cinco clases de calidad del agua (excepcional, 1, 2, 3, 4). Según el QII, la calidad del agua natural para uso agrícola puede ser excelente (90 a 100), buena (70 a 89), regular (50 a 69), marginal (25 a 49) y deficiente (0 a 24).

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Caracterización química de los ríos**

Del total de parámetros químicos medidos por DGA, se seleccionan veintisiete parámetros químicos debido a la extensión temporal de cada uno. El análisis químico se realiza en base a normas, por lo cual, si un parámetro químico excede la norma, por ejemplo, en el caso del ITUC, no necesariamente significa que el agua no es apta para potabilizar, sino que no cumple con la norma para su consumo directo; es decir, el agua debe tener un tratamiento antes de ser destinada al uso/consumo de agua potable.

Análisis de estadísticos no presentados en estudio, pero disponibles en (Jerez Toledo, 2021), muestran que entre los parámetros químicos seleccionados el cadmio (Cd), hierro (Fe), y mercurio (Hg), exceden o igualan los límites máximos permisibles de la NCh409/1. Por otro lado, el aluminio (Al) y boro (B), superan los valores de referencia de las Guías de calidad del agua potable (WHO, 2011).

#### *4.1.1. Límites de detección*

El límite de detección (LD) se refiere al nivel más bajo de concentración de una sustancia que puede ser detectada y cuantificada de manera confiable por un método analítico específico. Cuando el valor del parámetro químico obtenido en un laboratorio está por debajo del límite de detección, significa que la concentración de esa sustancia en la muestra es tan baja que el método analítico no puede detectarla con precisión.

En el contexto del análisis de calidad del agua, el LD se determina para cada parámetro químico para evaluar la sensibilidad del método utilizado. Si un valor se repite

constantemente por debajo del límite de detección, esto sugiere que el método analítico no es lo suficientemente sensible para detectar el parámetro a esas concentraciones bajas. En este caso, se considera que el parámetro está "fuera de rango" del método y no puede ser medido de manera confiable en ese laboratorio con esa técnica.

Se analizan los LD de los parámetros físicos y químicos, parámetros inorgánicos, y elementos (no-) esenciales en la cuenca del río Bueno. Los resultados indican que el arsénico (As < 0,001 mg/L), cadmio (Cd < 0,01 mg/L), plata (Ag < 0,01 mg/L), plomo (Pb < 0,01 mg/L), selenio (Se < 0,001 mg/L), y zinc (Zn < 0,01 mg/L), se repiten permanentemente como resultado del análisis de laboratorio. Por lo tanto, estos parámetros quedan excluidos de posteriores análisis de la calidad del agua de la cuenca.

#### 4.1.2. Análisis de potabilización

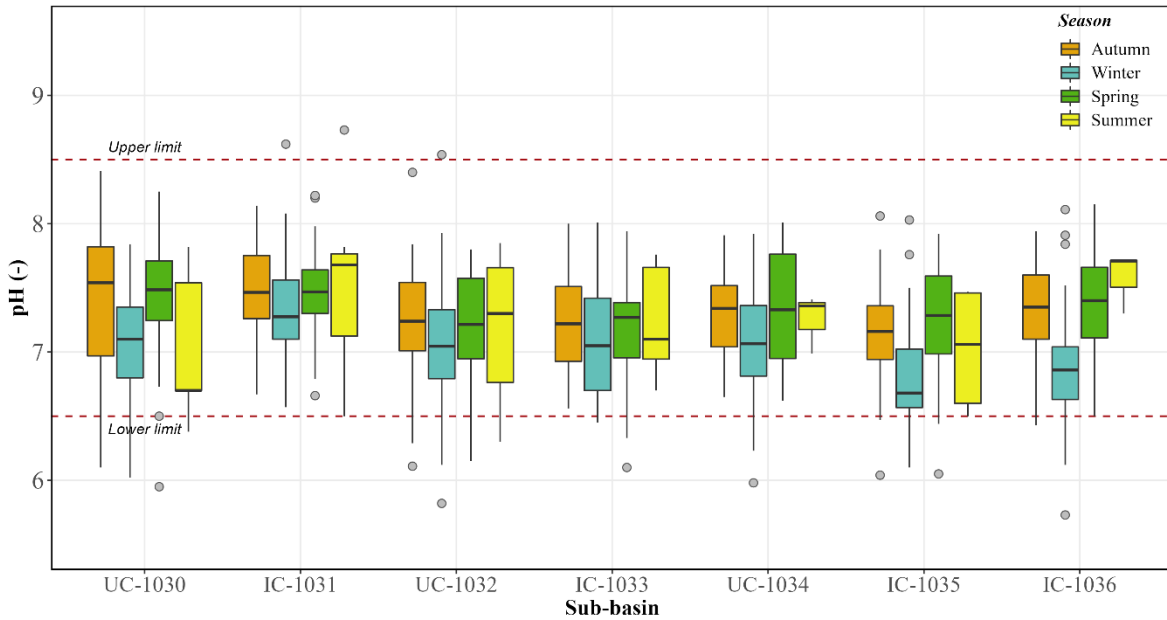
El nivel de potabilización del agua natural se determina según las clases de calidad de (CONAMA, 2003). Según estas instrucciones, los ríos de las subcuencas cordilleranas (UC) e intermedias (IC) presentan calidades similares. En las clases excepcionales se encuentran Cl-, CE, Cr, Fe, Mn, DO, TDS y SO4<sup>2-</sup>. En la clase 1, destaca especialmente el Mn en la subcuenca IC-1036; en la clase 2, Cu, Mo y Mn en la subcuenca IC-1035. En la clase 3 se detecta Al, y en la clase 4, B y Hg.

Las aguas que contienen parámetros químicos clasificados en la clase 4 indican que el agua no es apta para la conservación de las comunidades acuáticas ni para usos prioritarios, sin perjuicio de su utilización en el tratamiento adecuado para el consumo humano o fines industriales. En la cuenca del río Bueno, dos parámetros pertenecen a la clase 4: el boro (B) y el mercurio (Hg). El boro es un metaloide que se encuentra naturalmente en las aguas subterráneas, pero su presencia en las aguas superficiales se debe principalmente a la descarga de aguas residuales tratadas (WHO, 2011). En la cuenca del río Bueno, la presencia de boro se debe a factores naturales (lixiviación subterránea de formaciones geológicas) y antropogénicos (contaminación difusa de aguas residuales) (DGA, 2004). La exposición a cantidades elevadas de boro puede afectar el estómago, los intestinos, el hígado, los riñones y el cerebro (ATSDR, 2010).

Por otro lado, el mercurio es el cuarto metal más tóxico (Pandey & Madhuri, 2014). Es un elemento que se encuentra de forma natural en el aire, el agua y el suelo, y se presenta en forma elemental (o metálica) o como compuestos orgánicos e inorgánicos (WHO, 2005). La contaminación por mercurio a nivel acuático se debe a la interacción de bacterias con el elemento (Hg). Cuando se forma metilmercurio (compuesto orgánico), este se bioacumula en peces y mariscos y genera un proceso de bioamplificación. El metilmercurio es tóxico para el sistema nervioso central y periférico, puede afectar los riñones y los pulmones, causando daño en los tejidos mucosos del cuerpo, lesiones en la piel, órganos digestivos y renales (OMS, 2006).

La Figura 2 muestra las variaciones en el pH según temporada. En general, el pH se mantiene en el rango óptimo (6,5 a 8,5) según la normativa NCh409. El pH más ácido se presenta en las estaciones frías (otoño-invierno), con mínimos registrados de 5,29 y 3,74 en las subcuencas IC-1035 e IC-1036, respectivamente. Por otro lado, el pH tiende a volverse

alcalino con el aumento de las lluvias y las temperaturas, con máximos de 9,91 y 9,12 registrados en las subcuencas IC-1031 y UC-1032.



**Figura 2.** Histogramas de la variación estacional del pH. Las líneas punteadas representan los límites máximos permitidos para el pH (6.5 - 8.5) según la norma NCh409 (INN, 2005). La figura muestra las estaciones de otoño, invierno, primavera y verano.

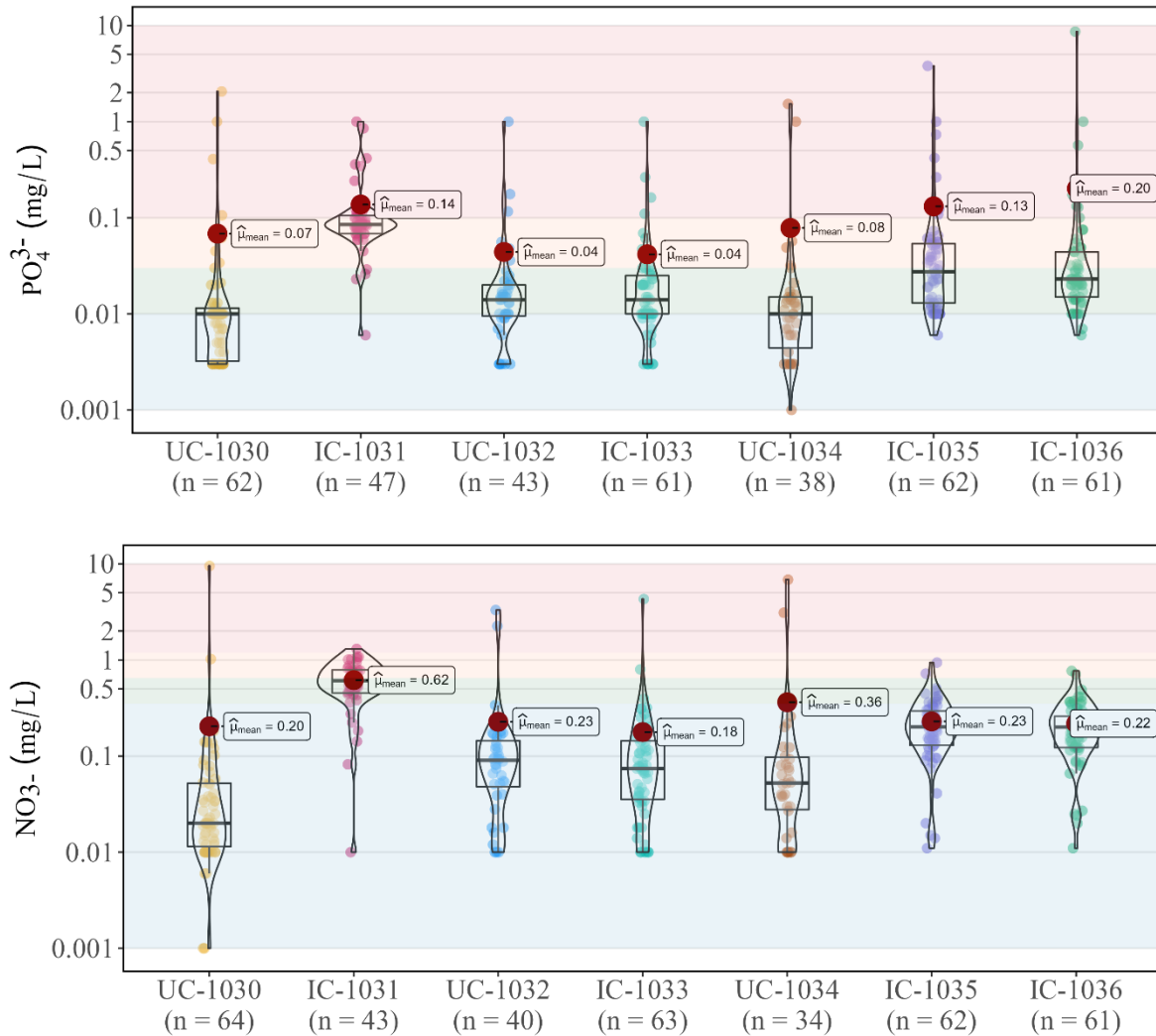
Un análisis de correlación entre el ortofosfato ( $PO_4^{3-}$ ) y el nitrato ( $NO_3^-$ ) con la variación de la temperatura del agua ( $\Delta Ta$ ) muestra que no existe una correlación significativa entre los nutrientes y la temperatura, pero es factible apreciar la relación inversamente proporcional de  $PO_4^{3-}$  y  $NO_3^-$ . El  $PO_4^{3-}$  supera el límite de un estado oligotrófico, según el MMA (2017). Específicamente, los ríos de las subcuencas UC-1030, UC-1032 e IC-1035 muestran una transición de un estado oligotrófico a mesotrófico.

Cabe señalar que el río Rahue (en el sector de la subcuenca IC-1036) y su afluente, el río Negro (IC-1035), reciben descargas de ESSAL. La Figura 3 muestra que los ríos Rahue y Negro presentan valores promedio de  $PO_4^{3-}$  equivalentes a características de hipertrofia; sin embargo, la mediana de las muestras refleja una condición mesotrófica. Esto implica que las concentraciones de  $PO_4^{3-}$  han mostrado un aumento sostenido con el tiempo o reflejan una variabilidad temporal en las subcuencas IC-1035 e IC-1036. Por otro lado, las concentraciones de  $NO_3^-$  muestran niveles promedio y medianos de oligotrofia en ambas subcuencas, con valores extremos que alcanzan el estado eutrófico.

Otra área con puntos de operación de ESSAL es la subcuenca IC-1031, donde las muestras de  $PO_4^{3-}$  se concentran en el estado eutrófico con un valor mediano en hipertrofia, mientras que los nitratos tienen una media y una mediana en el límite superior de la mesotrofia; en consecuencia, ~50% de las muestras (21 observaciones) registran concentraciones



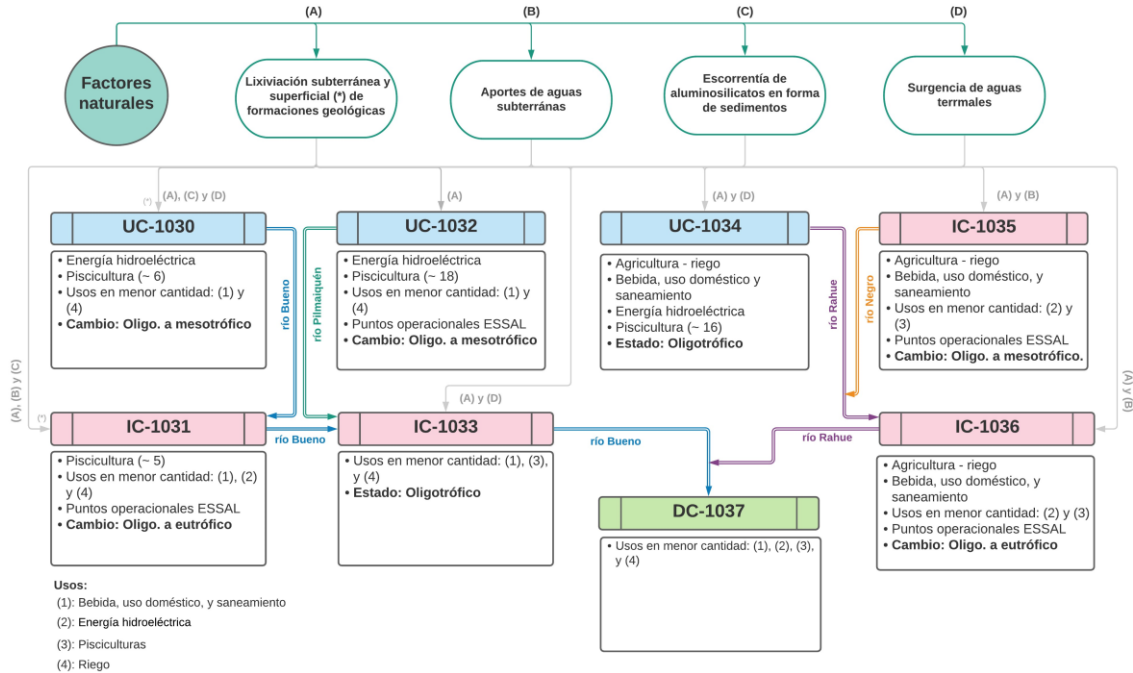
indicativas de ríos eutróficos a hipertróficos. Las demás subcuencas muestran un comportamiento similar en las concentraciones promedio y medianas de  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , donde los valores extremos pueden identificar descargas puntuales o errores en la medición de muestreo. Asimismo, las concentraciones más elevadas pueden deberse al uso excesivo de fertilizantes, la filtración de aguas residuales u otros desechos orgánicos en las aguas superficiales y subterráneas.



**Figura 3.** Nutrientes ( $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ) en el río Bueno. Donde las regiones difuminadas representan los límites del estado trófico de un río (MMA, 2017), con azul: oligotrófico, verde: mesotrófico, amarillo: eutrófico y rojo: hipereutrófico. Luego, los límites son 0.001, 0.01, 0.03 y 0.1 mg/L para  $\text{PO}_4^{3-}$  y 0.001, 0.35, 0.65 y 1.2 mg/L para  $\text{NO}_3^-$ , respectivamente.

Luego, la Figura 4 muestra las relaciones entre los efluentes y los ríos tributarios, indicando los factores naturales incidentes en la calidad del agua y los principales usos del agua de las subcuencas. Además, se presentan los cambios tróficos según los resultados de la caracterización química (DGA, 2011; Zelada, 2017). A partir del diagrama, postulamos que el principal problema de contaminación en la cuenca del río Bueno son las altas

concentraciones de nutrientes provenientes de las descargas de pisciculturas y plantas de tratamiento. Además, las actividades agrícolas y los servicios sanitarios comprometen la calidad del agua destinada a usos prioritarios, como la captación de agua para consumo humano y uso doméstico.



**Figura 4.** Factores naturales, usos del agua y estado trófico de los ríos de las subcuencas del río Bueno. La construcción del diagrama considera la información del presente documento y, aquella consultada en DGA (2004), *Consulta DGA, diciembre 2020*, y *Snifa-Catastro de Unidades Fiscalizables, mayo 2020*.

En consecuencia, la calidad del agua superficial en las subcuencas del río Bueno es buena según las clases de calidad de (CONAMA, 2003). Sin embargo, las actividades agropecuarias y servicios sanitarios debido a las descargas de nutrientes comprometen la calidad del agua destinada a usos prioritarios (e.g., captación para bebida y uso doméstico).

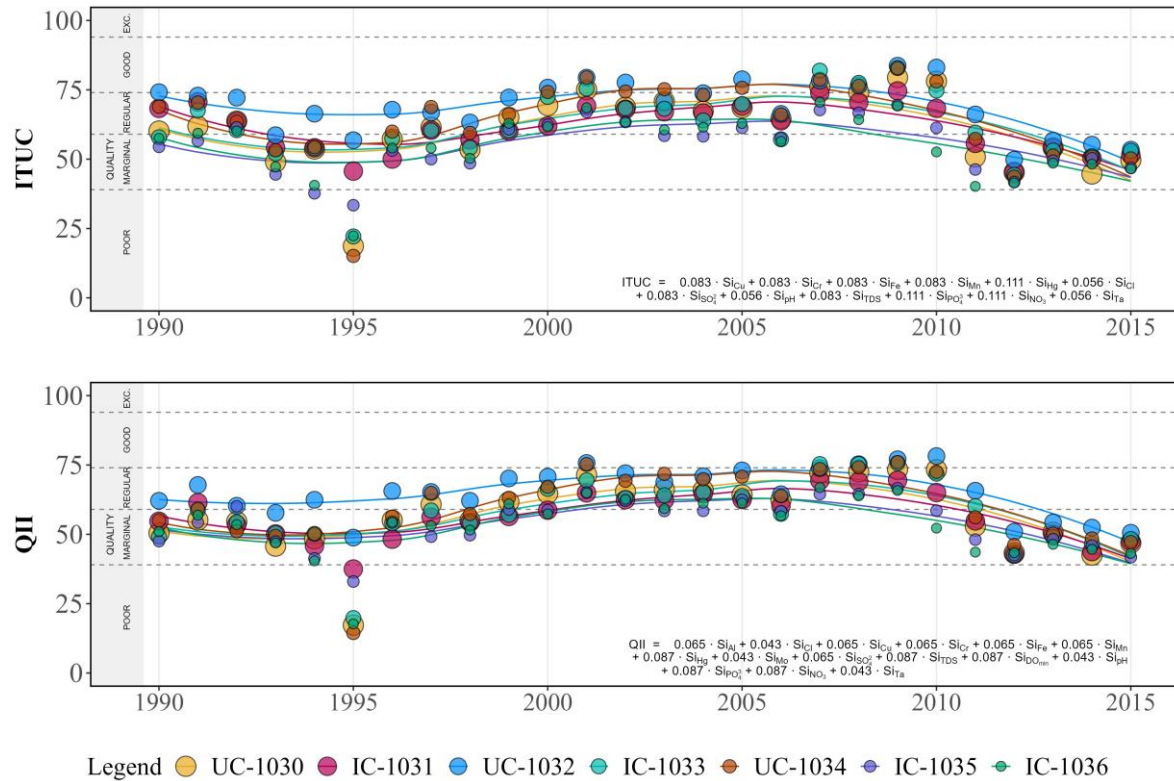
Concerniente a la potabilización del agua, los ríos son aptos para dicha actividad con el tratamiento apropiado. La mayoría de los parámetros químicos son clasificados en clase excepcional, sin embargo, el B, Hg, Al, Cu, y Mo, se clasifican en clase 2, 3 o 4.

#### 4.2. Uso y desarrollo de WQI

El Índice para el tratamiento de uso y consumo del agua potable (ITUC, Figura 5 - panel superior) muestra una tendencia de calidad del agua marginal a regular. Las subcuencas cordilleranas UC-1032 y UC-1034 presentan la mejor calidad de agua para el tratamiento de agua potable. Por otro lado, las subcuencas intermedias IC-1035 e IC-1036 (ambas con

descargas de ESSAL) muestran la calidad más baja para el mismo propósito en comparación con las demás subcuencas.

El Índice de Calidad para Riego (QII, Figura 5 - panel inferior) muestra una calidad del agua regular para el recurso destinado al uso agrícola. La evaluación del QII ratifica que las subcuencas cordilleras (UC-1032 y UC-1034) son las que tienen la mejor calidad del agua superficial en la cuenca del río Bueno.



**Figura 5.** Índices de calidad del agua durante 1990-2015. [panel superior] Índice para el Tratamiento de Agua Potable (ITUC), [panel inferior] Índice de Calidad para Riego (QII).

Los índices muestran una variación de 13 puntos en promedio en la cuenca, y los resultados de cada subcuenca varían en cinco puntos en promedio. El análisis por estación indica que el otoño es la temporada con los mejores niveles de calidad del agua, con buena calidad durante 2000/2009. Los resultados en las otras estaciones se encuentran por encima del límite inferior de buena calidad del agua (por ejemplo, el invierno en 2009/2010 y la primavera en 2002). Sin embargo, la clasificación del promedio y la mediana se sitúa en las clases marginales y regulares. Los resultados de verano están condicionados por los registros escasos, lo que limita la interpretación de los resultados.

## 5. CONCLUSIONES

Los análisis químicos de los ríos muestran bajas conductividades específicas (por lo tanto, bajas concentraciones de sólidos suspendidos) y valores de pH en el rango óptimo, según

NCh409 y NCh1333. Sin embargo, el boro, el mercurio, el aluminio, el cobre y el molibdeno presentan altas concentraciones y se clasifican en las clases de calidad 2 a 4. Además, los nutrientes indican cambios de estados de oligotrofia a mesotrofia en los ríos.

En relación con los resultados del Índice de Calidad del Agua (WQI), estos sugieren una calidad de agua regular en los ríos Negro, Rahue, Pilmaiquén y Bueno para fines de purificación de agua potable y su posterior uso/consumo como agua potable y en actividades agrícolas. Sin embargo, estas interpretaciones están condicionadas a la selección de los parámetros químicos y la escasa disponibilidad de información.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte del “Estudio de los efectos e impactos del cambio climático mediante índice hidrológicos evaluados en eventos extremos en la cuenca del río Bueno, Chile”, trabajo parcialmente financiado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

## REFERENCIAS

- ATSDR. (2010). Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Boron. *GA: U.S. Department of Health and Human Services, Publi Health Service.*
- Banda, T. D., & Kumarasamy, M. (2020). Development of a universal water quality index (UWQI) for South African river catchments. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/W12061534>
- Biswas, A. K. (2004). Integrated Water Resources Management: A Reassessment. *Water International*, 29(2), 248–256. <https://doi.org/10.1080/02508060408691775>
- Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water SA*, 33(1), 101–106. <https://doi.org/10.4314/wsa.v33i1.47882>
- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 22, Issue 2). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- CNE. (2020). Información de centrales hidroeléctricas de IDE Energía. *Ministerio de Energía.*
- CONAMA. (2003). Instructivo Presidencial para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Aguas Marinas. In *Comisión Nacional del Medio Ambiente, Dirección Ejecutiva.*
- Cude, C. G. (2001). Oregon Water Quality Index a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 125–137. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05480.x>
- DGA. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos

- de calidad: cuenca del río Bueno. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado Por: CADE-IDEPE*, 147.
- DGA. (2011). Antecedentes para Evaluar el Impacto Económico y Social de una Norma Secundaria de Calidad de Aguas en el Lago Ranco, Cuenca del Río Bueno. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado Por: Universidad Austral de Chile*.
- DOH. (2019). Agua Potable Rural. *Superintendencia de Servicios Sanitarios*.
- INN. (1987). Norma chilena (NCh) 1333. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos. *División de Normas Del Instituto Nacional de Normalización*, 15. <https://five.epicollect.net/>
- INN. (2005). NCh409/1.Of84 Agua potable - Parte 1: Requisitos. *División de Normas Del Instituto Nacional de Normalización*, 13. <https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh409.pdf>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021 The Physical Science Basis Summary for Policymakers Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
- IPCC. (2022). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In *Global Warming of 1.5°C*. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- Jerez Toledo, C. (2021). *Estudio de los efectos e impactos del cambio climático mediante índices hidrológicos evaluados en eventos extremos en la cuenca del Río Bueno, Chile* [University of Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183991>
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., & Bourrié, G. (2019). Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. *Water*, 11(2), 361. <https://doi.org/10.3390/w11020361>
- MMA. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en aguas continentales y marinas*. 1–102.
- Pandey, G., & Madhuri, S. (2014). Heavy Metals Causing Toxicity in Fishes. *Physics: Conference Series*, 6, 1294.
- Proyecto-FIPA-2016-19. (2017). *Levantamiento de información de pisciculturas en Chile y su incorporación a la IDE de la División de Acuicultura*. 109.
- Sneha Shankar Phadataré, & Prof. Sagar Gawande. (2016). Review Paper on Development of Water Quality Index. *International Journal of Engineering Research And*, V5(05). <https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS050993>
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(1), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2020). Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
- UChile. (2016). *Estudio de cuencas: Análisis de las condicionantes para el desarrollo hidroeléctrico en las cuencas de los ríos Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo y Yelcho, desde el potencial de generación a las dinámicas socio-ambientales*. 796.
- WHO. (2005). Mercury in Drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. *World Health Organization*.
- WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition*.
- Zelada, S. (2017). Antecedentes y Marco conceptual para una gestión sostenible de la calidad del agua en la Cuenca del Río Bueno, X Región de Los Lagos. Chile. *Sustainability*,

*Agri, Food and Environmental Research*, 5(3), 27–40.

### **ACERCA DE LAS AUTORAS**

**Catalina Jerez Toledo** es Ingeniera Civil, Magíster en Ciencias mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Actualmente es Investigadora Asociada en el Centro Avanzado de Tecnología Minera (AMTC), donde su enfoque de estudio contempla el impacto del cambio climático en eventos hidrometeorológicos extremos y la disponibilidad de recursos hídricos.

**Ximena Vargas Mesa** es Ingeniera Civil de la Universidad de Chile, desde 1975 ha sido académica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la casa de Bello. Fue la primera mujer directora del Departamento de Ingeniería Civil, cargo que ejerció en dos ocasiones, y ha sido Jefe Docente de la misma unidad.

## EVALUACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE DATOS CR2MET Y SIMULACIÓN WRF CON CONVECCIÓN EXPLÍCITA EN CHILE CONTINENTAL

SOFÍA SEGOVIA ESCAFI<sup>1</sup>, PABLO MENDOZA<sup>2</sup>, MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA<sup>3</sup>,  
LUCÍA SCAFF<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Estudiante Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile.

[sofia.segovia@ug.uchile.cl](mailto:sofia.segovia@ug.uchile.cl)

<sup>2</sup>Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

[pamendoz@uchile.cl](mailto:pamendoz@uchile.cl)

ORCID: 0000-0002-0263-9698

<sup>3</sup>Investigador Asociado del Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile y tesista doctoral Center for Climate and Resilience Research

[mlagosz@uchile.cl](mailto:mlagosz@uchile.cl)

ORCID: 0000-0002-8787-598X

<sup>4</sup>Profesora Asistente, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

[mscaff@udec.cl](mailto:mscaff@udec.cl)

ORCID: 0000-0002-6481-2652

### RESUMEN

El presente trabajo evalúa la calidad de las simulaciones de precipitación y temperatura generadas por un modelo atmosférico de alta resolución forzado por el reanálisis ERA-5, en Chile continental, comparando su desempeño con el producto meteorológico grillado CR2MET, para el periodo entre 2001 y 2019. Se evalúan montos diarios y trimensuales utilizando estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC), comparando la eficiencia modificada de Kling-Gupta (KGE'). Además, se evalúan índices categóricos derivados de tablas de contingencia para comparar la habilidad predictiva de las series de precipitación del modelo y de CR2MET. Los resultados indican que, las series meteorológicas a nivel de estación de CR2MET exhiben valores superiores de KGE' en comparación con el modelo, destacándose en las macrozonas de Chile Central y Sur. Asimismo, en lo que respecta a la capacidad para representar la ocurrencia y los montos de eventos de precipitación diaria, las series de CR2MET demuestran métricas superiores en comparación con el modelo.

**Palabras claves:** Modelo climático a escala convectiva, WRF-SA, CR2MET, precipitación, temperatura.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En Chile continental, la distribución espacio-temporal de mediciones in situ resulta insuficiente para lograr una caracterización detallada de la meteorología del país (DGA, 2017), por lo cual se ha explorado el uso de productos grillados derivados de modelos estadísticos, dinámicos y satelitales (e.g., Baez-Villanueva et al., 2020; Schumacher et al., 2020; Zambrano et al., 2017). No obstante, el diagnóstico de las fortalezas y limitaciones de estos productos es crítico para su posterior uso (Schumacher et al., 2020).

Un producto meteorológico de gran alcance en Chile es CR2MET (Boisier et al., 2018), que provee estimaciones de precipitación y temperatura a una resolución horizontal de 0.05°, basadas en observaciones y el reanálisis del ECMWF: ERA5 (Hersbach et al., 2020). La versión más reciente (V 2.5) abarca registros desde el año 1960 hasta el 2021. En las zonas con una baja o nula densidad de estaciones meteorológicas, ERA5 adquiere relevancia en el producto CR2MET. Sin embargo, ERA5 presenta deficiencias para replicar la meteorología a escala diaria en áreas de topografía compleja y condiciones climáticas altamente variables (Amjad et al., 2020), por lo que es importante explorar nuevas alternativas para caracterizar la meteorología en Chile continental.

Con el fin de potenciar herramientas para estudios hidrológicos, el grupo *South America Affinity Group* (SAAG), liderado por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR, USA), generó simulaciones meteorológicas que resuelven explícitamente la convección atmosférica con una resolución horizontal de 4 km para Sudamérica durante el periodo 2000-2021. Esta simulación se realizó mediante el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF; Skamarock et al., 2008), forzado por el reanálisis ERA-5; en adelante WRF-SA (Dominguez et al., 2023). La alta resolución horizontal de estas simulaciones ofrece nuevas oportunidades para caracterizar la meteorología en Chile continental. En particular, por su capacidad de resolver explícitamente procesos de precipitación convectiva y su mayor resolución de la topografía, a diferencia de los reanálisis atmosféricos. De este modo, se hace necesaria una evaluación y diagnóstico de esta base de datos previo a su utilización.

Este estudio tiene como objetivos evaluar las simulaciones de precipitación y temperatura generadas por WRF-SA, y comparar su desempeño en comparación al producto CR2MET, tomando como referencia mediciones in situ. Se utilizan mediciones in situ de estaciones meteorológicas, analizando la calidad de la variabilidad espacial de las simulaciones en diferentes agregaciones temporales. Asimismo, se examinará la capacidad de ambos productos para replicar eventos de precipitación.

## 2. DOMINIO, DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

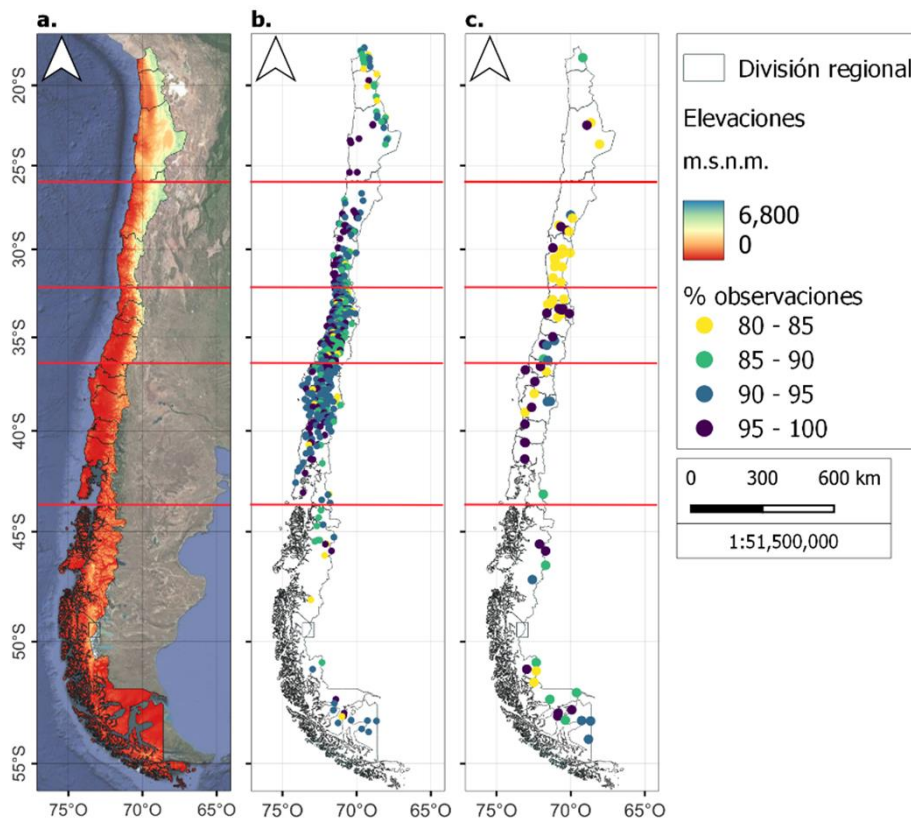
El área de estudio corresponde a Chile continental (Figura 1), que se extiende entre los 17°29'S y 55°58'S (más de 4.200 km), desde la costa del océano Pacífico hasta la cordillera



de los Andes, con un ancho máximo y mínimo de 445 y 90 km, respectivamente. A lo largo de este dominio, se distinguen cuatro principales unidades geográficas, de oeste a este: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes. Por otro lado, Chile continental presenta una gran variedad de climas. Al norte del país existen condiciones áridas, caracterizadas por bajas precipitaciones y altas temperaturas a lo largo del año, pero con influencias del invierno altiplánico en el sector cordillerano, lo que provoca lluvias de verano. La zona central se caracteriza por un clima templado con lluvias concentradas en invierno, mientras que el sur del país se caracteriza por climas más fríos y lluviosos (Aceituno et al. 2021).

## 2.2 Estaciones meteorológicas

En este estudio, se utilizan datos de estaciones de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima ubicadas en el territorio de Chile continental, pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Se seleccionaron 473 estaciones pluviométricas y 70 estaciones con mediciones de temperatura por contar con un mínimo del 80% de registros diarios durante el periodo comprendido entre abril de 2001 y marzo de 2020, tras someterse a un proceso de control de calidad. La temperatura media diaria fue estimada como el promedio entre las temperaturas máximas y mínimas registradas.



**Figura 1:** (a) Elevaciones en Chile continental (Rabus et al., 2003); (b) porcentaje de observaciones de estaciones de precipitación seleccionadas; (c) porcentaje de observaciones de estaciones de temperatura seleccionadas. El periodo de referencia utilizado es abril/2001 - marzo/2020.

### 2.3 Metodología de comparación

Para cada estación meteorológica, se obtienen las respectivas series de precipitación y temperatura de WRF-SA y CR2MET, para el mismo periodo en el punto de grilla que contiene la estación, siguiendo la metodología punto a píxel propuesta por Thiemig et al. (2012). Se comparan las observaciones y simulaciones de las variables meteorológicas para agregaciones temporales diarias y estacionales. Estas últimas se calcularon a partir de agregaciones mensuales obtenidas de aquellos meses con al menos 28 días de registros diarios.

Los análisis se realizaron por macrozonas, siguiendo la clasificación de la DGA (2016) adaptada por Zambrano-Bigiarini et al. (2017): Extremo Norte (17.50 – 26.00°S); Norte (25.00 – 32.18°S); Chile Central (32.18 – 36.40°S); Sur (36.40 – 43.70°S) y Austral (43.70 – 56.00°S). La distribución espacial de las estaciones de precipitación y temperatura se muestra en las Figuras 1.b y 1.c. El número de estaciones por macrozona se resume en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Número de estaciones de precipitación y temperatura filtradas por macrozonas.

Macrozona	Precipitación	Temperatura
Extremo Norte	42	4
Norte	78	17
Chile Central	181	18
Sur	143	14
Austral	29	17

Para evaluar el ajuste de las simulaciones de precipitación y temperatura, se utiliza la eficiencia modificada de Kling-Gupta ( $KGE'$ ; Kling et al., 2012):

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (1)$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o \quad (2)$$

$$\gamma = CV_s / CV_o = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o} \quad (3)$$

donde  $r$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son coeficiente de correlación de Pearson, relación de sesgo y relación de variabilidad, respectivamente.  $CV$ ,  $\sigma$  y  $\mu$  corresponden al coeficiente de variación (adimensional), desviación estándar (mm o °C) y media (mm o °C), respectivamente, y los subíndices s y o indican series simuladas y observadas, respectivamente. Los valores  $KGE'$ ,  $r$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son adimensionales y su valor óptimo es 1.

Para evaluar la capacidad de simular eventos de precipitación de distinta magnitud, se utilizaron métricas derivadas de tablas de contingencia de 2x2 (ver Tabla 2) utilizando la clasificación de eventos de precipitación de la Tabla 3, propuesta por Zambrano-Bigiarini et al. (2017).

**Tabla 2:** Tabla de contingencia utilizada para evaluar la capacidad predictiva de ocurrencia de precipitación de CR2MET y WRF-SA

		Observado	
		Evento ocurre	Evento no ocurre
Simulado	Evento ocurre	H	F
	Evento no ocurre	M	CN

H, M, F y CN representan el número de eventos de precipitación acertados por las simulaciones, eventos no acertados, eventos simulados no observados (falsas alarmas) y eventos de no precipitación acertados, respectivamente. Se define  $N_e$  como el total de simulaciones y  $H_e$  como el número de simulaciones de eventos de precipitación acertados por azar.

**Tabla 3:** Clasificación de eventos de precipitación diaria. Fuente: Zambrano-Bigiarini et al., (2017)

Evento	Intensidad (mm/día)
No precipita	[0,1)
Precipitación ligera	[1,5)
Precipitación moderada	[5,20)
Precipitación fuerte	[20,40)
Precipitación violenta	$\geq 40$

A partir de las tablas de contingencia, se calculan el (a) porcentaje correcto (PC, por sus siglas en inglés, Ec. 4) que representa la fracción de simulaciones correctas respecto al total de simulaciones; (b) probabilidad de detección (POD, por sus siglas en inglés, Ec. 5) que indica la fracción de eventos acertados de las simulaciones respecto al total de eventos observados; (c) tasa de falsa alarma (FAR, por sus siglas en inglés, Ec. 6), que indica la fracción falsas alarmas respecto al número de eventos de precipitación simulados; y (d) puntuación de amenaza equitativa o Gilbert Skill Score (GSS, Ec. 7) que representa la fracción de aciertos sin considerar aquellos por azar.

$$PC = \frac{H + CN}{N_e} \quad (4) \qquad GSS = \frac{H - H_e}{(H + F + M) - H_e} \quad (7)$$

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (5) \qquad N_e = H + M + F + CN \quad (8)$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (6) \qquad H_e = \frac{(H + M) \cdot (H + F)}{N_e} \quad (9)$$

PC, POD y FAR pueden tomar valores entre 0 y 1, mientras que GSS se encuentra en el rango -1/3 a 1. El valor óptimo de todos los índices es 1, a excepción de FAR cuyo óptimo es 0.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Eficiencia de las simulaciones de precipitación

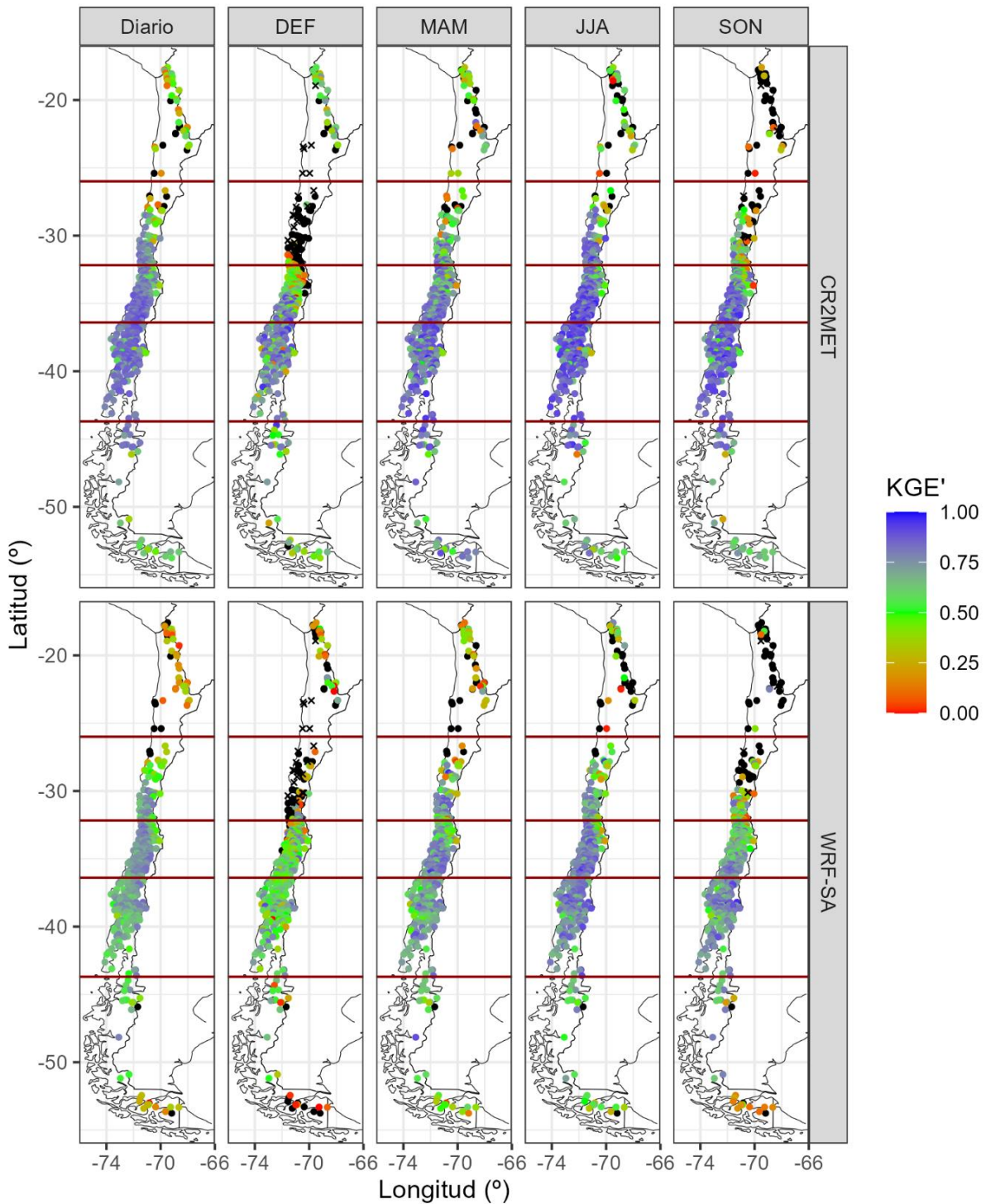
La Figura 2 presenta los resultados de KGE' de las series de precipitación extraídas de CR2MET y las simulaciones WRF-SA para las estaciones seleccionadas. Se destaca que los máximos de KGE' para ambas fuentes de datos se concentran en las macrozonas de Chile Central y Sur, disminuyendo hacia latitudes más alejadas. En términos generales, las series de CR2MET exhiben, en promedio, valores superiores de KGE' en comparación con las obtenidas de WRF-SA, con la excepción del verano en las macrozonas de Extremo Norte (CR2MET: -0.17, WRF-SA: -0.11), Norte (CR2MET: -6.51, WRF-SA: -4.30) y Chile Central (CR2MET: 0.16, WRF-SA: 0.41), así como en otoño en el Norte (CR2MET: 0.56, WRF-SA: 0.57).

En el caso de la macrozona Extremo Norte, para agregaciones temporales diarias y trimensuales, se observa que el promedio de KGE' de las series CR2MET y WRF-SA en las estaciones varía entre -19 y 0.19. Además, las desviaciones estándar superan el doble de sus respectivas medias, evidenciando una considerable dispersión espacial en el rendimiento de las series simuladas en esta zona.

En la zona Norte, para las agregaciones diarias, otoño e invierno, el KGE' promedio varía entre 0.52 y 0.65, con desviaciones estándar superiores a 0.31 para las series de CR2MET y WRF-SA. En contraste, en verano y primavera, las series en promedio no superan 0.02 de eficiencia.

En Chile Central, la media de KGE' para las agregaciones temporales evaluadas, a excepción del verano, varía entre 0.64 y 0.81, con la eficiencia de las series de CR2MET siendo mayor a las de WRF-SA por, a lo más, 0.07. De manera similar, en la macrozona Sur, la eficiencia KGE' de las agregaciones temporales evaluadas varía entre 0.58 y 0.84, con las medias de KGE' de CR2MET superiores a las de WRF-SA, por no más de 0.14.

En la macrozona Austral, los promedios de KGE' de las series de precipitación de CR2MET de cada macrozona fluctúan entre 0.54 y 0.73, mientras que las series de WRF-SA presentan medias menores o iguales a 0.47. En ambos casos, los valores mínimos se registran durante la temporada de verano.



**Figura 2:** Eficiencia modificada de Kling–Gupta ( $KGE'$ ) para la precipitación de CR2MET y WRF-SA en Chile continental, para agregaciones diarias, trimestrales. Los puntos negros representan valores de  $KGE'$  negativos. X negras indican estaciones donde  $KGE'$  no se calcula debido a que los valores de las series observadas son nulos. Las líneas horizontales representan división de macrozonas.

### 3.2 Eficiencia de las simulaciones de temperatura

Los resultados de las series de temperatura extraídas de CR2MET y las simulaciones de WRF-SA en distintas macrozonas y escalas temporales de Chile (Figura 3), presentan consistentemente que el conjunto de datos CR2MET supera en rendimiento a las simulaciones proporcionadas por WRF-SA, en términos de la eficiencia modificada de Kling-Gupta (KGE'). No obstante, se destaca que se obtiene lo contrario en el Extremo Norte en verano (CR2MET: 0.28, WRF-SA: 0.38) y primavera (CR2MET: 0.64, WRF-SA: 0.68).

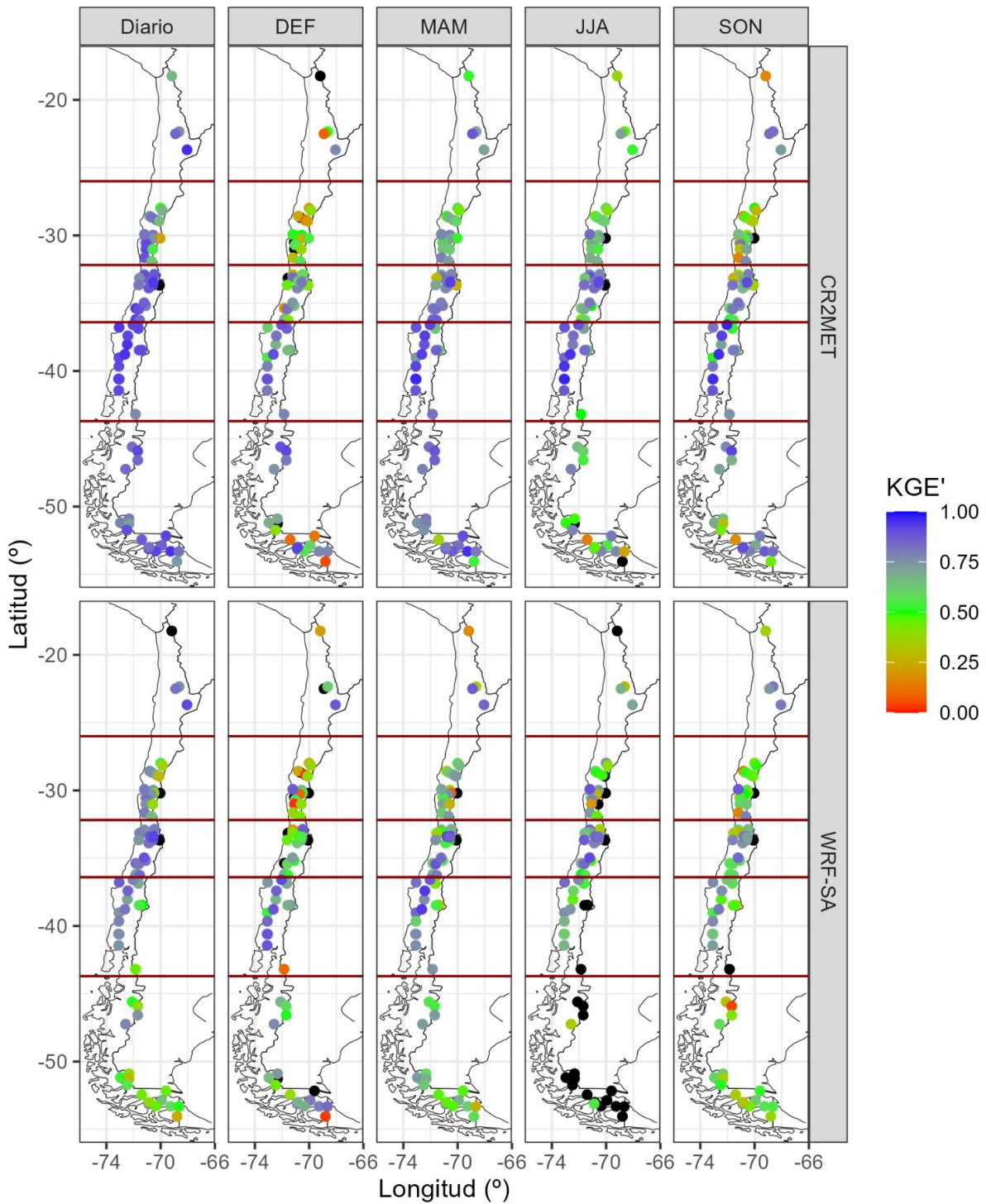
En el Extremo Norte, el rendimiento de las series de temperatura CR2MET y WRF-SA varía según la escala temporal. A escalas diarias y trimestrales de otoño y primavera, se obtienen, en promedio, índices KGE' superiores a 0.56 para ambas fuentes de datos. Sin embargo, en invierno, CR2MET destaca con un KGE' promedio de 0.52, superando a WRF-SA con -0.66. Es importante señalar que, en esta macrozona, todas las medias presentan una considerable dispersión, fluctuando la desviación estándar entre 0.12 y 2.42, debido al reducido número de estaciones evaluadas.

En la macrozona Norte, tanto CR2MET como WRF-SA encuentran dificultades para replicar la temperatura en verano, invierno y primavera, con valores de KGE' promedio que no superan los 0.44. En contraste, en las agregaciones diarias y de otoño, CR2MET muestra un rendimiento más destacado, obteniendo valores medios de KGE' de 0.73 y 0.65, respectivamente, casi duplicando la eficiencia de WRF-SA.

En Chile Central, la temperatura de CR2MET en las estaciones exhibe eficiencias de KGE' superiores o iguales a 0.58 para todas las agregaciones temporales evaluadas. En contraste, WRF-SA presenta KGE' superiores a 0.45 en todas las estaciones, a excepción de la primavera, donde la media de KGE' en las estaciones es de -0.33.

En la macrozona Sur, la temperatura de CR2MET exhibe eficiencias más consistentes, con valores de KGE' promedios mayores o iguales a 0.77, alcanzando su máximo rendimiento a escala diaria con un valor de 0.91. Por otro lado, las series de WRF-SA presentan eficiencias que varían entre 0.72 y 0.73 en agregaciones diarias, de verano y primavera. Sin embargo, en las series de otoño y primavera, las eficiencias disminuyen a 0.29 y 0.57, respectivamente.

La temperatura de CR2MET en las estaciones de la macrozona Austral presenta valores medios de KGE' que oscilan entre 0.44 y 0.85. En particular, las eficiencias más altas se registran en escalas diarias y de otoño. Por otro lado, de las series de WRF-SA se obtienen KGE' entre 0.47 y 0.59, a excepción de la serie trimensual de invierno, donde el promedio de KGE' en las estaciones es -26.45, con una desviación estándar de 92.29.



**Figura 3:** Eficiencia modificada de Kling–Gupta ( $KGE'$ ) para la temperatura de CR2MET y WRF-SA en Chile continental, para agregaciones diarias, trimestrales. Los puntos negros representan valores de  $KGE'$  negativos. X negras indican estaciones donde  $KGE'$  no se calcula debido a que los valores de las series observadas son nulos. Las líneas horizontales representan división de macrozonas.



### 3.3 Simulación de eventos de precipitación diaria

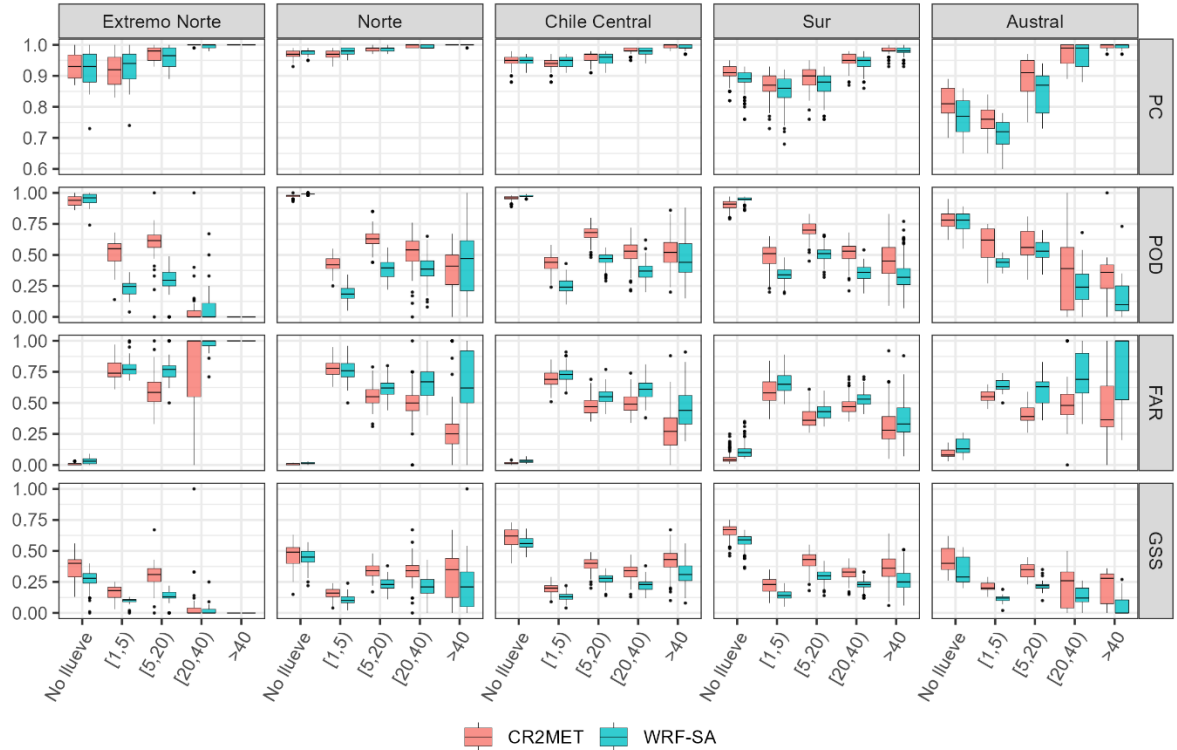
La Figura 6 exhibe un aumento en el porcentaje correcto (PC) en todas las macrozonas a medida que la magnitud de los eventos de precipitación aumenta. De hecho, la mediana del PC es igual o superior a 0.98 para eventos de precipitación diaria de más de 20 mm en todas las macrozonas. En contraste, los valores mínimos de PC se centran en eventos que no superan los 5 mm de precipitación diaria, con medianas que oscilan entre 0.72 y 0.81 para ambas fuentes de datos. Es notable destacar que las mayores discrepancias de PC entre las series de CR2MET y WRF-SA se observan en eventos de precipitación menores a 5 mm en las estaciones de la macrozona Austral, donde las medianas de CR2MET superan las de WRF-SA en 0.4 unidades.

En relación con la Probabilidad de Detección (POD), se observa que los valores máximos se alcanzan en eventos de no precipitación, donde las series extraídas de CR2MET y las simuladas por WRF-SA presentan medianas que difieren en menos de 0.05 unidades. En segundo lugar, se registran los mayores valores de POD para eventos de precipitación entre 5 a 20 mm en las series de CR2MET, con medianas que oscilan entre 0.62 y 0.7. Sin embargo, tanto para las series de CR2MET como para las de WRF-SA, se destaca la dificultad en la representación de eventos de precipitación diaria superiores a 20 mm en la macrozona Extremo Norte, con medianas que alcanzan valores nulos. Este patrón sugiere un desafío particular en la simulación de eventos de alta intensidad en dicha zona.

Respecto a la tasa de falta alarma (FAR), en términos generales, CR2MET presenta medianas y rangos intercuantiles de FAR menores que WRF-SA. En el caso de eventos sin precipitación, se observa que la mediana de la tasa de falsa alarma (FAR) es igual o inferior a 0.13 en todas las macrozonas, el rendimiento más destacado de los eventos evaluados, tanto para las series de CR2MET como para las de WRF-SA. Por otro lado, es particularmente notable que, en el Extremo Norte, tanto CR2MET como WRF-SA tienen dificultad en reproducir eventos de precipitación de intensidad superior a 20 mm ( $FAR \approx 1$ ).

Finalmente, mediana GSS para todas las agregaciones temporales y espaciales evaluadas no superan 0,67, con los mejores resultados para eventos de no precipitación. CR2MET supera en promedio los valores de GSS obtenidos con WRF-SA, a pesar de tener una mayor dispersión. Para las series de precipitación evaluadas los resultados son menores en comparación a lo observados para POD, ya que no se consideran aquellos aciertos por azar, y demuestran la dificultad del producto para replicar eventos para las clasificaciones evaluadas de precipitación en todo el dominio.





**Figura 3:** Evaluación de precipitación diaria de WRF-SA y CR2MET mediante porcentaje correcto (PC), probabilidad de detección (POD), tasa de falsa alarma (FAR) y Gilbert Skill Score (GSS).

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se evaluaron las series de precipitación y temperatura de WRF-SA y CR2MET en Chile Continental, utilizando registros de estaciones de la DGA y la DMC. En particular, se examinó la habilidad de dichos productos para replicar eventos de precipitación entre abril de 2001 y marzo de 2020. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que:

- El análisis de las simulaciones de precipitación en Chile revela una variabilidad en la eficiencia de las series de CR2MET y WRF-SA. Las macrozonas de Chile Central y Sur exhiben consistentemente un mejor rendimiento, mientras que en el Extremo Norte hay una dispersión espacial considerable y un rendimiento deficiente durante el verano. Se observan diferencias estacionales marcadas, y las series de CR2MET tienden a mostrar una eficiencia superior en comparación con WRF-SA.
- El análisis de las series de temperatura revela que, en términos de la eficiencia modificada de Kling-Gupta (KGE'), el conjunto de datos CR2MET supera consistentemente a las simulaciones proporcionadas por WRF-SA. Aunque se observan excepciones en el Extremo Norte durante las estaciones de verano y primavera, donde WRF-SA muestra un rendimiento ligeramente superior.
- Al evaluar los eventos de precipitación diaria en Chile, se encuentra que el rendimiento varía con la magnitud de los eventos para cada métrica. En general se

observa CR2MET tiene mejores métricas de desempeño que WRF-SA, pero ambas fuentes presentan desafíos, particularmente en el Extremo Norte para eventos de precipitación violenta.

Estas evaluaciones se realizaron comparando las series simuladas con datos observados de estaciones meteorológicas. A pesar de la aplicación de un control de calidad a estas estaciones, es crucial destacar que CR2MET se basa en datos provenientes de estaciones, lo que contribuye a su mejor rendimiento en esos puntos específicos. En consecuencia, resulta imperativo extender esta evaluación a áreas sin control meteorológico para obtener una visión más completa de la capacidad de CR2MET y WRF-SA.

## REFERENCIAS

- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Climate and weather in Chile. In *Water Resources of Chile* (pp. 7–29).
- Amjad, M., Yilmaz, M. T., Yucel, I., & Yilmaz, K. K. (2020). Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *Journal of Hydrology*, 584. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H. E., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., Giraldo-Osorio, J. D., & Xuan Tinh, N. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111606>
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., and Rondanelli, R., “CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile”, p. 19739, 2018.
- DGA (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Dominguez, F., Rasmussen, R., Liu, C., Ikeda, K., Prein, A., Varble, A., Arias, P. A., Bacmeister, J., Bettolli, M. L., Callaghan, P., Carvalho, L. M. V., Castro, C. L., Chen, F., Chug, D., Chun, K. P. (Sun), Dai, A., Danaila, L., Rocha, R. P. da, Nascimento, E. de L., ... Schneider, T. (2023). Advancing South American Water and Climate Science Through Multi-Decadal Convection-Permitting Modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/bams-d-22-0226.1>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., & Bamler, R. (2003). The shuttle radar topography mission - A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4), 241–262. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7)
- Schumacher, V., Justino, F., Fernández, A., Meseguer-Ruiz, O., Sarricolea, P., Comin, A., Peroni Venancio, L., & Althoff, D. (2020). Comparison between observations and gridded data sets over complex terrain in the Chilean Andes: Precipitation and temperature. *International Journal of Climatology*, 40(12), 5266–5288. <https://doi.org/10.1002/joc.6518>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., Levizzani, V., & De Roo, A. (2012). Validation of satellite-based precipitation products over sparsely Gauged African River basins. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1760–1783. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-032.1>
- Zambrano, F., Wardlow, B., Tadesse, T., Lillo-Saavedra, M., & Lagos, O. (2017). Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmospheric Research*, 186, 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.006>
- Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., & Ribbe, L. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 1295–1320. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>

## ACERCA DE LOS AUTORES

**Sofía Segovia Escafi** es tesista de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Su trabajo de título está enfocado en la evaluación de simulaciones de precipitación y temperatura de WRF-SA y su potencial para modelación hidrológica en Chile continental.

**Pablo Mendoza Zúñiga** es Ingeniero Civil, Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile, Ph.D. por la Universidad de Colorado, Boulder. Es Profesor Asociado de la Universidad de Chile y académico del Departamento de Ingeniería Civil e Investigador Asociado del Advanced Mining Technology Center. Con 15 años de experiencia en modelación hidrológica, cambio climático, pronóstico de caudales, hidroclimatología y criósfera.

**Miguel Lagos Zúñiga** es Ingeniero Civil, MSc. y candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería, mención Fluidodinámica de la Universidad de Chile. Se desempeña como Investigador asociado del AMTC y es tesista doctoral del CR2. Se especializa en estudio de eventos extremos de precipitación y cambio climático.

**Lucía Scaff** es Ingeniera Civil, Magíster en Meteorología y Climatología de la Universidad de Chile, PhD de la Universidad de Saskatchewan, Canadá. Es Profesora Asistente de la Universidad de Concepción. Se especializa en la investigación en hidrometeorología de montaña, con énfasis en el entendimiento de los procesos de formación e intensificación de la precipitación.

## HIDRO-GRAFÍA

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

La Hidro-Grafía de este número resultará fácil de responder para quienes asistieron al XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica que este año se desarrolló en Valdivia.



La imagen corresponde a una página del libro *Ortus Sanitatis*, publicado en 1491, en la que se muestra un dibujo coloreado del muérdago. ¿Cuál es la relación que existe entre el muérdago y la mecánica de fluidos?

- Los frutos del muérdago fueron utilizados como trazadores por Leonardo da Vinci en sus experimentos de visualización de flujos de fluidos.
- La planta está relacionada etimológicamente con los fluidos viscosos.
- El destilado de la pulpa de la semilla del muérdago fue utilizado en los experimentos de Poiseuille, Dubuat, Stokes y otros para confirmar la condición de no-deslizamiento en flujos con fronteras sólidas.

## NÚMERO ANTERIOR

La respuesta correcta a la HIDRO-GRAFÍA del número anterior es la alternativa b) Es un sistema de propulsión que aprovecha la velocidad del viento.

Corresponde a la aplicación del efecto Magnus para generar un mecanismo de propulsión a las embarcaciones. El efecto Magnus es una fuerza que actúa sobre un cuerpo que gira inmerso en un flujo, lo que produce una fuerza perpendicular tanto a la dirección de la corriente de aire como al eje del rotor. La primera aplicación práctica la realizó el ingeniero alemán Anton Flettner en 1924 en un proyecto en el que también participaron Albert Betz, Jakob Ackeret y Ludwig Prandtl. Un registro de 1925 se encuentra en <http://www.thiink.com/flettner-rotor-test/> Rápidamente siguieron otras iniciativas, la última en octubre de 2023, cuando Airbus anunció que había comisionado seis barcos con rotores Flettner para entrar en servicio en 2026.





## **INVITACION A CONTRIBUIR CON ARTÍCULOS**

La Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica invita a contribuir con artículos para ser publicados en sus próximos números. Los artículos pueden ser en castellano o inglés.

Los artículos buscan difundir trabajos en el área de interés de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, especialmente aquellos relativos a la hidráulica, hidrología y mecánica de fluidos en general, así como otros aspectos relacionados con el agua, como su uso, gestión, recursos, tecnologías, historia, etc. Los artículos pueden ser de investigación teórica o aplicada, soluciones novedosas a problemas de ingeniería, difusión u otros temas de interés para la comunidad hidráulica nacional.

El formato de presentación de los trabajos puede solicitarse al Editor a la dirección electrónica [atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)







